



Funded by  
the European Union



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

# 1 modulis. Pasaulinio atšilimo poveikis vandens kokybei ir poveikis akvakultūrai

**Doc. dr. Anželika Dautartė**  
**Vytauto Didžiojo universitetas**

## Turinys

Įvadas .....	2
1. Pasaulinio atšilimo poveikis vandens kokybei.....	3
1.1. Temperatūros pokyčiai ir jų poveikis ekosistemoms .....	3
1.2. Cheminė sudėtis: rūgštingumas, druskingumas ir maistinės medžiagos.....	5
1.3. Hidrologiniai ekstremumai ir jų pasekmės vandens kokybei.....	11
2. Pasaulinio atšilimo poveikis akvakultūrai .....	12
2.1. Ekologinis ir ekonominis rūšių pažeidžiamumas .....	12
2.2. Geografinis persiskirstymas ir klimato adaptacija .....	15
Santrauka .....	17
Literatūra.....	18



## Įvadas

Dėl klimato kaitos kylanti pasaulinė temperatūra daro reikšmingą poveikį vandens ekosistemoms, ypač vandens organizmų medžiagų apykaitos ir augimo procesams. Aukštesnė temperatūra spartina medžiagų apykaitą ir didina deguonies poreikį, todėl gali kilti sunkumų augimo ir dauginimosi procesuose. Šiame skyriuje analizuojama temperatūros pokyčių sąveika su vandens rūšių fiziologiniais procesais bei pateikiamos išvalgos apie tai, kaip ši dinamika veikia vandens kokybę ir visos ekosistemos sveikatą. Klimato kaita taip pat daro didelį poveikį pakrančių bei estuarijų ekosistemoms, kur druskingumo svyravimai yra vienas svarbiausių padarinių. Tirpstant poliariniam ledui ir keičiantis kritulių režimui, ypač regionuose, esančiuose šalia gėlo vandens pritekėjimo zonų, druskingumo lygio pokyčiai tampa ryškesni. Šie pokyčiai kelia iššūkių vandens organizmams, kurie yra priklausomi nuo stabilių druskingumo sąlygų, ir gali keisti ekosistemų struktūrą bei kelti grėsmę biologinei įvairovei (Guimbeau et al., 2024; Mensah et al., 2025).

Dėl klimato kaitos vykstantys druskingumo pokyčiai dar labiau trikdo jūrų ekosistemas. Dėl tirpstančio poliarinio ledo, pakitusio kritulių režimo ir didėjančio garavimo intensyvumo atsirandantys druskingumo svyravimai veikia jūrinių rūšių pasiskirstymą, mažina biologinę įvairovę ir apsunkina akvakultūros veiklą. Dėl žemės ūkio nuotekų, pramonės teršalų ir miestų taršos stiprėja eutrofikacijos procesai, kurie sukelia žalingą vandens žydėjimą, deguonies trūkumą ir rimtus jūrų bei gėlo vandens ekosistemų sutrikimus. Eutrofikacija, vis labiau plintanti dėl antropogeninio poveikio ir klimato kaitos, sukelia plataus masto ekologines ir ekonomines pasekmes (Zhang et al., 2024; Mensah et al., 2025).

Vandens prieinamumui ir kokybei vis didesnę grėsmę kelia klimato kaita ir žmogaus veikla. Dėl kylančios temperatūros ir nenusipėjamo kritulių kiekio visame pasaulyje keičiasi hidrologiniai ciklai. Kartu dėl taršos ir netinkamo valdymo blogėjanti vandens kokybė kelia didelių problemų ekosistemoms ir žmonių populiacijoms (DeNicola et al., 2015; Moussa et al., 2025). Pasaulinis atšilimas taip pat kelia iššūkių akvakultūrai, nes keičiasi aplinkos sąlygos, būtinos vandens rūšims. Kylant vandens temperatūrai, daugeliui rūšių sunku klestėti už jų optimalaus šiluminio diapazono ribų, todėl mažėja derlius ir didėja mirtingumas. Be to, šiltesniuose vandenyse susidaro palankios sąlygos patogenams ir parazitams, todėl didėja rizika akvakultūrai (DeNicola et al., 2015; Moussa et al., 2025). Šios tarpusavyje susijusios problemos daro didelę įtaką akvakultūros tvarumui ir pelningumui.

Dėl pasaulinio atšilimo keičiasi geografinis akvakultūros zonų pasiskirstymas. Kylanti jūros vandens temperatūra, kintančios vandenyno srovės ir kritulių struktūra keičia tradicinių akvakultūros regionų tinkamumą. Dėl šių pokyčių reikia strategiškai prisitaikyti, pavyzdžiui, perkelti veiklą į naujas tinkamas zonas, taip pat spręsti invazinių rūšių, kurios klesti pakitusiomis sąlygomis ir trikdo vietines ekosistemas, keliamas problemas. Šie trikdžiai turi didelių socialinių, ekonominių ir aplinkosaugos pasekmių, todėl politikos formuotojai, tyrėjai ir pramonės suinteresuotosios šalys turi nedelsiant skirti jiems dėmesio.



## 1. Pasaulinio atšilimo poveikis vandens kokybei

### 1.1. Temperatūros pokyčiai ir jų poveikis ekosistemoms

#### 1.1.1. Šiluminės stratifikacijos ir deguonies trūkumo mechanizmai

Šiluminė stratifikacija atsiranda, kai dėl vandens temperatūros skirtumų vandens telkinyje susiformuoja atskiri sluoksniai. Šį procesą dar labiau stiprina pasaulinis atšilimas, nes, kylant vandens paviršiaus temperatūrai, šiltesnio, lengvesnio paviršinio vandens ir vėsesnio, tankesnio giluminio vandens atskyrimas tampa intensyvesnis. Susidarę sluoksniai trukdo vertikaliam maišymuisi ir riboja deguonies judėjimą žemyn bei maistinių medžiagų kilimą į paviršių. Dėl to gilesniuose sluoksniuose mažėja deguonies kiekis, susidaro hipoksinės arba anoksinės sąlygos, kurios daro reikšmingą poveikį jūrų ekosistemoms (Bhuiyan et al., 2024; Burke et al., 2022).

Deguonies trūkumas ypač ryškus tose vietovėse, kuriose silpna vandens cirkuliacija ir vyksta intensyvus organinių medžiagų irimas, pavyzdžiui, Ramiojo vandenyno rytinėje atogrąžų dalyje ir Arabijos jūroje yra plačios deguonies minimumo zonos (DMZ), kuriose ištirpusio deguonies koncentracija nesiekia 20  $\mu\text{mol/l}$  ir kurios driekiasi nuo 100 iki 1000 metrų gylyje. Šiuose regionuose išryškėja lėtos vandenynų cirkuliacijos, organinių medžiagų irimo ir riboto deguonies papildymo sąveika (Bhuiyan et al., 2024).

#### *Regioninės ir pasaulinės tendencijos*

Nuo 1960 m. visame pasaulyje deguonies kiekis vandenynuose sumažėjo maždaug 2 proc. Ši tendencija siejama su intensyvėjančia stratifikacija, eutrofikacija ir atšilimu. Pakrančių regionuose, įskaitant Meksikos įlanką ir Česapiko įlanką, smarkiai išsiplėtė hipoksinės zonos, paprastai vadinamos „negyvosiomis zonomis“. Šių zonų formavimąsi daugiausia lemia maistinių medžiagų nuotėkis, skatinantis dumblių žydėjimą, kuris didina organinių medžiagų irimą ir deguonies suvartojimą (Bhuiyan et al., 2024).

Palydoviniai modeliai suteikia vertingų įžvalgų apie ištirpusio deguonies dinamiką ir parodo, kaip temperatūros bei druskingumo pokyčiai koreliuoja su deguonies kiekiu. Pavyzdžiui, regionuose, kuriuos veikia bangavimas, pavyzdžiui, Kalifornijos srovėje, stebimas didesnis deguonies kintamumas dėl maistingųjų medžiagų turtingų šaltųjų vandenų ir biologinio produktyvumo sąveikos (Sundararaman & Shanmugam, 2024).

#### *Poveikis jūrų gyvybei*

Deguonies trūkumas daro tiesioginį poveikį vandens organizmams – mažėja tinkamų gyventi buveinių plotai ir kinta ekosistemų dinamika. Labiausiai nukenčia sėsūs organizmai bei dugno fauna, nes jie negali išvengti žemo deguonies kiekio sąlygų. Judrūs organizmai, tokie kaip žuvis ir kai kurie bestuburiai, susiduria su buveinių suspaudimu – jie verčiami migruoti į seklesnius, deguonies turtingesnius vandens sluoksnius, kur didėja konkurencija dėl išteklių ir plėšrūnų poveikio rizika. Ilgalaikė hipoksija taip pat gali trikdyti organizmų augimą ir



dauginimasi, todėl mažėja ir komerciškai svarbių rūšių populiacijos (Burke et al., 2022; Sundararaman & Shanmugam, 2024).

### *Poveikio mažinimo strategijos*

- **Glaudesnė stebėseną:**
  - Nuotolinio stebėjimo technologijų ir biogeocheminių modelių pažanga leidžia realiuoju laiku stebėti deguonies bei maistinių medžiagų pokyčius vandenyje. Tai padeda laiku identifikuoti hipoksines sąlygas ir imtis prevencijos veiksmų.
- **Maistinių medžiagų kontrolė:**
  - Eutrofikacijos ir su ja susijusio deguonies mažėjimo poveikį galima sumažinti mažinant žemės ūkio nuotėkį, skatinant tvaraus ūkininkavimo praktikas bei optimizuojant trąšų naudojimą.
- **Deguonies tiekimo sistemos:**
  - Kai kuriose akvakultūros arba uždaro tipo vandens telkinių sistemose gali būti taikomos dirbtinio deguonies tiekimo technologijos, siekiant išvengti deguonies stygiaus (Burke et al., 2022).
- **Klimato kaitos švelninimas:**
  - Siekiant sumažinti temperatūros kilimą ir vandens sluoksnių stratifikaciją, būtina mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų – ypač anglies dioksido – išmetimą. Tokios priemonės padeda apsaugoti jūrų ekosistemas ir palaikyti biologinę įvairovę (Bhuiyan et al., 2024).

#### *1.1.2. Medžiagų apykaitos greitis ir deguonies poreikis*

Aukštesnė vandens temperatūra tiesiogiai veikia organizmų medžiagų apykaitą – didėjant temperatūrai, spartėja metaboliniai procesai, todėl padidėja deguonies poreikis. Tuo pat metu deguonies tirpumas vandenyje mažėja, o tai lemia vadinamąją temperatūrinę hipoksiją. Tokios sąlygos riboja organizmų aerobines galimybes (Seibel, 2024). Tyrimai rodo, kad metabolinis indeksas – rodiklis, vertinantis deguonies pasiūlos ir paklausos santykį – mažėja su temperatūra, dėl to deguonies nepakanka augimo ir dauginimosi procesams palaikyti (Deutsch et al., 2020).

Ypač pažeidžiamos žuvys, kurių deguonies poreikis stipriai padidėja šiltesniuose vandenyse. Dėl sumažėjusio deguonies tirpumo ir intensyvios medžiagų apykaitos šios rūšys patiria fiziologinį stresą, kuris riboja jų augimą, mažina išgyvenamumą ir gali sutrikdyti populiacijos dinamiką. Didžiausią riziką patiria rūšys, gyvenančios sekliuose ar stipriai susisluoksniavusiuose (stratifikavusiuose) vandens telkiniuose (Okon et al., 2024).

#### *Įtaka žuvų augimui ir dauginimuisi*

Padidėjusi vandens temperatūra ženkliai veikia vandens organizmų augimo ir dauginimosi procesus. Dėl šiltesnių sąlygų daugelis žuvų rūšių pasiekia lytinę brandą anksčiau, tačiau jų gyvenimo trukmė sutrumpėja. Tai sutrikdo populiacijų struktūrą ir gali lemti ilgalaikį ekosistemų disbalansą (Liu et al., 2024). Be to, aukštesnė temperatūra gali neigiamai paveikti



gametų (lytinių ląstelių) kokybę ir sumažinti neršto sėkmę, dėl ko mažėja reprodukcinis produktyvumas. Pavyzdžiui, žuvų rūšys Ramiojo vandenyno šiaurės vakarinėje dalyje parodė pokyčius savo reprodukcinėse strategijose, tiesiogiai reaguodamos į pakitusius šilumos režimus. Tai rodo, kad temperatūra yra svarbus veiksnys, lemiantis gyvenimo istorijos ypatumus (Liu et al., 2024).

### ***Poveikis ekosistemų sveikatai***

Padidėjęs medžiagų apykaitos greitis šiltesniuose vandenyse sukelia daugiapakopį poveikį visai ekosistemai. Organizmai intensyviau pasisavina maistines medžiagas ir išskiria daugiau metabolinių atliekų, o tai gali sustiprinti eutrofikacijos procesus, ypač maistingųjų medžiagų turtinguose vandens telkiniuose. Ilgalais terminis stresas silpnina organizmų imuninę sistemą, todėl padidėja jų jautrumas ligoms ir patogenams. Toks poveikis jau stebimas pasaulinėse akvakultūros sistemose, kur klimato kaitos sąlygotas stresinis fonas skatina infekcinių ligų protrūkius (Okon et al., 2024). Šios sąveikos pabrėžia būtinybę diegti integruotas ekosistemų valdymo strategijas, kurios leistų sušvelninti klimato kaitos poveikį vandens aplinkai ir išsaugoti jos atsparumą.

### ***Prisitaikymo atsakas ir poveikio mažinimo strategijos***

Vandens organizmai pasižymi skirtingo laipsnio fenotipiniu plastiškumu, leidžiančiu jiems prisitaikyti prie kintančių aplinkos sąlygų, įskaitant šiluminį stresą. Pavyzdžiui, eurihalinės rūšys gali keisti savo osmoreguliacijos mechanizmus, kad atlaikytų padidėjusį druskingumą ir temperatūros svyravimus (Esbaugh, 2025). Tačiau tokių fiziologinių prisitaikymų galimybes riboja organizmo energijos ištekliai, todėl vien prisitaikymas nėra pakankamas ilgalaikiam išlikimui. Dėl to būtina diegti aktyvias šiluminio poveikio švelninimo strategijas. Viena iš jų – pakrančių augalijos atkūrimas, kuris padeda sudaryti natūralų pavėšį, mažinant vandens telkinių įšilimą. Kita svarbi priemonė – vandens srauto didinimas stratifikacijai būdingose sistemose, siekiant pagerinti deguonies pasiskirstymą ir palaikyti ekosistemos funkcionalumą. Be šių vietinių sprendimų, būtinos ir globalios priemonės – visų pirma šiltnamio efektą sukeliančios dujų emisijos mažinimas, siekiant sulėtinti klimato kaitos sukeltą temperatūros kilimą (Seibel, 2024).

## **1.2. Cheminė sudėtis: rūgštingumas, druskingumas ir maistinės medžiagos**

### ***1.2.1. pH lygis ir vandenynų rūgštėjimas***

Vienas iš svarbiausių vandenynų rūgštėjimo veiksnių – anglies dioksido ( $\text{CO}_2$ ) absorbcija iš atmosferos. Nuo priešindustrinės eros vandenynų paviršinio sluoksnio pH reikšmė sumažėjo maždaug 0,1 vieneto, o tai atitinka apie 26 proc. padidėjusią vandenilio jonų koncentraciją (Duarte et al., 2022). Rūgštėjimo procesas vyksta dėl to, kad  $\text{CO}_2$ , tirpdamas jūros vandenyje, sudaro anglirūgštę, kuri vėliau disocijuoja į bikarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) ir vandenilio ( $\text{H}^+$ ) jonus. Pastarieji sumažina pH lygį ir sumažina karbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) jonų prieinamumą (Grabba et al., 2024). Karbonato jonai būtini kalcifikuojantiems organizmams, tokiems kaip moliuskai ar koralai, kurie naudoja kalcio karbonatą ( $\text{CaCO}_3$ ) savo kiautams ir



skeletams formuoti. Dėl karbonatų stokos jų struktūros tampa plonesnės, silpnesnės, o skeleto formavimosi procesai – sutrikę, kas kelia grėsmę šių rūšių išlikimui (Andrejeva et al., 2024).

### ***Poveikis jūrų gyvybei***

Vandenynų rūgštėjimas daro didelį poveikį kalcifikuojantiems organizmams, kurie ypač jautriai reaguoja į karbonatų prisotinimo būsenos pokyčius. Laboratoriniai tyrimai su dvigeldžiais moliuskais, tokiais kaip midijos ir austrės, rodo, kad sumažėjęs pH trukdo kriauklių formavimuisi, sulėtina vystymąsi ir padidina mirtingumą ankstyvaisiais gyvenimo etapais (Hamilton et al., 2022). Pavyzdžiui, midija *Mytilus galloprovincialis*, nors ir pasižymi tam tikru atsparumu žemam pH, rūgštinėmis sąlygomis patiria daugiau kiauto pažeidimų, sulėtėja augimo tempas (Andrejeva et al., 2024). Toks fiziologinis stresas kelia pavojų rūšies išlikimui ir produktyvumui tiek natūraliose buveinėse, tiek akvakultūros sistemose.

Vandenynų rūgštėjimas taip pat veikia nekalkines rūšis – keičia jų jutimo funkcijas, augimą ir dauginimąsi. Pastebėti žuvų ir bestuburių elgsenos pokyčiai, tokie kaip sumažėjęs plėšrūnų vengimas ir pakitusios buveinių pasirinkimo strategijos, esant žemam pH (Grabba et al., 2024). Be to, rūgštėjimas, veikiantis kartu su kitais stresą sukeliančiais veiksniais, pavyzdžiui, hipoksija, dar labiau sustiprina neigiamą poveikį, todėl bendras spaudimas jūrų biologinei įvairovei didėja (Andrejeva et al., 2024).

### ***Ekonominės ir ekologinės pasekmės***

Vandenynų rūgštėjimo ekonominės pasekmės yra labai didelės, ypač pramonės šakoms, priklausomoms nuo kalcifikuojančių organizmų. Moliuskų žvejyba ir akvakultūra susiduria su dideliais iššūkiais – prognozuojama, kad dėl pablogėjusios kriauklių kokybės ir išlikimo rodiklių sumažės produkcijos ir rinkos vertė (Mangi et al., 2018). Jungtinėje Karalystėje ekonominiai nuostoliai, priskiriami vandenynų rūgštėjimui, gali siekti nuo 14 proc. iki 28 proc. žuvininkystės grynosios dabartinės vertės pagal didelės emisijos scenarijus (Mangi et al., 2018). Šis ekonominis spaudimas rodo, kad būtina skubiai spręsti rūgštėjimo problemą siekiant apsaugoti jūrų išteklius ir pragyvenimo šaltinius.

Ekologiniu požiūriu jūrų mitybos tinklų suardymas kelia didelį susirūpinimą. Sumažėjusios kalcifikuojančių organizmų populiacijos gali turėti daugiapakopį poveikį plėšrūnų ir grobuonių dinamikai, maistinių medžiagų apykaitai ir bendram ekosistemos stabilumui (Duarte et al., 2022). Integruoti metodai, pavyzdžiui, daugiatautės akvakultūros sistemos, yra perspektyvūs siekiant sušvelninti šį poveikį, naudojant jūrų dumblius pH lygiui sušvelninti ir kalcifikuojančioms rūšims palaikyti (Hamilton et al., 2022).

### ***Poveikio švelninimo strategijos ir ateities perspektyvos***

Vandenynų rūgštėjimas sukelia reikšmingas ekonomines pasekmes, ypač toms pramonės šakoms, kurios priklauso nuo kalcifikuojančių organizmų. Moliuskų žvejyba ir akvakultūra susiduria su dideliais iššūkiais – dėl pablogėjusios organizmų kokybės ir sumažėjusio išgyvenamumo prognozuojamas produkcijos mažėjimas bei rinkos vertės kritimas (Mangi et al., 2018). Pavyzdžiui, Jungtinėje Karalystėje ekonominiai nuostoliai, susiję su





vandenynų rūgštėjimu, gali sudaryti nuo 14 proc. iki 28 proc. žuvininkystės grynosios dabartinės vertės pagal didelę emisiją scenarijus (Mangi et al., 2018). Šios prognozės pabrėžia būtinybę skubiai imtis veiksmų, siekiant apsaugoti jūrų išteklius ir su jais susijusius pragyvenimo šaltinius.

Ekologiniu požiūriu didžiausią nerimą kelia jūrų mitybos tinklų destabilizacija. Sumažėjus kalcifikuojančių organizmų populiacijoms, kyla daugiapakopis poveikis plėšrūnų ir grobio santykiams, trikdoma maistinių medžiagų apykaita ir mažėja bendras ekosistemų stabilumas (Duarte et al., 2022). Perspektyvia švelninimo priemone laikomi integruoti sprendimai, tokie kaip integruotos akvakultūros sistemos. Jose jūrų dumbliai gali būti naudojami pH lygiui mažinti, taip sukuriant palankesnes sąlygas kalcifikuojančių rūšių išlikimui (Hamilton et al., 2022).

### ***1.2.2. Druskingumo pokyčius lemiantys mechanizmai***

Pagrindiniai druskingumo svyravimus lemiantys veiksniai yra gėlo vandens pritekėjimas dėl ledynų tirpimo, padidėjęs kritulių kiekis ir sezoniniai upių nuotėkio svyravimai. Pavyzdžiui, šiaurinėje Aliaskos įlankos dalyje gėlo vandens patekimas iš ledynmečio paveiktų baseinų lemia ryškius sezoninius ir erdvinius druskingumo svyravimus. Šiuos pokyčius dar labiau moduliuoja vėjo sukeltas maišymasis ir pakrantės srovės, kurios daro įtaką gėlo vandens srautų pasiskirstymui (Reister et al., 2024). Panašiai Beringo jūroje dėl sumažėjusio jūros ledo kaupimosi ir padidėjusio tirpstančio vandens kiekio įvyko didelis gėlų vandenų atvėsimas, dėl kurio susilpnėjo stratifikacija ir pasikeitė maistinių medžiagų apykaita (Mensah et al., 2025).

### ***Poveikis jūrų ir estuarijų organizmams***

Upių žiotyse ir pakrančių regionuose gyvenantys organizmai yra itin jautrūs druskingumo pokyčiams. Rūšims, kurių fiziologija priklauso nuo pastovaus druskingumo, pavyzdžiui, vėžiagyviams ir tam tikroms žuvis, svyravimai gali sutrikdyti pagrindinius fiziologinius procesus – osmoreguliaciją, augimą ir dauginimąsi (Guimbeau et al., 2024). Pavyzdžiui, tyrimai Bangladeše parodė, kad padidėjęs druskingumas jauniklių vystymosi laikotarpiu lėtina jų augimą, o tai rodo ir didesnes ekologines bei socialines šių pokyčių pasekmes (Guimbeau et al., 2024).

Estuarijose, pavyzdžiui, Čezapeiko įlankoje, dar didesnę stresą kelia druskingumo svyravimų ir maistinių medžiagų pertekliaus derinys. Šiomis sąlygomis stebimas rūšių įvairovės sumažėjimas ir bendrijų sudėties pokyčiai – mažiau tolerantiškas rūšis dažnai pakeičia oportunistinės, generalistinės (Zhang et al., 2024). Tokie pokyčiai gali turėti daugiapakopį poveikį visos ekosistemos funkcionavimui – silpnėja mitybos tinklų stabilumas ir prastėja ekosistemų teikiamų paslaugų kokybė.

### ***Platesnės ekologinės ir socialinės bei ekonominės pasekmės***

Druskingumo pokyčiai daro poveikį ne tik biologinei įvairovei, bet ir pakrančių žvejybos bei akvakultūros produktyvumui. Sūraus vandens skverbimasis į gėlavandenius



telkinius sumažina tinkamų buveinių prieinamumą tiek gėlavandenėms, tiek vidutinio druskingumo žuvų rūšims. Tai lemia rūšių pasiskirstymo pokyčius ir mažina tradiciškai žvejojamų išteklių prieinamumą. Akvakultūroje kintantis druskingumas kelia papildomų iššūkių – tampa sunku palaikyti optimalias sąlygas auginamoms rūšims. Tai tiesiogiai veikia jų augimą, sveikatą ir išgyvenamumą, o ilgai mažina sektoriaus produktyvumą (Mensah et al., 2025).

Šie pokyčiai taip pat didina socialinę ir ekonominę pažeidžiamumą pakrančių bendruomenėse. Pavyzdžiui, Gango ir Bramaputros deltose stebimas žemės ūkio produktyvumo mažėjimas tiesiogiai susijęs su drėkinimui naudojamo vandens druskėjimu. Tai rodo, kad druskingumo svyravimai daro įtaką ne tik ekosistemoms, bet ir žmonių pragyvenimo šaltiniams bei regiono vystymosi galimybėms (Guimbeau et al., 2024).

### ***Poveikio švelninimo ir prisitaikymo strategijos***

Norint veiksmingai spręsti druskingumo svyravimų keliamus iššūkius, būtinos integruotos valdymo strategijos. Viena iš jų – pakrančių augmenijos atkūrimas, ypač mangrovių ir jūros žolių bendrijų. Tokie ekosisteminiai sprendimai padeda stabilizuoti nuosėdas, padidina vandens sulaikymą ir gali sušvelninti staigius druskingumo pokyčius. Kita svarbi priemonė – pažangesnis gėlo vandens įtekėjimo ir druskingumo dinamikos modeliavimas. Šie duomenys leidžia pritaikyti valdymo praktiką vietos lygmeniu, pavyzdžiui, optimizuoti drėkinimo grafikus arba pasirinkti druskai atsparesnes žemės ūkio augalų veisles (Zhang et al., 2024).

Platesniu mastu itin svarbu mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją, siekiant paveikti pagrindines klimato kaitos priežastis, kurios daro įtaką tiek druskingumui, tiek kitiems hidrologiniams procesams. Investicijos į globalias stebėsenos sistemas ir bendruomenių lygmens prisitaikymo planus gali sustiprinti pažeidžiamų regionų atsparumą ilgalaikiams aplinkos pokyčiams (Guimbeau et al., 2024; Mensah et al., 2025).

### ***Druskingumo sukeltų pasiskirstymo pokyčių mechanizmai***

Druskingumo svyravimus daugiausia lemia gėlo vandens įtekėjimas, ledynų tirpimas ir kintantys kritulių režimai. Pakrančių regionuose, ypač netoli upių žiočių, dėl sezoninių bei klimato pokyčių stebimi reikšmingi druskingumo svyravimai (Guimbeau et al., 2024). Pavyzdžiui, Vakarų Australijos estuarijose hipersūrumas išsivysto tada, kai sumažėja gėlo vandens įtekėjimas, o garavimo lygis viršija papildomo vandens kiekį. Tokios sąlygos verčia jautrias rūšis migruoti į mažesnio druskingumo teritorijas arba lemia populiacijų mažėjimą (Hoeksema et al., 2023).

Jūrų organizmų gebėjimas toleruoti druskingumo pokyčius yra nevienodas ir daro įtaką jų paplitimui bei bendrijų sudėčiai. Eurihalinės rūšys, galinčios prisitaikyti prie plataus druskingumo intervalo, dominuoja aplinkose, kuriose druskingumas svyruoja. Priešingai, stenohalinės rūšys, kurioms reikalingas pastovus druskingumo lygis, dažnai traukiasi į





pastovesnes buveines arba patiria populiacijos nuostolių, kai aplinkos sąlygos nukrypsta nuo optimalių (Rahman & Hung, 2024).

### ***Poveikis rūšių pasiskirstymui ir akvakultūrai***

Druskingumo pokyčiai ženkliai keičia jūrinių rūšių erdvinį pasiskirstymą. Pavyzdžiui, giliavandenės rožinės krevetės *Parapenaeus longirostris* Viduržemio jūroje, reaguodamos į klimato atšilimą ir padidėjusį druskingumą, pakeitė savo arealą – populiacijos pasislinko šiaurės kryptimi ir į gilesnius vandens sluoksnius, siekdamos išvengti mažiau palankių aplinkos sąlygų (Mingote et al., 2024). Tokie poslinkiai trikdo vietos ekosistemas ir žuvininkystės veiklą, nes kinta plėšrūnų ir grobio santykis, keičiasi išteklių pasiskirstymas bei prieinamumas.

Druskingumo kintamumas kelia iššūkių ir akvakultūrai. Pavyzdžiui, šlakių reprodukcija yra itin jautri druskingumui – esant neoptimalioms sąlygoms sumažėja spermos judrumas ir apvaisinimo sėkmė, o tai neigiamai veikia peryklų veiklą, mažėja akvakultūros tvarumas (Rahman & Hung, 2024). Bangladeše laipsniškai didėjantis druskingumas prisidėjo prie akvakultūros produktyvumo mažėjimo ir pakrančių bendruomenių socialinio bei ekonominio pažeidžiamumo didėjimo (Guimbeau et al., 2024).

### ***Platesnis ekologinis ir socialinis bei ekonominis poveikis***

Druskingumo sukeltas rūšių pasiskirstymo pokytis daro daugiapakopį poveikį ekosistemų paslaugoms. Bendrijų sudėties pokyčiai veikia maistinių medžiagų apykaitą, pirminę produkciją ir jūrų mitybos tinklų stabilumą (Hoeksema et al., 2023). Pavyzdžiui, estuarinėse sistemose, kuriose susidaro hiperdruskingos sąlygos, mažėja rūšių gausumas, nyksta biologinė įvairovė ir kinta ekosistemų funkcionavimas. Ekonominiu požiūriu žvejyba, priklausanti nuo tam tikrų rūšių, susiduria su neapibrėžtumu, nes tikslinės populiacijos migruoja į mažiau prieinamas ar net visai nepasiekiamas teritorijas. Tai fiksuota Viduržemio jūroje, kur druskingumo ir temperatūros pokyčiai paveikė ekonomiškai svarbių rūšių, tokių kaip rožinės krevetės, prieinamumą (Mingote et al., 2024).

Be to, druskingumo svyravimai kelia ilgalaikių iššūkių akvakultūrai, nes sunku užtikrinti stabilią gamybą. Todėl reikalingos investicijos į prisitaikymo infrastruktūrą, technologijas ir valdymo praktiką, kurios padėtų sumažinti šių pokyčių neigiamą poveikį produkcijai ir ūkių tvarumui.

### ***Poveikio švelninimo strategijos ir ateities kryptys***

Siekiant spręsti druskingumo pokyčių poveikio jūrų rūšių paplitimui problemą, reikalingos integruotos valdymo strategijos. Siekiant sušvelninti klimato kaitą ir stabilizuoti aplinkos sąlygas, daugiausia dėmesio reikėtų skirti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo mažinimui. Pakrančių augalijos, pavyzdžiui, mangrovių ir jūros žolių, atkūrimas gali padėti sušvelninti druskingumo pokyčius ir suteikti buveinių jūrų organizmams (Guimbeau et al., 2024).

Akvakultūros operacijoms gali būti naudingos technologinės naujovės, pavyzdžiui, recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS) ir selektyvus druskai atsparių rūšių veisimas.



Geresnė druskingumo pokyčių stebėseną ir prognozavimo modeliai taip pat gali būti naudojami prisitaikančiose valdymo strategijose, užtikrinant akvakultūros ir žuvininkystės atsparumą druskingumo sukeltiems iššūkiams (Rahman & Hung, 2024).

### **1.2.3. Maistinių medžiagų apkrovos ir eutrofikacijos mechanizmai**

Perteklinės maistingosios medžiagos, ypač azotas ir fosforas, į vandens ekosistemas patenka su nuotėkiu iš žemės ūkio naudmenų, miesto ir pramonės nuotekų. Šios medžiagos skatina fitoplanktono ir dumblių augimą, dėl to prasideda dumblių žydėjimas, o jiems skylant mažėja deguonies kiekis (Reister et al., 2024). Meksikos įlankoje dėl į Misisipės upės baseiną patenkančių maistinių medžiagų susidarė viena didžiausių hipoksinių zonų pasaulyje, daranti poveikį žuvininkystei ir biologinei įvairovei (Day et al., 2024).

Klimato kaita didina maistingųjų medžiagų apkrovą dėl padidėjusio kritulių kiekio ir ekstremalių meteorologinių reiškinių, kurie didina maistingųjų medžiagų nuotėkį į vandens telkinius. Kylanti temperatūra dar labiau prisideda prie eutrofikacijos, nes spartėja dumblių augimas, keičiasi ekosistemų dinamika (Mensah et al., 2025). Dėl šio sudėtinio poveikio dažnėja ir ilgėja kenksmingų dumblių žydėjimas (KDŽ), išskiriančių toksinus, kenksmingus jūrų gyvūnijai ir žmonių sveikatai (Zhang et al., 2024).

### **Eutrofikacijos poveikis**

Eutrofikacija veikia vandens ekosistemas: sutrinka mitybos tinklai, mažėja biologinė įvairovė. Deguonies trūkumas verčia žuvis ir bestuburius migruoti arba žūti, o dugno buveinės kenčia dėl nuosėdų anoksijos (Reister et al., 2024). Pavyzdžiui, Čezapeiko įlankoje atlikti tyrimai atskleidė, kad dėl pasikartojančių hipoksinių reiškinių labai sumažėjo žuvų populiacijos (Zhang et al., 2024).

KDŽ kelia papildomų iššūkių, nes gaminasi toksinai, kurie veikia jūrų organizmus ir žmonių populiacijas. Tokios rūšys kaip *Karenia brevis* ir *Microcystis aeruginosa* siejamos su masiniu žuvų gaišimu, vėžiagyvių užterštumu ir žmonių kvėpavimo problemomis (Mensah et al., 2025). Ekonominiai nuostoliai dėl KDŽ yra dideli, ypač žuvininkystės, turizmo ir visuomenės sveikatos srityse.

### **Poveikio švelninimo strategijos**

Norint veiksmingai sumažinti maistinių medžiagų apkrovą ir eutrofikaciją, reikia integruoto vandens telkinių valdymo ir politinių intervencijų. Žemės ūkio nuotėkio mažinimas taikant tvarius ūkininkavimo metodus, tokius kaip tarpiniai pasėliai, buferinės zonos ir tikslusis tręšimas, gali gerokai sumažinti maistinių medžiagų patekimą (Reister et al., 2024). Miestų teritorijose gali būti naudingos pažangios nuotekų valymo technologijos, kuriomis pašalinamas maistinių medžiagų perteklius prieš išleidžiant nuotekas.

Šlapynių ir pakrančių zonų atkūrimas yra veiksmingas gamtinis sprendimas, padedantis mažinti eutrofikacijos riziką. Tokios ekosistemos natūraliai filtruoja maistines medžiagas, sulaiko nuosėdas ir gerina paviršinio vandens kokybę. Kartu svarbų vaidmenį atlieka ir socialiniai bei instituciniai veiksniai. Visuomenės švietimas ir politinės reformos, įskaitant



maistinių medžiagų valdymo reglamentus bei paskatas imtis tvarios praktikos, būtini siekiant spręsti pagrindines eutrofikacijos priežastis (Day et al., 2024).

### **1.3. Hidrologiniai ekstremumai ir jų pasekmės vandens kokybei**

#### **1.3.1. Sausrų ir vandens trūkumo priežastys**

Sausras pirmiausia lemia klimato pokyčiai, įskaitant mažėjantį kritulių kiekį ir kylančią temperatūrą, dėl kurių didėja evapotranspiracija. Dėl žmogaus veiklos, pavyzdžiui, netvaraus vandens paėmimo ir žemės degradacijos, šie gamtos reiškiniai dar labiau sustiprėja (Zucca et al., 2021). Pavyzdžiui, tokiuose sausringuose regionuose kaip Saudo Arabija dėl dešimtmečius trukusios perteklinio požeminio vandens gavybos ir netinkamos drėkinimo praktikos išseko svarbiausi vandeningieji sluoksniai, o tai lėmė dar didesnę natūralaus vandens trūkumo poveikį (DeNicola et al., 2015).

Klimato kaita dar labiau sustiprina šiuos iššūkius, nes keičiasi kritulių struktūra, todėl dažnėja ir didėja sausras. Persijos įlankos bendradarbiavimo tarybos šalys, kurioms būdingas itin sausringas klimatas, yra ypač pažeidžiamos. Dėl sparčios urbanizacijos ir gyventojų skaičiaus augimo šiuose regionuose didėja vandens poreikis, todėl mažėja ir taip riboti ištekliai. Šioms problemoms spręsti priimtos novatoriškos strategijos, pavyzdžiui, nuotekų perdirbimas ir gėlinimas, tačiau jos tebėra daug energijos reikalaujančios ir aplinkai kenksmingos (Moussa et al., 2025).

#### **1.3.2. Pablogėjusios vandens kokybės poveikis**

Prastėjanti vandens kokybė dažnai sutampa su jo trūkumu, nes ribotus išteklius vis labiau teršia žemės ūkio, pramonės ir miestų nuotekos. Dėl per didelio maistinių medžiagų kiekio upių baseinuose prasideda eutrofikacija, kenksmingas dumblių žydėjimas, susidaro hipoksinės sąlygos, dėl kurių sutrinka vandens ekosistemos ir kyla grėsmė biologinei įvairovei (Giri, 2021). Dėl Saudo Arabijoje su klimato kaita susijusių ekstremalių meteorologinių reiškinių didėja vandens užterštumas, į gėlo vandens šaltinius patenka patogenų ir teršalų (DeNicola et al., 2015).

Pablogėjusios vandens kokybės socialinės ir ekonominės pasekmės yra labai reikšmingos. Dėl prastos vandens kokybės pasunkėja valymo procesai, didėja išlaidos ir kenkiama visuomenės sveikatai. Pasaulyje per užterštą geriamąjį vandenį plintančios ligos yra pagrindinė sergamumo ir mirtingumo priežastis, ypač mažas pajamas gaunančiose bendruomenėse (Giri, 2021). Persijos įlankos bendradarbiavimo tarybos šalyse dėl vandens trūkumo mažėjanti žemės ūkio produkcija kelia grėsmę apsirūpinimo maistu saugumui, o tai rodo, kad vandens kokybės problemos gali turėti daugiapakopį poveikį (Moussa et al., 2025).

#### **Poveikio švelninimo strategijos**

Norint spręsti dėl sausras ir pablogėjusios vandens kokybės kylančias problemas, reikia integruotų metodų, derinant technologines naujoves, politikos reformas ir bendruomenės dalyvavimą. Tvaraus vandens valdymo praktika, pavyzdžiui, lietaus vandens surinkimas ir



veiksmingos drėkinimo sistemos, yra labai svarbi siekiant sumažinti priklausomybę nuo pernelyg eksploatuojamų vandens šaltinių (Moussa et al., 2025). Atkuriant natūralias ekosistemas, pavyzdžiui, pelkes, galima pagerinti vandens kokybę filtruojant teršalus ir reguliuojant hidrologinius ciklus (Zucca et al., 2021).

Vandens gėlinimo technologijas ir pažangius nuotekų valymo metodus galima taikyti regionuose, kuriuose trūksta vandens. Tačiau šios technologijos turi būti diegiamos tvariai, kad būtų kuo mažesnis poveikis aplinkai ir užtikrintas pažeidžiamų gyventojų prieinamumas. Tarptautinis bendradarbiavimas ir gebėjimų stiprinimas yra labai svarbūs siekiant dalytis žiniomis ir ištekiais, kad būtų galima spręsti vandens problemas visame pasaulyje (DeNicola et al., 2015).

## 2. Pasaulinio atšilimo poveikis akvakultūrai

### 2.1. Ekologinis ir ekonominis rūšių pažeidžiamumas

#### 2.1.1. Rūšių atsparumo skirtumai

Fiziologiniai ir medžiagų apykaitos procesai priklauso nuo stabilios vandens temperatūros. Nukrypimai nuo optimalių ribų gali pakenkti augimui, dauginimuisi ir išgyvenimui. Pavyzdžiui, atogrąžų rūšys, tokios kaip krevetės ir tilapijos, yra ypač jautrios temperatūros svyravimams, nes sutrinka fermentų veikla ir medžiagų apykaitos efektyvumas (Giri, 2021). Tyrimai rodo, kad ilgalaikis temperatūros, viršijančios rūšies tolerancijos ribas, poveikis gali lemti streso sukeltą mirtingumą ir mažesnę akvakultūros rūšių produktyvumą (DeNicola et al., 2015).

Tokiuose regionuose kaip Arabijos pusiasalis, kur vandens temperatūra kyla greičiau nei vidutiniškai pasaulyje, akvakultūra susiduria su dar didesniais iššūkiais. Aukštesnė temperatūra ne tik mažina ištirpusio deguonies kiekį, bet ir didina amoniako toksiškumą, o tai kelia dar didesnę grėsmę vandens būklei (Moussa et al., 2025). Šis poveikis pabrėžia prisitaikymo priemonių, tokių kaip temperatūrai atsparių rūšių selekcinis veisimas ir terminę aplinką reguliuojančių akvakultūros sistemų kūrimas, poreikį.

#### *Ligos ir parazitų dauginimasis*

Dėl aukštesnės vandens temperatūros pagreitėja patogenų ir parazitų gyvenimo ciklas, todėl vis dažniau kyla jų protrūkiai. Pavyzdžiui, *Vibrio* spp. sukeliamos ligos ir parazitai, jūrinės utėlės, klesti aukštesnėje temperatūroje ir atneša didelių ekonominių nuostolių akvakultūroje (Zucca et al., 2021). Padidėjęs šių grėsmių paplitimas užfiksuotas krevečių ūkiuose Pietryčių Azijoje ir lašišų ūkiuose Šiaurės Atlante, kur dėl kylančios jūros paviršiaus temperatūros pradėjo greičiau plisti infekcinės ligos (DeNicola et al., 2015).

Temperatūros ir ligų dinamikos ryšį dar labiau komplikuoja klimato sukelti vandens cheminės sudėties pokyčiai, pavyzdžiui, rūgštėjimas ir druskingumo pokyčiai. Dėl šių veiksnių gali susilpnėti natūralus atsparumas, todėl rūšys tampa jautresnės infekcijoms (Giri, 2021).



Taigi, norint veiksmingai valdyti ligas akvakultūroje, reikia derinti stebėsenos sistemas, biologinio saugumo priemones ir ligoms atsparių padermių mokslinius tyrimus.

### ***Poveikio švelninimo ir prisitaikymo strategijos***

Norint kovoti su visuotinio atšilimo poveikiu akvakultūrai, reikalingos aktyvios ir integruotos strategijos. Technologinės naujovės, pavyzdžiui, recirkuliacinės akvakultūros sistemos (RAS) ir tvenkiniai su kontroliuojama temperatūra, gali sušvelninti šiluminį stresą vandens rūšims (Moussa et al., 2025). Be to, įgyvendinant vakcinacijos programas ir tobulinant ligų aptikimo technologijas, galima valdyti patogenų riziką.

Politikos formuotojai ir suinteresuotosios šalys taip pat turi teikti pirmenybę aplinkos išsaugojimui, kad būtų stabilizuotos ekosistemos. Atkuriant mangroves ir pelkes galima apsaugoti akvakultūros ūkius nuo temperatūros svyravimų poveikio ir natūraliai filtruoti ligų sukėlėjus. Be to, siekiant išlaikyti šią gyvybiškai svarbią pramonės šaką besikeičiančiomis aplinkos sąlygomis, labai svarbu skatinti tarptautinį bendradarbiavimą klimato kaitai atsparių akvakultūros metodų srityje (Zucca et al., 2021).

#### ***2.1.2. Produktyvumo pokyčiai ir ekonominės pasekmės***

Pasaulinis atšilimas pažeidžia vandens ekosistemų pusiausvyrą ir tiesiogiai veikia žuvų ir vėžiagyvių populiacijas. Dėl kylančios jūros temperatūros, rūgštėjimo ir besikeičiančių vandenynų srovių kinta vandens rūšių buveinės ir fiziologija. Dėl vandenynų šiltėjimo vandenyne sumažėja deguonies prieinamumas vandenyje, o tai kelia stresą jūrų gyvūnijai ir lemia mažesnę augimo tempą bei reprodukcinę sėkmę (Baag & Mandal, 2022). Dėl šių stresą sukeliančių veiksnių labai sumažėja žuvų ištekliai ir vėžiagyvių derlius, o tai turi daugiapakopį poveikį akvakultūros pelningumui (Doney et al., 2009).

Dėl bendro klimato atšilimo ir rūgštėjimo poveikio smarkiai sutrinka moliuskų, pavyzdžiui, austrių ir moliuskų, kalcifikacijos procesai. Sumažėjus pH lygiui, jie negali augti ir išgyventi, todėl kyla pavojus, kad jie gali būti naudojami akvakultūroje. Tyrimai parodė, kad kalcifikuojantys organizmai yra ypač pažeidžiami mažėjančios karbonatinių jonų koncentracijos, kurią sukelia padidėjęs atmosferos CO<sub>2</sub> kiekis (Nienhuis et al., 2010). Tad akvakultūros veiklos vykdytojai susiduria su dvejopu iššūkiu – sušvelninti poveikį aplinkai ir išlaikyti gamybos lygį.

### ***Prastėjanti vandens kokybė ir ligų protrūkiai***

Vandens kokybė yra labai svarbus akvakultūros veiksnys, o dėl klimato kaitos ji dar labiau blogėja. Padidėjus jūros temperatūrai skatinamas KDŽ, dėl kurio sumažėja deguonies kiekis ir išsiskiria vandens rūšims kenksmingi toksinai. Šie žydėjimai, kuriuos skatina maistingųjų medžiagų turtingas nuotėkis ir šiltėjantys vandenys, siejami su masiniu žuvų gaišimu ir ekonominiais nuostoliais akvakultūroje (USEPA, 2014).

Be to, dėl aukštesnės vandens temperatūros greičiau plinta vandens rūšių ligos. Šiltesnėmis sąlygomis patogenai klesti, todėl akvakultūros sistemose dažniau kyla ligų protrūkiai. Pavyzdžiui, austrių akvakultūros tyrimai atskleidė, kad dėl šiltėjančios temperatūros



silpnėja austrių imunitetas ir didėja jautrumas infekcijoms, todėl mažėja jų išgyvenamumas ir gamybos apimtys (Neokye et al., 2024). Dėl šių veiksnių mažėja akvakultūros operacijų ekonominis gyvybingumas, nes didėja mirtingumas ir gydymo išlaidos.

### ***Prisitaikymo prie klimato kaitos išlaidos akvakultūroje***

Prisitaikymas prie klimato kaitos keliamų iššūkių reikalauja reikšmingų investicijų į infrastruktūrą, technologijas ir valdymo priemones. Siekiant išlaikyti akvakultūros gamybos apimtį, būtina diegti atsparias sistemas, tokias kaip temperatūros kontrolės įranga ar ligoms atsparesnių rūšių auginimas (Naylor et al., 2023). Tačiau šie sprendimai dažnai susiję su didelėmis finansinėmis sąnaudomis, kurios ypač apsunkina veiklą mažas pajamas gaunančiuose regionuose.

Prisitaikymo poreikį dar labiau sustiprina geografiniai pokyčiai – dėl kylančio jūros lygio ir ekstremalių orų reiškinių kai kuriose teritorijose tampa neįmanoma saugiai vykdyti akvakultūros. Tai verčia perkelti gamybą į stabilesnes zonas, o šis perkėlimas susijęs su papildomomis investicijomis.

Siekiant sumažinti aplinkosauginį pėdsaką, vis griežtėja reguliavimas: taikomos naujos taisyklės dėl atliekų tvarkymo, vandens naudojimo ir taršos kontrolės. Norint atitikti šiuos reikalavimus, būtina investuoti į pažangias technologijas ir valdymo sprendimus (Garlock et al., 2022).

### ***Regioninis ir pasaulinis poveikis***

Pasaulinio klimato atšilimo poveikis akvakultūros sektoriui pasiskirsto netolygiai. Didesnį poveikį patiria regionai, kuriuose ekosistemos yra ypač pažeidžiamos, pavyzdžiui, atogrąžų zonos. Šiuose regionuose didėjantis druskingumas, ilgėjantys sausrų laikotarpiai ir plintančios invazinės rūšys trikdo akvakultūros veiklą, ypač auginant tokias rūšis kaip krevetės ar tilapijos. Tuo tarpu vidutinio klimato regionuose klimato kaitos poveikis šiuo metu yra santykinai mažesnis. Vis dėlto šie regionai taip pat nėra apsaugoti nuo ilgalaikių pokyčių – pakitęs kritulių kiekis, dažnėjantys ekstremalūs orai ir jūros lygio kilimas ilginiui gali paveikti vandens išteklius ir gamybos stabilumą (Mahu et al., 2022).

Visame pasaulyje akvakultūros produktų paklausa nuolat auga dėl gyventojų skaičiaus didėjimo ir tvarių baltymų šaltinių poreikio. Dėl to susidaro paradoksali situacija, kai akvakultūros sektorius turi didinti gamybos apimtį, kad patenkintų paklausą, ir kartu spręsti prisitaikymo prie klimato kaitos ekonomines ir aplinkosaugos problemas. Nesugebant spręsti šių iššūkių, kyla pavojus, kad dar labiau padidės aprūpinimo maistu neužtikrintumas ir ekonominiai skirtumai (FAO, 2022).

### ***Politika ir valdymas***

Siekiant sušvelninti ekonominį visuotinio atšilimo poveikį akvakultūrai, labai svarbu sukurti veiksmingas politikos sistemas. Vyriausybės ir tarptautinės organizacijos turi įgyvendinti strategijas, kuriomis būtų remiama tvari praktika ir skatinami atsparių akvakultūros sistemų moksliniai tyrimai. Pavyzdžiui, investicijos į genetinius mokslinius tyrimus, skirtus





klimato kaitai atsparioms rūšims kurti, ir ankstyvojo perspėjimo apie KDŽ sistemas gali sumažinti pažeidžiamumą ir padidinti sektoriaus atsparumą (Handisyde et al., 2017).

Be to, integruojant akvakultūros politiką į platesnius klimato kaitos veiksmų planus, užtikrinamas koordinuotas požiūris į šių iššūkių sprendimą. Politika turėtų užtikrinti ekonomikos augimo ir aplinkos tvarumo pusiausvyrą, kad akvakultūros veiklos vykdytojai galėtų prisitaikyti nepažeisdami ekologinio vientisumo (Naylor et al., 2023).

## **2.2. Geografinis persiskirstymas ir klimato adaptacija**

### **2.2.1. Akvakultūros zonų pokyčiai**

Dėl klimato kaitos sukeltų aplinkos pokyčių keičiasi akvakultūros zonų išsidėstymas. Dėl kylančios vandenynų temperatūros rūšys ir ūkinė veikla slenka į naujas teritorijas, nes daugelis tradicinių akvakultūros regionų tampa mažiau tinkami dėl šiluminio streso ir prastėjančios vandens kokybės. Šį reiškinį apibūdina jūros aplinkos tropikalizacija – tropinės rūšys plečiasi į vidutinio klimato zonas, keisdamos ekosistemų struktūras ir formuodamos naujas bendrijas (Zarzyczny et al., 2024).

Vidaus vandenų akvakultūrai įtakos turi ne tik temperatūros kilimas, bet ir kintantis kritulių režimas bei gėlo vandens prieinamumas. Pavyzdžiui, estuarijų regionuose sumažėjęs gėlo vandens srautas ir padidėjęs druskingumas daro poveikį rūšims, priklausomoms nuo specifinių druskingumo sąlygų, ir riboja jų augimą bei produktyvumą (Priya et al., 2023). Dėl šių pokyčių akvakultūros veiklą vis dažniau tenka perkelti į aplinkos požiūriu stabilesnius regionus. Tokie perkėlimai susiję su papildomomis finansinėmis sąnaudomis bei būtinybe atlikti išsamius aplinkosaugos vertinimus, siekiant nustatyti zonas, kuriose galima tvariai vykdyti akvakultūrą ir kartu išvengti ekologinės degradacijos (Mdoe et al., 2025).

Šie pokyčiai kelia ne tik techninių, bet ir socialinių bei ekonominių iššūkių. Bendruomenės, kurių gyvenimas priklauso nuo akvakultūros, gali susidurti su priverstiniu persikėlimu arba darbo vietų praradimu. Tad itin svarbu įtraukti suinteresuotąsias šalis, organizuoti perkvalifikavimo programas ir skatinti alternatyvius pragyvenimo šaltinius, kad būtų sumažintas socialinis poveikis.

### ***Invazinės rūšys: ekologiniai ir ūkinės veiklos sutrikimai***

Klimato kaitos sukelti aplinkos pokyčiai palengvina invazinių rūšių plitimą ir įsitvirtinimą, ypač vidutinio klimato regionuose. Šių zonų tropikalizacija sudaro palankesnes sąlygas tokioms invazinėms rūšims kaip sparnapelekės (*Pterois* spp) ar tam tikri dumbliai, kurie gali išstumti vietinius organizmus ir trikdyti ekosistemų funkcionavimą (Woods et al., 2016). Tokie pokyčiai neigiamai veikia akvakultūros veiklą – norint išlaikyti gamybos stabilumą, tenka taikyti papildomas, dažnai brangias valdymo priemones. Be to, dėl kylančios temperatūros ir augančios tarptautinės prekybos vis dažniau plinta invaziniai patogenai. Šios grėsmės ypač aktualios jautrioms ir ekonomiškai svarbioms rūšims, tokioms kaip krevetės ir lašišos, kurios šiltėjančiuose vandenyse tampa jautresnės infekcijoms (Ross et al., 2023).



Siekiant sumažinti ligų protrūkių riziką, būtina investuoti į biologinio saugumo priemones: patobulintas stebėsenos sistemas, patogenams atsparių veislių kūrimą ir inovatyvias technologijas, įskaitant CRISPR pagrįstą genų redagavimą.

Invazinės rūšys daro poveikį ne tik ūkiui, bet ir natūralioms ekosistemoms. Pavyzdžiui, invaziniai dumbliai gali suformuoti tankius sąžalynus, kurie užstoja šviesą koraliniams rifams ir jūros žolių bendrijoms – svarbioms buveinėms daugybei jūrų rūšių. Tokie ekologiniai pokyčiai mažina biologinę įvairovę ir daro poveikį ne tik akvakultūrai, bet ir žuvininkystei, turizmui bei bendrai jūrų ekosistemų būklei.

### **2.2.2. Prisitaikymo galimybės**

Siekiant prisitaikyti prie šių iššūkių, reikia derinti technologines naujoves, politines intervencijas ir ekosistemomis pagrįstus metodus. Pagrindinės strategijos:

**1. Integruota daugiapakopė akvakultūra:** įtraukdamos įvairių trofinių lygmenų rūšis, IDAS sistemos sušvelnina invazinių rūšių poveikį ir didina ekologinį atsparumą (Mdoe et al., 2025). Šis metodas leidžia maksimaliai padidinti išteklių naudojimo efektyvumą, nes sistemoje perdirbamos maistinės medžiagos.

**2. Genetiniai patobulinimai:** selekcinės veisimo programos ir genominės technologijos padeda sukurti žuvų ir vėžiagyvių padermes, kurios atsparesnės kintančioms aplinkos sąlygoms, įskaitant temperatūros ir patogenų pokyčius (Ross et al., 2023).

**3. Patobulintos stebėsenos ir ankstyvojo perspėjimo sistemos:** realiuoju laiku renkami duomenys ir prognozavimo modeliai leidžia laiku numatyti aplinkos pokyčius bei invazinių rūšių protrūkius. Vis dažniau naudojami palydoviniai vaizdai ir dirbtiniu intelektu pagrįsta analitika, pavyzdžiui, stebint vandens temperatūrą ar dumblių žydėjimą (Wang et al., 2021).

**4. Tvari politika ir reguliavimas:** būtina įgyvendinti veiksmingus teisės aktus, skirtus biologinės įvairovės apsaugai ir invazinių rūšių kontrolei. Tarptautiniai susitarimai, pavyzdžiui, Jungtinių Tautų darnaus vystymosi tikslai, gali suteikti gaires nacionalinėms strategijoms ir skatinti valstybių bendradarbiavimą (Priya et al., 2023).

**5. Vietos bendruomenių įtraukimas:** ilgalaikis prisitaikymas neįmanomas be aktyvaus vietos gyventojų dalyvavimo. Švietimo, konsultavimo ir gebėjimų stiprinimo iniciatyvos padeda užtikrinti, kad prisitaikymo priemonės būtų ne tik veiksmingos, bet ir socialiai teisingos.

### **Pasaulinio atšilimo poveikis akvakultūros zonoms: regioniniai skirtumai**

Pasaulinio klimato atšilimo poveikis akvakultūros zonoms skirtinguose pasaulio regionuose labai skiriasi. Atogrąžų regionuose, kur jau dabar vyrauja aukšta temperatūra, klimato pokyčiai kelia didžiausius iššūkius – daugelis tradicinių rūšių tampa netinkamos auginti dėl šiluminio streso. Tuo tarpu vidutinio klimato regionuose stebimas atogrąžų rūšių



plitimas. Tai sukuria naujų diversifikavimo galimybių, tačiau kartu kelia riziką dėl galimo ekosistemų disbalanso ir konkurencijos su vietinėmis rūšimis (Zarzeczny et al., 2024).

Pakrančių regionai yra ypač pažeidžiami dėl kylančio jūros lygio ir dažnėjančių audrų, kurios kenkia infrastruktūrai ir trikdo akvakultūros gamybos ciklus. Atsižvelgdami į šias grėsmes, kai kurie ūkininkai perkelia veiklą į vidaus vandenį ar atviros jūros teritorijas, kur aplinkos sąlygos gali būti stabilesnės. Tačiau toks perkėlimas susijęs su didelėmis sąnaudomis ir logistiniais iššūkiais (Woods et al., 2016). Nors akvakultūra atviroje jūroje laikoma perspektyvia kryptimi, jai reikalinga pažangi inžinerinė įranga, atspari sudėtingoms jūrų sąlygoms, bei aplinkai draugiškos technologijos, mažinančios ekologinį pėdsaką.

Prisitaikymo galimybės taip pat priklauso nuo regionų ekonominių ir institucinių gebėjimų. Šiaurės Europa ir Šiaurės Amerika, turinčios stiprią valdymo sistemą ir išvystytą mokslinių tyrimų bazę, geriau pasirengusios prisitaikyti prie klimato pokyčių poveikio. Tuo tarpu mažas pajamas gaunantys regionai, ypač pasaulio pietuose, susiduria su didelėmis kliūtimis: ribotomis galimybėmis gauti finansavimą, technologijas bei žinias. Šių skirtumų mažinimas yra būtinas siekiant užtikrinti pasaulinį aprūpinimą maistu ir socialiai teisingą vystymąsi.

## Santrauka

Terminė stratifikacija ir deguonies trūkumas kelia rimtą grėsmę vandens ekosistemoms, turi tiek ekologinių, tiek ekonominių pasekmių. Norint sukurti veiksmingas klimato kaitos švelninimo strategijas, būtina suprasti šiuos pokyčius lemiančių fizinių, cheminių ir biologinių procesų sąveiką. Integruojant technologinę pažangą ir tvarią praktiką, galima geriau valdyti visuotinio atšilimo poveikį vandens sistemoms. Kylanti pasaulinė temperatūra kelia didelį iššūkį vandens rūšims: spartėja medžiagų apykaita, trikdomas augimas ir dauginimasis. Šie fiziologiniai pokyčiai kelia pavojų tiek pavienėms rūšims, tiek visų ekosistemų stabilumui, todėl būtinas išsamus šios dinamikos supratimas ir kryptingos švelninimo priemonės, padedančios apsaugoti vandens biologinę įvairovę ir palaikyti vandens kokybę klimato kaitos sąlygomis.

Druskingumo svyravimai, susiję su klimato kaita, daro poveikį pakrančių ir jūrų ekosistemoms, trikdo rūšių pasiskirstymą ir apsunkina akvakultūros veiklą. Tam tikrose vietovėse tai sukelia socialinių ir ekonominių sunkumų. Šiam poveikiui sušvelninti būtinas holistinis požiūris, apimantis ekologinius, socialinius ir politinius sprendimus bei tvarią išteklių vadybą. Maistinių medžiagų perteklius ir eutrofikacija išlieka viena pagrindinių grėsmių vandens ekosistemoms. Jos skatina žalingą dumblių žydėjimą, deguonies trūkumą ir ekosistemų degradaciją. Klimato kaitos švelninimo strategijos turi būti nukreiptos į maistinių medžiagų mažinimą, ekosistemų atkūrimą ir suinteresuotųjų šalių bendradarbiavimą siekiant ilgalaikio poveikio.

Vandens trūkumas, atsirandantis dėl klimato kaitos ir žmogaus veiklos, kelia grėsmę tiek ekosistemoms, tiek žmonių sveikatai bei saugumui. Dėl sausros, nenuspėjamų kritulių ir



blogėjančios vandens kokybės būtina plėtoti tvarią vandentvarkos praktiką, skatinti tarptautinį bendradarbiavimą ir diegti inovatyvius sprendimus, kurie padėtų užtikrinti ilgalaikį vandens prieinamumą. Klimato kaita daro didelį poveikį akvakultūrai – didėja temperatūros svyravimai, plinta ligos ir parazitai, o tai silpnina rūšių atsparumą. Šie veiksniai turi ilgalaikių pasekmių tiek aprūpinimui maistu, tiek pakrančių bendruomenių ekonominiam stabilumui. Sprendžiant šiuos iššūkius, būtinas glaudus mokslininkų, politikos formuotojų ir verslo atstovų bendradarbiavimas. Galiausiai dėl klimato kaitos kintantis akvakultūros zonų geografinis pasiskirstymas reikalauja aktyvių prisitaikymo veiksmų. Kylanti jūros temperatūra, pakitusios srovės ir kritulių režimas lemia veiklos perkėlimą ir naujų, tvarių sprendimų paiešką. Derinant vietos ekologines žinias su šiuolaikiniais moksliniais pasiekimais, galima užtikrinti akvakultūros pramonės atsparumą ir jos indėlį į pasaulinį maisto saugumą.

## 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. Retrieved from <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* (pp. 51–59). Elsevier. <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.pocan.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>
- Sundararaman, 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. <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>
- Zarzyczny, 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>
- 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>