



Funded by  
the European Union



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

# 6 modulis. Akvakultūros sistemų pasirinkimas atsižvelgiant į pasaulinį atšilimą

**Doc. dr. Dimitris Klaoudatos**  
**Tesalijos universitetas, Graikija**

## Turinys

Ivadas .....	2
1. Pasaulinio atšilimo keliamų iššūkių poveikis akvakultūros sistemoms .....	3
1.1. Šiluminė įtampa ir vandens temperatūros svyravimai .....	3
1.2. Eutrofikacija, hipoksija ir patogenų plitimas .....	3
1.3. Vandenyne rūgštėjimas ir druskingumo pokyčiai .....	4
2. Klimato kaitai atsparių sistemų atrankos kriterijai .....	4
2.1. Atsparumas aplinkos sąlygų pokyčiams .....	4
2.2. Efektyvus energijos ir išteklių naudojimas .....	5
3. Inovatyvios sistemos klimato iššūkiams spręsti .....	7
4. Politiniai, ekonominiai ir socialiniai aspektai .....	8
4.1. Tarptautinis bendradarbiavimas ir vartotojų sąmoningumas .....	9
Santrauka .....	10
Literatūra .....	11



## Įvadas

Pasaulinis atšilimas daro reikšmingą poveikį vandens ekosistemoms ir akvakultūrai, todėl būtina diegti atsparias sistemas, padedančias spręsti tokius iššūkius kaip temperatūros kilimas, deguonies stoka ir didėjantis ligų plitimas. Tvarios akvakultūros praktikos yra itin svarbios šiems poveikiams sušvelninti, o tinkamas sistemos pasirinkimas atlieka svarbų vaidmenį užtikrinant prisitaikymą ir ilgalaikį gyvybingumą. Šiame skyriuje pateikiama išsami klimato kaitos poveikio akvakultūros sistemoms analizė, aptariami inovatyvūs sprendimai ir strategijos, skirtos politikos formuotojams, mokslininkams ir pramonės dalyviams, siekiant skatinti tvarumą šioje srityje. Tyrimai pabrėžia klimato pokyčiams atsparių technologijų, tokių kaip recirkuliacinės akvakultūros sistemos ir integruotos daugiapakopės akvakultūros sistemos, svarbą siekiant padidinti produktyvumą ir sumažinti poveikį aplinkai (Boyd et al., 2022; Handisyde et al., 2017; Froehlich et al., 2018).

Akvakultūra yra vienas sparčiausiai augančių maisto gamybos sektorių pasaulyje, atliekantis svarbų vaidmenį tenkinant augančios žmonijos mitybos poreikius. Tačiau pasaulinio atšilimo poveikis kelia rimtų grėsmių jos tvarumui. Didėjanti pasaulinė temperatūra, vandenynų rūgštėjimas, sūrumo pokyčiai ir patogenų plitimas keičia vandens ekosistemas ir sukuria naujų iššūkių akvakultūros veiklai. Šie aplinkos pokyčiai kelia grėsmę ne tik akvakultūros ekonominiam gyvybingumui, bet ir pasauliniam maisto saugumui bei biologinei įvairovei.

Dėl klimato kaitos didėja šiluminis stresas vandens aplinkose, todėl kinta auginamų rūšių medžiagų apykaita, augimas ir dauginimasis. Boyd ir McNevin (2015) teigia, kad temperatūros svyravimai už optimalaus rūšių diapazono ribų gali padidinti deguonies poreikį, susilpninti imuninę sistemą ir padidinti mirtingumą. Be to, šylantys vandenys sukuria palankias sąlygas KDŽ, kurie gali sumažinti deguonies lygį ir išskirti toksinus, pavojingus vandens organizmams (Diaz & Rosenberg, 2008). Dėl šių reiškinių reikia inovatyvaus požiūrio į akvakultūros sistemų projektavimą ir valdymą.

Vandenynų rūgštėjimas – tiesioginė padidėjusios anglies dioksido (CO<sub>2</sub>) koncentracijos atmosferoje pasekmė – kelia dar vieną rimtą grėsmę. Rūgštus vanduo sumažina karbonato jonų prieinamumą, kurie reikalingi moliuskams ir kitiems organizmams, formuojantiems kiaušius ar skeletus. Cooley ir kt. (2009) tyrimai pabrėžia ekonominę ir ekologinę riziką, susijusią su rūgštėjimu, ypač moliuskų pramonei. Taip pat sūrumo pokyčiai, sukelti tirpstančių ledynų ir pasikeitusio kritulių režimo, trikdo akvakultūros rūšių geografinį paplitimą, versdami ūkius prisitaikyti prie šių kintančių sąlygų (Troell et al., 2003).

Ligų plitimas yra dar viena didėjanti problema akvakultūroje klimato kaitos sąlygomis. Dėl aukštesnės temperatūros pagreiteja daugelio patogenų ir parazitų gyvavimo ciklai, dėl to dažnėja ir sunkėja protrūkiai. Pavyzdžiui, *Vibrio* spp. – dažnas patogenas akvakultūroje – klesti pakilusioje temperatūroje, lemdamas didelių ekonominių nuostolių (Bondad-Reantaso et al., 2005). Šie iššūkiai pabrėžia klimato kaitai atsparių akvakultūros sistemų diegimo svarbą.



Sistemos pasirinkimas yra itin svarbus prisitaikymo žingsnis. Uždaro tipo recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS), integruota daugiapakopė akvakultūros sistema (IDAS) ir atviro vandenyno akvakultūros sistemos yra inovatyvūs požiūriai, didinantys atsparumą ir tvarumą. Martins ir kt. (2010) pažymi, kad RAS leidžia tiksliai valdyti aplinkos sąlygas, taip mažinant išorinius stresorius auginamoms rūšims. IDAS sujungia skirtingas rūšis, atliekančias papildomas ekologines funkcijas, taip pagerindama maistinių medžiagų ciklą ir ekosistemų sveikatą. Atviro vandenyno akvakultūra, veikianti gilesniuose ir stabilesniuose vandenyse, yra tvari alternatyva pakrantės ūkiams, kurie labiau pažeidžiami dėl eutrofikacijos ir hipoksijos, sukeltos klimato kaitos (Holmer, 2010; Pereira et al., 2024).

## **1. Pasaulinio atšilimo keliamų iššūkių poveikis akvakultūros sistemoms**

Pasaulinis atšilimas sukėlė reikšmingų iššūkių akvakultūros sistemoms, įskaitant didėjančią vandens temperatūrą, vandenynų rūgštėjimą ir pakitusius sūrumo lygius, kurie kenkia vandens organizmų sveikatai ir produktyvumui. Padidėjęs šiluminis stresas spartina medžiagų apykaitą, o eutrofikacija ir hipoksija kelia grėsmę vandens buveinėms. Be to, klimato kaita skatina ligų ir patogenų plitimą, ypač tarp rūšių, kurių aplinkos tolerancija yra maža (Boyd & McNevin, 2015; Diaz & Rosenberg, 2008). Itin svarbu suprasti šiuos poveikius, siekiant kurti prisitaikančias strategijas, užtikrinančias akvakultūros atsparumą.

### **1.1. Šiluminė įtampa ir vandens temperatūros svyravimai**

Didėjanti pasaulinė temperatūra kelia iššūkių akvakultūros sistemoms, ypač toms rūšims, kurios pasižymi siauru šiluminiu tolerancijos diapazonu. Žuvis, moliuskai ir kiti vandens organizmai dažnai turi ribotą optimalios temperatūros intervalą, reikalingą jų fiziologinėms funkcijoms. Pakilus temperatūrai, pagreitėja medžiagų apykaita, todėl padidėja deguonies poreikis ir fiziologinis stresas (Boyd & McNevin, 2015). Kartu su vandens temperatūros kilimu mažėja deguonies tirpumas, todėl susidaro šilumos sukelta hipoksija. Šis reiškinys didina tokių rūšių kaip lašišos ar tilapijos, ypač stratifikuotuose vandens telkiniuose, kur deguonies lygis natūraliai svyruoja, mirtingumo rodiklius.

### **1.2. Eutrofikacija, hipoksija ir patogenų plitimas**

Klimato kaita skatina eutrofikacijos procesus, didindama maistinių medžiagų išplovimą iš žemės ūkio veiklų ir intensyvindama kritulių kiekį. Perteklinės maistinės medžiagos, ypač azotas ir fosforas, lemia kenksmingų dumblių žydėjimą, kurie išskiria toksinus ir, jiems skylant, išsekvoja ištirpusį deguonį. Eutrofikacija yra pagrindinė hipoksinių zonų, vadinamų negyvomis, priežastis – šiose buveinėse gyvūnams tampa neįmanoma išgyventi. Pavyzdžiui, Meksikos įlankos hipoksinė zona, kurią skatina maistinės medžiagos iš Misisipės upės, išsiplėtė dėl tiek antropogeninių, tiek klimato veiksnių, turinčių įtakos žuvų ištekliams ir akvakultūros veiklai.



Šiltėjantis vanduo sudaro palankias sąlygas patogenams ir parazitams daugintis, todėl akvakultūros sistemose išauga rizika. Pavyzdžiui, *Vibrio* spp. klesti padidėjusioje temperatūroje, sukeldamas ekonominių nuostolių krevečių ir žuvų ūkiuose (Bondad-Reantaso et al., 2005; Pounds et al., 2006). Be to, dėl aukštesnės temperatūros silpnėja vandens organizmų imuninė sistema, todėl jie tampa imlesni infekcijoms. Pavyzdžiui, pastaraisiais metais lašišų ūkiuose padaugėjo jūros utėlių, dėl kurių patiriama didelių nuostolių ir tenka naudoti daugiau cheminių priemonių, kurios kelia pavojų aplinkai (Abolofia et al., 2017).

### 1.3. Vandenynų rūgštėjimas ir druskingumo pokyčiai

Vandenynų rūgštėjimas yra dar vienas svarbus iššūkis akvakultūrai, ypač moliuskų auginimui. Kai atmosferinis CO<sub>2</sub> tirpsta vandenyje, susidaro anglies rūgštis, kuri mažina pH lygį ir karbonatų jonų prieinamumą, būtiną kriauklių ir skeletų formavimui kalcifikuojantiems organizmams (Cooley et al., 2009). Tokie moliuskai kaip austrės ar jūrų šukutės ypač pažeidžiami: rūgštus vanduo lemia plonesnes kriaukles ir mažesnį išgyvenamumą. Be to, rūgštėjimas trikdo kai kurių žuvų rūšių jutimo funkcijas, pakeisdamas jų elgseną ir sutrikdydamas ekosistemų pusiausvyrą (Munday et al., 2009).

Tirpstant ledo kepurėms ir keičiantis kritulių režimui, keičiasi vandens druskingumo lygis jūrinėse ir estuarinėse aplinkose, o tai veikia akvakultūros rūšių paplitimą ir produktyvumą. Tokios rūšys kaip krevetės ir jūriniai ešeriai, jautrios druskingumo svyravimams, gali patirti augimo ir reprodukcijos sutrikimų (Troell et al., 2003). Pavyzdžiui, Bangladeše dėl didėjančio pakrančių vandenų druskingumo krevečių ūkiai buvo priversti pradėti auginti druskingumui atsparesnes rūšis, tačiau šie pokyčiai susiję su didelėmis ekonominėmis ir ekologinėmis sąnaudomis.

## 2. Klimato kaitai atsparių sistemų atrankos kriterijai

Akvakultūros sistemų, atsparių klimato kaitos poveikiui, pasirinkimas yra būtinas siekiant užtikrinti tvarumą ir ekonominį gyvybingumą. Pagrindiniai pasirinkimo kriterijai apima atsparumą temperatūros svyravimams, eutrofikacijos mažinimą, patogenų kontrolę, energinį efektyvumą ir prisitaikymą prie druskingumo pokyčių. Tokios sistemos kaip uždaros recirkuliacinės akvakultūros sistemos ir IDAS efektyviai sprendžia šiuos iššūkius – suteikia aplinkos kontrolės galimybes bei padeda perdirbti maistines medžiagas (Martins et al., 2010; Pereira et al., 2024). Šie kriterijai leidžia akvakultūros sistemoms prisitaikyti prie besikeičiančių klimato sąlygų.

### 2.1. Atsparumas aplinkos sąlygų pokyčiams

RAS sistemos leidžia tiksliai kontroliuoti temperatūrą ir padidina sistemų atsparumą šilumos stresui. Sistemos turi būti pritaikytos prie temperatūros pokyčių, kad sumažėtų terminis stresas vandens organizmams. RAS sistemose palaikomos optimalios sąlygos rūšims augti ir išgyventi (Martins et al., 2010). Pavyzdžiui, Norvegijoje taikomos RAS technologijos lašišoms auginti padeda mažinti šiltėjančios jūros temperatūros poveikį (Badiola et al., 2012).



### ***Eutrofikacijos mažinimas***

Integruotoje daugiapakopėje akvakultūroje (IMTA) naudojami filtruojantys pašarai ir jūros dumbliai, kad būtų sumažinta maistinių medžiagų apkrova, absorbuojamas maistinių medžiagų perteklius, gerinama bendra vandens kokybė ir švelninama eutrofikacija (Pereira et al., 2024). Integruota daugiatautė akvakultūra (IMTA) yra tvarus maistinių medžiagų valdymo sprendimas. IMTA integruoja tokias rūšis kaip žuvis, jūrų dumbliai ir vėžiagyviai, kad būtų galima perdirbti maistingąsias medžiagas ir sumažinti eutrofikacijos riziką. Jūrų dumblių ūkiai Azijoje įrodė, kad maistinių medžiagų apykaita yra veiksminga, mažina KDŽ ir gerina vandens kokybę (Troell et al., 2003).

### ***Patogenų kontrolė***

Klimato kaita didina patogenų ir ligų riziką akvakultūroje, nes dėl aukštesnės temperatūros spartėja kenksmingų organizmų (bakterijų, virusų, parazitų) gyvavimo ciklai. Pažangios patogenų kontrolės priemonės yra būtinos akvakultūros veiklos saugumui. Bioapsagai užtikrinti itin svarbios uždaros RAS sistemos, kurios izoliuoja auginamus organizmus nuo išorinės aplinkos ir sumažina kontaktą su patogenais. Tokios technologijos kaip ultravioletinis (UV) sterilizavimas, ozonavimas ir biologiniai filtrai efektyviai mažina mikroorganizmų kiekį vandenyje (Bondad-Reantaso et al., 2005). Pavyzdžiui, Pietryčių Azijos krevečių ūkiuose naudojamos RAS su UV sterilizavimu padeda valdyti vibriozės protrėkius, kuriuos dažnai sukelia šiltėjantys vandenys (Aly & Fathi, 2024). Patogenams atsparių rūšių auginimas bei selekcija ligų tolerancijai didina sistemų atsparumą.

## **2.2. Efektyvus energijos ir išteklių naudojimas**

Energetiškai efektyvios sistemos svarbios siekiant sumažinti akvakultūros veiklos anglies pėdsaką. Atsinaujinančių energijos šaltinių, pavyzdžiui, saulės ir vėjo, integravimas bei pažangių technologijų (tokios kaip modernios aeracijos sistemos) diegimas skatina tvarią plėtrą. Nors RAS sistemos pasižymi dideliu energijos poreikiu (vandens siurbimas, aeracija, temperatūros palaikymas), jų veikla gali būti tvari naudojant atsinaujinančią energiją. Pavyzdžiui, hibridinėmis saulės energija paremtomis RAS sistemomis buvo sumažintos eksploatavimo energijos sąnaudos 30 proc. ir išlaikytas produktyvumas (Manolache ir Andrei, 2024).

Inovatyvūs sprendimai, kaip atliekų pavertimas energija (pavyzdžiui, biodujų gamyba iš organinių akvakultūros atliekų), dar labiau gerina tvarumą, sprendžiant ir atliekų naudojimo iššūkius (Martins et al., 2010). Saulės energija varomos akvakultūros sistemos išteklių stokojančiuose regionuose, pavyzdžiui, subsacharinėje Afrikoje, rodo, kad energetiškai efektyvūs sprendimai gali prisidėti prie aplinkos ir ekonominio tvarumo. Naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius bei efektyvias technologijas, galima sumažinti neigiamą poveikį aplinkai ir kartu užtikrinti ilgalaikį atsparumą ir produktyvumą (Badiola et al., 2012).



### ***Prisitaikymas prie druskingumo svyravimų***

Įrengiant akvakultūros sistemas pakrančių ir žiočių regionuose, reikia atsižvelgti į druskingumo pokyčius, kuriuos lemia pasaulinis atšilimas. Pirmenybė gali būti teikiama eurihalinėms rūšims, gebančioms pakęsti didelį druskingumo diapazoną. Dažnai taikomos selekcinės programos, skirtos išvesti rūšis, pasižyminčias didesniu atsparumu druskingumui (Rahman et al., 2021). Pavyzdžiui, akvakultūros ūkiai Bangladeše prisitaikė prie didėjančio druskingumo augindami druskai atsparias rūšis, tokias kaip tilapijos.

Prisitaikymas prie druskingumo svyravimų yra itin svarbus akvakultūros sistemoms, ypač pakrančių ir žiočių regionuose, kur klimato kaita sukelia reikšmingų druskingumo pokyčių. Tirpstant ledo kepurėms, kintant kritulių režimui ir kylant jūros lygiui, druskingumas tampa nenuspėjamas, o tai daro poveikį rūšims, jautrioms šiems pokyčiams. Siekiant išlaikyti produktyvumą, būtina pasirinkti tinkamas rūšis ir technologinius sprendimus. Eurihalinės rūšys, galinčios pakęsti didelį druskingumo svyravimą, dažnai pasirenkamos šiose aplinkose. Pavyzdžiui, tilapijos ir jūrų ešeriai pasižymi dideliu atsparumu druskingumo pokyčiams, todėl juos tinka auginti kintančiomis sąlygomis (Tine et al., 2014; Rahman et al., 2021).

Technologiniai sprendimai, tokie kaip selekcinės veisimo programos, leidžia išvesti rūšis, turinčias geresnį atsparumą druskingumui. Tyrimai su tilapijomis parodė, kad galima išvesti druskingumui atsparias atmainas, gebančias klestėti aplinkoje, paveiktoje druskos prisiskverbimo (Yue et al., 2024). Be to, tokios uždarnos sistemos kaip recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS) leidžia palaikyti kontroliuojamą aplinką, kur druskingumas reguliuojamas pagal rūšies poreikius, mažinant stresą ir skatinant augimą. Pažangūs vandens filtravimo ir desalinizacijos sprendimai taip pat padeda efektyviai švelninti druskingumo pokyčių poveikį (Martins et al., 2010).

Tarp prisitaikančios akvakultūros praktikų pavyzdžių – ūkiai Bangladeše, kurie perėjo prie druskingumui atsparių rūšių auginimo, reaguodami į didėjančią pakrančių vandenų druskingumą. Tokios praktikos sumažino ekonominius nuostolius ir padidino maisto saugumą pažeidžiamuose regionuose (Troell et al., 2023). Teikiant pirmenybę prisitaikomumui, akvakultūros sistemos gali geriau atlaikyti dinamiškus klimato kaitos iššūkius ir užtikrinti tvarią gamybą bei atsparumą.

### ***Ekonominis gyvybingumas ir plėtros galimybės***

Pažangių akvakultūros sistemų ekonominis gyvybingumas ir plėtros galimybės yra labai svarbūs siekiant užtikrinti jų plačiai paplitusį taikymą. Nors tokios sistemos kaip RAS ir IDAS (integruota daugiapakopė akvakultūros sistema) suteikia ilgalaikės naudos, jų didelės pradinės investicijos gali atbaidyti smulkius ir vidutinio dydžio ūkininkus. Siekiant įveikti finansines kliūtis, galima pasitelkti išlaidų pasidalijimo mechanizmus, tokius kaip viešojo ir privataus sektoriaus partnerystės bei valstybės subsidijos. Be to, dėl masto ekonomijos, pasiekiamos vykdant didesnės apimties veiklą ar bendradarbiavimo modelius, gali sumažėti vieneto sąnaudos. Tyrimai rodo, kad dėl IDAS sistemų plėtros Kanadoje gamybos efektyvumas





padidėjo 25 proc., kartu reikšmingai pagerėjo aplinkosaugos rezultatai (Baltadakis, 2021). Inovatyvūs moduliniai akvakultūros sprendimai, leidžiantys laipsniškai plėstis, suteikia lankstų ir ekonomišką kelią naujiems dalyviams atsirasti šiame sektoriuje.

### 3. Inovatyvios sistemos klimato iššūkiams spręsti

Inovatyvios akvakultūros sistemos, tokios kaip akvakultūra atviroje jūroje, recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS) ir integruota daugiapakopė akvakultūros sistema (IDAS), yra perspektyvūs sprendimai kovai su klimato kaitos keliamais iššūkiais. Akvakultūra atviroje jūroje sumažina eutrofikacijos ir hipoksijos riziką, nes veikia stabilioje giliavandenėje aplinkoje, o RAS leidžia tiksliai kontroliuoti aplinkos sąlygas ir sumažina išorės poveikį. IDAS didina ekologinį atsparumą integruodama vieną kitą papildančias rūšis, gerindama maistinių medžiagų perdirbimą ir vandens kokybę (Holmer, 2010; Pereira et al., 2024). Šios technologijos parodo tvarios akvakultūros praktikos potencialą, suderinantį aplinkosaugos ir ekonominius tikslus.

#### *Akvakultūra atviroje jūroje*

Akvakultūra atviroje jūroje tapo perspektyviu sprendimu, padedančiu spręsti klimato kaitos sukeltas problemas pakrančių ir priekrantės sistemose. Šios sistemos, veikiančios gilesniuose vandenyse, pasižymi stabilia temperatūra, aukštesniu deguonies lygiu ir mažesniu maistinių medžiagų kaupimu, todėl sumažėja eutrofikacijos ir hipoksijos rizika (Holmer, 2010). Atviroje jūroje įrengti narvai, pavyzdžiui, Viduržemio jūroje naudojami auksaspalvėms doradoms (*Sparus aurata*) ir paprastiesiems vilkešeriams (*Dicentrarchus labrax*) auginti, rodo šių sistemų potencialą plėsti akvakultūros gamybą, kartu sumažinant poveikį aplinkai (Nielsen et al., 2021). Vis dėlto akvakultūros sistemoms atviroje jūroje reikia didelių investicijų į tvirtą infrastruktūrą, kad būtų galima atlaikyti stiprias sroves ir bangavimą, taip pat į pažangias stebėsenos technologijas, kad būtų užtikrintas veiklos efektyvumas.

#### *Recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS)*

Recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS) leidžia minimaliai naudoti vandenį ir tiksliai kontroliuoti aplinkos sąlygas, taip sumažinant išorinių klimato svyravimų poveikį (Martins et al., 2010). Šios uždaros sistemos yra pažangus būdas spręsti aplinkos ir išteklių iššūkius. RAS technologija perdirba vandenį kontroliuojamoje aplinkoje, reikšmingai sumažindama vandens suvartojimą ir išorinės aplinkos pokyčių įtaką (Badiola et al., 2012). RAS leidžia tiksliai reguliuoti temperatūrą, deguonies kiekį ir atliekų tvarkymą, todėl jos ypač tinka rūšims, jautrioms aplinkos pokyčiams. Pavyzdžiui, Norvegijoje vis dažniau taikomos RAS sistemos lašišoms auginti, siekiant sušvelninti pakrančių vandens šiltėjimo padarinius. Tačiau dėl didelio energijos poreikio ir veiklos sąnaudų RAS reikia nuolatinių inovacijų, siekiant didinti energinį efektyvumą ir ekonominį gyvybingumą (Martins et al., 2010).



### ***Integruota daugiapakopė akvakultūros sistema (IDAS)***

Integruota daugiapakopė akvakultūros sistema (IDAS) didina ekologinį atsparumą integruojant tarpusavyje papildančias rūšis, tokias kaip žuvis, vėžiagyviai ir jūrų dumbliai (Pereira et al., 2024). Tai inovatyvi sistema, vienijanti kelių skirtingų trofinių lygių organizmus vienoje ūkininkavimo operacijoje. Ji remiasi natūraliais ekologiniais rūšių ryšiais, gerinančiais maistinių medžiagų apytaką ir mažinančiais poveikį aplinkai. Pavyzdžiui, jūrų dumbliai ir dvigeldžiai moliuskai gali absorbuoti žuvų auginimo metu susidarančių maistinių medžiagų perteklių, taip mažindami eutrofikaciją ir gerindami vandens kokybę (Pereira et al., 2024). Kanadoje IDAS sistemos, kuriose auginamos atlantinės lašišos (*Salmo salar*), midijos (*Mytilus edulis*) ir jūrų dumbliai (*Saccharina latissima*), davė tiek ekologinės, tiek ekonominės naudos – padidėjo biomasės gamyba ir sumažėjo maistinių medžiagų apkrova aplinkiniuose vandenyse (Troell et al., 2003).

### ***Jūrų dumblių akvakultūra***

Jūrų dumblių auginimas vis plačiau pripažįstamas kaip klimato kaitai atspari akvakultūros sistema, teikianti didelės naudos aplinkai. Jūrų dumbliai sugeria anglies dioksidą ir maistingąsias medžiagas iš vandens, taip mažindami vandenynų rūgštėjimą ir eutrofikaciją. Be to, jų auginimas siūlomas kaip anglies dioksido sekvestracijos strategija, padedanti švelninti klimato kaitos poveikį (Froehlich et al., 2019). Azijoje didelio masto jūrų dumblių ūkiai svariai prisideda prie vietos ekonomikų vystymosi ir kartu gerina jūrų ekosistemų būklę. Naujos technologijos, tokios kaip jūrų dumblių auginimo platformos atviroje jūroje, dar labiau plečia tvaraus jūrų dumblių auginimo galimybes regionuose, kur pakrantės erdvė ribota (Visch et al., 2023).

### ***Išmaniosios akvakultūros technologijos***

Skaitmeninių technologijų, tokių kaip dirbtinis intelektas (DI), daiktų internetas ir nuotolinis stebėjimas, integravimas iš esmės keičia akvakultūros veiklą. Išmaniosios sistemos leidžia realiuoju laiku stebėti aplinkos parametrus – temperatūrą, druskingumą, ištirpusio deguonies kiekį, todėl ūkininkai gali greitai reaguoti į besikeičiančias sąlygas (Føre et al., 2018). Pavyzdžiui, automatinės šėrimo sistemos ir DI pagrįsta sveikatos diagnostika didina veiklos efektyvumą ir mažina atliekų kiekį. Šios inovacijos padeda užtikrinti akvakultūros sistemų tvarumą ir mastelio plėtrą esant klimato kaitos spaudimui.

## **4. Politiniai, ekonominiai ir socialiniai aspektai**

Klimato kaitai atsparioms akvakultūros sistemoms diegti būtina išsami politikos parama ir ekonominės priemonės. Reguliavimo paskatos, tokios kaip subsidijos ir paramos priemonės, gali kompensuoti dideles pradinės investicijas, o tarptautinis bendradarbiavimas ir tvarių produktų rinkos paklausa skatina viso sektoriaus transformaciją. Sertifikavimo schemas ir ekologiškos etiketės užtikrina ekonominius paskatinimus užsiimti aplinkai atsakinga veikla. Be to, draudimo mechanizmai, pritaikyti klimato rizikai, padeda užtikrinti pažeidžiamų grupių





veiklos tęstinumą (FAO, 2020; Bush et al., 2013). Šie aspektai yra esminiai siekiant suderinti akvakultūros praktiką su pasauliniais tvarumo tikslais.

### ***Teisinis reguliavimas ir politinė parama***

Valstybės vaidmuo skatinant klimato kaitai atsparias akvakultūros sistemas yra itin svarbus. Politikoje turėtų būti teikiama pirmenybė paskatoms naudoti tvarias technologijas, tokias kaip recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS) ir integruota daugiapakopė akvakultūra (IDAS). Pavyzdžiui, Europos Sąjungos bendroji žuvininkystės politika (BZP) skatina tvarią akvakultūrą, įtraukdama klimato kaitos prisitaikymo strategijas (FAO, 2020). Subsidijos, mokesčių lengvatos ir dotacijos gali dar labiau paskatinti investicijas į inovatyvias sistemas. Taip pat teisiniai reglamentai turėtų apimti efektyvų vandens naudojimą, atliekų tvarkymą ir ligų kontrolę, kad akvakultūros praktika atitiktų aplinkos tvarumo principus (OECD, 2021).

### ***Ekonominis efektyvumas ir rizikų valdymas***

Didelės pradinės išlaidos pažangioms sistemoms, tokioms kaip RAS ir IDAS, turi būti kompensuojamos ilgalaikiais pranašumais, įskaitant mažesnius nuostolius dėl klimato sukeltų trikdžių (Tett et al., 2011). Pereinant prie tokių sistemų dažnai reikia didelių investicijų, o tai gali tapti kliūtimi, ypač mažesnių ir vidutinių pajamų šalyse. Todėl būtina atlikti sąnaudų ir naudos analizę, parodančią ilgalaikį ekonominį šių sistemų efektyvumą – pavyzdžiui, RAS sumažina priklausomybę nuo išorinių vandens šaltinių ir aplinkos riziką, todėl ilginiui mažėja veiklos sąnaudos (Badiola et al., 2012). Viešojo ir privataus sektoriaus partnerystės bei finansinės pagalbos programos gali padėti užtikrinti platesnį šių technologijų prieinamumą (Pasaulio bankas, 2013).

## **4.1. Tarptautinis bendradarbiavimas ir vartotojų sąmoningumas**

Klimato kaitos poveikis peržengia nacionalines ribas, todėl būtinas tarptautinis bendradarbiavimas. Bendros mokslinių tyrimų iniciatyvos, pavyzdžiui, vykdomos pagal „Horizon Europe“ programą, siekia kurti klimato kaitai atsparias akvakultūros technologijas ir skatinti gerųjų praktikų sklaidą tarp suinteresuotųjų šalių (European External Action Service, 2021). Be to, tokios tarptautinės organizacijos kaip Jungtinių Tautų maisto ir žemės ūkio organizacija (FAO) teikia techninę pagalbą ir politikos rekomendacijas, siekdamos stiprinti pasaulinį akvakultūros atsparumą (FAO, 2024). Regioninės sąjungos, pavyzdžiui, Azijos ir Ramiojo vandenyno žuvininkystės komisija (APFIC), taip pat palengvina žinių perdavimą ir išteklių telkimą, suteikdamos šalims galimybę taikyti sprendimus pagal vietos iššūkius (APFIC, 2019). Pasaulinės partnerystės skatina žinių mainus ir tyrimų, susijusių su klimato kaitai atsparia akvakultūra, finansavimą (Tett et al., 2011).

### ***Rinkos dinamika ir vartotojų sąmoningumas***

Rinkos jėgos yra svarbus veiksnys skatinant tvarią akvakultūros praktikų diegimą. Auganti ekologiškai atsakingų jūrų gėrybių paklausa skatina gamintojus pereiti prie tvarių



sistemų. Sertifikavimo schemas, pavyzdžiui, „Aquaculture Stewardship Council“ (ASC), suteikia rinkos pranašumą, didina konkurencingumą ir užtikrina vartotojams skaidrumą, skatindamos viso sektoriaus posūkį tvarumo link (Bush et al., 2013). Šios sertifikavimo sistemos kartu su švietimo kampanijomis, kurios akcentuoja klimato kaitai atsparių praktikų, tokių kaip recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS) ir integruota daugiapakopė akvakultūra (IDAS), aplinkosaugos pranašumus, daro įtaką pirkimo įpročiams ir skatina rinką rinktis aplinkai draugiškus produktus (Potts et al., 2021). Be to, skaitmeninės technologijos, įskaitant blokų grandinės (angl. „blockchain“) sprendimus, transformuoja jūrų gėrybių tiekimo grandinę, sudarydamos galimybę sekti produktų kilmę, stiprina pasitikėjimą ir skatina atskaitomybę tarp vartotojų ir gamintojų (Probst, 2020). Integravus sertifikavimą, edukacines priemones ir technologines naujoves, akvakultūros sektorius vis labiau derinamas su tvarumo tikslais, užtikrinant aplinkosaugos ir ekonominius privalumus.

### ***Rizikų valdymas ir draudimo mechanizmai***

Didėjant klimato kaitos sukeltų rizikų, tokių kaip ekstremalūs orai ir ligų protrūkiai, dažniui ir intensyvumui, svarbu diegti veiksmingas rizikos mažinimo strategijas ir pritaikytus draudimo mechanizmus akvakultūros apsaugai. Specialiai šiam sektoriui pritaikyti draudimo produktai, tokie kaip akvakultūros rūšims skirtas derliaus draudimas arba parametrinis draudimas nuo klimato veiksnių, gali suteikti veiklos vykdytojams finansinio saugumo. Tam būtinas vyriausybių, finansų institucijų ir draudimo teikėjų bendradarbiavimas, kad būtų sukurti prieinami ir įperkami draudimo modeliai. Pavyzdžiui, Filipinuose taikomos parametrinio draudimo programos sėkmingai užtikrino išmokas žuvų augintojams po taifūnų, leidžiant greičiau atkurti veiklą (Van Anrooy et al., 2022). Tokios rizikos vertinimo priemonės kaip klimato modeliavimo ir ankstyvojo perspėjimo sistemos dar labiau didina atsparumą, padeda ūkiams laiku numatyti ir sušvelninti galimus sutrikimus (Allison et al., 2009).

### **Santrauka**

Pasaulinio atšilimo poveikis akvakultūrai pabrėžia būtinybę strategiškai rinktis auginimo sistemas ir taikyti tvarias praktikas, kad būtų užtikrintas ilgalaikis šio sektoriaus atsparumas ir produktyvumas. Klimato kaitos sukelti iššūkiai – didėjanti temperatūra, vandenynų rūgštėjimas ir ligų plitimas – toliau stiprėja, todėl būtina diegti novatoriškas ir prisitaikančias akvakultūros sistemas. Šiame skyriuje buvo pristatyti tokie esminiai sprendimai kaip recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS), integruota daugiapakopė akvakultūra (IDAS) ir akvakultūra atviroje jūroje kaip veiksmingi būdai spręsti šiuos iššūkius.

Recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS) leidžia tiksliai kontroliuoti aplinkos sąlygas, todėl ūkininkavimo veikla tampa atsparesnė išoriniams klimato svyravimams ir mažėja priklausomybė nuo išorinių vandens šaltinių. Integruota daugiapakopė akvakultūra (IDAS) skatina maistinių medžiagų perdirbimą ir ekosistemų stabilumą, siūlydama holistinį požiūrį į tvarumą. Akvakultūra atviroje jūroje, vykdoma gilesniuose ir stabilesniuose



vandenyse, padeda išvengti pakrančių eutrofikacijos ir hipoksijos, nes siūlomas efektyvus gamybos plėtros būdas .

Pereiti prie šių sistemų galima tik turint aiškius politinius pagrindus ir ekonomines paskatas, kurios padėtų įveikti su didelėmis pradinėmis investicijomis susijusias kliūtis. Vyriausybės, privatūs subjektai ir tarptautinės organizacijos turi bendradarbiauti per tokius mechanizmus kaip tarptautinės sutartys, finansavimo programos ir žinių dalijimosi platformos. Konkretūs veiksmai – subsidijos, mokesčių lengvatos, dotacijos – būtini, kad būtų paskatintos investicijos į klimato kaitai atsparias technologijas, ypač smulkiesiems ūkininkams, kurie yra labiausiai pažeidžiami klimato sukrėtimų.

Vartotojų sąmoningumas ir didėjanti paklausa tvarioms jūrų gėrybėms kuria papildomas sektoriaus transformacijos galimybes. Sertifikavimo schemas ir ekologiniai ženklai gali paskatinti gamintojus taikyti klimato kaitai atsparias praktikas ir stiprinti vartotojų pasitikėjimą bei skaidrumą. Švietimo kampanijos ir šių iniciatyvų plėtra pasauliniu mastu dar labiau sustiprins jų poveikį, ypač regionuose, turinčiuose didelį akvakultūros potencialą. Be to, blokų grandinės technologijų taikymas tiekimo grandinei sekti padidins atsekamumą ir pasitikėjimą tarp vartotojų ir gamintojų.

Žvelgiant į ateitį, būtina investuoti į mokslinius tyrimus ir plėtrą, siekiant tobulinti akvakultūros sistemas. Prioritetinės sritys: RAS energijos vartojimo efektyvumo gerinimas, nebrangių IDAS sistemų kūrimas ir pažangių ligų valdymo strategijų vystymas. Ilgalaikis aplinkos stebėjimas ir aktyvus valdymas padės prisitaikyti prie kintančių klimato sąlygų.

Integruodamas technologinę pažangą ir ekologinius principus, akvakultūros sektorius gali stiprinti savo atsparumą ir tvarumą. Politikos formuotojai, tyrėjai ir verslo atstovai turi veikti ryžtingai, kad būtų įdiegtos sistemos, užtikrinančios ilgalaikį sektoriaus gyvybingumą klimato kaitos eroje. Tik bendromis pastangomis akvakultūra galės sėkmingai vystytis, prisidedama prie pasaulinio maisto saugumo ir ekonominės plėtros.

## Literatūra

Andreyeva, A. Y., Kukhareva, T. A., Gostyukhina, O. L., & Vialova, O. Y. (2024). Impacts of ocean acidification and hypoxia on cellular immunity, oxygen consumption, and antioxidant status in Mediterranean mussel. *Fish and Shellfish Immunology*, 154, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.109932>

Baag, S., & Mandal, S. (2022). Combined effects of ocean warming and acidification on marine fish and shellfish: A molecule to ecosystem perspective. *Science of the Total Environment*, 802, 149807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149807>

Bhuiyan, M. M. U., Rahman, M., Naher, S., Shahed, Z. H., Ali, M. M., & Islam, A. R. M. T. (2024). Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100621. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

Burke, M., Grant, J., Filgueira, R., & Swanson, A. (2022). Oxygenation effects on temperature and dissolved oxygen at a commercial Atlantic salmon farm. *Aquacultural Engineering*, 99, 102287. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102287>

Day, J. W., Rybczyk, J. M., & Stephens, J. R. (2024). Climate change effects on nutrient loading and coastal eutrophication. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 6(18), 627–637. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00112-8>



- DeNicola, E., Aburizaiza, O. S., Siddique, A., Khwaja, H., & Carpenter, D. O. (2015). Climate change and water scarcity: The case of Saudi Arabia. *Annals of Global Health*, 81(3), 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.005>
- Deutsch, C., Penn, J. L., & Seibel, B. A. (2020). Climate change constrains fish metabolic scope and habitat suitability globally. *Science Advances*, 6(22), eaax0194. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0194>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO<sub>2</sub> problem. *Annual Review of Marine Science*, 1(1), 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Duarte, J. A., Villanueva, R., Seijo, J. C., & Vela, M. A. (2022). Ocean acidification effects on aquaculture of a high resilient calcifier species: A bioeconomic approach. *Aquaculture*, 559, 738426. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738426>
- Esbaugh, A. J. (2025). Physiological responses of euryhaline marine fish to naturally-occurring hypersalinity. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 299, 111768. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2024.111768>
- FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org>
- Garlock, T., Asche, F., Anderson, J., Bjørndal, T., Kumar, G., Lorenzen, K., Ropicki, A., Smith, M. D., & Tveterås, R. (2022). Aquaculture's role in sustainable food systems. *Food Policy*, 116, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102422>
- Giri, S. (2021). Water quality prospective in the twenty-first century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies, and impediments. *Environmental Pollution*, 271, 116332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332>
- Grabba, K. C., Ghosh, A., Adekunbi, F. O., Williamson, P., & Widdicombe, S. (2024). Ocean acidification: Causes, impacts, and policy actions. In *Encyclopedia of the Anthropocene*. Elsevier, 51–59. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14082-2.00011-9>
- Guimbeau, A., Ji, X. J., Long, Z., & Menon, N. (2024). Ocean salinity, early-life health, and adaptation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 125, 102954. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.102954>
- Hamilton, S. L., Elliott, M. S., deVries, M. S., Adelaars, J., & Rintoul, M. D. (2022). Integrated multi-trophic aquaculture mitigates the effects of ocean acidification: Seaweeds raise system pH and improve growth of juvenile abalone. *Aquaculture*, 560, 738571. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738571>
- Handisyde, N., Ross, L. G., Badjeck, M. C., & Allison, E. H. (2017). Climate change and aquaculture: Vulnerability and adaptation in the tropics. *Aquaculture*, 467, 357–367. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.012>
- Hoeksema, S. D., Chuwen, B. M., Tweedley, J. R., & Potter, I. C. (2023). Ichthyofaunas of nearshore, shallow waters of normally-closed estuaries are highly depauperate and influenced markedly by salinity and oxygen concentration. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 291, 108410. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108410>
- Liu, S., Liu, Y., & Xing, Q. (2024). Climate change drives fish communities: Changing multiple facets of fish biodiversity in the Northwest Pacific Ocean. *Science of the Total Environment*, 955, 176854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176854>
- Mahu, E., et al. (2022). Climate-induced hazards and their impacts on aquaculture. *Environmental Research*, 259, 119535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119535>
- Mangi, S. C., Lee, J., Pinnegar, J. K., & Law, R. J. (2018). The economic impacts of ocean acidification on shellfish fisheries and aquaculture in the United Kingdom. *Environmental Science and Policy*, 86, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.008>
- Mdoe, C. N., Mahonge, C. P., & Ngowi, E. E. (2025). Mapping the trends, knowledge production, and practices of climate-smart aquaculture. *Aquaculture*, 598, 741939. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741939>



- Mensah, V., Chen, Y. C., & Ohshima, K. I. (2025). Multidecadal decline in sea ice meltwater volume and implications for nutrient dynamics. *Progress in Oceanography*, 230, 103377. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103377>
- Mingote, M. G., Galimany, E., Sala-Coromina, J., Bahamon, N., Ribera-Altimir, J., Santos-Bethencourt, R., & Clavel-Henry, M. (2024). Warming and salinization effects on the deep-water rose shrimp, *Parapenaeus longirostris*, distribution along the NW Mediterranean Sea: Implications for bottom trawl fisheries. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115838. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115838>
- Moussa, L. G., Mohan, M., Arachchige, P. S. P., Rathnasekara, H., Abdullah, M., & Abulibdeh, A. (2025). Impact of water availability on food security in GCC: Systematic literature review-based policy recommendations for a sustainable future. *Environmental Development*, 54, 101122. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2024.101122>
- Naylor, R., et al. (2023). A global view of aquaculture policy. *Food Policy*, 116, 102422. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102422>
- Neokye, E. O., et al. (2024). Climate change impacts on oyster aquaculture: Part II. *Environmental Research*, 259, 119535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119535>
- Nienhuis, S., et al. (2010). Ocean acidification effects on calcifying organisms. *Marine Ecology Progress Series*, 400, 287–302. <https://doi.org/10.3354/meps08307>
- Okon, E. M., Oyesiji, A. A., & Eissa, E. H. (2024). The escalating threat of climate change-driven diseases in fish: Evidence from a global perspective. *Environmental Research*, 263, 120184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120184>
- Priya, A. K., Muruganandam, M., & Sivarethinamohan, R. (2023). Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystems. *Environmental Research*, 238, 117233. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117233>
- Rahman, M. M., & Hung, T. C. (2024). Impact of salinity and body size on sperm motility in three California smelt species. *Aquaculture Reports*, 39, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102503>
- Reister, I., Danielson, S., & Aguilar-Islas, A. (2024). Perspectives on Northern Gulf of Alaska salinity field structure, freshwater pathways, and controlling mechanisms. *Progress in Oceanography*, 229, 103373. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103373>
- Ross, F. W. R., Boyd, P. W., & Filbee-Dexter, K. (2023). Potential role of seaweeds in climate change mitigation. *Science of the Total Environment*, 885, 163699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163699>
- Seibel, B. A. (2024). On the validity of using the Metabolic Index to predict the responses of marine fishes to climate change. *Encyclopedia of Fish Physiology*, 3, 549–558. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90801-6.00167-1>
- Sundaraman, H. K., & Shanmugam, P. (2024). Estimates of the global ocean surface dissolved oxygen and macronutrients from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 311, 114243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114243>
- USEPA. (2014). *Harmful algal blooms: Impacts on aquatic ecosystems*. U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://www.epa.gov>
- Wang, Y. S., & Gu, J. D. (2021). Ecological responses, adaptation and mechanisms of mangrove wetland ecosystems to global climate change. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 162, 105248. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105248>
- Woods, J. S., Veltman, K., & Huijbregts, M. A. J. (2016). Towards a meaningful assessment of marine ecological impacts in life cycle assessment. *Environment International*, 89–90, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.033>
- Zarzynny, K. M., Rius, M., & Williams, S. T. (2024). The ecological and evolutionary consequences of tropicalisation. *Trends in Ecology & Evolution*, 39(3), 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.10.006>
- Zhang, T., Liu, H., Lu, Y., Wang, Q., & Loh, Y. C. (2024). Impact of climate change on coastal ecosystem and outdoor activities: A comparative analysis among four largest coastline covering countries. *Environmental Research*, 250, 118405. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118405>



Funded by  
the European Union



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

Zucca, C., Middleton, N., Kang, U., & Liniger, H. (2021). Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management. *Catena*, 207, 105669. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105669>