

OPĆA HIDROBIOLOGIJA

Sadbera Trožić-Borovac, Mahir Gajević, Renata Bešta-Gajević, Aldijana Mušović



Opća Hidrobiologija

Prvo izdanje

Sadbera Trožić-Borovac, Mahir Gajević, Renata Bešta-Gajević, Aldijana Mušović

Sarajevo 2026.

Izdavač

Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Sarajevu

Za Izdavača

Prof. dr. Nusret Drešković

Recenzenti:

Prof. dr. Zlatko Mihaljević

Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet

Prof. dr. Suad Hamidović

Univerzitet u Sarajevu Poljoprivredno-prehrambeni fakultet

Prof. dr. Senad Šljuka

Univerzitet u Sarajevu Prirodno-matematički fakultet

Grafička priprema i dizajn

Prof. dr. Sadbera Trožić-Borovac

Lektor i korektor

Dipl. bibl.i dipl. komp. Biljana Stojanović

Štampa

Cooron's d.o.o. Sarajevo

Tiraž

30 primjeraka

Odlukom Vijeća Univerziteta u Sarajevu - Prirodno-matematičkog fakulteta broj 01-06-2649/5-2025 od 05.02.2026. ovaj udžbenik je dobio saglasnost.

Zabranjeno je svako neovlašteno kopiranje i umnožavanje rukopisa.

ISBN 978-9926-594-00-8 CIP zapis dostupan u COBISS sistemu Nacionalne i univerzitetske biblioteke BiH pod ID brojem 68192006

„Rukopis predstavlja metodološki kvalitetno i cjelovito oblikovan univerzitetski udžbenik koji temeljne ekološke principe dosljedno tumači kroz funkcionalne procese u vodenim ekosistemima. Posebno se ističe sistematična obrada hidrobionata, njihove morfološke i fiziološke adaptacije, kao i analiza strukture i dinamike akvatičnih biocenoza. Jasno je prikazano kruženje organske materije i protok energije kroz trofičke nivoe, čime se studentima omogućava razumijevanje povezanosti abiotičkih i biotičkih faktora u akvatičnim sistemima. Djelo daje snažan doprinos razumijevanju funkcionisanja planktonskih, bentoskih i nektonskih zajednica te njihovog značaja u održivom upravljanju vodnim resursima i zaštiti voda. Rukopis „Opća hidrobiologija“ u potpunosti ispunjava naučne i didaktičke kriterije univerzitetskog udžbenika i preporučuje se za objavljivanje i korištenje u nastavi.“

Prof. dr. sc. Zlatko Mihaljević

Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet

„Rukopis sistematično i pregledno obrađuje vodu kao životnu sredinu, fizikalno-hemijske osobine akvatičnih sistema, mikrobiologiju voda i adaptivne strategije organizama vezanih za vodeni medij. Posebnu vrijednost predstavljaju poglavlja o biocenzama, uključujući neuston, perifiton, plankton, nekton i bentos, kao i njihovu ulogu u procesima autopurifikacije i ekološke ravnoteže. Aplikativni dio rukopisa obuhvata monitoring, procjenu kvaliteta voda, biološke indekse, invazivne vrste, zarazne bolesti povezane s vodom i mjere zaštite, čime se teorijska osnova uspješno povezuje sa savremenim zahtjevima zaštite i očuvanja vodnih ekosistema. Rukopis „Opća hidrobiologija“ u potpunosti zadovoljava kriterije savremenog univerzitetskog udžbenika i preporučujem njegovo objavljivanje.“

Prof. dr. Saud Hamidović

Univerzitet u Sarajevu Poljoprivredno-prehrambeni fakultet

„Udžbenik uspješno integriše klasična hidrobiološka znanja s modernim ekološkim i upravljačkim pristupima. Na jasan i pregledan način obrađeni su hidrobionti, njihova sistematika, adaptacije i funkcionalna uloga u različitim tipovima akvatičnih ekosistema. Posebno se ističe povezivanje strukture biocenoza sa procjenom ekološkog statusa voda, primjenom bioloških indikatora i principima Okvirne direktive o vodama. Autori uspijevaju teorijske koncepte dovesti u direktnu vezu sa praksom monitoringa i savremenim izazovima upravljanja vodnim resursima, čime rukopis dobija izraženu aplikativnu i obrazovnu vrijednost. Smatram da rukopis „Opća hidrobiologija“ predstavlja vrijedan doprinos visokoškolskoj literaturi i da ga treba objaviti kao univerzitetski udžbenik.“

Prof. dr. Senad Šljuka

Univerzitet u Sarajevu Prirodno-matematički fakultet

PREDGOVOR

Udžbenik „Opća hidrobiologija“ nastao je kao rezultat dugogodišnjeg nastavnog, naučnoistraživačkog i stručnog rada autora u oblasti ekologije i biologije voda. Osnovna namjena ovog udžbenika jeste da studentima biologije, kao i studentima srodnih prirodnih i biotehničkih nauka, pruži sistematičan i savremen pregled temeljnih principa funkcionisanja vodenih ekosistema te olakša razumijevanje i usvajanje osnovnih i primijenjenih znanja iz oblasti hidrobiologije.

Knjiga je koncipirana tako da prati razvoj hidrobiologije kao naučne discipline – od historijata hidrobiologije i pregleda hidrobioloških istraživanja u Bosni i Hercegovini, do analize vode kao specifične životne sredine i fizičko-hemijskih faktora koji određuju uslove života u slatkim i slanim vodama. Posebna pažnja posvećena je hidrobiontima i njihovim morfološkim, fiziološkim i ekološkim adaptacijama, čime se omogućava razumijevanje povezanosti organizama i abiotičkih uslova sredine.

U knjizi se razmatra raznovrsnost vodenih ekosistema – mora i okeana, kopnenih stajaćih i tekućih voda te podzemnih voda – kroz analizu njihovih abiotičkih faktora i biocenoza. Naglašava se uloga svih organizama u izgradnji i održavanju strukture i funkcije vodenih ekosistema, uključujući mikroorganizme kao sastavni dio procesa kruženja organske materije i protoka energije. Aplikativna hidrobiologija tumači se kao interdisciplinarni okvir koji povezuje ekološke procese, biološku produkciju i savremene metode monitoringa sa principima zaštite i održivog korištenja vodnih resursa. Obrađuju se pitanja zagađenja i zaštite voda, uz prikaz procjene ekološkog stanja u skladu s konceptima Okvirne direktive o vodama (ODV), čime se teorijska znanja povezuju s njihovom praktičnom primjenom.

Hidrobiologija je široko i interdisciplinarno područje. Njena raznovrsnost predstavlja temelj za cjelovito razumijevanje vode kao životne sredine. Poseban naglasak stavljen je na savremene izazove, uključujući klimatske promjene, degradaciju i izvore zagađenja koji utiču na stabilnost vodenih ekosistema i raspoloživost vodnih resursa. U tom kontekstu, udžbenik je namijenjen studentima, ali i stručnjacima koji se bave korištenjem i zaštitom voda, kao podrška razumijevanju složenih procesa koji oblikuju budućnost vodenih sistema.

Autori

Sarajevo, 2026. godine

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1 Historijat razvoja hidrobiologije kao nauke.....	3
1.1.1 Hidrobiološka istraživanja u Bosni i Hercegovini.....	8
2. Zadaci hidrobiologije.....	11
3. Voda kao životna sredina.....	13
4. Fizičko-hemijski parametri vode.....	18
5. Hidrosferni ciklus (ciklus kruženja vode).....	36
5.1. Potrošnja vode.....	39
6. Hidrobionti i njihove adaptacije.....	41
6.1 Mikroorganizmi, raznovrsnost i adaptacije.....	43
6.2 Biocenoze vodenih ekosistema i njihove adaptacije.....	48
6.2.1 Neuston i perifiton.....	49
6.2.2 Plankton, sastav i adaptacije.....	50
6.2.3. Nekton, sastav i adaptacije.....	59
6.2.4. Bentos, sastav i adaptacije.....	62
7. Akvatični ekosistemi hidrosfere.....	77
7.1 Mora i okeani.....	78
7.1.1. Uslovi i život na morskom sedimentu.....	86
7.1.2 Biocenoza mora i okeana.....	89
7.1.3 Estuariji.....	98
7.1.4. Lanac ishrane i mreža ishrane u morima.....	99
7.2 Kopnene vode.....	100
7.2.1. Tekućice.....	103
7.2.1.1. Karakteristike zona tekućica.....	108
7.2.1.2 Dimenzije, ekološka zonacija i rangiranje vodotoka.....	116
7.2.2. Stajaćice.....	120
7.2.2.1 Podjela jezera.....	121
7.2.2.2 Reljef jezera.....	126
7.2.2.3 Zone jezera: strukture i funkcije.....	129
7.2.2.4 Biocenoza jezera.....	131
7.2.2.5 Bare, močvare i tresetišta.....	138
7.2.2.6 Ribnjaci.....	143
7.2.2.7 Sukcesija jezerskog tipa.....	144
7.2.3. Kruženje organske materije i lanac ishrane u vodenim ekosistemima.....	146
7.2.4. Podzemne vode.....	152
7.2.4.1. Podjela podzemnih voda prema nastanku.....	155
7.2.4.2. Vertikalni raspored i karakteristike podzemnih voda.....	156
7.2.4.3. Živi svijet podzemnih voda.....	157
7.2.4.4. Mikrobiologija podzemlja.....	159
8. Aplikativna hidrobiologija.....	161
8.1. Oblasti aplikativne hidrobiologije.....	162
8.2. Statističke metode u hidrobiologiji.....	170
8.3. Monitoring i procjena kvaliteta vode.....	173
8.3.1. Fitoplankton.....	174
8.3.2. Nekton/ribe.....	175
8.3.3. Bentos.....	175
8.3.3.1. Diatomeae i makrofite.....	175
8.3.3.2. Makrozoobentos.....	178

8.3.4. Monitoring i statističke metode u istraživanju jezera i mora.....	182
8.4. Zarazne bolesti i voda.....	184
8.5. Mjerenje organske produkcije u vodenim ekosistemima.....	187
8.6. Biološki indeksi u okviru EU Okvirne direktive o vodama: primjena i interpretacija	189
8.6.1 Hidromorfologija.....	191
9. Zagađenje vodenih ekosistema – izvori i posljedice.....	195
9.1. Biološko zagađenje voda.....	199
9.1.2 Akvakultura.....	201
9.1.3. Uticaj klimatskih promjena na zagađenje vodenih ekosistema.....	202
9.1.4. Autopurifikacija i uloga hidrobionata.....	203
10. Zaštita voda.....	205
10.1. Prirodni (biološki) tretmani otpadnih voda.....	209
10.2. Zakonska legislativa u oblasti zaštite voda.....	212
10.3. Okvirna direktiva o vodama (2000/60/EC, WFD).....	212
10.4. Analiza pritiska na vodne ekosisteme.....	214
10.5. Uloga hidrobiologije u zaštiti i zagađenju voda.....	216
11. Literatura.....	221

1. Uvod

Voda podržava raznovrsnost životnih oblika. Organizmi su se kroz evoluciju adaptirali na život u vodenom staništu, a te adaptacije su raznovrsne i svojstvene pojedinim skupinama. Veliki broj organizama vezan je za vodeno stanište, ali naseljava terestričnu sredinu, što ukazuje na jedinstvenost prirode kao cjeline. Biodiverzitet vodenih staništa u mnogome je uvjetovan stanjem kopna i ukupnim ekološkim uvjetima u području na kojem se rasprostiru. Vezanost vodenih staništa za kopno uvjetovana je njihovim podzemnim tokovima i velikim poriječjima koja dreniraju velike površine kopna. Kao dio Zemljinog sistema, hidrosfera je ključna jer voda u njenom sastavu omogućava nastanak i opstanak života. Neke od značajnih uloga hidrosfere su:

- a) glavni dio žive ćelije: voda čini najmanje 75% svake ćelije u živom biću. Ovo omogućava ćeliji da funkcioniše normalno. Većina hemijskih reakcija u živim organizmima odvija se uz učešće supstanci otopljenih u vodi. Bez vode, nijedna ćelija ne bi preživjela niti bi mogla obavljati svoje uobičajene funkcije;
- b) voda kao životna sredina: hidrosfera služi kao vitalno stanište za brojne biljke i životinje. Voda otapa različite nutrijente, uključujući nitrati, nitrite i amonijum-ione, kao i gasove poput ugljen-dioksida i kiseonika. Ova hemijska jedinjenja neophodna su za opstanak života u vodi. Specifična toplota vode doprinosi regulaciji klimatskih uvjeta;
- c) regulacija temperature: vodi je potrebno dosta vremena da se zagrije i ohladi. Time doprinosi regulaciji temperatura na planeti, održavajući ih u rasponu pogodnom za postojanje života. Ovoj regulaciji naročito doprinosi veliki toplotni kapacitet vode, posebno slane vode, zbog ogromnih površina okeana;
- d) formiranje atmosfere: hidrosfera je dala značajan doprinos razvoju današnjeg sastava atmosfere; smatra se da se ova pojava dogodila prije oko 400 miliona godina;
- e) zadovoljenje ljudskih potreba: osim za piće, voda se koristi za kućne potrebe (kuhanje, kupanje, čišćenje) i industriju. Također se koristi za transport, poljoprivredu i proizvodnju hidroenergije.

Na planeti Zemlji živa bića su rasprostranjena u životnim oblastima koje nastaju djelovanjem abiotičkih i biotičkih faktora. U tim odnosima voda se izdvaja kao specifična i složena životna sredina, čije osobine određuju strukturu, funkcioniranje i opstanak vodenih organizama. Za svaku vrstu ili populaciju karakterističan je prostor koji ispunjava adekvatne uvjete za opstanak. Ovi uvjeti se ogledaju kroz specifične klimatske, orografske, edafske i fizičko-hemijske faktore. Kao reakcija na abiotičke uvjete nastaje posebna prostorna i vremenska organizacija živih bića, odnosno njihova raznovrsnost u vremenu i prostoru. Za protoplazmu ćelije i osnovne biohemijske procese neophodni su voda, odgovarajuća temperatura i gasovi. Kiseonik omogućava oksidaciju i oslobađanje energije u ćeliji, dok je ugljen-dioksid neophodan u procesu fotosinteze. Neophodne su i mineralne materije, soli azota i fosfora iz vanjske sredine te sunčeva svjetlost. Svi ovi faktori, koji su neophodni za odvijanje života, a potječu iz vanjske sredine, označavaju se kao ekološki faktori. Uticaji faktora vanjske sredine na odvijanje

životnih procesa organizama, reakcije organizama na te uticaje, te odnosi između živih bića, predstavljaju predmet istraživanja ekologije. Istraživanja usmjerena na vodena staništa i procese koji se odvijaju kroz reakcije, koakcije i interakcije predmet su posebne ekološke discipline – hidrobiologije. Ekologija je ujedno i „ekonomija žive prirode“, tj. nauka o proizvodnji i raspodjeli organske materije u prirodi i održavanju živog svijeta. Upravo zato, jedan od temeljnih zadataka ekologije jeste prepoznavanje i proučavanje ekoloških faktora koji oblikuju životne uvjete za sve organizme. Ekološki faktori su različita djelovanja prirodne sredine kojima su izloženi živi organizmi. Oni se međusobno uvjetuju i djeluju kao cjelina te se dijele na: abiotičke, klimatske (svjetlost, temperatura, vlažnost), edafske i orografske, biotičke (uzajamne odnose između organizama). Način i opseg u kojem organizmi mogu podnijeti promjene ekoloških faktora definiše se njihovom ekološkom valencom.

Ekološka valenca je amplituda variranja jednog ekološkog faktora u čijim je granicama moguć opstanak određene vrste. Ona označava sposobnost vrste da se svojom unutrašnjom građom i fiziologijom prilagodi uvjetima vanjske sredine. Po širini ekološke valence, organizmi se dijele na: stenovalentne organizme koji imaju usku ekološku valencu; mezovalentne organizme, žive u srednjim rasponima ekoloških faktora i eurivalentne organizme koji imaju široku ekološku valencu. Ekološka valenca vrste ostvaruje se unutar uslova koje pruža njena životna sredina, pa je potrebno precizno odrediti šta čini životnu sredinu. Životna sredina predstavlja ukupnost faktora kojima su organizmi izloženi i na koje reaguju. Ona određuje okvire opstanka organizama, dok ekološka niša opisuje njihovu specifičnu ulogu i položaj unutar tih okvira. U skladu s ulogom svakog organizma u prirodi, ekološka niša predstavlja položaj ili status organizma u ekosistemu, koji proizilazi iz njegovih morfoloških adaptacija, fizioloških reakcija i ponašanja. Ona ukazuje ne samo na to gdje organizam živi nego i šta radi. Stanište je „adresa“, a niša „profesija“ datog organizma. Organizmi su putem različitih oblika koakcija i interakcija međusobno povezani te se udružuju u sve složenije stepene ekološke integracije, od populacije, preko biocenoze, do ekosistema, bioma.

Populacija obuhvata grupu jedinki iste vrste koja u datom vremenu naseljava određeni prostor i vrši aktivnu razmjenu genetičkog materijala dajući plodno potomstvo. Populacija je reproduktivni, genetički i ekološki sistem te objektivna biološka kategorija. Osnovni atributi populacije su gustina i distribucija.

Biocenoza je oblik jedinstva živih organizama sa svojim općim svojstvima, kao rezultatom evolucije i zajedničke egzistencije. Ona predstavlja integrirani i zakonito nastali skup populacija biljaka i životinja na određenom prostoru. Osnovne karakteristike su kvalitativni sastav vrsta i njihov vremenski raspored.

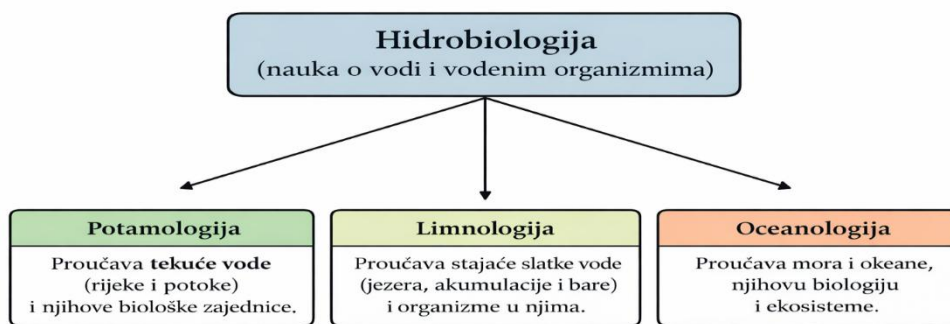
Ekosistem (= geobiocenoza = biogeocenoza) predstavlja jedinstvo fizičkih, hemijskih i bioloških procesa povezanih u cjelinu, biocenoze i njenog staništa (biotopa), koji se međusobno uvjetuju i čine integriran, dinamičan sistem (npr. bara, jezero, rijeka, šuma). Kroz ekosisteme neprekidno kruži materija i protiče energija, a oni imaju sposobnost samoregulacije. U takvim dinamičnim sistemima pod uticajem specifičnih klimatskih, orografskih, edafskih i fizičko-hemijskih faktora, a kao reakcija na abiotičke uvjete nastaje poseban raspored živih organizama ili raznovrsnost organizama u vremenu i prostoru. Iznad ekosistema, ekološke integracije obuhvataju biome kao velike regionalne cjeline i, na najvišem nivou, biosferu, ukupnost života

povezanog s atmosferom, hidrosferom i litosferom kroz kruženje vode i materije. Razumijevanje ovih hijerarhijskih veza važno je za pozicioniranje hidrobiologije kao nauke o vodenim ekosistemima.

1.1 Historijat razvoja hidrobiologije kao nauke

Hidrobiologija je grana biologije koja se bavi proučavanjem života u vodenim ekosistemima, uključujući slatke i slane vode. Vodena sredina kao jedna od životnih sredina, uslijed specifičnog sastava koji je rezultat rastopljenosti gasova, inicirala je adaptacije živih organizama koje su omogućile uspješnu egzistenciju. Ove adaptacije su prikazane morfološko-anatomskom građom i fiziologijom. Uslijed potrebe upoznavanja vode kao životne sredine, krajem 18. vijeka počinje razvoj posebne naučne discipline - hidrobiologije. Njena historija seže unazad vjekovima, ali se kao naučna disciplina razvila postepeno. Hidrobiologija se odnosi na proučavanje organizama koji žive u vodi, posebno što se tiče njihovih specifičnih bioloških prilagodbi na vodeno stanište (starogrčki ὕδωρ *hydor* = "voda, vodene površine" i βίος *bios* = "život" i *logos* - nauka). Na primjer, prilagodba planktonskih organizama na plutanje u otvorenoj vodi ili prilagodba vodenih organizama na spektar hrane ili uslove supstrata u vodi predstavljaju hidrobiološki sadržaj. Metodološki i tehnički aspekti ekologije vodenih organizama, u kontekstu pročišćavanja otpadnih voda, opisani su pod pojmom hidrobiologija. Termin se obično koristio i koristi za organizme iz "kopnenih voda", kao i za biologiju morskih organizama. Pojam hidrobiologija korišten je kolokvijalno i znanstveno u 20. vijeku i bio je ili se tumači u raznim užim ili širim terminima. Udžbenici koji su u naslovu imali ili još uvijek imaju pojam hidrobiologija obično prenose znanja koja pripadaju sadržajnom području današnje limnologije ili su usmjerena na neko specijalističko područje (npr. tehnička hidrobiologija). Tipični i (ranije) rašireni udžbenici i metodike bili su, na primjer, oni Ernsta Hentschela (1923), Sergeja Sernova (1958), Arna Wetzela (1969), Otta Kleea (1985), Dietricha Uhlmanna (1988) i Jürgena Schwoerbela (1994). Rani počeci, vezani su za period antičke Grčke i Rima. Filozofi poput Aristotela proučavali su morski život, zabilježivši svoja zapažanja o ribama i drugim vodenim organizmima. U srednjem vijeku proučavanje vodenih ekosistema stagniralo je, ali su se i dalje prenosile informacije o ribolovu i vodenim životinjama. U periodu 17. i 18. vijeka porast je interesovanja za prirodne nauke. Prve detaljne studije o moru i slatkovodnim organizmima počinju da se javljaju u djelima Carl Linnaeus (1707–1778), koji je razvio sistem klasifikacije organizama, uključujući i vodene. U periodu 19. vijeka bilježi se osnivanje zoologije, te proučavanje vodenih organizama postaje dio šireg okvira biologije. Kao sastavni dio proučavanja ekosistema dalji uvid u vodene ekosisteme kroz Charlesa Darwina koji je svojim radovima o evoluciji doveo do bolje spoznaje o ekološkim odnosima u vodenim sredinama. Sredinom 19. vijeka hidrobiologija se razvija na naučnoj osnovi, a prve podatke o živom svijetu u vodi nalazimo u knjigama Indijaca, Kineza i Grka. Prvi podaci su bili opisnog karaktera o naseljima riba, biljaka, rakova itd. Dalji razvoj istraživanja voda tekao je uporedo sa razvojem optičkih sprava, pa se otkriće praživotinja upravo dovodi u kontekst upoznavanja mikroorganizama vodenih staništa. Kasnije, sa usavršavanjem optičkih sprava, upoznaje se zajednica planktona (P. Mäller) prvim otkrićem račića. Ubrzo se osnivaju hidrobiološke stanice u Rusiji i Italiji, a hidrobiološke stanice kopnenih voda u Švicarskoj, Njemačkoj i Mađarskoj.

U toku 20. vijeka istaknut je razvoj naučnih metoda, tj. početak uvođenja metodologije u istraživanje hidrobiologije koje omogućava preciznije proučavanje ekosistema. Istaknuto je formiranje različitih naučnih društava i časopisa posvećenih hidrobiologiji kao što je „*Limnology and Oceanography*“. Savremeni trendovi podrazumijevaju multidisciplinarni pristup. Hidrobiologija se danas integriše s drugim disciplinama poput genetike, ekologije i klimatologije. Koriste se savremene tehnologije, poput daljinskog istraživanja i molekularne biologije, za bolje razumijevanje vodenih ekosistema. Hidrobiologija se nastavlja razvijati, posebno s obzirom na izazove poput klimatskih promjena, zagađenja i gubitka biodiverziteta. U okviru proučavanja životnih zajednica vodenih ekosistema, hidrobiologija se prema tipu vodenih staništa dijeli na: potamologiju, limnologiju i oceanologiju (shema 1.1.).



Shema 1.1. Podjela hidrobiologije prema oblastima istraživanja

a) Potamologija je grana hidrobiologije (limnologije) koja se bavi proučavanjem rječnih ekosistema. Obuhvata rijeke, potoke, izvore i njihovu okolinu. Istražuje fizičke, hemijske i biološke karakteristike tekućih voda. Potamologija analizira protok vode, brzinu strujanja, dubinu, sediment i oblik riječnog korita. Proučava kvalitet vode kroz hemijske parametre, pH vrijednost, koncentraciju nutrijenata i prisustvo zagađivača. Ovi faktori utiču na biocenozu, njihov diverzitet i stabilnost. Biološka istraživanja obuhvataju organizme rječnih ekosistema: bakterije, viruse, alge, mahovine, više biljke, beskičmenjake i kičmenjake, posebno ribe. Analiziraju se odnosi između vrsta, kao i interakcije organizama i njihovog staništa, uz uvažavanje uticaja ljudskih aktivnosti. Historijat potamologije povezan je s razvojem hidroloških istraživanja. Još u antičko doba rijeke su proučavane kao izvori života, trgovine i poljoprivrede. U 17. i 18. vijeku razvijaju se temelji naučne hidrologije kroz proučavanje padavina i hidrološkog ciklusa. U 19. vijeku pojam ekologije usmjerava pažnju na odnose organizama i njihove sredine. Tokom 20. vijeka razvijene su metode za mjerenje kvaliteta vode, protoka i sedimentacije, kao i istraživanja biodiverziteta.

Savremena potamologija koristi napredne tehnologije, uključujući satelitska snimanja, GIS i matematičke modele. Istražuje uticaje zagađenja, regulacije vodotokova, izgradnje brana i klimatskih promjena. Posebna pažnja posvećena je invazivnim vrstama i zaštiti autohtonih populacija. Značaj potamologije ogleda se u razumijevanju složenih procesa u rječnim ekosistemima. Njena saznanja koriste se u upravljanju i zaštiti vodnih resursa, ribarstvu i navodnjavanju. Posebno je važna u kontekstu savremenih ekoloških izazova i globalnih promjena.

b) **Limnologija**, kao nauka o stajaćim vodama, ima višestruk značaj jer doprinosi razumijevanju raznolikosti života u slatkovodnim ekosistemima i važnosti očuvanja ovih staništa. Proučava kako zagađenje, klimatske promjene i urbanizacija utiču na slatkovodne ekosisteme te pomaže u upravljanju ribljim resursima i održivoj proizvodnji ribe. Limnologija je ključna za razumijevanje i očuvanje slatkovodnih ekosistema, a njen značaj raste s obzirom na globalne ekološke promjene. Pojam „limnologija“ ustanovio je švicarski istraživač Forel, istražujući jezera na području Švicarske, čime je postavio temelje intenzivnim studijama koja su kasnije uslijedila. Zatim se pojavljuju i drugi istraživači u Evropi, provodeći istraživanja usmjerena na upoznavanje balkanskih jezera i riba. Forel je zaslužan za otkriće strujanja gustine koja se javljaju u alpskim jezerima usljed niskih temperatura i dotoka vode iz glečera. Limnologija je podoblast hidrobiologije koja se bavi naučnim proučavanjem slatkih voda, posebno jezera i bara. Disciplina uključuje biološke, fizičke i hemijske aspekte jezerskih i barskih voda. Istraživački centri osnovani su u Njemačkoj, Švedskoj, Austriji i Engleskoj (tabela 1.2.), gdje se formiraju prve limnološke škole. F. Ruttner 1908. godine nudi prvi kurs limnologije, a 1940. objavljuje „Osnove limnologije“, udžbenik koji postaje standard u Evropi i Sjevernoj Americi. Širenjem po Evropi disciplina dobija značajne doprinose iz Francuske, Italije, Španije i Poljske, a posebno se ističe R. Margalef, koji uvodi ekološku teoriju u limnologiju. Paralelno se u Rusiji, Japanu i Norveškoj razvijaju vlastite tradicije, čime limnologija već početkom 20. vijeka prerasta u globalnu disciplinu. Sjeverna Amerika ubrzo postaje novo središte limnologije. U Sjedinjenim Državama J. G. Needham 1907. godine uvodi limnologiju na Cornell University, a godinu kasnije drži prvi kurs. Needham i J. T. Lloyd 1911. objavljuju prvi udžbenik „Život unutrašnjih voda“. Univerzitet Wisconsin–Madison, zahvaljujući E. A. Birgeu i C. Judayu, postaje poznat kao „rodno mjesto limnologije“ u Sjedinjenim Američkim Državama. Kanada daje niz pionira (Hynes, Vallentyne, Rigler) čija istraživanja imaju ključnu ulogu u razumijevanju produktivnosti jezera i eutrofikacije. Rani radovi bili su usmjereni na opis i biologiju vodenih zajednica, dok kasniji autori, poput Hutchinsona i Margalefa, usmjeravaju limnologiju prema sistemskoj ekologiji i konceptualnim modelima. Tabela ilustruje evoluciju discipline od lokalnih istraživanja jezera do globalnog naučnog pokreta sa širokom ekološkom i primijenjenom dimenzijom.

Oko 39 profesionalnih limnoloških organizacija postoji u zemljama širom svijeta. Međunarodno udruženje za teorijsku i primijenjenu limnologiju (*Societas Internationalis Limnologiae*) osnovali su 1922. godine E. Naumann i A. Thienemann, a ono predstavlja međunarodnu organizaciju za limnologiju i limnologe (www.limnology.org). Ime je promijenjeno 2007. godine u Međunarodno limnološko društvo. Njegova misija je „raditi širom svijeta na razumijevanju kopnenih vodenih ekosistema i koristiti znanje stečeno istraživanjem za upravljanje njima“. Svake dvije do tri godine održavaju se kongresi u različitim zemljama uz učešće limnologa iz cijelog svijeta. Značaj limnologije je višestruk kroz pomoć u razumijevanju raznolikosti života u slatkovodnim ekosistemima (prvenstveno stajaćim vodama) i važnosti očuvanja ovih staništa. Savremeni značaj limnologije dodatno raste u kontekstu globalnih klimatskih i antropogenih promjena koje ugrožavaju slatkovodne resurse.

Tabela 1.2. Historijski razvoj limnologije kao nauke u Evropi i svijetu

Regija/Država	Pioniri / Istraživači	Doprinosi / Djela
Švicarska	François-Alphonse Forel	Tri sveska o Lac Lémanu (1892., 1895., 1904.); smatra se ocem limnologije
Švedska	E. Naumann, S. Ekman, W. Rodhe	Razvoj akademske limnologije, pionirski radovi u ekologiji i limnologiji
Njemačka	A. Thienemann, H. Elster, W. Einsele, W. Numann, W. Ohle, H. Sioli, D. Uhlmann	Osnivači i nosioci limnoloških škola, značajan doprinos limnološkim institutima
Danska	K. Berg, C. Wesenberg-Lund, P. Jónasson	Limnologija planktona i jezerskih ekosistema
Norveška	K. Strom	Rani radovi u ekologiji jezera
Francuska	F.A. Forel, A. Delebeque, B. Dussart	Osnivači francuske limnologije
Švicarska	L. Minder, E.A. Thomas	Rani doprinosi u istraživanju jezera
Španjolska	R. Margalef	Ekološka teorija i limnologija
Austrija	A. Ruttner-Kolisko, F. Ruttner, I. Findenegg	Prvi udžbenik <i>Osnove limnologije</i> (1940.); prvi kurs limnologije u Lunzu (1908.)
Engleska	T.T. Macan, W.H. Pearsall, C.H. Mortimer, E.M. Wedderburn, J. Talling, J. Lund, W. Tutin	Ključni istraživači limnologije u UK
Japan	S. Yoshimura, S. Horie	Razvoj azijske limnologije
Poljska	A. Hillbrecht-Ilkowska	Pionirski radovi u limnologiji
Rusija	Yu. I. Sorokin, G.G. Winberg	Istraživanja produktivnosti i biogeohemijskih procesa
Italija	E. Baldi, V. Tonolli, L. Tonolli	Istraživanja planinskih i alpskih jezera
Sjeverna Amerika (SAD)	J.G. Needham, J.T. Lloyd, E.A. Birge, C. Juday, A.D. Hasler, J. Reighard, F.E. Eggleton, P. Welch, H.B. Ward, D.S. Jordan, D.G. Frey, S. Gerking, C.A. Kafoid, S.A. Forbes, R. Patrick, L. Agassiz, G.C. Whipple, G.E. Hutchinson	- Prvi kurs limnologije (Cornell, 1908., Needham) - Prvi udžbenik <i>Život unutar njih voda</i> (1911., Needham & Lloyd) - Univerzitet Wisconsin-Madison = „rodno mjesto limnologije u SAD“ (Birge & Juday, 1909.) - Razvoj systemske analize kopnenih voda
Kanada	F.R. Hayes, H.B.N. Hynes, F.E.J. Fry, D.S. Rawson, F. Rigler, J.R. Vallentyne	Pionirska istraživanja kanadskih jezera i rijeka

c) **Oceanologija:** naučna disciplina koja se bavi proučavanjem slanih ekosistema (okeana), uključujući njihove fizičke, hemijske, biološke i geološke aspekte. Ova oblast istražuje širok spektar fenomena, od strukture i dinamike okeanskih struja do biodiverziteta i ekoloških niša koji se nalaze u slanim vodama. Ključne oblasti oceanologije uključuju fizičku oceanologiju koja proučava fizičke procese u okeanima, uključujući strujanje vode, talase, plime i oseke, kao i interakciju okeana s atmosferom. Hemijska oceanologija istražuje hemijski sastav okeanskih voda, uključujući nivoe hranljivih materija, gasova, mineralnih jedinjenja i zagađivača, Geološka istraživanja usmjerena su na karakteristike okeanskog dna, uključujući sedimentaciju, strukturu stijena te geodinamičke procese poput vulkanskih erupcija i potresa. Sve prethodno navedene karakteristike utiču na razvoj i raznovrsnost biote slanih ekosistema. Oceanologija se fokusira na morski život, uključujući plankton, nekton (ribe, morske sisare) i bentos, kao i na kompleksne ekosisteme poput koralnih grebena, estuarija i zajednica morskih cvjetnica

(morskih angiospermi). Značaj oceanologije ogleda se u proučavanju raznolikosti morskih organizama i njihovih staništa, što je važno za očuvanje i upravljanje morskim resursima. Ona ima ključnu ulogu u razumijevanju klimatskih promjena, jer okeani apsorbiraju veliki dio ugljen-dioksida i regulišu globalnu temperaturu. Oceanologija doprinosi održivom korištenju morskih resursa kroz upravljanje ribolovom, akvakulturom i drugim pomorskim aktivnostima, te omogućava razumijevanje složenih interakcija u okeanu i zaštitu ovog vitalnog dijela planete. Oceanologija (ili oceanografija) razvila se u 19. vijeku kao odgovor na potrebu sistematskog proučavanja mora i okeana. Iako su moreplovci i prirodoslovci još u antičko doba bilježili opažanja o morima (npr. Aristotel je opisivao morske organizme), moderna oceanologija počinje tek kada se razvijaju metode za mjerenje dubina, temperature, saliniteta i kada se započinju organizirane ekspedicije. Za osnivača moderne oceanologije najčešće se navodi princ Albert I. od Monaka (1848–1922). On je krajem 19. i početkom 20. vijeka organizovao niz istraživačkih ekspedicija u Sredozemlju i Atlantskom okeanu koristeći posebno opremljene brodove. U Monaku je 1910. godine osnovao Oceanografski institut (*Institut océanographique de Monaco*) i Oceanografski muzej, koji i danas imaju svjetski ugled. Prije Alberta I., ključna prekretnica u razvoju moderne oceanologije bila je britanska ekspedicija broda HMS *Challenger* (1872–1876), pod vodstvom Charlesa Wyvillea Thomsona, koja se smatra prvim velikim interdisciplinarnim istraživanjem okeana. Tokom ekspedicije prikupljeni su podaci o dubini, temperaturi, morskim sedimentima i više od 4.000 novih vrsta morskih organizama. Izvještaj objavljen u 50 svezaka (1877–1895) postao je temelj moderne oceanologije. Posebno značajan doprinos razvoju morske biologije dao je Victor Hensen (1887), koji je uveo pojam „plankton“. Hensen je prvi definisao plankton kao skup mikroskopskih organizama koji slobodno lebde u vodi i pasivno se prenose morskim strujama, te je time postavio temelje kvantitativne i eksperimentalne morske biologije, čime je oceanologiji dao preciznu biološku osnovu. Njegov sunarodnjak Ernst Haeckel (1891) nadogradio je tu klasifikaciju uvodeći izraze bentos i nekton, kako bi obuhvatio sve grupe organizama prema njihovom načinu života u vodi. Ova trojna podjela (plankton - nekton - bentos) postala je temelj moderne hidrobiološke i oceanografske klasifikacije vodenih organizama i koristi se do danas i za ostale hidroekosisteme (tekućice i stajaćice). Dvadeseto vijek donosi profesionalizaciju oceanologije kroz osnivanje specijaliziranih instituta, poput *Scripps Institution of Oceanography* u Kaliforniji i *Woods Hole Oceanographic Institution* u Sjedinjenim Američkim Državama. Nakon Drugog svjetskog rata oceanologija doživljava nagli razvoj zahvaljujući napretku sonar tehnologije, podmornica i kasnije satelitske oceanografije. Danas oceanologija objedinjuje fizičke, hemijske, geološke i biološke aspekte mora i okeana. Na istočnoj obali Jadrana djeluje nekoliko značajnih instituta koji se bave istraživanjem mora, priobalnih ekosistema i ribarstva. Najvažniji centri nalaze se u Splitu, Dubrovniku, Piranu i Kotoru, a zajedno čine mrežu koja pokriva gotovo čitav Jadran (tabela 1.3). Posebno je važno naglasiti da je većina istraživača u ovim ustanovama iz oblasti bioloških nauka. Veći broj njih svoje je akademsko obrazovanje stekao na Prirodno-matematičkom fakultetu u Sarajevu (prije 1992. godine), dok se za slovenske stručnjake ta tradicija veže uz Ljubljano. Time se jasno vidi povezanost istraživačkih institucija regije, kao i zajednička naučna osnova na kojoj se razvijala oceanologija i biologija mora. Okean predstavlja jedinstven globalni ekosistem unutar kojeg se, pod uticajem klimatskih i hidrografskih uslova, razvijaju različita staništa poput koralnih grebena, mangrova i estuarija. U strogo naučnom smislu ona nisu zasebni ekosistemi, već dijelovi jedinstvene cjeline. Ipak, u

naučno-popularnoj i primijenjenoj literaturi često se nazivaju posebnim ekosistemima zbog velikog biodiverziteta, složenih trofičkih mreža i značajne ekološke uloge.

Tabela 1.3 Instituti za istraživanje mora u jadranskoj regiji

Institut	Lokacija	Godina osnivanja	Glavna područja istraživanja
Institut za oceanografiju i ribarstvo (IOR)	Split, Hrvatska	1930.	Fizička, hemijska i biološka oceanografija; ribarstvo; ekologija Jadrana; monitoring mora
Institut za more i priobalje (IMP), Sveučilište u Dubrovniku	Dubrovnik, Hrvatska	1949. (kao stanica JAZU/HAZU)	Ekologija mora, monitoring kvalitete priobalnih voda, invazivne vrste, uticaj turizma i urbanizacije
Morska biološka postaja Piran, Nacionalni institut za biologiju	Piran, Slovenija	1969.	Ekologija i biodiverzitet sjevernog Jadrana, obalne vode, ekotoksikologija, klimatske promjene
Institut za biologiju mora, Univerzitet Crne Gore	Kotor, Crna Gora	1961.	Morska flora i fauna, ribarstvo, akvakultura, održivo upravljanje i monitoring Jadranskog mora

1.1.1 Hidrobiološka istraživanja u Bosni i Hercegovini

Hidrobiološka istraživanja na prostoru Bosne i Hercegovine razvijala su se krajem 19. i početkom 20. vijeka (tabela 1.1), u okviru šireg prirodoslovnog interesa austro-ugarskih vlasti za proučavanje bogate faune i flore ovog područja. Poseban doprinos imale su muzejske institucije, koje su postale čuvari prvih naučnih zbirki. U zbirkama su sačuvani primjerci brojnih ribljih vrsta iz slivova Neretve, Bosne i Drine, kao i riječnih rakova iz porodice *Astacidae*. Značajan dio tih nalaza austro-ugarske vlasti pohranjivale su i u Prirodoslovnom muzeju u Beču, čime je započelo sistematsko dokumentiranje hidrobionata iz BiH. Paralelno s tim, Muzej u Sarajevu postaje centralna institucija prirodoslovnih istraživanja, pružajući osnovu za razvoj domaće hidrobiološke nauke. Njegovom zaslugom pokrenuta su i prva sistematska entomološka istraživanja vodenih insekata. Tako je Viktor Apfelbeck 1894. godine objavio pionirske radove o fauni vodenih insekata Bosne i Hercegovine, čime je označen početak naučnog pristupa u proučavanju slatkovodnih ekosistema ovog područja. Početkom 20. vijeka dolazi do razvoja ribarstva. U periodu od 1894. do 1905. godine osnovano je ribogojilište na Vrelu Bosne, što je otvorilo put prvim praktičnim ihtiološkim istraživanjima u zemlji. U međuratnom periodu, posebno se ističe Mihajlo Radovanović (1934.) sa djelom *Trichoptere Jugoslavije*, objavljenim u *Glasniku Zemaljskog muzeja*, koje je predstavljalo prvi sveobuhvatni pregled faune tulara. Time su položeni temelji domaće triopterologije, koja će kasnije biti razvijana i kroz radove Marinković-Gospodnetić (1960–1980-ih). Paralelno, u drugoj polovini 20. vijeka, istraživanja ihtiofaune kulminiraju djelima Aganović i Vuković, (1963) i Vuković i Ivanović (1971), *Slatkovodne ribe Jugoslavije*, objavljenim u izdanju Zemaljskog muzeja. Nakon Drugog svjetskog rata, hidrobiologija dobija novu institucionalnu dimenziju. Godine 1949. osnovan je Biološki institut Univerziteta u Sarajevu, koji je, između

ostallog, inkorporirao i tadašnji Ribarski institut. Taj institut imao je značajnu ulogu u razvoju ribarstva i rukovodio je monitoringom kroz izradu ribarskih osnova, kako u Bosni i Hercegovini, tako i šire u regionu. Uz istraživanja ihtiofaune, razvijaju se i studije planktona, makrofita i posebno makrozoobentosa, čime se hidrobiologija usklađuje s modernim biološkim indikatorima kvaliteta voda. Prvi pisani podaci o organiziranom ribarstvu u Bosni i Hercegovini potiču iz vremena rane austrijske okupacije. Austrijske vlasti su ribarstvo posmatrale kao privrednu granu već 1882. godine od ribarstva je ostvaren prihod od 5.342 forinte, dok je do 1900. godine taj iznos narastao na 8.401 forintu. Poslovima ribarstva tada je upravljala Direkcija za šumarstvo, a prihodi su se ostvarivali naplatom taksi za profesionalne ribare (*ribarine*) na otvorenim vodama, poput Hutovog blata i drugih značajnih ribolovnih područja. Organizirana zaštita voda i zakonska regulativa uvedene su Uredbom iz 1886. godine, što je označilo početak institucionalnog upravljanja ribarstvom. Nekoliko godina kasnije, 1892. ili 1893., osnovano je prvo udruženje ribara u BiH pod nazivom “*Fischerei-Verein für Bosnien-Herzegovina*”, dok je 1906. godine u Sarajevu osnovano i prvo udruženje sportskih ribolovaca – Ribarsko društvo. Početak modernog ribogojstva u BiH vezuje se za osnivanje Ribogojilišta “Vrelo Bosne” kod Ilidže 1894. godine. Već 1898. godine izgrađeno je i novo, veliko mrjestilište kapaciteta oko 600.000 komada ikre, tada najveće i najmodernije u regiji. Njegov rad imao je presudnu ulogu u razvoju pastrmskog ribogojstva i u poribljavanju rijeka salmonidnim vrstama. O važnosti tog pogona svjedoče i podaci iz 1926. godine, kada je salmonidna mlađ bajraktarice (*Salvelinus fontinalis*) i potočna pastrmka (*Salmo trutta*), dužine 7 cm i više u velikim količinama distribuirana iz Ribogojilišta “Vrelo Bosne” za poribljavanje brojnih rijeka širom Bosne i Hercegovine. Osnivanjem Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Sarajevu (1960.), započinje intenzivan razvoj akademskih kadrova i istraživanja u oblasti hidrobiologije. Naučnici sa Odsjeka za biologiju, kroz nastavu i istraživačke projekte, razvili su ekspertizu u različitim grupama hidrobionata (fitoplankton, perifiton, makrozoobentos, ribe). Ujedno, Federalni hidrometeorološki zavod Sarajevo, kroz laboratorije i monitoring, postaje ključna institucija za praćenje kvaliteta voda na prostoru BiH. Nakon ratnog prekida 1990-ih, ulogu koordinacije hidrobioloških istraživanja i monitoringa preuzima Odsjek za biologiju PMF-a u Sarajevu (od 1996. godine). Tu se nastavlja tradicija istraživanja hidrobionata, s naglaskom na usklađivanje sa zahtjevima Okvirne direktive o vodama Evropske unije (WFD) i razvojem metodologije za procjenu ekološkog statusa voda. Posebno značajan iskorak u obrazovanju predstavlja akademska godina 2003/2004, kada je na Odsjeku za biologiju PMF-a uveden modul *Hidrobiologija*. Time je ova disciplina prvi put dobila status samostalnog modula u nastavnom programu Univerziteta u Sarajevu (i šire Bosne i Hercegovine), što je osiguralo kontinuitet između istraživanja i visokog obrazovanja te usklađivanje sa evropskim akademskim standardima.

Tabela 1.1.1 Objavljeni podaci o hidrobiološkom diverzitetu u vodama Bosne i Hercegovine (od 1849. do danas)

godina / period	dogadjaj / autor	grupa / oblast	značaj
1849	Kumer & Stender	Alge (Trstionica, Stavnja)	Prvi objavljeni rad o algoflori BiH
1864	L. Rabenhorst	Alge (rijeka Bosna)	BiH uključena u evropsku algofloru
1888	Osnivanje Zemaljskog muzeja BiH	Institucija	Početak sistematskih prirodoslovnih istraživanja
1894	V. Apfelbeck	Vodeni insekti (Coleoptera)	Prvi podaci o vodenim insektima BiH
1894-1905	Osnivanje ribogojilišta na Vrelu Bosne	Ribe	Početak praktične ihtiologije
1934	M. Radovanović – <i>Trichoptere Jugoslavije</i>	Trichoptera	Prvi cjeloviti pregled tulara u BiH
1949	Osnivanje Biološkog instituta UNSA (inkorporiran Ribarski institut)	Institucija	Biomonitoring, ribarske osnove i istraživanja ihtiofaune
1960	Osnivanje PMF-a u Sarajevu	Institucija	Jačanje univerzitetskog obrazovanja i istraživanja
1960-1992	S.Blagojević, L.Jerković, D.Remeta-Hafner	Fitobentos i fitoplankton (alge)	Taksonomska i ekološka istraživanja dijatomeja i drugih bentosnih algi
1960–1980	M. Marinković-Gospodnetić	Trichoptera, makrozoobentos	Razvoj triopterologije, bioindikacija i ekologija
1960–1987	D. Kaćanska	Plecoptera	Istraživanja vodencvjeta u BiH
1960–1989	M. Tanasijević	Ephemeroptera	Podaci o jednodnevnica u BiH
1970–1996	S. Krek	Psychodidae	Istraživanja akvatične entomofaune
1960–2000	H. Malicky (Austrija)	Trichoptera	Novi opisi i revizije vrsta s Balkana, uključujući BiH
1960–1980	R. Sowa (Poljska)	Ephemeroptera	Deskripcije i faunistički doprinos za : jednodnevnice Balkana
1955-1977	Mahmut Aganović	ihthiofauna	temeljna istraživanja ihtiofaune, postavio osnove modernog slatkovodnog ribarstva i hidrobiologije u regiji
1963, 1971	Vuković, T. 1963; Vuković & Ivanović. 1971	Ihtiofauna	Monumentalna djela, ključna referenca za regiju
1996	Odsjek za biologiju PMF-a Sarajevo preuzima monitoring	Hidrobionti	Nastavak istraživanja i ekoloških procjena voda
2003/2004	Uvođenje modula <i>Hidrobiologija</i> na PMF-u Sarajevo	Nastava	Hidrobiologija kao samostalni studijski modul na Univerzitetu u Sarajevu

2. Zadaci hidrobiologije

Osnovni zadaci hidrobiologije su višestruki, pri čemu centralno mjesto zauzima proučavanje uticaja ekoloških faktora i njihovih varijacija na organizme u vodenim ekosistemima. Reakcije organizama na promjene vanjske sredine pokazuju kako se uslijed različitih uvjeta razvijaju brojne adaptacije, čije je istraživanje jedno od ključnih područja hidrobiologije. Vodena sredina oblikovana je djelovanjem biotičkih i abiotičkih faktora. Biotički faktori obuhvataju uzajamne odnose živih organizama, dok ti odnosi istovremeno utiču na stanje abiotičkih parametara. Hidrobiologija zato stavlja poseban naglasak na istraživanje sastava živih zajednica i njihovih interakcija. Poznavanje adaptacija i specijskih odnosa omogućava razumijevanje produktivnosti vodenih ekosistema, lanaca ishrane i općeg ekološkog statusa staništa. Takvi podaci čine osnovu za adekvatno upravljanje vodnim resursima s ciljem održanja produkcije i očuvanja ekološke ravnoteže. Savremeni izazov predstavlja degradacija i zagađivanje voda, a time i potreba za zaštitom i revitalizacijom vodenih staništa, što čini jedan od centralnih zadataka hidrobiologije. Hidrobiologija, kao naučna disciplina koja proučava vodu i životne zajednice u vodenim ekosistemima, ima širok spektar zadataka. Ovi zadaci obuhvataju istraživanja usmjerena na razumijevanje strukture i funkcionisanja ekosistema, metodologiju analize i monitoring, kao i izučavanje biodiverziteta i porijekla akvatičnih sistema (tabela 2.1).

Tabela 2.1. Prikaz osnovnih zadataka hidrobiologije

Zadatak	Opis
Istraživanje akvatičnih ekosistema	Proučavanje svih biotičkih i abiotičkih faktora koji čine vodene ekosisteme (rijeke, jezera, mora, okeane, močvare).
Metodologija analize akvatičnih ekosistema	Primjena različitih pristupa, tehnika i postupaka za procjenu stanja ekosistema; uključuje analizu biotičkih i abiotičkih faktora; metode mogu biti kvantitativne, kvalitativne ili kombinovane.
Izučavanje postanka/porijekla akvatičnih ekosistema	Analiza nastanka i evolucije vodenih ekosistema kroz geološki, biološki i ekološki vremenski okvir.
Istraživanja biocenoza vodenih ekosistema	Proučavanje zajednica organizama (biljke, životinje, mikroorganizmi) i njihovih interakcija u rijekama, jezerima, morima i močvarama; fokus na stabilnosti, biodiverzitetu i uticaju promjena.
Istraživanje hidrobionta i biodiverziteta	Proučavanje organizama zavisnih od vodenog okruženja (hidrobionata: alge, biljke, ribe, beskičmenjaci, mikroorganizmi) i njihove raznovrsnosti (vrste, genetička raznolikost, ekosistemske usluge).
Monitoring vodenih ekosistema	Sistematsko i kontinuirano praćenje kvaliteta vode, stabilnosti ekosistema i biodiverziteta, radi procjene uticaja prirodnih faktora i ljudskih aktivnosti te donošenja mjera zaštite i upravljanja.

Monitoring vodenih ekosistema predstavlja sistematsko i dugoročno praćenje stanja voda, s ciljem da se utvrde promjene u njihovom kvalitetu, stabilnosti i biodiverzitet. Uključuje posmatranje i analizu abiotičkih parametara (fizikalno-hemijske osobine kao što su temperatura, kiseonik, pH, hranjive materije, metali, zagađivači) te biotičkih parametara (fitoplankton, makrofite, zooplankton, makrozoobentos, ribe, mikrobiološke zajednice). Kombinacijom ovih podataka dobija se cjelovita slika o ekološkom stanju vodenih tijela i

njihovoj osjetljivosti na prirodne promjene i ljudske pritiske. Monitoring vodenih ekosistema ima nekoliko osnovnih ciljeva (shema.2.1) koji uključuje procjenu, kontrolu, očuvanje itd.



Shema 2.1. Ciljevi monitoringa voda

Poseban zadatak hidrobiologije su pritisci i prijetnje akvatičnim ekosistemima, jer hidrobiologija ne proučava samo strukturu i funkcionisanje vodenih ekosistema, već i pritiske i prijetnje koji narušavaju njihovu stabilnost. Obuhvataju metodologiju analize pitke vode, zagađenje voda, patogene u vodi isl. Metodologija analize i stanja voda za piće; analiza stanja vode za piće obuhvata niz naučnih, tehničkih i regulatornih metoda kako bi se procijenila njena kvaliteta i usklađenost s propisanim standardima. Ova metodologija je ključna za osiguranje sigurnosti i stabilnosti potrošača te obuhvata fizičke, hemijske, biološke i mikrobiološke analize.

Zagađenje/onečišćenje voda; zagađenje/onečišćenje voda predstavlja proces u kojem dolazi do prisustva štetnih tvari ili supstanci u vodenim ekosistemima (rijekama, jezerima, morima, podzemnim vodama), što negativno utiče na kvalitet vode i zdravlje organizama koji nastanjuju te ekosisteme. Zagađenje voda je globalni problem koji ima dugoročne posljedice na ekosisteme, ljudsko zdravlje i biodiverzitet;

Utvrđivanje izvora zagađenja voda: Utvrđivanje izvora zagađenja voda je ključni korak u procesu smanjenja zagađenja i zaštite vodenih ekosistema. Identifikacija izvora zagađivača omogućava implementaciju ciljanih mjera za smanjenje njihovog uticaja na kvalitet vode i zdravlje ekosistema. Izvori zagađenja mogu biti različiti i mogu poticati iz prirodnih i ljudskih aktivnosti, a njihovo prepoznavanje zahtijeva primjenu različitih metodologija i tehnika; Akvatične invazivne vrste: su biljke, životinje ili mikroorganizmi koji, uslijed ljudskih aktivnosti, nisu prirodno prisutni u određenim vodenim ekosistemima, ali su se uspješno naselili i počeli se širiti. Ove vrste često uzrokuju ozbiljne negativne promjene u ekosistemima, jer mogu konkurirati s autohtonim vrstama za resurse, mijenjati prirodne ekološke procese i smanjivati biološku raznolikost. Akvatične invazivne vrste predstavljaju jedan od glavnih izazova za očuvanje stabilnosti vodenih ekosistema širom svijeta;

Patogeni u vodama: patogeni u vodama su mikroorganizmi, poput bakterija, virusa, protozoa i gljivica, koji mogu uzrokovati bolesti kod ljudi, životinja i biljaka (svih hidrobionata). Patogeni

mogu dospjeti u vodene ekosisteme putem ljudskog i životinjskog izmeta, industrijskih otpadnih voda, zagađenja iz poljoprivrede ili zbog lošeg upravljanja vodnim resursima;

Mjere kontrole zagađenja i zaštita: Mjere kontrole zagađenja i zaštita voda ključne su za očuvanje stabilnosti vodenih ekosistema i očuvanje kvalitete vode za ljudsku upotrebu, poljoprivredu i industriju. Zagađenje voda može imati dugoročne i štetne posljedice, kako za ekosisteme, tako i za zdravlje ljudi, stoga je važno implementirati učinkovite mjere kontrole i zaštite. Ove mjere obuhvataju prevenciju, monitoring, sanaciju zagađenih voda i upravljanje vodnim resursima; Okvirna direktiva o vodama; Okvirna direktiva o vodama (ODV) je ključni pravni instrument Europske unije koji ima za cilj zaštitu i poboljšanje kvaliteta vodenih resursa u EU. Donijeta 2000. godine (WFD 2000/60/EZ), ODV postavila je ambiciozan okvir za upravljanje vodama i ima za cilj osiguranje održivog korištenja voda za buduće generacije. ODV temelji se na nekoliko osnovnih ciljeva koji su usmjereni na dugoročnu zaštitu voda u EU: postizanje dobrog ekološkog statusa/potencijala, smanjenje zagađenja voda i održivo upravljanje vodnim resursima;

Uticaj klimatskih promjena na akvatične ekosisteme: predstavlja jedan od najvećih ekoloških izazova današnjice. Klimatske promjene uzrokuju značajne promjene u vodenim ekosistemima, uključujući rijeke, jezera, obalne zone i mora. Ove promjene mogu imati dugoročne posljedice na biološku raznolikost, funkcije ekosistema i ljudske zajednice koje ovise o vodenim resursima. Povećanje globalne temperature uzrokovano klimatskim promjenama ima izravan uticaj na temperature vodenih ekosistema, što dovodi do nekoliko ključnih promjena. Klimatske promjene uzrokuju otapanje polarnih ledenih kapa i glečera, što dovodi do povećanja razine mora. To ima značajan uticaj na obalne ekosisteme, poput močvara, mangrovskih šuma i koraljnih grebena. Klimatske promjene također uzrokuju promjene u globalnim vodenim ciklusima, što se odražava na distribuciju i količinu padavina, suše i poplave, što direktno utječe na akvatične ekosisteme i njihov biodiverzitet.

3. Voda kao životna sredina

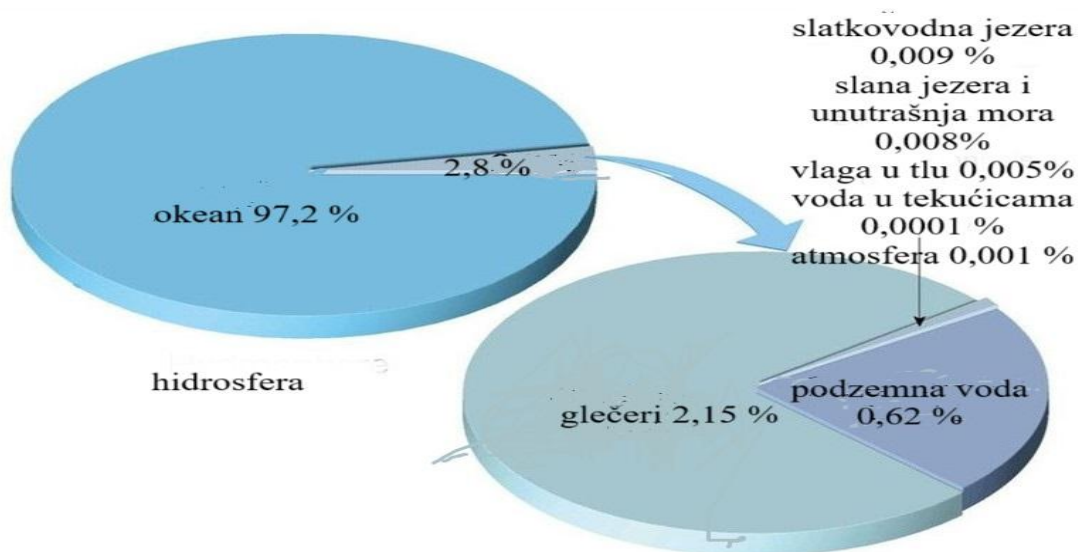
Životna sredina obuhvata prirodne abiotičke i biotičke faktore (svjetlost, temperaturu, vodu, hranjive materije, međusobne odnose živih organizama) koji određuju uslove života jedinke, populacije ili vrste. Na Zemlji razlikujemo dvije osnovne životne sredine, vodenu i vazдушnu, koje su međusobno tijesno povezane. Ta veza omogućuje njihov opstanak, jer izmjena materije i energije između ova dva sistema osigurava stabilnost biosfere. Voda isparavanjem ulazi u atmosferu, a padavinama se vraća na kopno i u vodene ekosisteme. Kiseonik koji nastaje fotosintezom vodenih organizama doprinosi sastavu atmosfere, dok ugljen-dioksid iz zraka služi kao osnova za primarnu produkciju u vodi. Na taj način, kruženje materije i protok energije povezuju vodenu i vazдушnu sredinu u jedinstven globalni sistem života. Voda predstavlja osnovni ekološki faktor koji oblikuje život na Zemlji. Kao životna sredina, ona se odlikuje specifičnim fizičko-hemijskim svojstvima:

- veliki toplotni kapacitet – to znači da može apsorbirati ili otpustiti mnogo toplote uz vrlo male promjene temperature, čime osigurava stabilan termički režim vodenih

ekosistema, istovremeno ublažava temperaturne oscilacije i stvara stabilne uslove za život.

- rastvorljivost supstanci – omogućava kruženje hranjivih materija i gasova neophodnih za organizme.
- gustina i viskoznost – uslovljavaju kretanje organizama i oblik njihovih adaptacija.
- prozirnost – određuje prodor svjetlosti i fotosintetsku zonu.
- promjenjiv hemijski sastav (slanost, sadržaj gasova, pH vrijednost) – direktno utiče na raspodjelu vrsta.

Ekološki uticaj vode na organizme (akcija vode) ostvaruje se kroz ove parametre, a može biti direktan (npr. uticaj kiseonika na disanje) ili indirektan (npr. salinitet koji posredno određuje prisustvo određenih vrsta). Od ukupne Zemljine površine, $\frac{3}{4}$ zauzima voda koja je raspoređena izrazito neravnomjerno (slika 3.1). Okeani i mora predstavljaju 97,2 %, a na ostale vode otpada 2,8 %, od toga na glečere 2,15 %. Jezera slatkovodna tek 0,009 %, a tekućice 0,0001 % dok na podzemne vode otpada 0,62 %. Ukupna površina Zemlje je 1.304 miliona km², a na slatke vode otpada 27 miliona km². Ovi podaci jasno pokazuju da je raspoloživa količina slatke vode ograničena, što slatkovodne ekosisteme čini prostorno i vremenski izoliranim, za razliku od okeana koji čini kompaktnu i globalno povezanu cjelinu.



Slika 3.1. Raspodjela vode na Zemlji u okviru hidrosfere (prilagođeno prema Shiklomanov (1993); USGS (2019))

U svim vodama obitava raznovrstan živi svijet, ali uslijed visoke koncentracije H₂S (sumporovodika) u dubokim slojevima Crnog mora, kao i izrazito visokog saliniteta u Mrtvom moru, biološki svijet je znatno siromašniji. Iz ovog proizilazi da u vodenim ekosistemima djeluje skup ekoloških faktora (abiotičkih) na koje su se živi organizmi adaptirali tokom evolucije. U poređenju sa kopnom, voda kao životna sredina ima niz specifičnih fizičko-hemijskih osobina koje direktno utiču na organizme i oblikuju njihove adaptacije. Međutim, i vazдушna sredina nosi svoje karakteristike koje su rezultirale drugačijim razvojem životnih oblika. Razlike između vodene i vazdušne sredine odražavaju se u načinu kretanja, disanja, komunikacije, raspoloživosti resursa i temperaturnoj stabilnosti (tabela 3.2).

Tabela 3.2. Razlike između vodene i vazdušne životne sredine

Karakteristika	Vodena sredina	Vazdušna sredina
Gustina	Voda je znatno gušća; pruža veću potporu organizmima. Tijela su prilagođena plutajućem životu ili plivanju.	Vazduh je mnogo rjeđi; organizmi moraju nositi vlastitu težinu. Razvijeni skeleti i mišići za kretanje i let.
Salinitet (slanost)	Slatkovodni ekosistemi <0,5 ‰; morski ekosistemi oko 35 ‰.	Nema saliniteta; hemijski sastav atmosfere stabilan (azot, kiseonik, CO ₂).
Otpor	Veliki otpor zbog visoke gustine; organizmi hidrodinamičnog oblika.	Mali otpor; omogućava brzo i energetski ekonomično kretanje.
Dostupnost kiseonika	Mnogo manja koncentracija O ₂ ; potrebni posebni organi (škrge).	O ₂ mnogo dostupniji; pluća i drugi efikasni mehanizmi disanja.
Temperaturna stabilnost	Voda se sporije zagrijava/hladi; temperatura stabilna.	Vazduh se brzo zagrijava/hladi; velike dnevne i sezonske oscilacije.
Svjetlost	Prodire ograničeno; fotosinteza moguća u gornjim slojevima; lom svjetlosti mijenja percepciju boja.	Lako prolazi; fotosinteza moguća na velikim površinama kopna.
Prilagodbe organizama	Škrge, peraja, glatka tijela, posebna osjetila za orijentaciju u vodi.	Pluća, noge, krila, zaštita od dehidracije, strukture za podršku tijela.
Zvuk	Širi se brzo i na velike udaljenosti; ključan za komunikaciju i navigaciju u vodi.	Širi se sporije i kraće; važniji vid, miris i drugi signali za komunikaciju.

Ove razlike imaju značajan uticaj na evoluciju i prilagodbe organizama koji žive u različitim sredinama. Pored toga slatkovodni i slani vodeni ekosistemi se značajno razlikuju po fizičkim, hemijskim i biološkim karakteristikama, što utiče na vrste organizama koje u njima žive, njihove prilagodbe i ekološke procese (tabela 3.3). U svom sastavu, morska i slatka voda se razlikuju prvenstveno po tipu i koncentraciji soli. Za mora je karakteristična visoka koncentracija soli (sulfata) koja je inicirala posebne adaptacije organizama na život u ovim ekosistemima. Prostor okena i mora koji prekriva najveći dio površine Zemlje čini kompaktnu cijelinu, a za razliku od njih, slatkovodeni ekosistemi nastali formiranjem kopna su prostorno i vremenski izolovani. Prilagodbe organizama u slatkovodnim ekosistemima uvjetovane su niskom koncentracijom soli, a mnogi imaju sposobnost da izbacuju višak vode iz ćelija (osmotska regulacija) kako bi spriječili da previše vode uđe u njihove organizme. Morski organizmi su razvili mehanizme za regulaciju visokog nivoa soli. Neki organizmi izlučuju višak soli kroz posebne žlijezde, dok drugi jednostavno žive u ravnoteži s visokom koncentracijom soli u vodi.

Tabela 3.3. Razlike između slatkovodnih i slanih ekosistema

Karakteristika	Slatkovodni ekosistemi	Morski (slani) ekosistemi
Salinitet	Vrlo nizak (< 0,5 ‰); soli prisutne u tragovima (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-).	Vrlo nizak (< 0,5 ‰); soli prisutne u tragovima (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-).
Biodiverzitet	Velika raznolikost vrsta u manjem obimu: ribe, vodozemci, insekti, vodene biljke. Mnogi organizmi ne podnose salinitet.	Ogroman broj vrsta: morski sisari (kitovi, delfini), ribe (tun, ajkule), mekušci, korali, plankton; složeni hranidbeni lanci.
Rastvoreni kiseonik	Više O_2 , posebno u hladnim i brzim vodama; pogoduje aerobnim organizmima.	Generalno niže vrijednosti zbog saliniteta; duboke zone imaju vrlo malo $\text{O}_2 \rightarrow$ posebne adaptacije.
Temperaturne razlike	Veće sezonske promjene, posebno u plićim jezerima i donjim tokovima rijeka. Na izvorima i gornjim tokovima Rijeka male su sezonske oscilacije temperature	Veća stabilnost u dubinama; površinske temperature variraju zavisno od geografije.
Ekološka uloga	<3% globalne vode; ključni za pitku vodu, poljoprivredu i staništa vrsta koje ne podnose so.	~70% Zemljine površine; ključna uloga u klimi, CO_2 ciklusu i proizvodnji O_2 kroz fitoplankton.
Biljni svijet	Trska, lokvanj, alge, mahovine; rast u plitkim zonama s dovoljno svjetla.	Morske trave, fitoplankton; koralni grebeni podržavaju visok biodiverzitet.
Proizvodnja i mreže ishrane	Jednostavnije mreže: alge, biljke i mikroorganizmi kao proizvođači; ribe i ptice često vršni predatori.	Složenije mreže: plankton kao osnovni proizvođač; vrh lanca čine ajkule, kitovi, morske ptice.
Kretanje vode	Rijeke i potoci s izraženim strujama; jezera i močvare sa statičnijom vodom.	Morske struje, plima i oseka – omogućavaju miješanje nutrijenata i kiseonika.

Ove razlike jasno pokazuju koliko se slatkovodni i morski ekosistemi razlikuju (tabela 3.4). i kako organizmi u njima razvijaju jedinstvene strategije za preživljavanje u specifičnim uslovima.

Tabela 3.4. Prikaz karakteristika slanih i slatkovodnih ekosistema na planeti Zemlji

karakteristika	slane vode	slatkovodne
raspored	jedinstvena cijelina	izolovani
porijeklo	prvoformirani	mlađi po postanku
sastav	dominiraju soli hloridi, dominacija NaCl	hidrokarbonat
gustina/pritisak	hidrostatički pritisak veliki, kao i gustina	manja gustina
endemi	bez	prisitni
vertikalna stratifikacija	200m prodor svjetlosti	uslijed manje dubine manje izražena
temperatura	na velikim dubinama stalna	postoji ali je manje izražena stratifikacija bez zone mraka
pokreti	plima i oseka, morske struje	turbulencije, protok

Razlozi za endemizam u slatkovodnim ekosistemima su prije svega geografska izolovanost (nisu pregledna cijelina), ograničena migracija i raznovrsni mikroklimatski uslovi.

Geografska izolacija: slatkovodni ekosistemi, poput rijeka, jezera i potoka, često su izolovani od drugih vodenih tijela. Ova izolacija sprječava miješanje populacija, što omogućava da se vrste razvijaju nezavisno kroz evolucijski proces. Vremenom, to dovodi do stvaranja endemičnih vrsta koje su jedinstvene za određeno područje. Na primjer, jezera koja su stara i geografski izolovana, poput Bajkalskog jezera u Rusiji ili jezera Tanjganika u Africi, stanište su mnogim endemičnim vrstama riba, poput ciklida (Cichlidae), koji su evoluirali isključivo u ovom jezeru i ne javljaju se nigdje drugo u svijetu..

Manje prilike za migraciju: za razliku od slanih ekosistema, slatkovodne ekosisteme povezuju samo određeni vodeni putevi, što ograničava širenje vrsta. Mnoge vrste su zato vezane za specifične stanišne uslove i nemaju mogućnost da se lako presele u druge vodene sisteme. Primjer su endemične vrste pastrmki i rakova koje žive samo u određenim rijekama ili jezerima.

Raznovrsni mikroklimatski uslovi: slatkovodna staništa često imaju raznovrsne mikroklimat zbog različitih dubina, strujanja, temperature i kvaliteta vode, što omogućava razvijanje specifičnih ekoloških niša. Svaka od tih niša može stvoriti uvjete za evoluciju novih, endemičnih vrsta prilagođenih specifičnim ekološkim uslovima.

Slani ekosistemi manje skloni endemizmu zbog veće povezanosti ekosistema. Okeani i mora su međusobno povezani, što omogućava slobodno kretanje vrsta širom svjetskih okeana. Morski organizmi mogu migrirati na velike udaljenosti kroz morske struje ili plimu i oseku, smanjujući šanse za geografski izolovanu evoluciju. Ovo čini slane ekosisteme otvorenijim sistemima, sa manjom vjerovatnoćom da se razviju lokalizovane, endemične vrste. Širi raspon prilagodbi kod morskih vrsta na uslove (saliniteta, temperature, dubine), omogućava im da žive na mnogim različitim područjima širom okeana. To također smanjuje šanse za izolaciju i specijalizaciju na jednom mjestu. Primjer su, vrste poput morskih kornjača, kitova ili mnogih vrsta riba koje migriraju kroz različite okeane i nisu vezane za jedno geografsko područje. Brža disperzija larvi i jaja, mnoge morske vrste proizvode veliki broj pelagičnih larvi koje se lako prenose morskim strujama na velike udaljenosti. To znači da nova populacija može brzo naseliti nove oblasti, čime se sprječava evolucija novih endemičnih oblika zbog miješanja genetskog materijala. Primjer su koralji, čije larve mogu putovati hiljadama kilometara prije nego što se nasele. Endemični oblici su mnogo češći u slatkovodnim ekosistemima zbog geografske izolacije, specijalizovanih ekoloških uslova i ograničene migracije. Slani ekosistemi, poput mora i okeana, zbog svoje povezanosti i dinamičnosti, imaju manje izolacije, što smanjuje mogućnost za stvaranje endemičnih vrsta. Što se tiče slanih vodenih ekosistema i evolucije, tačno je da u nekim od najstarijih okeanskih ekosistema evolucija mnogih organizama može izgledati stabilno ili usporeno, zbog postizanja prilagodbi (adaptacija) koje su efikasne u tom okruženju. Međutim, evolucija nije potpuno zaustavljena u slanim ekosistemima, već se odvija sporije u stabilnim uslovima. Jedna od poznatih morskih reliktnih vrsta je Havajska morska foka *Neomonachus schauinslandi* (Matschie, 1905) koja je specifična za Havajske otoke i ne može se naći nigdje drugdje u svijetu.

4. Fizičko-hemijski parametri vode

Abiotički parametri vodene sredine predstavljaju glavne faktore koji svojim vrijednostima i koncentracijama direktno utiču na sastav, brojnost i raznovrsnost biote, odnosno akvatičnih organizama. Pored klimatskih, orografskih i hidromorfoloških uslova, fizičko-hemijski parametri vode su ključni pokazatelji njenog kvaliteta. Klimatski faktori su vezani za klimatske pojase (umjereni, tropski, suptropski i polarni) koji direktno određuju osnovne fizičko-hemijske parametre voda. U okviru istih pojaseva izražena je vertikalna i horizontalna zonacija, pa se od nizijskog preko brdskog i montanskog do alpskog i subalpskog pojasa mijenjaju uslovi padavina, temperature, vjetrova, kao i dužina dana i noći. Takvi klimatski obrasci oblikuju režim otapanja snijega, količinu površinskog i podzemnog dotoka, kao i termičke karakteristike vodotoka i jezera. Orografske faktori koji obuhvataju reljef i nadmorsku visinu, imaju presudan uticaj na hidrografske osobine vodotoka i jezera. Nagib terena, konfiguracija sliva i ekspozicija određuju brzinu oticanja, transport sedimenata i hranjivih tvari, te oblik i dubinu korita. Planinski predjeli sa strmim padinama karakterišu brzi, hladni i bogato oksigenirani tokovi, dok nizine omogućavaju formiranje sporih i toplijih tokova, sklonih zadržavanju organske materije. Hidromorfološki faktori uključuju morfologiju (oblik, morfologiju obala, poplavne zone, tip sedimenta, širinu korita) i hidrološke (dubinu, režim protoka i sezonske oscilacije nivoa vode). Ovi faktori određuju uslove za život akvatičnih organizama - brzinu strujanja, intenzitet sedimentacije i erozije i u neposrednoj su vezi sa sposobnošću vrsta da opstanu i koloniziraju određena staništa. Na navedene klimatske, orografske i hidromorfološke uslove nadovezuju se fizičko-hemijski parametri vode, koji predstavljaju najčešće korišteni pokazatelj kvaliteta vodenih ekosistema. Dok klimatski pojasevi i reljef određuju okvirne granice u kojima se formira režim voda, fizičko-hemijske karakteristike – poput temperature vode, pH vrijednosti, rastvorenog kiseonika, konduktivnosti, tvrdoće i koncentracije nutrijenata pružaju detaljnu sliku o stanju vodenog tijela. One direktno utiču na sastav, brojnost i raznovrsnost biote i služe kao osnov za ocjenu pogodnosti vode za piće, poljoprivredu, industriju i očuvanje ekosistema. Za potrebe kontrole (monitoringa) stabilnosti voda, redovno se sprovodi mjerenje fizičkih parametara koji ukazuju na promjene u kvalitetu i kvantitetu (vidi tabelu 4.1).

Tabela 4.1. Prikaz fizičkih parametara i princip određivanja vrijednosti

parametar	određivanje
hidrostatički pritisak (HP);	mjerenjem (Pa/cm ²)
gustina	određivanje (g/cm)
miris i ukus	mjerenjem (jačina, okus)
viskoznost;	mjerenjem
pokreti	mjerenjem
providnost	mjerenjem
boja	očitanje prema tablicama
temperatura i	mjerenjem
provodljivost (conductivity)	mjerenjem

Hidrostatski pritisak (HP) - predstavlja odnos mase stuba tečnosti i površine na koju ona djeluje; vodeni stub od 10,07 m u vodi srednje gustine vrši pritisak snagom od 10^5 Pa/cm². Hidrostatski pritisak je veći u dubljim vodama. Prema širini ekološke valence u odnosu na HP, organizmi se grupiraju u:

- stenobitne organizme (gr. *bathus* - dubina),
- euribatne organizme: crv *Priapulius caudatus*; bakterija *Escherichia coli* izdrži HP od 100 MPa; Pisces (ribe) spuštaju se i do 400 m dubine u morima,

U dubokim jezerima organizmi reaguju slično kao i u morima, dok u vodotocima podnose razlike u hidrostatskom pritisku do 5×10^5 Pa (oko 50 m dubine). Organizmi velikih dubina razvili su specifične fiziološke adaptacije koje im omogućavaju da izdrže pritiske višestruko veće od površinskih. Takve prilagodbe uključuju fleksibilne skelete, specifične metaboličke procese, sporiji metabolizam i posebne mehanizme razmjene gasova pod visokim pritiskom. Dubokomorske ribe, na primjer, posjeduju specijalizovane mišiće i unutrašnje strukture koje omogućavaju ekonomično kretanje i regulaciju uzgona. Hidrostatski pritisak je ključan ekološki faktor jer utiče na fiziologiju organizama, ali i na hemijske procese i dinamiku hranjivih materija u vodenim ekosistemima. Razumijevanje ovog parametra važno je za očuvanje akvatičnih staništa i razvoj naučnih istraživanja.

Gustina vode - Gustina vode ovisi o rastvorenim supstancama i temperaturi. Povećanjem temperature gustina se smanjuje, a smanjenjem temperature povećava se koncentracija soli što rezultira povećanjem gustine. Za kopnene vode je karakteristično da povećanjem temperature od 0 °C do +4 °C voda postaje gušća, a specifična masa veća. Uslijed povećanja zagrijavanja, gustina se smanjuje kao i specifična masa. Hlađenje vode do tačke zamrzavanja dovodi do smanjenja gustine. Voda na 0 °C se sastoji od asosovanih molekula agregata (H₂O)₃, zagrijavanjem do +4 °C voda prelazi u agregate (H₂O)₂, a uslijed promjene zapremine i pregrupiranja molekula, voda postaje gušća. Led ima manju specifičnu masu i gustinu (0,92 g/cm³), zbog ove činjenice led pliva na površini vode, a kao loš provodnik toplote, on je izolator i sprečava zamrzavanje dubljih slojeva vode. Vertikalno strujanje vode rezultat je nejednake gustine, rashlađenja i gušća voda tone, a toplija i lakša dolazi na površinu. Gustina slane vode zavisi od nekoliko faktora, uključujući temperaturu, salinitet i pritisak. Generalno, gustina slane vode je veća od gustine slatke vode zbog prisustva rastvorenih soli (najčešće natrijum-hlorida, NaCl). Na nižim temperaturama (npr. blizu tačke smrzavanja), gustina slane vode je veća. Kada temperatura slane vode pada ispod 0°C, gustina može biti do 1.030 g/cm³. Na višim temperaturama (kao što je na temperaturama blizu 20°C-25°C), gustina slane vode opada, dostižući vrednosti od oko 1.020 g/cm³ do 1.025 g/cm³. Tačka smrzavanja morske vode saliniteta oko 35 ‰ (35 g soli na 1000 g vode) je oko -1.9°C. Razlog za to je što rastvorene soli u vodi smanjuju njen osmotski pritisak i time snižavaju tačku smrzavanja u poređenju sa slatkim vodom. U slatkoj vodi, tačka smrzavanja je 0°C, dok prisustvo soli snižava ovu tačku, čineći je nižom. Međutim, ta tačka smrzavanja može varirati u zavisnosti od tačne koncentracije soli. Vertikalnim strujanjem se vrši obnova kiseonika u vodi, a mineralne materije rastvorene u vodi postaju dostupne biljkama. Morska voda se skuplja od +4 °C do 0 °C, a u momentu zamrzavanja ona se širi i postaje lakša.

Miris i ukus - Prirodni miris i ukus vode potiče od rastvorenih organskih i anorganskih materija iz bioloških izvora ili procesa, industrijskih kontaminanata, sintetičkih materija, korozije ili tretmana voda (za piće posebno). Prirodni mirisi nastaju uslijed biološke ragrađnje ili procesa, a vještački mirisi rezultat su antropogenog zagađenaja voda. Tako npr. prisutan H_2S (vodoniksulfat) u vodi inicira miris na pokvarena jaja - ovaj miris je karakterističan za močvare. Miris vode se procenjuje organoleptički, što znači da se vrši kroz ljudsku percepciju pomoću čula mirisa. Određivanje jačine mirisa vode, odnosno kvantifikacija intenziteta mirisa, često se vrši pomoću specifičnih metoda koje omogućavaju mjerenje koncentracije mirisnih molekula u vodi. U nekim slučajevima, koristi se Bal (Benzil-aldehid ekvivalent) - jedinica za izražavanje jačine mirisa (tabela 4.2). Benzil-aldehid je jedan od standardnih mirisnih spojeva koji se koristi u analizi mirisa zbog svoje poznate i prepoznatljive arome. Ova metoda omogućava da se izrazi intenzitet mirisa u odnosu na poznatu jačinu mirisa benzil-aldehida.

Tabela 4.2. Prikaz vrijednosti i određivanja mirisa vode (posebno važno za vodu za piće)

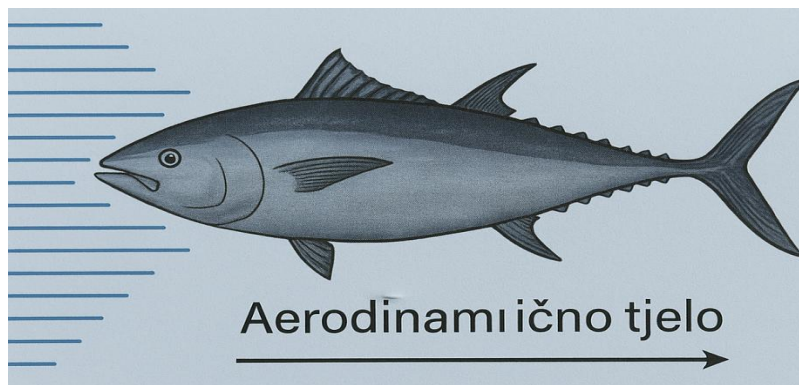
jačina/Bal	miris
0	bez mirisa
1	vrlo slabo
2	slabo
3	primjetno
4	znatno
5	vrlo jako

Ukus vode određen je mikrobiološkom (voda za piće) i toksikološkom ispravnosti, a zavisi od koncentracije soli u njoj (tabela 4.3). Određivanje ukusa vode prema tipu i koncentraciji soli važno je u ocjeni kvaliteta vode, posebno kada je voda namjenjena za ljudsku potrošnju ili za industrijske procese. Ukus vode zavisi od vrste soli koja je rastvorena u vodi, kao i od njihove koncentracije. Različite soli daju različite ukuse, i to može značajno uticati na opšti doživljaj ukusa vode.

Tabela 4.3. Vrijednosti koncentracije soli i ukus vode

Tip soli	Koncentracija soli	ukus
NaCl	500 mg/dm ³	slan
MgCl ₂	400 mg/dm ³	gorak
KCL	700 mg/dm ³	gorak
FeSO ₄	5 mg/dm ³	gvoždjevit
MnCl ₂	4 mg/dm ³	ukus na blato

Viskoznost - predstavlja otpor koji se javlja pri relativnom kretanju čestica ili slojeva tečnosti. Ona se povećava uslijed povećane gustine pri uvjetima niže temperature i obrnuto. O viskoznosti i gustine vode ovisi brzina kretanja organizama. Ribe su svojim oblikom tijela najbolje prilagođene kretanju u vodi (npr., tunj).



Slika 4.1. Oblik tijela ribe kao adaptacija na viskoznost vode (prilagođeno).

Pokreti vode podrazumijevaju talase i struje, plimu i oseku. Talasi su izazvani vjetrom, a njihov uticaj je, s jedne strane, ravan njihovoj visini, a djeluju do dubine koja je ravna njihovoj dužini – udarna snaga talasa dostiže i do 15 tona po m^2 . Zona koja je pod direktnim uticajem talasa u morima označava se kao zona «mlatanja». Organizmi koji naseljavaju ovakvu zonu imaju posebne prilagodbe na ekstremne uvjete, npr. *Patella* (puž priljepak).

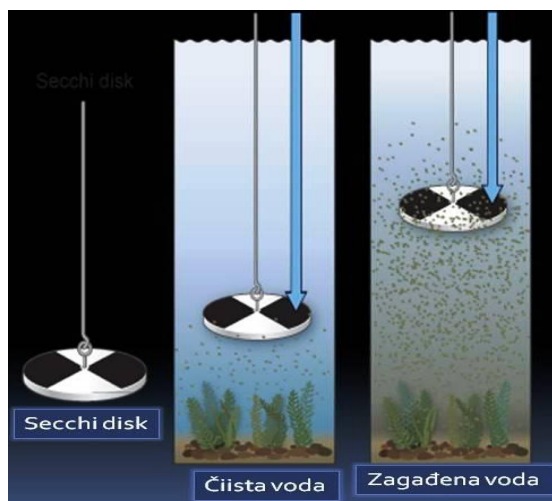
Plima i oseka su prirodni fenomeni koji se javljaju u vodenim površinama, kao što su mora i okeani, usled gravitacijskog uticaja Mjeseca i Sunca. Ovi pokreti vode izazivaju promjene u visini mora — podizanje i opadanje nivoa vode, što se često naziva plimom i osekom. Plima i oseka nastaju zbog kombinacije nekoliko faktora, gravitacija Mjeseca i Sunca. Mjesec ima najjači gravitacioni uticaj na Zemlju jer je najbliži. Gravitacija Mjeseca uzrokuje podizanje vode na strani Zemlje koja je okrenuta ka Mjesecu, stvarajući plimu. Na suprotnoj strani Zemlje takođe dolazi do podizanja nivoa vode usled centrifugalne sile, stvarajući još jednu plimu. Sunčeva gravitacija takođe utiče na Zemlju, ali jer je Sunce mnogo udaljenije od Mjeseca, njegov uticaj je manji. Ipak, Sunce može pojačati ili smanjiti efekat Mjeseca u zavisnosti od svog položaja u odnosu na Zemlju. Zbog međusobne interakcije gravitacije Mjeseca i Sunca, kao i centrifugalne sile, nastaju plime i oseke. Postoje različiti tipovi plime i oseke, koji se razlikuju po intenzitetu i periodici. Springska plima (eng. spring tide), ovaj tip plime nastaje kada su Sunce, Mjesec i Zemlja u istoj liniji, što se događa tokom punog Mjeseca i novog Mjeseca. Gravitacija Sunca i Mjeseca tada se pojačava, što dovodi do najveće visine plime i najniže oseke. Neptunova plima (neap tide), ovaj tip plime nastaje kada je Sunce, Mjesec i Zemlja u pravougloj položaju, što se dešava oko prvog i posljednjeg kvartala Mjeseca. U ovom slučaju, gravitacioni uticaj Sunca i Mjeseca se delimično poništava, pa su plime niže, a oseke dublje. Periodičnost plime i oseke, izražava se kao:

- Semidijalna plima i oseka: u većini djelova svijeta plima i oseka se javljaju dva puta dnevno. To znači da se nivo vode podiže i opada dva puta u periodu od 24 sata i 50 minuta, ovaj obrazac je najčešći;
- Dijalna plima i oseka: u nekim djelovima svijeta, poput Pacifičkog okeana, plima i oseka javljaju se samo jednom dnevno, ovaj obrazac je poznat kao dijalna plima i oseka;
- Mješovita plima i oseka: u nekim područjima može doći do mješovitih plima, kada su plime i oseke kombinacija semidijalnog i dijalnog tipa.

Amplituda plime označava razliku između najviše plime i najniže oseke. Amplituda može značajno varirati u različitim djelovima svijeta tako je Bay of Fundy u Kanadi je jedno od mjesta sa najvećim amplitudama plime na svijetu, gdje razlika između plime i oseke može biti i do 16-17 metara. U nekim delovima Pacifika, amplituda plime je vrlo mala, sa razlikama od svega nekoliko centimetara. Plime i oseke imaju veliki uticaj na prirodne ekosisteme, kao što su mangrove šume, estuariji, i plitke obale. Ove promjene nivoa vode utiču na distribuciju biljnih i životinjskih vrsta koje zavise od plime i oseke. Ovaj fenomen ima značajan uticaj i na pomorsku navigaciju, industrije kao što je ribolov, te na energetske sisteme koji koriste plimu za proizvodnju energije. Prva hidroelektrana koja koristi energiju plime i oseke za proizvodnju električne energije bila je La Rance hidroelektrana u Francuskoj. Ova hidroelektrana je počela sa radom 1966. godine i smatrana je pionirskom u korišćenju energije plime za proizvodnju električne energije.

Turbulencije i kompenzacione struje - Kompenzacione struje su struje u vodi koje nastaju kao odgovor na neravnoteže u drugim djelovima vodenog sistema, kako bi se "kompenzirale" promjene u gustini, temperaturi ili salinitetu. Ove struje nastaju kao rezultat razlike u pritiscima, temperaturnih razlika ili promjena u gustini vode i služe da izjednače ove razlike. Kompenzacione struje se formiraju kao reakcija na vertikalno ili horizontalno kretanje vode izazvano promjenama u gustini ili temperaturnim razlikama. Kada se, na primjer, na površini vode stvori temperaturna ili promjena saliniteta, gustina vode se mijenja, što izaziva kretanje vode u suprotnom pravcu kako bi se izjednačila ta neravnoteža. Kompenzacione struje su ključni mehanizam za izjednačavanje neravnoteža u vodenim ekosistemima, nastale zbog promjena u gustini, temperaturi ili salinitetu, i igraju važnu ulogu u mješanju i transportu materija u vodama. Organizmi se svojom morfologijom prilagođavaju različitim strujama vode, a hidrobionti pokrete vode osjećaju različitim receptorima: rakovi antenama, meduze pipcima, larve insekata čekinjama, ribe bočnom linijom i sl.

Providnost vode - ovisi o uglu pod kojim sunčevi zraci padaju na površinu vode, o vedrom vremenu ili oblačnosti, o gustini suspendovanih čestica, gustini fitoplanktona itd. U najbistrijim jezerima, na 1 m dubine stiže tek 40 % upadne svjetlosti. U blizini Azorskih otoka, fotočelijama su utvrđeni tragovi svjetla na 1.000 m dubine. Najveću providnost imaju topla mora: Tihi okean do 59 m, Crno more do 25 m, Bijelo more samo do 8 m itd. Providnost vode je veća u planinskim vodotocima, nego u ravničarskim što je rezultat dubine i količine suspendovanih materija. Prema stupnju providnosti, vode se dijele na: bistre, skoro bistre, slabo zamućene, zamućene, veoma mutne i neprozirne. Organizmi su se tokom svoje evolucije prilagodili intenzitetu svjetla adaptacijama: bez pigmenta (*albino*) - pećinski oblici ili oblici u podzemnim vodama; nastanak mrkog i crvenog pigmenta kod biljaka i koži nekih akvatičnih životinja, uslijed prejakog intenziteta svjetla; kod nekih vrsta riba koje žive u dubinama došlo je do uvećanja ili pomijeranja očiju. Mjerenje providnosti vrši se pomoći Secchi diska (sl. 4.2), promjera 20 -30 cm, obično bijele ili crne boje, s kontrastnim crnim i bijelim sektorima. Disk se spušta u vodu sa broda, a mjerenje prozirnosti zasniva se na dubini na kojoj disk postane nevidljiv (tj. kada se disk ne vidi golim okom sa površine vode).



Slika 4.2. Prikaz mjerenja providnosti (oligotrofna-čista i eutrofna -zagađena voda) pomoću Secchi disk-a (prilagođeno prema The GLOBE Program, n.d.)

Različiti vodeni ekosistemi (rijeke, jezera, mora) imaju različite nivoe prozirnosti, a Secchi disk je vrlo koristan alat za mjerenje te prozirnosti. U čistim i oligotrofnim slatkovodnim jezerima (posebno u područjima s malo zagađenja), prozirnost može biti vrlo visoka, s dubinama do 30 metara. U zagađenim jezerima ili eutrofnim jezerima s visokim koncentracijama fitoplanktona (algi), prozirnost je obično niža, sa dubinama prozirnosti manjim od 1 metra, jer suspenzija u vodi ometa prolaz svjetlosti. Prozirnost rijeka može značajno varirati ovisno o brzini toka, količini suspendiranih čestica i eroziji tla. U bržim rijekama ili onim koje teku kroz planinske krajeve, prozirnost može biti veća (i do nekoliko metara), dok u nižim, sporijim rijekama s velikim količinama suspendiranih čestica (posebno nakon kiša) može biti vrlo niska. U bistrim tropskim morskim vodama (oligotrofne vode otvorenog mora, koraljni grebeni) Secchi dubina je često 20–40 m, a lokalno može biti i veća, uz malu količinu suspendiranih čestica. U priobalnim područjima i blizu zagađenih obala prozirnost vode može biti znatno manja, često svega nekoliko metara ili manje. U područjima s povećanom količinom fitoplanktona voda postaje замуćena, što dodatno smanjuje dubinu prozirnosti. U estuarijima i plitkim morskim područjima, gdje se miješaju slatke i slane vode, prozirnost je često vrlo niska zbog velikih količina suspendiranih čestica i organske materije te može biti manja od jednog metra. Povećane koncentracije fitoplanktona, koje se često javljaju uslijed prekomjernog unosa hranjivih tvari (npr. dušika i fosfora iz poljoprivrede ili otpadnih voda), dodatno smanjuju prozirnost vode jer planktonske alge apsorbiraju i raspršuju svjetlost. Erozijska tla, zagađenje industrijskim otpadima ili otpadnim vodama može dovesti do velikih količina suspendiranih čestica u vodi, što smanjuje prozirnost i utječe na zdravlje ekosistema. Mjerenje prozirnosti vode pomoću Secchi diska pruža jednostavan, ali učinkovit način za procjenu stanja vodenog ekosistema. Prozirnost je važan parametar za razumijevanje kvaliteta vode, bioloških uslova i ekološke ravnoteže, jer utiče na raspodjelu svjetlosti, temperaturu i životne uvjete u vodenim sredinama.

Boja vode je važan fizički parametar koji može pružiti informacije o stanju ekosistema i kvalitetu vode. Boja vode zavisi od različitih faktora, uključujući prisutnost rastvorenih materija, suspendovanih čestica i mikroorganizama, kao i prirodnih ili antropogenih uticaja.

Boja vode može biti uzrokovana organskim materijama kao što su humusne tvari (poznate kao fulvične kiseline), koje dolaze iz razgradnje biljnih i životinjskih ostataka. Takvi materijali mogu uzrokovati žutu ili braon boju vode, posebno u močvarnim područjima, rijekama i jezerima. Alge, plankton i drugi mikroorganizmi mogu uzrokovati promjene u boji vode. Na primjer, velike količine zelenih algi mogu dati vodi zelenu boju, dok plavi fitoplankton može uzrokovati plavičasto-zelenu boju. Neke prirodne tvari, poput željeza ili mangana, mogu u vodi uzrokovati crvenkastu ili smeđkastu boju, naročito u područjima sa visokim nivoima ovih minerala. Industrijsko ili poljoprivredno zagađenje, kao što su otpadne vode i hemikalije, može uzrokovati promjene u boji vode. Na primjer, naftne mrlje mogu uzrokovati crne ili smeđe boje, dok zagađivači poput pesticida ili teških metala mogu izazvati različite promjene u boji. Otpadne vode iz domaćinstava i industrije, bogate organskim materijama i hemikalijama, mogu izazvati promjenu u boji vode, od žute do crvene, zavisno od vrste kontaminacije. Raspad biljnih i životinjskih materija može proizvesti proizvode koji vode do boje, kao što su huminske kiseline i tanini (kiselinske supstance koje obaraju vodu u tamnije tonove). Takve promjene su posebno uočljive u močvarnim područjima i šumskim potocima. Sezonske varijacije u temperaturama i vodostaju mogu također uticati na boju vode. Na primjer, u proljeće i jesen, zbog povećanog rastvaranja organskih materija, može doći do povećanja koncentracije tanina u vodi, što uzrokuje da voda postane tamnija (tabela 4.4).

Tabela 4.4. Prikaz boje vode i izvora koji utiču na nju u vodenim ekosistemima

Boja vode	objašnjenje
bistra, plavičasta voda	čista voda u dubokim morima ili oligotrofna jezera s minimalnim rastom algi
zeleni voda	voda bogata algama (bogat fitoplankton) ili eutrikacija
žuta ili braon boja	visoka koncentracija huminskih kiselina; močvarama i sl.
crvena	prisustvom crvenih algi ili hrđe (željezo u vodi)
crna	kontaminacija naftom
siva	vis. konc. susp. čestica minerala (kao što su kvarc, gline i druge sitne čestice), koje potiču od erozije tla ili povećanog vodostaja

Boja vode se često procjenjuje pomoću komparativnih skala boja ili instrumenta za mjerenje boje poput colorimetra. Takođe, Lovibond table (standardna skala boja) mogu se koristiti za određivanje boje vode u laboratoriji. Boja vode može biti prirodna ili rezultat ljudskih aktivnosti. Razumijevanje boje vode pomaže u procjeni kvaliteta vode i zdravlja vodenih ekosistema. Na temelju boje, može se uočiti potencijalno zagađenje, prisutnost mikroorganizama, kao i drugi ekološki faktori koji utiču na životne uslove u vodi.

Temperatura vode uvjetovana je geografskom širinom, godišnjim dobom, dubinom i strujanjem vode, njenim zagađenjem itd. Sunčevu energiju apsorbiraju pripadnici fitoplanktonske zajednice i pretvaraju je u toplotu i time zagrijevaju vodu do 1 m dubine. Dublji slojevi se zagrijevaju cirkulacijom (izaziva je razlika u gustini) i turbulentnim kretanjima vode (kao rezultat djelovanja talasa i različitih struja). Miješanje vode je i do 40 m dubine. Kod organizama, viša temperatura izaziva ubrzanje fizioloških procesa, intenziteta disanja, ishrane, ubrzanje rasta i razvoja, skraćuje ciklus razvoja, a broj generacija je veći. Promjena temperature vode kod nekih organizama djeluje kao signal i određuje početak mrijesta ili migracija. Poikilotermni (ektotermi) organizmi su na višoj temperaturi aktivniji, a zimi miruju, npr., ribe.

Homeotermni (endotermi) organizmi su manje ovisni o promjeni temperature vode. Uslijed trajnih promjena temperature može doći do potpunog iščezavanja nekih vrsta, npr. u tercijeru i kvartaru je potpuno iščezao losos u vodama Male Azije i sjeverne Afrike. Temperatura vode je jedan od ključnih faktora koji utiču na fizičke, hemijske i biološke procese u vodenim ekosistemima. Temperatura može varirati u zavisnosti od mnogih faktora, uključujući geografski položaj, sezonske promene, dubinu, brzinu strujanja, kao i prisustvo ljudskih aktivnosti.

Temeljno razumijevanje temperature vode važno je za procjenu kvaliteta vode, biodiverziteta i ekološke ravnoteže u različitim vodenim sistemima. Faktori koji utiču na temperaturu vode su prvenstveno geografska širina; u tropskim područjima voda ima više temperaturu, dok je voda u polarnim i subpolarnim regionima hladnija. Okeani i mora u tropskim zonama mogu imati temperaturu površinskih slojeva vode od 25-30°C, dok voda u polarnoj regiji može biti blizu tačke smrzavanja, oko 0°C. Uticaj sezone je jasno izražen tako da u toku letnjih mjeseci, temperatura vode raste zbog povećane sunčeve radijacije i visokih dnevnih temperature, a zimi tokom zimskih mjeseci, temperatura vode opada, a u područjima sa hladnom klimom voda može doći blizu ili ispod 0°C, stvarajući led na površini. Dubina takođe uvjetuje vrijednost temperature na površini vode, temperatura je obično viša zbog direktnog uticaja sunčeve svetlosti, a u dubljim vodama temperatura opada, jer svjetlost ne može doprijeti do većih dubina. U oceanskim dubinama, temperatura može biti samo nekoliko stepeni iznad nule (oko 3 °C).

Strujanje vode uzrokuje vrijednost temperature u rijekama - brze struje obično imaju manju temperaturnu fluktuaciju jer se voda stalno miješa. U mirnim vodama, poput jezera ili bazenima, temperatura može varirati tokom dana i noći, a tokom ljeta može dostići znatno viši nivo. Zagađenje i ljudske aktivnosti imaju direktan uticaj na vrijednost temperature poput industrijskog zagađenja, otpadnih voda ili termoelektrana koji mogu značajno povećati temperaturu vode.

Ove promjene, poznate kao termalno zagađenje, mogu imati ozbiljan uticaj na ekosistem i smanjenje biodiverziteta. Padavine i otapanje snijega u tekućicama mogu uzrokovati nagle promjene u temperaturi vode. Kiše obično hlade vodu, dok otapanje snijega može povećati protok hladne vode u rijeke, snižavajući temperaturu.

Temperatura vode u rijekama tokom ljeta može dostići temperaturu od 15-25°C dok u toplim jezerima (npr. u tropskim područjima) može dostići i 30°C. Tokom zime u hladnijim područjima, temperatura može opasti blizu 0°C, ali rijeke i jezera često ne smrzavaju potpuno zbog strujanja ili prisustva soli. Voda u tropskim i suptropskim morima može imati temperaturu između 25-30°C tokom cijele godine.

Umjerena područja imaju temperaturne varijacije, dok hladna mora (kao što je Sjeverni okean) mogu imati temperature od 0°C do 10°C tokom većeg dijela godine. Temperatura utiče na biološke procese, raspored/disperziju organizama u vodenim ekosistemima, na kvalitet vode kroz oksigenaciju isl. (tabela 4.5).

Tabela 4.5. Uticaj temperature vode na ekosisteme

Aspekt	Opis uticaja
Biološki procesi	Fotosinteza: temperatura direktno utiče na brzinu fotosinteze vodenih biljaka i fitoplanktona; u toplijim vodama fotosinteza može biti ubrzana, dok hladne vode usporavaju te procese. Respiracija: mikroorganizmi, ribe i drugi vodeni organizmi imaju različite optimalne temperature za disanje i rast; u toplim vodama metabolizam je brži, dok u hladnim vodama usporava.
Raspodjela vrsta	Topla voda pogoduje tropskim vrstama (npr. algama, koraljima, određenim vrstama riba), dok hladna voda odgovara vrstama koje naseljavaju polarna i subpolarna područja.
Oksigenacija vode	Hladnija voda može zadržati više kiseonika, što je ključno za opstanak mnogih vodenih organizama; toplija voda sadrži manje rastvorenog kiseonika, što može negativno uticati na ekosisteme, naročito u industrijskim područjima s visokim nivoima termalnog zagađenja.
Uticaj na kvalitet vode	Povećanje temperature može uzrokovati smanjenje rastvorenog kiseonika, stvarajući anaerobne uslove koji dovode do raspadanja organskih tvari i povećanja koncentracije toksina (amonijak, sulfidi).
Ekstremni temperaturni uslovi	Temperaturne fluktuacije mogu izazvati stres kod brojnih organizama; nagle promjene temperature uzrokuju migraciju ili uginuće osjetljivih vrsta (npr. prekomjerno zagrijavanje u ljetnom periodu ugrožava vrste koje preferiraju hladnije vode).

Mjerenje temperature vode - termometri su najosnovniji alat za mjerenje temperature vode. U praksi, korišćenje digitalnih termometara ili thermistor senzor daje precizne rezultate. Temperatura vode u ekosistemskim studijama obično se mjeri na nekoliko dubina kako bi se razumjeli temperaturni gradijenti unutar vodenog stupa (npr. epilimnion i hipolimnion u jezerima). Temperatura vode igra ključnu ulogu u regulaciji bioloških i hemijskih procesa u vodenim ekosistemima. Razumjevanje temperature je važno za očuvanje vodenih resursa, jer promjene u temperaturi mogu značajno uticati na biodiverzitet, kvalitet vode i funkcionisanje ekosistema. Kontinuirani monitoring temperature vode važan je za očuvanje vodenih ekosistema, posebno u kontekstu klimatskih promjena i ljudskih uticaja.

Električna provodljivost (EC) uvjetovana je rastvorenim solima u vodi (hlorid, nitrat, sulfat, natrij, magnezij, kalcij ili željezo), izražava se u $\mu\text{S}/\text{cm}$ (mikrosimens po centimetru) i predstavlja recipročnu vrijednost električnog otpora u mega omima. Generalno predstavlja sposobnost analiziranog uzorka vode da provodi električnu struju.

Vrijednost elektroprovodljivosti iznad $\sim 500 \mu\text{S}/\text{cm}$ (u slatkovodnim ekosistemima) već predstavlja povišenu mineralizaciju, iako ekološki prihvatljivu. Ipak, takva EC počinje uticati na fiziologiju i reprodukciju mnogih organizama. (tabela 4.6). Iako je područje dominantno na silikatnoj geološkoj podlozi, prisustvo karbonatnih stijena u dijelovima sliva, kao i lokalni hidrološki i antropogeni uticaji, mogu dovesti do povećane mineralizacije i vrijednosti elektroprovodljivosti koje lokalno prelaze $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Ukoliko nema povećanog sadržaja natrija i hlorida, takve vode mogu ostati ekološki pogodne i omogućiti opstanak osjetljivih vrsta, poput potočnog raka (*Austropotamobius torrentium*).

Tabela 4.6. Tipične vrijednosti elektroprovodljivosti (EC) u slatkim vodama

Vrijednost EC	karakteristike
0–150 $\mu\text{S}/\text{cm}$	oligotrofne, planinske, izvorske vode na slilikatnoj geološkoj podlozi
150–500 $\mu\text{S}/\text{cm}$	prosječne prirodne rijeke i jezera umjerenog pojasa
500–1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	već pokazuje mineralizaciju ili antropogeni uticaj
>1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	ekološki stresna za mnoge slatkovodne vrste
>2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	visoka, ograničava za mnoge organizme
oko 50.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	morska voda (drugačija biocenoza)

Mjeri se pomoću uređaja koji se zove konduktometar. Uređaj se postavlja na ravnu površinu i mora bit zaštićen od jakog svjetla i togase. Postoje dva tipa: laboratorijski i prenosivi (slika 4.2).



Slika 4.2. Mjerenje elektroprovodljivosti prenosivim konduktometrom (originalana fotografija Trožić-Borovac, 2022)

Porast elektroprovodljivosti uvjetovan je količinom organske materije i tipom geološke podloge (silikati i granit povećanje). Kod slane okeanske vode uslijed visoke koncentracije soli (velike vrijednosti provodljivosti (koje instrumenti ne mogu izmjeriti) mjeri se ukupni salinitet.

Hemijski parametri vode predstavljaju mjerljive pokazatelje hemijskog sastava i hemijskih procesa u vodi, a koriste se za procjenu njenog kvaliteta, porijekla, namjene i uticaja na organizme u vodenom ekosistemu. Oni obuhvataju koncentracije rastvorenih gasova, iona, hranjivih tvari, organskih i anorganskih supstanci, te druge hemijske pokazatelje koji određuju hemijsko stanje vode (tabela 4.7).

Tabela 4.7. Prikaz hemijskih parameter vode

pH	ukupni N
alkalitet	nitriti
tvrdća	nitriti
koncentracija kiseonika	amonijak
saturacija kiseonika	ukupni P
BPK ₅ -biološka potrošnja kiseonika	ortofosfati
HPK- hemijska potrošnja kiseonika	prioritetne supstance
TOC- ukupni ugljik	salinitet

Voda je odličan rastvarač i sadrži rastvorene organske i anorganske materiju koje su neophodne za opstanak života u njoj. Kišne kapi iz atmosfere upijaju gasove: kiseonik, ugljendioksid,

sumporvodoni i dr., a prolaskom kroz slojeve zemljišta, voda na svom putu rastvara mineralne materije koje dopijevaju u vodotoke, jezera i mora. Prema količini soli rastvorenih u vodi razlikuju se: slatke vode, slane vode i bočatne vode. Sadržaj soli i minerala u slanoj vodi znatno je veći nego u slatkoj vodi, što rezultira razlikama u pH i drugim svojstvima (tabela 4.8). Slana voda je svaka voda koja sadrži najmanje 3% soli. Oceani obično sadrže oko 3,5% soli. Sol je ista kao kuhinjska sol - natrijev klorid (NaCl). Molekule vode razdvajaju ione natrija (Na) i klora (Cl). Slana voda također sadrži minerale kao što su sulfati, magnezij, kalcij, kalij i brom. Morska voda pored kuhinjske soli sadrži soli: Na_2SO_4 – natrijev sulfat, K_2SO_4 – kalij sulfat, Ca_2SO_4 – kalcij sulfat.

Tabela 4.8. Sastav i tipovi voda

Tip vode	salinitet	pH	mineralni sastav
slatka voda	<0,5%	6,0-8,0	Cl- 1-250 mg/L; Na 1-200 mg/L; Ca 15 mg/L, sulfat 11 mg/L, silicij 7 mg/L, Mg 4 mg/L, Kalij 3 mg/L, Fe 1 mg/L
Braktna/bočatna	0,5-3%	6,0-9,0	Cl- 500-5000 mg/L; Na 5-8000 mg/L, Ca 30-350 mg/L, sulfat 10-800 mg/L Mg 5-80 mg/L, Kalij 5-50 mg/L
slana	>3%	8,0- 9,0	Cl- 19000 mg/L; Na 10 000 mg/L, Ca 400 mg/L, sulfat 2680 mg/L Mg 1290 mg/L, Kalij 395 mg/L; brom 66 mg/L

Za razumijevanje razlike između slane i slatke vode, potrebno je istaknuti svojstva vode općenito. Voda je polarna molekula, što znači da se elektroni koji se koriste za povezivanje H i O iona ne dijele ravnomjerno, što rezultira time da jedna strana molekule ima blagi pozitivni naboj, a druga ima blagi negativni naboj. Ovaj polaritet omogućava vodi da se uspješno veže sa drugim molekulama i da ih razdvaja. Voda je, zapravo, toliko izuzetna u otapanju drugih molekula da se naziva univerzalnim rastvaračem.. To ne znači da može otopiti sve, ali može otopiti mnogo više materija čak i od najjačih kiselina i baze. Tokom dugih historijskih perioda, voda koja je u kontaktu sa stijenom, poput dna oceana ili obale, otapa/la minerale u stijeni. Minerali se ugrađuju u vodu. Fosfor je glavni primjer za to. Kada padavina otiče u lokalne vodotoke i slivove, voda usput pokupi i minerale. Budući da većina vodenih puteva u konačnici teče u ocean na velikim udaljenostima, voda je obogaćena sa mnogo otopljenih elemenata dok ne stigne do oceana. To je jedan od faktora koji pridonosi značajno većem sadržaju minerala u slanoj vodi u usporedbi sa slatkom vodom. Zbog prisustva ovih soli, morska voda je gorka, a pripada sulfatnom tipu voda (kopnene vode sadrže manju koncentraciju soli i nešto više kalcijbikarbonata $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ – hidrokarbonatni tip). Pored njih, u morskoj vodi se nalaze i nitrati, amonijačne soli, fosfati i karbonati. Biljke ove soli iz vode uzimaju samo u obliku aniona i kationa.

Azotna jedinjenja - Izvor azotnih soli je zemljište kroz koje voda prolazi i spira ih u rijeke, a zatim u more. Drugi izvor su ostaci organizama koje bakterije razlažu; mineralizacijom organska materija prelazi u amonij (NH_4^+), potom u nitrite (NO_2^-), a daljom oksidacijom u nitrati (NO_3^-) koji su biljkama dostupni kao izvor azota (tabela 4.9). Amonijak (NH_3) nastaje tokom razgradnje proteina, u procesu amonifikacije i u urinu vodenih organizama, te postaje

toksičan u koncentracijama oko 8 mg/L, naročito pri povišenom pH i temperaturi. Služi kao rezerva azota u vodenim ekosistemima, jer ga bakterije, ako ga nema previše, brzo pretvaraju u manje toksične i biljkama iskoristive oblike. Nitriti su prelazni i potencijalno opasni oblici azota jer ometaju transport kiseonika u krvi riba (methemoglobinemija), dok nitrati imaju najmanju toksičnost, ali u visokim koncentracijama doprinose eutrofikaciji i povećanom rastu algi.

Tabela 4.9. Azotna jedinjenja u vodi

jedinjenje	Porijeklo
Amonijak (NH ₃):	najčešće azotno jedinjenje u vodi, iz otpadnih voda, dušičnih gnojiva, razgradnje organskih tvari i dekompozicije biljaka i životinja, u vodi može biti toksičan za mnoge vodene organizme, posebno za ribe, jer utiče na njihov respiratorni sistem, izazivajući smanjenje kapaciteta za disanje
Nitriti (NO ₂ ⁻):	međuprodukti u procesu nitrifikacije (pretvorba amonijaka u nitrata) nastaju kada bakterije, kao što je <i>Nitrosomonas</i> , oksidiraju amonijak u nitrite, mogu biti toksični za ribe i druge vodene organizme, jer ometaju transport kiseonika kroz njihovu krv (prekidaju vezivanje kiseonika za hemoglobin)
Nitrati (NO ₃ ⁻):	najstabilnija oblik azota u vodi i najčešće prisutni u slatkim i morskim vodama, nastaju kao rezultat daljnje oksidacije nitrita od strane bakterija <i>Nitrobacter</i> , obično su manje toksični od amonijaka i nitrita, ali mogu izazvati eutrofizaciju u vodenim ekosistemima
Organski azot	nalazi se u molekulama organskih tvari, kao što su proteini, aminokiseline i nukleinske kiseline, prisutan je u svim živim organizmima, a njegovo oslobađanje u vodu može nastati uslijed razgradnje ili dekompozicije organskih tvari

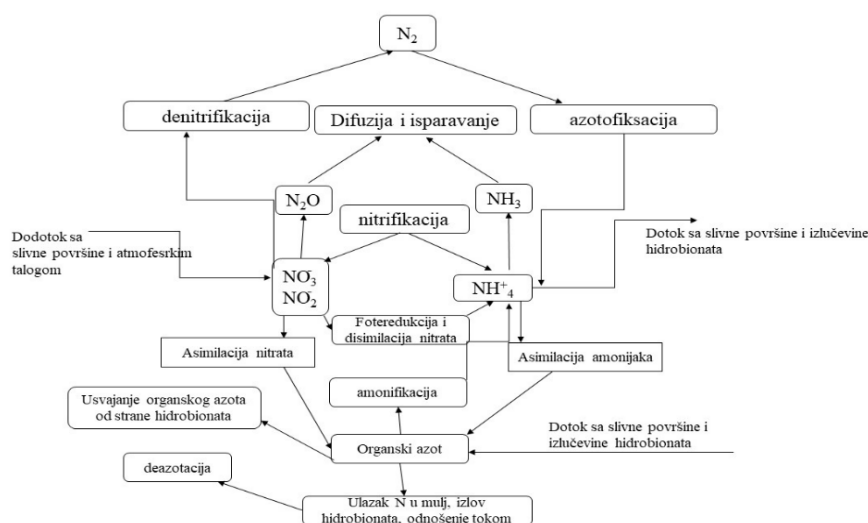
Fosfati su neophodni biljkama za stvaranje važnih komponenti ćelijske plazme, kao što su nukleotidi, ATP i ADP; fosfor ulazi i u sastav mnogih kofermenata, membranskih fosfolipida te životinjskih kostiju. U vodi se javlja u obliku ortofosfata (PO₄³⁻), koji je neposredno dostupan fitoplanktonu, te kao dio ukupnog fosfora, koji obuhvata rastvoreni fosfat, organske fosforne spojeve i fosfor vezan u suspendiranim česticama. Iako je fosfor esencijalan, u slatkim vodama ga ima u znatno manjim koncentracijama nego azota, pa upravo zato često predstavlja ograničavajući nutrijent. Planktonski organizmi ga najintenzivnije usvajaju, a zatim putem prehrambenog lanca prelazi na više trofičke nivoe, uključujući ribe.

Sumporvodoni (H₂S) nastaje u procesu truhljenja organskih materija bogatih bjelančevinama, a bakterije ga brzo oksidiraju u sumpornu kiselinu, zatim u njene soli koje su dostupne biljkama.

U vodenim sistemima se nalaze i biogeni elementi: C, O₂, N, Mg, P, Ca, Fe, S, K kao i mikroelementi: Zn, Co i Mo (najvažniji). Kopnene vode koje dolaze u dodir sa većom količinom mineralnih materija na svom putu kroz zemlju pripadaju tipu mineralnih voda.

Kruženje **azota** u vodenim ekosistemima (slika 4.3) podrazumijeva različite biološke i hemijske procese kroz koje azot prelazi iz jednog oblika u drugi, kao i iz različitih rezervoara (atmosfera, tlo, voda, biota). Glavni procesi u kruženju azota u vodi uključuju: fiksacija azota (Nitrogen fixacija), koji vrše azot-fiksirajuće bakterije (kao što su *Rhizobium* u korijenima biljaka, ili *Cyanobacteria* u vodenim ekosistemima) mogu fiksirati atmosferski azot (N₂) u biološki dostupne oblike poput amonijaka. Ovaj proces je ključan za unos azota u ekosistem.

Nitrifikacija je dvofazni proces u kojem nitrifikacione bakterije oksidiraju amonijak (NH_3) prvo u nitrite (NO_2^-), a zatim u nitrati (NO_3^-). Prva faza je oksidacija amonijaka u nitrite (vrši se bakterijama *Nitrosomonas*), dok druga faza uključuje oksidaciju nitrita u nitrati (vrši se bakterijama *Nitrobacter*). Denitrifikacija je proces u kojem denitrifikacione bakterije koriste nitrati kao izvor energije i redukuju ih natrag u atmosferski azot (N_2). Ovaj proces je ključan za oslobađanje azota iz vodenih ekosistema i vraćanje azota u atmosferu. Denitrifikacija se obično dešava u anaerobnim uslovima, kao što su muljaste sedimente u jezerima, močvarama ili rijekama. Amonifikacija je proces u kojem mikroorganizmi razgrađuju organski azot iz uginulih organizama, biljaka ili životinjskog otpada u amonijak (NH_3) ili ione amonijaka (NH_4^+). Proces kruženja azota suštinski je za obnavljanje i dostupnost azota u ekosistemima.



Slika 4.3. Shematski prikaz kruženja azota u vodenim ekosistemima (prema Kuznetsov i sur., 1979)

Eutrofizacija je proces u kojem povećane koncentracije azotnih jedinjenja (posebno nitrata) i fosfata izazivaju prekomjerni rast algi u vodama, što može dovesti do smaranja kvaliteta vode, smanjenja kiseonika i ugrožavanja biološke raznovrsnosti. U slatkovodnim ekosistemima, nitrati i fosfati su najčešći uzročnici eutrofikacije, što dovodi do stvaranja algalnih cvjetova i smanjenja kiseonika u vodi. Azotna jedinjenja u vodi imaju značajnu ulogu u stabilnosti ekosistema. Proces kao što su nitrifikacija, denitrifikacija, amonifikacija i fiksacija azota omogućavaju neprekidno kruženje azota u vodi, što podržava biološke procese i život u vodenim ekosistemima. Međutim, prekomjerni unos azotnih jedinjenja, naročito zbog ljudskih aktivnosti (npr. upotreba gnojiva i otpadnih voda), može izazvati eutrofikaciju i ugroziti kvalitet vode, što je izazov za očuvanje vodenih resursa.

Fosfor je jedan od ključnih hranljivih elemenata za rast biljaka i organizama, a u vodi se nalazi u različitim oblicima, uključujući anorganski fosfor (kao što su fosfati) i organski fosfor (koji je prisutan u organskim molekulama). Fosfor je esencijalan za biološke procese jer je osnovni sastojak DNK, RNK, ATP i drugih bioloških molekula, ali prekomjerno prisustvo fosfora u vodi može izazvati ozbiljne ekološke probleme, kao što je eutrofikacija. Anorganski fosfor u obliku fosfata (PO_4^{3-}) su najrasprostranjeniji oblik fosfora u vodi. Fosfati se mogu pojaviti u vodi u različitim oblicima, kao što su mono-fosfati i di-fosfati, koji su biološki dostupni za

vodene biljke i mikroorganizme. Fosfati mogu biti rastvoreni u vodi, a u slatkim vodama uglavnom se nalaze u rastvorenom obliku, dok u morskim vodama fosfati mogu biti prisutni u topivim ili netopivim oblicima, u zavisnosti od pH vrednosti i drugih faktora. Fosfati u vodi mogu poticati rast biljaka, ali prekomjerna koncentracija može izazvati probleme u ekosistemima, uključujući prekomjerni rast algi. Fosfor u organskim oblicima je prisutan u biljnom i životinjskom materijalu, uključujući mrtve organizme, detritus i otpade. Tokom degradacije organskih tvari od strane mikroorganizama, fosfor se oslobađa i prelazi u anorganske oblike (npr. fosfate), koji su biološki dostupni za biljke i mikroorganizme. Organski fosfor je takođe važan za biološke procese, ali njegov ciklus je složeniji od ciklusa anorganskog fosfora. Kruženje fosfora u vodi se razlikuje od kruženja drugih hranljivih elemenata, poput azota, jer fosfor nema atmotski oblik (kao što je azot u obliku N₂), pa se stoga fosfor kreće kroz ekosistem uglavnom kroz sedimente i vode.

Organska materija (organizmi nakon smrti) u vodi je predstavljena materijom u fazi mineralizacije, koji se sastoji od teško rastvorljivih humusnih kiselina, nafte, šećera i aminokiselina. Njihovu razgradnju vrše nitaste, gvožđevite i druge bakterije. Gornji slojevi vode, uslijed primarne proizvodnje organske materije i dovoljno svjetla, označavaju se kao tr o f o g e n i; a neosvijetljena (duboka) zona se označava kao t r o f o - l i t i č k a, u kojoj nema primarnih proizvođača. Alge i makrofitske biljke, asimilirajući sunčevu energiju, vrše fotosintezu stvarajući organsku materiju i oslobađajući kiseonik, a potrošači, koristeći stvorenu organsku materiju, razlažu je putem varenja u prostije sastojke i sintetišu nove složenije organske materije. Ugibanjem, ova živa bića budu mineralizovana aktivnošću mikroorganizama čiji rezultat je obnova mineralnih soli, koje vertikalnim kretanjem vode dopijevaju do biljaka i bivaju utrošene u novom procesu primarne produkcije ili fotosintezi. Energija protiče kroz ekosistem, sunčeva energija vezana prelazi u hemijsku, a ova u toplotnu koja ispada iz kruženja. Dio organske materije se gubi u svom kružnom toku, a dio se taloži na dno gdje ne može biti mineralizovan i vremenom prelazi u *naftu*. Tok organske materije se analizira putem aktivnog fosfora i pokazao je sezonske razlike.

Rastvoreni gasovi u vodi su, prije svega, kiseonik i ugljendioksid. Kiseonik dopijeva u vodu difuzijom iz vazduha i procesom fotosinteze vodenih biljaka. Slatka voda ima veću koncentraciju od morske, a koncentracija ovisi o pritisku, nadmorskoj visini, temperaturi i količini soli. Kiseonik se troši za disanje i za procese mineralizacije (truhljenje), a u vodene ekosisteme dopijeva u vodu difuzijom iz vazduha (gdje ga ima oko 25 puta više) i procesom fotosinteze vodenih biljaka.. Kiseonik u vodi potiče u oko 60–90% iz fotosinteze vodenih biljaka, algi i cijanobakterija, dok se preostali dio unosi otapanjem iz atmosfere. Brzina otapanja kiseonika zavisi od temperature, turbulencije i miješanja vode: hladna, brza i turbulentna voda može apsorbirati više kiseonika, dok u toploj i mirnoj vodi rastvorljivost značajno opada. U stajaćim vodama je izražena vertikalna stratifikacija ovog gasa. Količina kiseonika rastvorenog u vodi uvjetovana je temperaturom, nadmorskom visinom, sezonom, koncentracijom soli i pritiskom. Kopnene vode na 0 °C pri normalnim uvjetima pritiska sadrže 10 mg/L, a morska voda pri istim uvjetima samo 8 mg/L. Pri višim temperaturama (30 °C) količina kiseonika u slatkim vodama je 5,6 mg/L, a u moru 4,5 mg/L. Ovo je primjer razlike koncentracije kiseonika u različitim uvjetima temperature i koncentracije soli. U vodotocima, u gornjim tokovima,

uslijed niže temperature, više nadmorske visine na kojoj se nalaze i brzine protoka, voda je bogatija kiseonikom od nizinskih dijelova mirnijeg protoka, veće dubine i viših temperatura vode. Od parametara kiseonika posebno je važna biološka potrošnja kiseonika (BPK₅) koja predstavlja količinu kiseonika koja se utroši za razlaganje organske materije pod uticajem aerobnih bakterija u površinskim (otpadnim) vodama za pet dana. U čistim, prirodnim vodama, kao što su rijeke, jezera, ili mora koja nisu zagađena, BPK₅ vrijednosti su obično niske, jer količina organskih materija u vodi nije velika. U tim slučajevima, mikroorganizmi koji razgrađuju organsku materiju koriste kiseonik, ali ne u značajnim količinama. Visoke vrijednosti ukazuju na ozbiljno zagađenje vode i mogu biti znak da voda ima značajnu količinu organskih materija za čije razlaganje bakterije brzo koriste kiseonik. Ovo može dovesti do smanjenja nivoa kiseonika, što ima negativan uticaj na životne oblike koji zavise od kiseonika i može izazvati smrt mnogih vodenih organizama (tabela 4.10).

Tabela 4.10. Vrijednosti BPK₅ u uzorcima vode vodenih ekosistema i kategorija kvaliteta vode

Vrijed. BPK ₅ (mg/L)	Kat. kval.	Objašnjenje (kvaliteta vode)
>1	I	čista
1-3	II	dobra sa malom količinom organske materije
>3-7	III	umjerena količina organske materije sa evidentiranim uticajima na biodiverzitet
>7-15	IV	visok nivo zagađenja, što može smanjiti nivo kiseonika u vodi, dovodeći do smanjenja biološke aktivnosti i povećanja mrtvih zona (posebno u dubljim vodama)
>15	V	vrlo visok nivo zagađenja, koji može izazvati drastične promjene u ekosistemu, uključujući smanjenje biološke raznovrsnosti, smanjenje broja aerobnih organizama, i pogoršanje kvaliteta vode

Biološka potrošnja kiseonika je ključni indikator kvaliteta vode i nivoa zagađenja u vodenim ekosistemima. Visoke vrijednosti BPK₅ ukazuju na to da je voda preopterećena organskim materijama, što može dovesti do smanjenja dostupnosti kiseonika za organizme i uzrokovati ozbiljne ekološke probleme. Monitoring BPK₅ vrijednosti pomaže u procjeni stanja vodenih ekosistema i omogućava donošenje odluka o potrebnim mjerama zaštite.

Drugi parametar potrošnje kiseonika je **hemijska potrošnja kiseonika (HPK)** određena na osnovu utroška KMnO₄ ili K₂Cr₂O₇ koji su mjera sadržaja organske materije autohtonog ili alohtonog porijekla. HPK je parametar koji mjeri količinu kiseonika koja je potrebna za oksidaciju (razgradnju) hemijskih supstanci u vodi, bez obzira na porijeklo tih supstanci. HPK se koristi kao indikator stepena zagađenja voda, jer ukazuje na količinu hemijskih kontaminanata koji mogu zahtijevati kiseonik za svoj process razgradnje. Za razliku od BPK (biološke potrošnje kiseonika), koja se odnosi na količinu kiseonika koju mikroorganizmi koriste za razgradnju organskih materija, HPK se fokusira na oksidaciju svih supstanci, uključujući neorganske zagađivače (kao što su amonijak, nitrati, sumpor-dioksid, teški metali, itd.), kao i organske zagađivače koji nisu podložni biološkoj razgradnji. HPK je količina kiseonika (izražena u mg/L) koja je potrebna za hemijsku oksidaciju supstanci u uzorku vode, pri određenoj temperaturi (obično 20°C) i tokom određenog vremenskog perioda (obično 2-4 sata). Ovaj parametar daje uvid u nivo hemijskog zagađenja u vodi. HPK se mjeri pomoću reakcije oksidacije uz pomoć jakih oksidacionih agenasa, kao što je kalijum-dihromat

($K_2Cr_2O_7$), koji oksiduje razne hemijske kontaminante u vodi. Količina potrošenog dihmata (koji se mjeri titracijom) daje vrijednost HPK, koja je ekvivalentna količini kiseonika koji bi bio potrošen u procesu oksidacije tih supstanci. BPK (biološka potrošnja kiseonika) se odnosi na količinu kiseonika koju mikroorganizmi koriste za razgradnju organskih materija tokom vremena (obično 5 dana), dok se HPK odnosi na ukupnu količinu kiseonika potrebnu za hemijsku oksidaciju svih supstanci (organskih i neorganskih) u vodi. HPK može biti veći od BPK jer uključuje oksidaciju svih hemijskih zagađivača, dok BPK samo mjeri biološki razgradljive materije. Značaj HPK u vodenim ekosistemima: indikator hemijskog zagađenja, koristan je za identifikaciju nivoa hemijskog zagađenja u vodi, jer može detektovati prisutnost različitih hemijskih zagađivača kao što su teški metali, industrijski otpad, pesticidi, i druge toksične supstance koje ne mogu biti razgrađene biološkim putem. Visoke vrijednosti HPK mogu ukazivati na to da voda sadrži velike količine zagađivača koji mogu značajno smanjiti količinu dostupnog rastvorljivog kiseonika u vodi, što ugrožava organizme koji zavise od kiseonika (poput riba i drugih aerobnih organizama). Mjerenje HPK može pomoći u zaštiti vodenih ekosistema jer visoke vrijednosti ovog parametra ukazuju na potencijalne prijetnje za kvalitet vode i biodiverzitet. Npr., visoka vrijednost HPK može ukazivati na prisustvo teških metala, pesticida, ili industrijskih otpadnih voda, koji mogu imati dugoročne negativne posljedice po ekosisteme. Niske vrednosti HPK (manje od 5 mg/L) obično ukazuju na čiste vode sa niskim nivoima hemijskog zagađenja, što je povoljan uslov za život vodenih organizama. Umjerene vrijednosti HPK (od 5 do 15 mg/L) mogu ukazivati na umjereno zagađenje, kao što je prisustvo manjih količina industrijskih ili poljoprivrednih otpadnih voda. Takve vrijednosti obično ne ugrožavaju odmah ekosistem, ali mogu izazvati dugoročne promjene. Visoke vrednosti HPK (> 15 mg/L) ukazuju na ozbiljno hemijsko zagađenje, koje može značajno smanjiti kvalitet vode i ugroziti ekosistem. U ovom slučaju, voda može sadržati velike količine toksičnih materija koje zahtijevaju značajnu količinu kiseonika za njihovu oksidaciju. HPK je važan parametar za procjenu nivoa hemijskog zagađenja u vodi i može pomoći u ocjeni stanja vodenih ekosistema. Materija je biorazgradiva ako je odnos BPK_5/HPK visok ($\approx 0,4-1,0$), dok nizak odnos ($\approx < 0,2$) ukazuje na prisustvo teško razgradivih ili netoksičnih organskih spojeva koje bakterije ne mogu efikasno razgraditi.

pH vrijednost voda - predstavlja mjeru kiselosti ili bazičnosti rastvora i definiše se kao negativni logaritam koncentracije vodikovih jona (H^+): $pH = -\log [H^+]$. Ugljendioksid (CO_2) u vodu dolazi iz vazduha (difuzijom), respiracijom potrošača, truhljenjem, a neophodan je biljkama. Ulaskom u vodu dolazi do procesa:

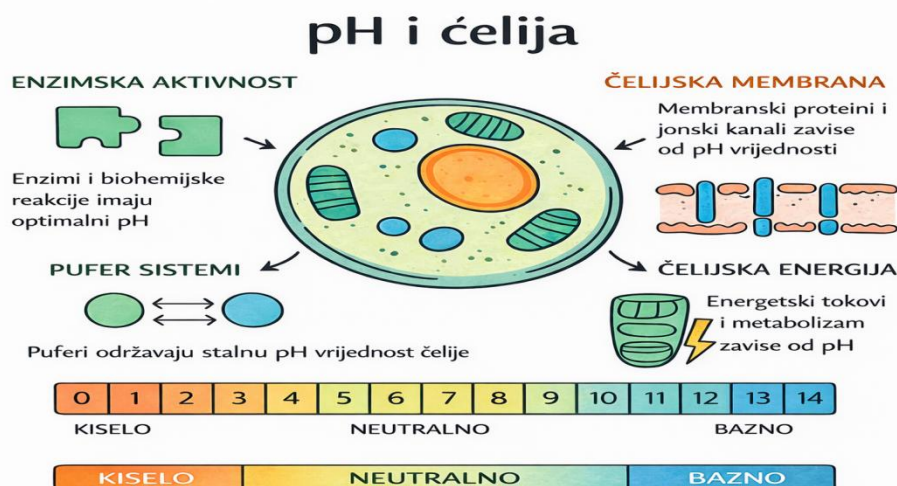
$CO_2 + H_2O + CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^-$ ili jednostavnije $CO_2 + H_2O + CaCO_3 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$, koja opisuje ravnotežu između slobodnog ugljičnog dioksida (CO_2), ugljične kiseline (H_2CO_3), bikarbonata (HCO_3^-) i karbonata (CO_3^{2-}) u vodi. Ta ravnoteža direktno određuje pH vrijednost vode, jer uključuje stvaranje i neutralizaciju vodikovih jona (H^+) i hidroksidnih jona (OH^-). Između rastvorenog ugljendioksida i rastvorljivog bikarbonata postoji ravnoteža i ona regulira ionsku reakciju prirodnih voda ili pH. pH je mjera kiselosti ili bazičnosti nekog rastvora koju je 1909. godine uveo danski hemičar Søren Peter.. Vodeni rastvori na $25^\circ C$ s pH manjom od sedam (> 7) smatraju se kiselim, dok se oni s pH većom od sedam (> 7), smatraju bazičnim (alkalnim). Kad je pH jednaka 7.0, to je neutralna tačka pri $25^\circ C$, jer je pri tom pH koncentracija H_3O^+ jednaka koncentraciji OH^- u čistoj vodi (tabela 4.11).

Tabela 4.11. pH vrijednosti – pitka voda i vodeni ekosistemi

pH vrijednost	Značenje za pitku vodu	Ekološko značenje u vodenim ekosistemima
< 6,5	Nezadovoljavajuća – voda je previše kisela, korozivna, neugodnog okusa	Stresna za većinu organizama; povećava toksičnost metala; smanjuje biodiverzitet
6,5 – 7,0	Prihvatljivo, ali na donjoj granici	Donja granica neutralnosti; osjetljive vrste (npr. Salmonidae) mogu biti ugrožene
7,0 – 8,0	Optimalan raspon za pitku vodu – najbolji ukus i stabilnost	Najpogodnije za većinu slatkovodnih organizama; omogućava stabilne ekosisteme i dobru fotosintezu
8,0 – 8,5	Još uvijek u granicama pitke vode	Uobičajeno u krškim rijekama i jezerima; povoljno za alge i organizme koji koriste kalcij
> 8,5	Prekomjerno alkalna, može uticati na okus i dezinfekciju	Može ograničiti raznolikost vrsta; pogoduje razvoju algi i cijanobakterija

pH vrijednost vode povezana je sa procesom korozije i sa alkalitetom, tvrdoćom, aciditetom, hlorisanjem, koagulacijom i stabilnošću CO₂. Izlaganje ekstremnim pH vrijednostima uzrokuje iritaciju očiju, kože i sluzokože (vrijednosti >11,0). Pri ekstremno niskim pH vrijednostima vode (<4,0) ustanovljeni su slični efekti na zdravlje ljudi. pH vrijednost jeste usko povezana i s ćelijom. pH utiče na funkcionisanje ćelijskih procesa jer reguliše koncentraciju vodikovih jona (H⁺) u citoplazmi i unutar organela (slika 4.4).

Većina enzima u ćeliji imaju optimalni pH pri kojem najbolje funkcionišu. Promjena pH može promijeniti prostornu strukturu (denaturaciju) proteina i tako usporiti ili potpuno zaustaviti biohemijske reakcije. Naprimjer, enzimi lizozoma su aktivni pri kiselom pH (oko 5), dok enzimi u citoplazmi najbolje funkcionišu pri neutralnom (oko 7,2) pH. Membranski proteini i ionski kanali zavise od pH za pravilno otvaranje i zatvaranje. Neravnoteža pH između unutrašnjosti ćelije i vanćelijskog prostora utiče na transport iona, hranjivih tvari i signalne procese. Tokovi energije i metabolizma (npr. glikoliza, Krebsov ciklus, fosforilacija) zavise od stabilnog pH. Ćelija troši energiju da održava acidobaznu ravnotežu pomoću ionskih pumpi i pufera. U ćeliji postoje pufer sistemi (npr. fosfatni i proteinski puferi) koji održavaju stalnu pH vrijednost i sprječavaju nagle promjene koje bi mogle oštetiti ćelijske strukture.



Slika 4.4. Uticaj vrijednosti pH na funkcije u ćeliji (prilagođeno)

Alkalitet - Alkalitet predstavlja faktor kapaciteta, kojim se mjeri kapacitet vode da primi H^+ jone (neutrališe kiseline). Mjeri se titracijom uzorka kiselinom. U sirovoj ili tretiranoj vodi čine ga bikarbonati, karbonati i hidroksidi. Takođe, alkalitet sirove vode mogu činiti soli formirane iz organskih kiselina. Formula za izračunavanje alkaliteta:

$Alkalitet = [OH^-] + 2[CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] - [H^+]$. Dok pH prestavlja faktor intenziteta koji mjeri koncentraciju baze ili kiseline dostupne za interakciju, alkalitet predstavlja faktor kapaciteta koji mjeri sposobnost vode da zaustavi reakciju sa bazom ili kiselinom.

Tvrdoća vode predstavlja ukupnu koncentraciju iona kalcijuma i magnezijuma izraženu kao $CaCO_3$. Vode se svrstavaju u četiri stepena tvrdoće, ako se stepen tvrdoće izražava u mg/L $CaCO_3$. Budući da tvrdoća vode značajno utiče na kvalitet pitke vode i životne uvjete u vodenim ekosistemima, u nastavku je data klasifikacija prema standardnim vrijednostima $CaCO_3$ (tabela 4.12).

Tabela 4.12. Tvrdoća vode prema Ca i Mg (izražena u mg/L $CaCO_3$)

Raspon vrijednosti	Kategorija tvrdoće	Hidrohemijsko značenje	Ekološko značenje
0 – 75 mg/L (0–4 °dH)	Mehka voda	Niska koncentracija Ca^{2+} i Mg^{2+} ; pogodna za pitku vodu, ali slabo mineralizirana	Siromašna mineralima, može ograničiti razvoj organizama sa ljušturom (puževi, školjke, rakovi)
76 – 150 mg/L (4–8 °dH)	Srednje tvrda voda	Umjerena mineralizacija; najčešće u prirodnim vodama	Većina slatkovodnih organizama se dobro prilagođava
151 – 300 mg/L (8–16 °dH)	Tvrda voda	Visok sadržaj Ca i Mg; stvara kamenac u instalacijama	Pogoduje školjkama i rakovima, povoljno za kalcifikaciju
> 300 mg/L (>16 °dH)	Vrlo tvrda voda	Prekomjerno mineralizirana; nepoželjna za kućnu upotrebu	Može otežavati metabolizam nekih riba i biljaka, ali pogoduje algama

Površinska voda je generalno mekša od podzemne usljed pojave padavina i manjeg kontakta sa solima minerala. Većina prirodnih zaliha vode ima malu tvrdoću. Ioni, poput gvožđa u vodama mogu doprinijeti tvrdoći vode, ali su u prirodnim vodama ipak prisutni u neznatnim količinama. Vode rijeka i mora su prirodne tvrde vode, dok je primjer mehke vode kišnica.

Biohemijska slojevitost - Koncentracija rastvorenih gasova i soli pokazuje sezonska variranja, a faktori koji ovo uzrokuju su, prije svega: temperatura, količina organske materije, osvjetljenje, biodiverzitet hidrobionata i gustina njihovih populacija. U proljeće i jesen, uslijed mješanja slojeva vode, raspored soli i gasova je donekle ravnomjeran. U osvjetljenim slojevima, uslijed prisustva fitoplanktona, soli azota i fosfora se neprekidno troše, pa ih ovdje ima manje a njihova koncentracija raste idući prema dnu. Na osnovu količine rastvorenih soli i njihovog rasporeda u vodama po teoriji spektra izdvajaju se tri sloja:

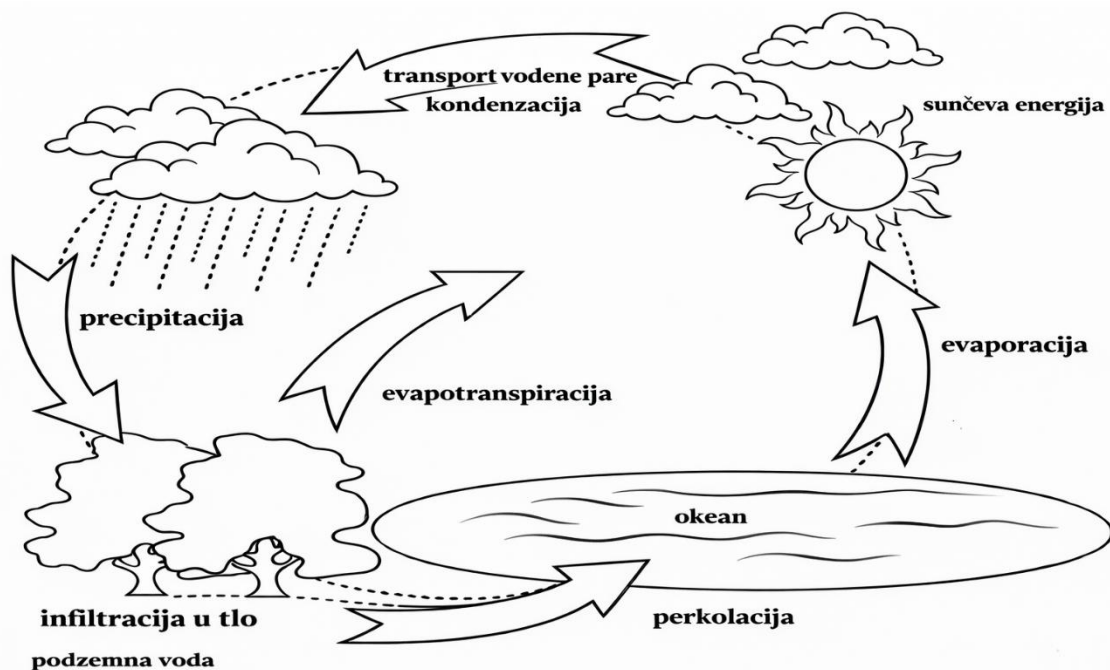
- a. politip - sloj vode sa velikom količinom ovih soli, obično bliže dnu, gdje se akumuliraju nutrijenti oslobođeni razgradnjom organske materije. manje kiseonika, ali više azotnih i fosfornih soli,
- b. mezotip – srednji sloj vode, prijelazna zona između površinskog i dubinskog sloja. sadržaj soli umjeren, ali može zavisiti od cirkulacije i godišnjeg doba i
- c. oligotip – sloj vode sa malom količinom ovih soli, najčešće površinski sloj u kojem fitoplankton aktivno troši dostupne nutrijente. više kiseonika zbog fotosinteze, ali manje mineralnih soli.

Ekološki značaj slojevitosti je da utiče na raspodjelu planktona, bentosa i riba u jezeru. Kada su nutrijenti „zarobljeni“ u politipu (dubini), fitoplankton na površini oskudijeva hranom, dolazi do smanjenje produkcije. U jesenjem i proljetnom miješanju nutrijenti se podižu prema površini, dolazi do cvjetanja algi i većeg primarnog produkcijskog potencijala.

5. Hidrosferni ciklus (ciklus kruženja vode)

Kruženje vode u prirodi je kompleksna i složena pojava koje se odvija pod uticajem Sunca. Ovaj proces je proizvod, prije svega, činjenice da voda lahko prelazi iz jednog u drugo agregatno stanje (gasovito, tečno, i čvrsto). Pri kretanju, voda učestvuje u prijenosu toplote, erozionim procesima i distribuciji mineralnih materija. U slučaju prenošenja okeanske vode prema područjima razne geografske širine, na kopnu dolazi do stvaranja složenih fizičko-geografskih procesa: obrazovanja padavina, riječnih sistema, razvoja i rasta živih organizama, formiranja pedoloških supstrata i razvoja složenih prirodno-geografskih kompleksa. Opća masa vode, tokom miliona godina, ostala je nepromijenjena, tj. voda se neprekidno kreće, a u svakom trenutku u hidrološkom ciklusu se nalazi 0,0005 % od ukupnih zaliha vode, tako da se jedan veći dio zadrži u jednom dijelu geografskog omotača i nije u pokretu. Glavni procesi u hidrosfernom ciklusu su: evaporacija, evapotranspiracija, kondenzacija, precipitacija, infiltracija i oticanje. U ovom ciklusu je zastupljen je i proces perkolacija tj. filtriranje i kretanje vode kroz tlo ili druge porozne materijale do podzemnih voda (slika 5.1).

U toku godine, sa površine Zemlje, pod uticajem sunčeve energije, ispari 518.600 km^3 vode, a samo sa površine Svjetskog okeana oko 447.900 km^3 . U vidu padavina, ponovo se u Svjetski okean u toku godine izluči oko 411.600 km^3 , a ostatak od 36.300 km^3 zračne struje donose na kopno. U obliku vodene pare, u atmosferi se zadržava stalna količina od 14.000 km^3 . Bez stalne vlage u atmosferi bi temperatura na površini Zemlje iznosila oko -18°C , umjesto današnjih $+15^\circ\text{C}$. To znači da bi bez stalnog isparavanja, kondenzacije i prisustva vodene pare, Zemlja bila previše hladna da bi podržavala većinu današnjih oblika života. Globalno posmatrano izračunato je da se na kopno Zemlje u toku godine izluči oko 99.300 km^3 padavina, a sa kopna ispari 63.000 km^3 vode. Ostatak od 36.300 km^3 vode rijeke ponovo vrata u Svjetski okean. Uglavnom je količina vode koja otiče s kopna približno jednaka količini vodene mase koja ispari s površine Svjetskog okeana. Ta ravnoteža postoji zato što je globalni hidrološki ciklus zatvoren sistem: količina vode koja ispari iz Svjetskog okeana prenosi se atmosferom nad kopno, gdje se u obliku padavina vraća na tlo. Dio vode infiltrira i zadržava se u zemljištu, dio isparava i transpirira iz vegetacije, a preostali dio otiče rijekama nazad u okean. Time se uspostavlja dugoročna ravnoteža između isparavanja s okeana i oticanja s kopna, što osigurava stabilnost ukupne količine vode na Zemlji. Ovim sistemom hidrosfernog ciklusa uspostavlja se stanje dinamičke ravnoteže u sadržini i razmjeni vodenih masa i svaki poremećaj imao bi dalekosežne posljedice na raspodjelu vodenih masa i sistemnost u geografskom omotaču. Uloga živih organizama u kruženju vode je veoma značajna. Za životne potrebe (fiziološke) životinjski organizmi apsorbiraju 0,003 % količine slatke vode. Biljke u procesu evaporacije i transpiracije oslobađaju veliku količinu vode, pa se navodi da, od 750 mm padavina, 525 mm se, procesom isparavanja i transpiracije, vraća u atmosferu. Posebno se oslobađa velika količina vodene pare na prostranstvima sa gustim biljnim pokrovom (drvećem), tako da, npr., sa 1 ha kukuruza dnevno ispari 37,8 hiljada litara vode, a u toku vegetacijskog perioda 4, 736 miliona litara vode. Pojedini ciklusi kruženja vode su različite dužine, tako da se padavinske vode sa kopna riječnim sistemom, bez obzira na udaljenost, za 16 dana vrata u okean. Ukupan proces obnove atmosferske vlage traje osam dana. Prema podacima o količini raspoložive vode u atmosferi i prema ukupnoj sumi padavina na Zemlji, u toku godine voda neprekidno kruži i cirkuliše. Izmjena zaliha vode u hidrosfernom ciklusu (ciklusu vode) podrazumijeva kontinuirano kretanje vode između različitih dijelova hidrosfere, uključujući atmosferu, oceane, površinske vode (rijeke, jezera), podzemne vode, ledenjake i biosferu. Ovo kretanje vode se odvija putem različitih procesa, koji uzrokuju promjene u zalihama vode u svakom od ovih rezervoara. Ključni procesi izmjene vode počinju sa isparavanjem (evaporacijom) tj. voda iz oceana, rijeka, jezera i tla prelazi u atmosferu u obliku vodene pare, na temelju energije Sunca. Transpiracija je proces biljaka koje oslobađaju vodu u atmosferu kroz svoje listove, a zajedno sa isparavanjem predstavlja proces evapotranspiracije. Dalje se vodena para hladi u atmosferi, kondenzira, te se pretvara u kapljice koje formiraju oblake. Pojava padavina (precipitacija), kada voda iz atmosfere se vraća se na Zemlju u obliku kiše, snijega, susnježice ili tuče. Otok (runoff) je proces kada se dio padavina slijeva preko površine tla u rijeke, jezera i oceane. Ovaj proces je ključan za obnavljanje površinskih vodenih tijela.



Slika 5.1. Prikaz hidrosfernog ciklusa

Dio vode prodire u tlo (infiltracija) i obnavlja zalihe podzemnih voda. Voda se kreće kroz podzemne slojeve, često ulazeći u vodonosnike ili tekući prema rijekama i okeanima (perkolacija). Sublimacija i taloženje leda se dešava kada voda direktno prelazi iz leda u paru (sublimacija) ili obrnuto (taloženje). Hidrosferni ciklus na zalihe vode, u okeanima objašnjava se činjenicom da čine oko 97% svjetske vode, ali količina slatke vode iz njih neprestano raste kroz isparavanje i vraća se kao padavine. Zalihe slatke vode su predstavljene sa ledenim pokrivačima i glečerima što čini najveći rezervoar slatke vode (oko 68%). Podzemne vode čine drugi najveći rezervoar slatke vode (oko 30%). Površinske vode i atmosfera imaju relativno male rezerve, ali su ključne za kratkotrajne izmjene. Promjene u zaliham, mogu biti sezonske i klimatske promjene koje utiču na kretanje vode (npr. topljenje leda povećava nivo okeana, dok suše smanjuju površinske zalihe). Pored toga antropogene aktivnosti, poput eksploatacije podzemnih voda i izgradnje brana, značajno mijenjaju prirodni ciklus. Hidrosferni ciklus omogućava obnovu i distribuciju zaliha vode na globalnom nivou, čineći vodu dostupnom za ekosisteme i ljudske potrebe. Svako narušavanje ovog ciklusa, bilo prirodno ili izazvano ljudskim djelovanjem, može imati dalekosežne posljedice na dostupnost i kvalitet vode.

Ovi podaci se odnose na površinske vode, a podzemne vode stalno cirkuliraju, dok se njihov hidrosferni ciklus ostvaruje za oko 300 godina. Za kružne izmjene vode u jezerima, barama, močvarama i rijekama potrebno je nekoliko godina, a u akumulacijama i hidrosfernim zonama od nekoliko stotina do nekoliko hiljada godina (tabela 5.1). Periodi potpune izmjene vode u različitim vodnim rezervoarima, poznati kao vrijeme zadržavanja ili vrijeme obrtaja, variraju u zavisnosti od veličine rezervoara, dinamike ciklusa i brzine protoka vode. Ovo vrijeme označava koliko je potrebno da se cijela količina vode u određenom rezervoaru potpuno obnovi kroz procese hidrosfernog ciklusa.

Tabela 5.1. Prikaz perioda izmjene zaliha voda hidrosfernom ciklusom

Tip vode	Period potpune izmjene
Svjetski okean	2.500 do 3.200 godina
Podzemne vode	Odo 300 do 10.000 godina
Pedološka vlaga	1 godina
Zona regionalne glacijacije na Zemlji	9.700 godina
Zona lokalne (planinske) glacijacije na Zemlji	1.600 godina
Zona mrzlot (podzemni led)	10.000 godina
Jezerske vode	5 do 100 godina
Riječne vode	Od 2 sedmice do 6 mjeseci
Vode bara i močvara	5 godina
Atmosferska vlaga	9 dana
Biološka voda	Nekoliko sati do sedmica

Izvor podataka: Trenberth, 1999

5.1. Potrošnja vode

Izraz „potrošnja vode“ se mora uzeti samo uvjetno jer se voda se ne isključuje iz hidrosfernog ciklusa već uvjetno mijenja poziciju ili agregatno stanje. Za lične fiziološke potrebe, čovjeku je neophodno dva do tri litra vode što, preračunato na stanovnike na Zemlji, iznosi 10-15 km³, a za domaćinstvo i industriju te potrebe su daleko veće. Globalni odnosi potrošnje vode na Zemlji najbolje su vidljivi iz podataka svjetskih organizacija za vode (World Water Development Report za 2024). Za sve što kupimo, koristimo, jedemo potrebna je voda. Vodeni otisak (eng. Water Footprint) je mjera ukupne količine vode koja se koristi, direktno i indirektno, za proizvodnju dobara i usluga koje koristi pojedinac, zajednica ili kompanija. Koncept je uveden kako bi se razumjela povezanost između potrošnje resursa i njihove raspoloživosti na globalnom nivou. Pored upotrebe u domaćinstvu, predstavlja količinu vode koja se koristi za proizvodnju roba i usluga koje konzumiramo. Globalni vodeni otisak procjenjuje se na 9 triliona tona godišnje. To je skoro 300.000 tona vode u sekundi. Globalni prosječni vodeni otisak potrošača je 3,8 tona dnevno. SAD imaju najveći otisak po glavi stanovnika od 6,8 tona dnevno. Mnoge evropske zemlje, poput Grčke, Italije i Španije, prate ih s vodnim otiskom od otprilike 6,5 tona vode dnevno po osobi. U Kini, s druge strane, prosječan građanin ima vodeni otisak od 1,9 tona - manje od 30 posto prosječnog američkog građanina.

Kategorije vodenog otiska uključuju plavi vodeni otisak koji se odnosi se na korištenje površinskih i podzemnih voda (rijeke, jezera, izvori) za proizvodnju (npr. voda za navodnjavanje; zeleni vodeni otisak se odnosi se na kišnicu koja se apsorbira u tlu i koristi za rast biljaka.(npr. kišnica koja se koristi u poljoprivredi i sivi vodeni otisak koji predstavlja mjeru količine vode potrebne za razrjeđivanje zagađivača kako bi se kvalitet vode održao unutar prihvatljivih granica (npr. otpadne vode iz industrije). Primjer praktične primjene ukazuju na potrošnju tako npr. za proizvodnju jedne šoljice kafe potrebno je približno 140 litara vode, uključujući uzgoj biljaka, obradu zrna i proizvodni proces. Dok za jedan kilogram govedine može se potrošiti i do 15.400 litara vode, a za proizvodnju pamuka za jednu majicu može zahtijevati oko 2.700 litara vode. Cilj mjerenja vodenog otiska je u podizanju svijesti o količini vode potrebne za svakodnevne aktivnosti; optimizacija potrošnje vode kroz efikasnije procese i upravljanju resursima kako bi se smanjio negativan uticaj na okolinu i obezbijedila održivost. Ovaj koncept je ključan za promovisanje odgovorne potrošnje, posebno u kontekstu klimatskih promjena i sve veće potražnje za ograničenim resursima vode. Kod svake potrošnje vode, jedan

dio se nepovratno gubi. Voda se u toku bioloških i fizičko-hemijskih procesa transformira u nova jedinjenja i tada za duži, kraći period ili potpuno ispada iz hidrosfernog ciklusa. Podaci govore da se nepovratno gubi 2.086 km³ vode. Pojedinačno posmatrano, prilikom utroška vode u naseljima i industriji nepovratno se gubi 141 km³, dok se ostatak vraća u vodotoke, jezera i mora, ali kao veoma zagađena voda (tabela 5.1.1). Za razblažavanje radi prečišćavanja otpadnih voda mora se za svaki kubni kilometar utrošiti 12 km³ do 15 km³ čiste vode iz čega proizilazi da je potrošnja vode u naseljima i industriji koja ne uključuje proizvodnju čelika, farmaceutske i proizvodnju papira, 250 km³ do 500 km³. Za farmaceutske i prehrambenu industriju se koriste posebno čiste vode koje se crpe iz podzemnih izvora. Za svaku stranicu knjige troši se čaša vode, a za proizvodnju jedne tone aluminija 1.300 km³ vode (industrija). Urbani sistemi su drugi po potrošnji vode tako npr., vodokotlić za jedno ispiranje utroši 18 -22 L, a u Njemačkoj 9 L za isti učinak. Količina vode za tuširanje se može smanjiti sa 19 na svega 2 L.

Tabela 5.1.1. Brojčani prikaz globalne potrošnje slatke vode u različitim industrijama

proizvodnja	% globalne potrošnje	Količina vode km³/g
Poljoprivreda (sa navodnjavanjem)	Oko 70%	2.300
Industrija	Oko 20%	500
Domaćinstva (vod., piće, kućni aparati)	Oko 10%	250
Rudarstvo	Oko 3%	75
Papirna ind., farm. ind., proizvodnju čelika	Oko 5-6%	150-200
Ukupna potrošnja slatkovodne vode na Zemlji	100%	3.500

Izvor: *World Water Development Report 2024*

Potrošnja vode od 20 litara za proizvodnju 1 litra piva odnosi se na sve faze proizvodnje, uključujući uzgoj sastojaka (ječam, hmelj, voda), proces kuvaranja, fermentaciju, čišćenje, punjenje i pakovanje. Ovo je broj koji se koristi u kontekstu procjene ukupne količine vode koja je potrebna za cjelokupan proizvodni ciklus, uključujući ne samo vodu koja se koristi direktno u procesu proizvodnje, već i vodu koja je potrebna za rast i preradu sirovina. Dakle, potrošnja vode u proizvodnji piva obuhvata sve aspekte procesa i značajno zavisi od efikasnosti i tehnologije korištene u pivovari. Međutim, važno je napomenuti da ukupna količina vode koja se koristi u proizvodnji piva može varirati u zavisnosti od specifičnih procesa u pivovarama i regijama. Na primjer, ako uključimo neposrednu potrošnju vode za fermentaciju, čišćenje opreme i rashlađivanje, potrebno je oko 3-6 litara vode za proizvodnju 1 litra piva. Proizvodnja benzina, koji je jedan od proizvoda rafinacije, zahtjeva oko 180 litara vode za svaku litru proizvoda (tabela 5.1.2).

Tabela 5.1.2. Potrošnja vode u industriji (Water Footprint Network)

PROIZVOD	Potrošena količina vode (u litrima)
Pivo (1 litar)	20 (3-6)
Benzin (1 litar)	180
čokolada (1 kg)	17.200
Papir (fini, 1 kg)	400-1.000
govedina (1 kg)	15.400
Pamučna košulja (1 komad)	50
Putnički automobil	39.000

Iako se voda u svakodnevnom govoru često naziva potrošnim resursom, ona se u stvarnosti ne troši, već koristi i vraća u prirodu izmijenjenog sastava. Tokom različitih prirodnih i tehnoloških procesa, voda mijenja svoja fizičko-hemijska svojstva, ali ukupna količina vode na Zemlji ostaje stalna. U pojedinim granama industrije, manji dio vode ostaje privremeno ugrađen u proizvode, gdje se zadržava u vezanom obliku. Takav je slučaj, primjerice, s tkaninama i drugim higroskopskim materijalima koji sadrže određenu količinu vlage apsorbirane iz zraka. U prirodnim vlaknima (poput pamuka, vune ili lana) voda je fizički ili hemijski vezana u strukturi vlakana, dok je u sintetičkim tkaninama taj udio minimalan. U biološkim sistemima, kao i u industrijskim procesima, voda se dakle ne gubi, već privremeno mijenja oblik, agregatno stanje ili hemijsku vezu, a zatim se vraća u hidrosferu kroz razgradnju, isparavanje i kruženje. Zbog ograničenih zaliha pitke i lako dostupne vode, održivo upravljanje resursima podrazumijeva racionalno korištenje, smanjenje zagađenja i uvođenje mjera ograničenja u djelatnostima koje zahtijevaju velike količine vode, s ciljem očuvanja ekološke ravnoteže i zaštite vodenih ekosistema.

Zbog velikog utroška vode u industrijskim procesima, pri čemu otpadne vode često postaju hemijski i termalno toksične, neophodno je njihovo prečišćavanje i ponovna upotreba, umjesto stalnog zahvatanja novih količina iz prirodnih izvora. Takav pristup omogućava smanjenje pritiska na raspoložive vodne resurse i doprinosi konceptu kružnog upravljanja vodom.

6. Hidrobionti i njihove adaptacije

U savremenoj hidrobiologiji organizmi vezani za vodenu sredinu razvrstavaju se prema njihovom načinu života i odnosu prema vodenom mediju. Takva podjela zasniva se na ekološkim principima koji su oblikovani krajem 19. stoljeća i koji i danas predstavljaju temelj razumijevanja strukture vodenih biocenoza. U okviru ove klasifikacije razlikuju se tri osnovne grupe: plankton, nekton i bentos. Plankton obuhvata organizme koji lebde u vodenom stupcu i čije je kretanje u velikoj mjeri uslovljeno strujama vode. Nekton čine organizmi sposobni za aktivno i usmjereno plivanje, nezavisno od vodene dinamike, dok bentos obuhvata organizme koji žive na dnu ili u sedimentu vodenih ekosistema.

Ovakva podjela omogućava funkcionalno razumijevanje raspodjele organizama u prostoru i njihove uloge u lancima ishrane i protoku energije. Pojam hidrobionti koristi se kao objedinjeni

naziv za sve organizme čiji je život u potpunosti ili djelimično vezan za vodu sredinu. Time se naglašava da voda nije samo prostorno stanište, već i fizičko-hemijski medij koji određuje tok životnih procesa, morfološke osobine i fiziološke adaptacije organizama. Daljnje produbljivanje ovog koncepta, naročito sredinom 20. stoljeća, usmjerilo je pažnju sa puke klasifikacije organizama na njihovu funkcionalnu ulogu u ekosistemu. U tom kontekstu, Konstantinov je hidrobionte posmatrao kroz prizmu bioprodukcije, trofičkih odnosa i energetskog balansa vodenih sistema, čime je dodatno afirmisan savremeni ekosistemski pristup u hidrobiologiji. Kasniji autori proširili su ovu perspektivu razvrstavanjem hidrobionata na autotrofne, heterotrofne i reducentske oblike, naglašavajući njihovu međusobnu povezanost u kruženju materije i protoku energije. Lindemanov funkcionalni pristup (1942) usmjerio je pažnju na tok energije kroz trofičke nivoe, čime su hidrobionti definisani kao integralni elementi energetskih i materijalnih procesa vodenih ekosistema. Savremena istraživanja dodatno su proširila pojam hidrobionata uključivanjem molekularnih i genetičkih pristupa proučavanju vodenog života. Ipak, mikroorganizmi nisu nova kategorija u hidrobiologiji. Već su ranija istraživanja, poput onih Sarthoriusa, koja su obuhvatala zasijavanje podloga i tipizaciju bakterija u vodi, jasno ukazivala na značaj bakterijskih zajednica u strukturi vodenih biocenoza. Molekularne metode danas omogućavaju identifikaciju kriptogenih vrsta i precizno praćenje promjena u biodiverzitetu pod uticajem klimatskih i antropogenih faktora.

Pojam hidrobionta tako dobija integralno značenje, koje objedinjuje ekološke, fiziološke i genetičke aspekte života u vodi. Hidrobionti su svi organizmi čiji je život u potpunosti ili djelimično vezan za vodu sredinu, slatkovodnu, bočatu ili slanu. Oni su evolucijski, fiziološki i molekularno prilagođeni njenim fizičko-hemijskim uslovima te čine osnovne funkcionalne elemente vodenih ekosistema. U njihov sastav ubrajaju se bakterije, virusi, alge, više biljke, mahovine, beskičmenjaci i kičmenjaci. Takva širina pojma prirodno vodi ka razmatranju adaptacija. Svi organizmi su tokom evolucije razvili prilagodbe na vodu kao životnu sredinu, kroz morfološko-anatomske i fiziološke osobine. Najmarkantnija među njima jeste razvoj škrge kao respiratornih organa kod pojedinih beskičmenjaka i kičmenjaka, posebno u okviru ihtiopopulacija.

Pored toga, razvijeni su organi za plivanje u obliku peraja ili druge morfološke transformacije koje omogućavaju kretanje u vodenoj sredini. Budući da hidrobionti obuhvataju širok spektar taksonomskih grupa, ključno pitanje postaje: koje im adaptacije omogućavaju uspješan život u vodi? Upravo analiza tih prilagodbi otkriva mehanizme koji stoje iza njihove funkcionalnosti u akvatičkom okruženju. Adaptacije mogu biti fizičke, ponašajne (etološke) ili fiziološke (tabela 6.1), a omogućavaju organizmima da efikasnije pribavljaju hranu, izbjegavaju predatore, razmnožavaju se i opstaju u promjenjivim uslovima vodenog medija.

Tabela 6.1. Ključni aspekti adaptacija hidrobionata

adaptacije	opis	primjer
Fizičke	Strukture ili oblici tijela koji pomažu organizmima da prežive u određenoj akvatičnoj sredini.	Deblji sloj kože kod životinja koje žive u hladnim klimama; škrge kod riba i drugih akvatičnih životinja za apsorpciju rastopljenog kiseonika.
Ponašajne (etološke)	Način na koji se organizmi ponašaju kako bi preživjeli.	Rakovi planktona tokom dana spuštaju se na veće dubine, a tokom noći bliže površini kako bi izbjegli predatore.
Fiziološke	Unutrašnje promjene u organizmu koje omogućavaju bolju funkcionalnost u specifičnim uslovima.	Sposobnost nekih organizama da izdrže visoke temperature ili da se prilagode promjenama u raspoloživoj organskoj materiji kao resursu ishrane u podzemnim vodama.

Adaptacije se razvijaju kroz evolucijske procese, pri čemu se adaptivne osobine, koje povećavaju reproduktivni uspjeh, prenose na naredne generacije. Na taj način, organizmi postaju bolje prilagođeni svom ekosistemu i uslovima u kojima žive.

6.1. Mikroorganizmi, raznovrsnost i adaptacije

Mikroorganizmi u vodi igraju izuzetno važnu ulogu u ekosistemima slatkovodnih i morskih voda. Vrste mikroorganizama uključene su u grupe bakterija, virusa, arheja, algi i praživotinja (tabela 6.1.1). Bakterije u vodenim ekosistemima su adaptirane da prežive i održavaju se u različitim uvjetima što rezultira njihovom velikom raznovrsnosti. Osnovne karakteristike koje su uvjetovale njihov veliki biodiverzitet su adaptacije na uslove u vodenoj sredini bogate kiseonikom (aerobne) i dijelove vodenog stuba bez prisutva kiseonika (anaerobne). Aerobne bakterije zahtevaju kiseonik za rast, dok anaerobne mogu rasti u njegovom odsustvu. Pored toga prema načinu ishrane su dominantno heterotrofi, ali ima i autotrofa. Heterotrofne bakterije se hrane organskim materijama, dok autotrofne koriste sunčevu svetlost (fototrofne) ili hemijske reakcije (hemoautotrofne) za proizvodnju hrane. Arheje (arheobakterije) predstavljaju jednu od ključnih grupa mikroorganizama u vodenim ekosistemima i odlikuju se izuzetnom ekološkom raznolikošću. U morskim i oceanskim vodama prisutne su duž cijelog vodenog stupa, od površinskog epipelagičnog sloja do ekstremnih dubina hadala. U površinskim slojevima dominiraju skupine koje oksidiraju amonijak i time učestvuju u globalnom ciklusu azota, dok se u mezopelagijalu i batipelagijalu njihova abundanca značajno povećava te mogu činiti i do 20–40% ukupnog mikrobnog planktona. Poseban značaj imaju termo- i hipertermofilne arheje koje nastanjuju hidrotermalne izvore, gdje podnose visoke temperature, ekstremne pritiske i hemijski agresivne uslove, te ostvaruju hemosintetsku proizvodnju u potpunom odsustvu svjetlosti. U slatkim vodama arheje su jednako široko rasprostranjene, iako često manje uočljive. Nalaze se u epilimniju, metalimniju i hipolimniju jezera, a posebno u sedimentima gdje učestvuju u procesima metanogeneze, oksidacije amonijaka i razgradnje organske materije. U jezerskim i riječnim sedimentima njihova zastupljenost može dosežati 10–60% ukupne mikrobne zajednice. Prisustvo arheja potvrđeno je i u slivovima rijeka, biofilmovima, te u oligotrofnim i dubokim podzemnim vodama, gdje obitavaju vrste

prilagođene niskim energetske tokovima. Time arheje predstavljaju važan funkcionalni dio vodenih ekosistema, od najosvjetljenijih površinskih zona do ekstremnih dubina i podzemnih akvifera.

Tabela 6.1.1. Prikaz sastava mikroorganizama vodenih ekosistema i njihove karakteristike

grupe	opis
Bakterija	Obuhvataju heterotrofne bakterije koje razgrađuju organske materije i autotrofne bakterije koje koriste sunčevu svjetlost (fotosinteza) ili hemijske reakcije (hemosinteza) za proizvodnju hrane.
Arhea	Mikroorganizmi slični bakterijama, ali genetski i biohemijski različiti. Često naseljavaju ekstremne sredine, poput jako slanah, toplih ili kiselih voda.
Alge	(prokarioti - Cyanobacteria i eukarioti- zelene, smeđe, crvene, zlatnosmeđe, dijatome itd.) jednoćelijski ili višećelijski fotosintetski organizmi, tijelo građeno od talusa. Proizvode kiseonik i predstavljaju osnovu lanaca ishrane u vodenim ekosistemima.
Protozoa	Jednoćelijski eukariotski organizmi koji se hrane bakterijama, algama i drugim mikroorganizmima. Uključeni su u mikrobiološke mrežu ishrane. Reprodukcijska polna i dominantno bespolna, kretanje cilijama, trepljama, bičem, pseudopodijama. Brza ekskrecija pomoću kontraktilnih vakuola.

Adaptiranost ili prilagođenost bakterija na život u vodenj sredini ogleda se prije svega u njihovoj građi, načinu metabolizma i međusobnim interakcijama (tabela 6.1.2). Bakterije u vodenim ekosistemima naseljavaju i pelagični dio vodenog stupa i bentala. Njihove adaptacije rezultirale su razvojem specifičnih morfoloških formi, koje su se paralelno razvijale s fiziološkim mehanizmima prilagođavanja uslovima sredine.

Tabela 6.1.2. Prikaz adaptacija bakterija na život u vodenj sredini

Tip adaptacije	Opis	Primjer
Metaboličke adaptacije	Sposobnost korišćenja različitih izvora hrane i otpornost na ekstremne uslove.	Neke bakterije koriste različite ugljene hidrate, lipide ili proteine kao izvor energije; termofilne bakterije podnose visoke temperature; acidofilne visoku kiselost.
Strukturne adaptacije	Strukture koje omogućavaju zaštitu, vezivanje za podlogu i preživljavanje u ekstremnim uslovima.	Biofilm štiti bakterije od predatora i nepovoljnih uslova; spore omogućavaju preživljavanje tokom suše, zagađenja ili visokih temperatura.
Komunikacija i interakcija	Načini međusobne komunikacije bakterija za koordinaciju ponašanja u skladu s gustinom populacije.	<i>Quorum sensing</i> omogućava bakterijama da osjete gustinu populacije i prilagode ponašanje, uključujući formiranje biofilma ili proizvodnju toksina.

Alge su veoma raznovrsni organizmi, koji igraju ključnu ulogu u planktonskim zajednicama vodenih ekosistema, ali i u bentosu. Njihove adaptacije im omogućavaju da prežive i uspijevaju u različitim uslovima (tabela 6.1.3). Posebno se ističu strukture za plivanje (lebdjenje), oblik tijela i veličina, hloroplasti (autotrofi), adaptacije na porast saliniteta (more i okeani) kao i sama reprodukcija.

Tabela 6.1.3. Prikaz adaptacija jedinki iz skupine alga na život u vodenoj sredini

Adaptacija	Opis
Plivajuće strukture	Sitni mjehurići ili flagela pomažu algama da ostanu suspendovane u vodi i da se kreću prema svjetlu; često sadrže uljne kapljice, koje služe kao rezervna materija i doprinose regulaciji plutanja u vodenom stupcu.
Oblik i veličina	Različiti oblici i veličine omogućavaju efikasno iskorištavanje resursa poput svjetlosti i hranljivih materija.
Hloroplasti	Sadrže razne vrste hloroplasta s pigmentima koji pomažu u fotosintezi i apsorpciji svjetla na različitim dubinama.
Adaptacije na salinitet	Prilagođene su promjenama u salinitetu, što im omogućava uspješan razvoj i u slatkim i u slanim vodama.
Reprodukcija	polno i bespolno razmnožavanje omogućava brzo povećanje broja jedinki kada su uvjeti povoljni.

Raznolikost algi u planktonu prvenstveno uključuje skupinu Bacillariophyta (Diatomeae), jednoćelijske alge sa ćelijskim zidom od silicijuma, koje često formiraju karakteristične obrasce i predstavljaju važan izvor hrane u slatkovodnim i morskim ekosistemima. Chlorophyta ili zelene alge bogate su hlorofilom i najčešće se razvijaju u plitkim, osunčanim vodama, dominantno u slatkovodnim ekosistemima. Dinophyta (dinoflagelati) su jednoćelijske, uglavnom planktonske alge sa dva biča; pojedine vrste mogu izazvati cvjetanje voda. Cyanobacteria (cijanobakterije) naseljavaju slatke i slane vode te kao fotosintetski organizmi proizvode kiseonik i imaju značajnu ulogu u planktonu.

Charophyta (parožine) pretežno su vezane za slatke vode, razvijene u obliku većih, razgranatih talusa pričvršćenih za podlogu i značajne za formiranje podvodne vegetacije i stabilizaciju sedimenta. U planktonu se mogu pojaviti i predstavnici skupina Euglenophyta (euglene ili bičašice), Xanthophyta (žutozelene alge) i Chrysophyta (zlatnozelene alge). Predstavnici Rhodophyta (crvene alge) i Phaeophyceae (smeđe alge) gotovo isključivo naseljavaju morske ekosisteme.

Takozvane „ružičaste alge“ nisu posebna taksonomska grupa, već obojenje koje mogu imati različite alge (najčešće Rhodophyta, Chlorophyta ili cijanobakterije) u specifičnim ekološkim uslovima, poput povećanog saliniteta ili temperature. Alge u planktonu imaju ključnu ulogu u proizvodnji kiseonika, vezivanju ugljen-dioksida i formiranju organske materije, čime predstavljaju osnovu funkcionisanja vodenih ekosistema. Njihova raznolikost doprinosi stabilnosti i biološkoj raznovrsnosti vodenih staništa.

Praživotinje (Protozoa) su vrlo prilagodljivi organizmi koji igraju važnu ulogu u vodenim ekosistemima, posebno u planktonu. Njihove adaptacije omogućavaju im preživljavanje i reprodukciju u ovim dinamičnim staništima (Tabela 6.1.4).

Tabela 6.1.4. Prikaz adaptacija jedinki iz skupine Protozoa na život u vodenoj sredini

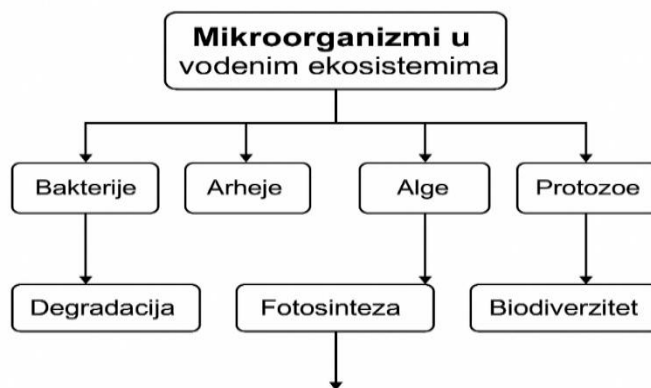
adaptacija	opis
Plivajuće strukture	Pseudopodije, flagelumi ili cilije omogućuju aktivno kretanje, približavanje hrani i izbjegavanje predatora.
Smanjena tjelesna masa	Mikroskopske dimenzije i mala masa omogućuju ostajanje suspendovanim u vodi i smanjuju taloženje na dno.
Povećana površina tijela	Sferičan ili spljošten oblik povećava omjer površine i zapremine, olakšavajući difuziju hranjivih materija i gasova.
Osmoregulatorne adaptacije	Mehanizmi regulacije osmotskog pritiska sprječavaju dehidraciju ili prekomjernu apsorpciju vode u slatkim i slanim vodama.
Sposobnost promjene oblika	Fleksibilan oblik tijela omogućava prilagodbu različitim uvjetima i izbjegavanje predatora.
Strategije ishrane	Fagocitoza i pinocitoza - ishrana bakterijama, detritusom i drugim organ. česticama.
Reprodukcijske strategije	Brza aseksualna (bespolna) dioba omogućava naglo povećanje brojnosti i brzu prilagodbu promjenama u okolišu.

Neke protozoe uspostavljaju simbiotske odnose s drugim organizmima, što im može pomoći u ishrani ili zaštiti. Ove adaptacije čine protozoe ključnim komponentama planktonskih zajednica, doprinoseći lancima ishrane (mreži ishrane) i ekološkoj ravnoteži vodenih ekosistema.

Gljive u vodenim sredinama predstavljaju raznoliku grupu organizama koji imaju specifične adaptacije koje im omogućavaju preživljavanje i održavanje u ovakvim ekosistemima. Raznovrsnost gljiva u vodenim sredinama podrazumjeva podjelu na mikroskopske gljive gdje su uključene različite vrste kvasaca i pljesni koje često žive u slatkovodnim i morskim ekosistemima. Druge su makroskopske gljive poput gljiva iz roda *Mycena* ili *Ganoderma*, koje se mogu naći u močvarnim ili vlažnim područjima. Javljaju se u rijekama i jezerima, a uloga gljiva je u razgradnji organske materije čime doprinose ciklusu hranjivih materija. U oceanima, gljive mogu učestvovati u razgradnji organskih materija na morskom dnu. Adaptacije gljiva u vodenim sredinama, sposobnost razgradnje kao posljedica enzimatske aktivnosti: proizvode specifične enzime koji im omogućavaju razgradnju složenih organskih materija, što ih čini ključnim dekompozitorima u ekosistemima. Adaptacije podrazumjevaju oblik i strukturu koja uključuje karakteristiku gljiva da formiraju hife koje mogu brzo rasti i prilagođavati se različitim uslovima u vodi, što im omogućava da efikasno apsorbiraju hranjive materije. Neke vrste formiraju plodnice iznad površine vode, što omogućava razmnožavanje i disperziju spora. Sposobnost preživljavanja uključuje osmotske prilagodbe i formiranje spora. Gljive u slanim vodama imaju adaptacije koje im pomažu da održe osmotsku ravnotežu i prežive u ovim uslovima. Mnoge gljive proizvode spore koje su otporne na nepovoljne uslove, omogućavajući im preživljavanje tokom sušnih perioda ili u zagađenim sredinama. Značaj gljiva u vodenim ekosistemima prvenstveno su ključne za razgradnju mrtvih biljaka i životinja, pomažući u reciklaži hranjivih materija. Gljive često imaju simbiotske odnose s algama i drugim mikroorganizmima, stvarajući zajednice koje doprinose ekološkoj ravnoteži (interakcijska sposobnost). Glavna uloga mikroorganizama (shema 6.1.1) u vodenim ekosistemima ogleda se u održavanju kruženja materije i energije. U gornjim, osvijetljenim slojevima vode, alge i cijanobakterije vrše fotosintezu, pri čemu proizvode kiseonik i organske materije koje čine osnovu primarne produkcije i podržavaju život u vodi. Istovremeno, drugi mikroorganizmi,

prije svega bakterije i gljive učestvuju u razgradnji organske materije, čime se hranljive materije poput azota i fosfora vraćaju u cirkulaciju i postaju ponovo dostupne biljnim organizmima. Ovaj proces mineralizacije čini osnovu ekološke ravnoteže u vodi i održava njenu biološku produktivnost.

Značajan dio mikroflore ima i indikatorsku vrijednost: prisustvo određenih algi i bakterija ukazuje na nivo trofičnosti i stepen zagađenja vode, dok mikrobiološki sastav određuje i njenu zdravstvenu ispravnost. Bakterije su posebno važne u procesima biorazgradnje zagađivača, uključujući organske spojeve, pesticide i teške metale, što omogućava prirodno prečišćavanje vode. Neke vrste su patogene, dok se druge koriste u biotehnologiji za proizvodnju enzima, lijekova i bioloških preparata za tretman otpadnih voda. Mikroorganizmi su temelj stabilnosti i funkcionalnosti vodenih ekosistema: povezuju proizvodnju, razgradnju i obnavljanje materije te doprinose očuvanju kvaliteta i biološke raznolikosti voda.

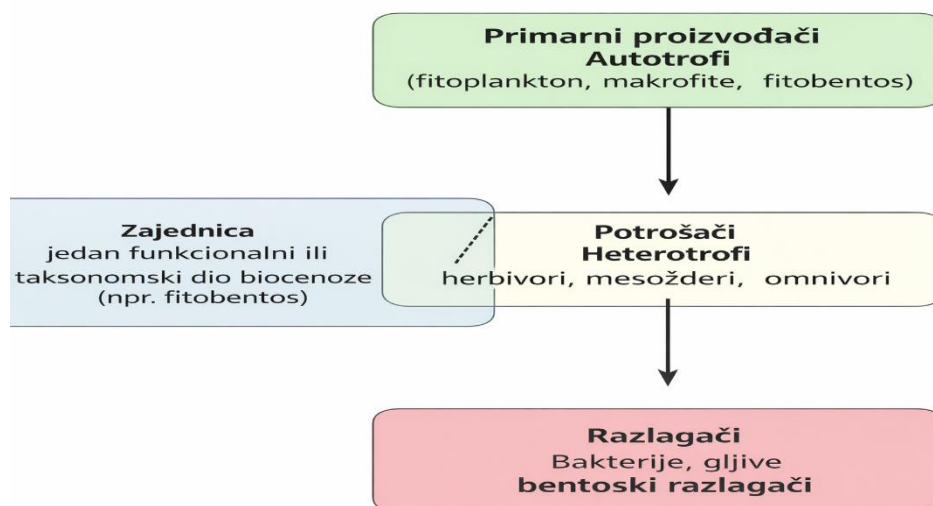


Shema 6.1.1. Pregled mikroorganizama u vodenim ekosistemima i njihove uloge u funkcionisanju akvatičnih sistema

Mikroorganizmi predstavljaju temelj trofičke piramide i osnovu svih biogeohemijskih ciklusa u vodenim ekosistemima. U vodenoj sredini biogeohemijski ciklusi obuhvataju kruženje osnovnih elemenata – ugljika (C), azota (N), fosfora (P), sumpora (S) i kiseonika (O) – kroz žive organizme, vodu, sediment i atmosferu. Iako su procesi slični onima na kopnu (fotosinteza, respiracija, razgradnja, mineralizacija), medij je drugačiji: odvijaju se u tečnom, dinamičnom okruženju gdje su difuzija i rastvorljivost gasova ključni. Kopneni ekosistemi snažno utiču na vodene putem dotoka hranljivih materija i organske tvari iz padavina, površinskog oticanja i erozije tla. Ti ulazi hrane fitoplankton i bakterije, ali istovremeno mogu izazvati eutrofikaciju. U vodenim sistemima mikroorganizmi, naročito bakterije i alge, čine glavni pogon kruženja materije i energije, jer pretvaraju anorganske tvari u organske i obrnuto, održavajući ekološku ravnotežu između biosfere, hidrosfere i atmosfere. Mikroorganizmi su prisutni u svim zonama vodenog ekosistema: u planktonu, perifitonu i bentosu, gdje obavljaju ključne funkcije u kruženju materije.

6.2. Biocenoze vodenih ekosistema i njihove adaptacije

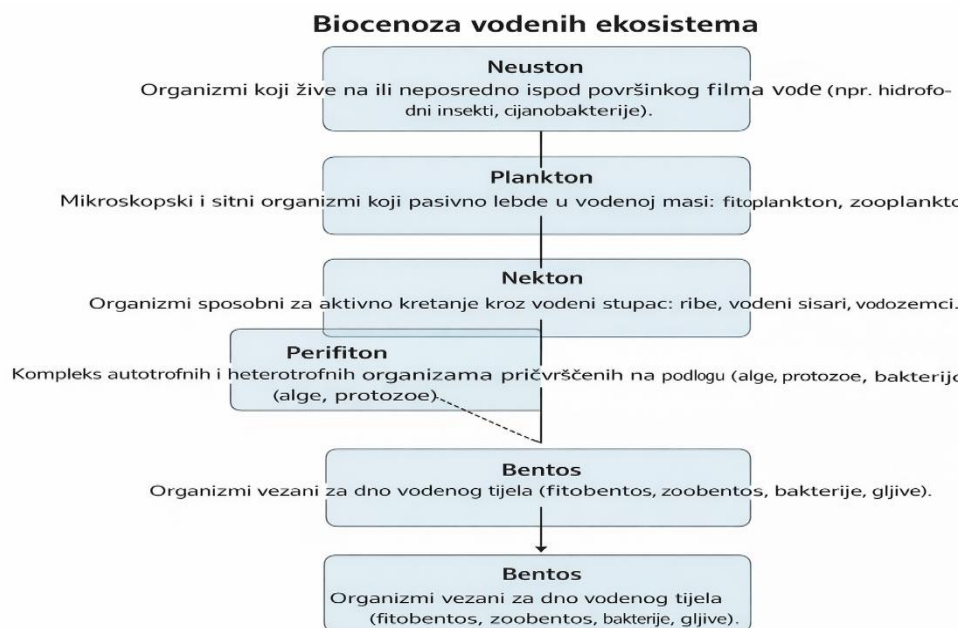
Biocenoza (od grč. *bios* – život i *koinos* – zajednički) označava skup svih živih organizama koji nastanjuju određeni biotop i međusobno su povezani složenim uzajamnim odnosima. Zajedno sa abiotičkim komponentama prostora (biotopa) kog nastanjuje, predstavlja viši stepen ekološke integracije, ekosistem. Strukturu biocenoze čine populacije biljaka, životinja, gljiva, bakterija i drugih mikroorganizama koje koegzistiraju na istom prostoru. Funkcionalnu komponentu biocenoze čine sve interakcije među organizmima (trofičke veze, kompeticija, simbioza, parazitizam) i njihova povezanost s abiotičkim uslovima, što omogućava kruženje materije i protok energije. Prostorna komponenta obuhvata raspored i vertikalnu stratifikaciju organizama (npr. plankton, nekton, bentos), dok se vremenska komponenta odnosi na sezonske i sukcesijske promjene u sastavu i strukturi zajednice. Termin *biocenosis* prvi je uveo Karl Möbius 1877. godine, a u našim jezicima ustalio se oblik biocenoza. Zajednica je uži pojam i predstavlja dio biocenoze koji ostvaruje specifičnu funkciju (npr. zajednica riba). Biocenoza obuhvata grupe filogenetski srodnih populacija koje koriste resurse na sličan način čine strukturnu cjelinu sastavljenu od proizvođača, potrošača i razlagača, prostorno vezanu uz biotop i vremenski određenu trajanjem pogodnih ekoloških uslova (shema 6.2.1).



Shema 6.2.1. Prikaz razlike biocenoze i pojma zajednice

U vodenim ekosistemima razvijene su biocenoze evolutivno prilagođene životu u odgovarajućim biotopima. Biocenozu ovih ekosistema u osnovi čine plankton, nekton i bentos. Pored toga, posebno se izdvajaju neuston i perifiton, karakteristični prvenstveno za stajaće vode, iako se perifiton razvija i u tekućim vodama na potopljenim podlogama (shema 6.2.2.). Neuston uključuje organizme koje žive na površinskom sloju vode ili u neposrednoj blizini površine, u tankom sloju vode koji se nalazi iznad nje, poznatom kao *interfejs* između vode i vazduha. Adaptiranost za ovakve uslove vezana je za bakterije, gljive, alge, protozoe, neke vrste insekata (Heteroptera), male račiće, puževe isl. Dok perifiton obuhvata organizme pričvršćene za vodene biljke, sediment, kamenje, dijelove drveta isl. Uključuje različite vrste epifita, kao što su alge, bakterije, gljive, lišajevi, i druge mikroskopske ili makroskopske organizme koji se vežu za čvrste podloge u vodi. Perifiton ima ključnu ulogu u ekosistemima vodenih tijela jer

doprinosi procesu filtracije, reciklaži hranjivih materija, i pruža stanište za mnoge vrste organizama.



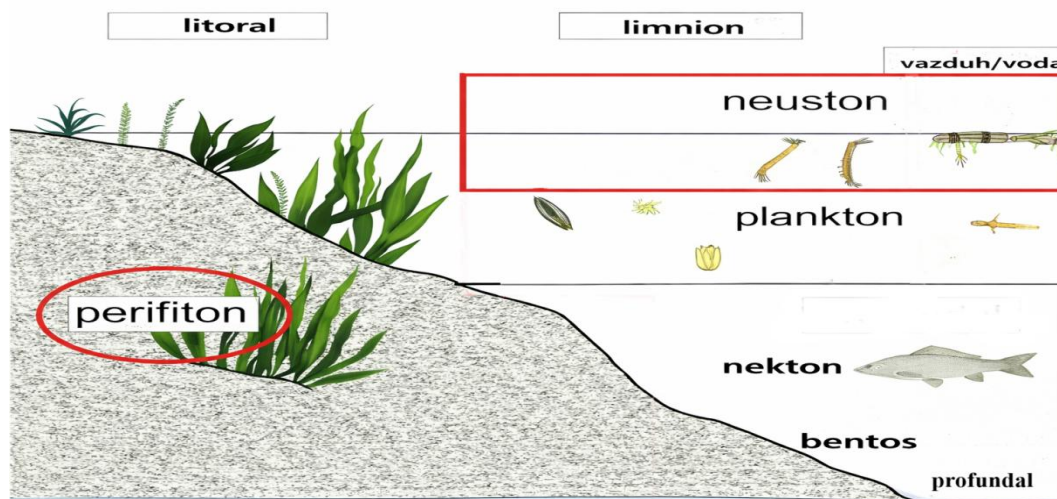
Shema 6.2.2. Sastav biocenoze vodenih ekosistema

6.2.1. Neuston i perifiton

U sklopu akvatičnih hidroekosistema se izdvajaju perifiton i neuston, specifični kompleksi organizama koje se ne uklapaju potpuno u klasične kategorije planktona, nektona i bentosa, ali predstavljaju prijelazne ili granične slojeve vodenog ekosistema. Neuston predstavlja kompleks organizama koji žive na samoj površini vode (epineuston) ili neposredno ispod nje (hiponeuston). Ovaj kompleks nastanjuje mikrosloj između vode i zraka, poznat kao površinski film, koji se odlikuje specifičnim fizikalnim i hemijskim svojstvima (visoka površinska napetost, promjenjiva temperatura i svjetlosni režim, intenzivna razmjena gasova). Neuston se najpotpunije razvija u stajaćim vodama (jezera, bare, ribnjaci), gdje su površinski slojevi stabilni i omogućavaju trajno formiranje mikrobioloških zajednica (slika 4.1). Ipak, može biti prisutan i u mirnijim dijelovima ravničarskih i nizijskih tekućica, gdje je površina vode dovoljno mirna da se održi površinski film. Neuston se sastoji od mikroorganizama (bakterije, alge, cijanobakterije, protozoe), sitnih beskičmenjaka (npr. larve insekata) i povremenih većih oblika koji koriste površinski sloj (npr. *Gerris lacustris* – vodene stjenice). Raznovrsnost organizama je uslovljena prisustvom površinske napetosti i dinamičnom razmjenom gasova. Mnogi organizmi imaju hidrofobne strukture koje im omogućavaju da se zadrže na površini. Ovaj sloj je izuzetno osjetljiv na zagađenje (ulja, deterdžente, organske tvari) koje remete površinsku napetost i hemijsku stabilnost filma. Neuston ima posrednu ulogu u procesima samopročišćavanja i razgradnje organske materije, te predstavlja granični kompleks između atmosfere i vodenog ekosistema.

Perifiton (grč. *peri* – oko, unaokolo; *phyton* – biljka) označava kompleks pričvršćenih (sesilnih) organizama koji obitavaju na čvrstim podlogama u vodi: kamenju, biljkama, sedimentu,

stablama, umjetnim površinama (staklo, plastika) i dr. (slika 6.2.1.1). Predstavlja karakterističnu zajednicu vodenih ekosistema, posebno izraženu u litoralnoj zoni jezera i tekućicama s dovoljnom prozirnošću i dotokom svjetlosti. Perifiton je heterogeni kompleks koji uključuje organizme različitih sistematskih skupina. Prema veličini organizama prisutan je mikrofitoperifiton koga čine autotrofne alge (najčešće dijatomeje – Bacillariophyceae), cijanobakterije i zelene alge (Chlorophyta). Mikrozooperifiton ili životinjski organizmi predstavljeni su praživotinjama, rotiferama i drugim sitnim beskičmenjacima. Makroperifiton u svom sastavu sadrži veće alge i mahovine koje rastu na kamenju, korijenju ili biljkama, dok životinje ili makrozooperifiton su larve i imago insekata (uglavnom Diptera, Hemiptera, Heteroptera isl.), puževi, školjke, vodeni račići i drugi pričvršćeni oblici. Površina na kojoj perifiton raste naziva se epilit (na kamenu), epifit (na biljkama), epipsam (na pijesku), itd. Perifitonske zajednice su izuzetno produktivne i imaju ključnu ulogu u autotrofnoj produkciji, samopročišćavanju voda i formiranju mikrostaništa za brojne bentoske organizme. Posebno u zoni litorala, gdje učestvuje u procesima vezivanja fosfora i azota, te stabilizaciji supstrata.



Slika 6.2.1.1. Neuston i perifiton u jezeru (izvor: <https://encyclopedia.pub/entry/32546>, prilagođeno)

6.2.2. Plankton, sastav i adaptacije

Plankton, sa najvećim stepenom razvoja, se nalazi u oceanu, morima, jezerima i velikim rijekama. Kvalitativno-kvantitativni sastav planktona varira horizontalno, vertikalno i sezonski. To je uzrokovano dostupom svjetlosti u nekom području. Sekundarni uzrok varijabilnosti je dostupnost hranjivih tvari. Velika područja tropskih i subtropskih oceana imaju puno svjetla ali imaju nisku dostupnost hranjivih materija kao što su nitrati, fosfati i silikati. Ovo je rezultat oceanske cirkulacije i oceanske slojevitosti ili raslojavanja vodenog stupca. Funkcionalne skupine planktona predstavljene su sa (slika 6.2.2.1) fitoplanktonom (primarni proizvođači), zooplanktonom (potrošači i sekundarni proizvođači) i akterioplanktonom (razlagači uginule organske materije).



Slika 6.2.2.1. Sastav planktona vodenih ekosistema (fitoplankton, zooplankton i bakterioplankton)

Pojam „plankton“ (potiće od grčke riječi *planktos* (πλαγκτός) – što znači lutajući *ili* onaj koji *pluta*). Fitoplankton fotosintezom, uz korištenje sunčeve energije, fiksira neorganski ugljik (CO_2) i pretvara ga u organsku materiju. Primarna proizvodnja označava količinu organskog ugljika proizvedenog fotosintezom, što predstavlja osnovu energetskega toka u vodenim ekosistemima. Fitoplankton je glavni u proizvodnji organske materije i energije za sve ostale organizme vodene sredine (ekosisteme). Fitoplankton proizvodi približno polovinu ukupnog kiseonika koji godišnje nastaje fotosintezom na Zemlji. Organizmi fitoplanktona su dominantni primarni proizvođači u vodenim ekosistemima i glavni izvor rastvorenog kiseonika. Manji dio kiseonika u vodu dopijeva razmjenom sa atmosferom, odnosno difuzijom kroz površinski sloj vode. Neki dinoflagelati posjeduju strukturu poznatu kao protoplazmatična mreža, kojom hvataju plijen, često veći od bakterija. Pojedine vrste tokom masovnog razvoja mogu uzrokovati uginuće riba usljed stvaranja toksina i smanjenja koncentracije kiseonika u vodi.

Kod nekih dinoflagelata izražena je bioluminiscencija, odnosno sposobnost emitovanja plavičasto-zelenog svjetla u mraku kada su organizmi uznemireni. Ova pojava predstavlja odbrambeni mehanizam protiv predatora. Kada se takve vrste masovno razvijaju u moru, svaki pokret vode može izazvati svjetlucanje površine, pa i ribe tokom noćnog plivanja ostavljaju svijetle tragove. Ovaj fenomen zabilježen je u morima širom svijeta. Dijatomeje (Bacillariophyta) čine najznačajniju grupu fitoplanktona u većini vodenih ekosistema. One su primarni proizvođači sa ćelijskim zidom od silicijuma, nazvanim frustula. Mnoge vrste posjeduju prilagodbe za lebdenje, poput bodlji, uljnih kapljica ili formiranja kolonija. Dijatomeje predstavljaju važan izvor hrane u vodenim lancima ishrane i značajno doprinose produkciji kiseonika. Nakon uginuća, njihove silikatne frustule talože se na dnu i miješaju sa sedimentom, stvarajući dijatomejski mulj (dijatomejsku zemlju). Pojedine vrste dijatomeja mogu proizvoditi domoičnu kiselinu, neurotoksin koji se akumulira u organizmima koji se hrane fitoplanktonom, posebno u školjkama. Konzumiranje kontaminiranih organizama može izazvati trovanje kod ptica, sisara i ljudi. Najznačajniji proizvođači ovog toksina pripadaju rodovima *Pseudo-nitzschia* i *Nitzschia*.

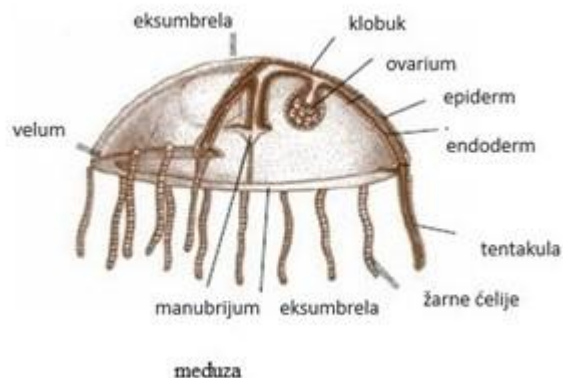
U morskim ekosistemima fitoplankton uglavnom čine dijatomeje, dinoflagelati, zelene alge, cijanobakterije i kokolitoforidi, dok u slatkim vodama dominiraju dijatomeje, zelene alge, harofitne alge (desmidijske), euglene i druge grupe.

Zooplankton- plankton životinja, protozoa i ili metazoa (npr. meduze, rotatorie, rakovi i ostale životinje), koji se hrane drugim organizmima planktona. Ovdje su uključena neka jaja i larve većih životinja, kao što su ribe, rakovi i anelida. Zooplankton sačinjavaju sitne životinje koje se nalaze u svim oceanskim zonama, osobito pelagičkim i primorskim zonama u oceanu, ali i u jezerima, ribnjacima, barama i rijekama. Morfološke i fiziološke razlike su vezane za veličinu tijela (daleko veći zooplanktonski oblici su u slanim vodama) i skeletne strukture (tabela 6.2.2.1). Od fizioloških razlika kao rezultat uvjeta staništa u slanim ekosistemima zooplanktonski organizmi su eurihalni, a process razmnožavanja duže traje i dosta je složeniji nego predstavnika iz slatkih voda, gdje dominira partenogeneza (kladocera).

Tabela 6.2.2.1. Morfološko-fiziološke adaptacije životinja zooplanktona

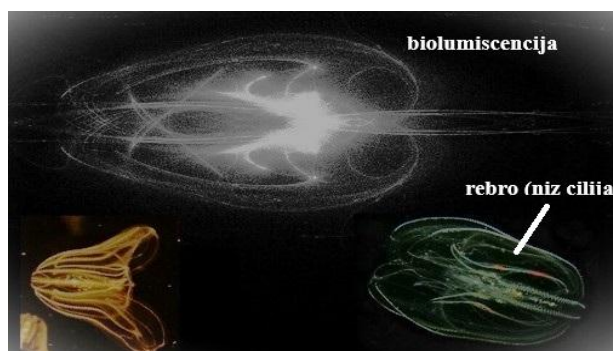
Osobina	Slatkovodni zooplankton	Morski zooplankton
Veličina tijela	Uglavnom manji (<2 mm)	Širok raspon, uključujući makroplankton
Skeletne strukture	Slabo izražene (prozirno tijelo)	Često s vapnenačkim/silicijskim skeletima
Plutanje (flotacija)	Masne kapljice, plosnati oblici	Plutajuće strukture (želatinozna tijela, ulja)
Tolerancija na salinitet	Usko specijalizirani	Eurihalne vrste su češće
Strategija razmnožavanja	Brzi ciklusi, partenogeneza	Sporiji, složeniji životni ciklusi

Najčešći organizmi zooplanktona pripadaju različitim taksonomskim grupama, uključujući protiste (nanoplanktonski flagelati) i životinje (Cnidaria, Ctenophora, Rotifera, larve mekušaca – veliger, Copepoda, Cladocera, larve glavonožaca, kozice i Tunicata). Nanoplanktonski flagellati (mikroskopski organizmi veličine od 2 - 20 μm) su ključni dio vodenih ekosistema i igraju značajnu ulogu u lancu ishrane (posebno u morskim okruženjima) jer kontrolišu brojnost populacija bakterija (ishranom). Njihova osnovna osobina je razvijen dugački bič (*flagelum*) za plivanje ili strukture slične niti zvane *cilia* (*ciliates*). Ciliata uspješno hvataju za ishranu bakterije, druge protiste i fitoplanktonske organizme. Adaptacije: mala veličina, tijela, bespolno razmnožavanje, organelle za kretanje, semipermeabilna membrana, brza ekskrecija, ishrana dominatno sa bakterijama te na taj način regulišu njihovu brojnost, uloga u prometu materije i protoku energije u vodi. Knidarije (Cnidaria), žarnjaci dominiraju u zooplanktonu slanih voda sa predstavnicima meduza Scyozoa ili nekih predstavnika Hydrozoa čiji se predstavnici javljaju i u slatkim vodama. Izražene su grabljivice (predatori drugih životinja) sa dobro razvijenim žarnim nitima na klobuku (slika 6.2.2.2).



Slika 6.2.2.2. Adaptacije meduza (Scyphozoa) na život u planktonu slanih voda

Rebronoše (Ctenophora) su grupa morskih organizama koja čini značajan dio zooplanktona slanih voda. Ctenofori su životinjski organizmi, a prepoznaju se po svojim karakterističnim "rebrima", koja se sastoje od cilija (sitnih dlačica koje se pomiču) i pomažu im za kretanje kroz vodu (slika 6.2.2.3). Oni su najpoznatiji po svojoj sposobnosti da stvaraju sjajnu svjetlost (*bioluminiscenciju*). Ctenofori dolaze u različitim veličinama, oblicima i bojama. Neki su mali i gotovo prozirni, dok su drugi veći i mogu biti vrlo šareni. Imaju kompleksne strukture koje im omogućuju uspješno kretanje i lov plijena.



Slika 6.2.2.3. Prikaz jedinki ktenofora u oceanskoj vodi (Marciel, 2019)

Phylum Rotifera ili rotatoria, predstavlja organizme koji nisu pokretni (ne mogu se kretati), ali oko 100 vrsta su u holoplanktonu (pravi planktonski organizmi). Nihovo pokretanje je rezultat lebdenja u masi vode i nošeni su pokretima vodenih masa. Hrane se bakterijama, detritusom, ostalim rotatorijama, algama ili protozoama. Veoma su reproduktivne, tj. proizvode dosta mladih. Kod njih je pristno bespolno razmnožavanje, a polno se razmnožavaju kada su uvjeti sredine stresni. Adaptacije rotatorija uključuju oblik tijela, fiziologiju i način života (tabela 6.2.2.2).

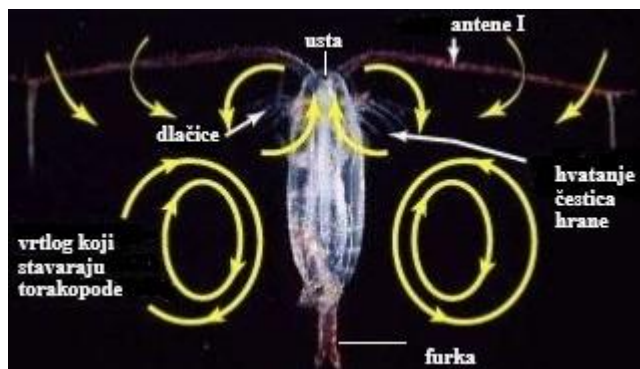
Tabela 6.2.2.2. Prikaz adaptacija rotatorija na život u plankton

karakteristike	Opis
Oblik tijela	Rotatorije su mali organizmi, što im omogućuje da se lako kreću kroz vodu, preživljavaju u turbulenciji i izbjegavaju predatore. Mnoge vrste rotatorija imaju oblik koji omogućava da se lako kreću u vodi.
Cilije/treplje	Cilije se koriste za generiranje mikroskopskih struja u vodi, što im omogućava da plutaju i usmjeravaju hranljive čestice prema ustima.
ishrana	Rotatorije se hrane mikroskopskim organizmima kao što su bakterije i alge. Adaptirane su za efikasnu filtraciju hrane iz vode; njihovi usni organi (korona) sa cilijama omogućavaju im da usmjere čestice hrane prema ustima.
Uslovi života	Većina vrsta rotatorija preživljava ekstremne uslove, kao što su promjene temperature, oscilacije u salinitetu i smanjenje dostupne hrane. Neke vrste mogu čak preći u fazu ciste koja im omogućava preživljavanje sušnih i nepovoljnih perioda.
Način života	Većina vrsta rotatorija adaptirana je za parazitski život u planktonskim zajednicama, živeći unutar drugih organizama. Ove vrste često imaju specijalizovane strukture za pričvršćivanje (kukice) na domaćina i mogu se hraniti njegovim tjelesnim tečnostima.

Predstavnici Rotifera su uglavnom zastupljeni sa slatkovodnim vrstama, široko su rasprostranjeni u svim vrstama kopnenih voda. Od 1817 opisanih vrsta, samo 50 je isključivo morskih, dok je pojedinačno opisano nekoliko vrsta kopnenih i parazitskih oblika. Rotiferi su generalno kosmopoliti, sa prevagom termofilnih ili tropikopolitanskih predstavnika (globalna rasprostranjenost u tropskom pojasu).

Rakovi (Crustacea): Većina makrozooplanktona su rakovi koji se nalaze u morskim i slatkovodnim ekosistemima. U sastavu zooplanktona slatkovodnih ekosistema dominiraju vrste Cladocera i Copepoda, dok u slanim ekosistemima Copepoda, Euphasiacea i larveni stadiji drugih viših rakova. Predstavnici Copepoda (veslonožaca) plivaju pomoću antene i frontalnih struktura na njihovim tijelima. Oni se hrane fitoplanktonom i detritusom, a ponekad i drugim zooplanktonskim organizmima manjih veličina. Copepoda su jedan od najvažnijih i najbrojnijih sastavnih dijelova zooplanktona u akvatičnim ekosistemima, kako u slatkim, tako i u slanim vodama. Ove male, često mikroskopske životinje, igraju ključnu ulogu u lancu ishrane i ciklusu hranjivih tvari u vodi. Copepoda su obično veličine u rasponu od 0,2 mm do 2 mm, iako neke vrste mogu biti veće. Imaju segmentirano tijelo, koje se sastoji od glave, toraksa i abdomena (slika 6.2.2.4.). Na glavi je razvijen jedan par antena (antene I) koje koriste za kretanje i manevriranje kroz vodu. Imaju ključnu ulogu u percepciji okoline i kontroli pokreta. Copepodi imaju jedan par dobro razvijenih antena (antennule), dok je drugi par antena znatno reduciran. Prvi par antena služi za kretanje i stabilizaciju tijela u vodi, a kod mužjaka i za pridržavanje ženke tokom kopulacije. Reducirane druge antene učestvuju u manipulaciji hrane i interakciji s okolinom. Kod njih je razvijeno jedno nauplijusovo oko, koje im omogućavaju detekciju svjetla, što je važno za navigaciju kroz vodu. Osnovna su hrana za mnoge veće vrste, uključujući ribe, kitove, rakove, pa čak i neke vrste ptica. Oni predstavljaju prijelaznu kariku između mikroskopskih biljnih organizama (poput fitoplanktona) i većih predatora. Mnoge vrste Copepoda filtriraju planktonske čestice (kao što su fitoplankton i mikrozooplankton) iz vode i koriste ih kao izvor hrane. Na taj način, oni također igraju ključnu ulogu u održavanju ravnoteže planktonskih zajednica. Kroz proces ishrane i izlučivanja, Copepoda pomažu u transportu

hranjivih tvari kroz ekosistem. Na primjer, feces koji ostavljaju može poslužiti kao izvor hranjivih tvari za druge organizme, te doprinosi ciklusu ugljika i dušika u vodi.

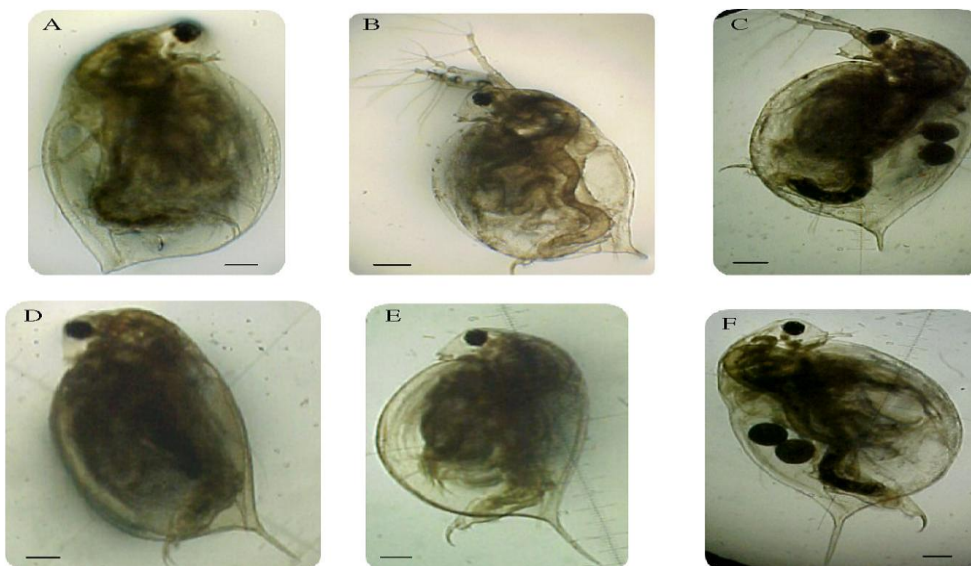


Slika 6.2.2.4. Prikaz građe predstavnika Copepoda kao i istaknute adaptacije na život u vodi (prilagođeno prema [www. slideserve.com/damian-clements/zooplankton](http://www.slideserve.com/damian-clements/zooplankton))

Copepoda se obično razmnožavaju polno, a ženka nosi jaja u posebnoj vrećici (kokon), dok se ne izlegu. Njihova jaja obično prelaze kroz nekoliko razvojnih stadija, uključujući larve koje imaju različite faze razvoja. Copepoda se brzo razvijaju, a njihov životni ciklus može biti vrlo kratak, što omogućava njihovu brzu reprodukciju i prilagodbu na promjenjive uvjete u akvatičnim ekosistemima. Vrste Copepoda su osjetljive na promjene u okolini, kao što su promjene temperature, saliniteta i dostupnosti hrane. Zbog svoje osjetljivosti, često se koriste u ekološkim istraživanjima kao pokazatelji stanja ekosistema.

Predstavnici Cladocera (vodenih buha) također su ključne komponente zooplanktona i imaju vrlo važnu ekološku ulogu u akvatičnim ekosistemima. Pretežno nastanjuju slatkovodne ekosisteme, gdje žive uglavnom kao dio zooplanktona, dok je u bočatim i morskim vodama prisutan manji broj specijaliziranih planktonskih vrsta. Kroz svoju ulogu u prehranbenom lancu, filtriranju hranjivih tvari, i brzoj reprodukciji, oni pomažu održavanju stabilnosti i ravnoteže vodenih ekosistema. Nihove adaptacije na život u planktonu su prije svega fizičke (strukture): smanjen volumen, bočne bodlje, karapaks, duge antene za lokomociju isl. Adaptacije za kretanje kod predstavnika Cladocera su povezane sa razvijenim velikim, pokretnim antenama II, koje koriste za kretanje kroz vodu. Osim toga, ekstremiteti na torakalnom dijelu tijela često se koriste za pomicanje i filtriranje hrane, stvarajući vortexe u vodi oko svog tijela. Brza vertikalna migracija kod nekih vrsta Cladocera zastupljena je kako bi izbjegle predatore ili kako bi pronašle bolje uvjete za hranjenje. Ova migracija često slijedi dnevni ritam (dnevna i noćna migracija). Predstavnici Cladocera su vrlo osjetljivi na prisustvo predatora, što pokazuje refleksno ponašanje, poput brze promjene smjera kretanja ili "skakanja" kada detektiraju predatore, poput riba ili drugih predstavnika zooplanktona. Neke vrste Cladocera mogu smanjiti svoju aktivnost ili potpuno "zamrznuti" svoje kretanje u trenutku kada prepoznaju prijetnju, kako bi izbjegle predatore. Reproduktivne adaptacije, podrazumjevaju polnu i bespolnu reprodukciju koja je zastupljena kod vrsta Cladocera. Tokom povoljnih uvjeta, mnoge vrste se razmnožavaju neseksualno (partenogeneza), što omogućava brzu veliku populaciju u idealnim uvjetima. Međutim, kada su uvjeti nepovoljni (npr. smanjenje hranjivih tvari ili zimski periodi), mogu se razviti jaja koja preživljavaju nepovoljne uvjete, a polna

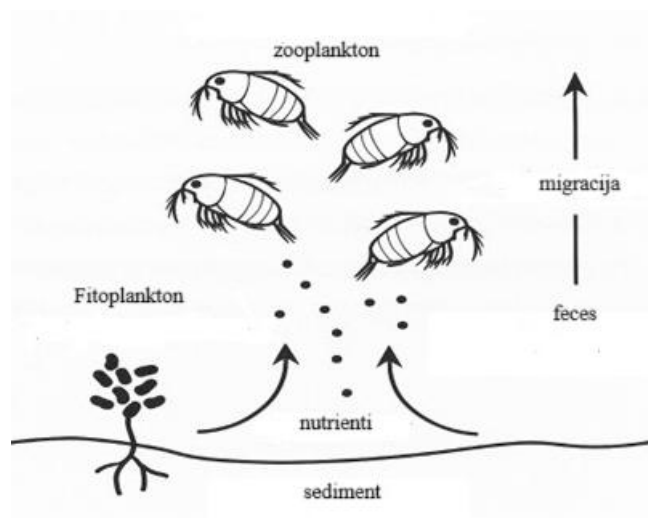
reprodukcija omogućava veći genetski diverzitet. Jaja koja preživljavaju nepovoljne uvjete mogu opstati kroz sušu ili zimu, dok se u povoljnim uvjetima izlegu novi organizmi. Cladocera pokazuju visok stepen prilagodljivosti promjenama saliniteta i temperature, čime održavaju unutrašnju stabilnost organizma (homeostaza). Vrste koje nastanjuju slane i bočate vode razvile su specifične fiziološke mehanizme za regulaciju ravnoteže soli i vode, što im omogućava opstanak u promjenjivim uslovima estuarijskih ekosistema. Istovremeno, Cladocera i drugi predstavnici zooplanktona razvili su različite strategije zaštite od predatora, posebno riba. Te prilagodbe uključuju prozirnost tijela, smanjenu pigmentaciju ili, kod organizama koji žive u dubljim slojevima vode, intenzivnije crveno obojenje. Kod pojedinih vrsta prisutne su i hemijske odbrambene osobine, poput neugodnog okusa, što dodatno smanjuje vjerovatnoću predacije. Jedan od najkarakterističnijih adaptivnih odgovora kod Cladocera je ciklomorfoza (slika 6.2.2.5) kao morfološka promjena tijela tokom različitih faza životnog ciklusa. Ovaj fenomen predstavlja reakciju na promjene u ekološkim uslovima, uključujući sezonske varijacije, dostupnost hrane i intenzitet predatorskog pritiska. Tokom toplijeg dijela godine organizmi obično imaju jednostavniju građu, dok u hladnijim mjesecima razvijaju izraženije morfološke strukture koje povećavaju njihovu otpornost na nepovoljne uslove.



Slika 6.2.2.5. Ciklomorfoza kod vrste *Daphnia magna* Straus, 1820: A–B, dužina kaudalne bodlje u aprilu; C–D, dužina kaudalne bodlje u maju; E–F, dužina kaudalne bodlje u junu; mjerna skala = 100 μm . (Toumi i sur., 2015)

Ciklomorfoza je složen adaptivni proces koji obuhvata fiziološke, ekološke i genetske faktore, omogućujući Cladocera da se uspješno prilagođavaju promjenama u spoljašnjoj sredini i povećaju vjerovatnoću preživljavanja i reprodukcije. Ekološka značajnost jedinki zooplanktona kao primarnih konzumenata je prvenstveno ishrana fitoplanktonom, bakterijama i detritusom, što ukazuje na aktivnu ulogu u procesu kruženja energije i održavanja ravnoteže. Kao sekundarni konzumenti, predatori manjih planktonskih jedinki regulišu brojnost, a kao filtratori i selektivni hranitelji utiču na održavanje prozirnosti voda i samoprečišćavanju. Usljed aktivnosti u procesima taloženja organskih čestica, uključeni su u ciklus hranjivih tvari kroz vertikalne migracije (dielna migracija). Na shemi 6.2.2.1 prikazana je funkcionalna veza između fitoplanktona, zooplanktona i sedimenta u zatvorenom ciklusu tvari kao i uloga

zooplanktona u procesu „sinking flux“ ili taloženju organskih čestica. Veslonošci (Copepoda), glavna komponenta zooplanktona, vertikalno migriraju prema površini (tipično noću). Nakon ishrane zooplanktonski organizmi izbacuju fecec (izmet) koji pada prema dnu. Ovo je važno u transportu ugljika i hranjivih tvari (N i P) prema sedimentu. Fitoplanktonski organizmi kao izvor hrane za zooplankton, koriste svjetlost za fotosintezu i hranjive tvari (nutrijenti). Hranjive tvari iz fekalnih peleta dopijevaju u sediment, gdje mogu biti ponovno mobilizirane i iskorištene. Strelice ukazuju na kruženje tvari iz sedimenta prema površini, podržavajući novi rast fitoplanktona. Fitoplankton učestvuje u kruženju hranjivih tvari u vodenom stupcu, dok dio nutrijenata pohranjenih u sedimentu koriste i makrofite, čime se ostvaruje veza između bentosa i pelagijala.



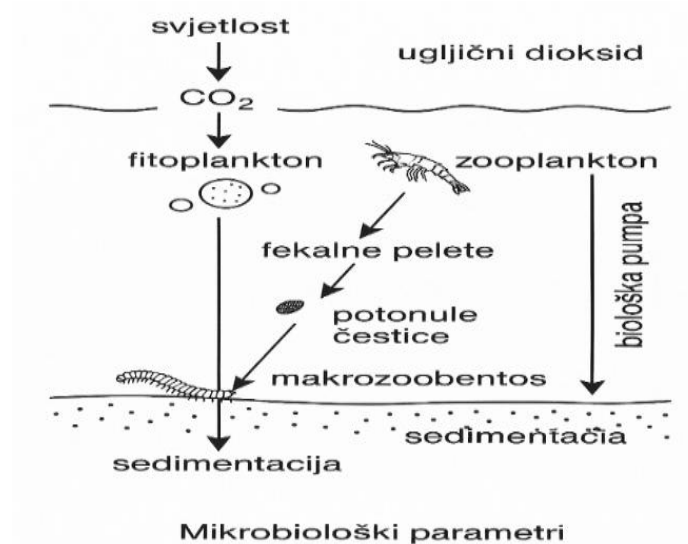
Shema 6.2.2.1. Prikaz uloge zooplanktonskih organizama u kruženju hranjivih materija u vodenom ekosistemu (prilagođeno prema Baustian i sur.2014)

U slatkovodnim ekosistemima dominacija različitih skupina zavisi od eutrofnosti, temperature i dostupnosti hranjivih tvari (tabela 6.2.2.3.). Česta je proljetna i jesenska eksplozija populacija *Daphnia*. U slanim sistemima dominiraju vertikalne migracije i prostorne razlike (epipelagične, mezopelagične i batipelagične zone). Slatkovodni zooplankton sastoji se uglavnom od rotatorija, veslonožaca i vodenih buha, dok su meduze, rebronoše i tunikati karakteristični za more. Morski zooplankton pokazuje veću raznolikost i raznovrsniju morfologiju, s više vrsta koje su trajni ili privremeni članovi planktona. Copepoda (veslonošci) su zajednički za oba sistema, ali se vrste razlikuju - slatkovodni uključuju npr. rod *Cyclops*, dok morski uključuju rodove *Calanus*, *Acartia* itd. Bioindikatorski značaj organizama zooplanktona u slatkim vodama - *Cladocera* i *Rotifera* se koriste kao bioindikator trofije i eutrofikacije, npr. *Bosmina coregoni* → oligotrofne vode. U slanim vodama, vrsta poput *Calanus finmarchicus* ukazuje na stabilne hladne morske mase.

Tabela 6.2.2.3. Sastav zooplanktona slanih i slatkih voda

Osobina	Slatkovodni ekosistemi	Morski ekosistemi
Dominantne skupine	Rotatoria (rotatorija), Cladocera (vodene buhe), Copepoda (veslonošci)	Copepoda (veslonošci) – apsolutno dominantni, Chaetognatha (streličari), Cnidaria (meduze, hidromeduze), Tunicata (<i>Salpa</i> , <i>Doliolum</i>)
Veličina organizama	Pretežno mikroskopski (20–500 µm)	Od mikroskopskih do makroskopskih (npr. meduze i salpe)
Biodiverzitet	Manji, često samo nekoliko dominantnih vrsta	Znatno veći, posebno u tropskim i pelagijskim područjima
Adaptacije	Tolerancija na promjene temperature i pH, brzi ciklus razmnožavanja	Osmoregulacija, mehanizmi za plutanje (uljne kapljice, želatinozna tijela)
Stalni i povremeni	Česti ciklični oblici – sezonske populacije (npr. <i>Daphnia</i>)	Mnogi organizmi su holo- ili mero-plankton (stalni i privremeni)
Ekološka funkcija	Glavna veza fitoplanktona i riba, filtratori i hranidbena baza	Osnovna karika morskog lanca hrane
Specifični rodovi	<i>Daphnia</i> , <i>Bosmina</i> , <i>Cyclops</i> , <i>Keratella</i> , <i>Brachionus</i>	<i>Calanus</i> , <i>Euchaeta</i> , <i>Sagitta</i> , <i>Oikopleura</i> , <i>Aurelia</i> (meduza)
Osjetljivost na promjene	Veoma osjetljivi na eutrofikaciju, zagađenje i promjene temperature	Reaguju na promjene saliniteta i temperature, pokazatelji klimatskih promjena

Površinski sloj: Fitoplankton vrši primarnu produkciju - fotosintezom koristi sunčevu svjetlost i CO₂ da stvori organsku tvar (ugljik). Time smanjuje koncentraciju CO₂ u vodi, što omogućuje difuziju CO₂ iz atmosfere. Organizmi zooplanktona se hrane se fitoplanktonom i proizvode fekalne pelete (izmet bogat ugljikom). Zooplankton sudjeluje u vertikalnoj migraciji (danju u dubinu, noću prema površini) i tako transportuje organski ugljik. Izmet i ostaci (mrtvi fitoplankton i zooplankton) tonu prema dnu. Ovo je ključna komponenta biološke pumpe – fizički transport organske tvari iz površine prema dubini. Sedimentacija podrazumjeva da se dobar dio čestica razgrađuje i remineralizira (vraća se CO₂ i hranjive tvari u vodu), ali dio se trajno taloži u sediment, uklanjajući CO₂ iz atmosferske razmjene na stotine do hiljada godina. Biološka pumpa predstavlja cijeli mehanizam kretanja ugljika. Od fiksacije CO₂ (fitoplankton) → kroz lanac ishrane → do taloženja na dnu. Ova shema sažima najvažniji prirodni mehanizam za dugoročno uklanjanje CO₂ iz atmosfere, gdje fitoplankton pokreće proces, a zooplankton i sedimentacija ga zatvaraju (shema 6.2.2.2.).



Shema 6.2.2.2. Od primarne produkcije do sedimentacije: uloga planktona u kruženju ugljika (prilagođeno prema Wetzel, 2001)

6.2.3. Nekton, sastav i adaptacije

Nekton su aktivno pokretni vodeni organizmi koji se mogu kretati neovisno o strujama vode. Za razliku od planktona, imaju snažnu muskulaturu i razvijene organe za kretanje, što im omogućava horizontalne i vertikalne migracije (tabela 6.2.3.1.). U ovu skupinu spadaju glavonožci (lignje, sipe idr.), ribe, morski sisari i vodozemci (u vodenim fazama ili stalno akvatični).

Adaptacije riba na život u vodi podrazumjevaju razvoj bočne linije, riblji mjehur, organe za respiraciju, razvoj kičme i dr. (slika 6.2.3.1).

Bočna linija predstavlja sistem kanala i pora u koži sa neuromastima (mehanoreceptori). Registruje mikro-vibracije i promjene strujanja, pomaže u orijentaciji i izbjegavanju predatora, lovu (detekcija plijena u mraku/mutnoj vodi) i koordinaciji kretanja u jatima. Funkcioniše jednako u slatkoj i slanoj vodi; kod brzoplivajućih vrsta je naglašena duž trupa i repa.

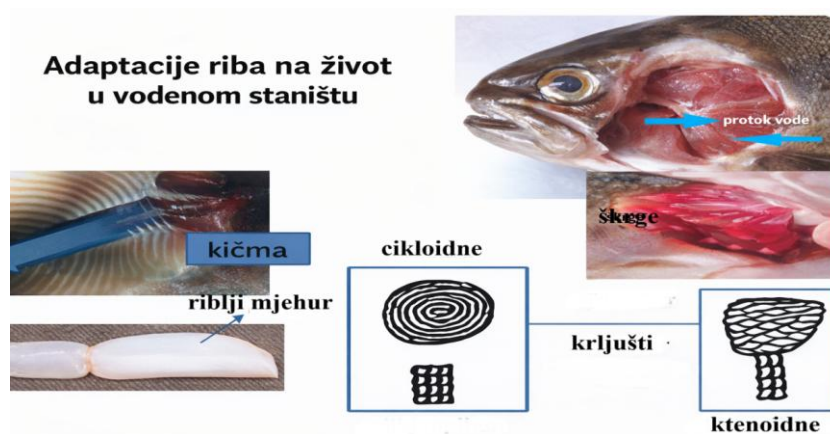
Riblji mjehur predstavlja hidrostatski organ koji omogućava regulaciju uzgona i precizno vertikalno pozicioniranje u vodenom stupcu. Kod fisostomnih vrsta ((ribe sa otvorenim plivajućim mjehurom), kao što su šarani, mjehur je povezan s crijevom, pa se količina gasa u njemu podešava gutanjem ili izbacivanjem zraka. Fisoklistne vrste, kojih je većina među koštunjačama, posjeduju zatvoren mjehur u koji gas dopijeva putem gasne žlijezde i sistema kapilara *rete mirabile*, dok se resorpcija obavlja preko ovalnog organa. Osim hidrostatske funkcije, mjehur kod nekih riba učestvuje i u percepciji zvuka, naročito kod vrsta koje imaju *Weberov* aparat, te može služiti kao pomoćni respiratorni organ. Koštunjače, poput ajkula i raža, kao i neke brze pelagične koštunjače, npr. tune, ne posjeduju riblji mjehur. Uzgon postižu visokom količinom ulja u jetri ili kontinuiranim plivanjem. Iako je princip funkcije ribljeg mjehura sličan u slatkim i morskim vodama, dubokovodne morske vrste često imaju posebno kompresibilne ili reducirane mjehure prilagođene velikim pritiscima.

Tabela 6.2.3.1. Sastav i adaptacije organizama nektona slanih i slatkih voda

okruženje	glavne grupe	primjeri	ključne adaptacije
slatka voda	Ribe	Pastrmka (<i>Salmo trutta</i>), šaran (<i>Cyprinus carpio</i>), som (<i>Silurus glanis</i>), štuka (<i>Esox lucius</i>)	Hidrodinamično tijelo za plivanje, osmoregulacija u niskom salinitetu, bočna linija za osjet vibracija, prilagodba škrge na promjenjiv sadržaj kiseonika
	Vodozemci	Odrasle faze žaba (<i>Rana temporaria</i>), daždevnjaka (<i>Triturus cristatus</i>)	Plućno i kožno disanje, sposobnost kretanja u vodi i na kopnu, sezonske migracije do mrijestilišta
slana voda	glavonožci	<i>Loligo vulgaris</i> (lignja), <i>Sepia officinalis</i> (sipa), <i>Nautilus pompilius</i>	hidrodinamični oblik tijela i snažno mlazno kretanje pomoću sifona, dobro razvijene oči, centralizovan nervni sistem koji omogućava aktivan predatorski način ishrane, efikasna regulacija plovnosti te sposobnost brze promjene boje radi kamuflaže i komunikacije.
	Ribe	Tuna (<i>Thunnus thynnus</i>), sardina (<i>Sardina pilchardus</i>), bakalar (<i>Gadus morhua</i>), ajkule (<i>Carcharhinus</i> spp.)	Vretenasto tijelo za brzinu, repni režanj visokog potiska, osmoregulacija u visokom salinitetu, efikasne škrge
	Morski sisari	Kit plavi (<i>Balaenoptera musculus</i>), delfin (<i>Delphinus delphis</i>), orka (<i>Orcinus orca</i>)	Plućno disanje, sposobnost zadržavanja daha (do sat vremena kod nekih kitova), togasska izolacija slojem loja, hidrodinamično tijelo

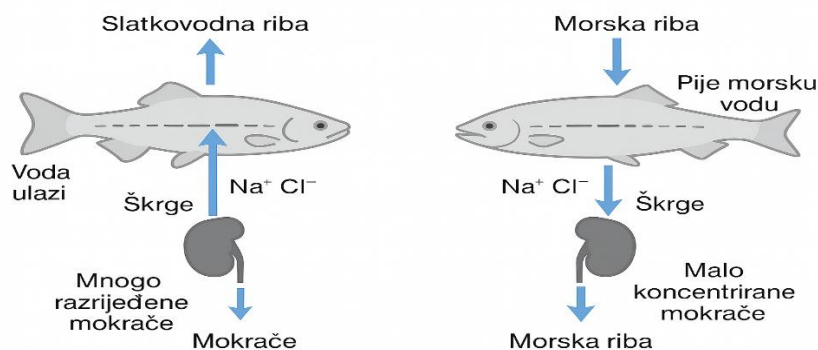
Škrge su smještene na škržnim lukovima i građene od filamenata sa sekundarnim lamelama, koje omogućavaju efikasnu protustrujnu izmjenu gasova i maksimalnu difuziju kiseonika. Osmoregulacija u slatkovodnih riba ostvaruje se pomoću ionocita (Cl^- ćelija) koji aktivno preuzimaju ione iz vode i učestvuju u izlučivanju amonijaka. U morskim vodama isti tip ćelija učestvuje u izlučivanju NaCl , uz djelovanje transportnih proteina i karboanhidraze. Aktivni plivači imaju dobro razvijene škrge s većom površinom lamela te efikasnije mehanizme ventilacije, uključujući pokrete poklopca (*operculum*). Krljušti su dermalne strukture koje daju mehaničku zaštitu i smanjuju hidrodinamički otpor, a javljaju se u više tipova: placoidne kod hrskavičnjača, ganoidne kod primitivnih koštunjača te cikloidne i ktenoidne kod većine teleosta. Dodatnu zaštitu pruža sluzni sloj koji smanjuje trenje i djeluje kao barijera protiv patogena, dok hromatofori omogućuju promjene boje, kamuflažu i kontramimikriju. Kod pojedinih vrsta rastni prstenovi na krljuštima mogu se koristiti za procjenu starosti ribe.

Kičma (vertebralni stub) - Segmentirana (prekaudalni i kaudalni dio), najčešće amficoelne pršljenove. Prenosi silu miomera (mišićnih segmenata) na repno peraje → potisak. Kombinuje krutost (za efikasno talasanje trupa) i fleksibilnost (manevar).



Slika 6.2.3.1. Adaptacije riba na život u nektonu vodenih ekosistema

Dodatne morfološke prilagodbe važne za nekton su oblik tijela: vretenast (brzina; tuna, pastrmka), dorzoventralno spljošten (pridreno plivanje). Peraja: položaj i oblik (visoko repno peraje = veći potisak; grudna za manevar). Rep: homocerkalan (teleosti) vs. heterocerkalan (ajkule – dodatni uzgon). Ove adaptacije omogućavaju ribama efikasno plivanje, fino vertikalno pozicioniranje bez velikog energetskog troška. Te omogućavaju preciznu percepciju okoline, osmoregulaciju u slatkim i slanim vodama, što je temelj migracija, lova i izbjegavanja predacije kod nektona. Ribe iz slane i slatke vode vode (slika 6.2.3.2) pokazuju i razliku u načinu regulacije koncentracije soli, procesima usvajanja i ekskrecije vode iz tijela. Slatku vodu karakteriše mala slanost, dok je visok salinitet karakterističan za slane ekosisteme. Slatkovodne ribe naseljavaju okruženje sa koncentracijom soli u vodi manjom nego u tjelesnim tekućinama ribe. Voda stalno ulazi u tijelo osmozom, a soli izlaze difuzijom. Bubrezi izlučuju velike količine razrijeđene mokraće (hipotonična u odnosu na krv), škrge aktivno unose ione (Na^+ , Cl^-) pomoću ionocita (tzv. Cl^- ćelije) i ne piju vodu, jer višak vode već ulazi pasivno. Morske ribe žive u sredini gdje je koncentracija soli u vodi veća nego u tjelesnim tekućinama ribe. Voda izlazi iz tijela osmozom, a soli ulaze difuzijom. Piju morsku vodu kako bi nadoknadile gubitak tekućine, škrge aktivno izlučuju višak Na^+ i Cl^- putem ionocita, a bubrezi izlučuju malo, ali koncentrirane mokraće, bogate ionima magnezija i sulfata.



6.2.3.2. Prikaz kontrole količine iona soli u krvi kod morskih i slatkovodnih vrsta (prilagođeno prema Evans, 1980)

Organizmi nektona prvenstveno imaju najznačajniju ekološku ulogu u lancu ishrane i trofičkoj povezanosti. Nekton zauzima različite trofičke nivoe (od biljojeda do vrhunskih predatora), povezujući niže trofičke organizme (plankton, bentos) s višim potrošačima. Regulacija populacija se ostvaruje predacijom, te tako utiču na brojnost i strukturu populacija drugih organizama (npr. kontrola zooplanktona ili manjih riba). Migracijom i ishranom doprinose premještanju materije unutar ekosistema i između ekosistema (npr. anadromne i katadromne migracije riba), te tako aktivno obezbjeđuju kruženje organske materije i hranjivih tvari. Vrste koje migriraju (losos, jegulja, tuna) prenose energiju i nutrijente između morskih i slatkovodnih sistema te tako ostvaruju povezivanje ekosistema. Nekton predstavlja važan dio ukupne biodiverzitetske slike vodenih ekosistema. Kao jedna od važnih uloga je indikacija ekološkog stanja i kvaliteta voda. Promjene u sastavu i brojnosti nektonskih zajednica odražavaju stanje ekosistema (npr. osjetljive vrste riba izumiru pri degradaciji staništa).

Nekton, a posebno ihtipopulacije imaju veliki ekonomski značaj u ribarstvu i akvakulturi (kao resurs ljudske ishrane) koji direktno zavise od zdravih nektonskih populacija. Pored toga zbog aktivnog ribolova (sportskog i rekreativnog) imaju kulturnu i rekreativnu vrijednost kroz sportski ribolov, ekoturizam i tradicionalnu ishranu. Nekton ima ključnu ulogu u održavanju strukture i funkcije vodenih ekosistema, u regulaciji energetske tokova i materijalnih ciklusa, te je od velikog značaja za čovjeka kroz prehranu, ekonomiju i očuvanje biodiverziteta. Zbog visoke pozicije u hranidbenom lancu i dugog životnog vijeka, akumuliraju zagađivače (teški metali, PCB-i), pa su važni bioindikator morskog i slatkovodnog zagađenja.

6.2.4. Bentos, sastav i adaptacije

Bentos kao kompleks organizama obuhvata naselje organizama na dnu koje su vezane stalno ili privremeno. Osnovna podjela bentosa prema načinu života organizama:

- a) epibentos – organizam koji živi na površini drugog živog organizma ili sedimenta. Odnos između dva organizma može biti neutralni ili komenzalistički. Domaćin epibionta naziva se bazibiont (npr. školjke, morski krastavci, puževi, rakovi).
- b) endobentos – organizmi koji žive unutar sedimenta, tj. zakopani (npr. neki maločetinaši-maločekinjaši, larve insekata, školjke).
- c) perifiton – mikroorganizmi i alge koji obitavaju na podvodnim površinama (kamenje, biljke, školjke itd.).

Kao primjer može se posmatrati školjka *Pinna nobilis* (periska) na kojoj se razvijaju komensalni organizmi kao epibionti, a ona sama je također u grupi epibionata (slika 6.2.4.1). Školjka prstac (*Lithophaga lithophaga*) živi ubušena u kamen i u grupi je endobionata. Perifiton se razvija na podvodnom bilju, ali i samoj školjki periska.



Slika 6.2.4.1. Prikaz epibionta, endobionta i perifitona u bentosu mora

Prema sastavu bentos se dijeli na fitobentos (alge i više biljke, mahovine), zoobentos (beskičmenjaci) i razlagače (bakterije i gljive). Glavna uloga razlagača je u razgradnja organske materije, te tako saprofagni bentos pomaže kruženju hranjivih tvari. Hrana za ribe i druge predatore - ključna karika u mrežama ishrane. Organizmi bentosa pokazuju razlike u sastavu i prilagodbama organizama na život u slanim i slatkovodnim ekosistemima (tabela 6.2.4.1).

Uloga i značaj organizama bentosa proizilazi iz njihovih aktivnosti u razgradnji organske materije, ciklusu kruženja elemenata, primarnoj i sekundarnoj proizvodnji. Zbog velike heterogenosti sastava (bakterije, gljive, biljke i životinje) te osjetljivosti na variranje abiotičkih uvjeta, bentoske zajednice brzo reagiraju na promjene u vodenoj sredini i stoga imaju važnu ulogu u indikaciji kvaliteta voda. Vrste bentosa, vrlo su osjetljive na promjene u kvaliteti vode (npr. zagađenje, eutrofikacija, promjene kiseonika). Recikliraju materije i razgrađuju organsku tvar kao saprofagne vrste (npr. Oligochaeta, neki rakovi), razgrađuju organske tvari i vraćaju hranjive tvari u ekosistem. Uključeni su u autopurifikaciju voda. Osnova su hranidbenih mreža, hrana su za ribe, ptice i druge vodene organizme. Izražena je povezanost između primarnih proizvođača i viših trofičkih nivoa. Svojim aktivnostima ili načinom života učestvuju u strukturiranju staništa, npr. školjke, polihete, makrofite, mijenjaju strukturu sedimenta, stvarajući mikrohabitate za druge vrste. Poboljšavaju prozračivanje sedimenta, bioturbacijom, koja uzrokuje miješanje sedimenta aktivnostima životinja (npr. maločetinaši, rakovi), što povećava prodiranje kiseonika. Neke vrste, kako biljke, a dominantno životinje imaju važan ekonomski značaj. Komercijalnu vrijednost imaju školjke, morski ježevi, morski trpovi, rakovi isl. Indirektno doprinose ribarstvu kao osnovna hrana za ekonomski važne ribe.

Tabela 6.2.4.1. Raznovidnost i adaptacije organizama bentosa u slatkim i slanim vodama

Tip bentosa	Okruženje	Primjeri organizama (taksonomske grupe)	Ključne adaptacije
Fitobentos	Slatka voda	Bacillariophyceae , Chlorophyceae, Rhodophyta, Cyanobacteria, makrofite (<i>Potamogeton</i> , <i>Myriophyllum</i>)	Prijanjanje za podlogu rizoidima ili bazalnim diskovima, tolerancija na promjene protoka i svjetlosti, fotosintetska prilagodba slaboj svjetlosti
Fitobentos	Slana voda	Morske trave (<i>Zostera</i>), Rhodophyta (<i>Corallina</i>), Phaeophyceae (<i>Fucus</i> , <i>Laminaria</i>), Chlorophyta (<i>Ulva</i>)	Čvrsti držači (eng. holdfast), otpornost na valove, promjene saliniteta i temperature, prilagodba plimi i oseki
Zoobentos	Slatka voda	Spongia, Cnidaria, Turbellaria, Gastropoda, Bivalvia, Oligochaeta, Hirudinea, Arachnida, Crustacea (Amphipoda, Isopoda, Decapoda), Insecta (Ephemeroptera, Odonata, Plecoptera, Trichoptera, Diptera, Megaloptera, Coleoptera)	Različiti načini kretanja (puženje, plivanje blizu dna), cjevčice ili kućice od materijala iz okoline, filtracija čestica iz vode, pričvršćivanje za podlogu, tolerancija na promjene kiseonika
Zoobentos	Slana voda	Anthozoa, Gastropoda, Scaphopoda, Polyplacophora, Bivalvia, Cephalopoda, Polychaeta, Lophophorata, Echinodermata,	Pričvršćivanje (sesilnost) za podlogu (byssus, hvataljke), čvrste skeletne strukture, otpornost na promjene saliniteta, razvijeni osjetni organi, prilagodba plimi i oseki

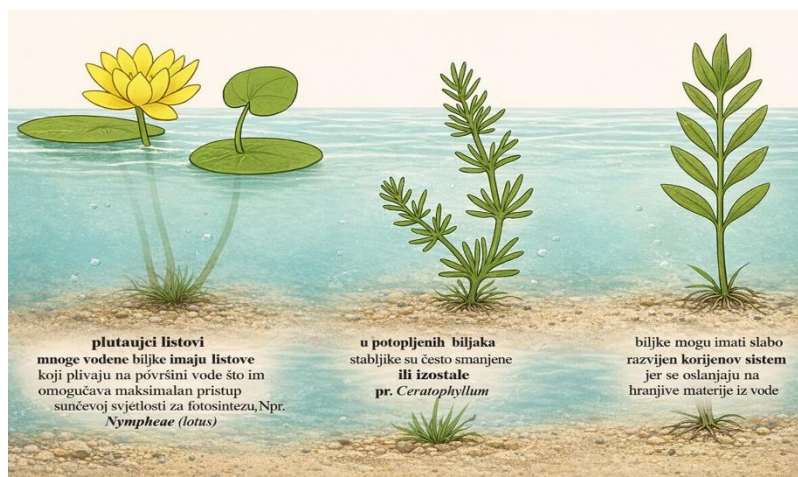
Fitobentos se odnosi na alge i biljke koje rastu na dnu vodenih ekosistema, uključujući mora, rijeke, jezera i močvare. Ovi organizmi igraju ključnu ulogu u ekosistemima, kao primarni proizvođači, hrana potrošačima i stanište drugim organizmima.

Prema tipu mikrostaništa koje naseljavaju razlikuje se nekoliko tipova algi (tabela 6.2.4.2). Epilietik je zajednica algi koje rastu na kamenju i stijenama (grč. *epi* = na, *lithos* = kamen). Epipsammon je zajednica mikroalgi i mikroorganizama koje žive među česticama pijeska (grč. *psammos* = pijesak).

Tabela 6.2.4.2. Tipovi algi prema mikrostaništu koje naseljavaju

Zajednica	Stanište / podloga	Dominantne taksonomske grupe	Ključne karakteristike i adaptacije
Epilitetik	Kamenje, stijene, tvrda podloga	Bacillariophyta (dijatomeje), Chlorophyta (zelene alge)	Pričvršćivanje za kamenje (rizoidima, sluznim omotačima); otporne na abraziju i promjene protoka; fotosintetska prilagođenost slabijoj svjetlosti pri dnu
Epipsammon	Pijesak; među zrnima pijeska	Dijatomeje otporne na mehaničko pomicanje; mikroalge; bakterije iz biofilma	Život među pokretnim česticama pijeska; tolerancija na oscilacije vlage; formiranje biofilma oko zrnaca pijeska; prilagođenost turbulentnom mikrohabitat
Epipelik	Fini sediment (mulj, glina); površinski sloj dna	Dijatomeje, cijanobakterije, Chlorophyta	Mogućnost djelimičnog ukopavanja u sediment; tolerancija na nisku svjetlost; stabilan biofilm; sposobnost kretanja unutar tankog površinskog sloja (npr. klizanjem dijatomeja)

Biljke koje žive u vodi, poznate kao vodene biljke ili hidrofitne biljke, razvile su različite adaptacije koje im omogućavaju da prežive i uspjevaju u vodenim ekosistemima. Kormofiti, ili više biljke, razvili su brojne adaptacije koje im omogućavaju da uspjevaju u vodenim staništima (slika 6.2.4.2).



Slika 6.2.4.2. Strukturne adaptacije viših biljaka na život u vodenim ekosistemima (prilagođeno prema Riis & Sand-Jensen, 1998)

Fiziološke adaptacije, podrazumjevaju osmoregulatorne adaptacije, adaptacije na salinitet i adaptacije reprodukcije. Biljke u slatkovodnim ekosistemima razvile su mehanizme za regulaciju osmotskog pritiska kako bi spriječile prekomjerno upijanje vode. Ti mehanizmi uključuju jačanje ćelijskih zidova, aktivno izbacivanje vode putem akvaporina i ionskih pumpi te akumulaciju osmotski aktivnih supstanci (šećera i iona) radi izjednačavanja pritiska. Adaptacije na salinitet podrazumjevaju da kod nekih vrsta viših biljaka u slanim vodama (halofiti) se razvijaju specijalizovani mehanizmi za izbacivanje viška soli, omogućavajući im

da prežive u ovim ekstremnim uslovima. Reproduktivne adaptacije podrazumjevaju bespolno ili aseksualno razmnožavanje vegetativno, stvarajući nove biljke iz dijelova stabljike ili listova. Ovaj način razmnožavanja omogućava brzu kolonizaciju kao i sporogeneza koja kod nekih vrsta podrazumjeva obrazovanje spora za reprodukciju, što im omogućava preživljavanje u nepovoljnim uslovima. Ekološke adaptacije vodenih viših biljaka uključuju značajnu ulogu biljaka kao skloništa i staništa za različite organizme u vodenim ekosistemima. Stvaranjem mikrohabitatâ putem nadzemnih dijelova (stabljike i listovi), biljke pružaju zaklon i podlogu za brojne organizme, uključujući insekte, mekušce, račice i riblju mlad. Na taj način povećavaju biološku raznolikost vodenih staništa. Međutim, ekološki najvažnija uloga biljaka ogleda se u funkciji njihovog korijenovog sistema, koji ima višestruki značaj za autopurifikaciju (samočišćenje) vode. Površina korijenja predstavlja idealan supstrat za kolonizaciju mikroorganizama, naročito nitrifikacionih i denitrifikacionih bakterija, koje razgrađuju organske tvari, transformišu dušikove (azotne) spojeve i time smanjuju eutrofikacijski pritisak. Višak azota (N) i fosfora (P) prisutan u vodi i sedimentu može se direktno asimilirati putem korijenovog sistema, čime biljke doprinose smanjenju dostupnosti hranjivih materija koje bi, u suprotnom, poticale masovni razvoj algi i planktona. Aeracija rizosfere podrazumijeva sposobnost mnogih vodenih biljaka da transportuju kiseonik iz atmosfere kroz svoja tkiva do korijenja, čime se oksigenira zona rizosfere (zemljište oko korijena). Time se omogućava razvoj aerobnih bakterija u inače anoksičnim uslovima sedimenta, što dodatno pospješuje razgradnju organskih tvari. Ove osobine čine kormofite ključnim bioinženjerima vodenih staništa, što opravdava njihovu primjenu u biološkoj revitalizaciji i očuvanju kvaliteta voda, naročito u plitkim jezerima, mrtvajama, kanalima i sporotekućim rijekama. Adaptacije kormofita na život u vodenim staništima su raznolike i kompleksne, omogućavajući im da prežive i uspijevaju u specifičnim ekološkim uslovima. Te adaptacije su ključne za njihovu ekosistemsku ulogu, jer doprinose očuvanju biološke raznolikosti i održavanju ekološke ravnoteže. Ključne ili najvažnije adaptacije uključuju strukturne, lisne adaptacije, reproduktivne adaptacije i ekološke adaptacije (tabela 6.2.4.3).

Tabela 6.2.4.3. Prikaz adaptacija biljaka na život u vodenim ekosistema

adaptacije	Opis
Strukturne:	• tanja ili odsutna <i>kutikula</i>: vodene biljke imaju tanju ili čak nepostojeću kutikulu, jer nema opasnosti od gubitka vode kao u kopnenim biljkama; • pneumatofori i <i>air sacs</i>: neke vrste imaju razvijene vazdušne kesice koje pomažu u održavanju uspravnog rasta i omogućavaju plutanje. • mehke, fleksibilne stabljike: omogućavaju lakše savijanje i prilagođavanje strujama vode.
Lisne adaptacije:	• široki listovi: često su široki i spljošteni kako bi maksimalno apsorbivali svjetlost koja prodire kroz vodu. • smanjen broj ili odsutnost listova: kod nekih vodenih biljaka listovi su reducirani ili preobraženi u uske ili nitaste oblike, čime se smanjuje otpor vode i olakšava život u vodenoj sredini;
Reproduktivne adaptacije	• plutajući cvjetovi: mnoge vodene biljke imaju cvjetove koji plutaju na površini, što olakšava oprašivanje. • različiti načini razmnožavanja: vodene biljke često koriste vegetativno razmnožavanje, poput reznica ili rizoma, pored polnog razmnožavanja.

Ekološke adaptacije:	• oslobađanje toksina: neke vodene biljke proizvode hemikalije koje mogu odbiti biljojede ili inhibirati rast drugih biljaka (allelopatija). • simbioza: neke vrste imaju simbiotske odnose s mikroorganizmima ili algama koji pomažu u apsorpciji hranljivih materija. • adaptacija na različite uslove: vodene biljke se mogu prilagoditi različitim nivoima saliniteta, dubinama i brzinama strujanja vode.
----------------------	--

Ove adaptacije omogućavaju vodenim biljkama uspješnu kompeticiju za resurse i opstanak u složenim i često promenjivim vodenim ekosistemima. Njihova struktura i sastav variraju zavisno od svjetlosti, prozirnosti vode, temperature, dubine, tipa podloge i trofičkog statusa ekosistema. Raznovrsnost fitobentosa ogleda se u morfološkoj, taksonomskoj i funkcionalnoj raznolikosti. Morfološki se razlikuju mikroskopske i makroskopske forme, od jednoćelijskih i kolonijalnih algi do viših vodenih biljaka. Podjela obuhvata:

mikroalge – jednoćelijske ili kolonijalne alge (npr. dijatomeje, zelene alge i cijanobakterije) koje rastu na podlozi i predstavljaju značajne primarne proizvođače organske materije i kiseonika u vodenim ekosistemima;

makroalge – višćelijske alge, uglavnom zelene i crvene u slatkim vodama, koje mogu formirati guste nakupine i predstavljaju stanište i izvor hrane za brojne organizme;

vodene paprati (*Salvinia*, *Azolla*, *Ceratopteris*) – rastu u vlažnim i potopljenim uslovima, doprinose pročišćavanju vode i pružaju sklonište sitnim organizmima;

više vodene biljke, poput *Eleocharis* i *Potamogeton*, naseljavaju močvare i plitke dijelove voda, stabilizuju sediment, smanjuju eroziju i stvaraju stanište za ribe i beskičmenjake i

močvarne biljke (*Cyperus*, *Juncus* i dr.) – rastu na obalama i u močvarnim zonama, učestvuju u filtraciji vode i obezbjeđuju mikrostaništa za brojne vodene organizme.

Značaj biljaka u sastavu fitobentosa pretežno je ekološki. One su ključne za održavanje vodenih ekosistema kroz primarnu produkciju, pročišćavanje vode, stabilizaciju dna te obezbjeđivanje hrane i staništa mnogim organizmima. Učestvuju u reciklaži hranljivih materija i održavanju ekološke ravnoteže, a njihov doprinos biodiverzitetu povećava raznovrsnost životinjskih vrsta koje od njih zavise. Vodene paprati predstavljaju posebnu grupu biljaka čije prilagodbe vlažnim staništima omogućavaju uspješan rast u specifičnim uslovima, pri čemu svojim ekološkim funkcijama dodatno doprinose stabilnosti vodenih sredina.

Briofite (mahovine) predstavljaju grupu primitivnih biljaka koje pretežno nastanjuju vlažne sredine, uključujući i vodene ekosisteme. Iako se najčešće vezuju za kopnena staništa, brojne vrste su uspješno prilagođene trajno ili periodično potopljenim uslovima. Raznolikost vodenih briofita zavisi od lokalnih ekoloških faktora. Tako se vrste roda *Fontinalis* („vodena mahovina“) često nalaze na dnu čistih potoka i rijeka, gdje formiraju duge, uspravne listove koji se mogu uzdizati prema površini (slika 6.2.4.3). Vrste roda *Amblystegium* rastu na kamenju ili uz izvore, dok *Sphagnum* obuhvata vrste tipične za močvarna područja i sposobne za zadržavanje znatnih

količina vode, čime utiču na vlažnost staništa. Adaptacije mahovina ogledaju se u njihovoj morfologiji i fiziologiji: tanke, fleksibilne lisne strukture olakšavaju apsorpciju vode i hranjivih materija, a razmnožavanje može biti vegetativno ili spolno, putem spora. Ekološki značaj ovih biljaka ogleda se u njihovoj ulozi u pročišćavanju vode, stabilizaciji obala i sedimenata te stvaranju mikrostanista za mnoge mikroorganizme i male vodene životinje, čime doprinose ukupnom biodiverzitetu.

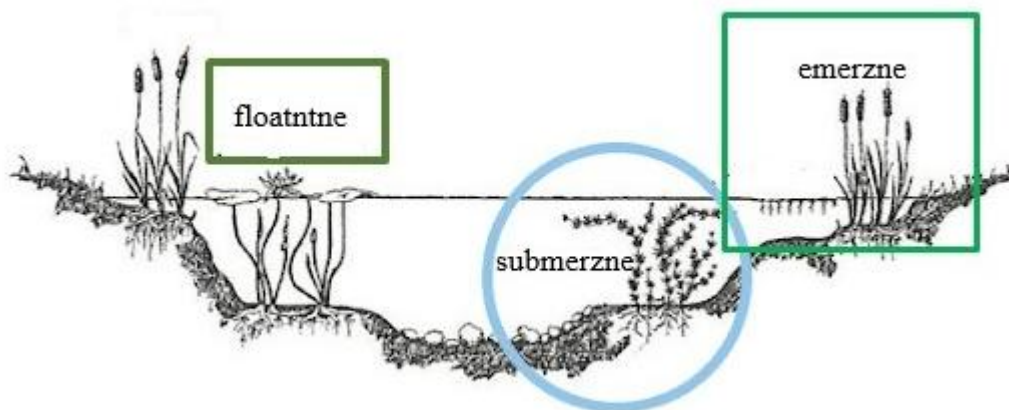


Slika 6.2.4.3. Prikaz nekih vrsta mahovina u vodenim ekosistemima

Kormofite ili više biljke, se često klasifikuju prema svojim adaptacijama na život u različitim vodenim uslovima i ekološkim prilagođenostima na uvjete vodenog staništa, razlikuju se:

- hidrofitne – biljke koje su potpuno prilagođene životu u vodi. Rastu u potpunosti potopljene i pružaju stanište mnogim vodenim organizmima (npr. *Elodea*, *Potamogeton*).
- higrofitne – biljke koje mogu rasti u vlažnim uslovima, ali i na suhim mjestima. Često se nalaze u močvarama ili uz obale vodenih tijela (npr. *Juncus*, *Carex*).
- kserofite – biljke prilagođene suhim uslovima, ali mogu podnositi povremeno vlaženje, ali ne rastu direktno u vodi.

Druga podjela, prema načinu rasta (shema 6.2.4.1), obuhvata submerzne (potopljene) biljke, koje rastu potpuno pod vodom (npr. *Myriophyllum*, *Ceratophyllum*). Za razliku od njih emerzne (iznadvodne) biljke, čiji su korijeni i donji dijelovi pod vodom, dok se ostali dijelovi uzdižu iznad površine (npr. *Typha*, *Scirpus*), dok biljke, koje slobodno plivaju na površini vode (npr. *Salvinia*, *Azolla*, *Nuphar*) označavaju se kao flotantne (plutajuće). Ove biljke su često povezane s močvarnim ekosistemima i čine važan dio vegetacije prijelaznih zona između kopna i vode.



Shema 6.2.4.1. Prikaz vrsta makrofita u akvatičnom ekosistemu prema načinu rasta

Sastav makrofita u slatkim i slanim vodama razlikuje se uslijed izrazito različitih fizičko-hemijskih karakteristika ovih ekosistema, pri čemu stabilno visok salinitet velikih morskih hidrosistema ima presudnu ulogu u oblikovanju flore (tabela 6.2.4.4).

Tabela 6.2.4.4. Prikaz razlika u sastavu makrofita slanih i slatkovodnih ekosistema

Osobina	Slatkovodni ekosistemi	Morski ekosistemi
Vrste makrofita	Pretežno prave vaskularne biljke i mahovine	Dominantno alge (makroalge), rijetko prave vaskularne biljke
Primarne grupe	- Hidrofite (npr. <i>Potamogeton</i> , <i>Myriophyllum</i> , <i>Ceratophyllum</i>) - Mahovine (<i>Fontinalis</i>)	- Smeđe alge (<i>Fucus</i> , <i>Laminaria</i>) - Crvene alge (<i>Corallina</i> , <i>Gracilaria</i>) Zelene alge (<i>Ulva</i> , <i>Codium</i>)
Prave morske cvjetnice	Nisu prisutne	Prisutne u plitkom moru (npr. <i>Posidonia oceanica</i> , <i>Zostera marina</i>)
Funkcija u ekosistemu	-Stanište i sklonište -Proizvođači kiseonika - Filtracija vode	- Stvaraju podmorske livade - Učestvuju u taloženju sedimenta - Stabilizacija morskog dna
Prilagodbe na sredinu	Tolerancija na varijabilan pH i količinu nutrijenata; Slaba otpornost na konc. soli	- Osmoregulacija - Mehanička otpornost na valove i salinitet
Staništa	Jezera, rijeke, potoci, močvare	Obalni plicaci, lagune, estuariji, koralni grebeni
Dominantne boje	Zelena zbog prisustva hlorofila	Raznolike: smeđa (fukoksantin), crvena (fikobilini), zelena (hlorofil)
Biodiverzitet	Relativno manji, ali lokalno značajan	Veća raznolikost, naročito u tropima i u sastavu algi

Zoobentos obuhvata životinje koje nastanjuju dno vodenih ekosistema, uključujući rijeke, jezera, močvare i mora. Zbog velike raznovrsnosti staništa, ove zajednice pokazuju širok spektar morfoloških i fizioloških adaptacija koje omogućavaju preživljavanje u promjenjivim uslovima pri dnu. Zoobentos prvenstveno čine beskičmenjaci, s posebno visokim diverzitetom u slatkovodnim ekosistemima, gdje dominiraju preimaginalni stadiji insekata. Razlike u taksonomskom sastavu između slatkih i slanih voda značajne su (tabela 6.2.4.5). Slatkovodni bentos karakterizira izrazita zastupljenost larvi i lutki insekata, koje su ujedno pouzdani indikatori kvaliteta vode. Morski bentos pokazuje mnogo veću taksonomsku raznolikost,

uključujući skupine kao što su bodljokošci, mnogočetaši i tunikate, koje u slatkim vodama uopće nisu prisutne. Rakovi i mekušci javljaju se u oba tipa ekosistema, ali se vrste i njihova morfologija značajno razlikuju. Oligohate i nematode također su zajedničke slatkoj i slanoj vodi, iako posjeduju specifične adaptacije u zavisnosti od saliniteta i karakteristika sedimenta.

Tabele 6.2.4.5. Prikaz razlika u sastavu bentoskih beskičmenjaka: slatkovodni i morski ekosistemi

Skupina	Slatkovodni ekosistemi	Morski ekosistemi
Prozoa (Rhizaria)	Foraminifera – jako rijetko	Foraminifera
Sunderi (Porifera)	Slatkovodni sunderi (Spongillidae)	Mnogobrojne morske vrste (Demospongiae, <i>Calcarea</i>)
Cnidaria	Hydrozoa (<i>Hydra</i> isl.)	Anthozoa (koralji), Hydrozoa
Turbellaria	Turbelarije u mulju, među biljem i na kamenju	Turbelarije (<i>Planocera</i> , <i>Leptoplana</i> , <i>Thysanozoon</i> , <i>Stylochus</i>)
Obli maločetaši (Nematoda)	Često prisutni u sedimentima	Visoko raznoliki u morskom bentosu
Gastrotrihe (Gastrotricha)	Sitni organizmi koji nastanjuju sediment i površinu vodenih biljaka.	Prisutne u međuobalnim pojasima
Annelida	Oligohate (<i>Tubifex</i> , <i>Lumbriculus</i>) Pijavice (Hirudinea)	Polihate (<i>Nereis</i> , <i>Arenicola</i>) – dominiraju
Mekušci (Mollusca)	Puževi (Lymnaeidae, Planorbidae, Hydrobiidae, viviparidae) Školjke (Sphaeriidae, Unionidae)	Raznolike vrste Polyplacophora, Aplacophora, Scaphopoda, Bivalvia, Gastropoda, Monoplacophora
Rakovi (Crustacea)	Amphipoda, Isopoda, Cladocera, Decapoda (vrste vezane za slatke vode)	Veći broj vrsta, uključujući Decapoda (škampi, jastozi, morski rakovi), Amphipoda, Isopoda. Cirripedia itd.
Insekti (Insecta) Preimaginalni stadiji i stadij imaga	Veoma brojni: Ephemeroptera, Plecoptera, Odonata, Trichoptera, Diptera, Megaloptera, Heteroptera, Coleoptera	Veoma rijetki – tek poneke larve u priobalnim lagunama
Paučnjaci (Arachnida)	Vodene grinje (Hydracarina)	Rijetki, eventualno u sedimentima
Bodljokošci (Echinodermata)	Nisu prisutni	Samo morski: morske zvijezde, ježevi, krastavci, krinovi, zvijezdače
Plastari (Tunicata)	Nisu prisutni	Isključivo morski organizmi – askidije, sesilni organizmi
Mahovnjaci (Bryozoa)	Rijetki	Česti na tvrdim podlogama – kamenju, školjkama, koralima

Zoobentos prema veličini organizama se dijeli se na: makrobentos (>0,5 mm), mejobentos (0.2–0,5 mm), i mikrobentos (<0.2 mm). Hrane se filtracijom, detritusom, sedimentom, biljkama ili su predatori. Imaju važnu ulogu u bioturbaciji, razgradnji materije, hranidbenim mrežama i bioindikaciji kvalitete vode. Adaptacije životinja bentosa podrazumjevaju morfološke, fiziološke, ekološke (tabela 6.2.4.6.) prilagodbe.

Tabela 6.2.4.6. Adaptacije životinja zoobentosa

adaptacija	opis
Morfološke /strukturne	Mnogi bentoski organizmi imaju spljošten (dorzoventralno ili lateralno) ili cilindričan oblik, što im omogućava efikasno kretanje u tjesnim prostorima između čestica sedimenta ili ispod kamenja. <i>Npr.</i> : Pijavice, maločetinaši i larve dvokrilaca (Diptera) imaju izduženo i savitljivo tijelo. Neki kao sunderi (<i>Spongia</i>) su sesilni sa perforiranim porama po tijelu što im omogućava usvajanje vode i nesmetan protok. Ephemeroptera i Plecoptera imaju spljošteno tijelo i noge prilagođene za prijanjanje. Puževi i školjke posjeduju čvrst oklop za zaštitu i pritisak iznad njih. Rakovi (Amphipoda, Isopoda, Decapoda) imaju segmentirano tijelo sa nogama za hodanje ili kopanje. Morske zvijezde i trpovi imaju radijalnu simetriju, što im olakšava kontakt s podlogom. Prilagođeni udovi i strukture; bentoski beskralješnjaci često imaju noge, pipke ili stopala za kretanje, zakopavanje ili pričvršćivanje: školjke koriste stopalo za ukopavanje u sediment, rakovi imaju kliješta i noge za hodanje, larve insekata razvijaju kukuljice i kućice za prijanjanje.
Fiziološke	Osmoregulacija: mnoge vrste su razvile sposobnosti za regulaciju saliniteta ili osmolarnosti, što je posebno važno u slanim ili brakoradnim staništima; Respiratorne adaptacije: različite vrste imaju specijalizovane strukture za disanje, kao što su škrge kod larava insekata ili šupljine kod nekih mekušaca; Sposobnost reprodukcije: mnoge vrste se razmnožavaju u velikim brojem mladih kako bi osigurale opstanak, često koristeći strategije poput brzozrelih jaja ili larvi koje se razvijaju u planktonu
ekološke	Stanišne prilagodbe: bentoske životinje su često prilagođene specifičnim uslovima svog staništa, kao što su dubina vode, protok, temperatura i prisustvo hranljivih materija. Ishrana: razvijene su različite strategije ishrane, uključujući filtraciju (npr. školjke), detritivorstvo (npr. maločetinaši) i predatori (npr. Odonate).
etološke	Kopanje i zaklanjanje: mnoge vrste (poput nekih rakova i crva) se zakopavaju u mulj ili podlogu kako bi se zaštitile od predatora i ekstremnih uslova. Noćna aktivnost: neke vrste su aktivnije noću kako bi smanjile rizik od predatora i povećale efikasnost u traženju hrane.

Životinje bentosa su izuzetno raznovrsne i razvile su širok spektar adaptacija koje im omogućavaju da prežive u specifičnim vodenim ekosistemima. Njihova raznolikost i prilagodljivost čine ih važnim dijelom ekološke ravnoteže i biodiverziteta u vodenim sredinama.

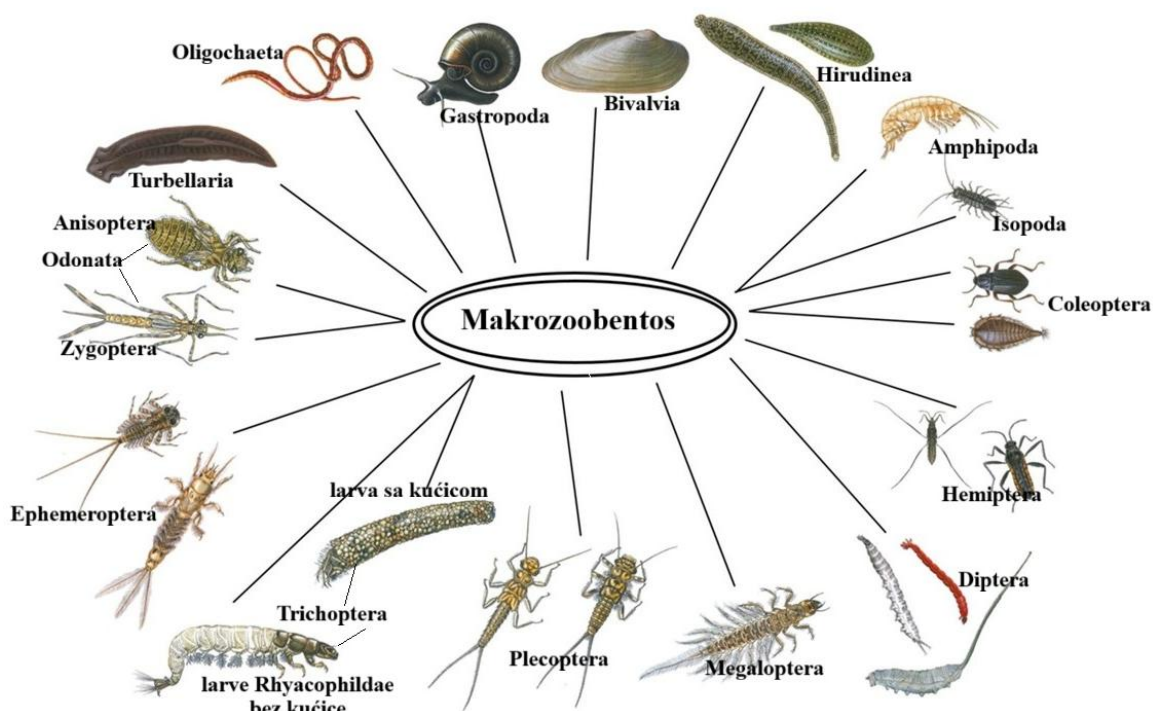
Ove adaptacije su ključne za njihovu ulogu u ekosistemu, uključujući pročišćavanje vode, reciklažu hranljivih materija i održavanje biološke raznolikosti. Zoobentos obuhvata raznolike organizme koji žive na dnu vodenih ekosistema.

Ova raznolikost igra ključnu ulogu u ekološkim funkcijama i stabilnosti vodenih staništa (tabela 6.2.4.7).

Tabela 6.2.4.7. Sastav, adaptacije i ekološke uloge bentoskih beskičmenjaka u slatkovodnim ekosistemima

Grupa	Morfološko-fiziološke adaptacije	Ekološka uloga
Spongia (Porifera)	Sesilni filtratori, skelet od spikula ili spongina	Filtracija vode, mikrohabitat
Hydrozoa (Cnidaria)	Radijalna simetrija, žarne ćelije, kolonijalni oblici	Predatori zooplanktona
Turbellaria (Platyhelminthes)	Spljošteno tijelo, regeneracija	Predatori i detritivori
Gastropoda (Mollusca)	Radula, škrge ili plućni zid, ljuštura	Primarni konzumenti perifitona
Bivalvia (Mollusca)	Dvije ljušture, filtracija sifonima, nemaju radulu i preferiraju sitni sediment	Filtratori, bioindikatori
Oligochaeta (Annelida)	Segmentirano tijelo, neke vrste otporne na hipoksiju	Bioturbacija, razgradnja organske tvari
Hirudinea (Annelida)	Pijavni diskovi, hematofagija	Regulacija populacija riba i beskralježnjaka
Arachnida	Voskom obloženo tijelo, zračni mjehurići	Predatori ili paraziti
Amphipoda (Crustacea)	Bočno spljošteno tijelo, brzo kretanje	Međupredatori, razlagači
Isopoda (Crustacea)	Dorzoventralno spljošteno tijelo, noćni način života	Detritivori, algofagi
Decapoda (Crustacea)	Egzoskelet, hvataljke, škrge	Svaštojedi, ekološki inženjeri
INSECTA		
Ephemeroptera	Preimaginalni stadiji akvatični, razvijene škrge; adulti u zraku dišu trahejama; na kraju tijela dva cerka i kaudalni filament (osim kod vrsta roda <i>Epeorus</i> i <i>Acentrella</i>)	Indikatori čiste vode, hrana ribama
Plecoptera	Preimaginalni stadiji akvatični, razvijene škrge; adulti u zraku dišu trahejama; na kraju tijela dva cerka	Indikatori oligotrofnih tokova
Odonata	Preimaginalni stadiji akvatični, razvijene škrge; adulti u zraku dišu trahejama; donja usna transformisana u masku	Predatori vodenih i kopnenih insekata
Trichoptera	Preimaginalni stadiji akvatični, razvijene škrge; adulti u zraku dišu trahejama; larve grade kućicu, a lutke su u pupariju, veoma raznovrsna skupina	Strugači, filtratori, predatori
Coleoptera	Vodootporna kutikula, zračni mjehurići	Svaštojedi, algofagi, predatori
Diptera	Preimaginalni stadiji akvatični, razvijene škrge; adulti u zraku dišu trahejama; kao larva i lutka su u vodi, veliki diverzitet	, eurivalentni Razlagači, hrana ribama
Megaloptera	Preimaginalni stadiji akvatični, razvijene škrge; adulti u zraku dišu trahejama;	Aktivni predatori u bentosu

Posebno u oblasti aplikativne hidrobiologije kao i u monitoringu voda se ističe skupina makrozoobentosa (slika 6.2.4.4) slatkih voda, koji uključuje sve jedinice beskičmenjaka >0,5 mm.



Slika 6.2.4.4. Predstavnici invertebrata u zajednici makrozoobentosa slatkih voda (prilagođeno prema www.anglerunion-jena.de/projekt-flow.php)

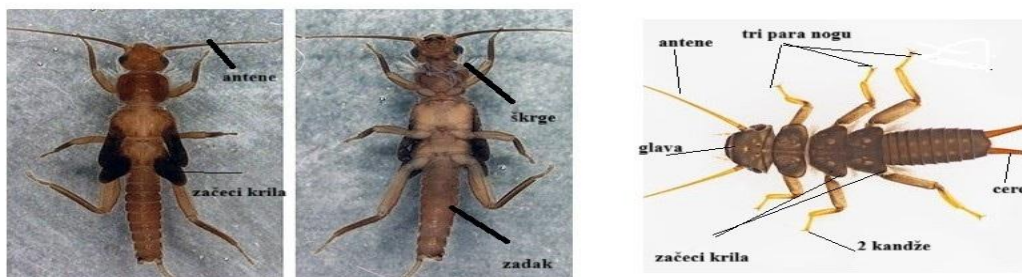
U okviru skupine makrozoobentosa posebno se ističu preimaginalni stadiji vodenih insekata iz redova Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera i Odonata. Ove grupe pokazuju niz morfoloških i fizioloških adaptacija koje im omogućavaju život u donjim slojevima vodenih ekosistema – na supstratu, među sedimentima, kamenjem ili vodenim biljem, gdje su izložene različitim mehaničkim, hemijskim i biotičkim faktorima.

Ephemeroptera (jednodnevnicе) karakterišu brojne prilagodbe na život u tekućim, oksigeniziranim vodama. Njihovo vitko, dorzoventralno spljošteno tijelo smanjuje otpor vode, a dugi cerci na kraju tijela (tri, rijetko dva kod rodova *Epeorus* i *Acentrella*) pomažu u održavanju ravnoteže u turbulentnom toku. Lateralno postavljene škrge na abdomenu (4–7 pari, perjaste ili pločaste) omogućavaju efikasnu difuziju kiseonika. Jedna kandža na tarsusu i sposobnost prijanjanja za podlogu dodatno ih štite od odnošenja strujom (slika 6.2.4.5). Ove larve su osjetljive na organsko zagađenje i naseljavaju vodu dobrog kvaliteta.



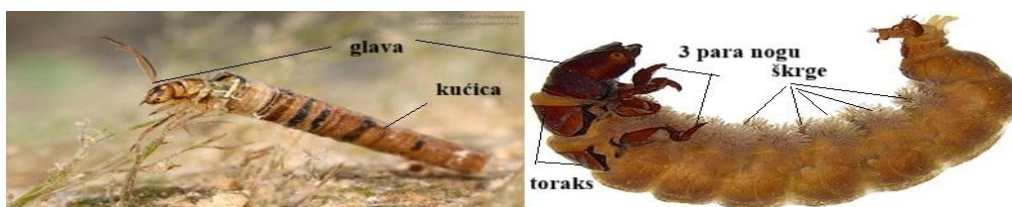
Slika 6.2.4.5. Građa i adaptacije larve Ephemeroptara (Jacobi i sur.2019)

Plecoptera (kamenjarke) su također tipični predstavnici bentosa brdskih i planinskih potoka. Njihova čvrsta kutikula i pljosnato tijelo omogućavaju život ispod kamenja, gdje se zaklanjaju od struje. Dva cerka na kraju tijela pomažu u orijentaciji, dok su škrge smještene u pazuhu torakalnih nogu (uglavnom) adaptacija koja omogućava disanje u brzim, hladnim vodama bogatim kiseonikom. Prisustvo dvije kandže na tarzusu povećava prljanje na podlogu. Vrlo su osjetljive na smanjeni sadržaj rastvorenog kiseonika i smatraju se (uglavnom) pokazateljima čistih, hladnih voda (6.2.4.6).



Slika 6.2.4.6. Građa i adaptacije larve/nimfe Plecoptera (Jacobu i sur., 2019)

Trichoptera (tulari) pokazuju izuzetnu ekološku plastičnost kroz različite adaptacije za život u bentosu. Larve većine vrsta grade zaštitne kućice od pijeska, grančica ili kamenčića, koje im pružaju mehaničku zaštitu i kamuflažu od predatora, ali i stabilnost na podlozi. Kod nekih familija, poput Hydropsychidae i Rhyacophilidae, larve ne grade kućice već razvijaju čvrstu muskulaturu i mrežaste strukture za hvatanje organske materije u toku vode. Lateralne abdominalne škrge omogućavaju respiraciju i u slabije oksigeniziranim uslovima (slika 6.2.4.7.). Zbog toga su tulari dobri indikatori ekološkog stanja, a pojedine vrste pokazuju i veću tolerantnost na umjereno zagađenje.



Slika 6.2.4.7. Građa i adaptacije larve Trichoptera (Jacobu i sur., 2019)

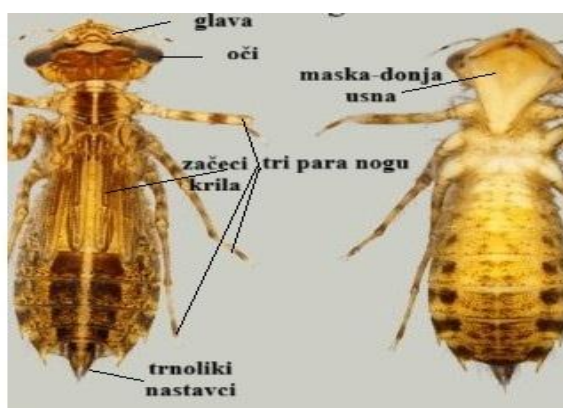
Red Diptera (dvokrilci) obuhvata izuzetno raznoliku skupinu insekata koji su holometabolni, što znači da prolaze kroz kompletnu metamorfozu: jaje → larva → kukuljica → odrasli oblik (imago). Ova metamorfoza omogućava jasnu ekološku i morfološku diferencijaciju između razvojnih stadija. Larve su najčešće crvolikog oblika, bez nogu i prilagođene različitim tipovima staništa, od kopnenih do vodenih i poluvodenih ekosistema (slika 6.2.4.8). Larve mogu biti saprofagne, predatorske, fitofagne ili parazitske. Velika ekološka raznolikost omogućava prisustvo u gotovo svim vodenim tipovima staništa: u trulim deponijama organske tvari, na površini, u sedimentu, pa čak i u anaerobnim uvjetima. Predstavnici familije Simuliidae se nalaze u brzo tekućim vodama, imaju ventralni analni disk na zadnjem kraju tijela, koji funkcionira kao organ za pričvršćivanje. Taj disk ima prstenasti vijenac hitinskih kukica pomoću kojih se larva čvrsto veže za podlogu, obično kamenje, biljne dijelove ili detritus u

brzim, kiseonikom bogatim vodama. Za razliku od svih ostalih familija dvokrilaca larve Blepharoceridae su isključivo reofilne, žive samo u jakim strujanjima, na površinama mokrog kamenja i stijena. Predstavnici familije Chironomidae postižu najveću brojnost u vodama, larve apodne sa različitom obojenošću tijela. Žive u mulju, detritusu ili među biljkama na dnu stajaćih ili sporotekućih voda. Neke vrste naseljavaju i jako zagađene eutroficirane vode, hrane se detritusom, algama i mikroorganizmima, a neki su i predatori.. Larve formiraju tanke cjevčice od mulja i detritusa koje služe kao sklonište.



Slika 6.2.4.8. Larve familija Blepharoceridae, Simuliidae i Chironomidae (red Diptera)

Odonata (vilini konjici), podijeljeni na *Zygoptera* i *Anisoptera*, razvili su specifične adaptacije koje omogućavaju aktivan predatorski život u bentosu. Larve *Zygoptera* imaju tri repna nastavka koji funkcioniraju kao spoljašnje škrge, dok *Anisoptera* koriste unutrašnje rektalne škrge, efikasan mehanizam ventilacije koji omogućava disanje i pokrete potiskom vode (reaktivni pokret). Njihova prepoznatljiva hvatačka maska (donja usna, labium) izdužuje se poput kliješta i služi za brzo hvatanje plijena (slika 6.2.4.9.). Ove larve nastanjuju stajaće i sporotekuće vode, priobalne zone i močvare, gdje predstavljaju predatore u bentoskim zajednicama, srednje tolerantne na organsko opterećenje, ali vrijedne pokazatelje tipa staništa i ekološke ravnoteže



Slika 6.2.4.9. Građa i adaptacije larve Odonata (Anisoptera)

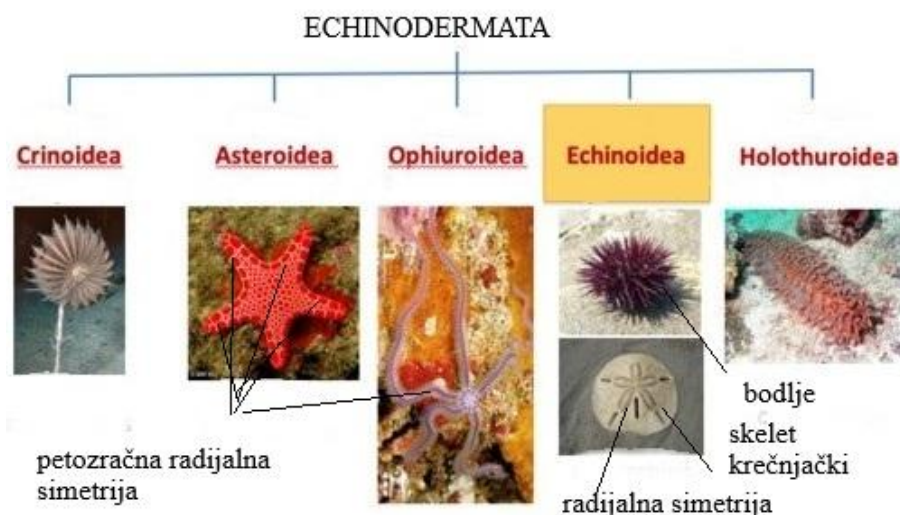
Bentoski beskičmenjaci mora i okeana razvili su niz adaptacija kako bi preživjeli u različitim uvjetima. Morfološke adaptacije prvenstveno podrazumjevaju da, mnogi imaju spljošteno tijelo ili čvrste hitinske/kalcijske oklopne strukture koje im omogućuju da se učvrste na podlozi i izdrže snažne morske struje i valove (npr. školjke, morski ježevi). Fiziološke adaptacije, kod vrsta koje žive u dubokim zonama prilagodile su se visokom pritisku, niskim temperaturama i

smanjenoj koncentraciji kiseonika. Bihevioralne adaptacije - mnogi se ukopavaju u sediment (npr. mnoge vrste poliheta i školjki) radi zaštite od predatora i valova, dok drugi grade cijevi ili kućice. Adaptacije ishrane se izražavaju da kao filtratori (npr. školjke, spužve) izdvajaju sitne organske čestice iz vode, dok detritofagi koriste organsku materiju nataloženu na dnu, a predatori i strvinari iskorištavaju životinjske resurse u bentosu. Sve te prilagodbe čine ih ključnim dijelom morskih i okeanskih ekosistema, jer učestvuju u kruženju materije i energije u bentosu (tabela 6.2.4.8.).

Tabela 6.2.4.8. Adaptacije, raznovrsnost i ekološke uloge bentoskih beskičmenjaka mora i okeana

Grupa	Adaptacije (morfološke, fiziološke i ekološke)	Ekološka uloga
Porifera	Sesilni filtratori; skelet od spikula/spongina; razvijen kanalski sistem	Filtracija vode, mikrohabitat
Cnidaria – korali i moruzgve	Žarne ćelije; simbioza sa zooxanthellama; kolonijalni rast	Formiranje grebena i staništa
Cnidaria – Hydrozoa	Kolonijalni polipi sa žarnim ćelijama	Predatori planktona
Platyhelminthes – Turbellaria	Spljošteno tijelo, kamuflaža, regeneracija	Predatori sitnih beskralježnjaka
Polychaeta	Parapodiji; različiti načini ishrane; prilagodba sedimentu	Bioturbacija sedimenta
Gastropoda	Radula; snažno prijanjanje za podlogu	Konzumenti algi i predatori
Bivalvia	Filtracija sifonima; zakopavanje u sediment	Filtratori, stabilizacija dna
Cephalopoda	Razvijena čula, kraci sa sisaljka, promjena boje	Aktivni predatori
Echinodermata (ježevi, zvijezde, krastavci)	Ambulakralni sistem; regeneracija; hranjenje algama ili sedimentom	Regulacija algi i reciklaža organske tvari
Crustacea – Decapoda	Egzoskelet, kliješta, hodanje i plivanje	Predatori, svejedi, čistači
Crustacea – Isopoda	Spljošteno tijelo; prilagodba dnu	Detritivori i paraziti
Bryozoa	Kolonijalni filtratori	Filtracija i mikrohabitat
Priapulida & Sipuncula	Cjevasto tijelo, zakopavanje u sediment	Bioturbacija, detritivori
Insecta (priobalne forme)	Larve prilagođene vodi	Lokalna razgradnja organske tvari

Echinodermata/bodljokožci su prilagođeni životu u bentosu mora i okeana nizom morfoloških i fizioloških osobina. Imaju radijalnu simetriju koja omogućava jednaku interakciju sa okolinom, čvrst kalcitni endoskelet i vodeni vaskularni sistem s cjevastim nožicama za kretanje, disanje i hvatanje hrane. Mnoge vrste su sporo pokretne ili sjedilačke, mogu se ukopavati u sediment, a posjeduju i sposobnost regeneracije izgubljenih dijelova tijela. Disanje se vrši difuzno preko papula (lat. *papulae* su tanke kožne izbočine kod morskih zvijezda Asteroidea koje funkcioniraju kao dermalne škrge) ili respiratornih stabala, što omogućava prilagodbu promjenjivim uslovima na morskom dnu (slika 6.2.4.9.).



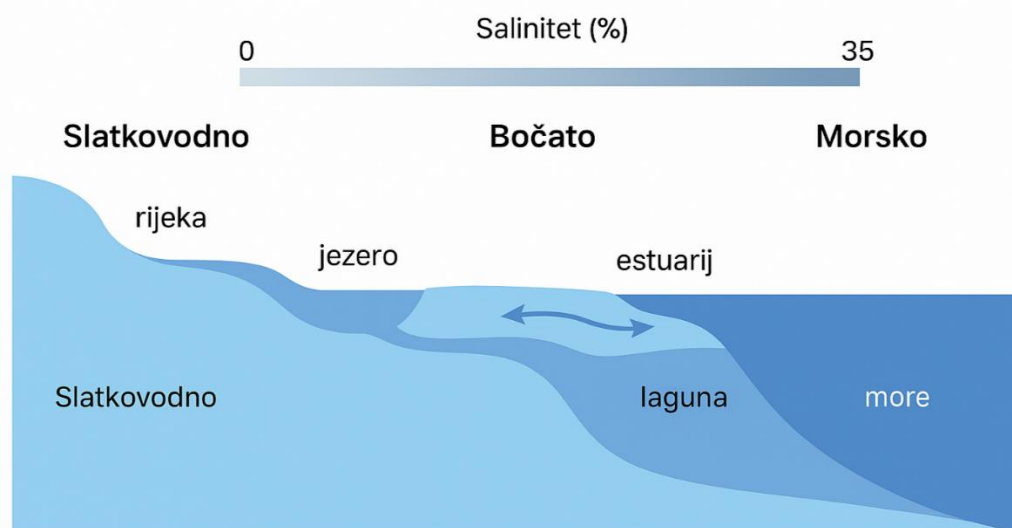
Slika 6.2.4.9. Raznovrsnost i adaptacije bodljokožaca (Echinodermata)

Hidrobionti predstavljaju rezultat dugotrajnog evolucijskog prilagođavanja životu u vodi, gdje su fizikalna i hemijska svojstva medija oblikovala njihovu građu, fiziologiju i životne strategije. U vodenoj sredini, stabilnost temperature, rastvorljivost gasova i optička svojstva stvaraju posebne uslove koji su omogućili razvoj velikog broja različitih oblika života od mikroorganizama do viših organizama složenih ekoloških odnosa. Adaptacije hidrobionata svjedoče o jedinstvenom spoju biološke forme i funkcije, gdje svaki organizam odražava ravnotežu između tjelesne građe i okolišnih faktora. Shvatanje tih prilagodbi ključno je za razumijevanje funkcionisanja vodenih ekosistema i njihove stabilnosti, ali ostaje u sferi naučnog istraživanja života u vodi, a ne njegove tehničke ili upravljačke primjene. Hidrobiologija, u svojoj suštini, istražuje zakone života u vodi, a ne potrebe čovjeka za njegovim korištenjem.

7. Akvatični ekosistemi hidrosfere

Akvatični ekosistemi predstavljaju funkcionalne cjeline života u vodi, koje obuhvataju sve međusobno povezane fizičke, hemijske i biološke procese u okviru hidrosfere. Hidrosfera obuhvata sve oblike vode na Zemlji, okeane, mora, jezera, rijeke, močvare, ledene pokrivače i podzemne vode. Predstavlja jedinstven, dinamičan sistem u kojem se voda neprekidno kreće između atmosfere, litosfere i biosfere, ostvarujući hidrosferni ciklus. Unutar hidrosfere, akvatični ekosistemi razlikuju se prema salinitetu, dubini, svjetlosnom režimu, temperaturi i strujanju vode, što određuje tipove organizama i način njihove prilagodbe na život u vodi. U osnovi se dijele na slatkovodne (kopnene), bočate (prijelazne) i morske (okeanske) sisteme. Svaka od ovih grupa obuhvata različite prostorne i funkcionalne cjeline: u slatkovodnim dominiraju lentički (stajajući) i lotički (tekući) ekosistemi, u bočatnim vodama tipični su estuariji, lagune i priobalna jezera. Morski sistemi obuhvataju priobalne, pelagičke i dubokomorske zone

s bogatom biocenotskom strukturom (slika 7.1). Bočate vode i estuariji imaju izuzetno ekološko značenje jer predstavljaju prijelaz između kopnenih i morskih ekosistema. U njima dolazi do stalnih promjena saliniteta i temperature, što zahtijeva posebne adaptacije organizama (eurihalni i euriotermni oblici). Estuariji su ujedno među najproduktivnijim područjima biosfere, bogati hranjivim materijama koje donose rijeke, te služe kao hranilišta, mrijestilišta i rastilišta brojnih morskih i slatkovodnih vrsta. Akvatični ekosistemi imaju presudnu ulogu u globalnim biogeohemijskim ciklusima, jer povezuju kopno i atmosferu putem kruženja vode, hranjivih materija i ugljika. U njima se ostvaruje složena mreža odnosa između hidrobionata i abiotskog medija, čime se održava stabilnost, produktivnost i ravnoteža biosfere. U okviru slanih ekosistema razlikuju se okeani i mora. Okean je najveća cjelina slanih voda na Zemlji, dok su mora manji, djelimično zatvoreni ili poluzatvoreni dijelovi okeana s karakterističnim hidrološkim i ekološkim osobinama. Zajedno čine prostran sistem slanih voda koji pokriva više od 97 % ukupne količine vode na Zemlji i ima ključnu ulogu u regulaciji klime, energetskim tokovima i održavanju globalne biosfere.



Slika 7.1. Kontinuitet akvatičnih ekosistema hidrosfere

7.1 Mora i okeani

Mora i okeani čine najveći dio hidrosfere i obuhvataju oko 71% površine Zemlje. Oni predstavljaju najveći ekosistem na planeti, koji se odlikuje ogromnim prostornim i dubinskim rasponom, raznovrsnim fizičko-hemijskim osobinama i bogatstvom života. Prosječni salinitet okeana iznosi 35 ‰ (3,5%), ali može znatno varirati zavisno od dotoka rijeka, padavina, isparavanja i formiranja leda. Slani vodeni ekosistemi obuhvataju i manja zatvorena ili poluzatvorena mora, lagune, estuarije i slana jezera. U njima salinitet može varirati od normalnog morskog do ekstremno visokog (hipersalinitet), što zahtijeva posebne adaptacije živih organizama. Organizmi tih staništa razvili su različite strategije osmoregulacije, od fiziološke tolerancije do ponašajnih prilagodbi. Mora i okeani nisu samo rezervoari života, već i ključni regulator globalnih biogeohemijskih ciklusa (ugljika, azota, fosfora). Oni su glavni proizvođač kiseonika na planeti i presudni faktor u klimatskim promjenama. Njihovo očuvanje

i održivo upravljanje postaju sve važniji zadaci u kontekstu povećanih pritisaka, zagađenja, klimatskog zagrijavanja, zakiseljevanja okeana i prekomjernog ribolova. Tihi okean je najveći (oko 168 miliona km²) i obuhvata trećinu ukupne površine Zemlje. Slijedi Atlantski okean sa oko 85 miliona km², a zatim Indijski okean sa približno 70 miliona km². Južni okean, koji okružuje Antarktik, zauzima oko 22 miliona km². Najmanji je Sjeverni ledeni okean sa oko 14 miliona km² (slika 7.1.1), ali i dalje ima presudnu ulogu u regulaciji klime i cirkulaciji vodenih masa.



Slika 7.1.1. Okeani na planeti Zemlji po veličini (NASA Earth Observatory – <https://earthobservatory.nasa.gov>)

Kako je naglašeno, mora su izdvojeni dijelovi okeana, dok dodatni ekosistemi poput laguna, estuara, slanih jezera, mangrova i koraljnih grebena daju posebnu raznolikost i bogatstvo. Po prostornom položaju mora mogu biti:

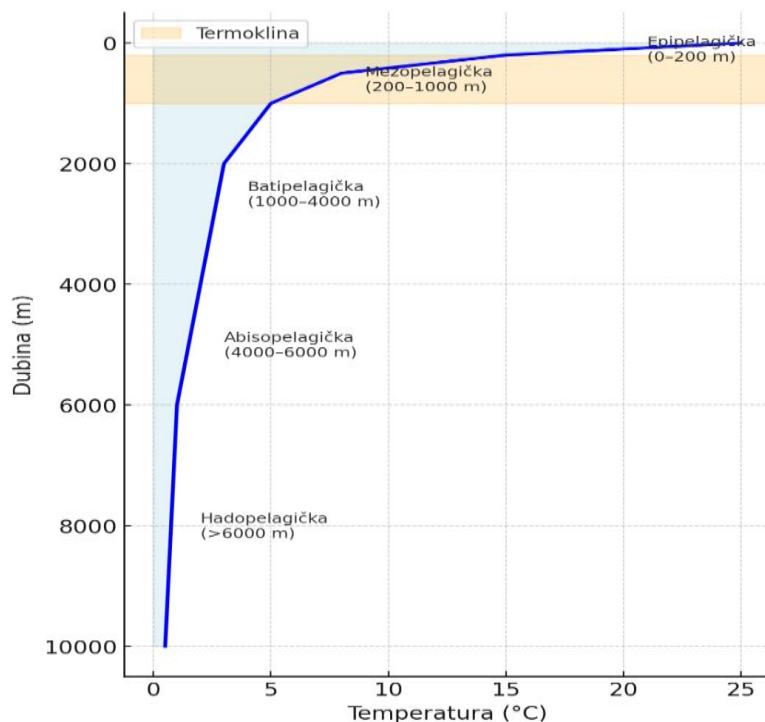
- a. unutrašnja (mediteranska) – gotovo zatvorena morem i povezana s okeanom uskim prolazima (npr. Sredozemno more);
- b. marginalna – uz rubove kontinenata, djelimično zatvorena otocima ili poluostrvima (npr. Jadransko more, Sjeverno more) i
- c. otvorena – prelazna područja između okeana i kopna (npr. Arabijsko more).

Voda okeana i mora ima posebna fizičko-hemijska svojstva koja snažno utiču na život u njima i na klimu kopna. Zbog velikog toplotnog kapaciteta, ona sporo akumulira, ali i sporo otpušta toplotu, čime ublažava temperaturne oscilacije i održava stabilniju klimu na područjima kopna. Još jedna važna osobina slanih voda je otpornost na potpuno smrzavanje. Zbog velike termalne mase i dubine, okeani i mora umjerenih oblasti nikada se ne lede u cijelosti. Morska voda počinje da se smrzava pri oko $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, pri čemu gustina tečne morske vode raste sve do tačke smrzavanja. Led ima manju gustinu od tečne morske vode, pa ostaje na površini, dok dublji slojevi ostaju tečni. Morska voda ima veliki kapacitet otapanja organskih i anorganskih spojeva. Prosječni salinitet iznosi oko 35 ‰ (3,5 g/l), a među jonima najvažniji su natrijum (Na^+) i magnezijum (Mg^{2+}) od kationa, te hlorid (Cl^-) i sulfat (SO_4^{2-}) od aniona. Otopljene soli snižavaju tačku leđišta na $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Morska voda je slabo alkalna, s pH vrijednostima između 7,5 i 8,4. Ona predstavlja hiperosmotsku sredinu jer ima veliki osmotski potencijal, što zahtijeva posebne fiziološke prilagodbe živih organizama. Gustina morske vode je oko 800 puta veća od gustine zraka, a hidrostatski pritisak raste za jednu atmosferu na svakih deset metara dubine.

Sunčeva energija brzo se apsorbira, čak 80% ukupnog zračenja gubi se već u prvih deset metara vodenog stupca. Infracrveno svjetlo apsorbira se već unutar jednog metra, dok plavo svjetlo prodire najdublje i u toplim morima može doseći do 1000 metara dubine. Međutim, fotosinteza je moguća samo do približno 200 metara, što ograničava zonu primarne proizvodnje. Dinamika vodenih masa, uključujući struje, valove, plimu i oseku, uslovljava je razvoj brojnih sesilnih organizama prilagođenih stalnom kretanju vode. Rastvoreni gasovi, posebno kiseonik i ugljen-dioksid, imaju veliku biološku važnost u vodenim ekosistemima. Njihova topljivost je veća u hladnoj vodi, pa se njihove koncentracije razlikuju s dubinom i temperaturom. Koncentracija rastvorenog kiseonika obično opada s dubinom do srednjih slojeva okeana, dok koncentracija ugljen-dioksida raste usljed razgradnje organske materije. Na dubinama oko 1000 m koncentracije kiseonika u otvorenim okeanima obično iznose približno 2–6 mg/L, a prema dnu se često blago povećavaju zbog dotoka hladnih dubinskih voda bogatih kiseonikom. Anaerobni uslovi javljaju se samo u posebnim područjima sa slabom cirkulacijom vode, ali nisu opće obilježje okeanskih dubina.

Toplotna svojstva vode imaju presudnu ulogu u formiranju temperaturnih karakteristika morskih ekosistema. Zbog velikog toplotnog kapaciteta, voda sporo akumulira i sporo otpušta toplotu, pa su temperature svjetskih mora daleko ujednačenije nego na kopnu. Okeani ublažavaju temperaturne varijacije susjednih kopnenih područja, djelujući kao regulator klime. Temperatura mora opada s dubinom, pa je većina vodenih masa u svjetskim okeanima hladna. Vertikalni temperaturni gradijent najizraženiji je u tropskim područjima, a u umjerenim klimatskim zonama posebno ljeti. Površinska temperatura u tropskim morima kreće se između 25 i 30 °C, dok na dubini od 150–200 m pada na oko 10 °C. U arktičkim područjima voda ostaje hladna gotovo tokom cijele godine, dok u umjerenim krajevima pokazuje veće sezonske oscilacije. Promjenjivi sloj (površinski sloj do 20–30 m) održava relativno stabilnu temperaturu zbog stalnog miješanja. U dubokom moru, temperatura je niska i prilično ujednačena. Posebno važan sloj je termoklina, u kojem dolazi do naglog pada temperature. U tropskim morima termoklina je stalna, u umjerenim područjima sezonska (najjača ljeti), dok u polarnim regijama gotovo izostaje, jer je vodeni stupac hladan od površine do dna. Oko 90% ukupne zapremine okeanske vode nalazi se ispod termokline, pri temperaturama od 2 do 4 °C (grafikon 7.1.1). Epipelagička zona (0–200 m), to je površinski sloj okeana, dobro osvijetljen koji omogućava fotosinteza, temperatura je najviša (20–25 °C, u tropima i više). Miješanje uzrokovano vjetrom i valovima održava relativno ujednačene uslove. Najveća biološka produktivnost (fitoplankton, zooplankton, ribe). Termoklina (200–1000 m) je prijelazna zona gdje temperatura naglo opada sa ~20 °C na ~5 °C. To je ključni vertikalni temperaturni gradijent u okeanu. Termoklina djeluje kao barijera između toplih površinskih i hladnih dubinskih voda ograničava miješanje hranjivih tvari. Njena debljina i intenzitet zavise od geografskog pojasa (najizraženija u tropima, slabija u polarnim morima). Mezopelagička zona (200–1000 m) se poklapa se s pojason termokline. Ovdje prodire vrlo malo svjetla nema fotosinteze, ali postoji tzv. “sumrak zona” gdje se javljaju organizmi s bioluminiscencijom. Temperatura pada na 5–10 °C. Batipelagička zona (1000–4000 m) je zona potpunog mraka, hladna voda (2–5 °C). Veliki pritisak, organizmi prilagođeni stalnoj tami (ribe s velikim očima ili bez očiju, dubokomorski beskičmenjaci). Abisopelagička zona (4000–6000 m) sa stalno niskom temperaturom (~2 °C). Vrlo malo života, uglavnom specijalizirani bentoski organizmi. Hadopelagička (hadal) zona (>6000 m), je najdublji

okeanski rovovi (Marijanski, Tonga) sa temperaturom blizu 0–1 °C, ekstremni pritisci, ali ipak postoje specifični mikroorganizmi i životinje.

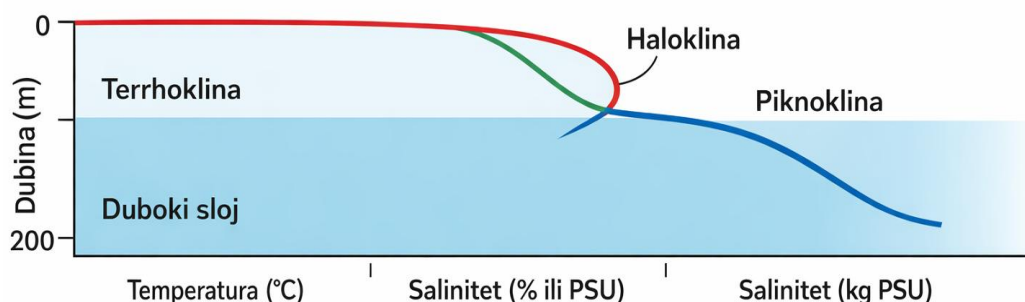


Grafikon 7.1.1. Vrijednosti temperature vode okeana na vertikalnom profile

Temperatura zajedno sa salinitetom određuje gustinu morske vode. Toplija voda je manje gusta i zadržava se na površini, dok hladnija voda tone. Tokom zime olujni vjetrovi homogeniziraju gornji sloj do nekoliko stotina metara dubine. U proljeće se površina zagrijava, povećava se stabilnost vodenog stupca, a hranjive materije iz dubljih slojeva izbijaju na površinu. To pogoduje intenzivnom rastu fitoplanktona i dovodi do proljetnog „cvjetanja mora“. Biološki značaj temperature ogleda se u činjenici da se morski organizmi moraju prilagoditi temperaturnim uslovima. Njihova raznolikost i brojnost mijenjaju se zavisno od dubine, godišnjeg doba i geografskog položaja. Na osnovu temperaturnih osobina (uslovljena klimatskim područjem na kojim se nalaze), svjetska mora se dijele u nekoliko velikih cjelina: a) arktička borealna (sjeverna umjereno hladna), b) sjeverna umjereno topla, c) tropska južna, d) umjereno topla antiborealna i e) antarktička (južna umjereno hladna).

Svjetlost ima glavni uticaj na distribuciju algi tj. organizama koji vrše fotosintezu. Svjetlost je uglavnom ograničena na gornjih 150–200 m ili fotičku regiju. Plavo svjetlo ima najdublje prodiranje u morsku vodu i omogućava fotosintezu organizma na najnižem nivou fotičke regije. Kod ovih algi su razvijeni mehanizmi pomoću kojih su u stanju sakupljati plavu svjetlost. U slanoj vodi mora i okeana uslijed vertikalne stratifikacije, nastale kao rezultat prodora svjetlosti (ograničenog) na oko 1000 m dubine javlja slojevima, piknoklina – sloj naglog porasta gustine mora u dubini oko 1000 m; haloklina – sloj naglog porasta saliniteta i termoklina – nagli pad temperature morske vode (shema 7.1.1).

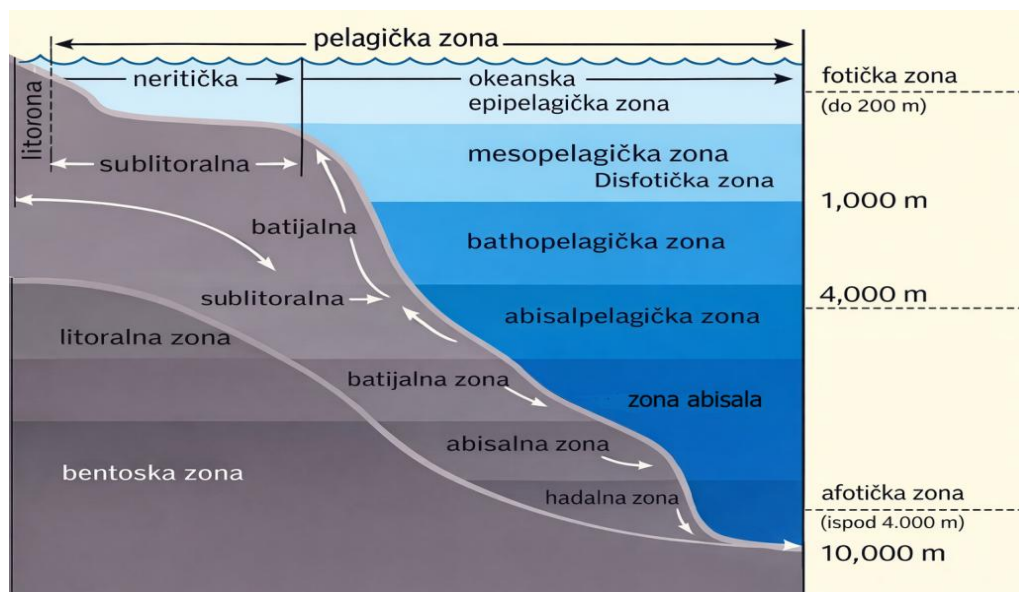
Oceani i mora



Shema 7.1.1. Raspored termokline, halokline i piknokline u morima i okenima

Zonacija mora i okena, prema svjetlosti je na površinsku ili photic (fotičku) zonu do 200 m dubine i aphotic (afotičku) do 6 000m kada nastupa zona potpunog mraka ili hadal. S obzirom na prodor svjetlosti i druge faktore u moru i okeanu je zastupljena vertikalna i horizontalna statifikacija (slika 7.1.2). Vertikalna podjela pelagičke zone vodenog stupca, obuhvata Epipelagička (0–200 m), to je fotička zona gdje je najveći intenzitet svjetlosti, fotosinteza moguća. Dominantni su fitoplankton, zooplankton, ribe, morski sisari. Mezopelagička (200–1000 m) zona je afotička (slabi tragovi svjetlosti, fotosinteza nije moguća) takozvana „sumrak zona“ sa bioluminiscentnim organizmima (ribe, lignje, meduze), početak termokline (nagli pad temperature). Batipelagička (1000–4000 m) zona sa potpunim mrakom, temperatura niska (2–5 °C). Pritisak visok, organizmi su specijalizirani dubokomorski predatori i filtratori. Abisopelagička (4000–6000 m) zona ekstremno hladno (~2 °C), stalni pritisak, a život ograničen na bentos i pojedine pelagičke vrste. Dalje slijedi zona hadala (>6000 m), okeanski rovovi, potpuni mrak, pritisci ekstremni, organizmi koji se javljaju su ekstremofili, specijalizirani mikroorganizmi i životinje.

Bentičke zone (dno) čini neritsko područje (kontinentalni šelf, uključuje litoral (intertidalni i sublitoralni dio do ~200 m dubine), batijal, kontinentalna padina (200–2000 m), abisal (velika okeanska ravnica, 2000–6000 m) i hadal (duboki rovovi >6000 m). Bentoski organizmi (spužve, koral, puževi, polihete, školjke, rakovi, ribe) vezani su uz podlogu i imaju ključnu ulogu u reciklaži organske materije. Faktori koji određuju zonaciju mora i okena su svjetlost, temperature, salinitet, gustina, hidrostatski pritisak i hranjive materije.



Slika 7.1.2. Vertikalna i horizontalna zonacija mora i okeana (britannica.com, prilagođeno)

Slanost (salinitet) morske vode. Salinitet je količina anorganskih soli izražena u gramima koja je otopljena u 1 kg morske vode. Salinitet se izražava kao djelovi u hiljadu (ppt) ili u promilima (‰). Salinitet se u otvorenim oceanima kreće u rasponu između 33 i 37 ‰, dok lokalno može varirati i znatno više, kao posljedica ravnoteže između razrjeđivanja morske vode uslijed dotoka slatke vode putem rijeka, padavina i podmorskih izvora i koncentriranja soli zbog procesa evaporacije i formiranja leda. Vrijeme zadržavanja je prosječno vrijeme koje jedinica težine pojedine supstance provede u moru prije nego što se izgubi u sedimentu ili na kopnu. Kod mnogih elemenata u moru vrlo je dugo i mjeri se u milijunima godina, za razliku od vremena miješanja morske vode koje se mjeri u hiljadama godina. To omogućava dobru izmješanost elemenata u moru i homogeniziranost mora s obzirom na relativne odnose pojedinih elemenata. To je razlog što su relativni odnosi pojedinih elemenata u moru (pogotovo onih s dužim vremenom zadržavanja) gotovo konstantni bez obzira na varijacije saliniteta od mjesta do mjesta. Iz toga proizlazi da je za određivanje saliniteta dovoljno odrediti količinu jednog elementa u moru i iz nje izračunati ukupni salinitet. Vrijeme zadržavanja elemenata u moru hlorinitet – salinitet. Budući da je omjer hlora s drugim elementima u moru konstantan, te da je precizno određivanje hlora metodološki vrlo jednostavno, upravo je određivanje hlora prihvaćeno kao metoda za određivanje ukupnog saliniteta. Gasovi iz atmosfere otapaju se u površinskom sloju mora. Gasovi se u moru bolje otapaju kod niže temperature i nižeg saliniteta. Boljem otapanju otopljenih gasova doprinosi i vjetar koji podiže valove i omogućava bolje miješanje vazduha i vode. S izuzetkom kiseonika i ugljen dioksida, more je u svim dubinama zasićeno s većinom atmosferskih otopljenih gasova. Dva su glavna izvora kiseonika u oceanima, difuzija iz vazduha i fotosinteza u ocenima i morima. Oba su procesa ograničena na površinske slojeve pa su oni najbogatiji kiseonikom. Koncentracija kiseonika opada s dubinom do sloja minimalnog kiseonika koji se nalazi na dubinama između 300 i 1000 m. U toj se dubini nalazi sloj nagle promjene gustine morske vode (piknoklina) koji daje veliku stabilnost vodenom stupcu i sprječava vertikalno miješanje vode. U tom se sloju nakupljaju

organske čestice koje su izložene bakterijskoj razgradnji pri čemu se troši kiseonik. Ispod sloja minimalnog kiseonika biološke potrebe za kiseonikom opadaju, pa se koncentracija kiseonika povećava s dubinom. Postojanje kiseonika u najvećim dubinama rezultat je tonjenja hladne kiseonikom obogaćene vode iz polarnih područja koja se spušta prema nižim geografskim širinama. Glavni izvori ugljen dioksida (CO_2) u oceanima su difuzija iz vazduha, te procesi respiracije i razgradnje organske materije. Primarna proizvodnja koja troši CO_2 smanjuje njegov parcijalni pritisak u površinskom sloju i pospješuje difuziju CO_2 iz vazduha u vodu (fenomen poznat kao biološka pumpa). Visoke geografske širine karakterizira hladna voda (topljivost CO_2 je dva puta veća na $0\text{ }^\circ\text{C}$ nego na $20\text{ }^\circ\text{C}$), koja zbog velike gustine brzo ponire i tako uklanja CO_2 iz površinskih slojeva što pospješuje difuziju zbog uspostave gradijenta. Kada se CO_2 otopi u vodi on formira ugljičnu kiselinu: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$ Ugljična kiselina vrlo lako disocira u bikarbonatne i karbonatne ione: $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$.

Ovaj proces disocijacije stvara vrlo efikasan puferski sistem koji održava pH vrijednost morske vode vrlo stabilnom (pH oko 8). pH u moru je blago alkalni (bazan) -oko 8, pa u moru dominiraju bikarbonati (HCO_3^-) Puferski sistem mora: pH je mjera za koncentraciju vodikovih iona (H^+), što znači da koncentracija H^+ u moru određuje njegovu kiselost. Karbonatni i bikarbonatni ioni lako otpuštaju i prihvataju vodikove ione u morskoj sredini, što morsku vodu čini otpornom na nagle promjene pH (osobine pufera): Voda prekisela: $\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow \text{HCO}_3^-$. Voda prealkalna: $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ Koncentracije otopljenog kiseonika i ugljen dioksida u moru prvenstveno su kontrolirane biološkim procesima. Gustina morske vode određena je u prvom redu temperaturom i salinitetom na način da postaje gušća što je temperatura niža i salinitet viši. Zbog otopljenih soli morska je voda nešto gušća od destilirane vode (gustina morske vode se uglavnom kreće u rasponu od 1.02 do 1.07 g cm^{-3}). Morska voda je oko 800 puta gušća od vazduha što je uz činjenicu da je morska voda bogata hranjivim materijama jedan od razloga razvitka planktonskog načina života. Gustina morske vode je također omogućila i razvitak najtežih organizama koji su ikada živjeli na Zemlji (plavi kit je nekoliko puta teži od najtežih dinosaura).

Morska doba Morska doba (mijene) su rezultat gravitacijskog uticaja Mjeseca i Sunca, usklađenog s uticajem rotacije Zemlje i oblikom morskog bazena. Plima nastaje na strani okrenutoj Mjesecu zbog njegovog gravitacijskog djelovanja, te na strani suprotnoj od Mjeseca gdje je gravitacija minimalna pa je nadjačava centrifugalna sila koja je rezultat rotacije Zemlje. Plimna se gibanja mogu mjeriti bilo gdje na oceanu, ali su ona osobito uočljiva na obali gdje se manifestiraju kroz plimne struje i vertikalne promjene nivoa mora. Mjesec prođe preko bilo koje tačke na površini Zemlje svakih 24 h i 50 min (lunarni dan), pa bi idealno svugdje trebale biti dvije plime i dvije oseke dnevno. Budući da se prividna pozicija Mjeseca u odnosu na Zemlju mijenja između 28.5° sjeverne do 28.5° južne geografske širine, relativna visina plime i oseke varira geografski u ovisnosti o vektoru gravitacijske sile. Tipovi morskih doba uključuju dnevni (jedna plima i jedna oseka dnevno), poludnevni (dvije plime i dvije oseke dnevno) i miješani tip (po jedna velika i mala plima i oseka dnevno). Kada Mjesec i Sunce djeluju po istom pravcu (razdoblje punog i mladog mjeseca) rezultat su velike plime i oseke. Kada Mjesec i Sunce djeluju pod pravim uglom (razdoblje $\frac{1}{4}$ i $\frac{3}{4}$ mjeseca) rezultat su male plime i oseke.

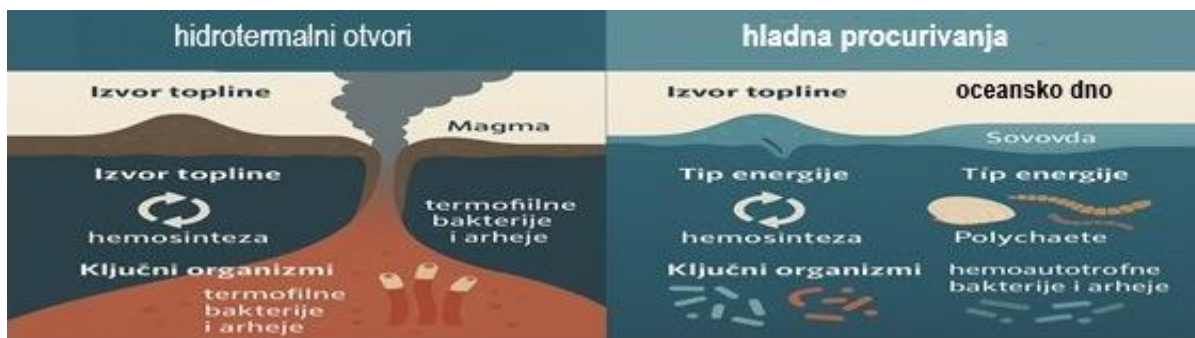
Klasifikacija na temelju batimetrije, ukazuje da porastom dubine bitno se mijenjaju tri parametra temperatura, svjetlost i pritisak. Nivo svjetla može poslužiti kao parametar za klasifikaciju pojedinih zona u moru (slika 7.1.2), fotička (trofogeno) zona, eufotička ili osvjetljena zona (do 200 m), disfotička (oligofotička) ili sumračna zona (od 200 do 1000-1500 m) i afotička (trofolitička) zona.

Horizontalno se izdvajaju zone: neritička i oceanska provincija. Ove zone obuhvaćaju dijelove vodene mase i morskog dna koje te vodene mase prekrivaju (shema 7.1.2). Neritička provincija sačinjava skup epikontinentalnih mora (mora koja prekrivaju kontinentalnu podinu ili šelf); obuhvaća 7% morske površine. Oceanska provincija predstavlja preostalo more koja prekrivaju morska dna koja se protežu ispod kontinentalne podine; obuhvaća 93% morske površine.

Životne oblasti u moru predstavljene su sa pelagijalom i bentalom (morskim dnom). Pelagičko područje obuhvaća slobodnu vodu (vodeni stupac) ili pučinu. Organizmi koji žive u pelagijalu nazivaju se pelagički organizmi. Vertikalno se izdvajaju zone: epipelegijala, mesopelegijala, batipelegijala i abisipelegijala. Bentičko područje, obuhvaća morsko dno. Svi organizmi koji žive na morskom dnu ili su o njemu ovisni nazivaju se bentos. Prema padu sedimenta razlikuju se zone neritičkog područja litoral i sublitoral, koji obuhvata područje do izraženog prodora svjetlosti, do 1000 m je zona batijala sa smanjenim prodorom svjetlosti i manjom raznovrsnosti organizama, od 1000 do 4000 m je zona sumraka ili abisala, zatim slijedi poslije 6000 m zona potpunog mraka ili hadala. Posebne zone su karakteristični za područja Tihog okeana poznati kao hidrotermalni otvori (slika 7.1.3) koji su s toplom vodom javljaju se na morskom dnu. Oni neprestano izbijaju vruću vodu bogatu mineralima koja podržava raznoliku zajednicu organizama. Iako većina dubokog mora je slabo naseljeno, odzračno mjesto vrvi širokim spektrom života, uključujući bakterije. Hidrotermalni otvori su otkriveni 1977. u Tihom okeanu i od tada su pronađeni u Atlantiku, Indijskom i Arktičkom okeanu. Oni se javljaju se na dubinama od oko 2.100 m u područjima morskog dna koje širi duž sistema Srednjeg okeanskog grebena - podvodni planinski lanac koji se javlja oko globusa. Oni nastali kada su se formirale ogromne ploče Zemljine kore koje su se razdvojile, uzrokujući duboke pukotine na dnu okeana. Morska voda prodire u ove otvore i zagrijava se rastaljenom stijenom ili magmom, ispod kore. Kad vrela izviru u ocean, njihova temperatura može biti toliko visoka do 360 ° C, ali voda ne ključa jer je pod tolikim pritiskom ogromne težine okeana iznad. Hidrotermalni otvori podržavaju rast mnogih organizama koji žive u potpunom mraku, uključujući i mnoge termofilne bakterija i Archae koji rastu na temperaturama do 112 ° C.

Hladna procurivanja (hladni izvori ili hladni otvori) su područja na dnu okeana gdje iz sedimenta izlaze metan, sumporovodik i druge tečnosti bogate ugljikovodicima (slika 7.1.3). Od hidrotermalnih otvora razlikuju se po temperaturi, koja je jednaka temperaturi okolne morske vode. Hemolitoautotrofne arheje i bakterije koje oksidiraju sulfide i metan predstavljaju glavni izvor energije i osnovu rasta drugih organizama. Jedinstvena biološka zajednica koja postoji u mraku se razvija upotrebom hemosintetske proizvodnje hemijske energije. Viši organizmi, naime školjke i Polychaeta, koji sadrže ove bakterije, koriste ovu energiju kako bi obezbjedili vlastite životne procese i to u zamjenu pružaju i sigurnost i pouzdan izvor hrane za bakterija.. Vjeruje se da je *Lamellibrachia luymesii* najdugovječniji nekolonijalni beskičmenjak poznat, sa minimalni životnim vijekom između 170 i 250 godina. Hladni otvori prvi put su

otkriveni 1984. godine u Meksičkom zaljevu na dubini od 3.200 m. Od tada, procjedi su otkriveni u drugim dijelovima svijeta. Pronađena je najdublja poznata zajednica u japanskom rovu na dubini od 7.326 m.



Slika 7.1.3. Prikaz hidrotermalnih izvora i hladnih procurivanja (NOAA Ocean Facts, prilagođeno)

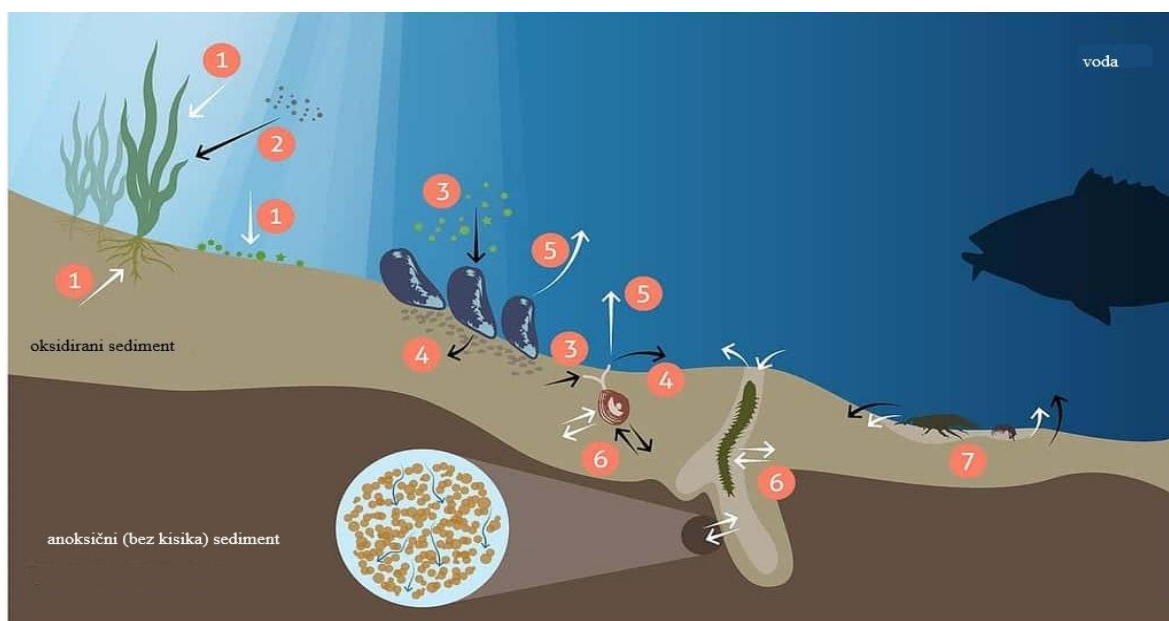
Ekološki značaj je prvenstveno u sekvestraciji ugljika, proces u kojem se ugljik (obično u obliku ugljik-dioksida ili metana) zadržava i pohranjuje u tlu, sedimentima, u oceanima. Time se sprječava njegovo oslobađanje u atmosferu i smanjuje efekat stakleničkih gasova. Hladna procurivanja su važna mjesta gdje se odvija oksidacija metana. Time doprinose smanjenju oslobađanja ovog snažnog stakleničkog gasa u atmosferu. Podržavaju specijalizovane zajednice koje ne postoje nigdje drugo, što ih čini važnim za proučavanje adaptacija na ekstremne uslove. Geološki procesi su često su povezana s nastankom metan-hidrata (ledenih struktura koje sadrže metan), što ima i energetski potencijal ali i rizike za klimatske promjene.

7.1.1. Uslovi i život na morskom sedimentu

Određeni su djelovanjem abiotičkih i biotičkih faktora, a uobičajeno se razlikuju pjeskoviti, muljeviti i šljunkoviti odnosno stjenoviti sedimenti.

Pjeskoviti sediment - ekološke odlike počinju sa razvijenom vegetacijom, ako nema stalnog gibanja pijeska, razvijaju se morske cvjetnice (*Posidonia*, *Zostera*) koje svojim korijenjem stabilizuju dno (slika 7.1.4). Epifaunalne zajednice, na travama i makroalgi rastu epifiti i razvijaju se zajednice foraminifera, briozoa i drugih pričvršćenih organizama. Vagilni bentos vrlo čest u pijesku zbog rupa i prostora za ukopavanje. Tu spadaju rakovi, puževi, ježevi, morski maločetinaši i zvjezdice. Zbog zakopavanja plijena, česti su predatori poput riba listova ili školjki glatkih ljuštura koje filtriraju pijesak. Tragovi i mehanizmi kretanja organizama (npr. rakovi, školjke) mijenjaju strukturu pijeska, povećavaju njegovu prozračnost i cirkulaciju hranjivih tvari. Bioturbacija predstavlja proces miješanja i preuređivanja sedimenta djelovanjem organizama koji u njemu žive (shema 7.1.2). U pjeskovitim sedimentima bioturbaciju vrše brojni bentoski organizmi ukopavanjem, kretanjem i ishranom. Rakovi, školjke, mnogosegmentni maločetinaši (*Polychaeta*), morski krastavci i pljosnate ribe svojim aktivnostima stvaraju hodnike, kanale i hodnike u pijesku. Školjke i krastavci filtriraju pijesak usisavajući ga, probavljaju organske čestice, a ostatak izbacuju na površinu u obliku karakterističnih ispusta ili „tornjića“. Neki rakovi, poput roda *Callinassa*, kopaju duboke hodnike koji značajno mijenjaju strukturu sedimenta, dok ribe poput lista, svojim pokretima dodatno premještaju površinske slojeve pijeska. Posljedice ovih aktivnosti su višestruke. Prije svega, sediment ostaje rahli i prozračen, jer hodnici i kanali omogućavaju prodiranje kiseonika u dublje slojeve. Time se povećava cirkulacija vode i hranjivih tvari, a organska materija iz

dubljih dijelova vraća se na površinu gdje postaje dostupna drugim organizmima. Svaka rupa i kanal predstavljaju novu mikronišu za bakterije, mikroalge i sitne beskičmenjake, što doprinosi rastu ukupne biodiverziteta bentosa. Ipak, bioturbacija može utjecati i na stabilnost pijeska, jer povećano miješanje može olakšati eroziju, ali istovremeno i povećati produktivnost ekosistema. Ekološki značaj bioturbacije u pjeskovitim sedimentima je izuzetno velik. Ona održava cirkulaciju hranjivih materija, osigurava uvjete za raznolikost organizama, te doprinosi sekvestraciji ugljika ubrzavanjem razgradnje organske materije. Osim toga, u geološkom smislu, tragovi bioturbacije ostaju sačuvani kao fosilizirani hodnici i kanali (ichnofosili), što pruža vrijedan uvid u ekosisteme prošlih geoloških epoha. Fosilni značaj je u činjenici da školjke i puževi u pijesku često ostavljaju fosilne ostatke, važan materijal za paleoekološka istraživanja.



Shema 7.1.2. Primjer bioturbacije u morskom okruženju i njenog uticaja na sredinu: hranjive materije i CO₂ se apsorbiraju, a kiseonik se oslobađa (1); doprinos stabilizaciji sedimenata (2); apsorpcija hranjivih materija (3); taloženje fekalija (4); izlučivanje hranjivih materija i disanje (5); bioturbacija i bioirigacija (6); te miješanje sedimenata (7). (Ehrnsten i sur., Wikimedia Commons, pod licencom CC BY-SA 4.0).

Muljeviti sediment - na muljevitom sedimentu uslovi za organizme bentosa značajno se razlikuju od onih u pjeskovitim ili kamenitim staništima. Muljevi se sastoje od vrlo sitnih čestica (< 63 µm), a posebno od frakcije od 1–2 µm, koja uključuje i organske čestice i minerale. Zbog jake kohezije među sitnim česticama, ovi sedimenti su stabilniji i teže se ispiru. Jednom formirane bušotine ostaju očuvane i stabilne duže vrijeme. Veći udio organske materije čini muljevite sedimente privlačnim za hranitelje sedimentom (*deposit feedere*). Na ovim podlogama manje je sesilnog bentosa jer su struje koje donose hranu slabe. Češći su predstavnici kao što su puževi roda *Turritella*, holoturije (morski krastavci), školjke i dugi cjevasti sifoni (slika 7.1.4). Holothuroidea (morski krastavci) imaju duguljasto tijelo, položeno na sediment, ishrana detritusom, tj. sitnim česticama organske materije iz mulja koje filtrira kroz probavni sistem. Na ovaj način ima važnu ekološku ulogu jer reciklira hranljivu materiju i aerira sediment. Puževi roda *Turritella* (puževi s spiralnim kućicama) imaju duguljaste,

spiralne ljuštore koje vire iz sedimenta. Žive djelimično ukopani u mulju, hrane se filtriranjem sitnih čestica i mikroorganizama, a predstavljaju tipične predstavnike muljevitih i pjeskovitih sedimenata. Iz skupine koralna vrste roda *Pennatulula* (morsko pero, koral) čine uspravno izraslu koloniju (narančaste boje na slici). Lovke polipa hvataju plankton iz vodenog stupca, indikator su stabilnih, mirnih, muljevitih podloga. Školjke su ukupane u muljeviti sediment, a iz mulja su ispruženi sifoni kojima uzimaju vodu bogatu hranom i kiseonikom. Njihova prisutnost ukazuje na bogatstvo organske materije u sedimentu.

Šljunkoviti/kameniti sediment - u morima i okeanima bitno se razlikuju od muljevitih ili pjeskovitih podloga jer nude stabilna, čvrsta staništa koja omogućavaju potpuno drugačije zajednice organizama. Građen od većih fragmenata stijena, oblutaka ili krupnog šljunka. Podloga je mnogo stabilnija od mulja ili pijeska, manje se premješta strujanjem. Na plićim dubinama omogućava razvoj fitobentosa (algi i morskih cvjetnica). Mikrostanista su predstavljena sa pukotinama i prostorom između kamenja koja služe kao skloništa za mnoge beskičmenjake i ribe. Makroalge (zelene, crvene i smeđe) predstavljaju primarne produkte i stvaraju složene trofičke mreže. Morske cvjetnice koloniziraju stabilne šljunkovite zone, pridonoseći stabilizaciji podloge. Sesilni organizmi kao što su spužve (Porifera) su filtratori koji pročišćavaju velike količine vode (slika 7.1.4).

Korali i koralinačne alge, stvaraju trodimenzionalne strukture koje povećavaju heterogenost staništa. Bryozoa (mahovne životinje) i cjevasti mnogočekinjaši (npr. *Serpula*) formiraju kolonije i cjevčice na tvrdim podlogama. Dagnje (*Mytilus galloprovincialis*) pričvršćuju se byssus nitima, gradeći guste agregate.

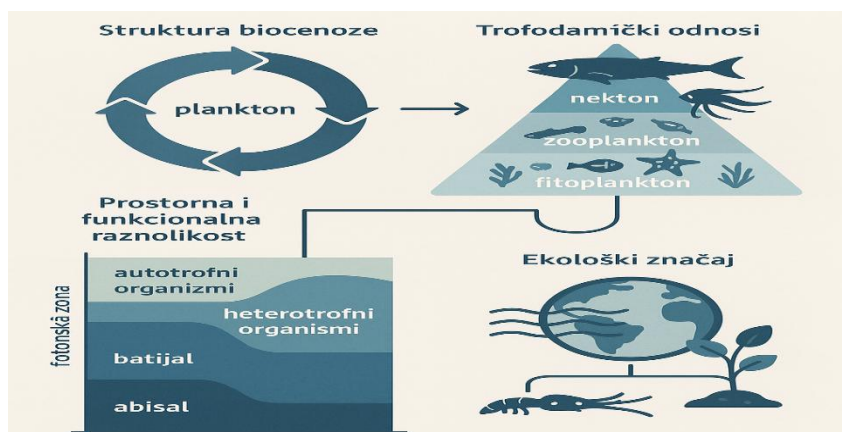
Od pokretnih beskičmenjaka javljaju se rakovi (Paguridae, *Brachyura*) koji koriste pukotine i školjke za zaklon. Morski ježevi i puževi (*Patella*, *Trochus*) stružu epifitske alge i biofilm. RIBE predstavljene poput blenija (Blenniidae) i gobija (Gobiidae) nastanjuju pukotine i niše. Između kamenja se zadržavaju i mlađe jedinke većih vrsta koje traže zaklon od predatora. Na kamentom sediment je zastupljen process bioerozije. Infauna- se aktivno ubušuje u podlogu: spužve, poliheta, školjke ali i inflora (endolitske alge), uzrokuju biokoroziju stijena (sa porama). Bioerozija, sinergijsko djelovanje u mjenjanju stijena, djelovanjem valova i organizama.



Slika 7.1.4. Tipovi morskog sedimenta i organizmi (blog.doc.govt.nz/2020/06/08/world-oceans-day-gardens-meadows-and-forests-support-healthy-marine-life/, modifikovano)

7.1.2. Biocenoza mora i okeana

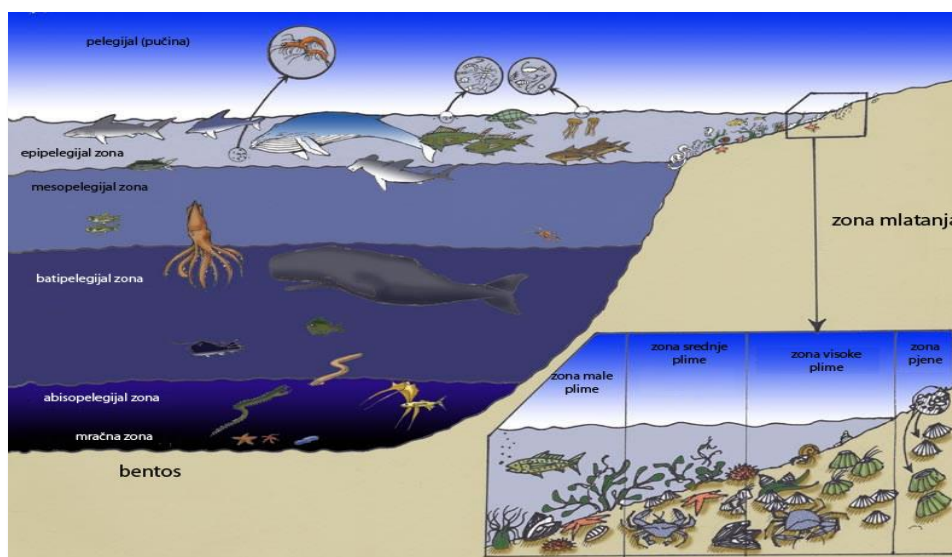
Biocenoza mora i okeana predstavlja funkcionalnu zajednicu svih živih organizama koji nastanjuju morski i okeanski prostor, a koji su međusobno povezani složenim mrežama interakcija i u stalnoj su zavisnosti od abiotičkih faktora sredine. U okviru biocenoze razlikuju se različite životne forme i ekološke grupe koje zauzimaju određene ekološke niše, čime se ostvaruje ravnoteža i održava stabilnost ekosistema. Strukturu biocenoze mora i okeana čini četiri osnovne komponente: plankton, nekton, neuston i bentos. Plankton čine organizmi koji slobodno lebde u vodi (fitoplankton - primarni producenti i zooplankton, primarni konzumenti, te bakterioplankton kao razlagači). Nekton obuhvata aktivne plivače, uglavnom ribe i morske sisare. Neuston podrazumijeva organizme vezane za površinski film vode, dok bentos obuhvata organizme pri dnu od bakterija i algi do beskičmenjaka. Osnovu trofičkog lanca u morskim ekosistemima čine fitoplanktonske alge koje fotosintezom proizvode organsku materiju (shema 7.1.3). One hrane zooplankton, koji dalje služi kao osnova ishrane za male ribe, larve i veće beskičmenjaka. Sekundarne i tercijarne karike predstavljaju veće ribe, glavonošci, morski sisari i ptice, dok dekompozitori (bakterije i gljive) razgrađuju mrtvu organsku materiju i vraćaju hranjive materije u kruženje. Ovaj složeni sistem ishrane u praksi se manifestuje više kao mreža ishrane nego linearni lanac. U morima i okeanima prostorne razlike (pelagična i bentoska zona, litoral, batijal i abisal) uvjetuju i specifičan sastav biocenoze. U fotičkoj zoni dominiraju autotrofni organizmi, dok afotične dubine karakterišu heterotrofni organizmi, često adaptirani na ekstremne uvjete, uključujući i bioluminiscentne forme. Biocenoza tako odražava vertikalnu i horizontalnu stratifikaciju ekosistema. Biocenoza mora i okeana ima ključnu ulogu u globalnom kruženju materije i energije. Ona učestvuje u biološkoj pumpi ugljenika, regulaciji klimatskih procesa, proizvodnji kiseonika i održavanju biodiverziteta. Stabilnost ovih zajednica direktno je povezana sa stanjem abiotičkih faktora (temperatura, salinitet, svjetlost, dostupnost hranjiva), ali i sa antropogenim pritiscima (zagađenje, prekomjerni izlov, klimatske promjene).



Shema 7.1.3. Odlike (karakteristike) biocenoze mora i okeana

Organizmi u morima i okeanima raspoređeni su u različite zone koje su određene prvenstveno dubinom, dostupnošću svjetlosti i uticajem plime i oseke. Svaka od ovih zona ima specifične abiotičke uvjete, pa se u njima razvijaju različite zajednice organizama. Vertikalna podjela vodenog stupca (pelagijala) te horizontalna i vertikalna podjela priobalnog područja (litoral) (slika 7.1.5) omogućava bolji uvid u ekološku raznolikost mora i okeana. Raspored organizama u različitim staništima su određeni svjetlošću, dubinom i uticajem plime i oseke. S lijeve strane slike vidi se vertikalna podjela pelagijala koja obuhvata epipelagijalnu zonu tj. površinski sloj,

bogat svjetlom i hranjivim tvarima, u kojem dominira plankton, a pojedinačno se pojavljuju lokomotorne ribe i morski sisari. U zoni mesopelagijalne zone ili sumračne zone, s manjom količinom svjetla prisutni su organizmi prilagođeni slabom osvjetljenju. Sa dubinom i svjetlosti u tragovima razvijena je batipelagijalna zona, tamni slojevi u kojima žive velike dubokomorske životinje poput lignji i kitova. Na kraju je abisopelagijalna zona, potpuno mračna, s rijetkim, specijaliziranim organizmima. Na dnu slike je označen bentos, zajednica organizama vezanih za morsko dno. S desne strane slike prikazana je litoralna zona pod uticajem plime i oseke (zona mlatanja), koja se dodatno dijeli na zonu male plime, zonu srednje plime, zonu visoke plime i zonu pjene. U svakoj od njih nalaze se karakteristični organizmi prilagođeni promjenama u dostupnosti vode, svjetlosti i kiseonika.

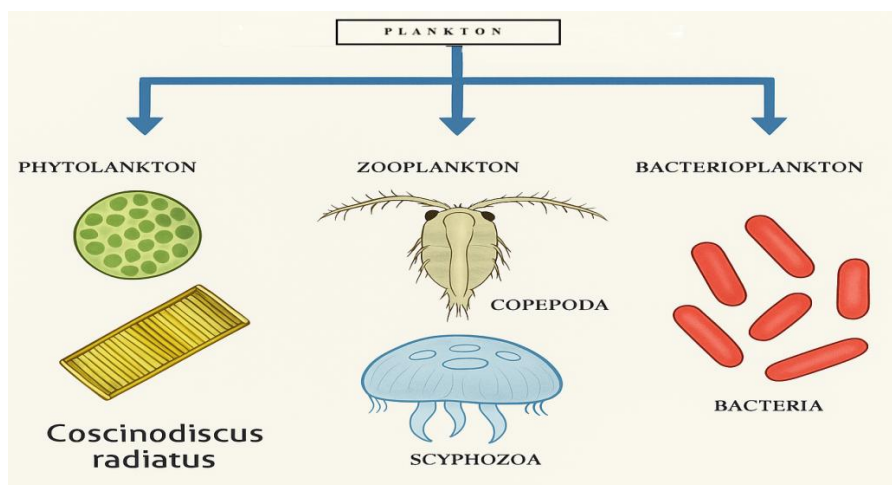


Slika 7.1.5. Životne zone mora i okeana (Mahar, 2016, prilagođeno)

U slobodnoj vodi pelagijala žive organizmi koji se označavaju kao pelagos, a sačinjavaju ga planktonski organizmi: zooplankton, fitoplankton i bakterioplankton. Plankton obuhvata različite organizme koji žive u vodenom stupcu (slika 7.1.6) i nošeni su morskim strujama. On predstavlja glavni izvor hrane mnogim ribama i morskim sisarima. Plankton nije sposoban za samostalno kretanje, već zavisi od kretanja vodenih masa. Planktonski organizmi mogu biti vrlo različitih dimenzija: od mikroskopskih virusa i bakterija do velikih meduza koje mogu dosezati masu od nekoliko desetina kilograma. Fitoplankton mora i okeana čini raznolika skupina fotosintetskih organizama koji predstavljaju osnovu morskih hranidbenih lanaca i primarne produkcije. Najbrojniju i najznačajniju skupinu čine dijatomeje (Bacillariophyceae), jednćelijske alge sa silikatnim oklopom koje često dominiraju u umjerenim i hladnijim morima, a karakterizira ih velika morfološka raznolikost. Dinoflagelati (Dinophyceae) također imaju značajnu ulogu, prepoznatljivi po dvjema bičevima i složenom načinu ishrane, jer mogu biti autotrofni, heterotrofni ili miksotrofni. Oni su često uzročnici cvjetanja mora, uključujući i pojavu crvenih plima. U toplim i oligotrofnim morima ključnu ulogu imaju cijanobakterije (Cyanobacteria), prokariotski fotosintetski organizmi koji osim primarne produkcije doprinose i obogaćivanju ekosistema vezivanjem atmosferskog dušika. Kokolitoforidi (Coccolithophorida), osobito vrsta *Emiliana huxleyi*, predstavljaju još jednu važnu skupinu

mikroskopskih algi. To su jednoćelijske alge koje na svojoj površini nose vapnenačke pločice (kokolite), te imaju značajnu ulogu u globalnom ciklusu ugljika i u formiranju morskih sedimenata. Osim ovih dominantnih grupa, u sastavu fitoplanktona nalaze se i zelene alge (Chlorophyta), koje su više vezane za priobalna područja, te poneke druge skupine poput euglenofita, koje se javljaju u estuarijima i priobalnim morima. Na taj način, fitoplankton je izrazito raznovrstan i uključuje organizme od mikroskopskih cijanobakterija do složenih algi, a njihova prostorna i vremenska distribucija zavisi od ekoloških uvjeta mora i okeana.

Zooplankton mora i okeana čini heterogenu skupinu životinjskih organizama koji žive u vodenom stupcu i nošeni su morskim strujama. On obuhvata organizme različite veličine i složenosti, od mikroskopskih protozoa do vidljivih račića i larvi većih morskih životinja. Najbrojniji i ekološki najvažniji dio zooplanktona čine račići, posebno kopepodi (Copepoda), koji predstavljaju ključnu kariku između fitoplanktona i viših trofičkih nivoa. Pored njih, značajnu ulogu imaju i vazda svijetleći rakovi (Euphausiacea), koji formira goleme populacije u hladnim morima i služi kao osnovna hrana kitovima i drugim velikim predatorima. U sastavu zooplanktona nalaze se i različite larvalne forme morskih beskičmenjaka i riba, poput larvi školjki, ježeva, rakova i riba (meroplankton), što doprinosi raznovrsnosti i sezonskim promjenama ove zajednice. Posebno su važni i želatinozni organizmi, kao što su meduze (Scyphozoa), rebronoše (Ctenophora) i salpe (Tunicata), koji često dominiraju u otvorenim okeanskim područjima i imaju specifičan način filtriranja i ishrane. U tropskim i suptropskim morima značajnu ulogu imaju i pteropodi (eng. Planktonic Gastropoda), tzv. „morske leptirice“, koje predstavljaju važan izvor hrane za ribe i sisare. Zooplankton se može podijeliti na holoplankton, organizme koji cijeli životni ciklus provode u planktonu (kopepodi, kril, salpe, pteropodi), i meroplankton, organizme koji samo jedan dio životnog ciklusa provode u planktonskoj zajednici, obično u stadiju larvi (larve školjki, rakova, ježeva i riba). Ova razlika posebno naglašava dinamičnost zooplanktona, jer njegov sastav varira sezonski i prostorno, zavisno o mriještenju i razvojnim ciklusima mnogih morskih organizama. Na taj način, zooplankton predstavlja osnovnu kariku u prijenosu energije i materije od primarnih producenata – fitoplanktona, ka višim trofičkim nivoima, uključujući ribu, morske ptice i sisare, i time ima ključnu ulogu u funkcioniranju morskih i okeanskih ekosistema.



Slika 7.1.6. Prikaz sastava planktona mora i okeana

Bakterioplankton predstavlja zajednicu bakterija i arheja koje slobodno žive u vodenom stupcu mora i okeana. Iako su mikroskopske veličine, njihova uloga u funkcionisanju morskih ekosistema je izuzetno značajna. Oni učestvuju u kruženju hranjivih tvari, posebno ugljika, dušika i fosfora, te predstavljaju osnovni dio tzv. mikrobne petlje, procesa kojim se rastvorena organska materija, koju izlučuju fitoplankton i drugi organizmi, ponovo vraća u lance ishrane. Na taj način bakterioplankton osigurava efikasno iskorištavanje hranjivih resursa u moru. U sastavu bakterioplanktona nalaze se raznolike skupine, među kojima se ističu heterotrofne bakterije, koje razgrađuju organske supstance i mineraliziraju ih do anorganskih oblika, dostupnih primarnim producentima. Pored njih, važnu ulogu imaju autotrofne bakterije, uključujući cijanobakterije (*Synechococcus*, *Prochlorococcus*) koje obavljaju fotosintezu i doprinose primarnoj produkciji, posebno u tropskim i oligotrofnim morima. Poseban značaj imaju i bakterije koje učestvuju u procesima nitrifikacije i denitrifikacije, te u oksidaciji sumpora i metana, čime posredno utiču na globalne biogeohemijske cikluse. Bakterioplankton karakteriše ogromna brojnost i brza reprodukcija, što im omogućava da odmah reagiraju na promjene u dostupnosti hranjivih tvari. Njihova biomasa i aktivnosti presudno utiču na prozirnost i hemijski sastav morske vode, ali i na stabilnost mreža ishrane. Zbog svoje raznolikosti i funkcionalne važnosti, bakterioplankton se smatra ključnim regulatorom bioloških i hemijskih procesa u svjetskim morima i okeanima.

Nekton mora i okeana obuhvata sve aktivno pokretne organizme u vodenom stupcu, koji se za razliku od planktona mogu samostalno kretati, savladavati morske struje i birati svoj položaj u prostoru. Nekton naseljava sve zone mora i okeana, od priobalja do otvorenog mora, od površine do dubina. Nektonske vrste su aktivni plivači i nisu ograničene na neritičku (šelfnu) zonu. Za razliku od bentosa (vezanog za dno) i planktona (pasivno nošenog strujama), nekton čine organizmi koji imaju razvijene organe za kretanje i sposobnost aktivne migracije. Nekton je vrlo raznolik i obuhvata različite sistematske skupine: glavonožce (sipe, lignje, hobotnice), ribe (najbrojniji dio nektona, npr. haringa, skuša, tuna, losos, morski psi). One zauzimaju različite trofičke niše, od biljojeda do vršnih predatora; morski sisari (kitovi, delfini, foke) koji se aktivno kreću u potrazi za hranom i imaju ključnu ulogu u regulaciji trofičkih mreža. Morske kornjače koje, iako povremeno borave na kopnu radi polaganja jaja, glavni dio života provode u moru kao dio nektonske zajednice. Neke morske ptice (npr. pingvini) veći dio života provode plivajući i roneći, iako nisu isključivo morski organizmi. Nekton je potrošački kompleks (konzumenti) morskih ekosistema. Hrani se planktonom, bentosom ili drugim nektonskim organizmima i predstavlja osnovnu kariku u prenošenju energije od primarnih producenata ka višim trofičkim nivoima. Nektonske vrste često formiraju jata i migracijske rute, što omogućava efikasno iskorištavanje prostora i resursa. Njihova biomasa i distribucija snažno zavise od sezonske produktivnosti, temperature mora i raspoloživosti hrane.

Bentos obuhvata sve organizme koji žive na morskom dnu ili unutar sedimenta. Prema funkcionalnoj ulozi, bentos se dijeli na fitobentos, koji čine primarni proizvođači (alge, cijanobakterije i vodene biljke; detaljnije obrađeno u poglavlju *Hidrobionti i njihove adaptacije*), te zoobentos, koji obuhvata potrošače, uglavnom beskičmenjake (puževe, školjkaše, polihete, rakove, bodljikaše i dr.). T

reću skupinu čine razlagači, mikroorganizmi (bakterije, gljive i protisti) koji razgrađuju organsku materiju i omogućavaju kruženje hranjivih tvari u bentosnim ekosistemima. Podjela bentosa je izvršena i prema organizaciji tijela, prema veličini, položaju na morskom dnu, odnosu prema podlozi, tipu sedimenta, vezanosti za podlogu (tabela 7.1.1). U sastavu bentosa razlikuju se jednoćelijski oblici (prokarioti i protisti) te višećelijski organizmi (metazoa). Prema veličini, bentos se svrstava u mikrobentos (<0,1 mm), mezobentos (0,1–1 mm), makrobentos (>0,5–1 mm) te megabentos (>10 cm).

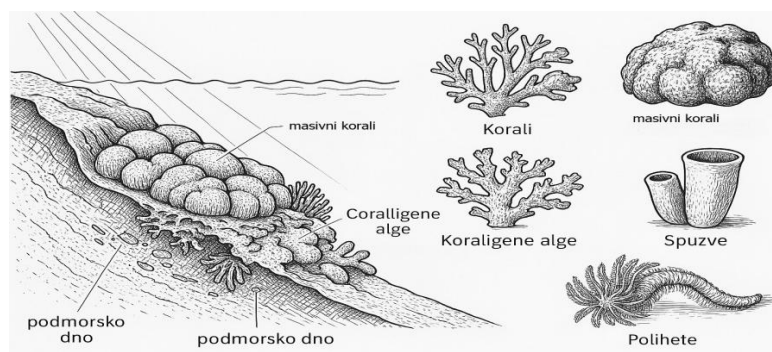
Odnos bentoskih organizama prema podlozi razmatra se kroz dva aspekta: položaj na morskom dnu i stepen vezanosti. Prema položaju na dnu razlikuju se litobionti (na stijenama), psamobionti (na pijesku) i pelobionti (na mulju). Prema odnosu s podlogom, bentos se dijeli na epibionte (žive na površini supstrata), endobionte (žive unutar supstrata) i mezobionte (žive u međuprostorima između čestica sedimenta).

Posebnu grupu čine prijelazni oblici, djelimično u sedimentu a djelimično izvan njega. Vezanost za podlogu može biti različita. Neki organizmi su sesilni i čvrsto pričvršćeni za dno (npr. koralji, spužve), dok su drugi sedentarni ili hemisesilni, sa ograničenom pokretljivošću (npr. školjke, poliheti). Treća grupa su vagilni oblici, aktivno pokretni organizmi poput riba, glavonožaca i rakova, koji imaju razvijene organe za kretanje i mogu zauzimati različite mikrostanišne niše.

Tabela 7.1.1. Pregled klasifikacije bentosa

Kriterij	Podjela	Primjeri / Opis
Prema organizaciji tijela	a) Prokarioti (bakterije, cijanobakterije) b) Jednoćelijski eukarioti (protozoe) c) Višećelijski organizmi (Metazoa) – fitobentos i zoobentos	Bakterije, cijanobakterije, protozoa, alge, Životinje, više biljke
Prema veličini	a) Mikrobentos <0,1 mm b) Mejobentos 0,1–1 mm c) Makrobentos >0,5–1 mm d) Megabentos >10 cm	Bakterije, protisti, nematode, rakovi puževi, školjke, rakovi, školjke, bodljokožci, rakovi
Položaj na morskom dnu	Litobionti – stjenovito dno, Psamobionti – pjeskovito dno Pelobionti – muljevito dno	Algofitne zajednice, školjke, maločetinaši
Odnos prema podlozi	a) Epibionti – na dnu b) Endobionti – u sedimentu c) Mezobionti – u međuprostorima čestica d) Prijelazni oblici – djelomično u i na sedimentu	Epifauna, infauna, intersticijalna fauna
Vezanost za podlogu	a) Pričvršćeni (sesilni, zakorijenjeni) b) Slabo pokretni (sedentarni, hemisesilni) a) pokretni (vagilni)	Koralji, spužve, polihete-sedentaria školjke, puževi, trpovi, morski ježevi, glavonošci, Erantia, rakovi isl.
Mikroorganizmi u bentosu	a) Bakterije, arheje, protozoe, gljive, virusi	Do 90% biomase mora, ključni u kruženju hranjiva

Važnu ulogu u bentosu imaju i mikroorganizmi, bakterije, arheje, protisti i gljive koji dominiraju po brojnosti i biomasi te učestvuju u kruženju hranjivih tvari i održavanju stabilnosti ekosistema. Pored njih, značajnu komponentu čine i morske alge, među kojima se ističu crvene (Rhodophyta), smeđe (Phaeophyta) i zelene (Chlorophyta) alge, kao i dijatomeje, kokolitoforidi i dinoflagelati. Ove skupine čine osnovu primarne produkcije u priobalnim i fotofilnim zonama bentala. Posebne grupe morskih ekosistema čine koraljni grebeni, estuariji i okeansko dno. Koraljni grebeni predstavljaju jednu od biološki najraznolikijih i najproduktivnijih morskih zajednica u kojima dominira životinjska komponenta. Oni su ujedno i najveće biološke građevine na Zemlji, građene krečnjačkim skeletima brojnih jedinki sporo rastućih vrsta koralja i drugih organizama, poput koraligenih algi, spužvi i poliheta (slika 7.1.7). Ovi skeleti su međusobno stopljeni i formiraju kompleksne strukture otporne na djelovanje valova.

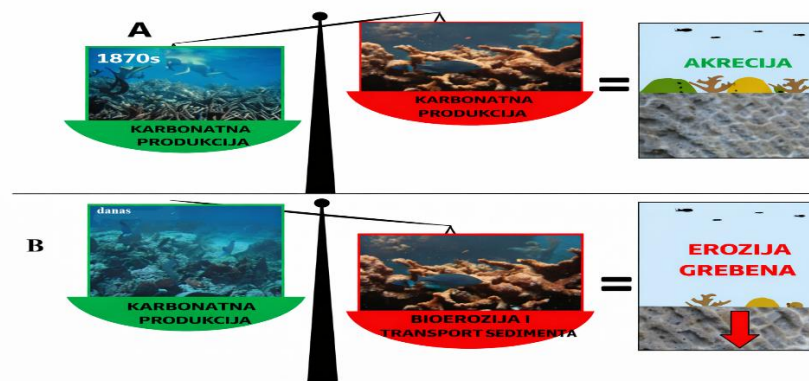


Slika 7.1.7. Struktura koraljnog grebena i organizmi graditelji.(prilagođeno prema Ballesteros, 2006)

Razvitak koraljnih grebena u velikoj mjeri ovisi o mutualističkom odnosu koralja i jednoćelijskih algi zooxanthellae. Koralji imaju višestruku korist od ovih simbiotskih algi: uklanjaju produkte ekskrecije, stvaraju kiseonik fotosintezom, proizvode ugljikohidrate i lipide, te pospješuju kalcifikaciju. Alge zauzvrat dobivaju zaštitu i hranjiva oslobođena ekskrecijom koralja. Razvoj grebena ograničen je brojnim ekološkim faktorima:

- temperatura: koralji naseljavaju tropske i subtropske pojaseve (25°N–25°S),
- salinitet: ograničeni su na oceanske salinitete; rijetko u estuarijima,
- svjetlo: nužno zbog simbiotskih algi; aktivna izgradnja prestaje ispod 25–50 m dubine i
- turbiditet i sedimentacija: smanjuju prodiranje svjetla i otežavaju hranjenje.

Grebeni rastu sporo, prosječna stopa rasta iznosi oko 1 cm u 1000 godina. Uz rast, važan je proces cementacije (precipitacija CaCO_3 u pukotinama i šupljinama), te proces bioerozije, kada spužve, školjke i drugi organizmi buše skelete i proizvode fini sediment. Ravnoteža između produkcije karbonata i bioerozije (slika 7.1.8), koje zajedno određuju da li u ekosistemu dominira proces izgradnje (akrecije) ili razgradnje (erozije) koraljnog grebena. Kada dodatni procesi rasta koralja i drugih organizama koji stvaraju kalcijum-karbonat (produkcija karbonata) nadmašuju negativne efekte erozivnih procesa, tada je favorizirana akrecija grebena i dolazi do formiranja nove grebenske strukture (A). U posljednjim decenijama, s padom populacija koralja, istraživanja ukazuju da je ta ravnoteža narušena u korist erozije grebena (B).

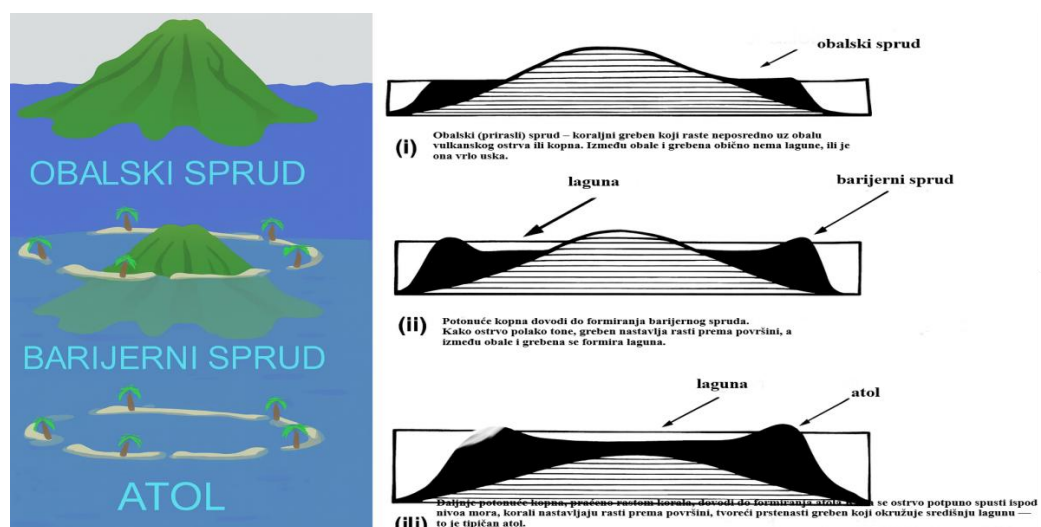


Slika 7.1.8. Ravnoteža između rasta koralja (akrecije) i bioerozije (Toth i sur. 2018, modificirano)

Karakterističan fenomen koraljnih zajednica je masovni mrijest, kada mnoge vrste koralja sinkronizirano otpuštaju gamete u vodu. Ovi ekosistemi obilježeni su snažnom kompeticijom za prostor, mutualističkim interakcijama i različitim oblicima zaštite od predatora.

Prema glavnim obilježjima razlikuju se tri osnovna tipa koraljnih sprudova:

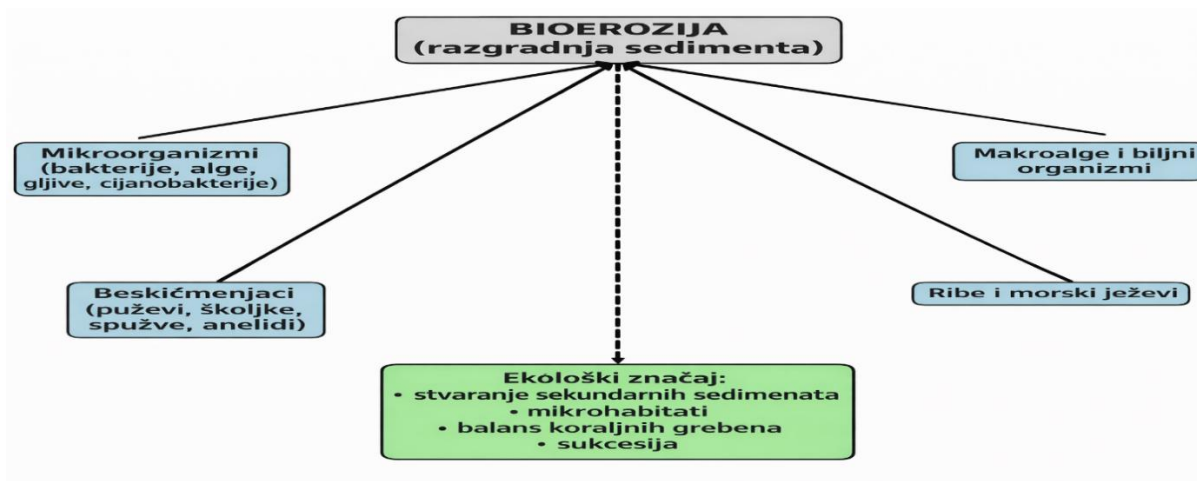
- obalski sprudovi – uz obalu,
- barijerni sprudovi – paralelni sa obalom, odvojeni lagunama i
- atoli – prstenasti sprudovi oko laguna (slika 7.1.9).



Slika 7.1.9. Tipovi koraljnih sprudova: obalski, barijerni i atol

Faunu graditelja čine dupljari klase Anthozoa (*Madrepora*, *Porites*, *Fungia*, *Meandrina*, *Astraca*), hidrozoe (*Millepora*), te krečne alge. Primarni proizvođači su zooxanthellae, jednoćelijske i višestanične alge, dok su potrošači polipi koralja, biljojedi i mesojedi. Grebeni imaju izuzetno visok produktivitet: biomasa se može obnoviti 12,5 puta godišnje, a primarna produkcija iznosi 18 g/m² na dan (za razliku od otvorenog okeana gdje iznosi samo 0,2 g/m²).

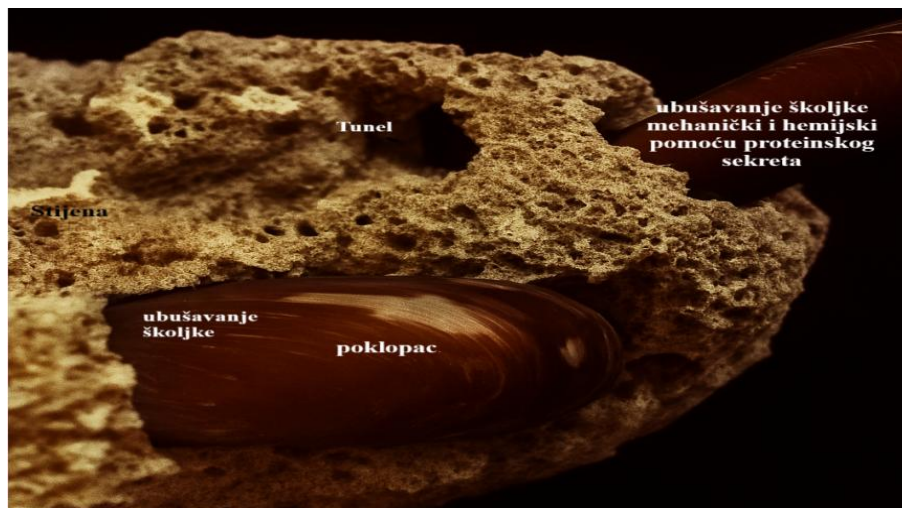
Bioerozija, predstavlja biološko razgradno djelovanje na sedimente (karbonatne stijene, koraljne skelete, školjke, potopljeno drvo i druge mineralne ili organske strukture). Za razliku od fizičke ili hemijske erozije, bioerozija je rezultat aktivnosti živih organizama, hidrobionata. Glavne grupe hidrobionata uključene u bioeroziju (shema 7.1.4). Mikroorganizmi (bakterije, cijanobakterije, alge, gljive) otapaju minerale i rastvaraju karbonatne sedimente putem metaboličkih procesa. Cijanobakterije i gljive prodiru unutar sedimenta, slabeći njegovu strukturu. Makroalge i biljni organizmi aktivno učestvuju u procesu bioerozije tako što određene alge (s endolitnim cijanobakterijama) rastvaraju karbonatne sedimente. Beskičmenjaci posebno puževi i školjke stopalom utiču na sedimente procesom mehaničkog bušenja i razaranja sedimenta (pijeska, mulja ili šljunka). Pri kretanju, oni ostavljaju galerije, tunele ili brazde, koje mogu biti ispunjene detritusom ili ostati kao šupljine u sedimentu. Ove galerije omogućavaju cirkulaciju vode i kiseonika unutar sedimenta, što povećava dostupnost nutrijenata i uvjete za druge organizme (npr. bakterije, male beskičmenjake). Spužve (npr. *Cliona*), probijaju karbonatne sedimente i koralje, stvarajući šupljine, dok Annelida i rakovi, kopaju hodnike i destabiliziraju sedimente. Ribe mehanički stružu i lome karbonatne stijene dok se ishranjuju algama. Morski ježevi aristama (zubićima *Aristotelove lampe*) buše sedimente i koraljne skelete, uzrokujući fizičku degradaciju.



Shema 7.1.4. Proces bioerozije i organizmi aktivni učesnici

Glavno područje bioerozije jer su izgrađeni od kalcij karbonata, vrlo podložnog rastvaranju i mehaničkom oštećenju. Balans između rasta koralja i njegove razgradnje, stvaranje bijelih koraljnih plaža (pijesak je često produkt bioerozije). Glavno područje bioerozije jer su izgrađeni od kalcij karbonata, vrlo podložnog rastvaranju i mehaničkom oštećenju. Spužve (*Cliona*) buše i razgrađuju skelete koralja, ribe papagajke (*Scaridae*) koje stružu površinu koralja dok pasu alge, proizvodeći fine čestice karbonatnog pijeska. Morski ježevi (*Diadema*) koje sa aristama buše koraljne skelete i stijene. Endolitne alge i cijanobakterije prodiru unutar koraljnih skeleta, rastvarajući kalcij karbonat. Pored koralja proces bioerozije se javlja na obalnim stijenama i liticama, otvorenom moru i morskom dnu. Bioerozija na obalnim stijenama i liticama na tvrdim karbonatnom i silikatnom sedimentu započinje djelovanjem endolitskih algi i cijanobakterija. One rastvaraju površinski sloj stijena, morski ježevi buše stijene u plicacima. Dok školjke (npr. prstac *Lithophaga lithophaga*) buše hodnike unutar stijena, što može oslabiti cijele obalne

strukture. Ova školjka spada u litofagne organizme koji se trajno ukopavaju u vapnenačke stijene i koraljne skelete. Proces ubušavanja temelji se na kombinaciji hemijskog i mehaničkog djelovanja. Epitelne žlijezde plašta izlučuju sekret bogat proteinima koji hemijski razgrađuje kalcij karbonat (CaCO_3), glavnu mineralnu komponentu stijena. Na taj način podloga postaje omekšana i pogodna za daljnje prodiranje. Nakon hemijskog razlaganja slijedi mehanička faza: Školjka uz pomoć pokreta plašta i rubova ljuštura postupno proširuje galeriju, dok stopalo služi za učvršćivanje i stabilizaciju tijela u stijeni. Time nastaje cilindričan kanal koji se produžava s rastom jedinke. Na površini stijene ostaje samo uzak otvor kroz koji prstac izbacuje sifone za filtriranje morske vode, čime se hrani planktonom i organskim česticama (slika 7.1.10). Ovaj način života ima značajne ekološke posljedice. Prstac doprinosi bioeroziji vapnenačkih podloga i koraljnih skeleta, ali istovremeno stvara mikrostaništa koja koriste brojni drugi organizmi (npr. mali rakovi, polihete i ribice). Zbog nekontrolisanog izlova, pri kojem se stijene razaraju radi vađenja jedinki, ova vrsta je u cijelom Mediteranu zakonski strogo zaštićena, uključujući i Jadransko more. Erozija litica, doprinosi oslobađanje mineralnih čestica i formiranje novih mikrohabitata.

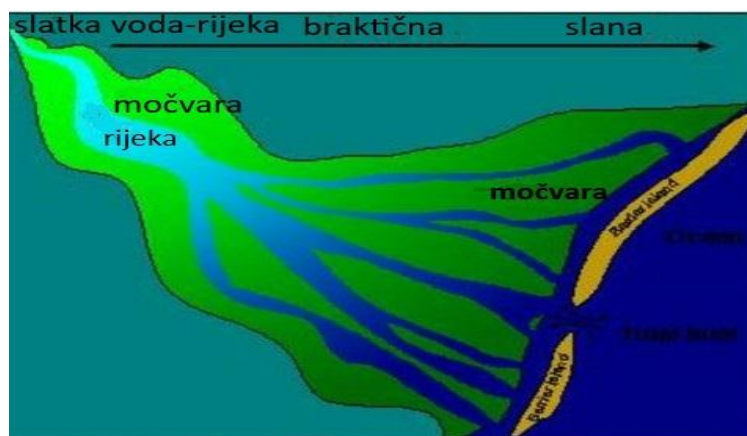


Slika 7.1.10. Prikaz bioerozije prstaca (prilagođeno prema Guidetti i sur.2004)

U procesu bioerozije u otvorenom moru i dnu, aktivno učestvuju spužve i anelidi koji buše tvrde sedimente i školjke potopljene u sedimentu. Ribe svojom ishranom usitnjavaju koralne i školjkaste čestice. Morski ježevi na šljunkovitim i stjenovitim podlogama vrše mehaničku bioeroziju. Ovaj process doprinosi formiranju karbonatnih i organsko-mineralnih sedimenata na dnu okeana. U estuarijima i priobalnim zonama mora, bioerozija se ovdje odvija u kombinaciji s jakim fizičkim procesima (valovi, plima i oseka). Glavni organizmi: bakterije, gljive, puževi i školjke koji razgrađuju organske i mineralne sedimente. Oslobađanje nutrijenata, stvaranje finog pijeska i mulja, što utiče na dinamiku hranidbenih mreža i produktivnost priobalnih voda. Bioerozija u morima i okeanima nije ograničena na koralne sprudove oni su samo najpoznatiji primjer. Proces obuhvata i obalne litice, morsko dno, priobalne zone i estuare, gdje različite grupe hidrobionata (od mikroorganizama do riba i ježeva) aktivno mijenjaju sedimente i oblikuju morski pejzaž.

7.1.3. Estuariji

Estuariji su prijelazne zone gdje se slatka voda rijeka miješa sa slanom morskom vodom, stvarajući specifične uvjete s velikom dinamikom i biodiverzitetom. Tipičan estuarij karakterizira protok slatke vode manje gustoće iznad gušće morske vode koja prodire uzvodno (slika 7.1.3.1).



Slika 7.1.3.1. Shema estuarija – gradijent saliniteta.

Prema stupnju miješanja vode razlikuju se tri tipa estuarija (slika 7.1.3.2):

- visoko stratificirani – slojevi su jasno odvojeni (slatka voda iznad, slana ispod),
- umjereno stratificirani – djelomično miješanje, salinitet raste prema moru i
- vertikalno homogeni – snažno miješanje homogenizira cijeli stupac vode.



Slika 7.1.3.2. Tipovi estuarija: visoko stratificirani, umjereno stratificirani i homogeni.

Estuariji imaju nekoliko ključnih ekoloških osobina, gradijent saliniteta varira s plimom i osekom. U sastavu ukupnog biodiverziteta, dominiraju eurihaline vrste (ribe, rakovi, školjke); služe kao mrijestilišta (npr. losos, jegulja). Pored toga istaknuta je visoka produktivnost, zbog dotoka hranjiva iz rijeka, sa halofitnim biljkama (npr. spartina), rakovi i školjke s osmotskom regulacijom. Prirodni su filteri, zadržavaju sedimente i nutrijente. Ugroženost zbog urbanizacija, zagađenje, ribolova i klimatskih promjena.

Morfologija okeanskog dna ima važnu ulogu u raspodjeli morskih ekosistema (slika 7.1.3.3). Istaknut je kontinentalni šelf kao blagi nagib, širok 10–300 km, kontinentalna padina, strm nagib, oceanske brazde koje su vulkanskog porijekla, izdignute 2000–4000 m iznad dna, često tvore otoke. Dalje slijede dubokomorski jarci koji dostižu dubine i do 11 km. Morfološke cjeline okeanskog dna, kontinentalni spust, oceanska brazda i okeanski jarak predstavljaju posebna staništa u kojima se razvijaju karakteristične zajednice organizama. Prilagođene specifičnim ekološkim uvjetima poput dubine, pritiska, dostupnosti svjetlosti i količine organske materije. Kontinentalni spust obilježava nagli prijelaz sa šelfa prema većim dubinama. U ovom pojasu vlada smanjen intenzitet svjetlosti, pa dominiraju heterotrofni organizmi. Tipični predstavnici su različite grupe rakova (amfipodi, izopodi), dubokomorske ribe s bioluminiscentnim organima (npr. lanternarke), mekušci i morski krastavci (Holothuroidea). Na prijelaznim dijelovima mogu se razvijati i hladnovodni koralni, poput vrste *Lophelia pertusa*, koji grade kompleksne biocenoze.



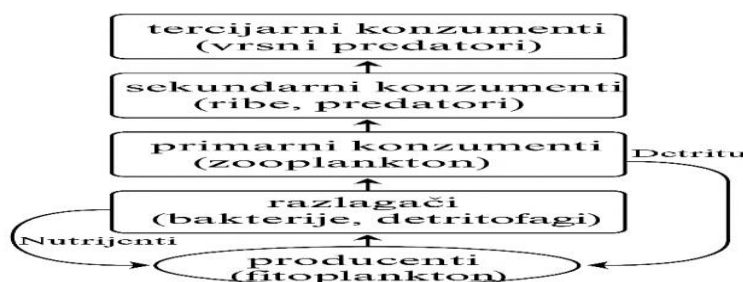
Slika 7.1.3.3. Presjek okeanskog dna s označenim šelfom, padom, brazdom i jarkom.

Oceanska brazda predstavlja blaži nagib gdje se akumulira materijal spušten sa viših dijelova dna. Zbog taloženja organske materije, ovo područje je relativno bogato hranjivim tvarima i podržava raznovrsne detritofage. Uobičajeni organizmi su morske zvijezde, ježinci, morski krastavci i mnoge vrste poliketa. Ovdje prevladavaju dubokomorski bentoski organizmi koji koriste organski talog i filtriraju sitne čestice. Okeanski jarak čini najdublje dijelove okeanskog dna, poput Marijanskog jarka. U ovim ekstremnim uvjetima, pri visokim pritiscima i potpunom mraku, žive specijalizirani organizmi. Među njima se izdvajaju ksenofijofore (gigantski jednoćelijski organizmi), amfipodi, polihete i hadalne ribe (npr. puzavice). U blizini hidrotermalnih izvora, ukoliko su prisutni, formiraju se posebne zajednice zasnovane na kemোসинтези, uključujući bakterije hemosintetizatore, školjke, cjevaste crve (*Riftia pachyptila*), rakove i puževe. Na ovaj način svaka zona okeanskog dna ima specifičan sastav faune, čime se potvrđuje uska povezanost morfoloških jedinica s ekološkim procesima i biodiverzitetom dubokih mora.

7.1.4. Lanac ishrane i mreža ishrane u morima

Lanac ishrane u morima počinje s producentima, fitoplanktonom, algama i cijanobakterijama koji fotosintezom pretvaraju anorganske nutrijente (azot, fosfor) i energiju svjetlosti u organsku materiju. Na njih se nadovezuju primarni konzumenti, zooplankton, mali rakovi i biljojede/herbivorne ribe, koji koriste proizvedenu organsku tvar. Sljedeći nivo čine sekundarni konzumenti, ribe mesožderi i drugi predatori, a na vrhu piramide nalaze se tercijarni konzumenti, veliki predatori poput morskih sisara ili morskih pasa. Za razliku od jednostavnog lanca, mreža ishrane predstavlja kompleksnu mrežu odnosa, jer većina organizama koristi više

različitih izvora hrane. Tako fitoplankton ne služi samo kao hrana zooplanktonu već i nekim filtratorima, dok zooplankton koriste mnoge vrste riba, rakova i želatinoznih organizama. Na taj način se ostvaruje višesmjerna povezanost i stabilnost ekosistema. Organska materija u morima kruži kroz povezane procese produkcije, konzumacije i razgradnje. Fitoplankton kao primarni producenti proizvode organsku materiju, koja prelazi na konzumente kroz ishranu. Dio organske materije trofički prelazi na više nivoe, dok značajan dio tone prema morskom dnu kao detritus. U sedimentu i bentosu detritus razgrađuju bakterije i razlagači, oslobađajući nutrijente. Oslobođeni nutrijenti vraćaju se u vodeni stupac, gdje ih fitoplankton ponovo koristi u procesu fotosinteze. Time se zatvara kruženje tvari i osigurava održivost ekosistema (Shema 7.1.4.1).



Shema 7.1.4.1. Kruženje organske materije u morima i okeanima

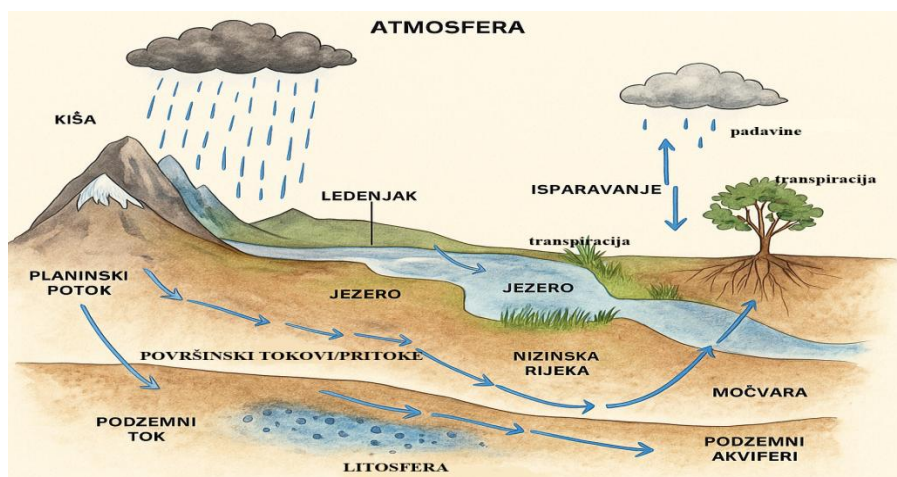
Protok energije kroz morske ekosisteme slijedi zakon trofičkih nivoa. Od ukupne energije koja ulazi u sistem kroz fotosintezu, na svaki viši trofički nivo prenosi se u prosjeku oko 10%. Ostatak energije se troši kroz disanje, kretanje, izlučivanje i održavanje životnih funkcija, te prelazi u togasu. Zbog toga se biomasa i brojnost organizama smanjuju prema višim trofičkim nivoima. U dubljim slojevima okeana, gdje nema svjetlosti, izvor organske materije predstavljaju detritus i morski snijeg (agregati organskog materijala koji tonu s površine). Ove čestice koriste mikroorganizmi i bentoski organizmi (npr. mnogi maločetinaši, školjke i rakovi), koji razgrađuju organske spojeve i tako omogućavaju regeneraciju nutrijenata.

U posebnim ekosistemima poput hidrotermalnih izvora, osnovu hranidbenih lanaca čine hemosintetski mikroorganizmi, koji ne koriste svjetlost, već energiju hemijskih spojeva (npr. H_2S). Na globalnom nivou, morski trofički lanci imaju ključnu ulogu u biogeohemijskim ciklusima i u regulaciji klime. Fitoplankton godišnje fiksira ogromne količine ugljikovog dioksida, čime doprinosi biološkoj pumpi ugljika, mehanizmu koji prenosi CO_2 iz atmosfere u okeanske dubine. Time okeani djeluju kao značajan ugljikov ponor, ali su istovremeno osjetljivi na promjene temperature, acidifikaciju i eutrofikaciju.

Antropogeni uticaji, poput prevelikog izlova riba, zagađenja, unošenja invazivnih vrsta i klimatskih promjena, mogu narušiti ravnotežu mreže ishrane. Uklanjanjem ključnih predatora ili smanjenjem biomase fitoplanktona remeti se stabilnost čitavog sistema. Dolazi do trofičkih kaskada, gdje promjena u jednoj karici lanca ima domino-efekat na sve ostale trofičke nivoe.

7.2. Kopnene vode

Kopnene vode obuhvataju sve površinske i podzemne vodene ekosisteme koji se nalaze izvan mora i okeana. Njihovo porijeklo vezano je za hidrološki ciklus, u kojem se voda stalno kruži između atmosfere, litosfere i biosfere. Padavine (kiša, snijeg) dopijevaju na površinu tla, gdje dio vode otiče površinski u obliku potoka i rijeka, dio se infiltrira u podzemlje stvarajući podzemne tokove, a dio se isparava ili biva usvojen biljkama putem transpiracije. Ovaj dinamički proces oblikuje različite tipove vodenih tijela na kopnu (slika 7.2.1.).



Slika 7.2.1. Kopnene vode i hidrološki ciklus

Kopnene vode karakterizira velika prostorna i vremenska raznolikost: od planinskih potoka i ledenjačkih jezera, preko nizinskih rijeka i močvara, do podzemnih akvifera. Ta heterogenost uslovljava izuzetno bogatstvo bioloških zajednica i visok ekološki značaj. Postoji više pristupa u podjeli kopnenih voda (tabela 7.2.1.).

Tabela 7.2.1. Podjela kopnenih voda

Kriterij podjele	Kategorija	Opis
Prema dinamici	Tekuće (lotički ekosistemi)	Rijeke, potoci i bujice; karakterizira ih stalno kretanje vode u jednom smjeru.
	Stajaće (lentički ekosistemi)	Jezera, bare, akumulacije; voda miruje, cirkulacija je uglavnom vertikalna i sezonska.
Prema porijeklu	Prirodne	Nastale prirodnim procesima (tektonskim pokretima, ledenjačkom erozijom, meandriranjem rijeka, padavinama).
	Vještačke	Nastale ljudskom aktivnošću (akumulaciona jezera, kanali, ribnjaci, vještački rezervoari).
Prema položaju	Površinske vode	Rijeke, potoci, jezera, močvare i tresetišta.
	Podzemne vode	Freatske i arteške vode, izvori, akviferi.
Prema hemijskom sastavu	Slatke vode	S niskom koncentracijom rastvorenih soli (< 0,5 g/L), najrasprostranjenije i ekološki najznačajnije.
	Slane i poluslane vode	U endoreičnim basenima, slanim jezerima ili lagunama.

Kopnene vode razlikuju se u zavisnosti od klimatske zone (npr. ledenjačka jezera u polarnim i planinskim predjelima, sezonski potoci u aridnim zonama). Također, geološka podloga (krečnjak, granit, bazalt) određuje hemizam vode (npr. tvrdoća, pH). Ekološki značaj kopnenih voda je višestruk, kako za prirodu uopće tako i za čovjeka. Prvenstveno da su kopnene vode stanište za ogroman broj organizama (alge, makrofiti, ribe, vodozemci, beskičmenjaci, ptice). Aktivno učestvuju u regulaciji mikroklimе i hidrološkog režima i povezivanju kopnenih i morskih ekosistema kroz tok materije i energije. Hidrobiološki značaj ukazuje da su kopnene vode ključne za biogeohemijske cikluse ugljika, dušika, fosfora i drugih elemenata. U procesima autopurifikacije osiguravaju prirodno pročišćavanje kroz razgradnju i taloženje organskih materija. Osnovni resurs su za vodosnabdijevanje, poljoprivredu i industriju. Izvor su energije (hidrocentrale na rijekama), podloga za ribarstvo, rekreaciju i turizam. Najznačajniji su za regulaciju poplava i očuvanje kvaliteta tla u priobalnim područjima. Sve je to u okviru socioekonomskog značaja ovih voda.

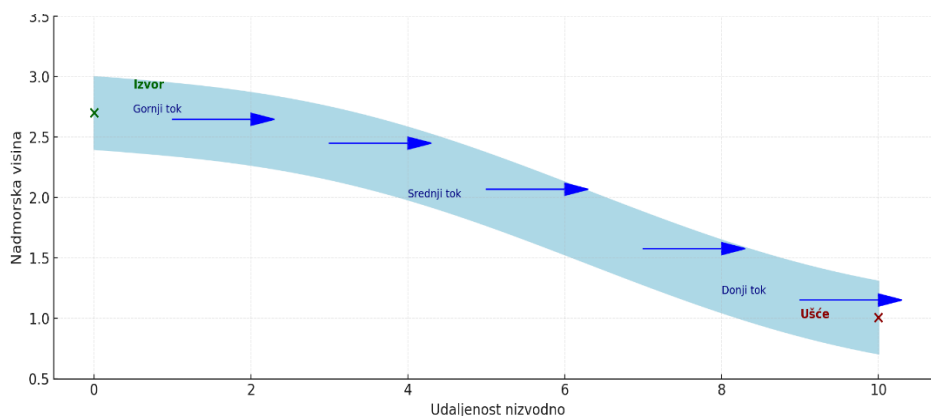
Kopnene vode su među najugroženijim ekosistemima zbog zagađenja, regulacije korita, klimatskih promjena i prekomjerne eksploatacije. Očuvanje rijeka, jezera i močvara predstavlja osnovni uslov za zaštitu biološke raznolikosti i ekosistemskih usluga. Kopnene vode čine samo oko 2,5% ukupne vode na Zemlji, od čega je 69% u ledu i snijegu, 30% u podzemnim vodama, <1% u rijekama, jezerima i močvarama (dostupno biosferi). Važno je naglasiti, jer objašnjava zašto su kopnene vode jedan od najograničenijih resursa. Antropogeni uticaji kao što su eutrofikacija, regulacija riječnih tokova, uništavanje močvara, klimatske promjene, unošenje invazivnih vrsta su najznačajniji pritisci koji remete ekološku stabilnost. Ovo daje kontekst zašto su kopnene vode među najugroženijim ekosistemima na svijetu (IUCN, UNEP), Njihova raznolikost, od planinskih izvora do velikih riječnih sistema i jezera, čini ih temeljem biodiverziteta i održivog razvoja. Zbog toga je nužno razumjeti njihov nastanak, tipove i funkcije, kako bi se osigurala adekvatna zaštita i racionalno upravljanje ovim dragocjenim ekosistemima. Naziv kopnene vode u klasičnoj limnološkoj literaturi (npr. Hutchinson, 1967, Wetzel, 2001) koristi se za sve slatkovodne i slane ekosisteme na kopnu, nasuprot morima i okeanima. Podrazumijeva rijeke, potoke, jezera, močvare, tresetišta i podzemne vode. Međutim, termin se može činiti nedovoljno preciznim, jer:

- „kopno“ sugerira da se radi samo o površinskim vodama na kopnu, dok se u stvarnosti uključuju i podzemne vode u dubljim slojevima litosfere,
- Kaspijsko jezero je najveće zatvoreno vodeno tijelo na Zemlji, površina mu je na oko –28 m ispod nivoa mora. Najdublji dijelovi dna leže znatno ispod razine mora. Hidrološki je endoreičan sistem (nema prirodnog otjecanja u more, već voda završava evaporacijom). Mrtvo more leži na oko –430 m nadmorske visine (ispod nivoa mora). S dubinom od oko 300 m, njegovo dno dopijeva do približno –730 m n.v. Jezero Asal (Džibuti, Afrički rog) nalazi se na oko –155 m nadmorske visine, što ga svrstava među najdublje kontinentalne depresije na svijetu. Ujedno je jedno od najslanijih jezera na Zemlji. Slana jezera u pustinji Taklamakan (Kina), kao i druga endoreična jezera, takođe se nalaze u depresijama ispod nivoa mora,

- precizniji izraz, posebno u međunarodnim dokumentima (npr. UNESCO, Ramsarska konvencija) koristi termin kontinentalne vode ili *inland waters* (unutrašnje kontinentalne vode) što obuhvata i površinske i podzemne sisteme.

7.2.1. Tekuće

Tekuće predstavljaju specifične lotičke ekosisteme u kojima je dominantna karakteristika stalno kretanje vode u jednom smjeru, od izvora ka ušću. Za razliku od jezera i bara (*lentic* ekosistemi), u tekućicama hidrodinamika određuje strukturu zajednica, kruženje materije i tok energije. Termin *lentic* i *lotic* u naučnu su upotrebu prvi uveli *Needham i Lloyd* (1916) kako bi razlikovali stajaće od tekućih vodenih ekosistema. Njihovu definiciju je precizirao *Paul S. Welch* (1935) u djelu *Limnology*, dok je *G. Evelyn Hutchinson* (1957) u svom kapitalnom djelu *A Treatise on Limnology* terminologiju sistematizirao i uveo u savremenu limnološku klasifikaciju. Međutim, same riječi potiču iz latinskog jezika *lotus* = opran, protočan, lotički = protočni ekosistem i sa druge strane su *lentus* = miran, spor, stajaći (*lentički* = stajaći ekosistem). Tekuće su tip vodenog ekosistema koji uključuju sve vrste tekućih voda, kao što su rijeke, potoci i izvori. Ovaj ekosistem je dinamičan, sa stalnim kretanjem vode (protok), što utiče na njegovu strukturu, biologiju i ekologiju. Brzina protoka varira zavisno od nagiba terena, širine korita, količine padavina i godišnjeg doba. Kretanje vode uzrokuje eroziju obala i korita rijeka, dok se istovremeno talože sedimenti na različitim mjestima (shema 7.2.1).



Shema 7.2.1. Prikaz toka vode u tekućici od izvora do ušća

Ovi procesi oblikuju staništa u ekosistemu tekućica. U tekućicama je izražena raznovrsnost staništa za hidrobionte. Stanište je prostor u kojem živi određena vrsta organizma ili skupina organizama, koji pruža sve potrebne uslove za njihov opstanak, rast i razmnožavanje. Uključuje fizičke (npr. temperatura, voda, svjetlost), hemijske (kiseonik, ugljen dioksid, nitrati, fosfati isl.) i biološke faktore (npr. dostupnost hrane, prisutnost drugih organizama, kompeticija isl.). Glavni, mjerljivi, parametri tekućica (sa naglaskom na rijeke) grupirani su u: hidrološki parametre koji određuju dinamiku vode i oblik staništa (tabela 7.2.2).

Tabela 7.2.2. prikaz hidroloških parametara tekućice

parametar	objašnjenje
protok (q)	Količina vode koja prođe kroz presjek rijeke u jedinici vremena (m ³ /s).
proticaj	Režim protoka tokom godine (hidrogram, sezonske oscilacije, poplave, suše).
vodostaj	Visina vodene površine u odnosu na referentnu tačku.
širina korita	Varira od izvora do ušća, utiče na svjetlosni režim i raspodjelu biocenoza.
dubina vode	Određuje termalnu slojevitost, svjetlosnu penetraciju i stanište.

Fizičke parametri koji opisuju osnovna fizička svojstva (temperatura, elektroprovodljivost, turbiditet) i hemijski parametri daju informaciju o kvalitetu vode, stepenu zagađenja i mogućnostima za život hidrobionata (tabela 7.2.3.).

Tabela 7.2.3. Prikaz fizičko-hemijskih parametara tekućica

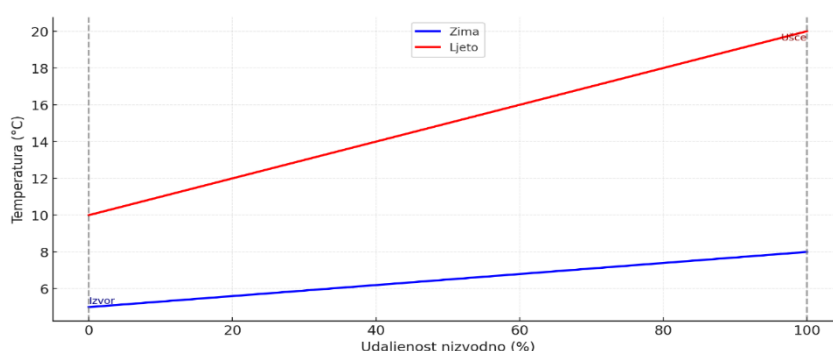
fizički parametar	Objašnjenje
Temperatura	Određuje rastvorljivost kiseonika i biološke procese.
Providnost / turbiditet	Količina suspendovanih čestica; važna za fotosintezu.
Boja i miris	Indikatori organske materije ili zagađenja.
Elektroprovodljivost (EC)	Fizički indikator koncentracije rastvorenih iona; veće vrijednosti ukazuju na veću mineralizaciju ili antropogeni uticaj.
hemijski	Objašnjenje
Rastvoreni kiseonik (O ₂)	Presudan za aerobne organizme.
pH	Kiselost ili bazičnost (optimalno 6,5–8,5).
Ukupni ugljik (Total C, DOC/TOC)	Pokazatelj organskog opterećenja.
Biološka potrošnja kiseonika (BPK ₅)	Količina O ₂ potrebna mikroorganizmima za razgradnju organske materije u 5 dana.
Hemijska potrošnja kiseonika (HPK)	Količina O ₂ potrebna za hemijsku oksidaciju organske materije (indikator ukupnog organskog zagađenja).
Nitrati, nitriti, amonij	Nutrijenti; povećane koncentracije ukazuju na zagađenje.
Fosfati (PO ₄ ³⁻)	Ključan nutrijent, uzrokuje eutrofikaciju.
Teški metali (Pb, Cd, Hg, Cr, Cu, Zn...)	Toksični kontaminanti porijeklom iz industrije i otpadnih voda.
Ukupna tvrdoća	Određena Ca ²⁺ i Mg ²⁺ jonima; zavisi od geološke podloge.

Iz prikaza (grafikon 7.2.1.) promjene temperature vode od izvora do ušća: Zimi (plava linija) temperatura se mijenja od izvora ka ušću (5–8 °C), voda je hladna i relativno stabilna sa blagim povećanjem prema izvoru. Kod krških izvora sezonsko variranje temperature je vrlo malo i najčešće iznosi oko 2 °C, jer voda dolazi iz podzemnih rezervoara stabilne temperature. Ljeti (crvena linija): na izvoru hladnija (oko 10 °C), a nizvodno raste do 20 °C zbog zagrijavanja i sporijeg toka. U toku zime, temperatura vode u rijekama se smanjuje nizvodno zbog manjeg

uticaja podzemnih izvora i povećane izloženosti površine vode niskim temperaturama. Ako temperatura površinskog sloja dostigne 0 °C ili niže, dolazi do formiranja leda na mirnijim i sporijim dijelovima toka, naročito u donjem toku rijeka i u plitkim zonama. U planinskim dijelovima (gornji tok) voda je često stalno u pokretu i turbulenciji, pa se led obrazuje sporadično ili u obliku ledenih mostova i ledenih iglica koje se vežu za supstrate. U nizijskim dijelovima sa smanjenom brzinom i većom širinom korita, led se može formirati kao:

- površinski led – formira se kad se cijela površina rijeke zaledi,
- pancirni led– mješavina leda i vode u toku procesa smrzavanja i
- ledene ploče – kontinuirani slojevi leda na površini ušća i mirnijih dijelova.

U toku zime, temperatura vode u rijekama se smanjuje nizvodno zbog manjeg uticaja podzemnih izvora i povećane izloženosti površine vode niskim vanjskim temperaturama.



Grafikon 7.2.1. Vrijednosti temperature vode u tekućicama u toku ljeta i zime

Rijeke i potoci sadrže različita staništa, poput brzaka (dijelovi sa brzim tokom), virova (dublja područja sa sporijim tokom), obala i korita. Svako stanište podržava različite vrste biljaka i životinja idr. organizama. U tekućicama rastu specijalizovane vodene biljke, poput vodenih mahovina, paprati, algi i više biljke (npr. trska). Biljni svijet zavisi od dubine vode, kvaliteta svjetla i protoka. Životinjske vrste u tekućicama uključuju mnoge vrste riba (npr. pastrmka, som, lipljen, škobalj idr.), vodozemca, mekušca (puževi i školjke), sunđera, hidre, maločekinjaši, pijavice, pauci, krpelji, insekti (vodeni insekti, imaga ili njihovi preimaginalni stadiji, larve i lutke), rakovi, a također i ptice (poput čaplji i pataka). Bakterije, gljivice i alge su ključni za procese razgradnje organske materije i cikluse hranjivih materija u tekućicama. Hranljive materije često dolaze izvan tekućice (lišće, grančice, organska materija), posebno u gornjim dijelovima toka gdje su rijeke okružene šumom (alohotona organska materija). Alge i vodene biljke koje vrše fotosintezu doprinose primarnoj proizvodnji unutar ekosistema (autohotona organska materija). Primarni potrošači, poput biljojeda i detritofaga (organizmi koji se hrane raspadnutim organskim materijalom), podržavaju veće predatore, poput riba i vodozemaca. Tekućice imaju ključnu ulogu u hidrološkom ciklusu, jer su putevi kojima voda s kopna ulazi u mora i jezera. Voda iz atmosfere ulazi u rijeke putem kiše i podzemnih voda. Tekućice prolaze kroz periodične poplave koje donose hranljive materije iz korita na okolne obale, podržavajući raznolikost biljaka i životinja u priobalnim područjima. Koncentracija rastvorenog kiseonika varira duž toka rijeke, a ona je ključna za život vodenih organizama. Voda u gornjim dijelovima tekućice obično ima visoke koncentracije kiseonika, dok u nižim dijelovima, zbog organskih materija i sporijeg protoka, kiseonika može biti manje. Količina

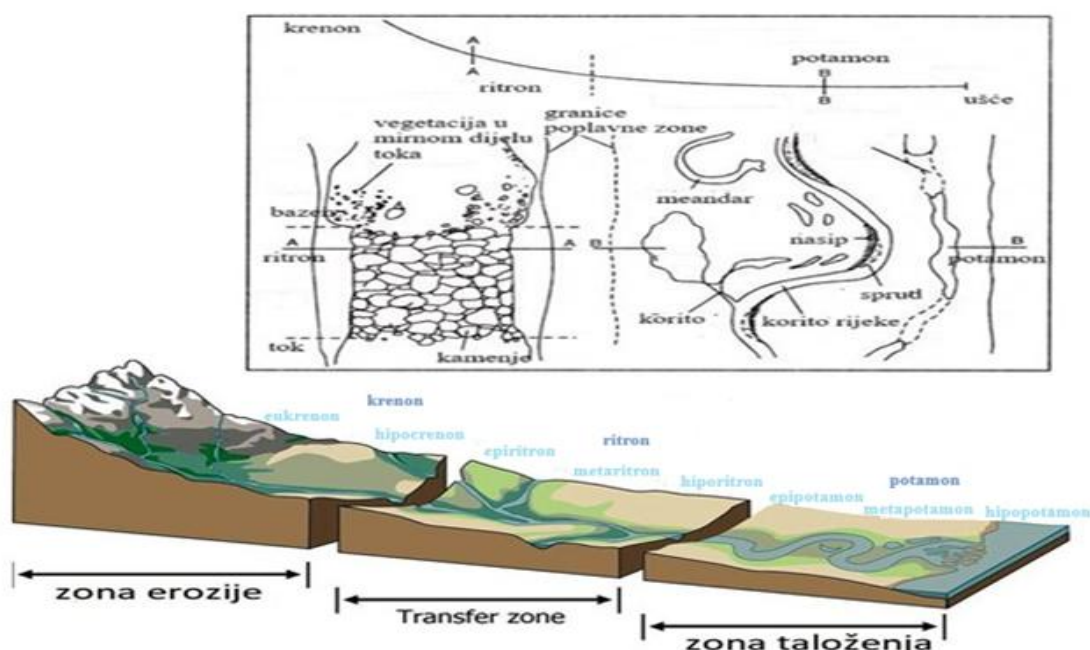
nitrata, fosfata i drugih hemijskih spojeva često zavisi od ljudskih aktivnosti, poput poljoprivrede i urbanizacije. Industrijski otpad, pesticidi, kanalizacija i hemikalije ozbiljno narušavaju kvalitet vode i biološku raznolikost tekućica. Brane, preusmjeravanje rijeka i kanali mogu promijeniti prirodne procese, utičući na biljni i životinjski svijet. Sve češće se sprovode aktivnosti restauracije rijeka, koje imaju za cilj obnovu prirodnih ekosistema, poboljšanje kvaliteta vode i zaštitu biološke raznovrsnosti. Tekućice igraju ulogu u filtriranju sedimenata i zagađivača, što pomaže očuvanju kvaliteta vode u cijelom ekosistemu. Mnoge vrste riba i ptica koriste tekućice kao migracijske puteve između različitih staništa, posebno za razmnožavanje, s druge strane obale tekućica služe kao stanište za mnoge vrste ptica i drugih životinja koje tu nalaze hranu i sklonište. Tekućice su složeni i dinamični ekosistemi, koji održavaju bogatstvo biljnih i životinjskih vrsta, osiguravaju ključne ekološke usluge, te su važni za održavanje zdravlja šire životne sredine. Razumijevanje njihovih karakteristika omogućava bolju zaštitu i očuvanje ovog važnog ekosistema. Giller i Malmquist (1998) u svojoj studiji o lotičkim ekosistemima istakli su nekoliko ključnih karakteristika ovih dinamičnih sredina, koje se odnose na ekosisteme tekućih voda poput rijeka, potoka i izvora (tabela 7.2.4). Giller i Malmquist su ovim istraživanjem ukazali na složenost lotičkih ekosistema, koje možemo zamisliti kao žive, pulsirajuće trake života koje povezuju različite ekosisteme. Od sporih meandrirajućih rijeka do brzih planinskih potoka, oni su vitalni za život kako organizama u vodi, tako i za one izvan nje.

Tabela 7.2.4. Karakteristike tekućica prema Giller i Malmquist (1998)

Stalno kretanje vode	U lotičkim ekosistemima, voda je u neprekidnom pokretu. Ova osobina stvara varijacije u protoku, brzini i dubini, koje utiču na organizme koji tu žive. Ribe, insekti i biljke koje nastanjuju ove vode razvile su specifične adaptacije kako bi se nosile sa stalnim protokom – poput ravnih tijela ili sposobnosti da se drže za podlogu kako ih voda ne bi odnijela.
Longitudinalna povezanost	Voda u ovim ekosistemima ne teče samo kroz fizički prostor, već se i biološke i hemijske karakteristike mijenjaju duž toka. Hranljive materije i organska materija koje dolaze iz šumskih područja iznad rijeke bivaju transportovane nizvodno, gdje podržavaju ekosistem i utiču na vrste koje tamo obitavaju. Ova "povezanost" obuhvata energiju, materije i organizme koji putuju cijelim tokom.
Fluktuacije u fizičkoj i hemijskoj sredini	Promjene u nivou vode, temperaturi, količini kiseonika i pH vrijednosti česte su u lotičkim ekosistemima. Ove fluktuacije mogu biti sezonske ili zavisiti od padavina, otapanja snijega ili sušnih perioda. Takve varijacije direktno utiču na organizme – od mikroba do većih životinja, koji se prilagođavaju promjenljivim uslovima.
Heterogenost staništa	Rijeke i potoci ne nude samo jedan tip staništa. Oni obuhvataju različite mikro-staništa kao što su brzaci, tihe vode, korita i obale. Ova heterogenost stvara uslove za različite vrste organizama, omogućavajući bogatstvo biodiverziteta u lotičkim ekosistemima.
Interakcije sa okolnim ekosistemima	Tekućice vode nisu izolovane – one su u stalnoj interakciji sa kopnenim ekosistemima kroz koje protiču. Na primjer, opalo lišće iz okolnih šuma može biti važan izvor hrane za organizme u vodi, dok ptice i sisari koriste rijeke kao izvor vode i hrane.

Male zone u okviru tekućica, poput kamenja i šljunka, mogu služiti kao mikrostaništa za mikroorganizme, insekte i larve. Duž toka su izražene promjene fizičkih karakteristika u tekućicama, u blizini izvora tekućica (krenona) voda je obično hladna (niske vrijednosti temperature), bistra i bogata kiseonikom, sa relativno brzim protokom. U srednjem toku kako

tekućica prolazi kroz različite predjele, voda postaje nešto toplija, a brzina struje opada (slika 7.2.2). Ovdje se miješaju hranljive materije i sediment. Tradicionalna podjela tekućica na gornji, srednji i donji tok potiče iz klasične geografije i hidrologije te se koristi mnogo prije razvoja moderne limnologije. Ekološka longitudinalna podjela tekućica potiče od Augusta Thienemanna (1920–1931), koji je razlikovao tri osnovne zone: krenon, ritron i potamon. Krenon obuhvata izvorišnu zonu sa stabilnim, hladnim uslovima i specijaliziranom faunom; ritron označava brdsko-planinske dionice sa brzim, hladnim i dobro oksigeniranim vodama; dok potamon predstavlja toplije, sporije i sedimentom bogate nizijske dijelove rijeka. Ovaj osnovni model kasnije je proširen. Izvorišna zona (krenon) u radovima Ward (1985), Allana i Castilla (2007), kao i u evropskim bentos vodičima (Tachet i saradnici), danas se redovno dijeli na eukrenon (mjesto izvira) i hipokrenon (kratki, već formirani izvorni tok). Ritron je u savremenim studijama dodatno razložen na epiritron i euritron, čime se prepoznaje prelaz između najbržih planinskih dionica i umjereno brzih tokova u brdskim predjelima. Nizijska zona (potamon) detaljnije je razrađena kroz potamološku regionalizaciju Illiesa i Botosaneanu (1963) te novije ekološke tipologije. Danas se u literaturi često razlikuju eupotamon, metapotamon i hipopotamon, koji opisuje donje, najsporije i najtoplije dionice rijeka u blizini ušća, sa finim muljem, nižim koncentracijama kiseonika i tolerantnim zajednicama. Na ovaj način savremena hidrobiološka podjela tekućica zadržava Thienemannovu osnovnu strukturu (slika 7.2.2.), ali uključuje preciznije podzone koje omogućavaju detaljnije razumijevanje ekoloških gradijenata od izvora do ušća.



Slika 7.2.2. Shema longitudinalne podjele tekućice, sa karakteristikama (prilagođeno prema Allan & Castillo 2007 i Wetzel 2001.)

7.2.1.1. Karakteristike zona tekućica

Krenon je zona tekućica koja obuhvata izvorišne dijelove vodotoka, gdje voda izbija iz podzemlja i započinje svoj površinski tok. Krenonska zona dalje se dijeli na tipove sa

specifičnim karakteristikama, a zonalnost krenona podrazumijeva podjelu prema fizičko-hemijskim uslovima na eukrenon (izvor) – stvarno izvorište gdje voda izbija iz podzemlja, i hipokrenon (prijelazni izvor) – područje neposredno ispod eukrenona, gdje voda počinje teći i postepeno prelazi u ritron (tabela 7.2.5). Krenon karakterišu niske i tokom godine vrlo stabilne temperature vode, visoka koncentracija rastvorenog kiseonika te tok koji može biti vrlo slab ili izrazito brz, zavisno od tipa izvora i konfiguracije terena. Flora i fauna prilagođene su hladnim, čistim i dobro oksigeniranim vodama, a tipične organizme čine mahovine, hladnovodne vrste insekata i pojedini vodozemci.

U okviru potamološke regionalizacije evropskih rijeka razlikuju se dvije jasno prepoznatljive zone: ritron, odnosno brdsko-planinski dio vodotoka s brzim tokom, i potamon, koji obuhvata spore, široke i nizijske dijelove donjih tokova rijeka. U tropskim rijekama pravi ritron često izostaje jer temperatura vode rijetko pada ispod 20 °C, dok su u umjerenim klimatskim područjima ritronske zone duže i bolje razvijene. U srednjem dijelu ritrona tok postaje umjereniji usljed širenja korita i promjena u karakteru obala, pa se ovaj dio ponekad opisuje kao prijelazna zona. Brzaci imaju snažan, turbulentan protok i grubo dno sastavljeno od kamenja, šljunka ili stijena, uz ograničen razvoj pričvršćene vegetacije. Bazeni, koji se smjenjuju s brzacima, odlikuju se sporijim tokom, finijim sedimentom i mjestimičnim razvojem ukorijenjene vegetacije. U donjim dijelovima vodotoka, kako se rijeka približava ušću, tok se usporava, povećava se taloženje finog sedimenta, a voda je često bogatija hranljivim materijama, dok koncentracije rastvorenog kiseonika opadaju. U većini umjerenih rijeka ovaj dio odgovara potamonu, pri čemu je potamon ekološka zona, dok je donji tok prostorno-geomorfološki pojam.

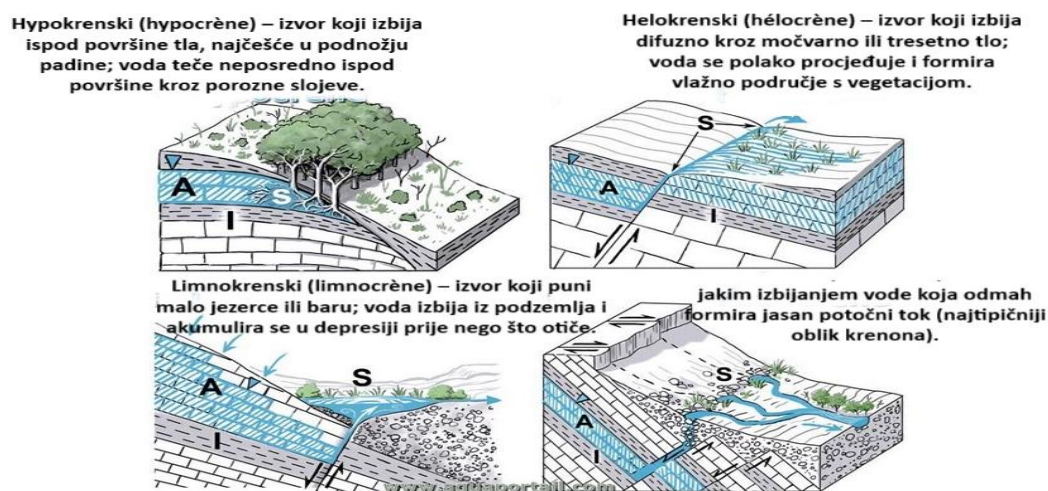
Ritron obuhvata brdsko-planinske dijelove rijeka s brzim tokom, hladnijom vodom i visokim koncentracijama kiseonika. U njemu dominiraju organizmi prilagođeni brzim vodama, uključujući salmonidne ribe te larve insekata kao što su Goeridae, Heptageniidae i Simuliidae, kao i druge takse s prilagodbama za prianjanje uz podlogu. Za ritron su karakteristični uski i strmi brzaci, slapovi te smjenjivanje plićih brzaka i dubljih bazena.

Tabela 7.2.5. Karakteristike *eu-eukrenona* i *hipokrenona*

<i>eu-krenon</i>	<i>hipokrenon</i>
Voda je hladna i konstantne temperature tokom godine	Temperatura vode se postepeno povećava kako teče dalje od izvora
Visok nivo rastvorenog kiseonika, ali niska brzina toka	Brzina struje je nešto veća nego u eukrenonu, ali još uvijek relativno spora
Mala fluktuacija u nivou vode jer izvor dolazi iz podzemnih rezervoara	prisutne fluktuacije u nivou voda
Obično se prostire u planinskim ili brdskim predjelima	Povećava se prisustvo sedimenta i organskih materijala
Ograničen broj vrsta koje su specijalizovane za život u ovim uslovima, kao što su hladnovodni insekti, mahovine i alge	Veći biodiverzitet nego u eukrenonu, s većim brojem biljnih i životinjskih vrsta. Prisutne su vrste koje preferiraju nešto toplije i mirnije vode u poređenju s pravim izvorima.

Krenon može imati različite oblike, određene hidrološkim uslovima i konfiguracijom terena (geomorfologijom), što utiče na formiranje specifičnih ekoloških staništa (slika 7.2.3). Limnokrenon predstavlja izvor u jezeru ili bari (*limne* = jezero), pri čemu voda izvire ispod vodene mase, pa se samo izvorište nalazi pod površinom stajaće vode. Karakteriše ga odsustvo jasno uočljivog toka na mjestu izviranja, jer se voda neposredno miješa sa jezerskom ili

barskom vodom. Organizmi su prilagođeni sporim ili stagnirajućim uslovima, dok stabilan dotok hladnije i mineralima bogate vode stvara specifične mikrohabitate. U takvim uslovima razvijaju se perifiton i vodena vegetacija tolerantna na stalnu vlagu i smanjenu količinu svjetlosti, dok faunu uglavnom čine bentoski i litoralni organizmi. Limnokrenoni imaju značajnu ulogu kao refugijumi, jer obezbjeđuju hladnija i kiseonikom bogatija staništa unutar šireg jezerskog ili barskog ekosistema. Helokrenon obuhvata izvore u močvarnim i tresetnim područjima, gdje dominiraju mahovine i višegodišnje biljke, uz bogatu zajednicu mikroorganizama specijalizovanih za razgradnju organske materije. Reokrenon čine izvori sa brzim protokom, koje naseljavaju hladnovodne vrste riba, larve insekata i biljke prilagođene brzim i hladnim tokovima.



Slika 7.2.3. Tipovi krenona i karakteristike (A – *akvifer* (vodonosni sloj) – porozni sloj stijena ili sedimenta koji sadrži podzemnu vodu i kroz koji ona slobodno cirkuliše; I – *impermeabilni sloj* (nepropusni sloj) – sloj stijena (npr. glina, lapor, kompaktni vapnenac) koji ne propušta vodu i sprječava dalje prodiranje u dublje slojeve i S – *izvor* (eng. *spring*) – mjesto gdje podzemna voda izbija na površinu tla, tj. gdje započinje površinski tok (krenon). (www.aquaportal.com, prilagođeno)

Općenite karakteristike krenonskih područja uključuju nisku i relativno konstantnu temperaturu vode, obično između 5 i 10 °C, uz male godišnje varijacije. Temperatura je stabilna zahvaljujući dotoku podzemnih voda. Voda u krenonu je obično izuzetno čista i bogata kiseonikom, iako hemijski sastav može varirati u zavisnosti od vrste podloge kroz koju voda prolazi (npr. karbonatne ili silikatne stijene). Krenonska područja obično imaju spor protok vode, posebno u eukrenonskoj zoni, dok se brzina toka može povećavati u hipokrenonu i reokrenonu. Sediment može varirati od kamenitog do muljevitog i tresetnog, a tip podloge ima ključnu ulogu u određivanju sastava zajednica koje naseljavaju ova područja.

Biološka raznovrsnost krenonskih područja je specifična i često ograničena na organizme visoko prilagođene hladnim, oksigeniranim i stabilnim uslovima. U sastavu flore (fitobentosa) javljaju se mahovine, alge i vodene biljke prilagođene hladnim vodama. Životinjska komponenta (zoobentos) uključuje hladnovodne insekte (npr. larve kamenjarki, vodenih cvjetova, tulara i dvokrilaca), dok se u reokrenonima mogu pojaviti i ribe poput pastrmke, kao i vodozemci te mikroorganizmi karakteristični za hladna okruženja. Krenonske zone, kao dio riječnih sistema, imaju važnu ulogu u formiranju ekosistema u planinskim i izvorišnim područjima. Različiti tipovi krenona pružaju specifična staništa za organizme prilagođene

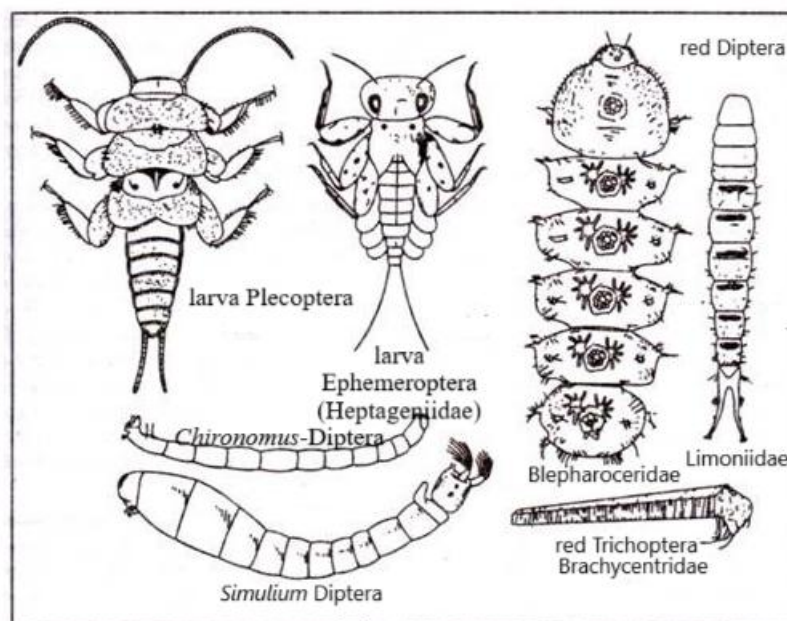
hladnim i oksigeniranim uslovima, dok stabilne temperature i čista voda omogućavaju razvoj specifičnih ekoloških zajednica. Ritron, u kontekstu tekućica, predstavlja gornji, brzi dio riječnog toka u kojem je izražen uticaj obalne (riparijske) vegetacije i unos alohtone organske materije, što stvara specifična staništa za brojne organizme. Ključne karakteristike ritrona (tabela 7.2.6) obuhvataju protok vode, strukturu vegetacije, biodiverzitet, kvalitet vode, sezonske promjene i povezanost vodotoka sa slivom.

Tabela 7.2.6. Karakteristike ritrona tekućice

Karakteristika	Opis
prijelazna zona	Ritron zona je dio toka između izvorišne zone (krenon/hipokrenon) i nizvodnog potamona, sa hladnom, brzo tekućom i kiseonikom bogatom vodom, kamenito-šljunkovitim podlogom i specifičnom biocenozom (larve EPT skupina, salmonidne ribe, mahovine prilagođene brzacima).
protok	Velika brzina vode zbog strmih padina, uskog korita i kamenitog dna.
podvodna vegetacija	Ritron je često obrastao vodenim biljem koje pruža stanište ribama, insektima i drugim organizmima, te stabilizira tlo i pročišćava vodu.
biodiverzitet	U ritronu obitavaju razlagači, biljke, ribe, vodozemci, puževi, maločekinjaši, rakovi, insekti i ptice; predstavljaju važne zone za razmnožavanje, hranjenje i migracije vrsta. Za ritron je karakterističan relativno visok biodiverzitet.
uticaj sezonskih promjena	Položaj i struktura ritrona mijenjaju se sezonski: u kišnim periodima vodostaj raste, u sušnim se povlači – mijenjajući dostupna staništa.
kvalitet vode	Na vodu ritrona utiču hemijski parametri vode (pH, temperatura, nutrijenti), što određuje prisutnost i raznolikost organizama.
interakcija sa slivom	Ritron je povezan s okolnim kopnom – organski materijal (lišće, grančice) obogaćuje vodu i održava ekološke procese.

Ritron kao dio tekućica igra ključnu ulogu u održavanju biološke raznolikosti i ekoloških funkcija u ovim dinamičnim sredinama te je od vitalnog značaja za očuvanje stabilnosti cijelog ekosistema. Biotičke zajednice ritrona sastoje se od perifitona, nektona i raznovrsnih bentoskih oblika. U relativno prirodnim tekućicama ritrona glavni primarni proizvođači su pričvršćene alge i dijatomeje (npr. filamentne zelene alge poput *Ulothrix* i *Cladophora*, te dijatomeje kao *Nitzschia* i *Gomphonema*). Organizmi čvrsto pričvršćeni za podlogu (potopljeno kamenje, biljke i druge supstrate), ali koji ne prodiru u nju, zajednički se nazivaju „aufwuchs“ (obraštaj, epibiont), termin koji je predložio Ruttner (1953). Ovaj pojam obuhvata sve pričvršćene organizme osim makrofita, za razliku od engleskog izraza „perifiton“, koji uključuje biljke i životinje pričvršćene za dijelove ukorijenjenih vodenih biljaka. Dijatomeje i sitne alge ponekad se nazivaju mikrofiti. U osunčanim dijelovima produktivnijih tekućica može doći do bujnog razvoja algi, poput vrsta roda *Cladophora*, koja predstavlja mezofit, odnosno prelazni oblik između mikrofita i makrofita. U bentosu ritrona javljaju se makrofiti, mahovine i alge, uz dominaciju silikatnih dijatomeja (Bacillariophyceae). U sastavu razlagača dominiraju saprofitske bakterije i gljivice. Zoobentos je predstavljen skupinama sundera, Hydrozoa (npr. *Hydra* sp.), planarija (Turbellaria; npr. *Crenobia alpina*, *Polycelis felina*, vrste roda *Dugesia*), puževa (Gastropoda: *Theodoxus*, *Bithynia*, *Bythinella*, *Lymnaea*, *Radix*, *Viviparus* i dr.), te Oligochaeta (familije Lumbriculidae, Naididae, Tubificidae, Enchytraeidae), pijavice klase Hirudinea (*Erpobdella*, *Glosiphonia*, *Hemiclepsis*, *Helobdella*, *Piscicola*), Arachnida (Hydrachnidae, Hidracarinae), rakovi klase Malacostraca (vrste roda *Gammarus*, *Asellus*, *Astacus*, *Austropotamobius*, slatkovodne krabe Potamonidae). U sastavu zoobentosa ritrona tekućica dominiraju preimaginalni i imaginalni stadiji insekata redova Ephemeroptera (vrste

familija Heptageniidae, Baetidae, Leptophlebiae, Ephemeridae, Ephemerellidae, Oligoneuridae), Odonata (Anizoptera i Zygoptera), Plecoptera (vrste familija Perlidae, Perlodidae, Leuctridae, Capnidae, Chloroperlidae, Nemouridae), Trichoptera (npr. vrste familija tulara Hydropsychidae, Rhyacophilidae, Philopotamoidae. Limnophelidae, Goeridae, Sericostomatidae idr.), Diptera (vrste familija Blepharoceridae, Chironomidae, Simuliidae, Athericiidae, Tipulidae, Tabanidae, Limoniidae), Coleoptera, Megaloptera, Heteroptera (slika 7.2.4).

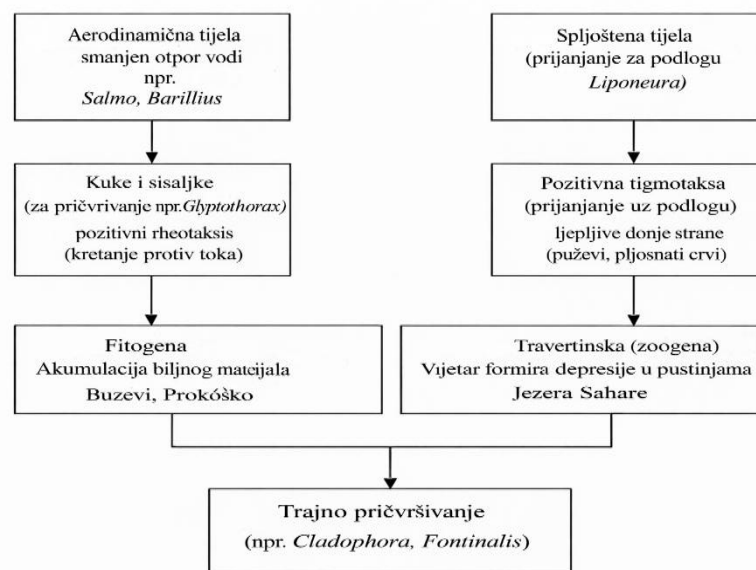


Slika 7.2.4. Predstavnici zoobentosa ritrona (prema Needham& Needham,1972)

Nekton ritrona čine kičmenjaci sa dominacijom ihtiopopulacija (riba). Ribe ritrona prilagođene su životu u brzjoj vodi, s dvije glavne grupe:

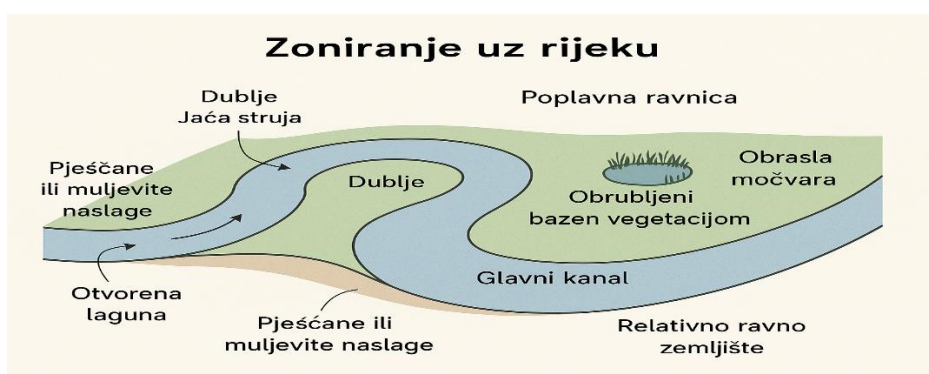
- a) salmonidne vrste: potočna pastrmka (*Salmo trutta*) mekousna pastrmka (*Salmo obtusirostris*), mladica (*Hucho hucho*), lipljen (*Thymallus thymallus*);
- b) ciprinidne vrste: gaga / gavčica (*Phoxinus phoxinus*), mrena (*Barbus balcanicus*), povremeno skobalj (*Chondrostoma nasus*) u prijelaznim zonama.

Organizmi ritrona prilagođeni su životu u brzim strujama na različite načine (Shema 7.2.2). imaju različite adaptacije koje omogućavaju organizmima ritrona da prežive u uvjete brzih struja.



Shema 7.2.2. Prilagodbe organizama na život u ritronu tekućica

Potamonska zona predstavlja ravničarski, sporotekući dio vodotoka u kojem dominiraju organizmi prilagođeni mirnijim vodama, uz razvijenu vodenu vegetaciju i bogatije zajednice riba. Zoniranje unutar potamonske zone odvija se uzdužno i bočno (slika 7.2.5). Uzdužno dolazi do ponavljanja različitih staništa povezanih s meandrima riječnog kanala. Bočno se razlikuju glavni kanal i poplavna ravnica. Poplavna ravnica predstavlja područje relativno ravnog zemljišta uz glavni kanal. Na zavojima rijeke kanal je dublji uz vanjsku, konkavnu obalu, gdje je struja najbrža, dok se uz unutrašnju, konveksnu obalu talože pješčani i muljeviti nanosi. Poplavna ravnica obuhvata različite tipove vodenih tijela, od kojih neka zadržavaju vodu i između poplavnih perioda. Usljed taloženja sedimenta ova vodena tijela prolaze kroz sukcesiju, od otvorenih laguna, preko vegetacijom obrubljenih bazena i gusto obraslih močvara, do konačne transformacije u kopnena staništa.



Slika 7.2.5. Zonacija potamona (prilagođeno prema Junk i sur., 1989)

Zona potamona je ekološki složenija i razlikuje se od ritronske zone u sljedećim karakteristikama: geomorfologiji kanala, fizičko-hemijskim osobinama vode, prirodi sedimenta te bioti, uključujući plutajuću (flotantnu), emerznu i submerznu vegetaciju, kao i visoku gustinu bakterija. Fizičko-hemijske, geološke i biotičke karakteristike značajno utiču na zajednice potamonske zone.

U donjem toku i ušću rijeka obično se javlja veća dubina vode u odnosu na gornji tok, što stvara različite uslove za život i utiče na raspodjelu organizama. U ovom dijelu vodotoka izražena je vertikalna zonalnost, odnosno raspodjela organizama u različitim slojevima vode, uzrokovana razlikama u fizičkim i hemijskim uslovima, kao što su temperatura i sadržaj kiseonika na različitim dubinama. U srednjem i donjem toku te ušću, vertikalna zonalnost može biti izraženija zbog stabilnijih uslova u vodi.

U ovim područjima često dolazi do intenzivnog razvoja riječnog planktona – potamoplanktona, što je povezano s povećanom količinom hranljivih materija i stabilnijim hidrodinamičkim uslovima. Plankton predstavlja važan dio prehrambenog lanca u riječnim ekosistemima. U srednjem i donjem toku te ušću rijeka često se talože sitni sedimenti, poput pijeska i mulja, koji obogaćuju podlogu hranljivim materijama i stvaraju pogodna staništa za brojne organizme. U tim dijelovima rijeka obično postaje šira, što utiče na dinamiku toka i ekološke procese, omogućavajući veću raznolikost staništa i povećanje biodiverziteta. Sve navedene karakteristike doprinose kompleksnosti i bogatstvu srednjeg i donjeg toka te ušća rijeka, zbog čega je upravljanje i zaštita ovih područja od ključnog značaja za očuvanje biodiverziteta i ekoloških funkcija. Biocenoza tekućica u dijelu potamona uključuje plankton, nekton i bentos. Pojava planktona usko je povezana s režimom toka. Tokom poplava planktonski organizmi mogu biti prisutni, ali su rijetki, dok se u sušnim sezonama u sporotekućim dijelovima ravničarskih voda i glavnom kanalu može javiti cvjetanje algi. Rijeke sa usporenim tokom, često kao posljedica hidrotehničkih zahvata, pokazuju veću produkciju planktona, iako njegov doprinos ukupnoj primarnoj produkciji rijeke ostaje relativno mali. U sastavu fitoplanktona dominiraju dijatomeje, uz prisustvo drugih grupa algi kao što su Chlorophyta (zelene alge), Cyanobacteria, Chrysophyta (zlatno-smeđe alge), Euglenophyta (euglene) i Dinophyta (dinoflagelati). Zooplankton potamonske zone uključuje protozoe, rotifere, kladocere i kopepode. Vrste poput *Filinia longiseta*, *Brachionus angularis* i drugih mogu se pronaći u čistim i umjereno zagađenim vodama, dok je *Brachionus rubens* karakterističan za zagađenije dijelove vodotoka. Raznovrsnost i brojnost bakterioplanktona u korelaciji su s razvojem fitoplanktonske i zooplanktonske komponente planktona. Nekton potamona čine ribe i ostali kičmenjaci. Ovu zonu pretežno nastanjuju ciprinidne ribe, uz prisustvo predatora (som, štika, smuđ) te vrste vezane za poplavne ravnice i vegetaciju. Ribe u potamonskoj zoni mogu se svrstati u dvije grupe. Prvu grupu čine vrste prilagođene niskoj koncentraciji rastvorenog kiseonika, kroz dodatne respiratorne organe ili prilagodbe u ponašanju, kao što su šaran (*Cyprinus carpio*), linjak (*Tinca tinca*), crvenperka (*Scardinius erythrophthalmus*), deverika (*Abramis brama*) i som (*Silurus glanis*), koji može gutati zrak i tolerira hipoksične uslove. Drugu grupu čine vrste koje su snažni plivači, žive u glavnom kanalu i aktivne su u zoni glavnog toka, te zahtijevaju veće koncentracije kiseonika. U ovu grupu ubrajaju se smuđ (*Sander lucioperca*), štika (*Esox lucius*), predatori otvorenih dijelova toka i rubnih zona kanala, te klen (*Squalius cephalus*), škobalj (*Chondrostoma nasus*) i bjelica/uklija (*Alburnus alburnus*), koja se često javlja u jatima u površinskim slojevima vode.

Bentos potamona je relativno siromašan, jer jednolično i nestabilno muljevito dno, intenzivno taloženje sedimenta i povremeno sezonsko isušivanje ne pogoduju razvoju organizama dna. Izdvaja se fitobentos s dobro razvijenim makrofitama i algama, među kojima često dominiraju

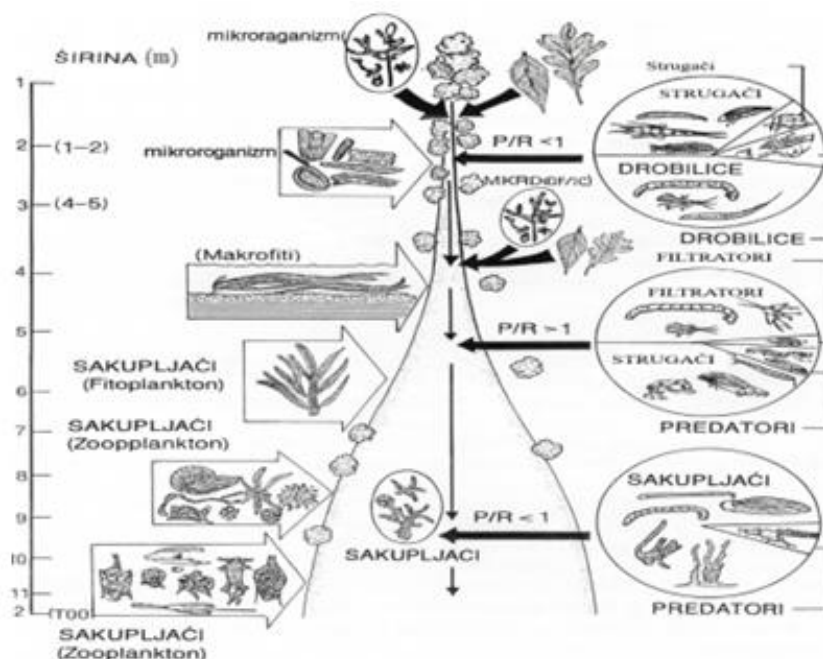
silikatne dijatomeje. Makrofiti predstavljaju karakterističan element potamonske zone. Većina vodenih makrofita su angiosperme (cvjetnice), ali mogu biti prisutne i vodene paprati, mahovine, jetrenjke te krupne alge iz skupine Charophyceae. Među slobodnoplivajuće makrofite ubrajaju se vrste kao što su *Salvinia* (vodena paprat), *Lemna minor* (vodena leća) i *Spirodela polyrhiza* (velika vodena leća). Ukorijenjeni makrofiti poput *Nuphar* (lokvanj), vrsta roda *Potamogeton* i *Typha* (rogoz) također su česti. Zoobentos može uključivati mekušce, pužve (*Lymnaea*, *Bithynia*, i druge), hironomide, efemeroptere, plekoptere, trihoptere, crve i pijavice. Bogastvo oblika je određeno tipom tekućice, kod velikih ravničarskih rijeka zoobentos uslijed jednoobraznog muljevitog sedimenta (mali broj ekoloških niša) karakteriše siromaštvo oblika. Potamon predstavlja nizvodni, ravničarski dio velikih rijeka, karakteriziran sporijim tokom, većom širinom i razvijenom planktonskom zajednicom, pri čemu se potamoplankton razvija isključivo u velikim nizijskim rijekama gdje je vrijeme zadržavanja vode dovoljno dugo za njegov razvoj. Položaj organizama u tekućicama, kao što su rijeke i potoci, uslovljen je nizom ekoloških faktora koji utiču na njihove adaptacije, distribuciju i interakcije unutar ekosistema. Ključni faktori koji određuju položaj organizama u lotičkim ekosistemima uključuju brzinu protoka, dubina vode, kvalitet vode, temperaturu vode, specijske interakcije i sezonske i vremenske promjene (tabela 7.2.7).

Tabela 7.2.7. Prikaz faktora i njihovog uticaja na organizme u tekućicama

Faktor	Uticaj na organizme
Brzina protoka vode	Brzi i turbulentni tokovi favoriziraju reobionte (stroge specijaliste brzih voda, npr. Heptageniidae, Goeridae, Perlidae, <i>Ancylus fluviatilis</i> , potočna pastrmka, mladica) te reofilne (vrste koje preferiraju brže tokove, ali naseljavaju i dionice sa slabim protokom, npr. Hydropsychidae, <i>Gammarus</i> spp., mrena). Reokseni se javljaju u sporijim vodama sa smanjenim protokom, npr. puževi, neke vrste Chironomidae, Oligochaeta i potamoplankton.
Dubina vode	Plići dijelovi omogućavaju razvoj makrofita i fotosintetskih organizama zbog više svjetlosti. U dubljim zonama dolazi do slabije fotosinteze i različitih uslova kiseonika, što utiče na raspodjelu riba i bentosa.
Podloga i sediment	Stjenovite i šljunkovite podloge pogoduju beskičmenjacima kao što su Trichoptera, Ephemeroptera, Plecoptera (tipični bentos brzih tokova). Mekane, muljevite podloge preferiraju potamonske vrste: Tubificidae, Chironomidae, kao i nizijske ribe.
Kvalitet vode	Hemijski sastav, koncentracija nutrijenata, prisustvo amonijaka i zagađenje direktno utiču na preživljavanje. Osjetljive vrste (npr. salmonidi, Plecoptera) ne opstaju u zagađenim vodama, dok tolerantne vrste (neke vrste Chironomidae, Tubificidae) dominiraju u eutrofnim i degradiranim uslovima.
Temperatura	Više temperature ubrzavaju metabolizam, ali smanjuju rastvoreni kiseonik, što utiče na brojnost i sastav zajednica. Hladnovodne vrste dominiraju u ritronu, dok toplovodne vrste prevladavaju u potamonu.
Interakcije sa drugim organizmima	Predacija, kompeticija i raspoloživost hrane utiču na ponašanje i distribuciju organizama. Prisutnost predatora utiče na izbor mikrostaništa (zaklon, dubina), posebno kod riba i makroinvertebrata.
Sezonske i vremenske promjene	Promjene nivoa vode, protoka i temperature određuju raspodjelu vrsta. Tokom poplava mnoge vrste se pomjeraju nizvodno; tokom suša povlače se u dublje zone ili formiraju dormantne stadije (npr. jaja rotifera, kokoni).

Svi ovi faktori zajedno određuju kako i gdje organizmi žive u tekućicama, oblikujući složene ekosisteme sa bogatom biodiverzitetom. Na vodotoku se na temelju biotičkih, hidroloških i bioloških karakteristika razlikuju četiri dimenzije (shema 7.2.3) koje karakterišu određeni ekološki uvjeti. Prema konceptu *River Continuum Concept* (Vannote et al., 1980), fizičke, hemijske i biološke karakteristike vodotoka mijenjaju se kontinuirano duž uzdužne osi rijeke, od izvorišnih dijelova prema ušću. Naglasak je na promjeni širine i dubine vodenog toka, razvoju skupina organizama i njihovih funkcionalnih grupa i promjeni tipa sedimenta duž toka. Gornji tok (reda toka 1–3), uzak i plitak, zasjenjen vegetacijom, sa sedimentom od velikih stijena (megatal), šljunak i pojedinačno mulj i biljke. Energetski unos, organska materija dolazi izvana (lišće, grančice). Organizmi prema načinu ishrane predstavljeni su drobilicama (eng. shredders) razgrađuju lišće i grublji detritus, predatori prisutni ali manje zastupljeni, mikroorganizmi za razlaganje organske materije. U odnosu produkcija/respiracija (P/R) < 1 , respiracija prevladava. Na samom izvorištu (mjesto izbijanja podzemne vode na površinu) uslovi su specifični: stalna temperatura, često zasjenjenost i stabilan hemijski sastav vode. U takvim uvjetima se formira biofilm kao kompleksna zajednica mikroorganizama i organskih polimera. Biofilm se sastoji se od bakterija, cijanobakterija, gljivica, protozoa i algi, povezanih u sluzavu matricu (ekstracelularne polimerne supstance). Biofilm se razvija na kamenju, biljkama i svakoj podvodnoj podlozi. Ima ključnu ulogu u razgradnji organskih materija, vezivanju hranjivih tvari i formiranju osnovnog energetskog resursa za više trofičke nivoe. On predstavlja primarni sloj života na izvorištu i osnovu za razvoj bentoske zajednice. Dakle, dok se nizvodno razvijaju specijalizirane funkcionalne grupe (drobilice, strugači, filtratori, predatori), na samom izvorištu može dominira biofilm sa bogato razvijenim mikroorganizmima koji započinju energetski i materijalni ciklus u toku.

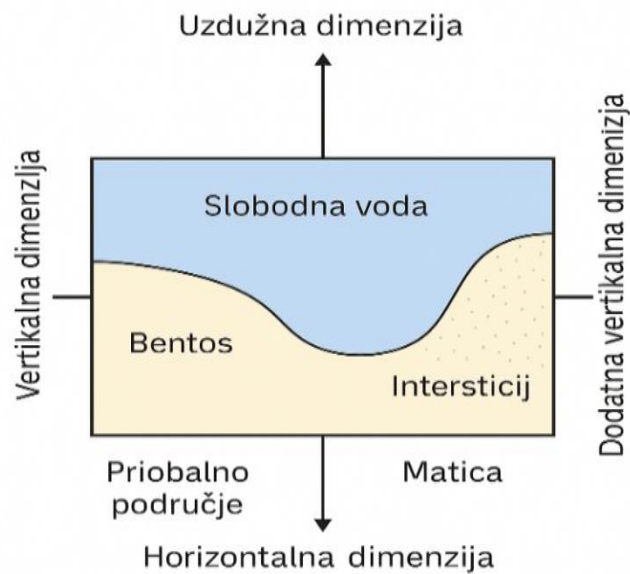
Srednji tok (reda toka 4–6) gdje je širina i dubina veća i dotok više svjetla. Sediment: mješovit šljunak i pijesak. Energetski unos: rast makrofita i perifitona, veća primarna produkcija. Organizmi su predstavljeni strugačima (eng. scrapers), hrane se perifitonom (algama na kamenju) kaon. U skupini filtratora i sakupljača koriste finu organsku materiju, a predstavnici reda Trichoptera, reda Diptera i reda Ephemeroptera. Pored toga prisutni su predatori iz skupine riba ali i nekih puževa i vodenih insekata. Generalno je $P/R > 1$ (produkcija veća od respiracije). Donji tok (reda toka > 7) prema širini i dubini, vrlo širok i dubok, često mutan. Sediment je fini pijesak i mulj. Energetski unos, dominira transport fine organske materije (FPOM). Organizmi sa dominacijom filtratora (eng. filter feeders) izdvajaju suspendovane čestice i sakupljača (eng. collectors), koriste organsku materiju iz sedimenta. Zooplankton i fitoplankton značajno prisutni. $P/R < 1$ (respiracija ponovo prevladava). Šema pokazuje da se s rastom širine i dubine rijeke mijenja tip sedimenta (od krupnog ka finog), mijenja se izvor energije (od lišća i grubog detritusa → perifiton i makrofiti → fina organska materija), mijenja se dominacija funkcionalnih grupa (drobilice → strugači → filtratori/sakupljači) i time se oblikuje dinamika cijelog riječnog ekosistema.



Shema 7.2.3. Koncept kontinuiteta toka (*River Continuum Concept – RCC*, Vannote i sur., 1980)

7.2.1.2. Dimenzije, ekološka zonacija i rangiranje vodotoka

Koncept višedimenzionalnosti toka rijeke prvi je razvio J.V. Hynes (1970–1975), naglašavajući longitudinalnu, lateralnu, vertikalnu i sezonsku komponentu. Stanford i Ward (1993) su kasnije formalizirali ove ideje u „*Hyporheic Corridor Conceptu*“, definisavši rijeku kao četverodimenzionalni ekosistem i uključivši intersticij / hiporeik kao ključni vertikalni prostor. Dimenzije vodotoka kao životnih sredina obuhvata prvenstveno vertikalnu dimenziju koja uključuje slobodnu vodu i bentos/dno (slika 7.2.6). Slobodna voda vodotoka obuhvata vodu koja se slobodno kreće u kolonu, uključujući površinski sloj gdje se odvija fotosinteza (uglavnom u potamonu velikih ravničarskih rijeka). Bentos uključuje organizme koji žive na dnu vodotoka. Ovi organizmi, kao što su beskičmenjake, bakterije i razni drugi mikroorganizmi, igraju ključnu ulogu u razgradnji organskih materija i reciklaži hranljivih tvari. Horizontalna dimenzija izdvaja priobalnu zonu i maticu. Priobalno područje se odnosi na obale i neposrednu okolinu vodotoka, koja je važna za biodiverzitet i interakciju između kopnenih i vodenih ekosistema. Ovo područje može sadržavati vlažne staništa, močvare i vegetaciju koja podržava razne vrste. Matica je centralni dio vodotoka, gdje je protok vode najintenzivniji. U ovom dijelu se često nalaze brzi i dublji dijelovi koji podržavaju specifične vrste riba i drugih organizama prilagođenih bržem toku. Uzdužna/longitudinalna dimenzija obuhvata izvorište ili krenon, ritron i potamon koji su opisani u prethodnom poglavlju. Dodatna vertikalna dimenzija uključuje intersticij koji se odnosi na prostor između čestica tla i sedimenata na dnu vodotoka. Intersticij je dio vertikalne dimenzije tekućice i predstavlja prostor između čestica sedimenta u koritu rijeke, ispunjen mješavinom površinske i podzemne vode, FPOM-om, biofilmom, mikroorganizmima, meiofaunom i larvama makroinvertebrata, te djeluje kao važan ekološki koridor i refugijum.



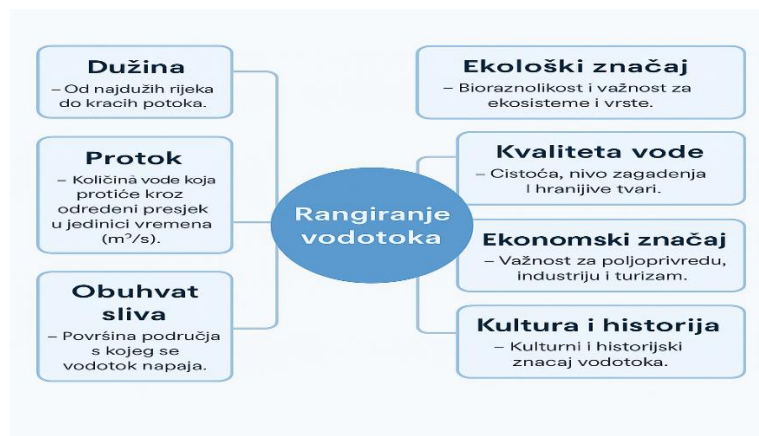
Slika 7.2.6. Dimenzije riječnog toka

Vremenska (sezonska) dimenzija tekućice objašnjava promjene u ekosistemu rijeka tokom različitih godišnjih doba i klimatskih perioda. Ona se odnosi na dinamičnost ekosistema kroz vrijeme, za razliku od horizontalne, vertikalne i uzdužne prostorne raspodjele (slika 7.2.7). Dinamičnost ekosistema tekućice direktno utiče na navedene dimenzije, a posebno na raspored organizama. Promjene protoka i nivoa vode, tokom proljeća (npr. snježne vode ili sezone kiše) dolazi do povećanog protoka i poplava, dok su u ljetnim mjesecima i tokom suša protoci manji i vodostaj opada. Temperaturne oscilacije kao i sezonske promjene temperature utiču na metabolizam, reprodukciju i migracije organizama (npr. mrijest pastrmke u jesen/zimu, mrijest šarana u proljeće/ljeto). Ljeti topla voda gubi kiseonik, dok zimi ili pri visokim protocima dolazi do bolje oksigenacije. Biološki ciklusi, mnoge vrste makrozoobentosa i riba imaju sezonske cikluse razvoja (larvalni stadiji, emergencija, migracije). Poplavni režim, sezonske poplave povezuju glavni kanal s bočnim staništima (lagune, mrtvaje, močvare), čime se povećava produktivnost i raznolikost ekosistema.



Slika 7.2.7. Vremenska/sezonska dimenzija tekućice

Ove dimenzije pružaju sveobuhvatan pregled kompleksnosti vodotoka kao ekosistema i ukazuju na raznovrsnost staništa i organizama koji obitavaju u njima. Razumevanje ovih dimenzija je ključno za očuvanje i upravljanje vodnim resursima. Rangiranje vodotoka može se vršiti prema različitim kriterijima, zavisno od ciljeva analize (shema 7.2.4)



Shema 7.2.4. Elementi za rangiranje vodotoka

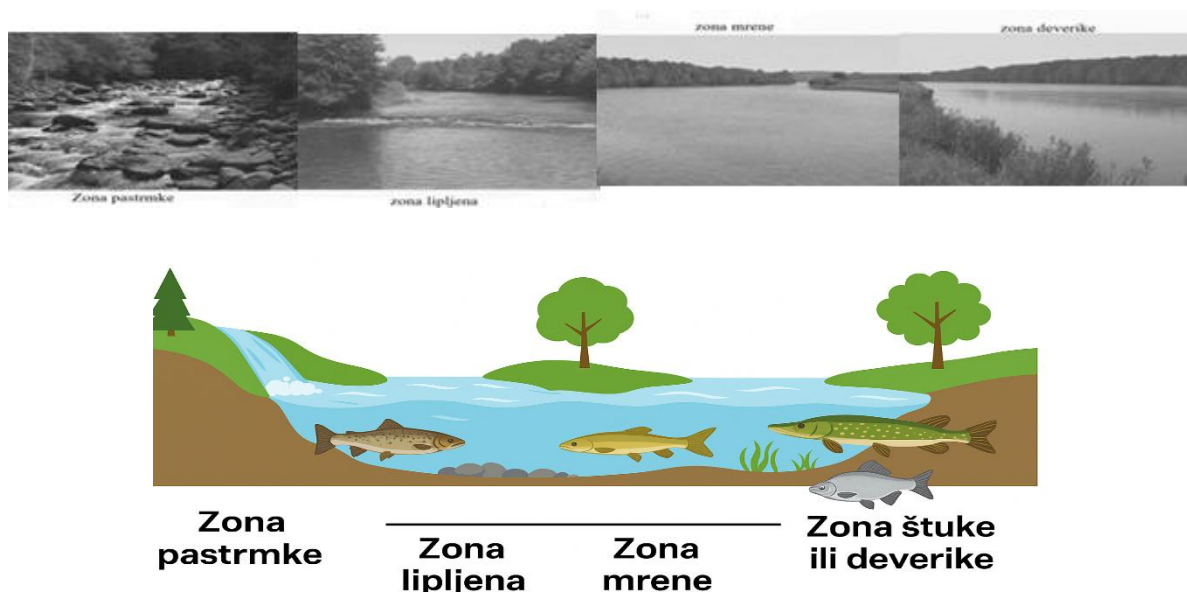
Diferencijacija rijeka na temelju hidrobionata zasnovana na vrstama Turbellaria, kao i na sastavu ihtiopopulacija, potiče iz klasičnih radova Augusta Thienemanna (1882–1960), njemačkog limnologa i osnivača moderne produkcijske limnologije. On je u svojim radovima 1920-ih i 1930-ih koristio vrste *Crenobia alpina*, *Polycelis felina* i *Dugesia gonocephala* kao pokazatelje krenona, ritrona i potamona (slika 7.2.8). Kasnije su njegovu koncepciju preuzeli i proširili Einar Naumann i drugi autori, što je dovelo do razvoja klasične Thienemann–Naumann limnološke zonacije koja je dominirala europskom limnologijom prve polovine 20. vijeka. Podjela tekućica prema planarijama danas ima prvenstveno historijsko-didaktičku vrijednost: *Crenobia alpina* je strogo ograničena na izvorišta (krenon), dok se *Polycelis felina* i *Dugesia gonocephala* ne javljaju isključivo u ritronu ili potamonu, nego se mogu pojaviti i u drugim dijelovima vodotoka.



Slika 7.2.8. Prikaz uzdužne regionalizacije tekućice prema vrstama planarija

Regionalizacija riječnih tokova na osnovu riblje faune razvijala se paralelno s biološkim zonacijama prema drugim grupama organizama (makrozoobentos). Ribe su bile posebno pogodne za ekološku klasifikaciju jer su dobro proučene, lako prepoznatljive i osjetljive na hidromorfološke i fizikalno-hemijske uvjete. Već krajem 19. vijeka u srednjoj Evropi javljaju

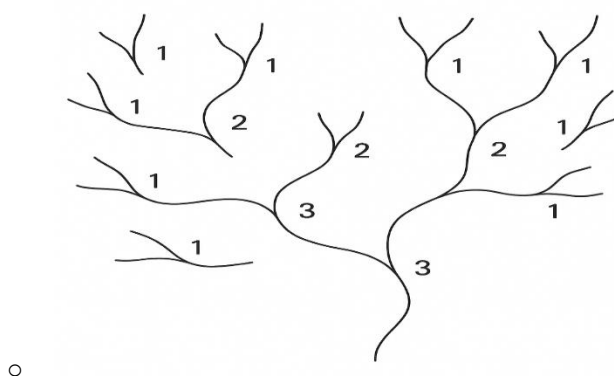
se prvi pokušaji razlikovanja “ribljih zona” na osnovu dominantnih vrsta, ali bez formalnog sistema. Temelje savremene ihtiološke zonacije postavljaju August Thienemann početkom 20. vijeka, dok je klasičnu i danas najšire korištenu riblju zonaciju razvio Pierre Huet (1949, 1954). On je definisao četiri osnovne zone prema dominantnim ribljim vrstama i ekološkim karakteristikama toka: zona pastrmke (eng. Trout zone) u brzim, hladnim i kiseonikom bogatim planinskim tokovima; zona lipljena (eng. Grayling zone) u nešto sporijim i toplijim dionicama; zona mreke (eng. Barbel zone) u srednjim, umjereno brzim i produktivnim tokovima; te zona deverike/štuke (eng. Bream/Pike zone) u donjim, sporim i muljevitim nizijskim tokovima (slika 7.2.9). Ova podjela je bila praktična, jasno definisana i brzo je postala standard u limnologiji i ribarskoj praksi.



Slika 7.2.9. Zonacija tekućice prema vrstama ihtiopopulacija (Huet, 1949)

Glavna ne mogućnost primjene ove zonacije je da sve tri zone osim pastrmke imaju ograničenja, zato se ihtiološka zonacija danas koristi više kao didaktički model za srednju Evropu. U savremenoj ekologiji se koriste kombinovani biološki indikatori (makrozoobentos, ribe, makrofite). Pored biološke zonacije, kojom se riječnim tokovima određuju zone prema sastavu organizama, postoje i metode rangiranja vodotoka koje polaze od njihovih morfoloških i hidrografskih obilježja, poput Hortonove i Strahlerove klasifikacije. Hortonovo rangiranje, poznato i kao Hortonova metoda, je tehnika koja se koristi za klasifikaciju vodotoka prema njihovim redovima. Ova metoda pomaže u analizi mreže rijeka i potoka, a zasniva se na nekoliko osnovnih pravila. Osnovna pravila Hortonovog rangiranja je izdvajenje primarnih vodotoka (1. red), ovo su glavni vodotoci koji nemaju pritoke (manje rijeke koje se ulijevaju u njih). Svi primarni vodotoci se označavaju redom 1. Sekundarni vodotoci (2. red) vodotoci koji nastaju spajanjem dva ili više vodotoka prvog reda. Tercijarni vodotoci (3. red) vodotoci koji nastaju spajanjem dva ili više vodotoka 2. reda. Ovi vodotoci se označavaju redom 3 i kvartarni vodotoci (4. red) vodotoci koji nastaju spajanjem dva ili više vodotoka 3. reda. Ovi se vodotoci označavaju redom 4. Dodatna pravila, ako se vodotok nižeg reda spoji s vodotokovima višeg reda, taj viši vodotok zadržava svoj red. Na primjer, ako se vodotok 1. reda spoji s vodotokom 3. reda, rezultatni vodotok će ostati 3. reda. Hortonovo rangiranje je korisno za analizu

hidrografskih mreža, istraživanje biodiverziteta u slivovima, planiranje i upravljanje vodnim resursima i evaluaciju uticaja promjena u korištenju zemljišta na hidrologiju. Strahler (1952,1964) je primjenio novu klasifikaciju vodotoka, koja se koristi se za rangiranje vodotoka na temelju njihove hijerarhijske strukture i karakteristika. Ova metoda se često koristi u geomorfologiji i hidrologiji za analizu mreže vodotoka. Osnovni koncept vodotoka jeste da svaki pojedinačni tok, poput rijeke ili potoka, predstavlja dio šireg sistema, gdje se manji vodotoci ulijevaju u veće i zajedno formiraju riječnu mrežu. Klasifikacija koja uključuje rangiranje vodotoka (shema 7.2.5), svakom vodotoku se dodjeljuje redni broj (rang) koji odražava njegovu poziciju u mreži. Rangovi se dodjeljuju na sljedeći način: prvi red (1. red), Najmanji vodotoci, koji nemaju druge vodotoke koji se u njih ulijevaju, drugi red (2. red) kada se dva vodotoka prvog reda sastanu, formiraju vodotok drugog reda i treći red (3. red) kada se dva vodotoka drugog reda spoje, nastaje vodotok trećeg reda.



Shema 7.2.5. Prikaz rangiranja vodotoka po Strahler (1957)

Značaj Strahlerove klasifikacije prije svega je hidrosistematski pristup. Ova klasifikacija pomaže u analizi tokova vode, erozije, sedimentacije i drugih hidrosistematskih fenomena. Omogućuje hidrobiolozima i ekolozima, da bolje razumiju kako vodotokovi utiču na okolinu i biološku raznolikost. U području upravljanja vodnim resursima, korisno je za planiranje i upravljanje vodnim resursima, kao i za procjenu uticaja ljudskih aktivnosti na vodne ekosisteme. Hidrobiolozi trebaju dobro poznavati Horton-ovo i Strahler-ovo rangiranje vodotoka, jer ono predstavlja osnovu za razumijevanje strukturnih i funkcionalnih karakteristika riječnih sistema, što je neophodno pri monitoringu, ekološkoj procjeni, identifikaciji pritisaka te planiranju efikasnih mjera zaštite i restauracije vodnih i o vodi ovisnih ekosistema.

7.2.2. Stajaćice

Stajaći ekosistemi obuhvataju vodene površine u kojima je kretanje vode minimalno ili gotovo odsutno, a obnova vode odvija se sporo. U ovim sistemima dominiraju procesi sedimentacije, termičke i hemijske stratifikacije, te biološke sukcesije. Dok cirkulacija materije i energije zavisi od vanjskih dotoka (padavine, podzemni dotoci, pritoke, erozija) i unutrašnjih bioloških procesa. Za razliku od *lotičkih* (tekućih) ekosistema, u kojima je protok vode stalno usmjeren nizvodno usljed nagiba terena i gravitacije, u stajaćim ekosistemima nema takvog kontinuiranog horizontalnog kretanja. Umjesto toga, javljaju se površinski valovi, strujanja

izazvana vjetrom i vertikalna miješanja slojeva uslijed temperaturnih razlika i sezonskih promjena. Ova hidrodinamička obilježja određuju raspored hranjivih materija, kiseonika i organizama u vodi. Stajajući ekosistemi, osim plitkih stajaćica, karakterišu se izraženom vertikalnom zonacijom u toplijem dijelu godine, *epilimnij* (gornji, topli sloj), *metalimnij* (prijelazni sloj ili termoklina) i *hipolimnij* (hladni, dublji sloj). Te horizontalnom heterogenošću, koja uključuje priobalnu zonu, otvorenu vodu (pelagijal) i dno (bental ili bentosku zonu). Ovi ekosistemi su ključni za očuvanje biološke raznolikosti, jer pružaju staništa mnogim specijaliziranim skupinama organizama, kao što su fitoplankton, zooplankton, makrofite, alge, bakterije, gljive, makrobeskičmenjaci (bentos) i ribe. Jezera predstavljaju najznačajniji tip stajaćih voda, to su prirodna udubljenja ispunjena vodom koja mogu biti slatkovodna (npr. borealna i alpska jezera) ili slana (npr. lagune i jezera u sušnim područjima).

7.2.2.1. Podjela jezera

Prema porijeklu, jezera se dijele na prirodna i vještačka, a unutar prirodnih razlikuje se više tipova prema načinu nastanka, tektonska, ledenjačka, vulkanska, riječno-aluvijalna, kraterska, te jezera nastala akumulacijom ili deluvijalnim procesim. Prirodna jezera nastaju različitim geološkim i geomorfološkim procesima, tektonskim pokretima (npr. Bajkalsko jezero), glacijalnim djelovanjem (npr. Prokoško jezero), vulkanskom aktivnošću (kraterska jezera), erozijom i akumulacijom ili prirodnim pregradama riječnih dolina (tabela 7.2.2.1). Ova jezera predstavljaju najstabilniji tip stajaćih voda i karakteriziraju ih složeni ekološki procesi. Stratifikacija temperature i kiseonika koja određuje distribuciju organizama, primarna produkcija dominantno u litoralnoj i površinskoj zoni, veliki kapacitet za akumulaciju hranjivih materija, što je čini osjetljivim na eutrofikaciju i dug životni vijek u poređenju s umjetnim akumulacijama. Zahvaljujući svojoj stabilnosti, prirodna jezera su centri visoke biodiverziteta i često staništa endemičnih vrsta. Najveći dio svjetskih zaliha slatke vode pohranjen je u jezerima. Također, imaju značajnu ulogu u regulaciji lokalne klime, akumulaciji pitke vode i rekreativnim aktivnostima. Na svijetu postoji oko 100 miliona jezera većih od 0,01 km². Jezera se mogu klasificirati na različite načine: prema svom geološkom porijeklu, prema trofičkom stanju, što je povezano s biološkim statusom, prema termalnom režimu, koji je vezan za klimu, ili prema hidrološkim uvjetima koji se odnose na karakter uliva i otoka.

Tektonska jezera nastaju zbog pokreta Zemljine kore (rasjedi, ulegnuća), obično su velika i duboka (Bajkalsko jezero, Tanganjika, Ohridsko jezero). U BiH nisu prisutna tipična tektonska jezera poput onih u tektonski aktivnim područjima, ali su moguća manja tektonska jezera u područjima s tektonskim rasjedima ili ulegnućima. Lednička (glacijalna) jezera nastala su djelovanjem ledenjaka, bilo erozijom podloge (kada led produbljuje i proširuje doline stvarajući udubljenja) ili akumulacijom morenskog materijala, koji zatvara doline i zadržava vodu. Takva jezera su često izduženog oblika, sa strmim obalama i velikom dubinom u odnosu na površinu. Nalaze se pretežno u planinskim područjima gdje su nekada postojali ledenjaci, pa su česta u Alpama, Pirinejima, Skandinaviji, Himalajima, kao i u planinskim masivima Dinarida (npr. Šatorsko, Blidinje, Boračko i Prokoško jezero u BiH) (slika 7.2.2.1). Voda u ovim jezerima obično je hladna i bistra, s niskim sadržajem hranjivih materija (oligotrofna), dok se njihova boja kreće od tirkizno plave do smaragdno zelene zbog refleksije svjetlosti i prisustva minerala

u suspenziji. Zbog ograničenog dotoka organske materije i niskih temperatura, produkcija biomase je slaba, ali su ekosistemi vrlo stabilni i osjetljivi na klimatske promjene.

Tabela 7.2.2.1. Tipova prirodnih jezera prema postanku

Kategorija	Tip jezera	Opis	Primjeri
Tektonska	Tektonska	Nastala u tektonskim ulegnućima i rasjedima	Bajkalsko, Ohridsko, Tanganjika
Erozivna	Glacijalna	Nastala erozijom ledenjaka	Bohinjsko, Prokoško
	Riječno-erozivna	Nastala riječnom erozijom	Erozivne udoline
	Vjetrovno-erozivna	Vjetar formira depresije u pustinjama	Jezera Sahare
Akumulativna	Fitogena	Akumulacija biljnog materijala	Jezera Alpa i Skandinavije
	Travertinska (zoogena)	Taloženje travertina uz djelovanje organizama	Plitvička jezera
Krška	Krška jezera	Nastala otapanjem vapnenca u kršu	Modro i Crveno jezero
Vulkanogena	Kraterska, kalderna	Nastala u vulkanskim kraterima i kalderama	Toba, Albano
Meandarska	Mrtvaje	Nastala presijecanjem riječnih meandara	Dunav, Sava



Slika 7.2.2.1. Glečerska jezera Blidinje jezero (BiH) i Bohinjsko jezero (Slovenija)

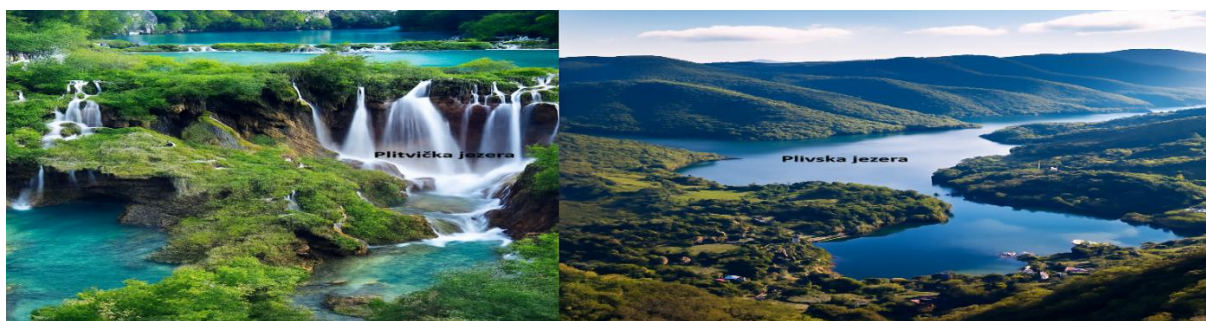
Na području Bosne i Hercegovine lednička jezera (gorske oči) pretežno se nalaze u visokoplaninskim oblastima Dinarida, gdje predstavljaju ostatke nekadašnjih glacijalnih procesa. Većina ih je smještena na visinama iznad 1.000 m n.v. (npr. Šatorsko, Blidinjsko, Veliko i Malo jezero na Zelengori), dok se neka, poput Boračkog jezera, nalaze u nižem, brdskom pojasu (tabela 7.2.2.2).

Iako se nalazi na manjoj nadmorskoj visini, Boračko jezero je glacijalnog porijekla, nastalo erozionim djelovanjem prenjškog ledenjaka i zatvaranjem doline morenskim nanosima.

Tabela 7.2.2.2. Lednička jezera u BiH (tzv. gorske oči)

Jezero	Planina / Područje	Osobine
Prokoško jezero	Vranica	Najpoznatije glacijalno jezero u BiH, smješteno na ~1.636 m n.v.
Boračko jezero	Prenj	Polukružnog oblika, duboko do 14 m, nastalo erozijom i taloženjem lednika
Blidinje jezero	Čvrsnica / Dugo Polje	Plitko, povremeno presušuje; postglacijalno jezero s elementima krškog
Jezera na Treskavici	Treskavica (npr. Crno, Bijelo)	Mala lednička jezera u cirkovima, često bez stalnog dotoka
Šatorsko jezero	Šator planina	Smješteno na visoravni, glacijalnog porijekla, turistički popularno

Akumulativna jezera nastaju tako što se na određenom mjestu taloži (akumulira) materijal, bilo da ga donose ledenjaci, rijeke, ili da se stvara biogenim procesima. Za razliku od erozionih jezera, gdje se jezerska udolina formira erozijom, kod akumulativnih jezera udolina nastaje zatrpavanjem, pregrađivanjem ili nagomilavanjem materijala. U okviru biogenih akumulativnih jezera razlikuju se dva dominantna tipa, fitogena i zoogena jezera. Fitogena jezera nastaju taloženjem kalcijum-karbonata uz posredstvo fotosintetskih organizama, prvenstveno makrofita, mahovina (npr. *Bryum*, *Cratoneurum*) i algi. Dok se zoogena formiraju djelovanjem životinjskih organizama, čije biološke aktivnosti i skeletne strukture doprinose akumulaciji karbonatnog materijala. Kod Plitvičkih jezera (slika 7.2.2.2) mikroorganizmi i životinje (npr. mahovina kolonizirana cijanobakterijama, algama i mikrofaunom) svojim metabolizmom mijenjaju pH i pospješuju taloženje CaCO_3 . Alge i biljke (vodene makrofite, mahovine) služe kao podloga i učestvuju u procesu, ali dominantni učinak dolazi od zajednice organizama (biofilm, mikrofauna) koja inducira travertinizaciju; rezultat su sedrotvorne barijere koje pregrađuju tokove i tvore jezera. Plivska jezera (Veliko i Malo Plivsko jezero) su oblikovana travertinskim barijerama nastalim djelovanjem mahovina, algi i mikroorganizama, što ih čini biogenim; međutim, u literaturi nema jednoglasnog dokaza koji bi ih s pouzdanošću klasificirao kao fitogena ili zoogena.



Slika 7.2.2.2. Plitvička jezera (R. Hrvatska) i Plivska jezera (Jajce, BiH)

Vještačka (umjetna) jezera nastala ljudskim djelovanjem (antropogena), najčešće izgradnjom brana ili iskapavanjem. Pojam *vještačko jezero* obično se koristi kao širi termin za sve antropogene nastale akumulacije vode (nastale gradnjom brane, pregradom, iskopavanjem šljunka, potapanjem kraških polja itd.). Primjeri: kopovska jezera BiH, akumulacije, Peruća (Hrvatska), Đerdap (Srbija/Rumunija). Kopovska jezera (nastala potapanjem napuštenih

kopova, najčešće šljunčara ili površinskih rudnika) spadaju u vještačka jezera. Kopovska jezera nisu prirodna vodna tijela nego rezultat ljudske aktivnosti iskopavanja i eksploatacije mineralnih sirovina. Nakon prestanka eksploatacije, jame se pune podzemnim ili površinskim vodama. U klasifikacijama voda (npr. po EU Okvirnoj direktivi o vodama (ODV); WFD, 2000) svrstavaju se u umjetna vodna tijela (eng. *artificial water bodies*). Iako nastaju umjetno, njihova dalja ekologija (flora, fauna, sukcesija zajednica) može se razvijati slično prirodnim jezerima, pogotovo ako dobiju stabilne dotoke podzemnih ili površinskih voda. U Bosni i Hercegovini postoji više takvih kopovskih jezera, uglavnom na mjestima gdje su bile šljunčare ili rudnici (npr. oko Sarajeva, Tuzle, Posavine). U literaturi se vodi kao vještačka jezera ili kopovska (slika 7.2.2.3). Kopovska jezera nastaju u napuštenim površinskim kopovima ruda ili uglja, koji se nakon prestanka eksploatacije ispune vodom (podzemnom, atmosferskom ili površinskom).



Slika 7.2.2.3. Kopovsko jezero u Kaknju i Varešu

Hidroakumulacije su posebna potkategorija vodenih tijela; iako se često navode kao jezera, one nastaju izgradnjom brana na rijekama i zato imaju dotok rijeke uzvodno, a oticanje istom rijekom nizvodno (primjer srednji tok rijeke Neretve). Prema ODV svrstavaju se u značajno izmijenjena vodna tijela (eng. *heavily modified water bodies*) jer se javljaju na mjestima gdje je prije zahvata postojalo prirodno vodno tijelo. Hidroakumulacije predstavljaju umjetno proširene dijelove riječnih tokova u kojima se, usljed usporenog kretanja vode i povećane dubine, razvijaju planktonske zajednice i može uspostaviti vertikalna stratifikacija. Takvi procesi su u skladu s prirodnim ekološkim zakonitostima jer se i u širim i dubljim dionicama prirodnih rijeka, naročito u srednjem i donjem toku velikih rijeka, prirodno javljaju planktonske zajednice različitog stepena razvijenosti, zavisno od brzine protoka, dubine i količine hranjivih materija. Buško Blato je specifičan slučaj. Prvobitno je to bilo kraško polje sa povremenim plavljenjem (periodično jezero/močvara). Izgradnjom brane 1970-ih ono je pretvoreno u trajnu hidroakumulaciju koja se koristi za hidroelektranu Orlovac (R. Hrvatska). Danas ga većina literature vodi kao hidroakumulaciju Buško jezero (umjetno stvoreno, ali na prostoru nekadašnjeg prirodnog močvarnog/blatnog područja). Prirodni tok rijeke Ričine (pritoka Cetine) u potpunosti je poplavljen izgradnjom Buške hidroakumulacije. Prije izgradnje brane, Ričina je imala prirodni tok kroz Buško Blato i prirodne poplavne cikluse (kraško polje s povremenim plavljenjem). Danas je donji tok Ričine prekinut i potopljen, pa rijeka praktično prestaje postojati kao samostalni vodotok u zoni akumulacije. Dakle, hidroakumulacija je transformisala cijeli vodotok u stajaće vodno tijelo sa potpuno izmijenjenim režimom. Dodatno je izgrađen kanal Lipa koji je umjetni vodotok izgrađen kako bi se voda sa područja Livanjskog

polja usmjerila prema Buškom Blatu. Njegova funkcija je povećanje dotoka u akumulaciju i time osiguravanje dovoljnih količina vode za potrebe hidroelektrane Orlovac. Ovim je napravljen hidrotehnički sistem preusmjeravanja voda (eng. inter-basin transfer), jer se voda koja bi prirodno oticala prema Jadranskom slivu sada kontrolisano usmjerava u hidroakumulaciju. Ekološke posljedice su prvenstveno u nestanku prirodnog toka Ričine što ukazuje na gubitak prirodnih staništa (riblje populacije, vlažna staništa Buškog blata). Kanal Lipa je antropogena struktura, bez prirodnih ekoloških funkcija, ali mijenja režim podzemnih i površinskih voda. Formirana je jedna od najvećih hidroakumulacija u Evropi (oko 55 km²). Hidrologija čitavog područja Livanjsko–Duvanjskog polja je izmijenjena. Ovaj primjer naglašava osnovnu razliku: prirodna jezera nastaju spontano, dok hidroakumulacije zahtijevaju inženjerske intervencije koje potpuno preoblikuju vodne tokove (poplavljanje rijeka + izgradnja novih kanala). Prva hidroakumulacija u svijetu izgrađena je 1891. godine na rijeci Croton u saveznoj državi New York (SAD) s osnovnom namjenom vodoopskrbe grada, dok je u Bosni i Hercegovini prva hidroakumulacija nastala 1896. godine podizanjem kamene gravitacione brane na rijeci Mušnici (Jezero Klinje) radi vodoopskrbe i navodnjavanja Gatačkog polja. Prva hidroelektrana u Bosni i Hercegovini nastala je 1899. godine u Jajcu na Plivi tipa derivacije, bez brane, dok je prva hidroakumulacija u zemlji izgrađena kao hidroelektrana, s bransom i akumulacijom vode, puštena je u rad 1941. godine u Bogatićima kod Trnova na rijeci Željeznici. Prva velika hidroakumulacija s primarnom svrhom proizvodnje električne energije izgrađena poslije Drugog svjetskog rata, brana Jablanica na Neretvi, puštena u operativni rad sredinom 1950-ih. Danas ih ima ukupno četiri (Grabovica, Salakovac i Mostar).

Podjela jezera prema slanosti, geografskoj širini i trofičnosti

Jezera su podijeljena i prema koncentraciji soli (tabela 7.2.2.3) koja se kreće od <0,5 g/L do >50 g/L. Slatkovodna jezera imaju od manje 0,5 g/L ukupnih rastvorenih soli, dok bočata sadrže od 0,5 do 30 g/L. Slana i hiperslana prelaze 30 g/L, odnosno mogu dostići i više od 50 g/L (npr. Mrtvo more).

Tabela 7.2.2.3. Podjela jezera prema salinitetu/slanosti (koncentraciji soli)

Tip jezera	Koncentracija soli (g/L)	karakteristike	Primjeri
Slatkovodna	< 0,5 g/L (< 500 mg/L)	Voda pogodna za piće, većina jezera u svijetu.	Ohridsko jezero, Plitvička jezera, Boračko, Prokoško
Slankasta (brakična)	0,5 – 30 g/L	Prijelazna između slatkih i morskih voda.	Baltičko more (u dijelu), Skadarsko jezero (lokalno)
Slana (salina)	30 – 50 g/L	Visok sadržaj soli, život ograničen na halofilne vrste.	Veliko slano jezero (Utah), Kaspijsko more (dijelovi)
Hiperslana	> 50 g/L	Ekstremno visoka koncentracija soli, voda izrazito gusta.	Mrtvo more (≈ 340–350 g/L), Don Juan Pond (Antarktik, > 400 g/L)

Koncentracija soli zavisi od klime, geološke podloge, isparavanja i dotoka vode. U sušnim područjima isparavanje premašuje dotok, pa dolazi do akumulacije soli i stvaranja slanih ili natrijum-hloridnih jezera. Nasuprot tome, u umjerenim i vlažnim područjima s obilnim

padavinama i stalnim dotokom, jezera zadržavaju slatkovodni karakter. Promjene saliniteta značajno utiču na biološku raznolikost i raspored organizama, jer većina slatkovodnih vrsta ima uski raspon tolerancije prema rastvorenim solima. Podijela jezera na temelju hemijske karakteristike vode, uslovljene postojanjem (ili ne) dotoka i odtoka iz jezera što utiče na ukupni hemijski sastav vode i hidrološki režim (tabela 7.2.2.4). U Bosni i Hercegovini nema tipičnih endoreičnih jezera u pravom smislu riječi, jer su sva prirodna jezera dio otvorenih hidroloških sistema (povezana s površinskim ili podzemnim oticajem). Ipak, neka manja krška jezera i Blidinjsko jezero pokazuju djelimično endoreične osobine, jer se voda zadržava u zatvorenim slivovima i gubi poniranjem ili isparavanjem

Tabela 7.2.2.4. Podjela jezera prema odtoku

Tip jezera	Opis	Primjer
Protočna jezera	Imaju i dotok i odtok; rijeke ulaze i izlaze kroz jezero.	Plitvička jezera (izljev Korana)
Uvorna jezera	Imaju dotok rijeka, ali nemaju površinski odtok; voda se gubi isparavanjem ili poniranjem.	neka krška jezera Dinarida
Izvorna jezera	Iz njih izvire rijeke; jezero daje svoj površinski odtok.	Boračko jezero (iz njega izvire rijeka Šištica)
Bezotoka (zatvorena, endoreična) jezera	Nemaju ni dotok ni površinski odtok; voda se gubi infiltracijom ili evaporacijom.	Crveno jezero (Imotski), Kaspijsko more (reliktno)

Jezera se takođe mogu klasificirati prema svojoj geografskoj širini od arktičkih i subarktičkih, preko umjerenih, do tropskih i suptropskih zona. (tabela 7.2.2.5).

Tabela 7.2.2.5. Jezera prema geografskoj širini i klimatskim zonama

Tip jezera	Geografska širina	Klimatske karakteristike	Osobine jezera	Primjeri
Topla tropska	Ekvatorijalni i tropski pojas (0–23°)	Visoke prosječne temperature, stalna insolacija, nema izražene zime	Vrlo duboka, stabilna stratifikacija, visok nivo isparavanja	Viktorijino jezero, Tanganjika, Malavi
Suptropska	23–35°	Suha i vruća ljeta, blage zime, često visoka evaporacija	Česta slana i endoreična jezera, visoka oscilacija nivoa vode	Mrtvo more, Veliko slano jezero (Utah)
Umjereno topla	35–55°	Izražena sezonalnost, topla ljeta i hladne zime	Stratifikacija sezonska (ljeti), bogata biodiverzitet	Bodensko jezero, Ohridsko jezero
Subpolarna	55–66°	Kratka ljeta, duge i hladne zime, često zaleđena	Plitka jezera, kratak period stratifikacije, niska produktivnost	Jezera Skandinavije, Islanda
Polarna	>66° (Arktik i Antarktik)	Permafrost, niske temperature, duga zaleđenost	Vrlo plitka, mali period otvorene vode, oligotrofna	Jezera Grenlanda i Antarktika

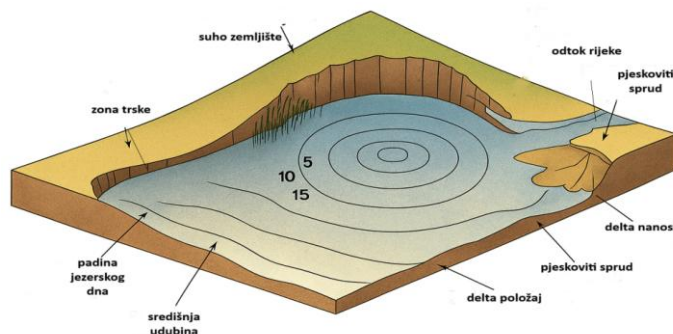
Prema stupnju organske produkcije, odnosno trofičnosti, jezera se klasificiraju od oligotrofnih, sa malom količinom organske materije koju proizvode, do eutrofnih, sa velikom količinom primarne produkcije organske materije. Primarna produkcija uslovljena je količinom hranljivih tvari (nutrijenata) u vodi, kao i intenzitetom svjetlosti, temperaturom i drugim ekološkim faktorima. Ova podjela se naziva trofička klasifikacija jezera i predstavlja osnovni način razumijevanja ekološkog stanja i funkcije jezera. Što je veća koncentracija hranljivih tvari (posebno azota i fosfora) u vodi, to je veća produkcija fitoplanktona i organske materije, odnosno viši trofički status jezera (grafikon 7.2.2.1).

Trofičnost	karakteristike
Oligotrofno	Vrlo malo hranjivih tvari (N, P), voda bistra i plava, niska produktivnost, fitoplankton slabo razvijen, (Ohridsko, Kukaviče jezero).
Mezotrofno	Umjerene količine hranjivih tvari, voda umjereno bistra, srednja produktivnost, raznolika flora i fauna (Balaton, Prokoško jezero)
Eutrofno	Visoka koncentracija hranjivih tvari, voda mutna i zelena uslijed masovnog razvoja algi, visoka produktivnost, cvjetanje algi
Hipertrofno	Ekstremno visoke koncentracije hranjivih tvari, masovno uginuće riba
Distrofno	Malo mineralnih nutrijenata, ali puno organskih kiselina (huminskih, fulvinskih), smeđa voda, kiselo pH 4–6, rasprostri ti se na 55° (Skandinavija, Rusija, Kanada) geografske širine

Grafikon 7.2.2.1. Tipovi jezera prema trofičkom statusu i karakteristike

7.2.2.2. Reljef jezera

Jezera su stajaći vodeni ekosistemi čije se abiotske osobine određuju geološkom podlogom, klimatskim uticajem i hidrološkim režimom. Reljef jezerskog bazena (ili *morfometrija jezera*) označava oblik dna i obale jezera, odnosno trodimenzionalnu građu prostora u kojem se akumulira voda. To je geomorfološka karakteristika koja određuje dubinu, površinu, nagib padina, tip obale i raspored sedimenta. Jezerski bazen uključuje ne samo samo jezero, već i sve geološke i geomorfološke karakteristike koje utiču na njega, kao što su doline, padine, riječne delte, obale i drugi elementi koji oblikuju prostor oko jezera (shema 7.2.2.1).



Shema 7.2.2.1. Reljef jezerskog bazena (Izvor: autori, prema konceptu morfologije jezerskog bazena Hutchinson, 1957).

Reljef bazena je ključan za razumjevanje hidrologije jezera, njegovih ekosistema i dinamike voda. Obale jezera (litoral): su područja koja okružuju jezero i granicu između kopna i vode. Oblik obale može biti različit, od strmih litica do blagih, pješčanih ili močvarnih područja. Obala može biti razuđena, sa mnogim uvalama i poluostrvima, ili može biti ravna i jednostavna. Obala je često bogata biljnim i životinjskim svijetom, jer predstavlja zonu koja povezuje vodeni ekosistem sa kopnenim. Kada govorimo o reljefu jezera, često se misli na vertikalnu i horizontalnu podjelu jezerskog reljefa koja se odnosi na oblik i strukturu jezera u smislu dubine, nagiba i širine. Ovaj pristup se koristi za analizu geomorfoloških karakteristika samog jezera, odnosno kako se dno jezera, kao i njegova obala, prostiru i mijenjaju.

Vertikalna podjela odnosi se na dubinu jezera, odnosno razlike u visini koje postoje od površine vode do najdubljih tačaka. Osnovni elementi reljefa jezerskog bazena uključuju obalu, priobalni pojas, profundal ili duboku zonu. Obala (litoralna zona u geomorfološkom smislu) predstavlja prijelaz između kopna i vodenog tijela. Može biti strma obala koja nastaje u tektonskim ili ledenjačkim jezerima, često s velikom dubinom uz samu obalu ili blaga obala, s postepenim ulaskom u vodu, često s razvijenim močvarnim područjem i taloženjem pijeska ili mulja. Plitko područje (priobalni pojas) je dio koji se proteže od obale prema sredini jezera s blagim nagibom dna. Ovdje dolazi do nataložavanja grubog materijala (pijeska, šljunka) i često se formiraju sprudovi i delte na ušću pritoka. Duboka udubljenja (centralni ili profundalni dio bazena) je najdublji dio jezerskog dna, često u obliku depresije. U njemu se taloži fini mulj, organski i neorganski sediment, jer nema strujanja i dominiraju procesi akumulacije.

Padine jezerskog dna povezuju plitko područje s centralnom udubinom. Njihov nagib utiče na cirkulaciju vode i distribuciju sedimenta. Ušće rijeke (delta ili aluvijalni nanos) mjesto gdje površinski tok unosi sedimentni materijal (pijesak, glinu, organsku materiju) u jezero. Ušća mogu formirati pljosnate sprudove ili male delte. Značaj reljefa za hidrobiologiju i ekološke procese u jezero prvenstveno što karakter reljefa određuje miješanje i stratifikaciju vode, utiče na temperaturni i kiseonikov profil, definiše mikrostaništa za organizme (npr. bentos na dnu, makrofite u plitkim dijelovima) i kontroliše proces taloženja i raspodjele hranjivih tvari. Strukturne i reljefne osobine bazena imaju direktan uticaj na vodenu masu i njena svojstva. Promjene u dubini, nagibu i dotoku vode oblikuju fizičko-hemijski sastav jezera, određujući njegovu prozirnost, temperaturu, pH vrijednost i koncentraciju kiseonika. Temperatura i svjetlost raspoređuju se u vertikalnim zonama (epilimnij, metalimnij, hipolimnij), a stratifikacija utiče na raspodjelu kiseonika i hranjivih tvari. Hemijski sastav vode zavisi od dotoka površinskih i podzemnih voda, kao i od trofičkog statusa. U okviru abiotskih faktora ističu se i morfometrijske karakteristike jezera (površina, dubina, zapremina), kao i dinamika taloženja sedimenta (tabela 7.2.2.6).

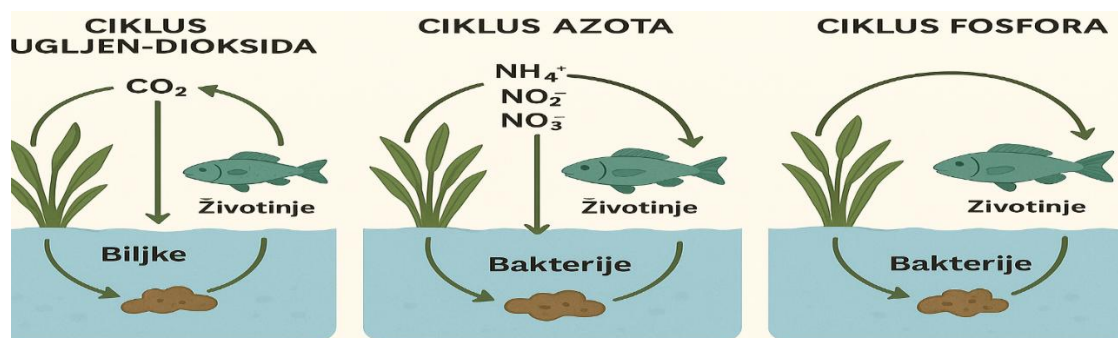
Tabela 7.2.2.6 Abiotske karakteristike jezera

Kategorija	Parametar	Opis / vrijednosti
Fizički parametri	Temperatura vode	Vertikalna stratifikacija (epilimnij, metalimnij, hipolimnij); sezonske promjene u temperaturi.
	Prozirnost (Secchi disk)	Mjeri se dubina prozirnosti i svjetlosna penetracija; povezana s trofičkim statusom jezera.
	Boja	Ovisi o količini organskih tvari, planktonu i mineralnom sastavu.
	Dubina	Maksimalna i prosječna dubina određuju volumen, stabilnost i miješanje vodenog stupca.
	Površina jezera	Povezana s klimatskim i hidrodinamičkim procesima.
	Sedimenti	Mineralni i/ili organski; značajni za hemijski sastav i taloženje nutrijenata.
Hemijski parametri	pH vrijednost	Može biti kisela, neutralna ili alkalna, u zavisnosti od podloge i dotoka.
	Otopljeni kiseonik (O ₂)	Vertikalna raspodjela zavisi od fotosinteze, respiracije i temperaturne stratifikacije.
	Električna provodljivost	Pokazatelj mineralizacije i ionskog sastava vode.
	Hranjivi elementi (N, P)	Ukupni i reaktivni oblici dušika i fosfora; određuju trofički status jezera.
	Karbonati (HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻)	Određuju puferni kapacitet i stabilnost pH vrijednosti.
Ostali abiotski faktori	Klimatski uvjeti	Padavine, temperatura zraka i insolacija utiču na togassku ravnotežu i dotok vode.
	Hidrološki režim	Odnos dotoka, otoka i podzemnog napajanja oblikuje dinamiku vodenog tijela.
	Geološka podloga	Karbonatna, silikatna ili vulkanska – određuje mineralni i hemijski sastav vode.
	Trofički status	Oligotrofno – mezotrofno – eutrofno jezero; klasifikacija prema koncentraciji hranjivih materija.

7.2.2.3. Zone jezera: strukture i funkcije

Osnovne karakteristike ekosistema jezera, pored abiotičkih, uključuju biodiverzitet, trofičke lance (lance i mreže ishrane), te biološke, odnosno biogehemijske cikluse. Stajanje vode često podržavaju bogat biodiverzitet, iako uslovi mogu biti ograničeni zbog stagnirajuće prirode vode, što utiče na vrste organizama koje se mogu naseliti. U stajaćim vodama trofički lanci obično počinju sa autotrofima, vodenim biljkama i algama koje fotosintezom proizvode organsku materiju. Na njih se nadovezuju različite grupe herbivora, mesoždera i detritivora, koje zajedno formiraju složene mreže ishrane. Biološki ciklusi predstavljaju kruženje materija u prirodi. Najvažniji ciklusi u svim vodenim ekosistemima, pa tako i u jezerima, jesu ciklus azota (N), fosfora (P) i ugljen-dioksida (CO₂). U vodu CO₂ ulazi iz atmosfere, disanja organizama i razgradnje organske materije. Fitoplankton i biljke ga koriste za fotosintezu i stvaraju organsku tvar, dok životinje i bakterije oslobađaju CO₂ disanjem. Na taj način održava

se ravnoteža između autotrofne (proizvodne) i heterotrofne (potrošačke) komponente ekosistema. Azot je neophodan za sintezu proteina i DNK, a u vodi se javlja u obliku amonijaka (NH_4^+), nitrita (NO_2^-) i nitrata (NO_3^-). Mikroorganizmi provode procese nitrifikacije (amonijak $\rightarrow$ nitrati) i denitrifikacije (povrat azota u atmosferu), čime se obezbeđuje stalna dostupnost hranjivih tvari potrebnih za rast algi, makrofita i planktona. Fosfor je često ograničavajući faktor u vodi, jer ga ima u malim koncentracijama. Prisutan je uglavnom u obliku fosfata (PO_4^{3-}). Biljke i alge ga koriste za rast, a nakon uginuća organizama fosfor se vraća u sediment ili u vodeni stupac procesom mineralizacije (slika 7.2.2.4). Upravo dostupnost fosfora često određuje trofički status jezera (oligotrofno, mezotrofno, eutrofno).



Slika 7.2.2.4. Ciklus azota, fosfora i ugljen dioksida u jezeru

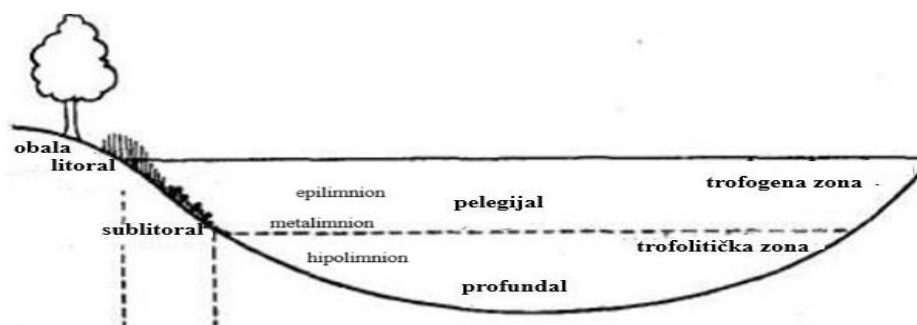
Ovi ciklusi osiguravaju kontinuiranu dostupnost hranjivih materija potrebnih za fotosintezu, rast i reprodukciju organizama. Oni sprečavaju iscrpljivanje resursa: bez reciklaže ugljika, azota i fosfora, organizmi u vodi bi ubrzo ostali bez osnovnih elemenata za život. Takođe održavaju dinamičku ravnotežu između produkcije (fitoplankton, biljke) i potrošnje (zooplankton, ribe, mikroorganizmi). Zahvaljujući ovim ciklusima u vodi opstaju fitoplankton, makrofite, zooplankton, insekti i ribe. Bez zatvorenog kruženja elemenata, jezera i bare bi brzo izgubila produktivnost, a ekosistem bi nestao. Horizontalna podjela reljefa jezera uključuje tri osnovne zone litoralna zona (litoral), najplići dio uz obalu, bogat biljnim i životinjskim svijetom, sublitoralna zona (sublitoral), srednja dubina, još uvijek pogodna za rast biljaka i limnetička zona (limnion), dublja voda koja nije pogodna za fotosintezu, ali je bogata ribama i drugim organizmima u slobodnoj vodi (shema 7.2.2.2). Svaka od ovih zona ima specifične ekološke karakteristike koje omogućavaju različite vrste biljaka i životinja da opstanu, u zavisnosti od dubine, svjetlosti, temperature i drugih faktora. Podjela jezera prema prodoru svjetlosti odnose se na različite slojeve jezera koji se razlikuju prema količini svjetlosti koja prodire u vodu. Ovaj faktor je ključan za određivanje raspodjele biljnih i životinjskih zajednica u jezeru, jer svjetlost igra ključnu ulogu u fotosintezi, što je osnovni proces za proizvodnju hrane u vodenim ekosistemima.

Vertikalna podjela jezera prema temperaturi, odnosi se na razliku u temperaturama vode u različitim dubinskim slojevima jezera. Temperatura je važan faktor jer utiče na kiseonik, hemijske procese i vrste organizama koji mogu preživjeti u različitim dubinama. Ova podjela je od velike važnosti za razumijevanje hidrodinamike jezera, jer temperatura direktno utiče na životne uslove unutar jezerskog ekosistema. Na osnovu prodora svjetlosti i temperature jezero se može u toplijem dijelu godine podijeliti u sledeće glavne zone: epilimnij (fotička zona),

metalimnij i hipolimnij (afotička zona). Epilimnij je gornji sloj jezera, najbliži površini, gdje svjetlost prodire najdublje i omogućava fotosintezu. Ovaj sloj je obično topliji (u toku ljeta), jer je pod uticajem sunčeve svjetlosti. Voda u epilimniju se aktivno miješa zahvaljujući djelovanju vjetrova, talasa i drugih vanjskih faktora. U ovom sloju se nalazi najveći broj algi i biljnih organizama (fitoplankton, alge, potopljene vodene biljke) koje obavljaju fotosintezu i stvaraju organsku materiju. Zbog obilja svjetlosti i visoke temperature, epilimnij je najproduktivniji sloj jezera i predstavlja osnovu trofogene zone, u kojoj prevladavaju procesi primarne produkcije.

Hipolimnij je najdublji sloj jezera, smješten ispod metalimnija. U njemu svjetlost gotovo uopće ne prodire, a voda je hladna, gusta i stabilna, s vrlo slabim ili nikakvim miješanjem s gornjim slojevima, a količina rastvorenog kiseonika često je ograničena, naročito u eutrofnim jezerima. Zbog nedostatka svjetlosti nema fotosinteze, a život se zasniva na razgradnji organske materije koja tone iz gornjih slojeva. U hipolimniju se trofolitička zona u potpunosti razvija, tu dominiraju procesi dekompozicije i mineralizacije, kojima mikroorganizmi razgrađuju organsku materiju i oslobađaju hranjive tvari.

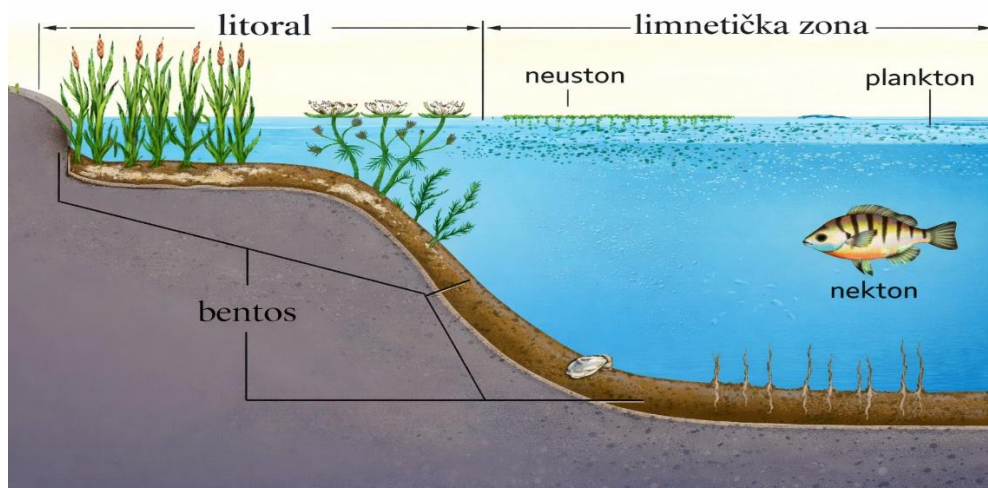
Afotična zona obuhvata dublje slojeve jezera u koje svjetlost više ne prodire. U njoj je količina svjetlosti premala za fotosintezu, pa biološka produkcija izostaje. Život u afotičnoj zoni zavisi od detritusa, organskih tvari koje tonu iz gornjih slojeva ili od organizama koji se hrane produktima razgradnje organske materije. Afotična zona se u većini slučajeva preklapa s hipolimnijem i trofolitičkom zonom, gdje prevladavaju reducenti i detritofagni organizmi.



Shema 7.2.2.2 Vertikalne i horizontalne zone jezerskog ekosistema

7.2.2.4. Biocenoza jezera

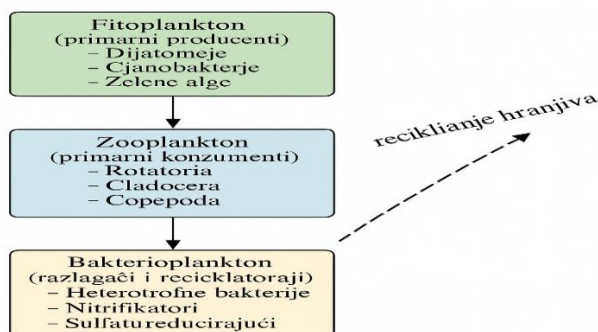
Plankton, nekton i bentos predstavljaju tri glavne skupine (komplekse) organizama u jezerskoj biocenozi. Svaka od njih ima svoje karakteristike u pogledu sastava i distribucije unutar ekosistema jezera. Razvoj planktona povezan je s porastom dubine vode, pri čemu najveću brojnost i raznovrsnost dostiže u limnionu, tj. u središnjem dijelu jezera. Organizmi nektona su plivači koji nastanjuju pelagične i litoralne zone. Bentos nastanjuje dno jezera i igra ključnu ulogu u reciklaži organskih tvari (slika 7.2.2.5).



Slika 7.2.2.5 Prikaz biocenoza jezera (www.slideserve.com/samara/lakes-and-ponds-ecosystem, prilagođeno)

Plankton je ključna komponenta biocenoze jezera, a njegove sezonske promjene, oscilacije i dijelovi života igraju veliku ulogu u ekološkoj ravnoteži i stabilnosti vodenih ekosistema. Plankton je podložan dinamičkim promjenama koje ovise o različitim ekološkim faktorima, poput temperature, svjetlosti, hranjivih tvari, strujanja i konkurencije. Plankton se prema sastavu dijeli u fitoplankton (biljni plankton), zooplankton (životinjski plankton) i bakterioplankton (tabela 7.2.2.7). U jezerskim ekosistemima fitoplankton, zooplankton i bakterioplankton predstavljaju međusobno povezane funkcionalne komponente koje održavaju kruženje materije i energije. Fitoplankton stvara organsku tvar putem fotosinteze, zooplankton je koristi kao izvor hrane, dok bakterioplankton razgrađuje organske ostatke i vraća hranjive tvari u opticaj. Posebno se ističu dijatomeje (*Bacillariophyceae*) koje su u većini jezera najbrojniji i ekološki najvažniji predstavnici fitoplanktona, naročito u proljetnom i jesenjem periodu. Zajedno, ove skupine planktona čine osnovu primarne produkcije i održavanja trofičke ravnoteže jezerskog ekosistema.

Ove tri komponente čine plankton kao cjelovit životni kompleks, povezan procesom transformacije organske materije i protoka energije (shema 7.2.2.3).



Shema 7.2.2.3 Sastav i povezanost organizama planktona u jezeru

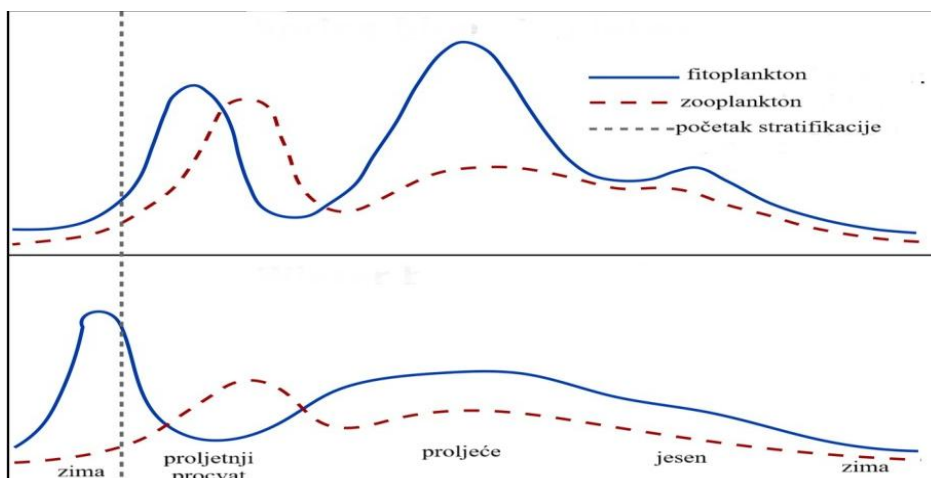
Tabela 7.2.2.7. Sastav planktona u jezerima

Grupa	Uloga	Tipični predstavnici
Fitoplankton	Primarni producenti – fotosinteza, stvaraju organsku tvar	Cyanobacteria (cijanobakterije) – česti u eutrofnim jezerima; mogu formirati cvjetanja vode (npr. <i>Microcystis</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Aphanizomenon</i>). Chlorophyceae (zelene alge) – vrlo raznolika grupa (npr. <i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> , <i>Pediastrum</i>). Bacillariophyceae (dijatomeje) – često dominantne u proljeće i jesen (npr. <i>Cyclotella</i> , <i>Asterionella</i> , <i>Fragilaria</i>). Dinoflagellata (dinoflagelati) – prisutni u stabilnim, toplim vodenim masama (npr. <i>Ceratium</i>). Chrysophyceae (zlatne alge) – tipične za oligotrofna, hladnija jezera (npr. <i>Dinobryon</i>). Euglenophyta (euglene) – česte u jezerima bogatim organskom materijom (npr. <i>Euglena</i>).
Zooplankton	Primarni konzumenti – hrane se fitoplanktonom i bakterijama, prenose energiju ribama	Protozoa (trepetljikaši i amebe) najčešće sitni predatori ili detritofagi. Rotifera (točkaši) mala i brojna skupina; osjetljivi indikatori trofičkog stanja (npr. <i>Brachionus</i> , <i>Keratella</i> , <i>Polyarthra</i>). Cladocera (rašljoticalci) filtratori fitoplanktona (npr. <i>Daphnia</i> , <i>Bosmina</i> , <i>Chydorus</i>). Copepoda (veslonošci) dominantni u većini jezera; dijele se na ciklopide (<i>Cyclops</i>) i kalanoide (<i>Eudiaptomus</i>). <i>Nauplius</i> - larvalni stadiji veslonožaca.
Bakterioplankton	Razlagači i reciklatori hranjivih materija – ključni za mikrobnu petlju	Heterotrofne bakterije, razgrađuju organsku materiju, recikliraju hranjive tvari (npr. <i>Pseudomonas</i> , <i>Flavobacterium</i>). Autotrofne bakterije, koriste anorganske izvore (npr. nitrificirajuće bakterije: <i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrobacter</i>). Cijanobakterije, iako se često ubrajaju u fitoplankton, funkcionalno su i dio bakterioplanktona jer su prokarioti. Anaerobne bakterije u sedimentu i hipolimnionu bez kiseonika (npr. sulfatreducirajuće bakterije <i>Desulfovibrio</i>).

Fitoplankton i zooplankton podložni su velikim sezonskim oscilacijama zbog promjena u ekološkim uvjetima, posebno tijekom proljeća, ljeta, jeseni i zime (slika 7.2.2.6). Planktonske zajednice podložne su oscilacijama ovisno o nekoliko ključnih faktora, prvenstveno temperatura vode. Ona ima izravan uticaj na rast i razmnožavanje planktonskih organizama. U toplijim uvjetima (proljeće i ljeto) rast fitoplanktona je brži, dok hladna voda (zima) usporava životne cikluse. Svjetlost je ključna za fotosintezu i rast fitoplanktona, pa smanjenje svjetlosti (posebno zimi ili u dubokim dijelovima jezera) može ograničiti njegovu proizvodnju. U plitkim jezerima, sunčeva svjetlost doprinosi većoj produkciji fitoplanktona. Povećana koncentracija nutrijenata poput dušika i fosfora može izazvati eutrofikaciju, što često dovodi do prekomjernog rasta fitoplanktona, osobito algi, što uzrokuje algalne cvjetove. Ovaj proces može smanjiti kiseonik u vodi, negativno utičući na zooplankton i druge vodene organizma. Strujanje i miješanje vode uzrokuju miješanje slojeva vode, što omogućava transport hranjivih tvari i planktonskih organizama. U dubljim, stratificiranim jezerima, plitki dijelovi imaju veću koncentraciju planktona, dok duboki dijelovi mogu imati manju koncentraciju jer su izvan dosega svjetlosti i hranjivih tvari. Godišnji ciklus fitoplanktona i zooplanktona u jezerima rezultat je sezonskih promjena svjetlosti, temperature, dostupnosti hranjivih tvari i hidrodinamičkih procesa. Tokom zime biomasa fitoplanktona ostaje vrlo niska jer je svjetlost ograničena, a temperature su niske. Dominiraju male hladnotolerantne vrste, poput

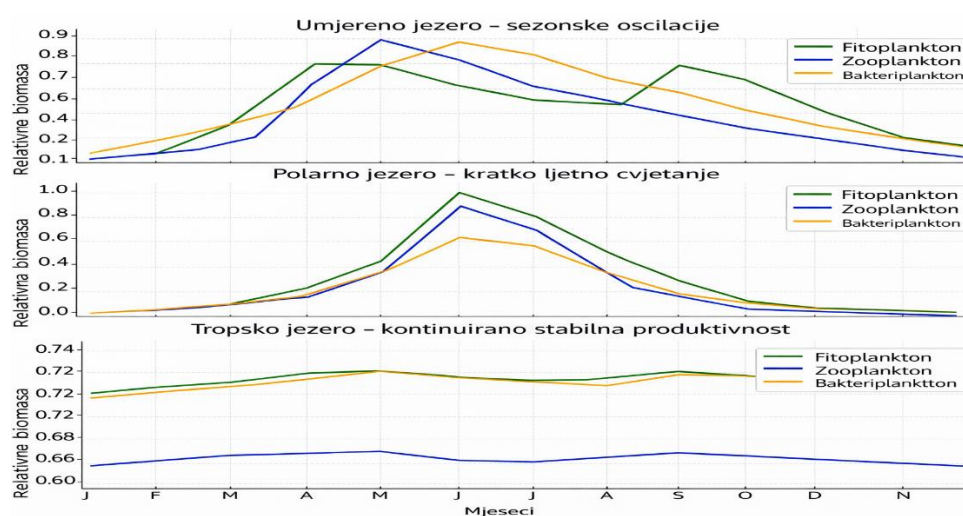
predstavnik roda *Cryptomonas*. Populacije zooplanktona se u tom periodu svode na minimum; preživljavaju samo ciste, jaja ili mali broj jedinki koje čekaju povoljnije uvjete (slika 7.2.2.6). Bakterioplankton pokazuje smanjenu aktivnost zbog niske temperature, iako se u sedimentu nastavljaju odvijati anaerobni procesi.

S dolaskom proljeća, nakon perioda zimskog miješanja vodenog stupca koji obogaćuje površinske slojeve hranjivim tvarima poput nitrata i fosfata, dolazi do intenzivnog proljetnog procvata algi. U ovim dobro osvijetljenim, hladnim uvjetima dominiraju dijatomeje (Diatomeae) i zlatne alge (Chrysophyceae). Fitoplanktonska biomasa naglo raste, što se odražava na proljetni maksimum u sezonskoj dinamici. Zooplankton zaostaje za fitoplanktonom i počinje rasti nešto kasnije, prvenstveno kladocere (Cladocera), koje se hrane fitoplanktonom i svojim intenzivnim ispašanjem uzrokuju postepeni pad proljetnog cvjetanja. Istovremeno, bakterioplankton postaje sve aktivniji, koristeći organske tvari oslobođene razgradnjom ranih proljetnih algi. U ljetnom periodu, s porastom temperature, u jezeru se uspostavlja stabilna stratifikacija, čime se ograničava dotok hranjivih tvari u površinski sloj. U takvim uvjetima fitoplanktonom dominiraju zelene alge (Chlorophyceae) i cijanobakterije (Cyanobacteria), pri čemu su u eutrofnim jezerima česta intenzivna cvjetanja cijanobakterija. Zooplankton dostiže svoj maksimum u junu ili julu, ali kasnije može opadati zbog smanjene količine hrane i povećane predacije riba. Bakterioplankton u epilimnionu ostaje vrlo aktivan, dok se u hipolimnionu, zbog potrošnje kisika, mogu razviti anaerobni procesi. Dolaskom jeseni, slabljenje stratifikacije dovodi do ponovne miksacije jezera i obogaćivanja površinskog sloja hranjivim tvarima. To omogućava novi, iako mnogo skromniji porast fitoplanktona, u kojem ponovno važnu ulogu imaju dijatomeje. Jesenji maksimum znatno je manji od proljetnog. Populacije zooplanktona se smanjuju, ali ostaju prisutni ostaci ljetnih zajednica. Bakterioplankton održava umjerenu aktivnost, reciklirajući organske tvari koje nastaju razgradnjom algi i zooplanktona. Ovakva sezonska dinamika, s izraženim proljetnim procvatom i promjenama u dominaciji planktonskih skupina, odražava temeljne ekološke procese u jezerima te pokazuje kako fizikalni i hemijski faktori vode određuju sukcesiju i produktivnost planktonskih zajednica tokom godine.



Slika 7.2.2.6. Prikaz sezonskih promjena i oscilacija u planktonu jezera (Sommer i sur.2012)

Sastav planktona posebno je karakterističan u zavisnosti od stupnja organske produkcije (trofije), a njegov sastav je različit u oligotrofnim, mezotrofnim i eutrofnim jezerima. Neki autori naznačavaju i hipertrofna jezera. Plankton je ključni životni kompleks (potpuni) za funkcionisanje jezerskog ekosistema, jer igra ulogu u prehrambenom lancu, proizvodnji kiseonika i razgradnji tvari. Sezonske promjene, oscilacije u temperaturnim uvjetima, dostupnosti svjetlosti i hranjivih tvari, te konkurencija unutar planktonskih zajednica, mogu dovesti do značajnih promjena. Usljed klimatskih uvjeta oscilacije planktona pokazuju različitost u umjerenom, polarnom i tropskom području. Umjereno jezero može imati dva maksimuma razvoja fitoplanktona (proljeće, jesen), ljetni maksimum zooplanktona, polarna jezero imaju kratko i intenzivno ljetno cvjetanje i tropsko jezero gotovo ravne krivulje, bez jasnih oscilacija – produktivnost stabilna tokom cijele godine, s vrlo blagim fluktuacijama (grafikon 7.2.2.1).



Grafikon 7.2.2.1. Oscilacije produktivnosti planktonske zajednice umjerena, polarna i tropska jezera

Nekton obuhvata organizme koji aktivno plivaju i mogu se kretati u vodenom ekosistemu neovisno o vodenim strujama. U jezerima najvažniju i najbrojniju skupinu nektona čine ribe. Među njima se razlikuju funkcionalne trofičke grupe: predatori (karnivorni/piscivorni), kao što su štika (*Esox lucius*), smuđ (*Sander lucioperca*), pastrmka (*Salmo trutta*) i som (*Silurus glanis*), te herbivorni i omnivorni predatori koji se hrane biljnim i/ili životinjskim organizmima, među kojima su šaran (*Cyprinus carpio*), keder (*Alburnus alburnus*), bijela riba (razni ciprinidi) i druge lokalne ciprinidne vrste. U širem ekološkom smislu, u nekton se mogu uključiti i pojedini vodozemci, poput žaba, krastača i daždevnjaka, koji se aktivno kreću u vodi, iako su mnogo manje zastupljeni od riba. Od ptica u našim jezerima nektonske karakteristike imaju pojedine vrste pataka (porodica Anatidae), koje aktivno plivaju i hrane se vodenim organizmima, ali se ne smatraju tipičnim nektonom već povremenim korisnicima jezerskog ekosistema. Nekton je podložan sezonskim promjenama, iako te promjene obično nisu toliko drastične kao kod planktona. Temperatura, koncentracija kiseonika, hranjenje i reprodukcija ključni su faktori koji oblikuju sezonsku dinamiku nektonskih zajednica u jezerima (tabela 7.2.2.8).

Tabela 7.2.2.8. Sezonske promjene u aktivnostima nektona u jezeru

SEZONA	KARAKTERISTIKE
proljeće	- Povećanje temperature vode omogućuje veću aktivnost nektonskih organizama.- Ribe (osobito predatori) postaju aktivnije. Reprodukcijska: mnoge vrste (štuka, smuđ) dolaze u plitke zone radi polaganja jaja. Migracija: pastrmke i druge vrste traže povoljnija područja za hranu i razmnožavanje.
Ljeto	- Stratifikacija jezera: topla površina, hladniji dublji slojevi.- Ribe koje vole hladniju vodu migriraju dublje, dok vrste toplijih voda ostaju plitko.- Hrane ima dovoljno (fitoplankton i zooplankton), ali nizak kiseonik u dubini ograničava aktivnost nektona.
Jesen	- Jesenje miješanje obogaćuje površinske slojeve hranjivim tvarima.- Povećava se dostupnost hrane, naročito za predatore. Migracija: nekton (ribe) kreće u plitke zone, a pred kraj jeseni povlači se u dublje dijelove gdje je voda stabilnija.
Zima	- Aktivnost nektona opada zbog niske temperature. Ribe postaju letargične. - Preživljavanje: smanjenje metaboličke aktivnosti; smuđ i druge vrste prilagođavaju se zimskim uvjetima.

Slični faktori koji utiču na plankton također utiču na nekton, ali uz određene razlike zbog veće mobilnosti tih organizama. Temperatura, toplija voda obično povećava aktivnost nektonskih organizama jer povećava brzinu metabolizma i omogućava bržu potrošnju hrane. U hladnim uvjetima (posebno u zimskim mjesecima), većina nektonskih organizama smanjuje aktivnost ili migrira u dublje, stabilnije slojeve. Niske vrijednosti koncentracije kiseonika u dubljim dijelovima jezera, osobito tijekom ljetne stratifikacije, mogu ograničiti aktivnost nektonskih organizama u tim zonama. Ribe koje preferiraju hladnu vodu migriraju prema dubljim zonama, gdje je kiseonik prisutan, dok vrste koje preferiraju topliju vodu ostaju bliže površini. Dostupnost hrane za nektonske organizme također igra ključnu ulogu. Prekomjerni rast fitoplanktona zbog eutrofikacije može uzrokovati velike promjene u cijelom prehranbenom lancu, uključujući smanjenje broja predatora (nektona), jer će doći do smanjenja kiseonika i promjena u biološkoj ravnoteži.

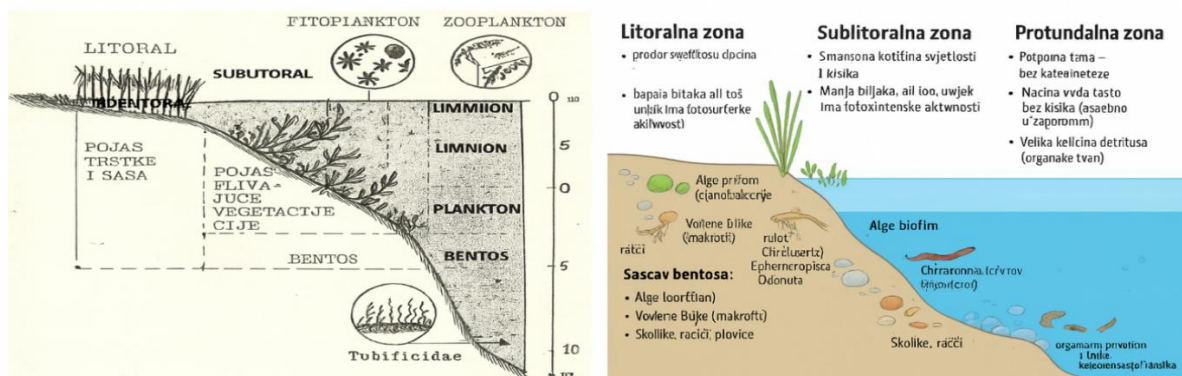
Migracija nektonskih organizama igra važnu ulogu u očuvanju ravnoteže ekosistema jezera. Na primjer, neke vrste riba migriraju u različite dijelove jezera ovisno o sezoni i uvjetima (reprodukcija, hrana, temperatura). Ove migracijske strategije, zajedno s dostupnošću resursa, doprinose tome da se sastav nektonskih zajednica razlikuje među jezerima različitog trofičkog statusa. Nekton u različitim tipovima jezera na temelju stupnja trofičnosti pokazuje i različit sastav. U oligotrofnim jezerima niska količina hranjivih tvari i relativno hladna voda znače da su nektonske zajednice obično manje raznolike, ali uključuju vrste koje su specijalizirane za hladnije uvjete (npr. pastrmka). Niska biomasa nektona zbog ograničene hrane, ali visoka kvaliteta vode. U eutrofnim jezerima visoka količina hranjivih tvari omogućuje bogatiji fitoplankton i zooplankton, što dovodi do većih biomasa nektona. Međutim, povećana koncentracija hranjivih tvari može izazvati eutrofikaciju, što smanjuje kiseonik i može utjecati na brojnost nektona (posebno predatora poput riba). U jezerima srednjeg trofičkog statusa (mezotrofna), nektonske zajednice su često uravnotežene s umjerenim brojem predatora i riba. Količina hrane i ravnoteža u ekosustavu omogućuju stabilne zajednice nektona. Nekton čini ključnu komponentu jezerskih ekosistema, a njegovi sezonski ciklusi i oscilacije u velikoj mjeri ovise o temperaturi, hranjenju, razini kiseonika i migracijama. Zdravlje nektonske zajednice izravno je povezano s kvalitetom vode, a promjene u ekosistemu, poput eutrofikacije, mogu imati velike uticaje na dinamiku nektona.

Bentos jezera – osnovne karakteristike po zonama

Bentos čine svi organizmi koji žive na dnu jezera ili u neposrednoj blizini dna. S obzirom na dubinu i pristup svjetlosti, u stratificiranim jezerima bentos se dijeli na litoralnu, sublitoralnu i profundalnu zonu. Organizmi raspoređeni horizontalno u jezerskom ekosistemu obitavaju u različitim pojasevima od litoralnog područja s dobro razvijenom vegetacijom, gdje dominiraju trstika i šaš (shema 7.2.2.4), preko pojasa plutajuće vegetacije (npr. lopoč). Sublitoral karakterizira porast dubine, slabiji prodor svjetlosti, smanjenje vegetacije te veće taloženje fine organske materije u sedimentu, uz postepeni prijelaz dna u strmiji pad prema dubljem dijelu jezera. Vertikalno se već u zoni litorala javljaju organizmi planktona, a sa porastom dubine broj ovih organizama raste. Sa njima se miješaju mlade jedinke nektona koje su vezane za slobodni dio limniona i zbog porasta dubine slijedi nagli pad sedimenta (afotična zona) sa ograničenim brojem organizama bentosa (maločetinaši, dvokrilni insekti) koji su adaptirani na uvjete bez primarne produkcije.

Litoralna zona (priobalni dio jezera) odlikuje se dobrim osvjetljenjem koje omogućava intenzivnu fotosintezu. Ovo područje je bogato kiseonikom i hranjivim tvarima te nudi raznovrsna staništa, uključujući kamenito, pjeskovito i muljevito dno, kao i gusto vodeno bilje. U litoralu se razvija najveća biološka raznolikost bentoskih organizama. U sastavu bentosa posebno se ističe fitobentos, koji čine alge perifitona, cijanobakterije i vodene biljke (makrofiti). Zoobentos je predstavljen brojnim skupinama beskičmenjaka, među kojima su puževi, larve vodenih insekata iz redova Ephemeroptera, Trichoptera, Odonata i Diptera, kao i predstavnici Coleoptera i Hemiptera. Osim toga, prisutni su i puževi, školjke, račići, pijavice te Oligochaeta, a povremeno se mogu javiti i slatkovodne spužve iz porodice Spongillidae.

Sublitoralna zona (područje ispod litorala, još uvijek unutar zone dostupne svjetlosti) odlikuje se smanjenom količinom svjetlosti i kiseonika u odnosu na priobalni dio jezera. Vegetacija je oskudnija, ali je fotosintetska aktivnost i dalje prisutna. U ovom pojasu dolazi do taloženja organskih tvari koje potiču iz litorala i površinskih slojeva. Bentos karakterišu biofilm i razvoj jednostavnih algi, a u zoobentosu dominiraju larve komaraca iz porodice Culicidae, larve tulara i dvokrilnih mušica iz porodice Chironomidae, te razne vrste crva (Oligochaeta). Ovdje su pretežno prisutni organizmi tolerantni na slabije ekološke uvjete, kao što su smanjena provjetrenost i povećano taloženje finog detritusa. Profundalna zona (duboki dio jezera u kojem svjetlost ne dopire) predstavlja afotičnu zonu potpunog mraka u kojoj fotosinteza nije moguća. Ovaj sloj odlikuje hladna voda, a koncentracija kiseonika često je vrlo niska ili potpuno odsutna, naročito u eutrofnim ili zagađenim jezerima. U profundalu se nakuplja velika količina detritusa – organskog materijala koji potječe iz vodenog stupca (pelagijala). Bentos u ovoj zoni čine uglavnom organizmi otporni na niske vrijednosti kiseonika, među kojima se ističu maločetinaši skupine Oligochaeta iz porodice Tubificidae, larve dvokrilaca familije Chironomidae, te familije Chaoboridae. Vrste familije dvokrilnih insekata Chaoboridae, naseljavaju cijeli vodeni stub posebno jezera većeg stupnja trofije, a javljaju se i na dnu (bentosu). Zbog nepovoljnih ekoloških uvjeta u profundalnoj zoni nema većih životinja, a ukupna biološka raznolikost je znatno smanjena.

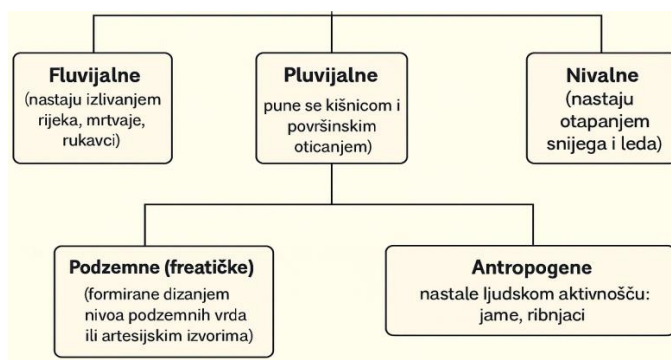


Shema 7.2.2.4. Zone jezera, prikaz pada sedimenta i karakteristike bentosa (prilagođeno)

Organizmi bentosa u jezerima imaju ključnu ulogu u razgradnji organske materije, čime doprinose lancu ishrane, kruženju tvari i obnovi hranjivih elemenata u ekosistemu. Kao stanovnici bentala, bentoski organizmi zbog svoje brojnosti i osjetljivosti pouzdano odražavaju procese poput eutrofikacije i klimatskih promjena, te služe kao indikatori kvalitete vode. Taloženje organske materije na dnu direktno utiče na njihov sastav i brojnost, pa kroz svoju saprobiološku ulogu jasno odražavaju stepen organskog opterećenja i stanje ekosistema.

7.2.2.5. Bare, močvare i tresetišta

Bare su manja vodena tijela (ekosistemi), često privremena, koja se formiraju u depresijama na zemlji. Bare su često bogate biljnim i životinjskim svijetom, predstavljaju stajaće ili slabo protočne površinske vode. Manjeg su prostornog obuhvata u odnosu na jezera, i imaju značajnu ulogu u očuvanju lokalne biodiverziteta. Zbog malih dimenzija i plitkog vodenog tijela, podložne su brzim promjenama abiotičkih faktora, što ih čini vrlo dinamičnim ekosistemima. Podjele bara, izvršena je prema više kriterija, prvenstveno prema hidrološkom režimu, načinu nastanka i trajanju. Prema hidrološkom režimu nastanka dijele se na fluvijalne (slika 7.2.2.7), pluvijalne, nivalne podzemne i antropogene (shema 7.2.2.5).



Shema 7.2.2.4. Podjela bara prema načinu nastanka

Prema trajnosti vode i hidrološkom režimu, bare se dijele na stalne, periodične (intermitentne) i epizodične (privremene). Stalne bare (permanentne) zadržavaju vodu tokom cijele godine, uz stabilan hidrološki balans. Ove bare imaju stalni dotok iz izvora, podzemnih voda ili vodotoka

dok se gubitak vode odvija sporo, najčešće isparavanjem. Primjeri su bare nastale freatičkim (podzemnim) izvorima ili riječne mrtvaje koje se ne isušuju ni tokom ljeta. U njima je ekosistem dobro razvijen i čine ga vodene biljke, zooplankton, bentos, brojni vodozemci te ptice močvarice.

Periodične (intermitentne) bare ispunjene su vodom samo u određenim sezonama, najčešće u proljeće i jesen, dok tokom ljeta mogu presušiti. Punjenje ovih bara zavisi od oborina, topljenja snijega ili povremeno povišenog nivoa podzemnih voda. Tipične su (slika 7.2.2.7) za nizinska i livadska područja (pluvijalne bare). Njihov ekosistem je prilagođen naizmjeničnim vlažnim i suhim periodima, pa su prisutne vrste otporne na isušivanje, poput jaja određenih beskraljeznjaka ili spora algi.

Epizodične (privremene) bare nastaju vrlo kratkotrajno, najčešće nakon obilnih padavina ili poplava. Voda se u njima zadržava od nekoliko dana do nekoliko sedmica, nakon čega ispari ili oteče. Vegetacija i fauna su izrazito oskudne, ali se povremeno mogu razviti prolazne zajednice algi ili larvi insekata. Tipični primjeri su manje depresije na poljskim putevima ili plitke udoline u kraškim poljima nakon jačih kiša.



Slika 7.2.2.7. Primjer fluvijalne bare

Živi svijet bara (biocenoza) obuhvata plankton, neuston, nekton i bentos, čiji se sastav i brojnost razlikuju u zavisnosti od dubine, površine, trajnosti vode i drugih ekoloških uslova. Biljni svijet (fitocenoza) čine fitoplankton izgrađen od zelenih algi (Chlorophyta), dijatomeja (Bacillariophyta) i cijanobakterija (Cyanobacteria), dok od viših biljaka u barama najčešće rastu trska (*Phragmites australis*), šaševi (*Carex* spp.), rogoz (*Typha latifolia*), lokvanj (*Nymphaea alba*), žuti lokvanj (*Nuphar lutea*) i vodena leća (*Lemna minor*). Razvijenost vegetacije zavisi od veličine i porijekla bare, hidrološkog režima, trajnosti vode i klimatskih uslova područja.

Životinjski svijet (zoocenoza) bara čine organizmi prilagođeni stajaćim, često eutrofnim i promjenjivim uvjetima, pa se u njima mogu razviti stabilne zajednice planktona, bentosa, vodenih insekata, vodozemaca i ptica močvarica. Zooplankton je predstavljen kladocerama poput *Daphnia magna* i *Bosmina longirostris*, zatim veslonošcima (Copepoda) i rotiferama (Rotatoria), koji filtriraju fitoplankton i organske čestice te predstavljaju važnu hranu za mlađ riba i larve vodenih insekata. U barama je česta i jaka zastupljenost Protozoa, osobito trepetljika (Ciliata). Bentos naseljavaju organizmi tolerantni na niske koncentracije kiseonika i visoku količinu organske materije; najčešće se javljaju larve dvokrilaca (Chironomidae), pijavice

(Hirudinea), oligohete (posebno porodica Tubificidae), puževi (*Lymnaea stagnalis*, *Planorbis planorbis*) i školjkaši (*Sphaerium corneum*, *Pisidium casertanum*). Od insekata prisutni su vodeni cvjetovi (Ephemeroptera), tulari (Trichoptera), vilini konjici (Odonata) i kukci iz reda Hemiptera, kao što su *Notonecta glauca* i *Corixa punctata*, a mnoge vrste borave u zoni makrofitske vegetacije i učestvuju u složenim trofičkim mrežama. Ribe su uglavnom prisutne u trajnijim barama koje imaju stalni dotok ili freatičko napajanje, a najčešće vrste su šaran (*Cyprinus carpio*), karaš (*Carassius gibelio*) i linjak (*Tinca tinca*). U povremenim barama ribe uglavnom izostaju zbog čestog isušivanja. Bare predstavljaju ključna staništa za razvoj i mriještenje vodozemaca, među kojima su najčešće velika zelena žaba (*Rana ridibunda*), gatalinka (*Hyla arborea*) i obični daždevnjak (*Triturus vulgaris*), čije larve (punoglavci) mogu činiti značajan dio biomase tokom perioda visokog vodostaja. Od ptica močvarica javljaju se liske (*Fulica atra*), divlje patke (*Anas platyrhynchos*) i siva čaplja (*Ardea cinerea*), koje barama služe za gniježđenje, ishranu i odmor tokom migracija. Razlagači imaju presudnu ulogu u procesima razgradnje organske materije i mineralizacije, čime zatvaraju kruženje tvari i doprinose samočišćenju vodenog ekosistema. U barama dominiraju bakterije, prisutne u slobodnoj vodi kao bakterioplankton i u sedimentu kao bentoske bakterijske zajednice. One razgrađuju rastvorene organske tvari (DOC), vrše remineralizaciju dušika i fosfora, učestvuju u procesima nitrifikacije i denitrifikacije te ulaze u simbiozne odnose s algama, oslobađajući CO₂ i regenerirajući hranjive tvari. U toplijim, stajalnim barama česte su heterotrofne bakterije poput *Pseudomonas*, *Bacillus* i *Spirillum*, dok se u dubljim i anoksičnim slojevima razvijaju sulfatreducirajuće i metanogene vrste. Aktivnost mikrobnih zajednica ključna je za ekološku stabilnost bara, jer omogućava brzu razgradnju organske materije i održavanje kružnog toka tvari. Bare su važna staništa za mnoge reliktno i ugrožene vrste te djeluju kao rezervoari biodiverziteta, prirodni filteri vode, ublaživači poplava i mikroklimatskih ekstrema. Zbog brze reakcije na promjene u okolini, često se smatraju osjetljivim indikatorima ekološkog stanja. To su ekosistemi koji se nalaze u vlažnim područjima i imaju stagnirajuću ili sporotekuću vodu te mogu biti stalni ili sezonski, ovisno o hidrološkim uvjetima. Močvare, s druge strane, predstavljaju prijelazne ekosisteme između kopna i vode, u kojima dominira stalno ili povremeno zasićenje tla vodom, hidromorfno tlo i bogata vegetacija prilagođena vlažnim uslovima. One često čine završni stadij jezerske sukcesije i obuhvataju plavne šume, delte, riječne rukavce i poplavna područja (slika 7.2.2.8).



Slika 7.2.2.8. Močvara - stajali voden ekosistem

Močvare su najproduktivniji ekosistemi na planeti, jer posjeduju izuzetno razvijenu primarnu produkciju zahvaljujući bogatoj vegetaciji makrofita, algi i tresetnica. Predstavljaju složene prijelazne ekosisteme između kopnenih i vodenih staništa, karakterizirane povremenim ili stalnim poplavlivanjem i zasićenjem tla vodom, što stvara anaerobne uslove s niskim sadržajem kiseonika. Takvo okruženje pogoduje specijaliziranim skupinama biljaka, životinja i mikroorganizama koje su razvile morfološke i fiziološke adaptacije na periodično plavljenje i zasićenost vodom. U močvarama vladaju ekstremni ekološki uvjeti. Velike oscilacije vrijednosti temperature, svjetlosti, pH i koncentracije kiseonika, zbog čega su one relativno siromašne planktonskim i nektonskim oblicima, ali izuzetno bogate bentosnim i perifitonskim organizmima te detritusnim lancima ishrane. Posebnu značajnost močvara predstavlja pojava biljaka heterotrofne ishrane, kao što su *Drosera*, *Utricularia* i *Pinguicula*, koje hvataju sitne životinje i tako nadoknađuju nedostatak mineralnih hranjiva u zasićenim, kiselim i siromašnim supstratima. Ekološki značaj močvara ogleda se u više ključnih funkcija. Prvenstveno u regulaciji vodnog režima, upijaju višak vode tokom poplava, a otpuštaju je u sušnim razdobljima. Filtraciji i pročišćavanju vode, procesima sedimentacije, denitrifikacije i biološke razgradnje, te u sekvestraciji ugljika. Tresetna močvarna tla predstavljaju jedan od najvećih svjetskih rezervoara organskog ugljika. Hidrobiološki značaj močvara za biodiverzitet povezan je s činjenicom da su one mrijestilišta i rastilišta riba, te ključna staništa za ptice močvarice i selice (gniježđenje, hranjenje, odmor na migracijskim rutama). Pored toga, močvare sadrže rijetke i endemične vrste, uključujući stenoendemske ribe u plavnim područjima i specijalizirane insekte, te se smatraju ekološkim „hotspotovima“ biodiverziteta. Termin močvara formalno je uveden 1953. godine u izvještaju Američke službe za ribu i divlje životinje (USFWS), čime su postavljeni temelji za savremenu klasifikaciju i definisanje močvarnih ekosistema. Ovaj pristup poslužio je kao osnov za kasnije međunarodne inicijative, među kojima je najznačajnija Ramsarska konvencija o močvarama (Iran, 1971.), donesena sa ciljem zaštite i racionalnog korištenja močvarnih područja. Ramsarska konvencija vrlo široko definiše močvare, uključujući sve stajaće i tekuće vode, prirodne i umjetne, slatke, bočate i slane, kao i morska područja do dubine od šest metara. Konvencija uvodi i koncept „močvara od međunarodnog značaja“, posebno onih koje imaju ključnu ulogu kao staništa za vodene ptice. Danas je Konvenciju potpisalo više od 170 država, među kojima i Bosna i Hercegovina, u kojoj se na Ramsarskoj listi nalaze četiri područja: Bardača, Hutovo blato, Livanjsko polje i Blidinje.

Tresetišta se u ekološkoj klasifikaciji izdvajaju kao posebni ekosistemi uvjetovani hidrologijom, klimom i geomorfologijom. To su specijalizirani ekosistemi gdje voda stagnira ili se vrlo sporo kreće, a razgradnja organske materije je usporena zbog kiselosti, niske temperature i zasićenosti vodom. Time se formira treset, deblji sloj neraspadnute biljne mase, koju uglavnom grade tresetnice (*Sphagnum*), šaševi i rogoz. Tresetišta se razvijaju kada se istovremeno ispune posebni uslovi, stalni višak vode (usljed dotoka podzemnih voda ili padavina i slabe drenaže), niska temperatura i kisela pH vrijednost koja usporava mikrobnju razgradnju. Razvoj biljnog pokrova sposobnog za akumulaciju organske materije, prije svega tresetne mahovine (*Sphagnum*), koje mogu vezati 20–30 puta više vode od vlastite mase. Mikroreljef takođe ima važnu ulogu, udubljenja, doline i zaravni u kojima se voda zadržava pogoduju formiranju tresetnih slojeva. Tresetišta se ubrajaju u najosjetljivije ekosisteme na Zemlji. Karakterišu ih ekstremni abiotski uslovi, nizak pH, niska temperatura, zasićenost

vodom i nedostatak hranjivih soli, što ograničava broj prisutnih vrsta. Fauna tresetišta je stoga vrlo specifična i ograničena na oblike koji podnose kiselu i oligotrofnu sredinu. Zoološki sastav tla čine uglavnom mikro- i mezofaunalne grupe tolerantne na visoku vlagu i kiselost: Collembola (skakači), Oribatida (mahovinasti grinji), Enchytraeidae (oligohete), Nematoda, te larve Diptera, naročito porodica Chironomidae i Ceratopogonidae. Makrofauna je vrlo siromašna; izostaju puževi, školjke i rakovi, jer ne podnose kiselu reakciju i manjak karbonata.

Floru tresetišta čine kiselootporne i higrofilne vrste tresetnica (*Sphagnum* spp.), šaševa (*Carex*, *Eriophorum*), mahovina i karakteristične biljke heterotrofne ishrane, kao što su *Drosera rotundifolia*, *Pinguicula vulgaris* i *Utricularia minor*. Ove mesožderke nadoknađuju manjak hranjivih tvari hvatanjem insekata, čime ostvaruju konkurentsku prednost u ekstremnim oligotrofnim uslovima. Krupni mesožder *Drosera rotundifolia* raste u svom prirodnom okruženju prepunom tresetnica i vlažnog supstrata (slika 7.2.2.9). Ova vrsta je široko rasprostranjena u sjevernoj Evropi, Sibiru i velikom dijelu Sjeverne Amerike, pa i u planinskim dijelovima Balkana, gdje raste uz tresetišta i močvare. Listovi formiraju bazalnu rozetu s ljepljivim žlijezdama koje izlučuju sluz; hvataju insekte pomoću „lovki“ nalik super-ljepilu. Nakon dodira s plijenom, list se postepeno savija i obavija insekta, proces koji traje nekoliko minuta do potpunog zatvaranja, a biljka zatim apsorbira hranjive materije – uglavnom dušik i fosfor. Mahovine roda *Sphagnum* mogu zadržati i do 20–30 puta više vode od svoje suhe mase, čime tresetištima daju spužvastu, močvarnu strukturu. One luče organske kiseline i vezuju katione (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), čime zakiseljavaju podlogu (pH često $<4,5$). To ograničava rast većine drugih biljaka i stvara posebne uvjete za formiranje treseta. Zbog sporog rasta i slabe razgradnje u anaerobnim uslovima, odumrli dijelovi *Sphagnuma* se akumuliraju i tvore deblje slojeve treseta. Ove vrste djeluju kao ekološki inženjeri: određuju mikroklimu, hemizam i tip vegetacije cijelog ekosistema tresetišta.



Slika 7.2.2.9. *Drosera rotundifolia* i mahovina *Sphagnum*

Tresetišta imaju izuzetnu ekološku ulogu u globalnoj sekvencijaciji i pohrani ugljika (C). Iako zauzimaju manje od 3% kopnene površine Zemlje, u njima je pohranjeno više od 30% svjetskih zaliha organskog ugljika u tlu, čime premašuju i ukupne rezerve ugljika u svim šumskim ekosistemima zajedno. Proces akumulacije treseta zasniva se na višestoljetnom taloženju

organske materije u anaerobnim, kiselim uslovima, pri čemu se ugljik „zaključava“ u tlo i sprječava njegovo otpuštanje u atmosferu u obliku CO₂.

Međutim, tresetišta su danas među najugroženijim kopnenim ekosistemima, prvenstveno zbog eksploatacije treseta za energetske i hortikulturne svrhe, isušivanja radi poljoprivredne obrade i šumarske melioracije. Isušivanjem i oksidacijom treseta dolazi do trajne emisije CO₂ i gubitka sposobnosti tresetišta da skladište ugljik, što ih pretvara iz „ponora ugljika“ (eng. carbon sink) u njegov izvor (eng. carbon source). Obnova takvih područja izuzetno je spora i zahtijeva dugoročno upravljanje vodnim režimom i potpunu zabranu eksploatacije treseta.

7.2.2.6. Ribnjaci

Predstavljaju posebnu kategoriju umjetnih vodenih površina. nastali kopanjem i punjenjem vodom, s ciljem uzgoja ribe. Obično plitki i manjih dimenzija. Ribnjaci su upravljani ekosistemi u kojima plankton ima ključnu ulogu u osiguravanju prirodne hrane za ribu. Za razliku od prirodnih vodenih tijela, u ribnjacima se dinamika planktona često umjetno stimulira i usmjerava, čime oni postaju primjer antropogenog ekosistema s ciljanom bioprodukcijom. Ribnjaci se mogu klasifikovati po funkciji (sistemski i nesistemski ili polusistemski) i po konstrukciji: zemljani i betonski (slika 7.2.2.10).



Slika 7.2.2.10. Ribnjaci prema konstrukciji betonski (lijevo) i zemljani (desno)

Sistemski ribnjaci (integrisani ribnjački sistemi) oni su uređeni tako da obuhvataju čitav proizvodni ciklus ribe – od mrijesta do tržišne veličine. U njima se obično nalaze:

- a) mrijestilišta – posebni bazeni ili ribnjaci za polaganje i oplodnju ikre te inkubaciju mlađi.
- b) rastilišta (odgojni ribnjaci) – u njima se mlađ ribe hrani i razvija, često uz stimulaciju prirodne hrane (plankton, bentos).
- c) tovilista – ribnjaci gdje se riba hrani do tržišne veličine, uz kombinaciju prirodne i vještačke hrane.
- d) (ponekad i) zimovnici – ribnjaci namijenjeni prezimljavanju ribe, s dubljim vodama i stabilnijim uvjetima.

Ovakvi sistemi su tipični za šaranske ribnjake u nizijama, ali i za salmonidne vrste posebno kalifornijajska i potočna pastrmka.

Polusistemski/nesistemski ribnjaci to su ribnjaci koji nemaju sve navedene faze, već u namjenjeni najčešće za uzgoj ribe do tržišne veličine. Primjer su kafezni ribnjaci u jezerima i akumulacijama (npr. pastrmski kavezi), gdje se riba ubacuje u kafeze i direktno tovi do prodaje, bez zasebnog mrijesta ili rastilišta. Ovdje je proizvodnja ribe jednostavnija, ali zavisi od

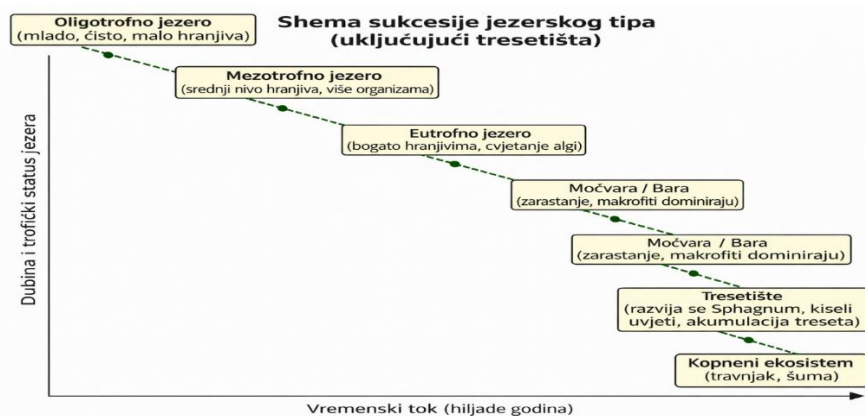
vanjskih izvora mlađi i kontrolisane hrane. Prvi ribnjaci u svijetu u Kini oko 2000. p.n.e. (šaran), zatim u Rimu (oko 100. p.n.e.) kao luksuzni ribnjaci. U BiH prvi ribnjak je na Vrelu Bosne u Austro-Ugarsko doba. Što se tiče godine osnivanja: moderni uzgoj ribe u BiH veže se za ribnjak „Vrelo Bosne“ kod Ilidže iz 1894., a ubrzo potom (1898.) podignuta je i nova mrijestilišna stanica kapaciteta ~600.000 komada mlađi. Ribnjaci su antropogeni lentični ekosistemi u kojima se, uz upravljanje i kontrolisane uvjete, odvijaju prirodni procesi produkcije i kruženja materije (razvoj planktona). Iako donose značajnu ekonomsku i prehrambenu korist, akvakultura može predstavljati ekološki pritisak zbog eutrofikacije, unošenja invazivnih i alohtonih vrsta, te promjena kvaliteta vode i degradacije staništa. Stoga je njihovo održivo upravljanje ključno za očuvanje ravnoteže u akvatičnim ekosistemima.

7.2.2.7. Sukcesija jezerskog tipa

Sukcesija jezerskog tipa predstavlja dugotrajan, prirodan proces promjena u vodenim ekosistemima koji se odvija od trenutka formiranja jezera do njegovog potpunog zatrpavanja i transformacije u kopneni ekosistem. Ovaj proces se zasniva na postepenom nakupljanju hranjiva, organskih tvari, sedimenta i promjenama u biljnim i životinjskim zajednicama, a traje hiljadama godina.

Sukcesije jezera se odvija postepeno zatrpavanjem sedimentima i organskom materijom, razvoj vegetacije i konačan prelazak u travnatu ili šumsku površinu (shema 7.2.2.5). Tipična šema sukcesije jezera dešava se kroz stadije:

- Oligotrofno jezero – duboko, prozirno, malo hranjiva, slabo razvijena vegetacija.
- Mezotrofno jezero – povećava se produkcija algi i makrofita, dno se puni organskim materijalom.
- Eutrofno jezero – pliće, zamućeno, česta cvjetanja algi, bogato makrofitima i sedimentom.
- Močvara / Bara – vodena površina zarasta, dominiraju tršćaci, šaševi, lopoči.
- Tresetište (ako su uvjeti kiseli i siromašni mineralima, razvija se *Sphagnum*).
- Kopneni ekosistem – travnjak ili šuma na mjestu nekadašnjeg jezera.



Shema 7.2.2.5. Sukcesija jezerskog tipa

Prirodni proces u jezeru u početnoj fazi nastaje oligotrofno jezero, obično kao rezultat glacijalnih, tektonskih ili vulkanskih procesa. Ova jezera su duboka, prozirna i siromašna hranjivim materijama. Karakterizira ih niska primarna produkcija i relativno mali broj vrsta. Biološke zajednice u ovoj fazi čine uglavnom dijatomeje, rijetke makrofite i specijalizirane životinje prilagođene niskom nivou hranjiva i visokoj prozirnosti vode (slika 7.2.2.11). S vremenom dolazi do povećanog unosa hranjivih materija uslijed erozije obala i doprinosa iz okolnog sliva. Tako nastaje mezotrofno jezero, sa višim nivoom produkcije i bogatijim biocenozama. Pojavljuju se brojniji makrofiti, zooplankton i bentoski beskičmenjaci. U ovoj fazi počinje ubrzano taloženje organske materije na dnu, što postepeno smanjuje dubinu jezera. Daljim nakupljanjem hranjivih materija jezero prelazi u eutrofno fazu. Ovu fazu karakterizira intenzivno cvjetanje algi i cijanobakterija, smanjenje prozirnosti vode i nestabilnost ekološke ravnoteže. Makrofiti zarastaju plitke dijelove, a u dubljim zonama zbog raspadanja organske tvari može doći do deficita kiseonika. Biodiverzitet se mijenja u pravcu dominacije tolerantnih i oportunističkih vrsta.



Slika 7.2.2.11. Sukcesija jezera od oligotrofnog do eutrofnog (autori, prema Wetzel, 2001)

Kako se eutrofno jezero dalje zatrpava, nastaje močvara ili bara. Vodena površina biva prekrivena gustom vegetacijom, prvenstveno tršćacima, šaševima i drugim heliofitnim biljkama. U ovoj fazi vodeni sloj je značajno reduciran, a bentos i plankton gube na značaju u odnosu na vegetacijske zajednice. Tresetišna faza nastaje u specifičnim uvjetima, naročito na siromašnim i kiselim podlogama, močvarna faza može prijeći u tresetište. Dominantnu ulogu preuzimaju mahovine roda *Sphagnum* koje akumuliraju treset i stvaraju kiselu sredinu. Ovo dovodi do specifičnih ekoloških uvjeta u kojima uspijevaju rijetke i endemične biljne vrste, uključujući i biljojede biljke poput roda *Drosera*. Završna faza sukcesije jezerskog tipa je kopneni ekosistem (livada). Na mjestu nekadašnjeg jezera razvijaju se travnjaci ili šumske zajednice, u zavisnosti od klimatskih i edafskih uvjeta (slika 7.2.2.12). Time se zatvara sukcesijski ciklus od otvorenog vodenog ekosistema ka stabilnom kopnenom habitatu.



Slika 7.2.2.12. Dalja sukcesija od eutrofnog jezera do livade (autori)

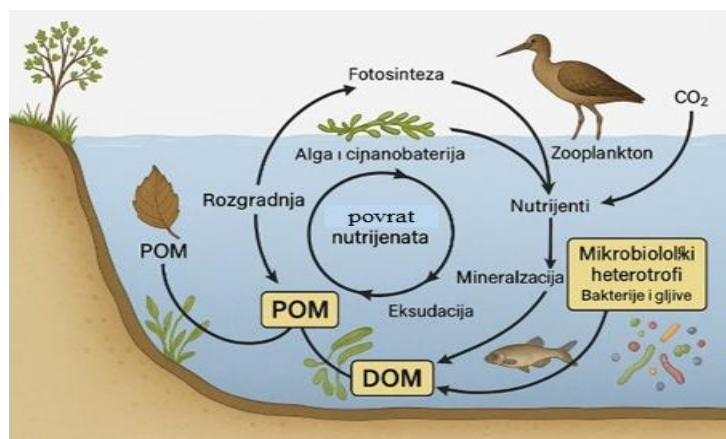
7.2.3. Kruženje organske materije i lanac ishrane u vodenim ekosistemima

U vodenim ekosistemima (jezera, potoci, rijeke, mora, okeane) kruženje organske materije odvija se kroz složene procese proizvodnje, potrošnje i razgradnje. Primarni producenti (fitoplankton, makrofiti, perifiton) fotosintezom, koriste svjetlost i mineralne nutrijente (npr. azot, fosfor) kako bi stvorili organsku materiju. Ova organska materija postaje osnova mreže ishrane, jer je koriste herbivorni organizmi (zooplankton, biljojedi beskičmenjaci, ribe). Dio organske materije dopijeva u sediment ili ostaje u vodenom stubu kao detritus. Heterotrofni mikroorganizmi (bakterije, gljive) i detritivori razgrađuju tu organsku materiju, pri čemu se oslobađaju nutrijenti koji ponovo ulaze u ciklus. Tako se uspostavlja zatvoren kružni tok materije, dok je energija jednosmjerno usmjerena kroz trofičke nivoe i završava disipacijom (rasipanjem energije) u obliku toplote. U proces kruženje organske materije i nutrijenata u vodenom ekosistemu uključeni su procesi razgradnje organske tvari (slika 7.2.3.1), njena transformacija u rastvorene i partikulirane oblike, te uloga mikroorganizama u mineralizaciji i vraćanju nutrijenata proizvođačima (algama i cijanobakterijama). čime se realizuje kruženje organske materije i nutrijenata u vodenom ekosistemu. Organska materija u ekosistemu egzistira u dva glavna oblika:

- POM (partikulirana organska materija) obuhvata veće čestice, poput otpalog lišća, detritusa, mrtvih organizama i njihovih dijelova. Ovaj materijal ulazi u akvatični sistem putem površinskog oticanja, erozije i unosa iz okolnih kopnenih ekosistema i
- DOM (rastvorena organska materija) nastaje raspadanjem POM-a putem enzimske aktivnosti mikroorganizama, ali i eksudacijom iz živih stanica (npr. algi i cijanobakterija). DOM predstavlja ključan supstrat za mikrobiološke heterotrofe.

U hidrobiologiji pod eksudacijom najčešće podrazumijeva izlučivanje organskih i anorganskih materija iz autotrofnih organizama (npr. algi, makrofita, biljaka) u okolni medij, što ima ključnu ulogu u kruženju materije i održavanju mikrobioloških zajednica.

Uloga proizvođača (alge i cijanobakterije), odnosno fitoplanktona čini osnovu primarne produkcije. Kroz proces fotosinteze, koriste svjetlost, CO_2 i nutrijente (amonij, fosfate, nitrate) za sintezu organske materije. Time stvaraju osnovu hranidbenog lanca, jer su izvor hrane za zooplankton i više trofičke nivoe (npr. ribe). Dio proizvedene organske materije direktno ulazi u DOM putem eksudacije. Konzumenti (zooplankton, ribe i drugi organizmi) u primarni i sekundarni potrošači koji koriste primarne proizvođače i manje organizme kao hranu. Metabolički procesi, te uginuće organizama, rezultiraju otpuštanjem POM i DOM u sistem, čime se nastavlja ciklus organske materije. Razlagači i mikrobiološki heterotrofi odnosno bakterije i gljive predstavljaju ključnu komponentu razlaganja. Oni koriste DOM i POM kao supstrat, pri čemu se putem ekstracelularnih enzima vrši razgradnja kompleksnih organskih molekula. Proces mineralizacije pretvara organsku materiju u anorganske nutrijente (NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}), koji se vraćaju u sistem i postaju ponovo dostupni proizvođačima.



Slika 7.2.3.1. Kruženje organske materije u vodenim ekosistemima (prilagođeno prema Wetzel, 2001)

Zatvoreni ciklus materije je cjelokupan proces kruženja koji osigurava da nutrijenti u ekosistemu ne budu trajno izgubljeni, već se stalno recikliraju između živih organizama i nežive komponente ekosistema. CO₂, oslobođen respiracijom mikroorganizama i viših organizama, ponovo ulazi u fotosintetski ciklus, čime se zatvara energetska-materijalna petlja.

Organska materija u akvatičnim ekosistemima potiče iz dva osnovna izvora, autohtonog i alohtonog. Autohtona organska materija stvara se unutar samog ekosistema procesima fotosinteze i primarne produkcije koje obavljaju fitoplankton, perifiton i makrofiti. Alohtona organska materija potiče iz kopnenog okruženja i u vodu dopire putem površinskog oticanja, vjetrom ili padanjem biljnog materijala iz riparijalne vegetacije.

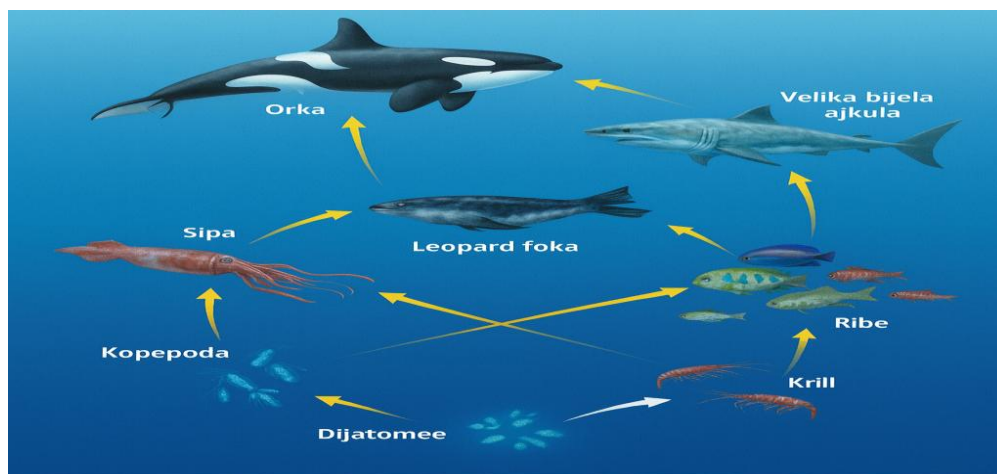
U vodenom mediju, organska materija se javlja u različitim oblicima od krupnih čestica (CPOM) do sitnih frakcija (FPOM), koje predstavljaju različite faze razgradnje i prelaska kroz trofičke nivoe. Ovi procesi uključuju niz mehaničkih, hemijskih i bioloških transformacija, u kojima učestvuju mikroorganizmi i veći heterotrofni organizmi. Kružno kretanje organske materije, odnosno biogeochemijski ciklus, odvija se kroz povezane faze: produkciju, razgradnju, remineralizaciju i ponovnu asimilaciju hranjivih tvari. U okeanima i morima, ovaj ciklus obuhvata i vertikalni transport organske tvari od površinskih slojeva prema dubljim zonama čime se uspostavlja „biološka pumpa“ koja ima ključnu ulogu u globalnom kruženju ugljika i kisika. Održavanje ravnoteže između stvaranja i razgradnje organske materije predstavlja osnovu trofičke stabilnosti akvatičnih sistema. Time se osigurava kontinuitet u opskrbi energijom, povezanost između autotrofnih i heterotrofnih komponenti te dugoročna održivost biosfere vodenih ekosistema. Lanac ishrane (trofički lanac) predstavlja linearni slijed kroz koji se prenosi energija i materija u ekosistemu, od proizvođača (autotrofa) preko različitih nivoa potrošača (heterotrofa) do razlagača. Svaka karika u lancu naziva se trofički nivo. Ukratko: lanac ishrane pokazuje ko koga jede u ekosistemu. U vodenim ekosistemima te karike čine različite grupe hidrobionata, organizama koji su svojim životom i ishranom vezani za vodu (tabela 7.2.3.1). Njegova polazna tačka su primarni proizvođači fitoplankton (alge i cijanobakterije) i makrofite koje putem fotosinteze koriste sunčevu svjetlost, ugljen-dioksid i mineralne nutrijente za sintezu organske materije. Oni čine temelj cjelokupnog sistema jer omogućavaju opskrbu energijom i materijom svim višim organizmima. Na proizvođače se

nadovezuju primarni potrošači, uglavnom zooplankton (veslonošci, račići, larve vodenih insekata), koji se hrane algama i prenose energiju na naredni trofički nivo. Sljedeći stepen čine sekundarni potrošači, manje grabežljive ribe i larve predatora, koje koriste zooplankton i sitne beskičmenjake. Energija se zatim usmjerava ka tercijarnim potrošačima, većim grabljivim vrstama riba poput štuke, smuđa ili soma, kao i ka pticama ribaricama, koje zauzimaju vrh lanca ishrane. Paralelno sa ovim odnosima djeluju i razlagači, bakterije i gljive koji razgrađuju uginule organizme i organske ostatke. Njihova uloga je presudna jer omogućavaju mineralizaciju i povrat ključnih nutrijenata (azot, fosfor, ugljik) u vodeni sistem, čime se zatvara ciklus i osigurava nastavak primarne produkcije. U morskim ekosistemima lanac ishrane takođe obuhvata raznovrsne hidrobione (slika 7.2.5.1). On započinje s primarnim producentima dijatomejama i mikroskopskim algama koje fotosintezom proizvode organsku materiju i kiseonik. Njima se hrane zooplanktonski organizmi, prije svega kopepode i kril (rakovi iz podreda Euphasiacea), koji predstavljaju ključnu vezu između mikroskopskih proizvođača i većih potrošača.

Tabela 7.2.3.1. Pregled trofičkih nivoa organizama u lancu ishrane

Trofički nivo	Opis	Primjeri hidrobionata
Producerski nivo	Autotrofni organizmi koji fotosintezom stvaraju organsku materiju	Fitoplankton, alge, cijanobakterije, vodene biljke
Primarni konzumenti	Biljojedi koji se hrane producentima	Zooplankton, ribe herbivori, puževi
Sekundarni konzumenti	Mesožderi nižeg reda koji koriste primarne konzumente	Insektivorne ribe, rakovi
Tercijarni konzumenti	Predatori višeg reda	Grabežljive ribe (štuka, smuđ), ptice ribarice, sisari
Razlagači (dekompozitori)	Razgrađuju mrtvu organsku materiju i vraćaju nutrijente u ekosistem	Bakterije, gljive

Sekundarne konzumente čine ribe i sipe (lignje), dok tercijarni konzumenti obuhvataju vrste poput leopard foke i velike bijele ajkule. Na vrhu lanca nalazi se orka (kit ubica), koja je vršni predator (slika 7.2.3.2) i nema prirodnih neprijatelja. Njena ishrana obuhvata foke, ajkule, ribe pa čak i druge morske sisare, čime zaokružuje energetske tok u ekosistemu. Orke kao vršni predatori svoju populaciju drže pod kontrolom kombinacijom ograničene dostupnosti specifičnog plijena, kompleksne socijalne strukture, sporog reproduktivnog ciklusa i visoke energetske zahtjevnosti. Kao K-strategije (jedan od tipova zavisne kontrole gustine populacije), s kasnim sazrijevanjem i malim brojem mladunaca, imaju prirodno nizak potencijal rasta populacije, pa ekosistem sam održava njihovu brojnost u ravnoteži.



Slika 7.2.3.2. Lanac ishrane u morskom ekosistemu (autori, prema konceptima morske trofičke strukture)

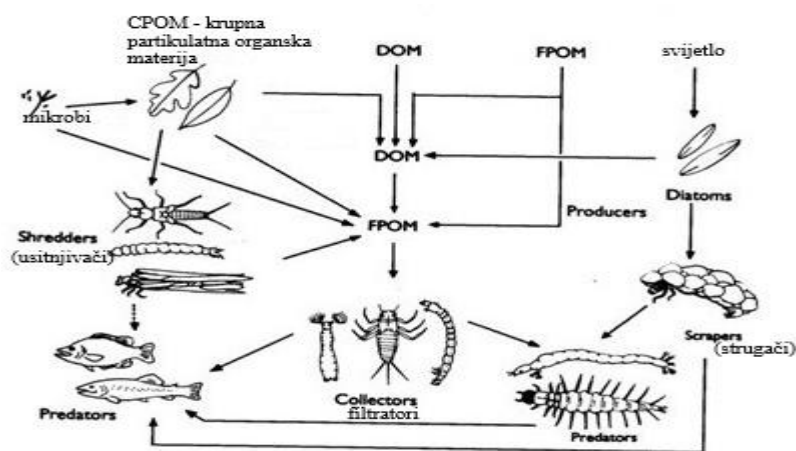
Ajkule kao vršni karnivori regulišu veličinu svoje populacije sporim reproduktivnim ciklusom (K-strategija), visokim mortalitetom mladih i izraženim kanibalizmom, uključujući intrauterini i juvenilni kanibalizam. Ograničena dostupnost plijena i gustine-zavisna konkurencija dodatno stabiliziraju populaciju na niskom nivou, što je tipično za apex predatore. Cijeli proces ukazuje da je lanac ishrane zatvoren i međusobno povezan sistem, gdje svaki organizam ima svoju funkciju i ulogu. Energija se u sistem unosi fotosintezom, prenosi između potrošača različitih nivoa i završava razgradnjom, pri čemu se dio oslobađa u obliku toplote kroz respiraciju. Upravo ta povezanost proizvođača, potrošača i razlagača osigurava stabilnost i produktivnost vodenog ekosistema. U vodotocima je raspodjela funkcionalnih grupa organizama: razlagača (mikroba), sekundarnih raspadača (sjekači ili usitnjivači krupne organske materije) koji se hrane krupnim organskim materijalom (CPOM-opalo lišće npr.), kolektora/filtratora (za sitne čestice FPOM), strugača (koji skidaju biofilm, alge), te predatora koji jedu druge životinje. Ulaz energije i organskih materija, autohtone (unutrašnji izvori kao što su dijatomeje) i alohtone (spoljašnji izvori, poput opalog lišća i grana iz ruba toka). Raspadaju se u različite forme: CPOM (krupni komadi, >1 mm), FPOM (sitne čestice, <1 mm) i DOM (rastvorene organske tvari).

U tekućicama, osnovni izvor organske materije dolazi iz dva pravca, alohtonih izvora, materijal koji dolazi izvan ekosistema, kao što je opalo lišće, grančice i drugi krupni organski materijal (CPOM) i autohtoni izvori, organska materija nastala unutar vodenog sistema, prije svega fotosintetskom aktivnošću algi, prvenstveno dijatomeja. Krupni organski materijal (CPOM) u potoku podliježe kolonizaciji mikroba (bakterija i gljiva) i fizičkom usitnjavanju, čime nastaju rastvorena organska materija (DOM) i fini partikulatni organski materijal (FPOM). Ti procesi osiguravaju kontinuiran protok hranjivih tvari kroz ekosistem. Na osnovu vrste hrane koju koriste i načina na koji je pribavljaju, makrobeskičmenjaci u potocima se svrstavaju u funkcionalne grupe (tabela 7.2.3.2).

Tabela 7.2.3.2. Funkcionalne grupe makrobeskičmenjaka u tekućicama

Funkcionalna grupa	Izvor hrane / uloga	Primjeri organizama
Usitnjivači	Hrane se krupnim organskim materijalom (CPOM), naročito lišćem koloniziranim mikrobima; proizvode FPOM	<i>Tipula</i> (Diptera), <i>Taeniopteryx</i> (Plecoptera), <i>Chaetopteryx</i> (Trichoptera)
Sakupljači	Koriste fini partikulatni organski materijal (FPOM): filteri izdvajaju čestice iz vode skupljači prikupljaju FPOM sa dna	<i>Simulium</i> (Diptera, filter-hranilac), <i>Baetis</i> (Ephemeroptera, skupljač)
Strugači	Skidaju alge i biofilm (perifiton) sa kamenja i drugih podloga	<i>Glossosoma</i> (Trichoptera), <i>Heptagenia</i> (Ephemeroptera)
Predatori	Hrane se drugim makroinvertebratima i ribama; vrhunski potrošači među beskičmenjacima	<i>Sialis</i> (Megaloptera), larve Odonata, Plecoptera

Tok energije u tekućicama započinje krupnom organskom materijom (CPOM) koju razgrađuju usitnjivači (shredders) uz mikrobnu pomoć (shema 7.2.3.1), pretvarajući je u sitniju organsku materiju (FPOM). FPOM zatim konzumiraju filtratori (filter i gather tip), dok se dio energije prenosi prema višim trofičkim nivoima. Strugači se hrane perifitonskim biofilmom s podloge i iskorištavaju autohtonu organsku materiju proizvedenu u vodotoku. Predatori koriste energiju iz svih prethodnih funkcionalnih grupa, čime se uspostavlja mreža ishrane u kojoj alohtoni materijal i autohtoni producenti čine osnovu trofičkih odnosa.



Shema 7.2.3.1. Vodene (lotic) mreže ishrane. (a) Pojednostavljen prikaz mreže ishrane u potoku. Ulazi energije uključuju opalo lišće, koje kasnije koloniziraju mikroorganizmi; mali autotrofi, prvenstveno dijatomeje; te rastvorena organska materija (DOM) i fini partikulatni organski materijal (FPOM), nastali iz vanjskih izvora i uzvodnih dijelova toka (prilagođeno prema Cummins & Klug, 1979)

Hidrobioni – organizmi koji trajno ili privremeno žive u vodi ulaze u različite specijske odnose koji određuju strukturu i funkcionisanje akvatičnih ekosistema. Ti odnosi mogu biti pozitivni, negativni ili neutralni, zavisno od toga da li su uključeni organizmi u međusobnoj koristi, šteti ili bez značajnog uticaja. Biološki odnosi među hidrobiontima odnosno načini na koje različite vrste međusobno utiču jedna na drugu, u akvatičnim ekosistemima su mnogostruki (tabela 7.2.3.3). Jedan od odnosa je neutralizam koji podrazumjeva da dvije vrste žive u istom prostoru, ali nema međusobnog uticaja ni pozitivnog ni negativnog. Spužve (Spongillidae) i larve tulara

(Trichoptera) žive u istom mikrostaništu (npr. na kamenju ili granama u rijeci), ali se ne takmiče za iste resurse niti direktno utiču jedna na drugu. Za razliku od neutralizma kompeticija je stalno prisutna između jedinki iste vrste i različitih vrsta kada dvije vrste ili jedinke iste vrste, koriste zajedničke resurse (hranu, svjetlost, prostor), zbog ograničenosti resursa dolazi do takmičenja ili kompeticije, koji može završiti potpunim istiskivanjem ili smrću jedinki. Perifitonske alge različitih vrsta natječu se za prostor na kamenju u brzacima, gdje svjetlost i površina za pričvršćivanje mogu biti ograničeni. Predatorsvo je odnos kada jedna vrsta (predator) ubija i jede drugu (plijen). Tako npr. larve vilinskih konjica (Odonata) su aktivni predatori koji love male račiće iz planktona (Cladocera, Copepoda). Poseban oblik predacije predstavlja kanibalizam, koji se javlja među jedinkama iste vrste. Kod vrsta porodice *Astacidae*, kao i kod drugih vrsta akvatičnih životinja (riba npr.), kanibalizam ima adaptivnu ulogu i može se posmatrati kao mehanizam samoregulacije populacije.

Tabela 7.2.3.3. Priakaz specijskih odnosa kod hidrobioanata

tip odnosa	primjeri kod hidrobiona
neutralizam	Spužve (Spongillidae) i larve tulara (Trichoptera) u istom mikrostaništu bez direktnog uticaja.
kompeticija	Perifitonske alge različitih vrsta koje se nadmeću za prostor na kamenju u brzacima.
predacija	Larve vilinskih konjica (Odonata) love račiće (Cladocera, Copepoda).
parazitizam	Trematode (<i>Diplostomum</i> spp.) u očima i tkivima puževa ili riba; vodene grinje (<i>Hydrachnidia</i>) na larvama insekata.
komenzalizam	Epifitske alge koje rastu na listovima podvodnih makrofita (<i>Potamogeton</i> , <i>Myriophyllum</i>).
mutualizam	Cijanobakterije koje fiksiraju azot u zajednici sa vodenim biljkama koje im osiguravaju stanište.
amensalizam	Izlučivanje toksina od strane cijanobakterija (allelopatija) koji inhibiraju rast dijatomeja.

Na slici 7.2.3.3 je prikazan primjer predatorstva, gdje larva vodenog insekta (npr. tular ili vilinski konjic) aktivno lovi i konzumira drugog vodenog beskičmenjaka. Ovaj odnos jasno pokazuje dinamiku plijen–predator, koja ima ključnu ulogu u regulaciji brojnosti populacija i održavanju ekološke ravnoteže u vodenim staništima. Prikaz simbioze, u kojoj se na oklopu riječnog raka mogu uočiti organizmi roda *Branchiobdella* (sitni prstenasti maločetinašići). Njihov odnos je uglavnom komenzalistički ili mutualistički, oni se hrane organskim česticama i algama s površine raka, dok rak dobiva korist kroz čišćenje oklopa i škrge. Takva simbioza je česta u planinskim i kraškim vodotocima. Na trećoj slici prikazan je primjer parazitizma, gdje se na tijelu ribe nalazi pričvršćen parazit (kopepoda). Parazit se hrani tkivom ili krvlju domaćina, pri čemu domaćin trpi štetu u vidu gubitka energije, oštećenja epitela ili povećane osjetljivosti na bolesti. Parazitizam je čest oblik interakcije u akvatičnim zajednicama i značajno utiče na zdravlje i vitalnost populacija riba.



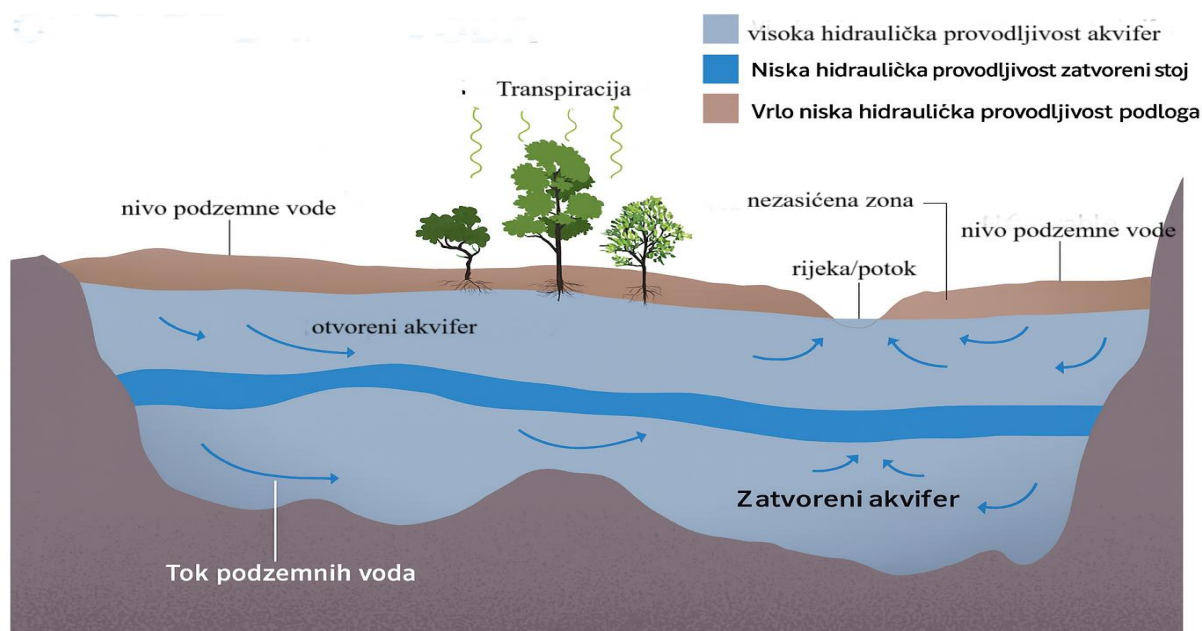
Slika 7.2.3.3. Prikaz predatorsva, simbioze i parazitizma kod hidrobionata

Specijski odnosi hidrobionata održavaju dinamiku vodenih ekosistema i utiču na njihovu stabilnost, biodiverzitet i energetske tokove. Razumijevanje ovih odnosa važno je i za upravljanje vodnim resursima, jer poremećaji (npr. unošenje invazivnih vrsta poput školjke *Dreissena polymorpha*) mogu drastično promijeniti prirodne mreže ishrane i funkcionalne odnose. Specijski odnosi među hidrobiontima predstavljaju složenu mrežu međuzavisnosti u kojoj se isprepliću kompetitivne, trofičke i simbiotske veze. Ovi odnosi nisu statični, već dinamični i podložni stalnim promjenama koje odražavaju adaptivne procese u vodenim ekosistemima. Među svim oblicima interakcija, predatorstvo se izdvaja kao najmarkantniji i ekološki najznačajniji odnos, jer čini osnovu trofičke organizacije i lanca ishrane. Kroz predaciju se ostvaruje prijenos energije između trofičkih nivoa, održava biološka ravnoteža i kontroliše brojnost populacija, čime se osigurava stabilnost cjelokupnog ekosistema. Predatori tako djeluju kao ključni regulatori zajednica, a njihova prisutnost i brojnost često su pokazatelj integriteta ekološkog sistema. S druge strane, kompeticija, iako manje vidljiva u kratkom vremenskom okviru, ima dubok evolucijski značaj. Kompeticija je u vodenim zajednicama bila glavni pokretač evolucije prilagodbi. Te prilagodbe, morfološke, fiziološke i etološke, omogućavaju efikasnije korištenje resursa i smanjuju preklapanje ekoloških niša među vrstama. Sveukupno, složenost specijskih odnosa hidrobionata, odražava visok stepen organizacije i koevolucijske povezanosti među vrstama. Svaka interakcija doprinosi funkcionalnosti, otpornosti i dugoročnoj održivosti vodenih ekosistema.

7.2.4. Podzemne vode

Podzemne vode obuhvataju sve vode koje se nalaze u Zemljinoj kori i ispod površine. Javljaju se kao slobodne ili gravitacione, koje se kreću po šupljinama i međuprostorima i vezane, koje su adhezijskim i drugim silama učvršćene za pojedine čestice, što im onemogućava kretanje. Hidrogeologija je nauka koja proučava podzemne vode, njihovu dinamiku i kretanje, odnos sa geološkim strukturama i njihovo povezivanje sa površinskom vodom u kruženju vode u prirodi. Zdravstveno stanje ljudi i društveni razvoj ovisi, o snabdijevanju dovoljnim količinama slatke vode kao i o njenoj kvaliteti. Danas, širom svijeta, oko 1,2 milijarde ljudi nema dovoljno pitke vode. Podzemne vode su jedne od važnijih izvora pitkih voda u svijetu. U Evropi, 70% vode koja se koristi u kućanstvu su podzemne vode. Slobodne podzemne vode nalaze se uglavnom u tečnom, ali mogu biti i u gasovitom i čvrstom agregatnom stanju. Prema podacima, dubina na kojoj se nalazi podzemna voda u tečnom stanju seže do 10 km. što je izvedeno iz podatka o dubini termalnih voda čiji su rezervoari smješteni veoma duboko u Zemljinoj kori. Podzemne vode u čvrstom stanju poznate su pod nazivom mrzolota, a javljaju se na većim geografskim širinama, iznad 55° N, za koje je karakteristično da se niske temperature zadržavaju preko čitave godine. U vrijeme kratkog ljeta, povećanjem temperature otopi se samo površinski dio leda, dok

dublji slojevi ostaju zaleđeni. Debljina mrzolote kreće se od 0,5 m, a u ekstremnim slučajevima može iznositi i do 500 m. Mrzolota se javlja i na visokim planinama, ali je tamo znatno manja. Podzemne vode u gasovitom stanju (para) nalaze se na velikim dubinama gdje je prisutna velika temperatura pod velikim pritiskom. Podzemne vode nastaju infiltracijom padavina kroz tlo, gdje prolaze kroz nezasićenu zonu u kojoj se u porama tla nalazi i voda i zrak. Kada voda dođe do dubine na kojoj su sve pore ispunjene vodom, dostiže nivo podzemne vode, odnosno početak zasićene zone. U ovoj zoni voda ispunjava šupljine između čestica tla ili pukotine stijena i kreće se pod uticajem gravitacije i pritiska. U površinskom dijelu zasićene zone nalazi se otvoreni, ili nezatvoreni akvifer, koji je direktno povezan s površinom terena i čiji nivo podzemne vode može varirati u zavisnosti od količine padavina, isparavanja i crpljenja vode. Voda u otvorenom akviferu (propusni podzemni sloj koji sadrži i provodi vodu) kreće se horizontalno prema područjima nižeg pritiska ili nadmorske visine, najčešće prema rijekama, potocima ili izvorima. Biljke svojim korijenjem koriste dio ove vode, koju transpiracijom vraćaju u atmosferu, čime se nivo podzemne vode može lokalno smanjiti. Ispod otvorenog akvifera nalazi se zatvoreni, ili konfini akvifer (slika 7.2.4.1). Koji je od površine odvojen slojevima stijena ili tla sa vrlo niskom hidrauličkom provodljivošću, poput gline ili lapora. U njemu je voda pod pritiskom, jer je zarobljena između nepropusnih slojeva. Kada se takav sloj probije bušotinom, voda može izbijati prema površini i bez pumpanja, stvarajući arteške izvore.



Slika 7.2.4.1. Kretanje ili tok podzemne vode (prilagođeno, prema Fetter 2001)

Kretanje podzemne vode zavisi od nagiba terena, pritiska i propusnosti geoloških slojeva. Voda se u otvorenim akviferima kreće brže, dok je u zatvorenim kretanje sporije, ali pod većim pritiskom. Podzemne vode takođe mogu hraniti rijeke, ukoliko je njihov nivo viši od vodostaja rijeke, pa voda pritiče prema koritu. Ukoliko je nivo podzemne vode niži, rijeka može gubiti vodu koja infiltrira u podzemlje. Ispod svih vodonosnih slojeva obično se nalazi podloga vrlo niske hidrauličke provodljivosti, koja sprječava daljnje prodiranje vode i predstavlja donju

granicu cirkulacije podzemnih voda. Tako podzemne vode predstavljaju dinamičan sistem u stalnom kretanju, povezan sa površinskim vodama i procesima u tlu i atmosferi. Nakon što podzemne vode dopiju u vodonosne slojeve, njihovo kretanje i zadržavanje u velikoj mjeri zavise od toga kroz kakve stijene prolaze. Upravo svojstvo stijena da propuštaju ili zadržavaju vodu određuje kako će se podzemni tokovi razvijati. To svojstvo se naziva propusnost stijena, i ono predstavlja sposobnost stijene da propušta vodu kroz svoje pore ili pukotine bez promjene prirodne strukture. Stijene koje izgrađuju podzemlje razlikuju se po tome koliko vode mogu primiti, ali i koliko je lako otpuštaju. One koje imaju dovoljno pora ili pukotina, kroz koje voda može slobodno teći, nazivaju se vodopropusnim stijenama. U takvim stijenama, kao što su šljunak, pijesak ili raspucani vapnenci, voda se kreće u većim, mjerljivim količinama i formira podzemne tokove ili akvifere. Ove stijene najčešće predstavljaju glavna spremišta podzemne vode. Iznad ili ispod njih često se nalaze slojevi koji primaju vodu, ali je vrlo sporo otpuštaju. To su polupropusne stijene, poput sitnozrnatog pijeska, praha ili zaglinjenog materijala. U njima se voda zadržava duže, kreće se sporije, a protok je ograničen.

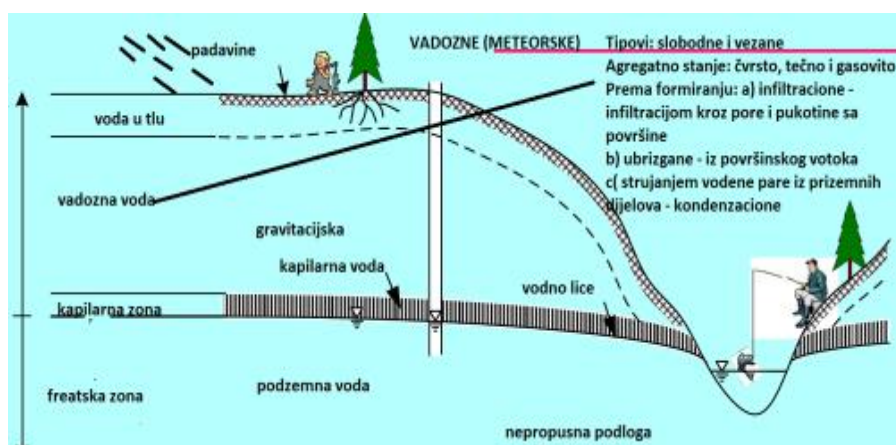
Najdublje ili na granicama vodonosnih slojeva, nalaze se stijene koje vodu gotovo uopšte ne propuštaju. U takve vodenonepropusne stijene ubrajaju se glina, lapor ili kompaktne magmatske stijene. One imaju vrlo malo ili nimalo međusobno povezanih pora, pa voda kroz njih ne može prodirati. Kada se nalaze ispod vodopropusnih slojeva, ove stijene čine prirodno dno akvifera i sprječavaju dalje prodiranje vode u dubinu. Zato se u hidrogeologiji pravi razlika između poroznosti i propusnosti. Stijena može sadržavati mnogo vode i biti porozna, ali ako voda iz nje teško ističe, onda nije propusna. Tek ona stijena koja vodu ne samo zadržava, već joj omogućava i kretanje, smatra se stvarno propusnom. Upravo taj odnos poroznosti i propusnosti određuje kretanje podzemnih voda, njihovu brzinu, dubinu i dostupnost čovjeku kroz izvore ili bunare. Krš u Bosni i Hercegovini predstavlja jedno od hidrogeološki i ekološki najposebnijih područja u Evropi. Više od polovine teritorije BiH izgrađeno je od karbonatnih stijena (vapnenci i dolomiti), što je čini klasičnim primjerom Dinarskog krša. Upravo zbog toga ovdje se razvija složen sistem podzemnih voda, rijeka ponornica, estavela, kraških izvora (vrela) i periodičnih jezera, koji imaju ogroman značaj za hidrobiologiju. Posebnost krša je u tome što voda brzo ponire u podzemlje, te površinskih tokova često nema ili su kratkotrajni. Rijeke kao što su Trebižat, Buna, Bregava, Pliva ili ponornice poput Trebišnjice i ponori Unca, stalno mijenjaju tok između površine i podzemlja. Kroz pukotine i kaverne, voda se kreće u mračnim, stabilno hladnim i često hranjivima siromašnim podzemnim ekosistemima. Ovakvi uvjeti pogodovali su razvoju stigobionata, specijaliziranih podzemnih organizama poput račića roda *Niphargus*, puževa *Lanzaia*, riba *Proteus anguinus* (čovječija ribica). Podzemne vode krša u BiH karakteriše visoka čistoća, ali i osjetljivost, jer voda bez filtracije brzo prodire kroz tlo, pa je zagađenje teško zaustaviti i lako se širi kroz cijeli vodonosni sistem.

7.2.4.1. Podjela podzemnih voda prema nastanku

Fizičko-hemijska svojstva podzemnih voda razlikuju se prema načinu pojavljivanja, sposobnosti kretanja i količini, a ove razlike prvenstveno su uvjetovane njihovim porijeklom. Prema porijeklu, podzemne vode se dijele u tri grupe: vadozne, juvenilne i konatne.

a) Vadozne vode (lat. *vadosus* - plitak)

Ovo su podzemne vode, čije porijeklo je iz atmosfere i sa Zemljine površine gdje su dospjele padavinama. Javljaju se u sva tri agregatna stanja (čvrsto, tečno i gasovito), kao slobodne i vezane vode (slika 7.2.4.2). Ako u zemlju dospijevaju infiltracijom kroz pore i pukotine označavaju se kao infiltracione. Vode koje su nastale od vodene pare prizemnih dijelova atmosfere, koja je strujanjem dospjela u pukotine i šupljine stijena gdje se kondenzovala nazivaju se kondenzacione. Stvaranje kondenzacionih voda može se jasno pratiti u krškim pećinama. To je prostor gdje se javljaju vazdušne struje i gdje se topao i vlažan zrak kondenzuje, pa se voda sliva niz zidove, a često stvara i male lokve. Ove vode nastaju velikim dijelom i iz vodene pare iz dubljih slojeva čije pare struje prema površini, kondenzuju se, pa se ili sjedinjuju sa izdanima ili se, uslijed smanjenog pritiska, vraćaju u dubinu. Kondenzacione vode se stvaraju neprekidno. S druge strane, infiltracijom riječnih voda u izdan nastaju ubrizgane vode. Ovakve vode se stvaraju u ravninama gdje protiče velika rijeka (Sava) sa veoma kolebljivim riječnim režimom. Ako se maksimum vodostaja javi u vrijeme kada su podzemne vode niske, dolazi do infiltriranja riječne vode pod određenim pritiskom, što je uvjetovano visinskom razlikom između razine rijeke i izdani. Ova pojava se pojavljuje i kod rijeka gdje su ravni pjeskovito-šljunkovite kao što je Neretva ili Zeta.



Slika 7.2.4.2. Vadozne vode karakteristike i tipovi (prilagođeno, prema U.S. Geological Survey, Water Science School, 2018)

b) Juvenilne vode (lat. *juvenilis* - mladalački)

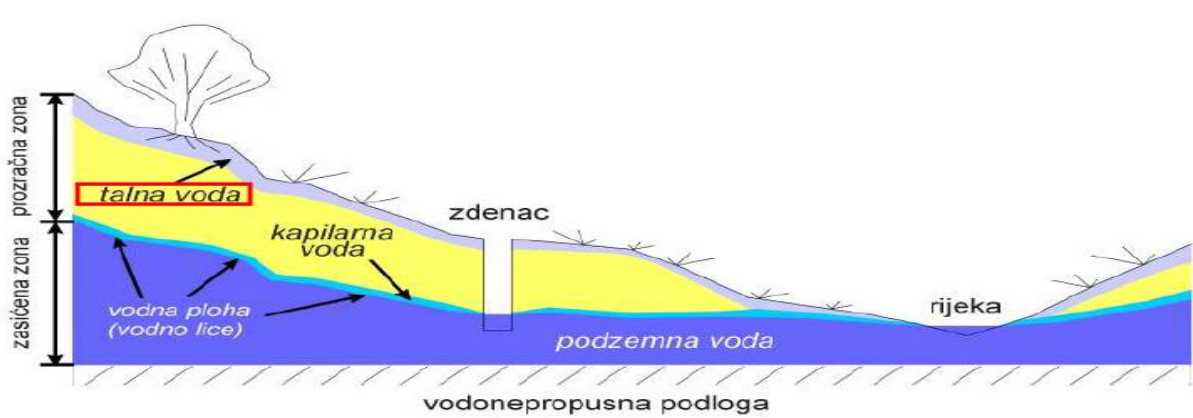
Podzemne vode koje nastaju sintezom kiseonika i vodika, a naziv “juvenilne” dobile su zato što sintezom nastaje (“rađa se”) voda. Smatra se da je u doba formiranja Zemlje na ovaj način nastala sva voda. Danas nastaje u procesu hlađenja i diferenciranja žitke magme u zoni kontakta između magme i litosfere. Nastaje u samoj Zemljinoj kori i na njenoj površini npr., hlađenjem vulkanske lave. Uslijed različitog nastanka grupiraju se u više grupa (magnatske, vulkanske itd.).

c) Konatne vode (lat. *conatus* - zajedno rođen)

Ove podzemne vode javljaju se u sedimentnim stijenama s kojima su istovremeno nastale, pa otuda potiče i njihov naziv. Sedimenti nekadašnjih jezera i mora sadrže znatne količine vode; kada se vodena masa povuče, dio te vode ostaje zarobljen u porama i pukotinama stijena. Količina konatne vode zavisi prvenstveno od geološkog sastava dna i strukture taložnog materijala. Poznata su brojna nalazišta ovakvih voda u Panonskoj niziji, a do njih se najčešće dolazi bušenjem ili kopanjem bunara.

7.2.4.2. Vertikalni raspored i karakteristike podzemnih voda

Površinske vode se upijaju i poniru u zemljište pod djelovanjem Zemljine teže i prolaze kroz kapilarne pore i pukotine do vodenopropusnog sloja (slika 7.2.4.3). Iznad tog sloja se obrazuje vodena masa, izdan. Izdan se javlja na različitim dubinama. U niskim i širokim aluvijalnim ravninama kao što je Panonska nizija javlja se neposredno ispod površine, a ponekad izbija i po površini. Vodenopropusni sloj može se naći i na nekoliko stotina metara dubine. U tom slučaju su podzemne vode duboko ispod površine, mogu da grade akumulacije ili da se, u ovisnosti o nagibu terena, polahko kreću. Podzemne vode karakterizira kapilarno kretanje od površine ka izdani i obrnuto, od izdani ka površini. Podizanje kapilarne vode značajno je za vegetaciju jer je najintenzivnije za vrijeme suše. Visina do koje se može podići voda ovisi o kvalitetu zemljišta i iznosi od nekoliko centimetara do 12 m.



Slika 7.2.4.3. Vertikalni raspored podzemne vode (prilagođeno, prema Bonaci, 2003)

Za krške predjele je karakteristično da sve vode predstavljaju podzemne vode što je uvjetovano površinskom i podzemnom hidrografijom u čemu se razlikuje od svih ostalih terena. U prvoj, najvišoj zoni gdje ima mnogo pukotina, jama i pećina, voda se javlja samo u slučaju padavina, inače je to suha zona. U slijedećoj zoni se obrazuju podzemni tokovi koji se kreću kroz pukotine i podzemne kanale i često grade i podzemne rijeke. Ove rijeke imaju i svoje pritoke, a u njihovom toku mogu se javiti i protočna i sifonska jezera. Na površinu izbijaju u vidu vrela, a često poniru kao ponornice. Upravo zato što se javljaju u različitim sredinama, fizičko-hemijska svojstva podzemnih voda se razlikuju. Različit mineraloški sastav stijena, naročito onih koje se rastvaraju u vodi, utiče na njihov sastav i kvalitet. Fizička svojstva podzemne vode su: temperatura, boja, providnost i miris. Podzemna voda koja se nalazi bliže površini, na dubini od 5 m do 50 m, ima temperaturu približno srednjoj godišnjoj temperaturi prizemnog sloja

atmosferskog vazduha. Karakterizira je veća stabilnost i ujednačenost. U toku dana zapažaju se kolebanja na 2,5 m dubine, ali su skoro beznačajna. Sezonska kolebanja se javljaju na dubini od 25 m do 30 m u umjerenim geografskim širinama. Ispod njega je neutralan sloj na kojega ne utiču klimatske promjene, ali se temperatura povećava jedan stupanj celzija na svakih 33 m, pa voda na većim dubinama postaje geotermalna od 20 °C do 42 °C, a negdje i više.

Boja podzemne vode ovisi o rastvorenim ili suspendovanim česticama, najčešće je blijedozelenkasta, ali može biti žuta od organskih materija ili mrka od humusa koje sadrži. Prisustvo mangana daje vodi tamnije tonove, a žućkastocrvenu nijansu rastvoreni hidroksid gvožđa. Boja u podzemnim vodama označava prisustvo određenih materija i njihovu količinu.

Providnost podzemne vode ovisi o stijenama kroz koje prolazi. Najmanja je kod rijeka ponornica jer one u podzemne tokove unose najveću količinu suspendovanih materija i njihova providnost je 30 cm. Ovaj parametar se može mjeriti samo u krškim rezervoarima i iznosi oko 20 m. Pošto podzemne vode karakterizira potpuno odsustvo svjetlosti zbog toga nema obnavljanja kiseonika niti stvaranja organske materije jer nema biljaka.

Hemijske osobine podzemne vode određuje mineraloški sastav stijena i njihov stupanj rastvorljivosti. Veliki uticaj ima i površina preko koje podzemna voda prolazi, brzina toka i temperatura, a što je stupanj rastvorljivosti stijena i dodirna površina veća, tok brži, temperatura viša, voda će rastvoriti više mineralnih materija. Uslijed ovoga, hemijski sastav podzemne vode jako varira. Količina rastvorenih soli varira od nekoliko grama do 300 g/l. Najviše su zastupljeni karbonati, sa 60 % od ukupne količine suhog ostataka, a hloridi sa svega 5 %. Od 45 hemijskih elemenata, njih 20 se javljaju u podzemnim vodama, a najzastupljeniji su soli magnezija, kalcija, tj. karbonati i sulfati od kojih voda postaje "tvrda". Povećanje koncentracije soli u podzemnoj vodi za 40g/l smanjuje rastvorljivost gasova za 25%. Pored kiseonika i ugljika, u vodi se nalaze rastvoreni azot, sumporovodik i neki gasovi ugljovodika i vodika. Kiseonik je porijeklom iz atmosfere ili je nastao procesom fotosinteze i donesen ponornicama, ali ga u dubljim slojevima nikako nema.

Ugljendioksid nastaje respiracijom hidrobionata ili potiče iz atmosfere, a njegovo prisustvo, odnosno prisustvo ugljene kiseline koju gradi sa vodom, povećava rastvorljivost vode i utječe na razlaganje kalcijkarbonata. Ostali gasovi potječu iz atmosfere, oksidoredukcionim procesima organske materije, metamorfozom organske materije pri obrazovanju nafte, diferencijacijom magme i pri vulkanskim procesima. Organska materija dopijeva u podzemne tokove sa površine ili ih voda pokupi na svom putu dok ponire u zemlju. Podzemne vode sadrže malu količinu organske materije.

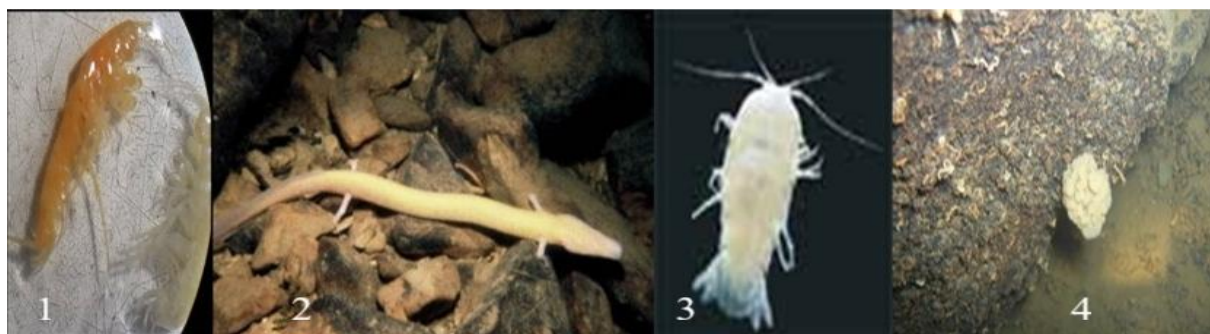
7.2.4.3. Živi svijet podzemnih voda

Živi svijet podzemnih voda karakteriziraju posebne prilagodbe na specifične uvjete: nedostatak svjetlosti, niže temperature, mala količina kiseonika i hrane. Hrana su samo mala količina ostataka biljaka i životinja koje je donijela voda, na svom putu kroz zemljište ili unesena ponornicama. Mala veličina organizama koji se pojedinačno javljaju u podzemnim vodama rezultat je male količine hrane, ali i skućenog prostora. Čovječija ribica *Proteus anguinus* ipak dostiže veličinu i do 30 cm, a smatra se da je *Proteus* je evoluirao iz relativno velikog površinskog vodenog vodozemca (porodica Proteidae). Dakle, nije „morao“ evoluirati iz sitnih formi, već je u podzemlje ušao već kao velika vrsta, a u izoliranim uslovima veličina nije

predstavljala evolucijski problem. Ima izuzetno spor metabolizam i može živjeti više od 70–100 godina, pa raste tokom cijelog života. Stabilni podzemni uslovi i odsustvo predatora dodatno omogućavaju postizanje znatne dužine, uprkos ograničenim resursima.

Podjela životinja u podzemnim vodama vrši se prema stepenu i trajanju njihove povezanosti s podzemnim staništem na stigobionte, stigofile i stigoksene.

Stigobionti (troglobionti), organizmi potpuno prilagođeni podzemnom životu (slika 7.2.4.4).. Cijeli život provode u podzemnim vodama. Nemaju pigmentaciju (bijeli), često bez očiju, produžene antene ili ekstremiteti. Račići *Bathynella* i *Parabathynella* su mikroskopski stigobiontni račići podzemnih voda, bez očiju i pigmentacije, nastanjeni u intersticijskim vodama i freatičkim slojevima. Predstavljaju reliktno vrste koje su tokom ledenog doba preživjele u podzemnim refugijima, a danas su bioindikator očuvanih, nezagađenih podzemnih ekosistema. *Niphargus* je rod slijepih, depigmentiranih amfipodnih račića koji žive isključivo u podzemnim vodama (stigobionti). Naseljavaju špilje, podzemne tokove i izvorišne zone, hrane se detritusom i mikroorganizmima, a služe kao pokazatelji čistoće podzemnih ekosistema. Posebno su raznoliki u Dinarskom kršu, gdje su mnoge vrste endemične. *Proteus anguinus* (čovječija ribica), potpuno prilagođen životu u podzemlju: slijep, bez pigmentacije, cijeli život provodi u podzemnim vodama Dinarida. *Sphaeromides virei* je slijepi, depigmentirani izopodni račić, strogo vezan za podzemne vode (stigobiont). Naseljava špiljske i freatičke ekosisteme Dinarskog krša, gdje se hrani detritusom i mikroorganizmima. Predstavlja evolucijski reliktni i važan bioindikator očuvanih podzemnih ekosistema. *Eunapius subterraneus* (Sket & Velikonja, 1984) je endemska podzemna slatkovodna spužva Dinarskog krša i jedina poznata stigobiontna slatkovodna spužva na svijetu. Potpuno je prilagođena životu u podzemlju: bez je pigmentacije i fotosintetskih algi, sa izrazito sporim metabolizmom, te se smatra važnim bioindikatorom očuvanih, hladnih i oligotrofnih podzemnih ekosistema. Ova vrsta je endem Hrvatske, gdje je zabilježena u području Samoborskog gorja, Ogulina, Korduna i Gorskog kotara. Posebno je poznata ogulinska špiljska populacija, a pronađena je i u Jamskom sistemu Lukina jama – Trojama na Sjevernom Velebitu, na dubini od čak 1392 m.



Slika 7.2.4.4 Stigobionti. (1,2,3 originalne fotografije)

Legenda: *Niphargus ilidzensis* Schaferna, 1922- Vrelo Bosne, 2. *Proteus anguinus* (Laurenti, 1768), 3. *Sphaeromides virei* (Dollfus, 1897)- Krušnica i 4. *Eunapius subterraneus* (Sket & Velikonja, 1984)

Stigofili (troglofili) Organizmi koji žive u podzemnim vodama, ali se mogu naći i u površinskim vodama. Dakle, biraju podzemno stanište, ali nisu strogo vezani za njega. Ova grupa uključuje vrste koje preferiraju podzemlje, ali mogu preći u epigejske vode.

Stigokseni su organizmi koji povremeno i slučajno dospiju u podzemne vode, npr. putem bujica, podzemnih tokova ili ponornica. Nisu prilagođeni životu u podzemlju. *Paraphoxinus* rod riječnih riba čije vrste mogu dospjeti u podzemne vode.

Organizmi koji naseljavaju podzemne vode uglavnom su stenovalentni, s vrlo uskom ekološkom valencom, te podnose samo mala kolebanja ekoloških faktora, posebno temperature. U krškim podzemnim vodama najviše je istražen postojnsko-planinski jamski sistem, koji formira ponornica Pivka, a u kojem je do sada zabilježeno oko 190 vrsta životinja. Među njima su: 37 vrsta tulara (Chironomidae), 25 vrsta maločekinjaša, 22 vrste mekušaca, 21 vrsta račića kopepoda, 13 vrsta praživotinja te tri vrste riba, uključujući i čovječiju ribicu. Po bogatstvu podzemnih organizama Pivka spada među najbogatije sisteme u svijetu (Sket, 1979). U ovakvim podzemnim zajednicama, pored brojnih stigobionata, prisutan je i veliki broj stigofila. U najdubljim, potpuno tamnim zonama podzemlja pojavljuju se gotovo isključivo gljive i bakterije, dok se u dijelovima pećina gdje dopire vrlo malo svjetlosti (npr. Postojnska jama) mogu javiti i modrozeleni alge. Podzemne vode krša odlikuju se velikim udjelom endemičnih vrsta. Endemičnost podzemne faune Dinarskog krša, o čemu je ranije bilo riječi na primjeru ogulinske špiljske spužvice, potvrđuje visoku specijaliziranost i izoliranost ovih ekosistema. Mnogi od ovih organizama pokazuju izrazite prilagodbe podzemnom načinu života, uključujući nedostatak pigmenta, redukciju očiju, usporen metabolizam, promijenjenu fiziologiju stanica i organizma te specifičan način razmnožavanja. Adaptacije organizama podzemnih voda mogu se svrstati u dvije osnovne skupine: morfološke i fiziološke (shema 7.2.4.1), pri čemu svaka od njih odražava visoku specijaliziranost prema ekstremno stabilnim, tamnim i oligotrofnim uvjetima podzemnih ekosistema.



Shema 7.2.4.1. Adaptacije organizama u podzemnim vodama (stigobionti)

7.2.4.4. Mikrobiologija podzemlja

Iako je danas jasno da duboke, izolirane podzemne vode u prirodnom stanju ne sadrže razvijene populacije bakterija niti drugih mikroorganizama, historijski razvoj mikrobioloških istraživanja podzemnih voda počeo je mnogo ranije.

Historijski osvrt počinje od Van Leeuwenhoek (1677.) je prvi mikroskopski opisao “sićušne čestice” u vodi iz bunara ali to su bile površinske infiltracione vode, a ne stvarna dubinska podzemna voda. Hassall (1850) i Cohn (1853) pronašli su bakterije željeza i mangana u londonskim vodovodnim sistemima, uglavnom u biofilmu formiranom na zidovima cijevi i bunara, gdje podzemna voda dolazi u kontakt sa zrakom. Početkom 20. vijeka Namyslowski

1913, kao Rogers 1917 i Ginsburg 1933 opisali su mikroorganizme u slanim rudnicima, naftnim bušotinama opet u okruženjima gdje podzemna voda dolazi u kontakt s površinom, organskim materijalom ili se miješa s tehnogenom vodom. Važno je naglasiti, prisustvo mikroorganizama u tim slučajevima nije dokaz da mikrobi žive u dubokoj podzemnoj vodi, nego da dolaze izvana ili se formiraju tek pri doticaju s kiseonikom, organskom materijom i svjetlom. U dubljim podzemnim zonama (pukotine stijena, vadozna i kapilarna zona) sadržaj organske materije i kiseonika je vrlo nizak, pa su i mikroorganizmi rijetki. Međutim, kako se podzemna voda približava površini, ona dolazi u kontakt s organskom materijom koja prodire iz tla, kiseonikom iz aeracijskog (vadoznog) sloja i površinama pogodnim za kolonizaciju (stijene, korijenje, sediment, zidovi bunara). U tim uslovima mikroorganizmi se mogu brže razmnožavati i počinje formiranje biofilma, tankog, sluzavog sloja kojeg čine bakterije, alge, gljivice i drugi mikroorganizmi, čvrsto vezani za podlogu (stijenu, cijev, korijen). Biofilm se tipično javlja u plitkim bunarima, izvorima, šupljinama i kanalima u kršu i makroporama tla (kanali oko korijenja, pukotine, crvotočine). Što je voda bliže površini i što više dobija kiseonika i organske materije, to je bogatija mikroorganizmima i biofilm se lakše formira.

Hiporejska (hipoheična) zona. Hiporejska zona predstavlja prijelazno područje između površinskih tekućih voda (rijeka, potoka) i podzemnih voda koje se nalaze u riječnom šljunku, pijesku ili drugim sedimentima korita. U toj zoni dolazi do miješanja riječnog toka i podzemne vode, pa je riječ o hidrolškom i ekološkom kontaktu dvaju sistema površinskog i podzemnog. Za razliku od dubokih podzemnih voda, koje su siromašne kiseonikom, bez svjetlosti i gotovo bez mikroorganizama, hiporejska zona predstavlja biološki najaktivniji dio podzemnog sistema. Voda iz rijeke, zajedno s rastvorenim kiseonikom i organskom materijom, prodire u riječna sedimentna ležišta i omogućava razvoj mikroorganizama te stvaranje tankog mikrobiološkog filma (biofilma) na površini čestica šljunka i pijeska. Hiporejska zona ima ključnu ulogu u cirkulaciji hranjivih tvari, razgradnji organske materije, nitrifikaciji i denitrifikaciji, te služi kao stanište za brojne beskičmenjake i mikroorganizme. Istovremeno, ona djeluje kao važan biogeohemijski filter između površinske i podzemne vode, jer voda prije ulaska u dublje slojeve akvifera prolazi kroz ovu „živu barijeru“. Mikrobne zajednice u hiporejskim sedimentima najbolje su proučene u riječnim sistemima umjerenog pojasa. Istraživanja pokazuju da njihov sastav zavisi od godišnjeg doba, protoka vode, granulacije sedimenata i količine organske materije. Ljeti dominiraju bakterije iz skupina β - i γ -proteobakterija te rod *Bacillus*, dok su zimi i u proljeće češće prisutne *Firmicutes*, *Nitrospira* i druge bakterije uključene u oksidaciju amonijaka i nitrita. U više rijeka u hiporeji se kao stalni rodovi izdvajaju *Pseudomonas*, *Aquabacterium*, *Rhodoferax*, *Hyphomicrobium* i *Pirellula*. Ove bakterije grade biofilm na mineralnim česticama, koriste organski ugljik iz površinskih voda i učestvuju u razgradnji organske materije. Posebno je važno naglasiti razliku između hiporeje i dubljih podzemnih voda (akvifera). Dok duboko podzemlje ima veoma malo hranjivih materija, kiseonika i energije, pa su mikroorganizmi rijetki ili odsutni, u hiporeji zbog stalnog kontakta s površinskom vodom postoje pogodni uslovi za njihov opstanak i aktivnost.

Ovakva razlika u biološkoj aktivnosti naglašava osjetljivost podzemnih voda, posebno onih u kršu, na svaki poremećaj kvaliteta površinske vode i uticaje iz okoline. Problem dostupnosti pitkih voda u svijetu sve više raste, a procjenjuje se da će u budućnosti pitka voda biti jedan od najvažnijih resursa. Svi ovi podaci ukazuju na potrebu njenog očuvanja i racionalnog korištenja.

Kraške podzemne vode imaju izrazito slabe mogućnosti samopročišćavanja, pa svaki oblik zagađenja vrlo brzo dopire u akvifer. Jedini način očuvanja podzemnih voda jest zaštita čitavog kraškog sistema, uključujući i njegove površinske ekosisteme. Nekontrolirano odlaganje otpada i ispuštanje otpadnih voda višestruko ugrožava cijeli ekosistem: ispiranjem tokom kiša i otapanja snijega, toksične i opasne materije, kao i mikroorganizmi, dospijevaju u podzemlje i u rezervoare pitke vode. Razvoj civilizacije dodatno je promijenio sastav otpada, pa se u podzemlje sada unose i različite opasne hemikalije, pesticidi, herbicidi i deterdženti, što predstavlja dugoročnu prijetnju za kvalitet i dostupnost pitke vode.

8. Aplikativna hidrobiologija

Aplikativna hidrobiologija je grana biologije koja se bavi proučavanjem vodenih ekosistema i njihovih organizama, s posebnim naglaskom na praktičnu primjenu tih saznanja. Prvenstveno u zaštiti okoline, očuvanju prirode, održivom upravljanju prirodnim resursima i restauraciji degradiranih staništa. Ova disciplina, uključuje detaljno istraživanje slatkovodnih (rijeke, potoci, izvori, jezera, bare, močvare, tresetišta) i slanih ekosistema (mora i okeana), analizu biološke raznolikosti, međusobnih odnosa među vrstama, kao i uticaj antropogenih faktora na vodene resurse. Prvenstveno se odnosi na lotičke (tekuće) i lentičke (stajaće) "kopnene vode", gdje su uključeni prirodni i umjetni (izmenjeni) vodotoci, podzemne i izvorišne vode kao i prelazna staništa. Aplikativna hidrobiologija obuhvata širok spektar istraživačkih i primijenjenih aktivnosti vezanih uz procjenu stanja voda, monitoring ekosistema i upravljanje vodnim resursima. Šema daje pregled temeljnih oblasti koje čine osnovu ovog multidisciplinarnog pristupa (shema 8.1).



Shema 8.1. Prikaz sadržaja i obuhvata aplikativne Hidrobiologije

8.1. Oblasti aplikativne hidrobiologije

Aplikativna hidrobiologija obuhvata širok spektar oblasti koje uključuju proučavanje biodiverziteta vodenih organizama, akvakulturu, zagađenje i zaštitu voda te upravljanje vodnim resursima (tabela 8.1). Biodiverzitet vodenih ekosistema obuhvata raznolikost vrsta, njihove genetske osobine, staništa i ekološke funkcije u sistemu. Identifikacija i klasifikacija organizama obuhvata sve trofičke nivoe – od mikroorganizama, poput bakterija i algi, do viših biljaka, beskičmenjaka i riba. Pored tradicionalnih taksonomskih metoda, sve češće se primjenjuju molekularne tehnike koje omogućavaju preciznu identifikaciju i otkrivanje kriptičnih vrsta. Distribucija i abundancija vrsta analiziraju se kako bi se razumjelo kako su organizmi prostorno raspoređeni (npr. duž riječnog toka) i koje ekološke ili antropogene varijable, poput temperature vode ili nivoa zagađenja, utiču na njihovu brojnost. Dugoročna praćenja populacija omogućavaju uvid u promjene i trendove u ekosistemima. Ekološke interakcije uključuju odnose među vrstama, poput predacije, kompeticije, mutualizma i parazitizma. Razumijevanje ovih odnosa pomaže u određivanju uloge pojedinih vrsta u ekosistemu, npr. oprašivača, ekosistemskih inženjera (poput bentoskih vrsta) ili ključnih vrsta čije prisustvo stabilizira zajednicu. Ekološku strukturu i funkciju zajednica dodatno oblikuju abiotički i biotički faktori, kao što su temperatura, salinitet, dostupnost nutrijenata te prisustvo predatora ili kompetitora. Analiza ovih faktora omogućava procjenu otpornosti i prilagodljivosti organizama na promjene u okolišu. Zaštita i upravljanje biodiverzitetom obuhvata mjere očuvanja ugroženih vrsta i staništa, obnovu oštećenih ekosistema i korištenje savremenih tehnologija, poput GIS-a, za prostorno planiranje i modeliranje distribucije vrsta. Daljinska istraživanja dodatno omogućavaju procjenu stanja ekosistema na velikim geografskim skalama. Posebnu vrijednost u modernoj hidrobiologiji ima istraživanje biodiverziteta i genetskih resursa primjenom molekularnih metoda, kao što su DNK

barkodiranje i analiza DNK iz okoliša (eDNA), koje omogućavaju detekciju prisustva vrsta u vodi bez fizičkog uzorkovanja organizama.

Tabela 8.1. Ključne oblasti aplikativne hidrobiologije

Oblast	Kratki opis
Biodiverzitet	Raznolikost akvatičnih organizama
Biodiverzitet i eDNA	Genetsko identifikovanje vrsta putem DNK iz okoliša bez direktnog uzorkovanja
Akvakultura	Uzgoj vodenih organizama radi ishrane, očuvanja i ekonomije
Upravljanje vodama	Monitoring, zaštita i racionalno korištenje površinskih i podzemnih voda
Monitoring voda i biomonitoring	Praćenje parametara i indikatorskih organizama za procjenu ekološkog statusa
Zagađenje voda	Analiza izvora i posljedica zagađenja, mjere prevencije i remedijacije
Zaštita i očuvanje voda	Planovi i mjere očuvanja resursa, usklađeni sa zakonodavstvom i lokalnim potrebama
Prečišćavanje otpadnih voda	Tehnologije za uklanjanje zagađivača i ponovno korištenje vode
Klimatske promjene	Uticaj na režim voda, distribuciju vrsta, stabilnost i prilagodbu ekosistema
Prilagodba i korištenje zemljišta	Zelena infrastruktura, smanjenje emisija, restauracija prirodnih vodnih tijela
Tipologija voda	Klasifikacija voda prema fizikalnim, hemijskim i biološkim karakteristikama
Bioakumulacija i biomagnifikacija	Praćenje i analiza akumulacije zagađivača u organizmima i duž trofičkog lanca

Akvakultura, kao oblast primijenjene hidrobiologije, odnosi se na uzgoj vodenih organizama u kontroliranim uslovima s ciljem obezbjeđivanja hrane, ekonomskog razvoja i smanjenja pritiska na prirodne populacije. Ona predstavlja praktičnu primjenu znanja iz biologije vodenih organizama, ekologije voda, hemije i savremenih tehnologija. Ključni aspekti akvakulture uključuju biologiju i fiziologiju ciljnih vrsta, kvalitet vode, nutritivne potrebe, zdravstveno stanje organizama, kao i ekološke i tehnološke komponente sistema uzgoja (tabela 8.2).

Temelji aplikativne hidrobiologije oslanjaju se na tri ključna koncepta: tipologiju voda, biomonitoring i upravljanje vodama. Ovi elementi su međusobno povezani: tipologija omogućava razumijevanje prirodnih karakteristika voda i definisanje referentnih uslova; biomonitoring procjenjuje stvarno stanje voda pomoću bioloških, fizičko-hemijskih i hidromorfoloških pokazatelja; upravljanje vodama koristi dobijene rezultate u planiranju, zaštiti i održivom korištenju vodnih resursa. Tipologija voda je sistematska klasifikacija površinskih voda (rijeka, jezera, prijelaznih i priobalnih voda) prema njihovim prirodnim fizičkim, hemijskim, morfološkim i biološkim karakteristikama. Njena svrha je:

- određivanje referentnih uslova (prirodnog, minimalno antropogeno izmijenjenog stanja),
- dizajn mreže monitoringa i odabir reprezentativnih lokaliteta,
- procjena ekološkog statusa kroz poređenje stvarnog i referentnog stanja,
- harmonizacija među državama, posebno u okviru EU ODV.

Tabela 8.2. Prikaz aspekata akvakulture

Aspekt akvakulture	Opis
Biologija ciljnih vrsta	Poznavanje morfologije, fiziologije, ishrane i reprodukcije uzgajanih vrsta (npr. pastrmka, šaran, som, školjke roda <i>Mytilus</i> , rakovi iz roda <i>Astacus</i>).
Kvaliteta vode	Praćenje parametara: temperatura, pH, kiseonik, amonijak, nitriti, nitrati; direktan uticaj na zdravlje i rast.
Nutritivne potrebe i hranjenje	Razvoj optimalnih režima ishrane prema vrsti i stadiju razvoja; efekti hrane na metabolizam i ekologiju.
Bolesti i paraziti	Monitoring patogeni (bakterije, virusi, paraziti); biološka kontrola bolesti uz doprinos hidrobiologa.
Genetika i selekcija	Genetske metode u selekciji za bolji rast, otpornost i konverziju hrane (npr. eDNA, genotipizacija).
Ekološki uticaji	Negativni uticaji na ekosistem (eutrofikacija, invazivne vrste); razvoj održivih sistema.
Sistemi uzgoja	Tehnologije uzgoja: RAS, kavezi, IMTA – optimizacija prostora i resursa.
Zakonski i standardni okviri	Usklađivanje s propisima (PUO, ODV, Natura 2000); monitoring i procjene uticaja na okoliš.

Tipologija obuhvata sljedeće grupe karakteristika: a) fizičke: nadmorska visina, površina sliva, dužina i nagib, brzina toka, dubina; b) hemijske: prirodne koncentracije nutrijenata, mineralizacija (provodljivost), pH, rastvoreni kiseonik; c) morfološke: širina, dubina, meandriranje, prirodnost obala, povezanost s poplavnom zonom; d) biološke: tipične zajednice makrozoobentosa, fitobentosa, riba i makrofita i e) biogeografske: ekoregioni poput alpskog, dinarskog i panonskog. Biomonitoring predstavlja sistematsko praćenje stanja vodnih ekosistema na osnovu bioloških indikatora, a ne samo hemijskih parametara. On ne služi isključivo za ocjenu ekološkog statusa prema, već ima mnogo širu primjenu u otkrivanju dugoročnih i kumulativnih promjena u ekosistemu, rano upozoravanje na degradaciju (early warning), procjena uticaja specifičnih pritisaka (hidrocentrale, poljoprivreda, otpadne vode), evaluacija uspješnosti restauracijskih mjera, zaštita biodiverziteta, Natura 2000 područja, invazivne vrste i kontrola voda za akvakulturu, rekreaciju, pitku vodu. Biomonitoring obuhvata korake (shema 8.2): izbor lokaliteta, uzorkovanje, laboratorijska determinacija, statistička analiza, primjena bioloških indeksa (BMWP, ASPT, saprobni indeks, EQR, EFI) i klasifikacija (visok, dobar, umjeren, loš, vrlo loš status).



Shema 8.2. Koraci/slijed u biomonitoringu

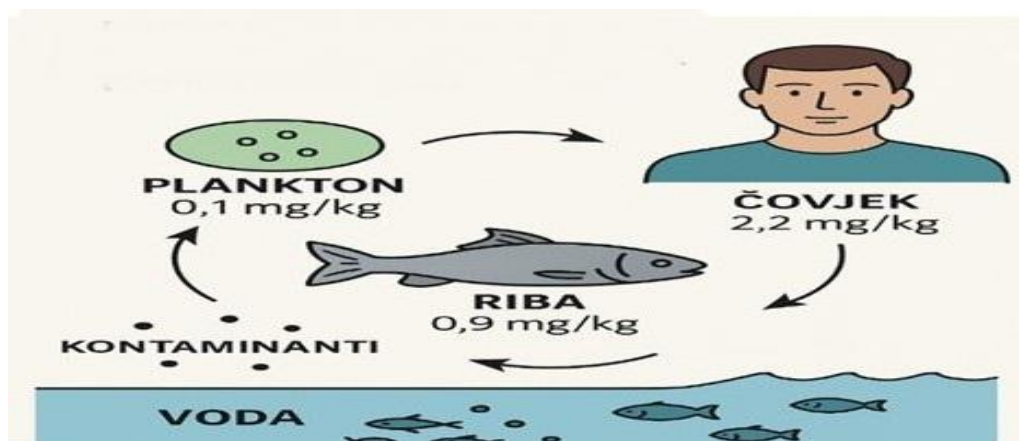
Bioindikatori su vrste, populacije ili zajednice organizama koje svojim prisustvom, abundansom, fiziološkim stanjem ili strukturnim promjenama odražavaju ekološko stanje

određenog staništa, te omogućavaju identifikaciju prirodnih ili antropogenih promjena u okolišu. Bioindikatori su alat u biomonitoringu najčešće korištene bioindikatorske grupe su alge, beskičmenjaci, kičmenjaci (ribe posebno), mahovine, više biljke (tabela 8.3).

Tabela 8.3. Prikaz skupina bioindikatora

Organizmi/zajednice	Primjena i značenje
Makrozoobentos	Osjetljivi na kiseonik, organske i toksične supstance (npr. EPT takes, saprobnost – važni pokazatelji čiste vode)
Fitobentos (alge)	Reaguje na promjene u svjetlu, hranjivim tvarima, pH i toksičnim tvarima
Fitoplankton	Brzo reaguje na eutrofikaciju i zagađenje nutrijentima
Makrofite	Pokazuju dugoročne promjene u protoku, prozirnosti i trofiji
Ribe	Pokazuju kumulativne promjene, ali su manje osjetljive na kratkoročne uticaje

Poseban oblik biomonitoringa jeste biomonitoring zasnovan na bioakumulaciji, pri čemu se zagađujuće supstance (npr. teški metali, pesticidi, organski zagađivači) ne mjere direktno u vodi, nego u tkivima organizama koji ih postepeno nakupljaju tokom života. U tu svrhu se koriste tzv. bioakumulatori, organizmi poput mahovina, školjki, rakova ili riba koji reflektuju stvarnu, kumulativnu izloženost ekosistema zagađenju. Ovaj pristup je posebno vrijedan kada su koncentracije kontaminanata u vodi niske ili ispod granice detekcije, ali ipak dugotrajno prisutne. Bioakumulacija je proces postepenog nakupljanja kontaminanata u organizmu iz vode, sedimenta i/ili hrane, pri čemu je unos veći od eliminacije (unos > izlučivanje). Biomagnifikacija označava povećanje koncentracije kontaminanata duž trofičkog lanca, od nižih ka višim trofičkim nivoima (alge → zooplankton → ribe → ptice grabljivice → čovjek). Ona objašnjava zašto organizmi na vrhu hranidbenog lanca imaju najveće koncentracije toksikanata. Primjene u aplikativnoj hidrobiologiji i biomonitoringu: praćenje teških metala (Hg, Pb, Cd) u ribama i bentosnim organizmima, istraživanje mikroplastike u filtratorima (školjke, spužve), detekcija organskih zagađivača (PCB, pesticidi, PAH) u predatorima, ribama i pticama, procjena rizika po čovjeka na osnovu trofičke pozicije, potrošnje biomase i biološke dostupnosti kontaminanata i izrada sanitarnih upozorenja (npr. „ne preporučuje se konzumacija ribe iz...“). Ilustrativan primjer bioakumulacije i biomagnifikacije kontaminatima (shema 8.3): koncentracija u planktonu 0,1 mg/kg → u ribama 0,9 mg/kg → u čovjeku 2,2 mg/kg.



Shema 8.3. Bioakumulacija i biomagnifikacija kontaminantima (prilagođeno prema Renuka & Patyal 2025)

Upravljanje vodnim resursima je praktična primjena rezultata tipologije i biomonitoringa. Obuhvata monitoring, zaštitu, racionalno korištenje i planiranje voda u skladu s potrebama stanovništva i ekosistema (tabela 8.4).

Tabela 8.4. Ključne komponente upravljanja vodnim resursima

Komponenta	Opis
Monitoring ekološkog statusa	Praćenje bioloških elemenata kvalitete (makrozoobentos, fitobentos, ribe), fizičko-hemijskih i mikrobioloških parametara.
Procjena ekoloških pritisaka	Identifikacija antropogenih uticaja poput zagađenja, regulacije vodotoka, eutrofikacije, hidroenergetskih postrojenja.
Modeliranje protoka i ekološkog protoka	Utvrđivanje minimalnog potrebnog protoka za očuvanje akvatičnih zajednica.
Restauracija vodnih tijela i staništa	Revitalizacija oštećenih staništa (npr. obala, dna vodotoka, vegetacije) i reintrodukcija osjetljivih vrsta.
Planovi upravljanja slivom	Izrada integriranih planova za upravljanje cijelim slivnim područjem prema principima održivosti.
Racionalno korištenje voda	Upravljanje vodom za piće, navodnjavanje, industriju i rekreaciju uz očuvanje ekosistemskih funkcija.
Primjena EU Okvirne o vodama	Implementacija zahtjeva za postizanje dobrog ekološkog statusa/potencijala svih voda do ciljanih rokova.
Učešće javnosti i obrazovanje	Edukacija lokalnih zajednica, uključivanje korisnika i dionika u procese odlučivanja.

Monitoring kao temelj upravljanja obuhvata fizičko-hemijske, biološke, mikrobiološke i hidromorfološke parametre, što je prikazano u tabeli 8.5.

Tabela 8.5. Monitoring kvaliteta voda – aspekti aplikativne hidrobiologije

Segment monitoringa	Opis
Biološki monitoring	Praćenje bioloških elemenata kvalitete: makrozoobentos, fitobentos (alge), fitoplankton, makrofite, ribe. Koriste se biološki indeksi (npr. BMWP, EPT, Saprobni indeks).
Fizičko-hemijski parametri	Mjerenje temperature, pH, provodljivosti, otopljenog kiseonika, zasićenja kiseonikom, BPK ₅ , nutrijenata (amonijak, nitriti, nitrati, fosfati).
Hemijsko stanje	Analiza prisutnosti opasnih i prioritetnih supstanci (teški metali, pesticidi, organski zagađivači) u skladu s graničnim vrijednostima.
Mikrobiološki parametri	Određivanje prisustva fekalnih bakterija (npr. <i>E. coli</i> , koliformi) kao pokazatelja sanitarne ispravnosti vode.
Hidromorfološki pokazatelji	Analiza prirodnosti toka, morfologije obala, prisustva barijera, povezanosti sa poplavnim područjima.
Trendovi i poređenja u vremenu	Praćenje promjena u kvalitetu vode kroz duži vremenski period radi identifikacije degradacije ili poboljšanja.
Standardizacija i protokoli	Monitoring se obavlja prema nacionalnim (npr. BAS EN ISO) i međunarodnim standardima uz definisane metodologije.

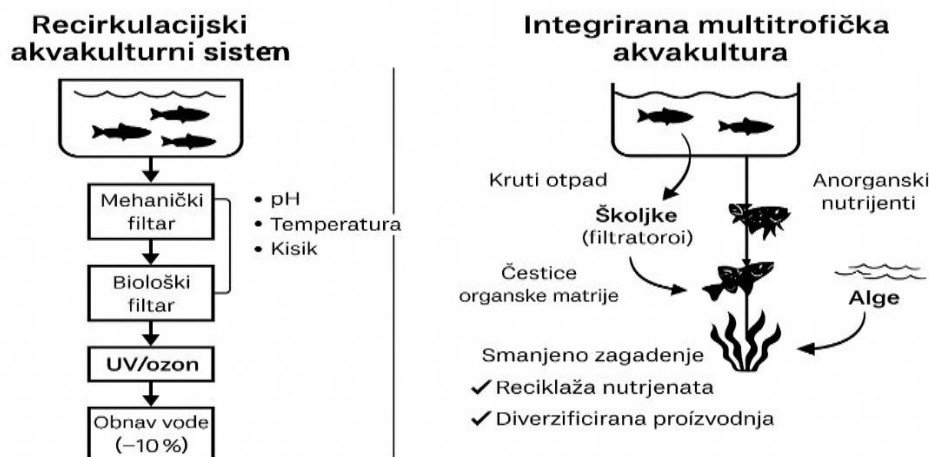
Tipologija voda, biomonitoring i upravljanje vodama čine nerazdvojivu cjelinu aplikativne hidrobiologije. Tipologija omogućava razumijevanje prirodnih karakteristika voda i definiše referentne uslove; biomonitoring prati odstupanja od tih uslova i otkriva uzroke degradacije; upravljanje vodama koristi ove informacije za donošenje planova, zaštitnih mjera i restauracije ekosistema. Ovaj integrisani pristup je osnova savremenog upravljanja vodnim resursima i očuvanja akvatičnih ekosistema.

Tipologija voda određuje prirodne uslove ekosistema (temperaturu, protok, hemizam), biomonitoring pokazuje njihovo biološko stanje, a upravljanje vodama osigurava racionalno korištenje i zaštitu tih resursa. Upravo na spoju ova tri segmenta razvija se akvakultura, jer uspješan uzgoj riba i drugih organizama zavisi od tipa vode, njene ekološke stabilnosti i održivog upravljanja. Akvakultura spaja naučna istraživanja s praktičnim rješenjima u sektoru proizvodnje hrane, očuvanja resursa i održivog korištenja vodenih ekosistema.

Predstavlja ključnu oblast za budući razvoj plave ekonomije i sigurnosti hrane. Uloga hidrobiologa u akvakulturi obuhvata:

- poznavanje biologije, morfologije i fiziologije ciljnih uzgojnih vrsta (ishrana, reprodukcija);
- nutritivne potrebe i hranjenje (razvoj optimalnih režima ishrane);
- kvalitet vode (monitoring pH, koncentracije rastvorenog kiseonika i nutrijenata u uzgojnim objektima);
- bolesti i parazite (nadzor, dijagnostika i biološka kontrola patogena);
- genetiku i selekciju (primjena genetskih metoda i genotipizacije);
- procjenu stanja, monitoring i usklađenost s EU direktivama i nacionalnim propisima;
- ekološke uticaje akvakulture na vodotoke i jezera (eutrofikacija, promjene u biodiverzitetu, organsko opterećenje);
- sisteme uzgoja: kavezni uzgoj, recirkulacijske akvakulturne sisteme (RAS – eng. Recirculating Aquaculture Systems) i IMTA (integrirana multitrofička akvakultura).

RAS sistemi su zatvoreni sistemi uzgoja u kojima se voda kontinuirano filtrira, pročišćava i vraća u opticaj, čime se omogućava precizna kontrola uslova u bazenima. IMTA sistemi predstavljaju (shema 8.3) savremeni oblik održive akvakulture u kojem se kombinuju vrste različitih trofičkih nivoa (npr. ribe – školjke – alge), čime se smanjuju otpadne materije i povećava efikasnost korištenja resursa.



Shema 8.3. Recirkulacijski sistemi i IMA sistemi za uzgoj akvatičnih organizama (prilagođeno prema Timmons& Ebeling, 2013).

Dok akvakultura predstavlja primjer planskog i kontrolisanog korištenja vodnih ekosistema u skladu s ekološkim principima, drugi važan segment primjene hidrobiologije odnosi se na zaštitu voda od zagađenja i degradacije. Industrijski, poljoprivredni i komunalni uticaji mogu narušiti prirodnu strukturu vodenih zajednica, hemijski sastav vode i funkcionisanje cijelog ekosistema. Zbog toga hidrobiologija ima ključnu ulogu u prepoznavanju, definisanju, praćenju i sanaciji zagađenja vodenih tijela.

Zagađenje voda predstavlja unošenje supstanci ili energije u vodni ekosistem u količinama koje dovode do promjene kvaliteta vode, narušavanja biološke ravnoteže i ugrožavanja zdravlja ljudi, organizama ili ekosistemskih funkcija.

Zagađenje voda obuhvata unošenje organskih, anorganskih, mikrobioloških, prioriternih supstanci i mikroplastike u vodeni ekosistem, što dovodi do gubitka biodiverziteta, promjena u strukturi zajednica, hipoksije, mortaliteta i bioakumulacije, zbog čega je nužno provoditi zakonsku zaštitu voda, prečišćavanje otpadnih voda, održivu poljoprivredu, restauraciju staništa te edukaciju i uključivanje javnosti (tabela 8.6).

Zaštitu voda, kroz očuvanje kvalitete i kvantiteta resursa, identifikaciju prioriternih područja za zaštitu i razvoj politika očuvanja na lokalnom i regionalnom nivou. Aplikativna hidrobiologija se ne bavi samo analizom zagađenja, već i primjenom mjera zaštite voda koje uključuju:

- ograničavanje unosa zagađujućih tvari kroz kontrolu izvora (tačkasti i difuzni),
- prečišćavanje otpadnih voda putem tehničkih sistema (biološki, mehanički, hemijski tretman),
- restauraciju i zaštitu prirodnih vodnih tijela u skladu sa ekološkim principima.

Tabela 8.6. Prikaz smjernica u oblasti zagađenje i zaštita voda – aplikativna hidrobiologija

Aspekt	Opis i primjena
Vrste zagađenja	Organsko; nutrijenti (N, P) – eutrofikacija; teški metali i toksini; mikrobiološko; mikroplastika.
Izvori zagađenja	Tačkasti (kanalizacija, industrija); difuzni (poljoprivreda, atmosferski talozi); urbani i saobraćaj.
Posljedice po ekosistem	Gubitak biodiverziteta, promjene zajednica, hipoksija, bioakumulacija.
Biološki odgovor i indikatori	Promjene u sastavu makrozoobentosa, fitoplanktona, riba, saprobni/trofički indeks; tolarentene/invazivne vrste
Mjere zaštite	Propisi (WFD, nacionalni zakoni), PPOV/I-PPOV, održiva upotreba pesticida/đubriva, restauracija močvara, edukacija.
Uloga hidrobiologa	Identifikacija zagađenja, procjena otpornosti i samočišćenja, preporuke mjera, učestvovanje u planiranju i monitoringu.

Prečišćavanje: konvencionalne (mehaničke, biološke) i napredne tehnologije (membransko, fitoremedijacija) smanjuju pritiske na ekosisteme. Hidrobiolozi procjenjuju efikasnost tretmana i biološki odgovor biocenoza. (tabela 8.7).

Tabela 8.7. Smjernice u oblasti prečišćavanje otpadnih voda u aplikativnoj hidrobiologiji

Segment	Opis
Vrste otpadnih voda	Komunalne; industrijske; poljoprivredne; urbane površine.
Nivoi tretmana	Primarni (mehanički); sekundarni (biološki: aktivni mulj, biofilteri); tercijarni (nutrijenti mikrobiologija, mikropolutanti).
Biološko prečišćavanje	Vještačke močvare (Constructed Wetlands), biofilteri, stabilizacijske lagune, denitrifikacija/fosfatna fiksacija.
Ekološki značaj	Prevenција eutrofikacije, očuvanje biodiverziteta, pejzažne/habitatne funkcije.
Uloga hidrobiologa	Monitoring prije/poslije, bioindeksi, evaluacija efikasnosti, saradnja u projektovanju.
Savremene tehnologije	RAS, IMTA, zelena infrastruktura i kombinacije prirodnih-inženjerskih rješenja.

Osim zagađenja, očuvanje voda sve više ugrožavaju i klimatske promjene, koje mijenjaju količinu, temperaturu i kvalitet voda te zahtijevaju prilagodbu mjera zaštite. Klimatske promjene utiču na temperaturu, padavine i učestalost ekstrema (poplave/suše), mijenjaju kvalitet vode, stabilnost zajednica i rasprostranjenost vrsta (tabela 8.8).

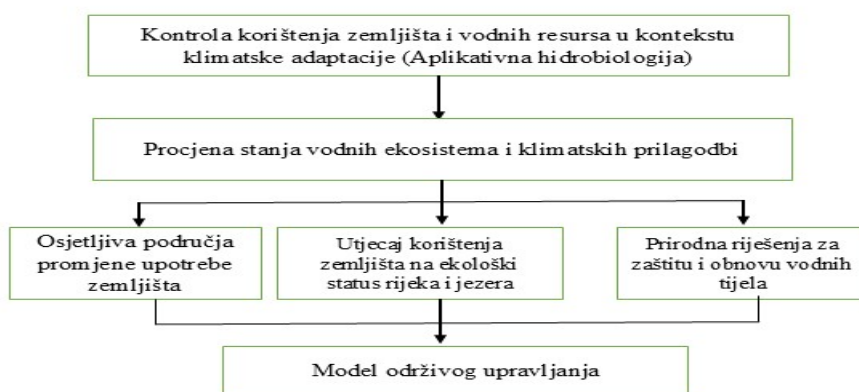
Tabela 8.8. Mjere u analizi uticaja klimatskih promjena (aplikativna hidrobiologija)

Aspekt	Opis i primjena
Temperatura vode	- Viši metabolizam, niži rastvoreni kiseonik, cvjetanje algi/eutrofikacija.
hidrološki režim	Suše i manji bazalni protok; ekstremne poplave remete staništa.
invazivne vrste	Širenje termofilnih/invazivnih vrsta, potiskivanje autohtonih.
Poremećaji fenologije	Pomjeranje razmnožavanja, migracija, cvjetanja; mismatch hrana–stadij.
Kvaliteta vode	Koncentracija zagađivača (evaporacija), veći nutrijenti i mikrobiološka opterećenja
Uloga hidrobiologa	Dugi nizovi biomonitoringa, rano upozoravanje, adaptivno upravljanje (npr. ekološki protok).
Mjere prilagodbe	Očuvanje/restauracija vlažnih staništa, retencija, E-flow, “klimatski

Kontrola obuhvata planiranje, upravljanje i regulaciju aktivnosti koje utiču na vodne ekosisteme (shema 8.4). Fokus je na zaštitnim zonama uz vodotoke (riparijska vegetacija), zabrana gradnje u plavnim zonama, agroekološke prakse sa smanjenim inputima, dugoročni monitoring kvaliteta vode i sedimenta, GIS kartiranje rizika. U ovom kontekstu, u okviru istraživanja se:

- identificiraju osjetljiva područja gdje je promjena upotrebe zemljišta (npr. deforestacija, urbanizacija) direktno povezana sa smanjenjem infiltracije i povećanjem površinskog otjecanja;
- procjenjuje uticaj korištenja zemljišta na ekološki status rijeka i jezera pomoću bioloških indikatora (makrozoobentos, perifiton, riba);
- doprinosi klimatskoj adaptaciji kroz prijedloge prirodnih rješenja (npr. restauracija vlažnih staništa, zaštita vegetacije uz vodotoke, očuvanje močvarnih područja);
- razvija modele održivog upravljanja koji povezuju režim korištenja zemljišta sa očuvanjem hidrološke ravnoteže (retencijski kapacitet, evapotranspiracija, infiltracija).

Mjere kontrole i prilagodbe obohvaćaju uvođenje zaštitnih zona uz vodotoke (riparijska vegetacija) radi stabilizacije obala i filtracije zagađivača. Zabrana ili regulacija gradnje u plavnom području, promocija poljoprivrednih praksi sa smanjenim inputima (agroekološki pristupi, zaštita od eutrofikacije). Kao posebno važna i dugoročna mjera je monitoring kvaliteta voda i sedimenta, te izrada GIS-kartiranih rizika povezanih sa klimatskim promjenama. U kontekstu klimatskih promjena, aplikativna hidrobiologija igra ključnu ulogu u povezivanju znanstvenih spoznaja o stanju vodnih ekosistema sa praktičnim mjerama upravljanja korištenjem zemljišta i voda. Integrirano planiranje i očuvanje vodnih resursa predstavlja temelj uspješne klimatske adaptacije.



Shema 8.4. Prikaz koraka u oblasti kontrole korištenja zemljišta i vodnih resursa u kontekstu klimatskih promjena

8.2. Statističke metode u hidrobiologiji

Statistika u hidrobiologiji omogućava objektivnu obradu podataka, identifikaciju obrazaca i potvrđivanje naučnih hipoteza. Primjenjuje se u analizi biodiverziteta, biomonitoringu, procjeni ekološkog statusa, populacijskoj dinamici i modeliranju ekosistema. Deskriptivna statistika

uključuje aritmetičku sredinu, medijan, varijansu, standardnu devijaciju i grafički prikaz (histogrami, box-plot, dijagram raspršenja). Inferencijalna statistika (t-test, ANOVA) koristi se za testiranje razlika između grupa, dok korelaciona i regresiona analiza ispituju odnose među varijablama (npr. kiseonik – broj EPT taksona). Multivarijantne metode (PCA, CCA, klaster analiza) omogućavaju prepoznavanje ekoloških gradijenata, grupisanje lokaliteta i vrsta te redukciju kompleksnih podataka (tabela 8.2.1). Indeksi biodiverziteta:

a) Shannon-Weaver indeks (H'):

$H' = - \sum \left(\frac{n_i}{N} \cdot \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right) \right)$ gdje H' – SW indeks, n_i – broj jedinki i -tog taksona, N – ukupan broj svih jedinki u uzorku

Tabela 8.2.1. Vrijednosti Shannon-Weaver indeksa i njihovo okvirno tumačenje

Vrijednost H'	Značenje diverziteta	Ekološka interpretacija
0–1,0	Vrlo nizak diverzitet	Ekosistem je degradiran, dominira jedna vrsta, visok stres, moguće zagađenje
1,0–2,0	Nizak diverzitet	Umjeren stres, nekoliko dominantnih vrsta
2,0–3,0	Umjeren diverzitet	Stabilna zajednica, relativno dobra ekološka kvaliteta
3,0–4,0	Visok diverzitet	Dobro strukturirana zajednica, ekosistem u dobrom stanju
>4,0	Vrlo visok diverzitet	Ekološki netaknuto ili referentno stanje, kompleksna i stabilna biocenoza

Granične vrijednosti mogu varirati zavisno od tipa staništa i organizama koji se analiziraju (npr. makrozoobentos, fitoplankton, zooplankton). Za makrozoobentos u tekućicama, vrijednosti iznad 3 često se smatraju pokazateljem dobrog ekološkog statusa (tabela 8.2.2). Prirodno siromašni habitati (npr. izvorišta) rezultiraju niskim vrijednostima H' :

- dominacija jedne vrste (npr. *Gammarus* ili *Baetis spp.*) nije nužno znak degradacije, već odraz prirodne zajednice s uskom ekološkom specijalizacijom i
- u tim uslovima može doći do niskog H' , iako je voda ekološki stabilna (nije degradirana)

Tabela 8.2.2. Značaj vrijednosti Shannon-Weaver indeksa (H') u analizi makrozoobentosa i drugih akvatičnih organizama

Prednosti	Ograničenja
Jednostavna primjena i razumijevanje	Osjetljiv na dominaciju jedne vrste, čak i u prirodnim staništima
Kombinira bogatstvo i ravnomjernost	Ne razlikuje prirodnu dominaciju od one izazvane stresom (npr. <i>Gammarus</i> vs. tolerantne vrste)
Koristan za poređenje između staništa i sezona	Ne uzima u obzir osjetljivost ili indikatorsku vrijednost vrsta

Indeks ujednačenosti (eng. *Evenness index*) opisuje kako su jedinke raspoređene među prisutnim vrstama u zajednici tj. da li je broj jedinki ravnomjerno raspoređen ili dominira jedna ili nekoliko vrsta. Pielouov indeks ujednačenosti (J') najčešće korišten formulom:

$J' = \frac{H'}{\ln S}$ gdje H' -Shannon-Weaver indeks, $\ln$ prirodni logaritam, a S - broj vrsta (taksa)

- $J'=1$: sve vrste su ravnomjerno zastupljene
- $J'=0$ dominacija jedne vrste, nema ujednačenosti

Tipično raspon: $0 < J' \leq 1$; Značaj u hidrobiologiji proizilazi iz važnosti za biološki monitoring jer otkriva dominaciju vrsta, čak i kad je bogatstvo vrsta visoko. Primjenjuje se uz Shannon-Weaver u analizama ekološkog statusa i uticaja zagađenja.

b) Simpsonov indeks (D):

- $D = \sum \frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)}$ gdje n_i = broj jedinki i -te vrste, N = ukupno broj jedinki u uzorku,

Ova verzija je originalni Simpsonov indeks iz 1949. i mjeri vjerovatnoću da dvije nasumično odabrane jedinke pripadaju istoj vrsti (tabela 8.2.3).

Tabela 8.2.3. Tumačenje vrijednosti Simpson-ovog indeksa

Vrijednost D	Značenje
Blizu 0	Visoka raznolikost (nema dominacije)
Blizu 1	Mala raznolikost (dominiraju 1–2 vrste)

c) Margalefov indeks (D_M)

Jednostavan za izračunavanje, koristan u poređenju različitih staništa. Viša vrijednost indeksa znači veće bogatstvo vrsta u zajednici. niža vrijednost ukazuje na manju raznolikost, često zbog dominacije nekoliko vrsta ili stresa u ekosistemu. Formula za izračunavanje: $D_M = \frac{S-1}{\ln N}$

gdje je: S – broj vrsta u uzorku; N – ukupan broj jedinki (suma svih jedinki svih vrsta) i $\ln$ – prirodni logaritam. Glavna ograničenja vezana su za osjetljivost na veličinu uzorka i ne uzima u obzir ujednačenost (evenness) raspodjele jedinki među vrstama (za to se koristi npr. Shannon-Weaver indeks)

d) Brillouinov indeks (H_B)

Brillouinov indeks je mjera biološke raznolikosti koja se koristi kada je zajednica potpuno poznata tj. kada je populacija cjelovito uzorkovana i sve jedinke su identificirane. To ga čini posebno pogodnim za uzorke gdje se zna ukupna populacija (npr. laboratorijske ili zatvorene populacije, ali i uzorci makrozoobentosa sa uzetih prostirki- kvantitativno uzorkovanje kolonizirajuće zajednice). Računa se formulom:

$H_B = \frac{\ln(N!) - \sum \ln(n_i!)}{N}$, gdje N – ukupan broj jedinki u uzorku; n_i broj jedinki za svaku vrstu i , $\ln$ – prirodni logaritam i $!$ – faktorijal

Više vrijednosti indiciraju veću raznolikost i ujednačenost među vrstama, a niže vrijednosti dominacija jedne vrste ili mala raznolikost. Prednosti ovog indeksa su da je više namjenjen za male i zatvorene uzorke (npr. u sedimentima, akvarijima, recirkulacijskim sistemima) i precizniji kada je populacija u potpunosti poznata. Njegova ograničenja u primjeni su da je matematički složen zbog faktoriijela, zahtijeva kompjutersku obradu i rijetko se koristi za velike prirodne ekosisteme jer se pretpostavlja potpuna determinisana zajednica. Primjena u hidrobiologiji je u uslovima kada je broj jedinki potpuno poznat i reprezentativan npr. kod uzorkovanja s podlogama (umjetnim supstratima), u eksperimentalnim bazenima, ili pri kvantitativnim uzorkovanjima makrozoobentosa.

8.3. Monitoring i procjena kvaliteta vode

Kvalitet vode procjenjuje se na osnovu fizičkih, hemijskih i bioloških parametara, a monitoring je ključan za očuvanje ekosistema i sigurnu upotrebu vode. Fizički parametri uključuju temperaturu, mutnoću, boju i provodljivost, hemijski pH, rastvoreni kiseonik, hranjive materije i metale, dok biološki obuhvataju sastav i raznolikost organizama (makrozoobentos, fitoplankton, ribe) te mikrobiološke indikatore. Za procjenu ekološkog stanja koriste se biološki indeksi definirani na nacionalnom nivou (tabela 8.3.1). Iako se većina metodologija temelji na zahtjevima Okvirne direktive o vodama (ODV) i odnosi na vodna tijela sa slivom većim od 10 km², hidrobiološki monitoring provodi se i u manjim vodotocima koji mogu imati značajan ekološki ili vodoprivredni značaj.

Tabela 8.3.1. Indeksi u biološkom monitoringu

Biološki element	Indeks/metoda	Vrsta pokazatelja
Fitoplankton	Biomasa i sastav, saprobni index	Trofičnost i saprobnost
Fitoplankton	Chlorophyll- <i>a</i>	Trofičnost
Fitoplankton	Indeks fitoplanktonske raznolikosti (H')	Raznolikost
Zooplankton	Raznolikost (Shannon-Weaver, H')	Raznolikost
Dijatomeje	Raznolikost, saprobni indeks, trofički indeks dijatomeja (TDI)	Raznol., saprob., trofičnost
Makrozoobentos	BMWP / ASPT, EBI	Organsko zagađenje
Makrozoobentos	Saprobní indeks	Saprobnost
Makrozoobentos	EPT% (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera)	Osjetljivost na zagađenje
Makrozoobentos	Funkcionalne prehrambene grupe (FFG)	Funkcionalna struktura
Makrozoobentos	IBI za makrozoobentos	Integrirani indeks
Makrofiti	Makrofitski indeks za rijeke (MIR)	Trofičnost / eutrofikacija
Makrofiti	Indeks pokrovnosti i raznolikosti	Vegetacijska struktura
Ribe	Fish-based Index (FBI)	Ekološki status riba
Ribe	Indeks ekološke netaknutosti riba (F-IBI)	Integrirani riblji indeks
Bakterije	Ukupni broj kolonija (BAS EN ISO 6222)	Mikrobiološko opterećenje
Bakterije	Koliformne bakterije / <i>E. coli</i> (ISO 9308-1)	Sanitarna ocjena kvaliteta vode

Biološki elementi kvaliteta, poput fitoplanktona i zooplanktona, zahtijevaju statističku analizu radi utvrđivanja strukture zajednica, sezonskih promjena i odnosa prema ekološkim faktorima.

8.3.1. Fitoplankton

Fitoplankton predstavlja primarne producente u akvatičnim ekosistemima i jedan je od glavnih bioloških elemenata kvaliteta vode prema ODV-u. Statistička analiza fitoplanktona obuhvata procjenu njegove biomase, brojnosti, taksonomske strukture i saprobnosti, čime se može odrediti trofički status, eutrofikacija i organsko zagađenje.

Indeksi bazirani na zajednicima fitoplanktona su kvantitativni i kvalitativni.

a) Biomasa fitoplanktona fitoplanktona izražava se kao:

- Hlorofil-a (Chl-a) [$\mu\text{g/L}$] – indirektna mjera biomasem
- Biovolumen (mm^3/L) – zbroj volumena pojedinačnih jedinki prema taksonima
- Broj ćelija po litru (ćel./L)

b) Saprobni indeks (Pantle-Buck, 1955) ili Zelenika – Marvan, 1961

Formula:

$$SI = \sum \frac{s_i \times h_i}{h_i}$$

Gdje je:

- s_i – saprobna vrijednost vrste (npr. 1 = oligosaprobna, 4 = polisaprobna); h_i – relativna zastupljenost vrste (brojnost, biomasa itd.).

Zelenika-Marvan, 1961 uvažava i indikatorsku vrijednost taksa

$$\text{Formula: } SI = \sum \frac{s_i \times g_i \times h_i}{g_i \times h_i}$$

Gdje je: s_i – saprobna vrijednost vrste (raspon 1–4), g_i – indikatorska vrijednost (važnost indikatorske vrste; npr. 1–5) i h_i – relativna zastupljenost vrste (brojnost ili biomasa). Skala za h_i – relativna zastupljenost vrste algi (tabela 8.3.1.1). Faktor h_i u saprobnim indeksima može biti izražen na dva načina: kvalitativno– procjena relativne zastupljenosti i kvantitativno na osnovu broja jedinki ili biovolumena.

Tabela 8.3.1.1. Komparativna tabela za oba pristupa (relativna abundance h) analize fitoplanktona

ocjena	Kvalitativna analiza (vizuelna procjena)	Kvantitativna analiza (broj jedinki / biovolumen ćel./L)
1	Vrlo rijetko (1–2 ćelije u preparatu)	Vrlo niska brojnost (npr. <100)
2	Rijetko (do 5% ukupne biomase)	Niska brojnost (100–500)
3	Umjereno prisutno (5–20%)	Umjerena brojnost (500–5000)
4	Dominantno (20–50%)	Visoka brojnost (5×10^3 – 5×10^4)
5	Veoma dominantno (>50%)	Vrlo visoka brojnost (> 5×10^4 L)

8.3.2. Nekton/ribe

Značaj ihtiopopulacija u aplikativnoj hidrobiologiji proizilazi iz njihove fiziologije, načina života i uloge u kruženju organske materije. Ihtiopopulacije predstavljaju ključnu komponentu vodnih ekosistema jer odražavaju kumulativne uticaje fizičko-hemijskih, morfoloških i bioloških faktora na vodena tijela. Ribe su dugovječne, mobilne i osjetljive na promjene u staništu, što ih čini izuzetno vrijednim bioindikatorima. U aplikativnoj hidrobiologiji, ihtiopopulacije se koriste za: procjenu prirodnosti i stabilnosti staništa, praćenje efekata zagađenja, eutrifikacije i hidromorfoloških promjena, evaulaciju uspješnosti restauracijskih i zaštitnih mjera i detekciju prisutnosti invazivnih i alohtonih vrsta.

Iako su *Fish-based Index* (FBI) i *Index of Biotic Integrity* (F-IBI) razvijeni u okviru EU direktiva, njihova primjena je šira i relevantna za nacionalne strategije očuvanja biodiverziteta, upravljanja ribarstvom i zaštite prirodnih resursa, neovisno o formalnoj primjeni zakonodavstva EU (tabela 8.3.2).

Tabela 8.3.2. Komparativna tabela indeksa za procjenu ihtiopopulacija

Naziv indeksa	Opis / metrike	Primjena
FBI (Fish-based Index)	• Broj autohtonih i osjetljivih vrsta • Udio tolerantnih i invazivnih vrsta • Indikatori stresa (bolesti, anomalije)	Procjena ekološkog stanja na osnovu prisutnosti ključnih grupa
F-IBI (Index of Biotic Integrity)	• Struktura zajednice (broj vrsta, osjetljive vrste) • Trofička struktura (herbivori, piscivori, insektivori) • Udio bolesnih jedinki	Kompleksan indeks za klasifikaciju vodnih tijela na osnovu stanja ihtiofaune
EFI+ (European Fish Index)	• Regionalni model baziran na tipologiji rijeka • Uzimaju se u obzir biogeografske zone i prirodni režimi	Standardizirani alat za EU države članice, dio WFD implementacije
BQI (Biological Quality Index for Fish)	• Slično FBI, sa dodatkom za riblju biometriku i životne cikluse	Fokusiran na biološke funkcije i cikluse populacija

8.3.3. Bentos

8.3.3.1. Diatomeae i makrofite

Pored saprobnog indeksa i indeksa diverziteta za analizu ili monitoring voda primjenjuje se učešće cijanobakterija i zelenih algi (tabela 8.3.3.1). Trofički indeks dijatomeja (TDI) je kvantitativni indeks koji se koristi za procjenu trofijskog statusa vodenih ekosistema (npr. rijeka, jezera) na osnovu sastava zajednice dijatomeja (Bacillariophyta). Razvijen je prvenstveno u Velikoj Britaniji (Kelly & Whitton, 1995) i koristi se u mnogim evropskim zemljama. Svaka vrsta dijatomeja ima poznatu toleranciju na eutrofikaciju (bogatstvo hranjivim tvarima, posebno azotom i fosforom). Pored ovog indeksa primjenjuje se i %Diatomea, %Cyanobacteria itd.

Tabela 8.3.3.1. Metričke grupe (Indeksi) fitobentosa i posebno dijatomeja

Indeksi/metrike	Ekološko značenje
% Diatomeja	Visoka prisutnost → stabilna, autotrofna zajednica
TDI	trofičnost
% Zelenih algi (Chlorophyta)	Rastu pri povećanom N i svjetlosti; mogu signalizirati mezotrofne uvjete
% Cijanobakterija (Cyanophyta)	Porast pri visokom P i temperaturi; pokazatelji degradacije i UV otpornosti
Biofilm biomasa (npr. mg Chl-a/cm ²)	Direktan indikator produkcije i trofije
Pokrovnost (%)	Ocjena dominacije; 50–75% cijanobakterija = alarm za eutrofikaciju

TDI je ponderirana srednja vrijednost indikacijskih vrijednosti za prisutne vrste, uvažavajući njihovu relativnu zastupljenost. Formula (pojednostavljeno, za izračunavanje TDI se koristi softver OMNIDIA sa licencom):

$TDI = \frac{\sum(A_i \cdot S_i)}{\sum A_i}$; gdje A_i – relativna zastupljenost i vrste i S_i – indikatorska vrijednost vrste i (u rasponu od 1-5 od oligotrofne do eutrofne). Vrijednosti indeksa su od 0-20 za oligotrofna do 100 hipereutrofna (tabela 8.3.3.2).

Tabela 8.3.3.2. Kategorije trofičnosti vodenih ekosistema prema TDI vrijednostima

TDI vrijednost	Trofijski status
0–20	Oligotrofno (vrlo čista voda)
21–40	Mezotrofno
41–60	Blago eutrofno
61–80	Eutrofno
81–100	Hiper-eutrofno

Napomena: TDI se koristi u kombinaciji sa biovolumenom i ostalim indikatorima za pouzdaniju procjenu.

%Cyanobacteria (cijanobakterije) Baziran na relativnoj zastupljenosti cijanobakterija (plavo-zelene alge) u ukupnoj algalnoj biomasi ili broju jedinki. Povećan %Cyanobacteria obično ukazuje na eutrofikaciju (tabela 8.3.3.3), naročito kada se pojave toksične vrste poput vrsta roda *Microcystis*, *Anabaena*.

Tabela 8.3.3.3. Vrijednost indeksa %Cyanobacteria i značenje

%Cyanobacteria	Ekološki značaj
<10%	Nizak eutrofikacijski pritisak
10–30%	Umjerena eutrofikacija
>30%	Visok nivo eutrofikacije, moguće cvjetanje

Diatomeae (Dijatomeje)

Relativna zastupljenost dijatomeja u ukupnoj biomasi algi. Visok % dijatomeja je često indikator dobrog ekološkog statusa, naročito kada dominiraju navlake (tabela 7.3.3.4) i epilitionične vrste (npr. *Achnanthes minutissimum*).

Tabela 8.3.3.4. Vrijednosti indeksa %Diatomea i značenje

%Diatomeae	Značenje
>50%	Oligotrofni do mezotrofni uslovi
30–50%	Mezotrofni uslovi
<30%	Indikacija eutrofikacije ili zagađenja

Biomasa biofilma (algal biofilm biomass)

Mjeri se kao sadržaj hlora-*a* u biofilmu (npr. $\mu\text{g Chl-a}/\text{cm}^2$) ili kao suha masa biofilma (tabela 8.3.3.5). Biofilm čini kompleks mikroorganizama (alge, bakterije, gljive) koji rastu na podlogama (kamenje, biljke). Visoka biomasa biofilma obično korelira s visokim nutrijentima i eutrofikacijom.

Tabela 8.3.3.5. Vrijednosti indeksa i tumačenje

Biomasa biofilma (Chl-a)	Trofijski status
$<5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$	Oligotrofni uslovi
$5-20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$	Mezotrofni uslovi
$>20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$	Eutrofikacija

U nastavku su osnovne grupe i tipične predstavnici makrofita koji se koriste u monitoringu voda, te odgovarajuće indekse koji se koriste za procjenu ekološkog statusa i kvalitete staništa. Sastav makrofita u monitoringu voda se obično klasificiraju u 4 funkcionalne grupe: (tabela 8.3.3.6). Prema načinu života, trofičnosti, vrsti pričvršćenosti i dubini rasta, svjetlosnim zahtjevima i toleranciji na nivo vode makrofite su prvenstveno hidrofite potpuno ili djelomično potopljene u vodi (vrste roda *Myriophyllum* npr.). Helofite kao emergentne sa korijenom u vodi i listovima iznad vode (npr, *Typha latifolia*), plutajuće biljke na površini vode, ali nisu slobodne, jer su ukorijenjene u sediment (dno), tkz.natečene. S druge strane vrste koje su plutajuće kao npr. *Lemna minor* (vodena leća), nisu korijenom vezane za sediment.

Tabela 8.3.3.6. Ekološka klasifikacija makrofita, opis i primjer

Tip makrofita	Karakteristike	Ekološki zahtjevi	Primjeri
Helofiti (močvarne vrste)	Ukorijenjeni u sediment, stabljika i listovi iznad vode	Plitka voda, visoka svjetlost, anaeroban sediment	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Carex spp.</i>
Hidroheliofiti (amfibične vrste)	Toleriraju i potopljene i izronjene uslove	Promjenjivi nivo vode, visoka morfološka plastičnost	<i>Ranunculus aquatilis</i> , <i>Alisma plantago-aquatica</i>
Potopljene hidrofite	U cijelosti pod vodom, nježni listovi	Oligotrofni do mezotrofni uslovi	<i>Ceratophyllum demersum</i> , <i>Elodea canadensis</i>
Plutajuće vrste	Slobodno plutajuće ili s plutajućim listovima, korijen u vodi ili sedimentu	Površinska zona, eutrofni uslovi (slobodne), stabilniji uslovi (natečene)	<i>Lemna minor</i> , <i>Salvinia natans</i> , <i>Nymphaea alba</i> , <i>Nuphar lutea</i>

Postoje više razvijenih indeksa u Evropi na temelju makrofita (tabela 8.3.3.7).

Tabela 8.3.3.7. Indeksi za makrofite u monitoringu voda

Indeks	Zemlja	Raspon	Šta mjeri	Primjena
MIR	Poljska	~1–10	Toleranciju vrsta na eutrofikaciju, brzinu toka i pokrovnost	Srednjoevropske rijeke, pokrovnost i prisutnost vrsta
IBMR	Francuska	1–20	Osjetljivost makrofita na zagađenje i trofiju	Najšire korišten u EU za biološki monitoring
QBR	Španija	0–100	Prirodnost riparijske vegetacije (struktura, kontinuitet)	Dopunski pokazatelj degradacije i erozije
TIM	Češka	1–10	Trofijsko opterećenje prema preferencijama i pokrovnosti	Procjena trofije iz difuznih izvora

Najadekvatniji za područje Bosne i Hercegovine i šire su dva indeksa TIM i QBR. Puni naziv *Índice de Calidad del Bosque de Ribera* (QBR – Španija) prvobitno razvijen za mediteranske rijeke, ali se uspješno primjenjuje i u srednjoevropskom kontekstu. Ne mjeri direktno akvatične makrofite, već kvalitetu riparijskog (obalnog) pojasa što je indirektni pokazatelj ekološkog integriteta vodotoka. Sastoji se od 4 kategorije, svaka sa maksimalno 25 bodova (tabela 8.3.3.8), a obuhvata pokrovnost riparijske vegetacije: koliki dio obale je prekriven prirodnom vegetacijom, struktura vegetacije - prisutnost više slojeva (travnati, grmoliki, drvenasti), prirodnost, autohtonost prisutnost autohtonih vs. invazivnih/stranih vrsta i povezanost s riječnim koritom kontinuitet vegetacije, veza s obalom, prisustvo staza, ograde itd. Vrijednost indeksa je u rasponu od 0 do 100, veća vrijednost znači prirodniju i stabilniju riparijsku zonu. TIM – *Trophic Index of Macrophytes*, razvijen u Češkoj, koristi se za ocjenu trofijskog statusa na osnovu makrofita (tabela 8.3.3.8). Specifičan za tekuće vode s različitim stupnjem eutrofikacije. TIM se računa na osnovu: pokrovnosti (%) vrsta makrofita, trofičke indikatorske vrijednosti svake vrste (1 = oligotrofna, 10 = eutrofna), izračunava se kao ponderirana sredina:

$$TIM = \frac{\sum(T_i \cdot C_i)}{\sum C_i} \quad \text{Gdje je: } T_1...T_n = \text{indikatorska vrijednost svake vrste, } C_1...C_n = \text{pokrovnost vrste.}$$

Skala: 1 – 10, TIM > 7 → visoka trofija (eutrofni uvjeti) i TIM < 4 → oligotrofni uvjeti.

Tabela 8.3.3.8. Uporedni prikaz interpretacije vrijednosti QBR i TIM indeksa

QBR indeks	TIM indeks
QBR rezultat	TIM vrijednost
75–100 – Prirodno stanje, visoka kvaliteta	1–2 – Prirodno ili gotovo prirodno stanje (nizak rizik)
50–75 – Umjereno očuvano	2–4 – Umjereno izmijenjeni morfološki elementi
25–50 – Degradirano	4–7 – Značajno degradirani segmenti toka
0–25 – Veoma degradirano (betonirane obale, erozija)	>7 – Teško degradirano, jaka regulacija, kanalizacija, potpuna modifikacija

Ova dva indeksa je najprihvatljivije koristiti u kombinaciji, zato što se dopunjuju u konačnoj ocjeni trofičnosti i prirodnosti vodenih ekosistema. QBR indeks ocjenjuje degradaciju i integritet staništa na osnovu prirodnosti i strukture obalne (riparijske) vegetacije, dok TIM indeks procjenjuje trofički status vodotoka koristeći indikatorske vrijednosti i pokrovnost akvatičnih makrofita.

8.3.3.2. Makrozoobentos

Za potreba statističke analize kvalitativno-kuantitativnog sastava uzoraka makrozoobentosa primjenjuje se funkcionalni indeksi, različiti biotički indeksi, indeksi diverziteta i saprobni indeksi.

a) Funkcionalni indeks u hidrobiologiji (makrobeskičmenjake bentosa)

Koristi se za ekološki monitoring rijeka i potoka, procjenu uticaja zagađenja i antropogenih pritisaka i dugoročno praćenje promjena u ekosistemima. Važnost ovog indeksa je povezana sa

činjenicom da taksonomski indeks (npr. BMWP) kaže ko je prisutan, a funkcionalni indeks kaže šta organizmi rade. Kombinovanjem oba pristupa dobiva se puna ekološka slika. Prednosti funkcionalnog indeksa proizilaze iz činjenice da je robustan prema taksonomskim greškama, osjetljiv na promjene u staništu i organsko opterećenje i daje ekosistemsku perspektivu (npr. energetski tokovi). Funkcionalni indeks nije dovoljan sam za klasifikaciju ekološkog statusa prema ODV, ali se koristi kao podrška i za potvrdu rezultata iz taksonomskih indeksa i praćenje dugoročnih promjena u ekosistemskim funkcijama. Jedan dio zemalja ga je uvrstio u redovni monitoring, dok se kod ostalih kao što je i BiH primjenjuje u projektima i studijama.

Jedan od najčešće korištenih je *Functional Feeding Group Index* (FFG), koji se temelji na udjelu različitih funkcionalnih grupa ishrane unutar makrozoobentosa (tabela 8.3.3.2.1).

Tabela 8.3.3.2.1. Prikaz primarnih funkcionalnih grupa (FFG) makrozoobentosa (Moog, 1996)

Skraćenica	Funkcionalna grupa	Ekološka uloga
SH	Shredderi (usitnjivači)	Razgrađuju grubu organsku materiju (lišće)
SC	Sakupljači/kolektori	Hrane se sitnom organskom materijom (FPOM)
FG	Filtratori	Filtriraju čestice iz vode
PR	Predator	Hrane se drugim beskralješnjacima
SCG	Strugači (grazeri)	Gule perifiton s podloge
OM	Omnivori	Kombinirana ishrana

Može se izraziti kao relativni udio funkcionalnih grupa: $FFGi = \frac{Ni}{Nukupno}$

gdje je: FFGi– udio funkcionalne grupe i; Ni – broj jedinki u grupi i; Nukupno– ukupni broj jedinki u uzorku.

Tumačenje npr.: visok udio usitnjivača (SH) → prirodni, šumski vodotoci, puno alohotone organske materije; povećani sakupljači (SC) → eutrofni sistemi, organsko opterećenje; dominacija predatora (PR) → stabilna i raznolika zajednica i filtratori (FG) → prisutnost suspenzije, možda polagano tekući tok. Funkcionalni indeksi daju uvid u ekosistemsku funkciju, ne samo taksonomsku raznolikost. Idealno ih je koristiti uz taksonomske indekse (BMWP, EPT, SI) za potpunu ekološku procjenu.

b) Extended Biotic Index (EBI) – prošireni biotički indeks

Extended Biotic Index (EBI) prema Ghetti (1986) je indeks koji se koristi za ocjenu kvaliteta vode na osnovu prisutnosti indikatorskih grupa makrozoobentosa. Ova metoda je kvalitativna i koristi samo podatke o prisutnosti/odsutnosti određenih taksa i njihove brojnosti. Osnovu metode čini identifikacija sedam indikatorskih grupa: Plecoptera, Ephemeroptera, Trichoptera, *Gammarus* spp., *Asellus aquaticus*, Tubificidae i Chironomidae. Svaka od ovih grupa ima određenu osjetljivost na zagađenje, a njihova prisutnost ili odsutnost određuje ukupnu EBI vrijednost na skali od 1 do 14 (tabela 8.3.3.2.2.).

Tabela 8.3.3.2.2. Interpretacije vrijednosti EBI (Ghetti, 1986) indeksa

EBI vrijednost	Ocjena kvaliteta vode	Opis
>11	Vrlo dobra	Visok broj osjetljivih grupa; oligosaprobnih uslovi
10–9	Dobra	Uglavnom prisutne osjetljive grupe; slabi pritisci
8–7	Umjereno dobra	Smanjen broj osjetljivih grupa; miješani indikatori
6–5	Umjereno loša	Dominiraju tolerantnije vrste poput <i>Gammarus</i> , <i>Asellus</i>
4–3	Loša	Pojava Tubificidae i Chironomidae u većem broju
2–1	Vrlo loša	Ekstremna dominacija tolerantnih vrsta; ozbiljno zagađenje

EBI metodologija prema Ghetti (1986) je korisna za brzu i efikasnu procjenu ekološkog statusa voda, posebno u područjima sa ograničenim taksonomskim resursima i gdje je potrebna kvalitativna analiza makrozoobentosa.

c) BMWP – Biological Monitoring Working Party score indeks

BMWP indeks je razvijen u Ujedinjenom Kraljevstvu za rijeke, zasnovan na toleranciji porodica makrozoobentosa na organsko zagađenje. Svaka porodica ima skor od 1 do 10: 10 = vrlo osjetljiva na zagađenje (npr. Heptageniidae, Perlidae, Perlodidae, Odontoceridae, Goeridae itd.) i vrijednost 1–3 = vrlo tolerantna (npr. Tubificidae, Chironomidae neke Gastropode, Hirudinea). Sabiraju se svi skorovi za prisutne porodice:

$BMWP = \sum \text{tolerantne vrijednosti porodica (8.3.3.2.3.)}$

Tabela 8.3.3.2.3. Skala interpretacije (prilagodljivo po regijama)

BMWP vrijednost	Ekološki kvalitet
>100	Vrlo dobro
71–100	Dobro
41–70	Umjereno
11–40	Loše
≤10	Veoma loše

Prednosti su u jednostavanosti za primjenu. Robustna metoda i u regijama sa slabom taksonomskom pokrivenošću.

ASPT – Average Score Per Taxon

- ASPT se koristi zajedno s BMWP, kao prosjeka biotičkih vrijednosti taksa, bez uticaja brojnosti. Formula: $ASPT = \frac{\text{vrijednost BMWP}}{\text{broj porodica}}$. Viši ASPT ukazuje na dominaciju osjetljivih vrsta. Nezavisan je od brojnosti, pa pomaže u tumačenju kada BMWP bude nizak uslijed niskog bogatstva, ali prisutne vrste su kvalitetne (8.3.3.2.4.).

Tabela 8.3.3.2.4. Vrijednosti ASPT indeksa i značenje

ASPT vrijednost	Ocjena
>6	Čista voda
5–6	Dobra voda
4–5	Umjerena
<4	Zagađena voda

Saprobni i biotički indeksi – razlike u pristupu i značenju

U procjeni biološkog kvaliteta površinskih voda razvijen je niz indeksa koji se razlikuju po obuhvatu i interpretaciji ekoloških informacija. Saprobni indeksi imaju uže značenje, jer se odnose na stepen organskog zagađenja i količinu organske materije podložne razgradnji u vodi. Oni se zasnivaju na prisustvu karakterističnih vrsta (taksa) koje su poznate po svojoj saprobnoj toleranciji. Razvoj ovog indeksa tekao je postupno od 1902 godine (tabela 8.3.3.2.5). Ovi se indeksi temelje na saprobnim vrijednostima pojedinih vrsta i njihovoj brojnosti u uzorku, a primarno služe za interpretaciju stepena saprobnosti vodenog ekosistema, odnosno razvrstavanje u polisaprobnno, mezosaprobnno ili oligosaprobnno područje.

Tabela 8.3.3.2.5. Historijat razvoja saprobnog indeksa

Autor / godina	Naziv ili sistem	Princip / formula	Značaj i primjena
Kolkwitz & Marsson (1902–1909)	Saprobni sistem zona	Kvalitativni opis prema prisutnosti indikatorskih vrsta (polisaprobnna, mezosaprobnna, oligosaprobnna zona)	Prva biološka klasifikacija voda prema organskom zagađenju; osnova modernih indeksa.
Liebmann (1951–1962)	Numerički saprobni indeks	$SI = \Sigma(S \times G) / \Sigma G$	Uveo saprobnne vrijednosti (S) i indikatorske težine (G); omogućio kvantifikaciju zagađenja.
Pantle & Buck (1955)	Pantle–Buck indeks	$S = \Sigma(h_i \times s_i) / \Sigma h_i$	Pojednostavljeni numerički sistem; široko korišten u praksi (Njemačka, Austrija).
Zelinka & Marvan (1961)	Modifikovani saprobni indeks	$SI = \Sigma(s_i \times g_i \times h_i) / \Sigma(g_i \times h_i)$	Kombinira saprobnu vrijednost, težinu i učestalost; osnov PERLODES i mnogih nacionalnih standarda.
Sládeček (1960–1973)	Standardizacija i sinteza	Objedinio grupe organizama (bakterije, alge, makrofite, beskičmenjake,)	Razvio globalni sistem (>1500 vrsta); osnov za međunarodnu primjenu.
Wegl (1983)	Njemačka modifikacija (Weglov indeks)	Modifikacija saprobnih vrijednosti prema	Prilagodio saprobnne vrijednosti i skalu (1–4) za vrste makrozoobentosa u

		hidromorfološkom tipu voda	kontekstu tipologije i ekoloških pritisaka.
Moog (1995, 2002)	Austrian Fauna Aquatica – faunistički pristup	Indeks integrira saprobni i trofički uticaj kroz funkcionalne grupe	Uveo kombinaciju saprobnih vrijednosti i biotičkih indeksa; korišten u austrijskom monitoringu (AT-WFD).
Nacionalne adaptacije (2000–danas)	Primjena u okviru ODV-a	Prilagođavanje saprobnih vrijednosti lokalnim zajednicama	Zemlje članice EU i tranzicijske zemlje razvijaju nacionalne liste saprobnih vrijednosti i tip-specifične indekse;.

Biotički indeksi, nasuprot tome, imaju šire ekološko tumačenje i primjenu. Oni obuhvataju ne samo organsko zagađenje, već i trofičnost, eutrofikaciju, hidromorfološke promjene i druge antropogene uticaje. Procjena se zasniva na kombinaciji osjetljivosti i diverziteta biocenoze, a ne isključivo na saprobnim vrijednostima. Tipični predstavnici su: Extended Biotic Index (EBI) Ghetti (1986) ili prošireni biotički indeks (PBI), BMWP (Biological Monitoring Working Party), ASPT (Average Score Per Taxon), IBMWP, BBI, IBE, STAR_ICMi, i dr.

Biotički indeksi stoga omogućavaju cjelovitiju ekološku interpretaciju i često se koriste u okviru ekološke procjene voda prema zahtjevima ODV.

Saprobni indeks ima najveću preciznost u kvantitativnoj procjeni stepena organskog zagađenja i predstavlja osnovni biološki pokazatelj stvarnog ekološkog stanja vodenog tijela. Zasnovan je na tačno definisanim saprobnim vrijednostima za pojedine vrste (taksonomske jedinice), koje odražavaju njihovu osjetljivost prema organskom opterećenju i prisustvu raspadljivih materija. Zbog toga ovaj indeks omogućava direktnu numeričku interpretaciju nivoa saprobnosti (oligo-, β -mezo-, α -mezo-, polisaprobnog područje) i s njim povezanog kvaliteta vode. Za razliku od toga, biotički indeksi imaju šire, ali manje precizno značenje, oni ne daju neposrednu vrijednost saprobnosti, već ukazuju na opći ekološki status ekosistema i trendove u promjenama biocenoze. Oni služe kao suportni alat (dopuna) pri biološkoj interpretaciji rezultata, zajedno s indeksima diverziteta i drugim strukturnim pokazateljima (npr. odnos osjetljivih i tolerantnih taksa, prisustvo EPT grupa i sl.). Drugim riječima, saprobni indeks samostalno može precizno odrediti stepen organskog zagađenja i kvalitet vode, dok su biotički i indeksi biodiverziteta, pomoćni parametri koji dopunjuju i potvrđuju biološku procjenu.

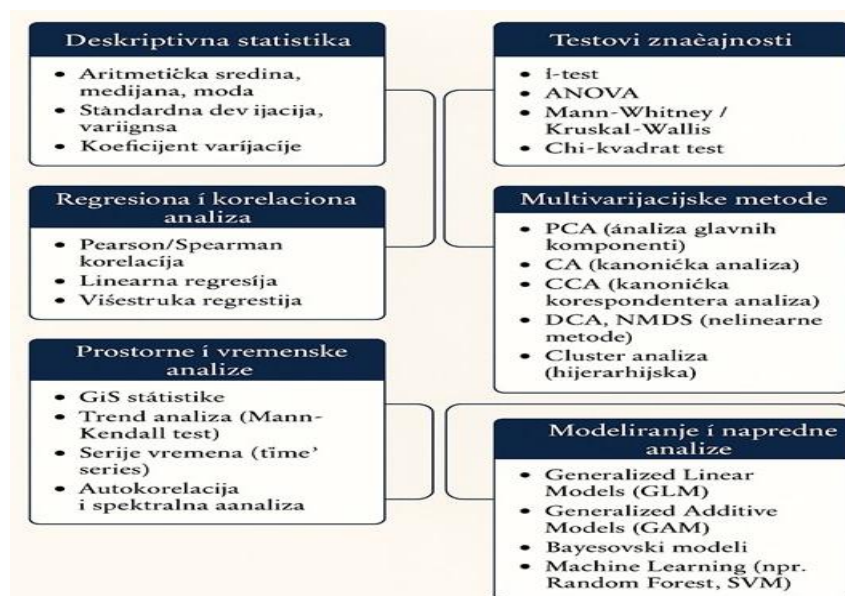
8.3.4. Monitoring i statističke metode u istraživanju jezera i mora

Statističke metode u limnološkim i oceanološkim istraživanjima omogućavaju analizu velikih kompleksa podataka, identifikaciju obrazaca i modeliranje odnosa između biotskih i abiotskih faktora. Dokument obuhvata osnovne i napredne statističke metode koje se primjenjuju u analizi podataka iz jezera i mora, kako bi se razumjela struktura, funkcija i promjene vodenih ekosistema (shema 8.3.4.1). Biološki monitoring morskih ekosistema i okeana predstavlja

složen i integrisan proces kojim se procjenjuje stanje morskog okruženja, njegove biološke zajednice i promjene koje nastaju pod uticajem prirodnih faktora i čovjeka. Posebno je značajno definisati referentno (prirodno) stanje ekosistema, tj. stanje mora koje nije narušeno antropogenim uticajima. Praćenje odstupanja od ovog stanja omogućava procjenu ekološkog statusa i identifikaciju pritisaka kao što su zagađenje, eutrofikacija, klimatske promjene i invazivne vrste. U biološkom monitoringu mora ključnu ulogu imaju bioindikatorske grupe organizama. Fitoplankton (posebno dijatomeje i dinoflagelate) koji reaguje na povećanje hranjivih soli i omogućava rano otkrivanje eutrofikacije, često vidljive kroz "cvjetanje mora". Mjerenje hlorofila *a* koristi se kao indirektan pokazatelj primarne produkcije i eutrofikacije.

Zooplankton odražava promjene temperature, saliniteta i klimatskih uslova u vodenom stubu. Makroalge i morske cvjetnice, poput vrste *Posidonia oceanica*, važne su za dugoročno praćenje kvaliteta mora jer su osjetljive na zamućenje, eutrofikaciju i mehanička oštećenja. Makrozoobentos (spužve, polihete, školjkaši, bodljikaši) pokazuje stanje morskog dna i uticaj organskih materija, ribolova, sedimentacije ili fizičkog narušavanja staništa. Ribe i veliki predatori, poput tuna, delfina ili ajkula, odražavaju stanje trofičkih mreža i ukupnu funkcionalnost ekosistema. Posebnu pažnju zahtijevaju invazivne (alohtone) vrste koje u more dolaze balastnim vodama, akvakulturom ili prirodnom migracijom (npr. lezsepsijske vrste koje ulaze kroz Sueski kanal), jer mogu narušiti autohtone zajednice. Posebnu važnost u savremenom monitoringu imaju klimatske promjene. Povećanje temperature mora uzrokuje pomjeranje areala vrsta prema sjevernijim ili dubljim područjima, izbjeljivanje koralnih grebena, promjene migracijskih puteva riba i pojavu novih patogena. Acidifikacija, uzrokovana povećanom koncentracijom CO₂ u atmosferi, negativno utiče na stvaranje vapnenačkih skeleta kod školjki, puževa i koralala. Uz to, ljudske aktivnosti poput prekomjernog ribolova, zagađenja iz kopnenih izvora, plastičnog otpada, turizma i izgradnje priobalne infrastrukture mogu dodatno degradirati morska staništa.

Biomonitoring stajaćica, posebno jezera, fokusira se na praćenje bioloških zajednica (fitoplankton, zooplankton, makrofite, makrozoobentos), hemijskih parametara (nutrijenti, fosfor, azot, klorofil *a*) i fizičkih karakteristika kao što su temperatura, prozirnost, rastvoreni kiseonik i termička stratifikacija (epilimnij, metalimnij, hipolimnij). Jezera su zatvoreni sistemi pa snažno zavise od kopnenog sliva i imaju veći rizik od eutrofikacije, anoksije i naglih promjena. Za razliku od jezera, more je otvoren, dinamičan sistem s velikim volumenom, salinitetom i stalnom cirkulacijom voda. Posebno značajne statističke metode za jezera su vertikalna i sezonska analiza (ANOVA između slojeva/doba), trofički status i eutrofikacija (P-Chl *a* regresije, TSI, korelacije). Multivarijantne metode za zajednice (PCA, CCA, NMDS). trendovi u kvalitetu vode kroz godine (Mann-Kendall) i veza sliva–jezero (nutrijenti, sedimenti, → regresija, CCA).



Shema 8.3.4.1. Statističke metode u analizi stajaćih ekosistema i mora

Za potrebe hidroekoloških analiza bazirane na biološkim komponentama (parametrima) stajaćica, mora i okeana se primjenjuju kombinacije saprobnosti, trofije, u cilju određivanja ekološkog statusa i kvaliteta (tabela 8.3.4.1).

Tabela 8.3.4.1. Ekološki indeksi i metričke analize

Metoda	Primjena
Indeksi diverziteta (Shannon-Weaver, Simpson)	Opis strukture zajednica (planktona, nektona, bentosa)
Indeks ujednačenosti	Distribucija među vrstama
TDI, BMWP, ASPT, EBI	Ocjena ekološkog statusa voda
TSI (Trophic Status Index)	Trofički status jezera
F-IBI (Fish-based index)	Indeks integriteta ihtiopopulacija

Statistički alati omogućavaju objektivnu analizu kompleksnih podataka, procjenu uticaja okolišnih faktora, klasifikaciju i tipizaciju jezera i morskih staništa i identifikaciju trendova i promjena u ekosistemima

8.4. Zarazne bolesti i voda

Voda predstavlja jedan od ključnih medija za prenošenje različitih zaraznih bolesti, ne samo putem pitke vode, nego i kroz rekreacijske vode, površinske i podzemne vodotoke, te akvatične ekosisteme opterećene antropogenim uticajima. Patogeni mikroorganizmi (bakterije, virusi, protozoe i helminti) mogu dospjeti u vodeni okoliš kroz fekalno zagađenje, otpadne vode, poljoprivredu, poplavne događaje ili direktnim unosom iz životnih i industrijskih aktivnosti.

Njihov opstanak i širenje zavise od ekoloških uvjeta poput temperature, nutritivnog statusa vode, prisustva suspendiranih materija i interakcija sa drugim hidrobiontima. Zbog toga je veza između vode i zaraznih bolesti multidimenzionalna: obuhvata kvalitet pitke vode, sigurnost voda za kupanje, utjecaj klimatskih promjena na pojavu patogena, ulogu vodnih ekosistema u održavanju ili razgradnji mikrobioloških kontaminanata, te rizike koji proizlaze iz degradiranih

ili eutrofnih vodnih tijela. Razumijevanje ovih procesa predstavlja osnovu za preventivne mjere, nadzor i održivo upravljanje vodnim resursima u cilju zaštite javnog zdravlja.

Kontaminirana pitka voda predstavlja značajan javnozdravstveni rizik jer može biti vektor za prenos različitih bakterijskih, virusnih i parazitaranih patogena. Prisustvo fekalnih indikatora, nedovoljna dezinfekcija, infiltracija otpadnih voda, loša sanitarna infrastruktura i povremene hidrološke ekstreme (poplave, bujice) doprinose unošenju i preživljavanju uzročnika infekcija u vodenom sistemu.

osljedica su brojne vodom prenosive bolesti, koje se manifestuju gastroenteritisima, hepatitisima, febrilnim stanjima i sistemskim infekcijama, te mogu izazvati ozbiljne epidemije u slučajevima masovne kontaminacije. Tabela u nastavku (tabela 8.4.1) prikazuje najznačajnije zarazne bolesti povezane s neadekvatnim kvalitetom pitke vode, uzročnike tih oboljenja, te metode njihove detekcije koje predstavljaju ključne alate u aplikativnoj hidrobiologiji.

Tabela 8.4.1. Zarazne bolesti povezane s neadekvatnom kvalitetom pitke vode i načini detekcije u aplikativnoj hidrobiologiji

Uzročnik	Bolest	Put prenosa	Način detekcije u vodi
<i>Vibrio cholerae</i>	Kolera	Fekalno–oralno	Kulture na selektivnim podlogama (TCBS), PCR, imunološki testovi
<i>Shigella spp.</i>	Bacilarna dizenterija	Fekalno–oralno	Kulture, biokemijska identifikacija, PCR
Patogeni sojevi <i>Escherichia coli</i> (EHEC, ETEC)	Enteritisi, HUS	Fekalno–oralno	Membranska filtracija, E. coli/Coliform testovi, PCR za toksine
<i>Salmonella typhi/paratyphi</i>	Tifus, paratifus	Fekalno–oralno	Selektivne podloge (XLD, SS agar), PCR, imunoeseji
<i>Giardia duodenalis</i>	Giardijaza	Fekalno–oralno	Koncentracija + imunofluorescencija, ELISA, PCR
<i>Cryptosporidium parvum/hominis</i>	Kriptosporidioza	Fekalno–oralno	Filtracija + epifluorescencija, imunološke metode, PCR
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebijaza	Fekalno–oralno	Mikroskopija trofozoita/cista, PCR
Hepatitis A virus	Hepatitis A	Fekalno–oralno	RT-PCR, detekcija virusnih markera u vodi
Hepatitis E virus	Hepatitis E	Fekalno–oralno	RT-PCR (visoka osjetljivost), koncentracija virusnih čestica
Enterovirusi (polio, coxsackie, echo)	Enterovirusne infekcije	Fekalno–oralno	RT-PCR, kultura na ćelijskim linijama
Norovirus	Akutni gastroenteritis	Fekalno–oralno	RT-PCR (najčešće), imunohromatografski testovi
<i>Campylobacter jejuni</i>	Kampilobakterioza	Fekalno–oralno	Selektivne mikroaerofilne kulture, PCR

<i>Leptospira interrogans</i>	Leptospiroza	Kontakt s kontaminiranom vodom	PCR, serologija (MAT), tamnopoljna mikroskopija
<i>Legionella pneumophila</i>	Legioneloza	Aerosoli iz toplih vodenih sistema	Kulture na BCYE agarima, PCR, antigenski testovi

Procjena sigurnosti pitke vode zahtijeva mikrobiološke testove, posebno na indikator prisustva fekalne kontaminacije (npr. ukupni koliformi, *E. coli*). Standardi WHO i lokalnih regulatornih tijela definišu prihvatljive koncentracije. Mikrobiološka analiza podrazumjeva kontinuiranu i stalnu kontrolu bakterija, *Escherichia coli*, *enterokoke*, ukupni koliformi, spore *Clostridium perfringens* (tabela 8.4.2).

Tabela 8.4.2. Mikrobiološki elementi analize u pitkoj vodi

Mikroorganizam	Granična vrijednost
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	0 CFU/100 ml
Enterokoki	0 CFU/100 ml
Ukupne koliformne bakterije	0 CFU/100 ml
<i>Clostridium perfringens</i> (spore)	0 CFU/100 ml
Broj aerobnih mezofilnih bakterija (22 °C i 37 °C)	indikativno

Biološki pokazatelji (u sirovoj vodi i posebnim slučajevima) koji se još analiziraju uključuju prisustvo fitoplanktona, cijanobakterija (npr. *Microcystis spp.*), prisustvo parazita (*Giardia*, *Cryptosporidium*) i biološki testovi toksičnosti (npr. sa *Daphnia magna*). Statistička analiza omogućava povezivanje koncentracije mikrobioloških zagađivača u vodi s pojavom bolesti u populaciji. Analizom podataka (npr. CFU/100 mL, broj oboljelih, temperatura, padavine) identificiraju se sezonski obrasci, korelacije i trendovi koji ukazuju na povećan rizik od zaraznih bolesti. Na primjer, povećane koncentracije *Escherichia coli* ili prisustvo protozoa kao što su *Giardia* i *Cryptosporidium* u površinskim vodama nakon obilnih padavina statistički se podudaraju s porastom *gastroenteritisa*, *hepatitisa A* ili proliva u lokalnom stanovništvu. U takvim analizama koriste se deskriptivna statistika, log-transformacija, korelacijska analiza (*Pearson*, *Spearman*), ANOVA za sezonske razlike te regresijski modeli za predviđanje rizika. Ovakav pristup čini vezu između hidrobiologije, javnog zdravlja i upravljanja vodnim resursima. Propisi koji regulišu kontrolu pitke vode su sadržani u odredbama Svjetske zdravstvene organizacije (WHO: Guidelines for Drinking-Water Quality), EU Directive (EU) 2020/2184 i nacionalni zakoni BiH Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće (Službeni glasnik FBiH/RS/BD). Pored bioloških parametara analize uključuju fizičke-hemijske parametre, radiokativne elemente:

Fizički parametri - Temperatura - Boja - Miris - Ukus - Zamućenost (NTU) - Provodljivost ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Hemijski parametri - pH - Otopljeni kisik - Nitrati, nitriti, amonijak - Hloridi, sulfati - Ukupna tvrdoća (Ca^{2+} , Mg^{2+}) - Teški metali (Pb, Hg, Cd, As) - Organska jedinjenja (pesticidi, PAH) - Reziidualni hlor
---	---

8.5. Mjerenje organske produkcije u vodenim ekosistemima

Saprobni indeksi klasificiraju organizme prema njihovoj osjetljivosti na zagađenje, omogućavajući ocjenu saprobnog statusa vode. EBI (Extended Biotic Index) i BMWP (Biological Monitoring Working Party) koriste se za procjenu kvaliteta na osnovu prisutnosti osjetljivih grupa makroinvertebrata. Ovi indeksi kvantificiraju ekološko stanje i olakšavaju donošenje upravljačkih odluka. Za vode je od velikog značaja procjena produkcije/produktivnosti u obliku primarne i sekundarne produkcije. Mjerenje primarne produkcije u vodenim ekosistemima je ključno za razumijevanje energetskeg protoka, produktivnosti i ekološkog statusa voda. Primarna produkcija podrazumijeva proces fotosinteze, kojim autotrofni organizmi (prvenstveno fitoplankton, makrofiti i bentoske alge) pretvaraju svjetlosnu energiju u hemijsku energiju (organsku tvar). Može se mjeriti kao:

- Bruto primarna produkcija (GPP): ukupna fotosintetska produkcija i
- Neto primarna produkcija (NPP): GPP umanjena za respiraciju biljaka

Metode podržavaju direktno mjerenje biomase (npr. suha težina), mjerenje koncentracije hlorofila-*a*, praćenje izmjene CO_2 ili O_2 u zatvorenim sistemima i modeli bazirani na svjetlosti, temperaturi i hranjivim tvarima. Jedinice primarne produkcije su volumetrijski: kao $\text{mg C}/\text{m}^3/\text{h}$, površinski kao $\text{g C}/\text{m}^2/\text{dan}$ ili $\text{g O}_2/\text{m}^2/\text{dan}$. Za poređenje ekosistema koristi se i integrirana dnevna ili sezonska produkcija. Neto primarna produkcija $\text{NPP}=\text{GPP}-\text{R}$, predstavlja razliku bruto primarne produkcije i respiracije producenata. Mjerenje primarne produkcije u vodi omogućava procjenu trofičkog statusa, praćenje eutrofikacije, razumijevanje karbonskog ciklusa, upravljanje ribolovom i akvakulturom i praćenje klimatskih promjena na produktivne procese. Sekundarna produkcija odnosi se na generisanje biomase heterotrofnih organizama koji konzumiraju primarne proizvođače. Sekundarna produkcija predstavlja količinu biomase koju proizvode heterotrofni organizmi (npr. makrozoobentos, zooplankton) u jedinici vremena. Ona je ključna za razumijevanje prenosa energije kroz ekosistem i evaluaciju ekološkog statusa voda. Postoji više metoda mjerenja sekundarne produkcije u kavičnim ekosistemima (tabela 8.5.1).

Tabela 8.5.1. Metode mjerenja sekundarne produkcije, princip, prednosti i ograničenja

Metoda	Princip	Prednosti	Ograničenja
Increment-summation metoda	Sumiranje prirasta mase kroz vremenske intervale ($P = \sum (N_t \times \Delta W_t)$) N_t -br.jedinki u interval; ΔW_t -promjena prosj.mase jedinke	Precizna, pogodno za vrste s jasnim razvojnim stadijima	Zahtijeva višekratno uzorkovanje i pretpostavlja nisku smrtnost
Kohortna metoda	Praćenje biomase jedne generacije i računanje uz mortalitet ($P = \bar{B} \times (1 + Z)$) $\bar{B}$ prosječna biomasa kohorte, a Z mortalitetni koeficijent.	Precizna kod populacija s jednom generacijom	Neprimjenjiva kod preklapajućih generacija
Size-frequency metoda	Korištenje klasa veličina kao zamjene za starost i proračun dinamike mase	Ne zahtijeva poznavanje dobi	Može biti nepouzdana kod neregularnog rasta
P/B metoda	Upotreba empirijskog odnosa produkcije i biomase	Jednostavna i brza	Gruba aproksimacija, bez sezonske dinamike
Energetska bilanca	Računanje energetskeg unosa i gubitaka ($C = P + R + U + F$) C – unos hrane; P – produkcija; R – respiracija, U – urin i F – feces	Sveobuhvatna metoda	Složena i zahtijeva puno podataka

Izbor metode zavisi od ciljeva istraživanja, ciljne grupe organizama i dostupnih resursa. Sekundarna produkcija je važan parametar za biološki monitoring i ekološko modeliranje (tabela 8.5.2).

Tabela 8.5.2. Primjena metoda procjene sekundarne produkcije po grupama organizama

Grupa organizama	Tipična metoda	Napomena
Makrozoobentos	Prirast ili veličinsko-frekvencijska metoda	Moguće koristiti P/B omjer iz literature
Zooplankton	P/B odnos, produktivnost hlorofila	Brze generacije, visoka sezonska varijabilnost
Zoobentos (Chironomidae)	Kohortna metoda	Jasne generacije, kratki životni ciklusi
Ribe	Kohortna + energetska metoda	Rijetko u makroskali zbog migracija i mortaliteta

*Kohorta je skup jedinki iste vrste (takse) koje pripadaju istom vremenu rođenja ili razvojnog ciklusu.

Za procjenu ekološke energetike u okviru sekundarne produkcije, često se koristi formula:

$P_2 = C \cdot AE \cdot NP$ gdje su: P_2 – sekundarna produkcija, odnosno stvarna količina organske materije (rast biomase) producirana u određenom vremenu. Najčešće se izražava u $mg/m^2/dan$ ili $g/m^2/god$, C – ukupan unos hrane predstavlja količinu konzumirane hrane u jedinici površine i vremena, u $mg hrane/m^2/dan$, AE – apsorpcijska efikasnost, označava koji dio unesene hrane organizam zaista apsorbira iz probavnog trakta. Prikazuje se u bezdimenzionalnom obliku (npr. $0,6 = 60\%$) i NP – neto produkcijska efikasnost, udio apsorbirane energije koji se ne potroši na održavanje i respiraciju, već se ugrađuje u novu biomasu. Također je bezdimenzionalna (npr. $0,4 = 40\%$).

Ova formula omogućava kvantificiranje energetskeg toka od konzumacije hrane do realne produkcije biomase, što je ključno za razumijevanje trofičke dinamike, procjene efikasnosti

prenosa energije kroz trofičke nivoe i evaluaciju produktivnosti populacija u slatkovodnim i morskim ekosistemima. U hidrobiologiji se posebno koristi pri analizi rasta bentosnih organizama, zooplanktona i riba, kao i pri procjenama energetskeg učinka u različitim ekološkim uslovima (npr. temperature, dostupnosti hrane, kvaliteta hrane).

Sekundarna produkcija se koristi kao pokazatelj kvaliteta hrane iz primarne produkcije, stabilnosti i biodiverziteta bentoske zajednice, produktivnosti vodenih ekosistema i procjeni uticaja eutrofikacije i zagađenja. Ovi podaci su ključni za modeliranje energetskih tokova i funkcionalne povezanosti u ekosistemima. Kao multidisciplinarna oblast, aplikativna hidrobiologija spaja ekologiju, toksikologiju, molekularnu biologiju, statistiku i politiku upravljanja resursima, doprinoseći integriranom pristupu očuvanju voda i prilagodbi globalnim izazovima.

8.6. Biološki indeksi u okviru EU Okvirne direktive o vodama: primjena i interpretacija

Ova direktiva postavlja integrirani okvir za očuvanje i poboljšanje kvaliteta svih voda u EU. Ključni ciljevi su postizanje dobrog ekološkog i hemijskog statusa, definiranje tipologije voda, monitoring i javno sudjelovanje u upravljanju slivovima. Klasifikacija se temelji na fizikalnim (pristup A) i ekološkim (pristup B) karakteristikama, uz upotrebu ekoregija kao referentnih jedinica. Ekološki status odražava koliko se trenutno stanje, odnosno funkcije i strukture, vodnog tijela razlikuje od prirodnog, referentnog stanja. Ekološki status podrazumijeva ukupnu funkcionalnost ekosistema, uključujući njegovu otpornost i sposobnost oporavka. Ekološki potencijal se koristi za umjetna i znatno izmijenjena vodna tijela i predstavlja njihovu moguću maksimalnu ekološku vrijednost. U ODV ne ocjenjuje se samo kvalitet vode, nego ukupno ekološko stanje vodnog tijela, pri čemu je kvalitet vode samo jedan od elemenata procjene. ODV uvodi koncept ekološkog statusa / stanja, koji je mnogo širi od same "kvalitete vode". Procjena uključuje biološke elemente, hidromorfološke, fizičko-hemijske, prioritetne supstance/hemijski status (tabela 8.6.1). Kvalitet vode (fizičko-hemijski parametri) je samo jedan dio ovog sistema i predstavlja uz hidromorfološke elemente podršku biološkim elementima.

Tabela 8.6.1. Elementi koji su uključeni u ocjeni ekološkog statusa/potencija prema ODV-u

Element procjene	Šta obuhvata
Biološki kvalitetni elementi	Ribe, makrozoobentos, fitobentos (dijatomeje), makrofite, fitoplankton.
Hidromorfološki elementi	Prirodnost toka rijeke, struktura obala i korita, protok, povezanost s obalama i poplavnim područjem.
Fizičko-hemijski elementi (kvalitet vode)	Temperatura, pH, kiseonik, nutrijenti (N, P), suspendovane materije, salinitet...
Specifični zagađivači	Teški metali, pesticidi, organski mikropolutanti.
Hemijski status (posebno)	Usklađenost sa standardima za prioritetne supstance (kadmij, živa, PAH, pesticidi itd.).

ODV daje najveću težinu biološkim elementima jer oni odražavaju dugoročno stanje ekosistema. Uključena je biocenoza akvatičnih ekosistema sa planktonom, nektonom i

bentosom (tabela 8.6.2). Fitobentos obuhvata dijatomeje → mikroalge koje žive pričvršćene na podlogu; ključne za procjenu saprobiteta i eutrofikacije. Makrofite predstavljaju strukturni element ekosistema, utiču na brzinu toka, produkciju kiseonika, stanište organizama bentosa (posebno bakterija) i riba, te su ključne za procjenu eutrofikacije i hidromorfoloških promjena. Sve veće vodene biljke (bez obzira na sistematsku pripadnost, mahovine ili cvjetnice) i makroskopske alge ulaze u skupinu makrofita. Većina zemalja EU je prihvatila ovakav pristup, a BiH kao država u procesu pristupanja EU, takođe se opredjelila na ovakav pristup u biomonitoringu.

Tabela 8.6.2. Biološki elementi prema ODV-u u ocjeni ekološkog statusa

Ekosistem	Biološki elementi
Rijeke	Makrozoobentos, ribe, fitobentos (dijatomeje, analiziraju se zasebno), makrofite = sve alge i vodene biljke vidljive golim okom, uključujući: vaskularne biljke (npr. <i>Potamogeton</i> , <i>Ranunculus</i>); briofite (npr. <i>Fontinalis</i> , <i>Fissidens</i>) i makroskopske alge (>0,5 mm npr. <i>Cladophora</i> , <i>Chara</i>). Fitoplankton samo u velikim rijekama gdje uvjeti dozvoljavaju razvoj zajednice.
Jezera	Fitoplankton, makrofite (u širem smislu kao i rijeke), zooplankton, makrozoobentos, fitobentos, ribe.
Prijelazne/obalne vode	Fitoplankton, bentos, ribe.

Biološki indeksi su statističke vrijednosti izvedene iz prisutnosti, brojnosti i osjetljivosti organizama. Oni pretvaraju biološke podatke u kvantitativne pokazatelje, što omogućava, poređenje među lokalitetima, klasifikaciju u ekološki status i statističku obradu (ASTERICS – makrozoobentos, OMNIDIA - fitobentos; ANOVA, PCA, CCA, korelacije itd.). Time biološki indeks postaje statistički alat, jer transformiše biološke podatke u broj koji se može analizirati, porediti, klasificirati.

Prema tipologiji se izdvajaju vodna tijela, osnovne prostorne jedinice definirane kao jasno odvojeni i homogeni dijelovi površinskih ili podzemnih voda, a za svaki tip vode određuju se odgovarajuće biološke metrike i indeksi koji se koriste za ocjenu ekološkog stanja. Evropska komisija traži da primijenjene metode ispune tri osnovna kriterija: da se dobivene vrijednosti indeksa u pojedinom tipu mogu porediti s referentnim uvjetima, da budu zasnovane na principu „one-out-all-out“ (najlošiji element određuje ekološki status), te da omogućavaju međudržavnu uporedivost kroz proces interkalibracije. ODV označava prelazak s tradicionalne kontrole „kvaliteta vode“ na širi koncept ekološkog integriteta vodnog ekosistema, što zahtijeva interdisciplinarni pristup u kojem hidrobiologija ima centralnu ulogu. Hidrobiologija, kroz primjenu bioloških indikatora i ekoloških indeksa, operacionalizira ovaj koncept jer omogućava tumačenje strukture i funkcije živih zajednica u odnosu na ekološke pritiske. U tom smislu, biološki indeksi predstavljaju ključni alat hidrobiološke prakse, povezujući ekološka načela uz korištenje statističkih metoda u procjeni ekološkog stanja.

8.6.1. Hidromorfologija

Hidromorfologija proučava fizičku strukturu, dinamiku voda i oblikovanje riječnih/jezerskih korita, ne samo kao "inženjerski aspekt", nego kao osnovu za razumijevanje bioloških zajednica. U okviru ODV hidromorfologija je dio ekološkog statusa i direktno je povezana s biološkim elementima kvaliteta (ribe, makrofiti, makrozoobentos, fitobentos). Tri su razloga zašto je hidromorfologija dio aplikativne hidrobiologije:

- a. hidromorfološki uslovi direktno određuju životne stanišne mogućnosti hidrobionata. parametri poput širine i dubine korita, brzine tečenja, heterogenosti supstrata i povezanosti s priobaljem oblikuju raspodjelu, raznovrsnost i produktivnost akvatičnih zajednica (makrozoobentos, ribe, makrofite),
- b. hidromorfološke promjene odražavaju i kvantificiraju antropogene pritiske, regulacija korita, izgradnja brana, vađenje šljunka, modifikacije obala i fragmentacija tokova mijenjaju prirodnu dinamiku voda, što utiče na ekološki status i zahtijeva hidrobiološku interpretaciju i
- c. hidromorfologija je ključna za integrisanu procjenu ekološkog stanja prema ODV-u, praćenje hidromorfoloških parametara omogućava povezivanje abiotičkih uslova s biološkim elementima kvaliteta, čime se povećava tačnost ekološke procjene i omogućava planiranje mjera restauracije.

Okvirna direktiva o vodama (2000/60/EC) u prilogu V definira hidromorfološke elemente kao dio ekološkog statusa (ali kao „pomoćni/podupirući elementi kvaliteta“ za biološke elemente). Biološki monitoring uvijek uključuje morfološki opis staništa. Priručnici za restauraciju rijeka (CEN, ISO, EU River Restoration Framework) hidromorfologiju tretiraju kao dio ekološkog, ne isključivo inženjerskog pristupa. U naučnim radovima i udžbenicima se navodi: „Hidromorfologija je sastavni dio primijenjene hidrobiologije jer osigurava stanišne uslove za biotu“. Hidromorfologija u okviru aplikativne hidrobiologije, se koristi za procjenu ekološkog statusa, planiranje biološkog monitoringa, obnovu ekosistema (restauraciju) i očuvanje biodiverziteta i prirodnih procesa u vodi. Hidromorfologija obuhvata fizičke karakteristike vodnih tijela, uključujući: oblik i strukturu korita, režim protoka, transport i taloženje sedimenata, stabilnost obala i prisustvo riparijske vegetacije, poplavne ravni, međudjelovanje s podzemnim vodama (hiporeja).

BAS EN 15843:2011 je bosanskohercegovačka verzija evropskog standarda EN 15843:2010 – „*Water quality – Guidance standard on determining the degree of modification of river hydromorphology*“. Ovaj standard definira kako procijeniti stepen modifikacije hidromorfologije rijeka u poređenju s prirodnim (referentnim) stanjem. Procjenjuju se tri glavna elementa: režim protoka, longitudinalni i lateralni kontinuitet te morfologija korita i obala (Tabela 8.6.1), koji su s dodatnim objašnjenjima prikazani i slikovito (Slika 8.6.1.1).

Tabela 8.6.1.1. Parametri hidromorfologije rijeka koji se ocjenjuju,

Hidromorfološki element	Opis	Primjer (sa slike)
Režim protoka	• Prirodna sezonska i dnevna varijabilnost protoka • Minimalni/maksimalni protoci, hidrološki ekstremi • Uticaj brana, derivacija, hidroelektrana (hidropeaking)	Brana, regulisan protok (slika 3 – desno)
Longitudinalni i lateralni kontinuitet	• Povezanost rijeke s poplavnim ravnicama i hiporejskom zonom • Slobodno kretanje vode, riba i sedimenta • Barijere: brana, kanal, nasipe	Slika 1 – prirodno Slika 2 – kanalizirano Slika 3 – brana
Morfologija korita i obala	• Širina, dubina, oblik, meandriranje vodotoka • Struktura dna (šljunak, pijesak, sedra, stijene) • Obalna vegetacija, stabilnost obala, sprudovi	Slika 1 – meandar, prirodno korito Slika 2 – pravolinijski kanal Slika 3 – betonirano korito



Slika 8.6.1.1. Prikaz nekih hidromorfoloških parametara koji se ocjenjuju (autori: prilagođeno)

Ocjenjivanje hidromorfološkog stanja se bazira na skali od 1 do 5, za svaki parametar se prema opisnom ili utvrđenoj vrijednosti na terenu dodaju bodovi, na kraju se zbrajaju te se podijele sa brojem parametara dobivena vrijednost se očitava na skalama sa kategorijama voda kao prirodno (plava boja), neznatno izmijenjeno (zelena boja), umjereno izmijenjeno (žuta boja), značajno izmijenjeno (narandžasta boja) i jako izmijenjeno (crvena boja). Ova kvalifikacija nije dio standarda nego Okvirne direktive o vodama i zakona u državi u oblasti upravljanja vodama.

Razlika između BAS EN 15843:2011 i novijih standarda (EN 14614:2020, EN 15843:2025 *Water quality - Guidance standard on determining the degree of modification of river hydromorphology*, noviji evropski standardi uvode moderniji, procesno orijentisan pristup hidromorfologiji. Glavne razlike su što standard iz 2010. mjeri odstupanje od prirodnog stanja, dok standard iz 2025. godine procjenjuje *dinamiku i funkciju* riječnog sistema. Pored toga u novim standardima (nadogradnjom spoznaja aplikacijom ODV-a) uključuje procjenu erozije, nanosa sedimenata, taloženja i blokiranja sedre, procjenjuje se stanje riparijske (obalne) vegetacije i prirodna interakcija rijeke s poplavnim područjima. Uključuje se i hiporejska zona – prijelaz između rijeke i podzemne vode.

Jezera za razliku od rijeka, imaju stabilniji vodni režim. U jezerima se procjenjuju slijedeći elementi: geometrija jezerskog bazena: površina, volumen, dubina, nagib dna, obalna zona: prirodna ili betonirana, erozija, tršćaci, makrofite, regulacija vodostaja: brane, akumulacije,

oscilacije nivoa vode, povezanost sa dotocima i podzemnim vodama i sedimentacija sa morfologijom dna.

Hidromorfologija jezera obuhvata (tabela 8.6.1.2) fizičke karakteristike jezera, njegove obale (priobalnog pojasa) i procese koji određuju oblik, vodni režim i povezanost s okolnim ekosistemima. U skladu s Okvirnom direktivom o vodama EU, hidromorfološki elementi su potporni element ekološkog statusa ili potencijala.

Tabela 8.6.1.2. Glavni hidromorfološki elementi jezera

Hidromorfološki element	Opis / Šta se procjenjuje
Hidrologija (vodni režim jezera)	Prirodne i umjetne promjene nivoa vode, Ulazne i izlazne vode (pritoke, emisije, pregrade, brane), Vrijeme zadržavanja vode, umjetna preusmjerenja
Morfologija obale (priobalnog pojasa)	Prirodna, modificirana ili vještačka obala, Nagib, erozijske i akumulacione zone, Indeks razvijenosti obale (SDI – shoreline development index)
Morfologija jezerskog bazena	Bathimetrija (prirodna dubinska struktura naspram iskopanih/nasutih zona) i umjetni nasipi, regulacije, ispuštanje sedimenta
Povezanost sa okolišem (lateralna i vertikalna)	povezanost jezera sa močvarama, plavnim ravnima, deltama i prisustvo barijera (nasipi, putevi, urbano područje)
Priobalna vegetacija i korištenje zemljišta	Trska, makrofite, obalne šume ili degradirana vegetacija, poljoprivredno, urbano, turističko korištenje zemljišta i postojanje ili nedostatak zaštitnog pojasa (buffer zone)

Hidromorfologija predstavlja temeljni dio aplikativne hidrobiologije i osnova je za razumijevanje odnosa između fizičkog habitata i bioloških zajednica. Standardi BAS EN 15843:2011, EN 14614:2020 i EN 15843:2025, EN ISO 16689:2018 daju stručni okvir za procjenu stanja i planiranje restauracijskih mjera u rijekama i jezerima, te priobalnim vodama (tabela 8.6.1.3).

Tabela 8.6.1.3. Popis standarda ocjene hidromorfologije za rijeke, jezera i priobalne vode

Vrsta vodnog tijela	Tačan EN / ISO / BAS standard	Napomena
Rijeke	EN 15843:2010 / BAS EN 15843:2011	<i>Water quality – Guidance for assessing hydromorphological features of rivers</i> Kvalitet vode – Standardno uputstvo za određivanje stepena modifikacije riječne hidromorfologije
Jezera	EN 16039:2011 / BAS EN 16039:2013	<i>Water quality – Guidance for hydromorphological assessment of lakes</i> Kvaliteta vode -- Savjetodavna norma za procjenu hidromorfoloških značajka jezera
Prijelazne i priobalne vode (estuari, lagune, priobalno more)	EN ISO 16689:2018 (nije preveden u BAS)	<i>Water quality – Guidance for assessing hydromorphological features of transitional and coastal waters</i>
Terminologija hidromorfologije	EN 17244:2019	<i>Water quality – Terminology used in hydromorphological assessment</i>

Prema EN ISO 16689:2018 (*Water quality — Guidance on assessing hydromorphological features of transitional and coastal waters*; Kvalitet vode- Smjernice za procjenu

hidromorfoloških obilježja prijelaznih i priobalnih voda), standard definiše hidromorfološke elemente koji se koriste za ocjenu prijelaznih (estuarskih) i priobalnih morskih voda. Ovaj standard je dopuna WFD (Okvirne direktive o vodama) i primjenjuje se na: estuare (ušća rijeka), lagune, deltaste sisteme, priobalno more (obalna zona do ~1 NM od obale), plitke zaljeve, uvale i morske močvare.. Ovaj standard ne klasificira ekološki status samostalno → hidromorfologija se koristi samo kao potporni element za postizanje visokog ekološkog statusa (HES) prema WFD (tabela 8.6.1.4). Ne daje numeričke granice za klase, već strukturu šta treba mjeriti i kako dokumentovati.

Tabela 8.6.1.4. Glavni hidromorfološki elementi hidromorfologije za priobalne vode prema EN ISO 16689:2018

Hidromorfološki element	Šta se procjenjuje
Hidrologija i hidrodinamika	Plima i oseka, talasi, morske struje, cirkulacija; miješanje slatke i morske vode (salinitet, stratifikacija); odstupanje od prirodnog režima zbog obalnih građevina
Morfologija obale i dna	Tip i struktura obale (prirodna/umjetna); tipovi obala i dna; erozija i akumulacija sedimenata
Uzdužna i lateralna povezanost	Povezanost s lagunama, močvarama i estuarima; riječni ulivi; prekid povezanosti zbog obalnih zahvata; veza s podzemnim vodama
Sedimentni režim	Transport sedimenata i uticaj morskih struja; umjetni uticaji (dredging, zatrpavanje, luke); promjene prirodnih deltastih struktura
Korištenje obale i pritisci	Urbanizacija, luke i marine; turizam i rekreacija; industrija i akvakultura; gubitak prirodnih obalnih staništa

Hidromorfološki EN/ISO standardi ne sadrže klasifikaciju prirodnosti ili stupnja izmijenjenosti vodnih tijela. Oni daju smjernice za opisivanje elemenata, dok je kategorizacija (npr. visoko, dobro, umjereno stanje) definisana Okvirnom direktivom o vodama (WFD) i uspostavlja se kroz nacionalne metodologije nadležnih institucija za upravljanje vodama.”

U okviru primijenjene hidrobiologije hidromorfologija zauzima centralno mjesto jer fizičke karakteristike vodnih tijela određuju prostorne obrasce staništa, raspodjelu vrsta i uslove za njihov opstanak. Bez obzira na tip vodenih sistema, tekućice, stajaćice ili priobalno more oblik korita ili bazena, dubina, strujanje, tipovi sedimenata i povezanost s okolnim područjima snažno utiču na biotu, na njen kvalitet i kvantitet.

Standardizirani postupci procjene hidromorfoloških osobina omogućavaju dosljedno prikupljanje podataka i njihovu pouzdanu interpretaciju u monitoringu, čime hidromorfologija postaje ključni alat za razumijevanje stanja vodnih sistema i planiranje mjera njihovog očuvanja i održivog korištenja.

9. Zagađenje vodenih ekosistema – izvori i posljedice

Zagađenje voda predstavlja unošenje u vodene ekosisteme supstanci, energije ili drugih oblika materije. Promjenu fizičkih, hemijskih ili bioloških svojstava vode, u mjeri koja uzrokuje ili može uzrokovati štetne efekte po zdravlje ljudi, vodene organizme i funkcionalni integritet ekosistema. Takve promjene narušavaju prirodnu ravnotežu i smanjuju sposobnost vode da se koristi u društveno-ekonomskim, rekreativnim i ekološkim funkcijama. U širem smislu, zagađenje voda je svaka promjena kvaliteta vode koja rezultira smanjenjem njene pogodnosti za postojeće ili planirane namjene, te predstavlja prijetnju održivom korištenju prirodnih resursa u životnoj sredini. Zagađenje vodenih ekosistema predstavlja jedan od najznačajnijih globalnih ekoloških problema današnjice. Ono podrazumijeva unošenje supstanci ili energije u vode u količinama koje dovode do promjena u fizičkim, hemijskim i biološkim karakteristikama, narušavajući prirodnu ravnotežu i ugrožavajući život akvatičnih organizama, kao i zdravlje ljudi. Vodeni ekosistemi, uključujući rijeke, jezera, močvare, priobalne zone i morske obale, posebno su osjetljivi na antropogene pritiske zbog ograničene sposobnosti samoprečišćavanja kada je opterećenje prekomjerno. Način djelovanja zagađenja su otpadne vode. Otpadne vode su vode čiji je kvalitet promijenjen ljudskim aktivnostima, tako da sadrže tvari u količinama ili koncentracijama koje mogu biti štetne za okoliš i/ili zdravlje ljudi. Nastaju kao rezultat komunalnih, industrijskih, poljoprivrednih i oborinskih aktivnosti (shema 9.1).



Shema 9.1. Tipovi otpadnih voda

Hemijski sastav otpadnih voda značajno varira ovisno o izvoru nastanka (komunalne, industrijske, poljoprivredne, oborinske), ali se u pravilu može podijeliti na organske i anorganske komponente, uz prisustvo gasova i toksičnih supstanci (tabela 9.1).

Tabela 9.1. Prikaz hemijskog sastava otpadnih voda

Komponente	Primjeri / opis
Organske komponente	Ugljikohidrati, ostaci hrane, biljni materijal, deterdženti, proteini, fekalije, ostaci hrane, životinjski otpad, masti i ulja, kuhinje, prehrambena industrija, maziva, sintetičke organske supstance, deterdženti, plastifikatori, fenoli, pesticidi i herbicidi, poljoprivredne otpadne vode, policiklički aromatski ugljikovodici, naftni derivati
Anorganske komponente	Makroelementi – azot (NH_3 , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), fosfor (PO_4^{3-}), sumpor (SO_4^{2-} , H_2S), hloridi (Cl^-), Teški metali – Hg, Pb, Cd, As, Cr, Ni, Zn, Cu, mineralne soli – karbonati, bikarbonati, sulfati, anorganske kiseline i baze – H_2SO_4 , HCl, NaOH
Gasovi	O_2 – otopljeni kiseonik, CO_2 – produkt biološke razgradnje, H_2S – iz anaerobne razgradnje sumpornih spojeva, CH_4 – metan iz anaerobne razgradnje, NH_3 – slobodni amonijak

Toksične supstance i mikrozagađivači	Farmaceutski ostaci – antibiotici, hormoni, analgetici, hormonski disruptori – bisfenol A, nonilfenol, ftalati, mikroplastika i nanoplastika, organo-metalni spojevi – metil-živa
--------------------------------------	---

Fizičke karakteristike otpadnih voda opisuju vidljive i mjerljive osobine koje direktno utiču na izgled, miris, temperaturu i ponašanje vode u okolini. Ove karakteristike su često prvi pokazatelj prisustva zagađenja. Biološke komponente obuhvataju žive mikroorganizme i veće biološke kontaminante prisutne u otpadnim vodama, od kojih mnogi mogu biti patogeni i predstavljati rizik za zdravlje ljudi i životinja (tabela 9.2).

Tabela 9.2. Fizikalni i biološki sastav otpadne vode

Komponente	Primjeri / opis
Fizičke komponente	Temperatura – često povišena kod industrijskih otpadnih voda Boja – rezultat prisustva otopljenih i suspendovanih tvari Miris – uzrokovan prisustvom organske materije i gasova (H_2S , NH_3) Mutnoća – čestice suspendovane u vodi (organskog i anorganskog porijekla) Suspendovane čvrste materije – mulj, pijesak, organski ostaci Taložne čestice – veće čestice koje se talože pod djelovanjem gravitacije
Biološke komponente	Bakterije – uključuju indikatorske vrste (<i>Escherichia coli</i>), patogene (<i>Salmonella</i> , <i>Vibrio cholerae</i>) Virusi – enterovirusi, adenovirusi, norovirusi Protozoe – <i>Giardia lamblia</i> , <i>Entamoeba histolytica</i> helminti – jaja crva (<i>Ascaris lumbricoides</i> , <i>Trichuris trichiura</i>) Mikroalge i cijanobakterije – posebno u eutrofiziranim vodama Gljivice – kvasci i plijesni povezani s organskim zagađenjem

Podjela izvora zagađenja na difuzne i rspršene izvore zagađenja izvršena je prema prostornoj distribuciji i načinu ulaska zagađivača u vodene ekosisteme. Podjela na prirodne i antropogene izvore zagađenja (dominiraju) je na temelju porijekla zagađenja (tabela 9.3).

Tabela 9.3. Vrste zagađenje, karakteristike, opis i primjeri

Pristup klasifikacije	Kategorija	Opis	Primjeri
Prema distribuciji	Difuzni izvori	Široko rasprostranjeni, bez jasnog mjesta ulaska	Poljoprivredni oticaji, atmosferska depozicija
	Raspršeni (tačkasti) izvori	Jasno definisan i lociran izvor	Ispust iz fabrike, kanalizacija
Prema porijeklu	Prirodni	Nastaju prirodnim procesima	Erozija, vulkanske erupcije
	Antropogeni	Posljedica ljudskih aktivnosti	Industrija, poljoprivreda, saobraćaj

Tačkasti /raspršeni) izvori imaju jasno definisanu lokaciju ispuštanja zagađivača u vodotok i mogu se relativno lako identificirati, kontrolirati i nadzirati. Primjeri uključuju ispuste iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (komunalna ili industrijska postrojenja), direktna ispuštanja iz industrijskih pogona (npr. hemijska industrija, prehrambena industrija). pored toga tu su izlivi/dotoci iz rudnika i jalovišta i cjevovodi i kanali koji ispuštaju otpadne tokove.

Difuzni izvori nemaju jednu jasno definisanu tačku ispuštanja, već potiču s većih površina, a polutanti ulaze u vode preko otjecanja padavinama, infiltracije ili atmosferskog taloženja. Oni

su znatno teži za kontrolu. Primjeri uključuju ispiranje pesticida i gnojiva s poljoprivrednih površina tokom kišnih padavina, oticanje ulja, metala i čestica sa saobraćajnica, atmosferska depozicija kiselih oksida i teških metala i šumski požari i erozija tla, koji u vodotokove unose sediment i hranjive materije.

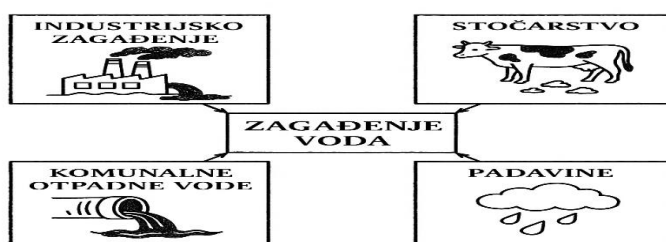
Stvarni izvori zagađenja (slika 9.1) na određenom ili globalnom prostoru podrazumjevaju, prvenstveno prirodne izvore. Iako se najveći dio zagađenja vezuje za antropogenu aktivnost, određeni stepen zagađenja potiče i iz prirodnih procesa prvenstveno erozija tla i prirodno ispiranje minerala u vodotokove. Pored toga vulkanizam i geotermalne aktivnosti, koji oslobađaju teške metale i gasove u vode i prirodno raspadanje organske materije u vodenim ekosistemima, što može povećati koncentraciju hranjivih soli (nutrijenata) i organskog ugljika.

Antropogeni izvori zagađenja su dominantni u većini vodnih tijela i obuhvataju niz različitih pritisaka. Komunalne otpadne vode predstavljaju najčešći izvor, posebno kada su nepročišćene ili nedovoljno pročišćene, te u vodotok unose organske materije, patogene mikroorganizme, nutrijente (azot i fosfor) i deterdžente.

Industrijsko zagađenje dodatno opterećuje vodene ekosisteme ispuštanjem teških metala (olovo, kadmij, živa, arsen), fenola, ulja, organskih rastvarača, termičkih ispusta i radioaktivnih materijala.

Poljoprivredno zagađenje obuhvata ispiranje pesticida, herbicida, mineralnih gnojiva i organskih materija sa stočarskih farmi, dok rudarska eksploatacija često dovodi do pojave kisele rudarske drenaže i taloženja teških metala. Saobraćaj i transport doprinose unosu nafte i njenih derivata, mikročestica nastalih abrazijom guma te produkata korozije metalnih dijelova vozila. Dodatni pritisak predstavlja atmosferska depozicija, uključujući kisele kiše i taloženje polutanata iz zraka, poput emisija iz termoelektrana.

Sve ove vrste zagađenja mogu djelovati pojedinačno ili istovremeno (tabela 9.4), a intenzitet njihovih posljedica zavisi od vrste, količine i dužine trajanja uticaja na vodno tijelo.



Slika 9.1. Prikaz glavnih izvora zagađenja pored poljoprivrede

Postoji više tipova zagađenja koji mogu djelovati pojedinačno ili istovremeno (tabela 9.4). Njihov uticaj na vodna tijela zavisi od vrste zagađivača, njihove koncentracije i dužine trajanja pritiska, što u konačnici određuje intenzitet i obim posljedica.

Tabela 9.4. Vrste i posljedice zagađenja voda

Kategorija	Opis
Fizičko zagađenje	Promjene temperature (termalno zagađenje), povećana zamućenost, promjena boje i mirisa.
Hemijsko zagađenje	Prisustvo toksičnih anorganskih i organskih supstanci, povećana koncentracija nutrijenata (eutrofikacija), promjene pH i provodljivosti.
Biološko zagađenje	Unošenje patogenih mikroorganizama, parazita ili invazivnih vrsta.
Radioaktivno zagađenje	Prisustvo radionuklida iz industrijskih, medicinskih ili vojnotehnoloških izvora.
Ekološke posljedice	Eutrofikacija, gubitak biodiverziteta, promjene u trofičkim mrežama, bioakumulacija i biomagnifikacija.
Zdravstvene posljedice	Pojava bolesti (dizenterija, hepatitis A, gastroenteritisi), trovanja metalima i toksinima, dugoročni efekti izloženosti (karcinogeni, teratogeni, mutageni efekti)
Socioekonomske posljedice	Smanjenje dostupnosti pitke vode, gubici u ribarstvu i akvakulturi, degradacija estetskih i rekreativnih vrijednosti, povećani troškovi prečišćavanja.

Efikasno upravljanje zagađenjem vodenih ekosistema zahtijeva integrirani pristup koji uključuje prevenciju, kontrolu izvora zagađenja, primjenu savremenih tehnologija za pročišćavanje otpadnih voda, kao i kontinuirani biomonitoring. Održivo korištenje vodenih resursa moguće je samo kroz međusektorsku saradnju, strogu primjenu zakonskih propisa i podizanje svijesti javnosti o važnosti očuvanja kvaliteta voda.

Zagađenje voda ne djeluju (tabela 9.5) kao multiplikator rizika, pojačavajući postojeće pritiske na vodene ekosisteme i istovremeno stvarajući nove oblike degradacije. Povećanje globalne temperature, promjena režima padavina i porast ekstremnih vremenskih događaja utiču na transport, koncentraciju i učinak zagađivača u vodi.

Tabela 9.5. Ključni mehanizmi uticaja zagađenja voda

Mehanizam	Opis
Povećanje temperature vode	Smanjuje rastvorljivost kiseonika, ubrzava hemijske reakcije i može pojačati toksičnost nekih polutanata (npr. amonijaka, cijanotoksina).
Promjene hidrologije	Učestalije poplave ispiru veće količine nutrijenata, pesticida i teških metala s kopna u vodotoke; suše koncentriraju polutante u manjim količinama vode.
Povećanje eutrofikacije	Više temperature i duža vegetacijska sezona favorizuju masovni razvoj fitoplanktona, uključujući toksične cijanobakterije.
Širenje invazivnih vrsta	Toplije vode i poremećaji staništa olakšavaju prodor i uspostavu neautohtonih vrsta koje mogu mijenjati ekosistemske procese.
Uticaj na sanaciju i tretman vode	Promjene u kvalitetu sirove vode zahtijevaju prilagodbu tehnologija pročišćavanja, što može povećati troškove i potrošnju energije.

Kombinacija klimatskih promjena i postojećih izvora zagađenja može dovesti do sinergijskih efekata koji nadilaze pojedinačne uticaje, te stoga zahtijevaju integrisano planiranje upravljanja vodama u kontekstu adaptacije na klimatske promjene. U tom okviru, posebno je važno razmotriti i biološko zagađenje voda, koje predstavlja specifičan oblik pritiska

9.1. Biološko zagađenje voda

Biološko zagađenje podrazumijeva prisustvo patogenih mikroorganizama, parazita i invazivnih vrsta u vodi, koji mogu ugroziti zdravlje ljudi, životinja i ekološku stabilnost. Ovi agensi uključuju patogene mikroorganizme (bakterije, viruse, protozoe, gljivice), parazite te invazivne i neautohtone vrste. Za razliku od hemijskog i fizičkog zagađenja, biološko zagađenje voda neposredno je povezano s pojavom infektivnih bolesti i poremećajem ekološke stabilnosti vodenih ekosistema. Uzrokuju ga mikroorganizmi (bakterije, virusi, protozoe, gljivice) ili njihovi toksini, a izvori mogu biti antropogeni ili prirodni (tabela 9.1.1).

Tabela 9.1.1. Antropogeni izvori uključuju

Izvor zagađenja	Opis
Komunalne otpadne vode	Nepročišćene ili djelimično pročišćene fekalne vode iz domaćinstava, septičkih jama i urbanih naselja.
Poljoprivreda i stočarstvo	Ispiranje fekalnog materijala, gnojiva i organskih ostataka sa farmi, pašnjaka i deponija stajnjaka u površinske i podzemne vode.
Prehrambena industrija	Otpadne vode klaonica, mljekara i pogona za preradu mesa i ribe; sadrže visoke koncentracije mikroorganizama i organskih materija.
Medicinski i laboratorijski otpad	Sadrži patogene mikroorganizme i bakterijske sojeve rezistentne na antibiotike, što povećava rizik za zdravlje ljudi i životinja.

Prirodni izvori biološkog zagađenja obuhvataju fekalne materije divljih životinja i ptica, kao i prirodno prisustvo patogenih bakterija, virusa i protozoa u vodenim ekosistemima, posebno u područjima sa stagnirajućom vodom ili povećanim brojem životinja (shema 9.1.1).



Shema 9.1.1. Prikaz kategorija bioloških zagađivača

Posljedice biološkog zagađenja prvenstveno se očituju kao zdravstveni rizici za ljude, uključujući bolesti probavnog sistema (dizenterija, gastroenteritis, kolera), virusne infekcije (hepatitis A, poliomijelitis) i parazitoze poput giardijaze i kriptosporidioze. Ekološke posljedice podrazumijevaju poremećaj strukture zajednica usljed dominacije invazivnih i tolerantnih vrsta, gubitak biodiverziteta, promjene u trofičkim mrežama i smanjenje ekosistemskih usluga, što ubrzava degradaciju vodenih ekosistema. Prevencija i kontrola zasnivaju se prvenstveno na efikasnom prečišćavanju komunalnih i industrijskih otpadnih voda, kontroli stočarskih i poljoprivrednih otjecanja te primjeni mjera sanitarne zaštite izvorišta pitke vode. Sve mjere

zahtijevaju kontinuiran nadzor kroz monitoring, brzu detekciju patogena i invazivnih vrsta, kao i redovnu edukaciju stanovništva o higijeni i sigurnom korištenju vode.

9.1.1. Invazivne vrste

Zagađenje i degradacija kvaliteta vode stvaraju uslove koji često pogoduju širenju invazivnih neautohtonih vrsta. Takve vrste imaju široku ekološku toleranciju, visoku reproduktivnu sposobnost i često nadmašuju autohtone organizme u kompeticiji za resurse. Mehanizmi širenja invazivnih vrsta u degradiranim vodama uključuju istiskivanje autohtonih vrsta, povećanje zagađenosti (shema 9.1.2).



Shema 9.1.2. Mehanizmi širenja invazivnih vrsta

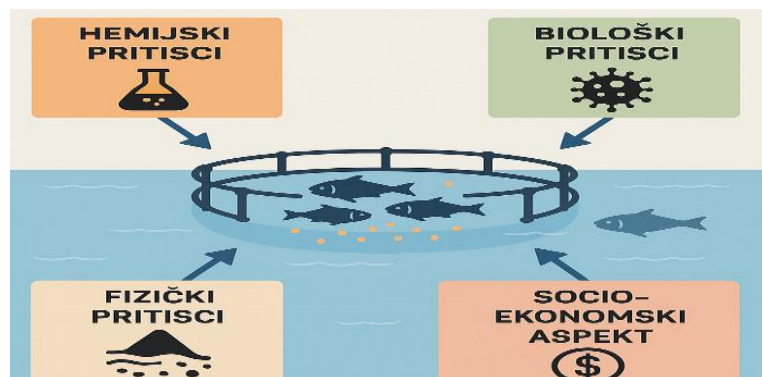
Primjeri invazivnih hidrobionata u slatkovodnim ekosistemima Balkana obuhvataju više vrsta koje značajno mijenjaju strukturu i funkcionisanje vodenih zajednica. *Dreissena polymorpha* (zebra školjka) masovno kolonizira jezera i akumulacije, a intenzivnim filtriranjem vode mijenja dostupnost nutrijenata, povećava prozirnost i remeti postojeće trofičke mreže. *Ameiurus melas* (crni somić) je oportunistički predator koji konzumira ikru i mlađ autohtonih ribljih vrsta, doprinoseći njihovom opadanju. Biljna vrsta *Elodea canadensis* (kanadska vodena kuga) stvara guste monokulture koje zasjenjuju i potiskuju autohtonu makrofitsku floru, mijenjaju hidrodinamiku i otežavaju ribolov i rekreacijske aktivnosti. Rak *Pacifastacus leniusculus* (američki ili signalni rak) ne samo da kompetitivno nadvladava autohtone vrste, nego i prenosi račju kugu (*Aphanomyces astaci*), bolest koja uzrokuje visoku smrtnost osjetljivih populacija evropskih riječnih rakova. U posljednjim godinama uočava se porast invazivnih akvatičnih vrsta u hidroakumulacijama na području BiH, pri čemu su promjene najizraženije u Jadranskom slivu. Vještački rezervoari sa stabilnijim termičkim režimom, usporenim proticanjem, povećanim unosom nutrijenata i čestim introdukcijama putem ribolovnih aktivnosti predstavljaju pogodna staništa za širenje invazivnih biljnih i životinjskih vrsta. Ovi sistemi često služe kao „hotspotovi“ iz kojih se invazivne populacije dalje šire u nizvodne tokove i prirodna jezera. Porast invazivnih vrsta dovodi do smanjenja biološke raznolikosti, poremećaja u strukturi i funkciji ekosistema, promjena u protoku energije i materije te povećanja ekoloških i ekonomskih gubitaka. U ribarstvu i akvakulturi ovi uticaji uključuju pad brojnosti komercijalnih vrsta, propadanje staništa i povećane troškove

upravljanja i kontrole populacija invazivnih organizama. Dugoročno, invazivne vrste mogu izmijeniti čitave ekosisteme, smanjujući njihovu otpornost na druge pritiske, uključujući eutrofikaciju i klimatske promjene.

9.1.2. Akvakultura

Akvakultura, kao oblik kontrolisanog uzgoja vodenih organizama (riba, školjki, algi), ima značajnu ulogu u osiguravanju hrane i ekonomskoj stabilnosti lokalnih zajednica. Međutim, uz brojne koristi, ona se prepoznaje i kao važan parametar pritiska na akvatične ekosisteme, budući da može uzrokovati promjene u hemijskim, biološkim i fizičkim karakteristikama voda (slika 9.1.2). Hemijski pritisci u akvakulturi nastaju prvenstveno zbog povećanog unosa nutrijenata u vodu, jer nepojedena hrana i metabolički produkti uzgojenih organizama podižu koncentracije azota i fosfora. Time se podstiče eutrofikacija, razvijaju cvjetanja algi i smanjuje sadržaj rastvorenog kiseonika. Dodatni rizik predstavlja primjena antibiotika i drugih hemikalija, koji se mogu zadržavati u vodi i sedimentu te pospješiti razvoj rezistentnih mikroorganizama. Biološki pritisci proističu iz visokih gustoća jedinki u uzgoju, što olakšava pojavu i širenje bolesti i parazita, a oni se mogu prenijeti i na divlje populacije. Značajan problem predstavlja i bijeg alohtonih ili hibridnih jedinki iz uzgojnih sistema, jer mogu ugroziti autohtone vrste kroz nadmetanje za resurse, mogućnost hibridizacije i promjene u trofičkim odnosima unutar ekosistema. Fizički pritisci kroz infrastrukturu akvakulture, poput kaveza, bazena i nasipa, utiče na promjenu prirodnih staništa i hidromorfoloških osobina vodenih tijela. Intenzivna akvakultura doprinosi i povećanoj sedimentaciji, pri čemu se u podlozi ispod kaveza akumulira organski materijal koji dovodi do stvaranja anaerobnih uslova i degradacije makrozoobentosa. Socio-ekonomski aspekt akvakulture ogleda se u njenom doprinosu lokalnoj ekonomiji i sigurnosti hrane, ali prema zahtjevima Okvirne direktive o vodama (ODV) ovi pozitivni učinci ne isključuju obavezu da se njeni potencijalni pritisci uključe u analizu rizika i opterećenja vodnih tijela. To podrazumijeva da se pri planiranju i provođenju akvakulturnih aktivnosti moraju uvažiti mjere zaštite i restauracije ekosistema, kako bi se osiguralo održivo korištenje vodnih resursa i spriječilo narušavanje njihovog stanja. Da bi se ublažili pritisci akvakulture, preporučuju se sljedeće mjere, pažljivo prostorno planiranje i izbor lokacija. Kontrola hranjenja i optimizacija upotrebe hrane. Pored toga redovni monitoring kvaliteta vode, bentosa i ihtiopopulacija, korištenje autohtonih vrsta i biosigurnosnih mjera i uvođenje integrisane multitrofičke akvakulture (IMTA), gdje se kombinira uzgoj riba, školjki i algi radi smanjenja otpada i kruženja materije. Godine 2020. akvakulturni sektor EU ostvario je 1,2 miliona tona proizvodnje i 3,9 milijardi eura prometa, te zaposlio oko 57.000 ljudi u približno 14.000 preduzeća, uglavnom malih i porodičnih. Najveći dio proizvodnje (67 %) koncentrisan je u Francuskoj, Grčkoj, Španiji i Italiji, pri čemu više od polovine otpada na školjkaše, dok ribe čine 21 % morske i 28 % slatkovodne proizvodnje. Uprkos značajnom ekonomskom doprinosu, sektor se suočava s ozbiljnim izazovim. Ovi izazovi obuhvataju zahvate vode, ispuštanje nutrijenata i hemikalija, eutrofikacija i gubitak biodiverziteta. Posebno ilustrativan je primjer Danske, koja je 2019. obustavila razvoj novih akvakulturnih farmi zbog prekoračenja dozvoljenih unosa azota u

obalne i unutrašnje vode. Ovaj slučaj jasno pokazuje da je ključna prepreka održivom razvoju akvakulture u EU potreba da se uskladi ekonomski rast sa zaštitom kvaliteta voda i očuvanjem ekosistema.

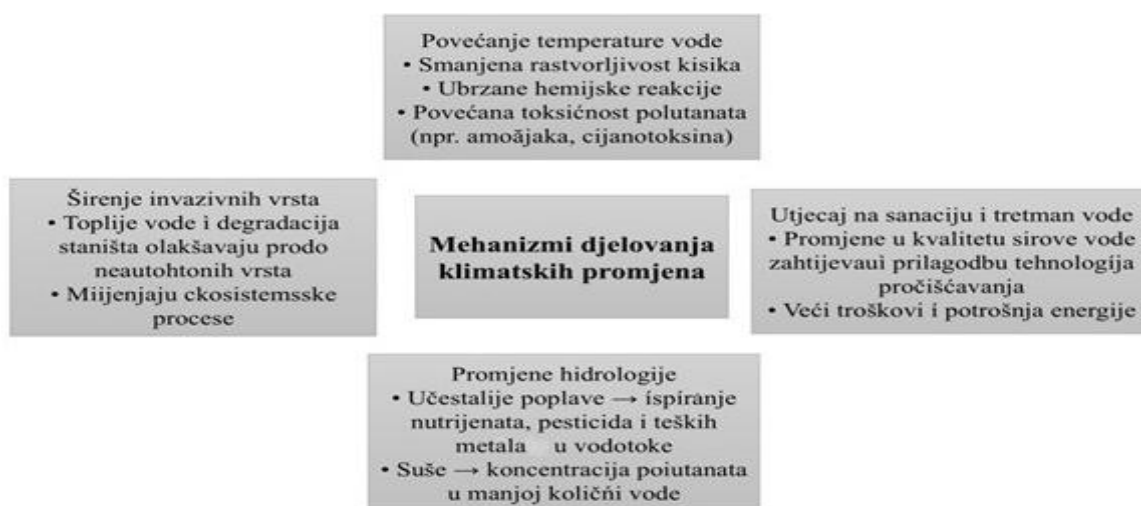


Slika 9.1.2. Uticaj akvakulture na vodene ekosisteme

Pritom se kao presudni faktori izdvajaju kvalitet institucija, efikasnost regulatornog okvira i kontrola vrsta odnosno nasada koji se uzgajaju, kako bi se spriječili prekomjerni pritisci na vodna tijela i negativni ekološki efekti povezani s unošenjem, širenjem ili dominacijom nepoželjnih organizama.

9.1.3. Uticaj klimatskih promjena na zagađenje vodenih ekosistema

Klimatske promjene djeluju kao multiplikator rizika, pojačavajući postojeće pritiske na vodene ekosisteme i istovremeno stvarajući nove oblike degradacije. Povećanje globalne temperature, promjena režima padavina i porast ekstremnih vremenskih događaja utiču na transport, koncentraciju i učinak zagađivača u vodi. Ključni mehanizmi uticaja predstavljeni su na shemi 9.1.3.



Shema 9.1.3. Prikaz mehanizama djelovanja klimatskih promjena na zagađenje voda

U okeanima se promjene klime manifestuju kroz zagrijavanje površinskih slojeva, zakiseljavanje morske vode usljed povećanog CO₂, sniženje pH vrijednosti i razvoj hipoksičnih ili anoksičnih zona. Ovi procesi utiču na fitoplankton, zooplankton, korale, ribe i druge morske organizme, mijenjajući njihovu distribuciju, fenologiju i međusobne interakcije. Posebno je izražen pomak areala brojnih vrsta prema višim geografskim širinama ili dubljim slojevima mora, gubitak koralnih grebena zbog izbjeljivanja te smanjenje ukupne produktivnosti okeana. Slatkovodni i priobalni sistemi takođe pokazuju izrazitu osjetljivost na klimatske promjene. Povišene temperature, promjene hidrološkog režima, češći ekstremni događaji i smanjenje sadržaja rastvorenog kiseonika utiču na strukturu i stabilnost populacija hidrobionata. Takve promjene povećavaju ranjivost ekosistema, podstiču širenje invazivnih vrsta i pojačavaju efekte postojećih hemijskih i bioloških pritisaka. U takvim uslovima, razumijevanje reakcija hidrobionata na promjenjene fizičke, hemijske i biološke uslove postaje ključno, jer se efekti klimatskih promjena često preklapaju i pojačavaju sa djelovanjem zagađenja u vodenim ekosistemima. Kombinacija klimatskih promjena i postojećih izvora zagađenja može dovesti do sinergijskih efekata koji nadilaze pojedinačne uticaje, te zahtijeva integrisano planiranje upravljanja vodama u okviru mjera adaptacije. U takvim uslovima posebno je važno razumjeti kako promjene u kvalitetu i kvantitetu vode utiču na hidrobionte, tj. organizme koji žive u vodi, uključujući plankton, nekton, bentos, perifiton i makrofite. Stabilnost i brojnost njihovih populacija direktno zavise od fizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika vodenog staništa, a zagađenje mijenja ove uslove, utičući na fiziološke procese, obrasce ponašanja, reprodukciju i preživljavanje. Mehanizmi djelovanja zagađenja na hidrobionte obuhvataju fiziološki stres, bioakumulaciju i biomagnifikaciju, reproduktivne poremećaje, promjene u ponašanju te gubitak biodiverziteta i promjenu strukture zajednica (tabela 9.1.3).

Tabela 9.1.3. Prikaz mehanizama djelovanja zagađenja na hidrobionte

mehanizmi	Djelovanje (opis)
Fiziološki stres	Smanjenje rastvorljivosti kiseonika (termalno zagađenje, eutrofikacija) dovodi do hipoksije ili anoksije, što posebno pogađa osjetljive vrste (npr. lososide, Ephemeroptera). Poremećaj osmoregulacije usljed promjena saliniteta i provodljivosti. Povećana toksičnost nekih supstanci na višim temperaturama (npr. amonijak).
Bioakumulacija i biomagnifikacija	teški metali (Hg, Pb, Cd, As) i lipofilni organski polutanti (PCB, pesticidi) akumuliraju se u tkivima, često bez mogućnosti izlučivanja. povećanje koncentracija kroz trofičke nivoe dovodi do hroničnih efekata kod vršnih predatora (npr. ribe grabljivice, ptice močvarice).
Reproduktivni poremećaji	hormonski disruptori (npr. bisfenol A, ftalati) uzrokuju feminizaciju mužjaka, smanjenje plodnosti i malformacije embriona; poremećaji u razvoju gameta usljed prisustva toksina; smanjena sposobnost izbjegavanja predatora zbog neurotoksičnih efekata pesticida i izmijenjene migracione rute i gubitak staništa usljed degradacije riječnih tokova.
Promjene u ponašanju	smanjena sposobnost izbjegavanja predatora zbog neurotoksičnih efekata pesticida; izmijenjene migracione rute i gubitak staništa usljed degradacije riječnih tokova; smanjena sposobnost izbjegavanja predatora zbog neurotoksičnih efekata pesticida.
Gubitak biodiverziteta i promjena strukture zajednica	osjetljive vrste nestaju, a tolerantne (npr. Chironomidae, Tubificidae) dominiraju; smanjenje funkcionalne raznolikosti zajednica, što smanjuje ekosistemske usluge.

Mehanizmi djelovanja zagađenja na hidrobionte pokazuju koliko su vodeni organizmi osjetljivi na poremećaje u fizičkim, hemijskim i biološkim uslovima. Istovremeno, upravo ti organizmi imaju ključnu ulogu u prirodnim procesima samoopročišćavanja voda. Zbog toga se u narednom potpoglavlju razmatra autopurifikacija i doprinos hidrobionata u održavanju i obnovi kvaliteta vodenih ekosistema.

9.1.4. Autopurifikacija voda i uloga hidrobionata

Autopurifikacija (samočišćenje) je prirodni proces (shema 9.1.3) kojim se vodeni ekosistemi obnavljaju i vraćaju u stanje ekološke ravnoteže nakon unošenja zagađujućih materija. Taj proces obuhvata niz fizičkih, hemijskih i bioloških mehanizama koji zajedno doprinose smanjenju koncentracije polutanata i njihovoj transformaciji u manje toksične ili netoksične oblike. U užem smislu, autopurifikacija se može posmatrati kao biorenoza – biološka obnova ekosistema putem djelovanja mikroorganizama, biljaka i životinja.



Shema 9.1.3. Prikaz autopurifikacije u vodenom toku sa procesima (prilagođeno prema Ghangrekar, 2022)

Proces autopurifikacije je u velikoj mjeri određen ulogom hidrobionata u vodenim ekosistemima (tabela 9.1.4). Među njima se posebno izdvajaju bakterije, čija sposobnost razlaganja organske materije, širok diverzitet i rasprostranjenost čine osnovu prirodnog samoopročišćavanja voda.

Tabela 9.1.4. Uloga hidrobionata u vodenim ekosistemima

hidrobiont	uloga
Mikroorganizmi	Bakterije su ključni akteri u razgradnji organske materije i mineralizaciji hranjivih soli. Nitrifikacione i denitrifikacione bakterije pretvaraju amonijak u nitrate, a zatim u gasoviti azot, smanjujući eutrofikaciju
Makrofiti (vodene biljke)	Uklanjaju nutrijente iz vodenog stuba putem asimilacije. Stvaraju mikroklimatske uslove pogodne za razvoj mikroorganizama na svojim površinama (perifiton). Stabilizuju sediment i smanjuju zamućenost.
Beskičmenjaci	Filtratori (npr. školjke roda <i>Dreissena</i> , spužve) uklanjaju suspendovane čestice i fitoplankton. Detritivori (npr. larve Chironomidae, <i>Gammarus spp.</i>) usitnjavaju organske ostatke, povećavajući njihovu površinu za mikrobnu razgradnju
Ribe	Neke vrste (npr. bentofagne ribe) pomažu u bioturbaciji sedimenta, čime ubrzavaju kontakt zagađivača sa oksidiranim slojevima.

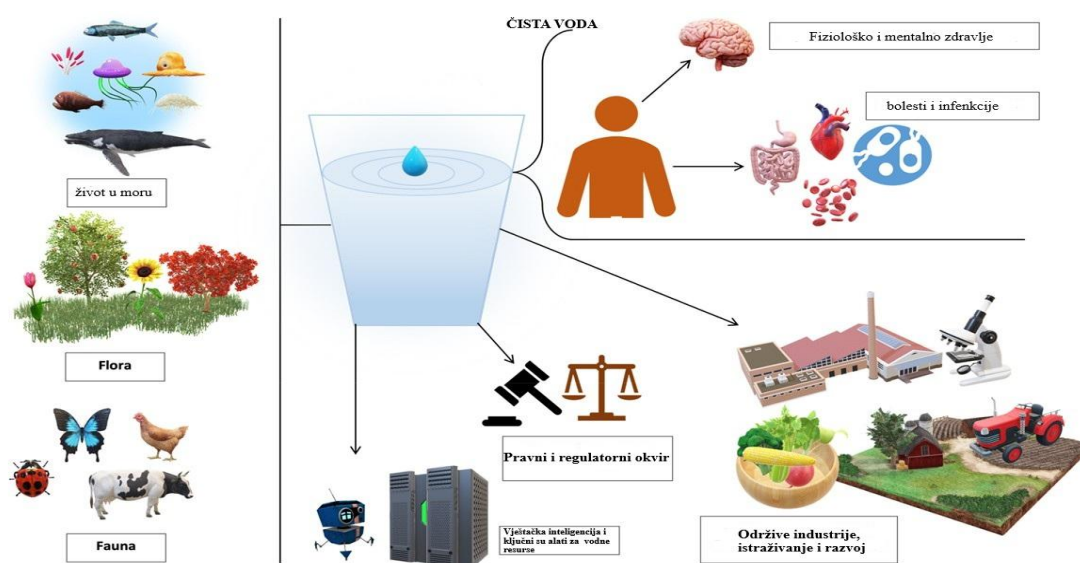
Faktori koji utiču na efikasnost autopurifikacije uključuju hidrauličko vrijeme zadržavanja vode, temperaturu i zasićenje otopljenim kiseonikom, vrstu i koncentraciju polutanata, biodiverzitet i trofičku strukturu zajednica hidrobionata, kao i hidromorfološke uslove kao što su protok, dubina, širina korita i prisustvo vegetacijskog pojasa. Autopurifikacija i biorenoza predstavljaju osnovne prirodne mehanizme samoodržanja vodenih ekosistema, zasnovane na biološkim, hemijskim i fizičkim interakcijama koje omogućavaju razgradnju, transformaciju i uklanjanje polutanata. Iako ovi procesi mogu znatno ublažiti negativne efekte zagađenja, njihova efikasnost je ograničena nivoom opterećenja i stepenom degradacije staništa. Savremeni koncepti upravljanja vodama i restauracije ekosistema naglašavaju da cilj nije „umjetno popravljati“ sistem, nego obezbijediti uslove u kojima se prirodne funkcije mogu ponovo uspostaviti. To podrazumijeva vraćanje hidromorfološke povezanosti, očuvanje ili obnovu riparijskih zona, smanjenje dotoka polutanata i stvaranje uslova u kojima zajednice hidrobionata mogu ponovo razviti svoje samoregulacijske mehanizme.

U tom smislu, čovjek ne „oporavlja“ ekosistem, nego omogućava prirodi da se sama oporavi, uklanjajući prepreke i minimizirajući pritiske koji sprečavaju ostvarenje prirodnih zakonitosti samoopročišćavanja i regeneracije vodenih tijela. Ovakav pristup predstavlja temelj savremenih evropskih smjernica za restauraciju (CEN, ISO, EU River Restoration Framework), u kojima se naglašava da je održivost postignuta tek kada se prirodni procesi mogu odvijati bez kontinuirane intervencije.

10. Zaštita voda

Voda je najvažniji prirodni resurs i osnov života na Zemlji. Ona omogućava funkcionisanje svih bioloških sistema, održava ekološku ravnotežu i ima nezamjenjivu ulogu u društveno-ekonomskom razvoju. Osiguravanje dostupnosti čiste i sigurne vode jedno je od ključnih pitanja savremenog doba, jer bez adekvatne zaštite vodnih resursa nije moguće osigurati zdravlje ljudi, sigurnost hrane, očuvanje biodiverziteta niti održivi razvoj. Kontaminacija i degradacija voda danas predstavljaju globalnu krizu. Prema izvještajima Svjetske zdravstvene organizacije i Ujedinjenih nacija, milijarde ljudi nemaju pristup zdravstveno ispravnoj vodi, dok ekosistemi trpe posljedice zagađenja, klimatskih promjena i prekomjerne eksploatacije. Posljedice se manifestuju kroz pojavu bolesti koje se prenose vodom, degradaciju riječnih i jezerskih staništa, gubitak biodiverziteta i narušavanje prirodnih ciklusa. Time voda postaje ne samo ekološko nego i sigurnosno pitanje. Na međunarodnom planu, koncept zaštite voda usko je povezan sa ciljevima održivog razvoja Ujedinjenih nacija (SDG 6: Čista voda i sanitarni uslovi), koji naglašavaju potrebu da do 2030. godine svi ljudi imaju pristup sigurnoj vodi i da se unaprijedi upravljanje vodnim resursima. U Evropskoj uniji, ključni normativni okvir čini Okvirna direktiva o vodama (2000/60/EC), koja postavlja cilj postizanja dobrog ekološkog i hemijskog statusa svih površinskih i podzemnih voda. Ona integriše ekološke, hemijske i hidromorfološke parametre te uvodi princip upravljanja na nivou riječnih slivova. Zaštita voda zahtijeva multidisciplinarni pristup u kojem se hidrobiologija povezuje sa ekologijom, biologijom,

hidrologijom, hemijom, inženjerskom naukom (hidrotehnikom), medicinom i društvenim naukama. Uspješno upravljanje vodama uključuje razumijevanje pritiska poput industrijskog i poljoprivrednog zagađenja, urbanizacije, klimatskih promjena i širenja invazivnih vrsta. Što uključuje i planiranje mjera koje obuhvataju restauraciju ekosistema, poboljšanje tretmana otpadnih voda, kontrolu erozije i integrisano upravljanje riječnim slivovima. Čista voda temelj za očuvanje ekološke ravnoteže, dobrobit ljudi, tehnološki napredak i ekonomsku održivost. Čista voda podržava morski život, floru i faunu. Čista voda osigurava fizičko zdravlje te doprinosi psihološkoj i mentalnoj dobrobiti. Ona je od presudne važnosti za održive industrije, poljoprivredu te istraživanje i razvoj. Efikasni pravni i regulatorni okviri, u kombinaciji s primjenom vještačke inteligencije i velikih podataka, ključni su za upravljanje vodnim resursima (slika 10.1).



Slika 10.1. Elementi upravljanja vodama (preuređeno od Ejiohuo et. al., 2025)

Iz hidrobiološke perspektive, zaštita voda podrazumijeva očuvanje prirodnih procesa i biocenoza u akvatičnim ekosistemima. Ključni zadatak je održavanje ekološke ravnoteže, tj. stabilnih odnosa između biotičkih (fitoplankton, zooplankton, bentos, ribe, makrofite) i abiotičkih komponenti (fizičko-hemijski parametri, protok, temperatura, svjetlost). Zagađenja ili hidromorfološki pritisci dovode do promjena u strukturi zajednica: smanjenja osjetljivih vrsta (npr. Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera), povećanja tolerantnih grupa (npr. Oligochaeta, Chironomidae), pojave invazivnih vrsta i smanjenja biodiverziteta. Ove promjene predstavljaju biološke indikatore narušavanja kvaliteta voda. Mjere zaštite, iz hidrobiološke perspektive, uključuju:

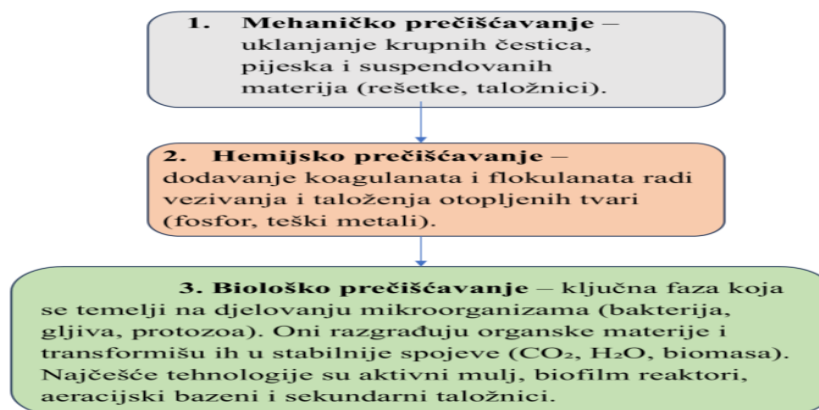
- kontinuirani biomonitoring bioloških elemenata kvaliteta,
- očuvanje prirodnih staništa i migracionih puteva organizama,
- restauraciju oštećenih riječnih i jezerskih ekosistema,
- kontrolu unosa alohtonih organizama i
- očuvanje genetičke raznolikosti populacija.

Zaštita voda stoga nije samo hemijska ili tehnička, već i biološka obaveza, jer očuvanje prirodnih zajednica i ekosistemskih funkcija osigurava dugoročnu stabilnost i otpornost vodenih resursa.

Otpadne vode predstavljaju jedan od najvećih izazova savremenog društva, jer njihov nekontrolisan uticaj ugrožava površinske i podzemne vode, degradira ekosisteme i dovodi u pitanje održivo korištenje vodnih resursa. Povećanje urbanizacije, industrijalizacije i intenzivne poljoprivrede uzrokuje rast količine i složenosti otpadnih voda, uključujući prisustvo hranjivih soli, organskih materija, teških metala, farmaceutika i mikroplastike. Zbog toga tretman otpadnih voda nije samo tehničko pitanje, već i ekološka i društvena obaveza. Osnovni cilj procesa prečišćavanja je uklanjanje onečišćenja do nivoa koji omogućava očuvanje kvaliteta recipijenata i zaštitu biološke raznolikosti. Tradicionalni postupci zasnivaju se na mehaničkom, hemijskom i biološkom tretmanu, dok savremeni pristupi uključuju inovativne tehnologije (membranske sisteme, anaerobne digestore, vještačke močvare, napredne oksidacijske procese) usmjerene ka ponovnoj upotrebi vode, iskorištavanju energije i recikliranju hranjivih materija. Na taj način, otpadne vode sve više postaju resurs, a ne samo problem, čime tretman dobija strateški značaj u kontekstu održivog razvoja i cirkularne ekonomije.

Tretman otpadnih voda obuhvata skup postupaka kojima se uklanjaju ili smanjuju štetne tvari prije njihovog ispuštanja u prirodne recipijente. Cilj je očuvanje kvaliteta površinskih i podzemnih voda, zaštita ljudskog zdravlja i održavanje funkcionalnosti akvatičnih ekosistema.

Tradicionalno, tretman se provodi kroz tri osnovna nivoa mehanički, hemijski i biološki (Shema 10.1).



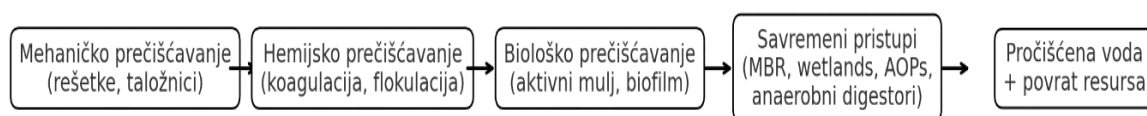
Shema 10.1. Faze prečišćavanja otpadnih voda

Moderni sistemi idu dalje od osnovnog uklanjanja zagađenja i usmjereni su na cirkularnu ekonomiju i očuvanje resursa:

- membranske bioreaktorske tehnologije (MBR) – spajaju biološku razgradnju s membranskom filtracijom, dajući visoko kvalitetnu pročišćenu vodu pogodnu za ponovno korištenje.

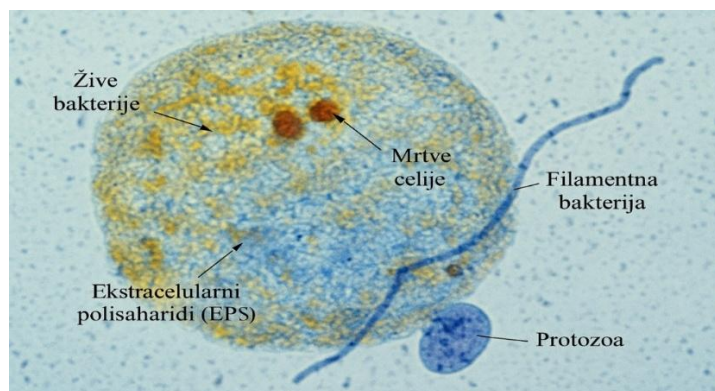
- konstrukcija vještačkih močvara (constructed wetlands) – ekološki pristup koji koristi biljke i mikroorganizme za prirodnu filtraciju i razgradnju.
- anaerobni digestori – omogućavaju proizvodnju biogasa (metan) iz organskog otpada, čime se otpad pretvara u energiju.
- napredne oksidacijske tehnologije (AOPs) – primjena ozona, UV zračenja ili vodikovog peroksida za razgradnju farmaceutika, pesticida i drugih mikropolutanata.
- obnavljanje (recikliranje) nutrijenata – izdvajanje fosfora i dušika iz otpadnih voda za upotrebu u poljoprivredi (npr. u vidu struvita).

Savremeni tretman otpadnih voda sve više se posmatra kroz prizmu održivog upravljanja (shema 10.2.).



Shema 10.2. Proces prečišćavanja otpadnih voda po etapama

Konvencionalni način prečišćavanja otpadnih voda zasniva se na mehaničkom, hemijskom i biološkom tretmanu, kojim se otpadna voda dovodi do kvaliteta prihvatljivog za ispuštanje u recipijente. Proces započinje mehaničkim prečišćavanjem, pri čemu se putem rešetki, sita, pjeskolova i taložnika uklanjaju krupne nečistoće, pijesak i suspendirane čestice. Na taj način smanjuje se opterećenje narednih faza i štiti postrojenje od oštećenja. Nakon toga slijedi hemijsko prečišćavanje, gdje se dodavanjem koagulanata i flokulanata vezuju fine čestice i uklanjaju otopljeni nutrijenti, prije svega fosfor. Središnji dio konvencionalnog procesa predstavlja biološko prečišćavanje, u kojem mikroorganizmi, uglavnom bakterije, u aerobnim uvjetima razgrađuju organske tvari. U procesu biološkog prečišćavanja ključnu ulogu imaju mikroorganizmi koji koriste organske tvari kao izvor energije i hrane. Oni razgrađuju složene organske spojeve poput proteina, ugljikohidrata i lipida na jednostavnije produkte, ugljični dioksid, vodu, nitrate, sulfate i fosfate. Tokom ovog procesa bakterije stvaraju flokule aktivnog mulja (slika 10.2), u kojima se zajedno s organskim česticama povezuju u veće nakupine. Te nakupine omogućavaju da se u naknadnom taložniku odvoji pročišćena voda od biomase. Flokul aktivnog mulja je nakupina mikroorganizama (pretežno bakterija), čestica organske i anorganske materije (npr. sitnih mineralnih supstanci, detritusa), povezanih sluzavim matricama, ekstracelularnim polisaharidima i proteinima (EPS). Flokul aktivnog mulja predstavlja živu mikrobiološku zajednicu u kojoj bakterije čine osnovu. One se povezuju u kolonije i proizvode EPS i proteine koji „lijepe“ čestice zajedno. Mrtve bakterijske ćelije i organski ostaci također se ugrađuju u strukturu flokula, ali nisu dominantni, nego se inkorporiraju u matriks. Filamentozne bakterije (npr. *Sphaerotilus*, *Microthrix*) formiraju svojevrsni „skelet“ flokula i povezuju manje nakupine u veće strukture. Protozoe i metazoa (trepetljikaši, rotiferi, nematode) žive unutar ili na površini flokula, hrane se bakterijama i doprinose stabilnosti sistema. U flokule se često ugrađuju i anorganske čestice (glina, pijesak, metalni oksidi). Grupisanje mikroorganizama u flokule omogućava taloženje biomase i učinkovito odvajanje pročišćene vode od čvrstih tvari.



Slika 10.2. Struktura flokule (autori: prilagođeno)

Najčešće prisutne grupe bakterija u ovim procesima su:

- Heterotrofne bakterije (npr. *Pseudomonas*, *Zooglea ramigera*, *Flavobacterium*) koje razgrađuju organske tvari i sudjeluju u formiranju flokula,
- Nitrifikacijske bakterije: *Nitrosomonas* (pretvaraju amonijak u nitrit) i *Nitrobacter* (pretvaraju nitrit u nitrat) i
- Denitrifikacijske bakterije (npr. *Paracoccus denitrificans*, *Pseudomonas denitrificans*) koje u anoksičnim uvjetima redukuju nitratre do elementarnog dušika (N_2).

Pored bakterija, u aktivnom mulju prisutni su i protozoe (trepetljikaši, amebe), rotiferi i nematode, koji se hrane slobodno lebdećim bakterijama i održavaju ravnotežu mikrobne zajednice, čime dodatno poboljšavaju kvalitetu pročišćene vode. Najčešće se primjenjuju sistemi aktivnog mulja ili biofilm reaktori. Na kraju se biomasa taloži u sekundarnim taložnicima, a voda se po potrebi dodatno dezinfikuje, najčešće hlorisanjem ili UV zračenjem. Prednosti ovakvog pristupa ogleda se u njegovoj pouzdanosti i dugogodišnjoj primjeni, koja ga čini standardom u zaštiti voda. Konvencionalni tretman je relativno jednostavan za implementaciju, može se primijeniti na različitim kapacitetima postrojenja i omogućava značajno smanjenje organskog opterećenja, suspendovanih materija i nutrijenata. Međutim, proces je energetski zahtjevan, naročito u fazi aeracije, a nusproizvod je velika količina mulja koji zahtijeva dodatnu obradu i odlaganje. Također, konvencionalni sistemi nisu dovoljno efikasni za uklanjanje mikropolutanata poput farmaceutika, pesticida, hormona ili mikroplastike, niti pružaju mogućnost povrata resursa iz otpadnih voda. Iako konvencionalni tretman i dalje predstavlja osnovu upravljanja otpadnim vodama u većini urbanih sredina, njegovu nadogradnju sve više zahtijevaju izazovi savremenog društva i potreba za održivim korištenjem resursa.

10.1. Prirodni (biološki) tretmani otpadnih voda

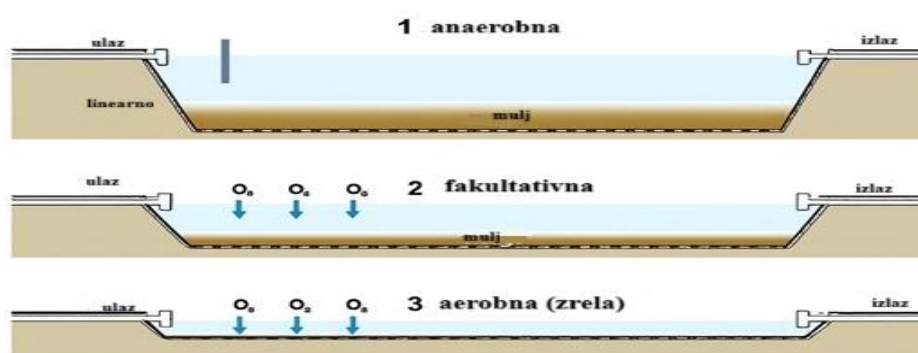
Prirodni ili ekološki tretmani otpadnih voda temelje se na procesima koji se prirodno odvijaju u ekosistemima, djelovanju mikroorganizama, makrofitnih biljaka, tla i sunčeve energije. Za razliku od konvencionalnih postrojenja, oni koriste biološku razgradnju i samoprečišćavajuću sposobnost prirodnih sistema, uz minimalno tehničko održavanje i manju potrošnju energije.

Osnovne metode:

1. Stabilizacijske lagune

Velike plitke lagune u kojima mikroorganizmi (aerobni i anaerobni) razgrađuju organske tvari. Sunčeva svjetlost i fotosintetske alge doprinose obogaćivanju kiseonikom. Otvorena vodna tijela u kojima se otpadni otrovni mulj tretira procesima koji se prirodno odvijaju uticajem svjetlosti, mikroorganizama, vjetra i algi u mulju, navodnjavajuću vodu i biogas. Postoje tri vrste laguna aerobna, anaerobna i fakultativna (slika 10.1.1).

- Anaerobne lagune: Duboke (3–5 m), bez prisustva kiseonika; razgradnja organske materije odvija se anaerobno. Uklanjanje visokih koncentracija organskog opterećenja (visok BPK₅). Stvara se metan, ugljični dioksid i sulfidni spojevi (često neugodni mirisi). Primjena za industrijske otpadne vode ili komunalne vode s vrlo visokim organskim opterećenjem.
- Fakultativne lagune: Srednje duboke (1,5–2,5 m), u gornjem sloju dominira aerobni proces (zahvaljujući fotosintezi algi i difuziji kiseonika), dok je dno anaerobno. Kombinacija aerobne i anaerobne razgradnje organske materije. Višenamjenski proces, efikasan za razgradnju i stabilizaciju. Najčešći oblik za komunalne otpadne vode u malim i srednjim naseljima.
- Aerobne (zrele, maturacijske) lagune: Plitke (0,5–1,5 m), potpuno prozračene difuzijom i fotosintezom algi. Uklanjanje preostalih nutrijenata (azot, fosfor) i patogena nakon anaerobne ili fakultativne obrade. Pruža visok nivo dezinfekcije prirodnim putem (UV zračenje + kiseonik). Završni tretman komunalnih otpadnih voda, posebno gdje je ispuštanje u recipijente osjetljivo (rijeke, jezera).

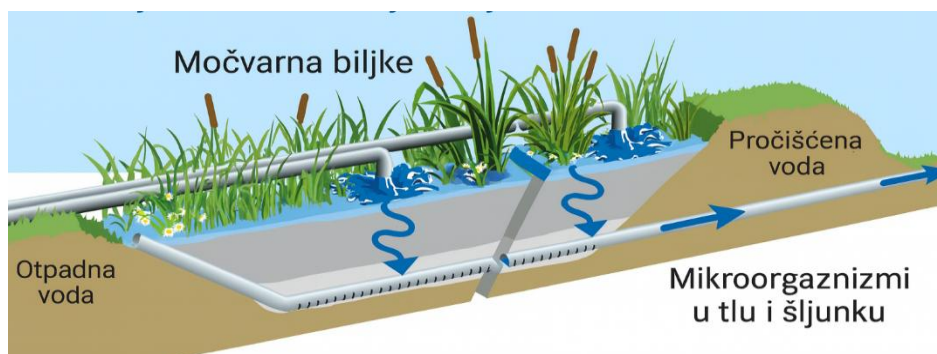


Slika 10.1.1. Stabilizacijska laguna (anaerobna, aerobna i fakultativna)(<https://en.wikipedia.org/wiki/>)

Prva namjenski konstruisana stabilizacijska laguna izgrađena je 1920-ih godina u Južnoj Africi (Durbanu). Ubrzo nakon toga koncept se širi u druge zemlje s toplijom klimom (Latinska Amerika, Australija), gdje su lagune bile posebno pogodne zbog sunčeve svjetlosti i visokih temperatura koje potiču biološke procese. Danas su stabilizacijske lagune jedan od najstarijih i najraširenijih prirodnih sistema obrade otpadnih voda, naročito u ruralnim i manje razvijenim područjima. Primjena: manja naselja, ruralna područja.

2. Vještačke močvare (eng. Constructed Wetlands)

Sistemi bazirani na biljkama močvarica npr. trska *Phragmites*, rogoz *Typha*). Tlo, biljke i mikrobi formiraju filter kroz koji protiče otpadna voda (slika 10.1.2). Prednost: uklanjaju organske tvari, nutrijente, pa čak i teške metale.



Slika 10.1.2. Vještačka močvara (prilagođeno www.epa.gov/wetlands/constructed-wetlands)

Infiltracijsko-perkolacijski sistemi funkcionišu tako što se otpadna voda propušta kroz slojeve pijeska i šljunka, pri čemu mikroorganizmi vrše razgradnju organskih materija. Ovi sistemi su pogodni za pročišćavanje manjih količina komunalnih voda.

Prirodni biljni filteri i ribnjaci predstavljaju ekstenzivne tretmane koji koriste vodene biljke, mikroorganizme i ribe kako bi oponašali prirodne procese samoopročišćavanja.

Prednosti prirodnih tretmana uključuju nisku potrošnju energije i niže troškove održavanja, mogućnost integracije u pejzaž, estetsku i edukativnu vrijednost te visoku efikasnost u uklanjanju organskog opterećenja i nutrijenata.

Također doprinose povećanju biodiverziteta i stvaranju staništa za ptice i druge organizme. Međutim, ovi sistemi zahtijevaju veliku površinu zemljišta, pokazuju smanjenu efikasnost pri naglim promjenama hidrauličkog ili organskog opterećenja, imaju ograničenu sposobnost uklanjanja mikropolutanata i mogu biti povezani s pojavom neugodnih mirisa i komaraca, naročito u lagunama.

10.2. Zakonska legislativa u oblasti zaštite voda

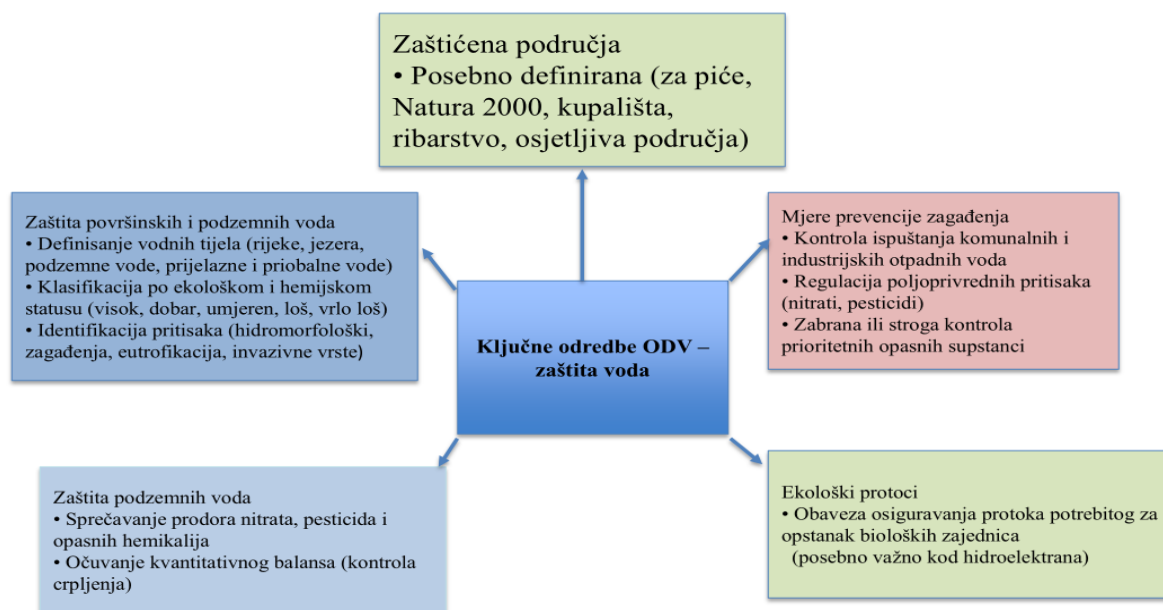
Protokoli u zaštiti voda (tabela 10.2.1) obuhvataju ključne međunarodne, evropske, nacionalne i tehničke dokumente, od multilateralnih konvencija do operativnih procedura koje se koriste u praksi upravljanja i tretmana voda.

Tabela 10.2.1. Pregled zakonske legislative u oblasti zaštite voda

Nivo	Dokument / Protokol	Godina	Glavni cilj / značaj
Međunarodni	Konvencija o biodiverzitetu (CBD, Rio)	1992	Očuvanje i održivo korištenje biodiverziteta, uključujući vodene ekosisteme
	Ramsarska konvencija	1971	Zaštita močvara i vodenih staništa od međunarodnog značaja
	Helsinška konvencija (UNECE)	1992	Zaštita i korištenje prekograničnih vodotoka i međunarodnih jezera
	Barselonska konvencija (Sredozemlje)	1976/1995	Sprečavanje zagađenja i zaštita obalnih voda
	Protokol o vodi i stabilnosti (London)	1999	Povezuje upravljanje vodama sa zaštitom zdravlja ljudi
EU direktive	Okvirna direktiva o vodama (WFD 2000/60/EC)	2000	Postizanje dobrog ekološkog i hemijskog statusa svih voda
	Direktiva o komunalnim otpadnim vodama (91/271/EEC)	1991	Tretman i ispuštanje otpadnih voda
	Direktiva o vodi za piće (98/83/EC; 2020/2184)	1998/2020	Kvalitet vode za ljudsku potrošnju
	Direktiva o podzemnim vodama (2006/118/EC)	2006	Prevenција zagađenja podzemnih voda
	Direktiva o poplavama (2007/60/EC)	2007	Procjena i upravljanje rizicima od poplava
	Direktiva o prioritetnim supstancama (2008/105/EC)	2008	Standardi za hemijske supstance u vodama
	Direktiva o nitratu (91/676/EEC)	1991	Zaštita od poljoprivrednog zagađenja
	Direktiva o staništima i pticama (Natura 2000)	1992 / 2009	Zaštita vodenih i močvarnih staništa
Nacionalni (BiH)	Zakon o vodama FBiH / RS	2006+	Pravna osnova za upravljanje i zaštitu voda
	Strategija upravljanja vodama BiH	-	Usklađivanje s EU direktivama
	Planovi upravljanja AVP Sava i AVP Mostar; Vode Srpske Bijeljina	-	Monitoring i zaštita površinskih i podzemnih voda
	Pravilnici o kvalitetu i ispuštanju voda	-	Granične vrijednosti emisija i kontrola zagađenja

10.3. Okvirna direktiva o vodama (2000/60/EC, WFD)

Predstavlja „ustav“ zaštite voda u EU, a time i obavezu za BiH (koja je u procesu usklađivanja zakonodavstva). Ključne odredbe za zaštitu voda su zaštita površinskih i podzemnih voda, mjere preencije zagađenja, zaštita podzemnih voda, ekološki protoci, zaštićena područja (Shema 10.2.1).



Shema 10.3.1. Prikaz ključnih odredbi država ODV-a usmjerenih na zaštita voda

Prema čl. 13 i 14 ODV, svaka mora izraditi Plan upravljanja za svako vodno područje, koji uključuje više zadataka iz oblasti zaštite i upravljanja vodama (tabela 10.3.1).

Tabela 10.3.1 Ključne odredbe plana upravljanja vodama

Ključna oblast	Sadržaj
Analiza karakteristika sliva	- Hidrološke, geomorfološke i ekološke osobine - Identifikacija pritisaka i rizika
Monitoring program	- Biološki (fitoplankton, fitobentos, makrofiti, makrozoobentos, ribe) - Hemijski (nutrijenti, metali, organska jedinjenja) - Hidromorfološki (režim protoka, morfologija korita)
Program mjera	- Osnovne mjere: primjena postojeće EU i nacionalne regulative (tretman otpadnih voda, nitrati, pesticidi) - Dodatne mjere: restauracija rijeka, kontrola erozije, revitalizacija močvara, upravljanje invazivnim vrstama
Ekonomska analiza	- Troškovi i koristi u primjeni mjera- Princip „korisnik plaća“ i „onečišćivač plaća“
Učešće javnosti	- Obaveza informisanja, konsultacija i uključivanja javnosti u izradu plana
Obaveze izvještavanja	- Planovi se donose na 6 godina - Obaveza izvještavanja Evropskoj komisiji (u BiH – EU integracijski mehanizam)

BiH ima dva vodna područja: podsliv rijeke Save (Crnomorski sliv), Jadransko more, te prekogranične slivove.

- Agencije za vodno područje (AVP Sava u Sarajevu i AVP Jadransko more u Mostaru) izrađuju Planove upravljanja vodnim područjem (prvi ciklus bio 2016–2021, sada 2022–2027).

- Planovi su rađeni u skladu s WFD, ali uz kašnjenja i djelimičnu primjenu zbog institucionalnih i finansijskih ograničenja.

Zaštita voda prema Okvirnoj direktivi o vodama i PUV (Plan upravljanja vodnim područjem) zasniva se na:

- integrisanom slivnom pristupu;
- obavezi da se spriječi pogoršanje i postigne dobar status voda;
- kontinuiranom monitoringu i reviziji planova na svakih 6 godina;
- primjeni ekonomskih instrumenata i učešću javnosti.

10.4. Analiza pritiska na vodne ekosisteme

Analiza pritiska predstavlja jedan od ključnih koraka u okviru karakterizacije vodnih tijela, kako to propisuje ODV (WFD, 2000/60/EC). Njena osnovna svrha je identifikacija i procjena ljudskih aktivnosti koje mogu negativno uticati na ekološki i hemijski status površinskih voda, te na kvantitativni i hemijski status podzemnih voda. Analiza pritiska se provodi radi utvrđivanja stepena uticaja pritiska na kvalitet voda, ispunjavanje propisanih namjena vodnih tijela, te na stanje o vodi ovisnih ekosistema (riparijske zone, močvare, bare, izvorišta, riblje populacije i dr.). Rezultati analize omogućavaju prepoznavanje rizika od nepostizanja „dobrog stanja“ voda, što je temeljni cilj ODV, i time postavlja osnovu za definiranje programa mjera i planova upravljanja.

Analiza pritiska obuhvata različite kategorije uticaja, koje se u planovima upravljanja vodama sistematiziraju u tri osnovne grupe:

- a) Hidromorfološki pritisci: Ova grupa uključuje sve intervencije koje mijenjaju prirodne morfološke i hidrološke osobine vodotoka i vodenih tijela. To su, prije svega, regulacije i kanalizacija korita, izgradnja obaloutvrda i nasipa, izgradnja hidroenergetskih objekata i akumulacija, eksploatacija šljunka i pijeska, preusmjeravanja vodnih tokova te drenaža i isušivanje močvara. Hidromorfološki pritisci značajno utiču na režim protoka, povezanost staništa i dinamiku ekosistema.
- b) Pritisci od zagađenja: Ovdje se ubrajaju svi oblici emisija i difuznih izvora zagađenja. Posebno su značajni komunalni i industrijski ispusti otpadnih voda, koji unose organsko opterećenje, nutrijente i opasne supstance. Poljoprivreda predstavlja jedan od glavnih izvora nitrata i pesticida, kao i erozije tla i unošenja suspendovanih materija u vodotoke. Rudarska i industrijska postrojenja mogu biti izvori teških metala, kiselih mina voda i ulja, dok saobraćaj i deponije unose soli, mikroplastiku i različite hemikalije.
- c) Biološki pritisci: biološki pritisci odnose se na promjene u biološkoj strukturi ekosistema izazvane antropogenim djelovanjem. Najznačajniji su unos i širenje invazivnih vrsta (npr. školjka *Dreissena polymorpha* ili riba *Carassius gibelio*), te poribljavanje alohtonim vrstama riba koje narušavaju prirodnu ravnotežu zajednica.

Proces analize pritiska obuhvata nekoliko koraka:

- Inventarizacija izvora pritisaka, koja podrazumijeva prikupljanje podataka iz registara postrojenja, komunalnih sistema, industrijskih i poljoprivrednih aktivnosti, te hidroenergetskih objekata.
- Kvantifikacija emisija i opterećenja, uključujući procjenu unosa nutrijenata, suspendovanih materija i opasnih supstanci u vodne tokove.
- Povezivanje izvora pritisaka s vodnim tijelima, s ciljem da se utvrdi odnos između aktivnosti u slivu i stvarnog stanja voda.
- Procjena značaja pritisaka, kojom se određuje da li identificirani pritisci mogu ugroziti postizanje dobrog ekološkog ili hemijskog statusa.

Rezultati analize pritisaka prikazuju se u više oblika. Najčešće se koriste karte, na kojima su označeni izvori zagađenja, lokacije akumulacija, degradirana korita i zone ugroženosti. Također se izrađuju tabele, koje daju pregled pritisaka po pojedinačnim vodnim tijelima. Konačno, pritisci se vrednuju kroz ocjenu rizika:

- Nizak rizik – pritisci nemaju značajan uticaj na stanje voda.
- Umjeren rizik – postoji mogućnost narušavanja stanja, pa su potrebna dodatna praćenja.
- Visok rizik – postoji visoka vjerovatnoća da neće biti postignut dobar status voda bez provođenja dodatnih mjera.

Analiza pritisaka u planovima upravljanja u Bosni i Hercegovini jasno pokazuje raznovrsnost problema u različitim slivovima:

- u podslivu rijeke Bosne dominantni su pritisci od industrijskog i komunalnog zagađenja, kao i od rudarske eksploatacije;
- u podslivu rijeke Neretve najizraženiji su hidroenergetski pritisci, uključujući brane i akumulacije koje mijenjaju prirodni režim protoka i utiču na biološke zajednice;
- u podslivu Save i Drine značajni su problemi eutrofikacije i širenja invazivnih vrsta i
- kod podzemnih voda u Posavini prepoznati su rizici od nitrata i pesticida, uslovljeni intenzivnom poljoprivrednom proizvodnjom.

Karakterizacijski izvještaj je temeljni dokument u implementaciji ODV i predstavlja polaznu osnovu za izradu planova upravljanja vodama. Njegova svrha je da pruži sveobuhvatan pregled stanja vodnih resursa na jednom slivnom području. Karakterizacijski izvještaj sadrži više cijelina usmjerenih na procjenu prirodnosti i očuvanosti površinskih i podzemnih voda.

Opis prirodnih karakteristika sliva; U ovom dijelu iznose se osnovne geografske, hidrološke i geomorfološke karakteristike. Obuhvaćene su klimatske osobine, hidrološki režim, tipovi i podtipovi vodnih tijela (rijeke, jezera, podzemne vode, prijelazne i priobalne vode), kao i ekološke i biološke osobine sliva. Često se prilažu i kartografski prikazi sa granicama sliva i podslivova.

Identifikacija i klasifikacija vodnih tijela: Ova cjelina uključuje izdvajanje i tipologiju površinskih i podzemnih vodnih tijela. Površinske vode se razvrstavaju prema ekološkim tipovima (npr. planinske rijeke, nizinske rijeke, prirodna i umjetna jezera), dok se podzemne

vode definišu prema hidrogeološkim cjelinama. Za svako vodno tijelo određuju se granice i osnovne osobine. Poseban segment izvještaja odnosi se na utvrđivanje antropogenih pritisaka. To uključuje hidromorfološke izmjene (regulacije, brane, eksploatacija materijala), zagađenja iz tačkastih i difuznih izvora (otpadne vode, poljoprivreda, industrija), kao i biološke pritiske (invazivne vrste, unošenje alohtonih organizama). U okviru ovog poglavlja procjenjuje se rizik da određeno vodno tijelo neće postići „dobar status“ do planiranog roka.

Monitoring program: Definišu se elementi praćenja stanja voda: biološki (fitoplankton, makrofiti, makrozoobentos, ribe), hemijski (nutrijenti, prioritetne supstance, metali) i hidromorfološki (režim protoka, morfologija korita). Ovdje se utvrđuje mreža mjernih stanica i metodologija praćenja.

Zaštićena područja: Identifikuju se posebne zone unutar sliva koje uživaju poseban režim zaštite, kao što su izvorišta za piće, područja Natura 2000, kupališta, ribarska područja i osjetljiva područja u pogledu eutrofikacije ili emisija opasnih supstanci.

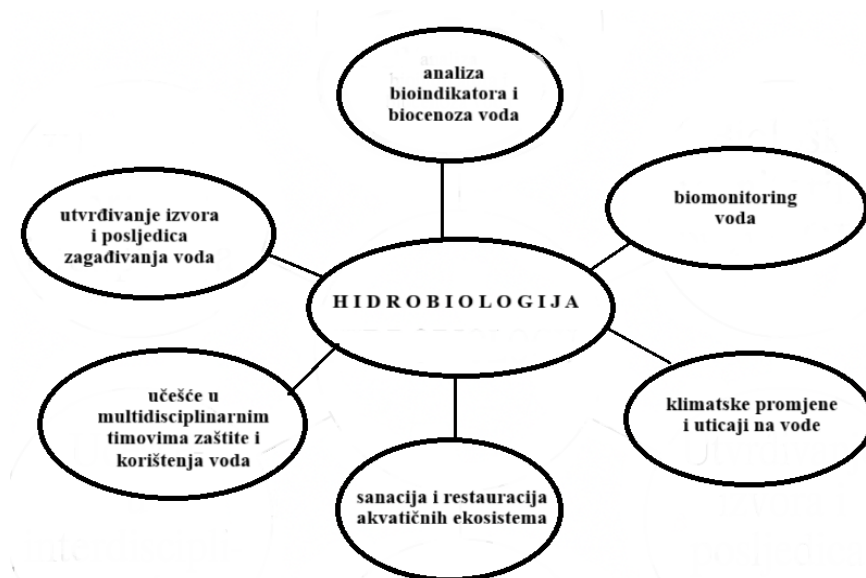
Ekonomska analiza korištenja voda: Obuhvata procjenu troškova i koristi vezanih za upotrebu i zaštitu voda, uključujući primjenu principa „korisnik plaća“ i „onečišćivač plaća“. Analiza doprinosi planiranju finansijski održivih mjera i utvrđivanju prioriteta.

Učešće javnosti i institucionalni okvir: ova cjelina naglašava obavezu uključivanja javnosti i svih relevantnih aktera u proces izrade i primjene planova. Također opisuje institucionalni okvir nadležnih organa za vode, okoliš i prostorno planiranje.

Obaveze izvještavanja i ciklus planiranja: Na kraju se naglašava da se karakterizacijski izvještaj i planovi upravljanja izrađuju u šestogodišnjim ciklusima, uz obavezu izvještavanja prema Evropskoj komisiji. U BiH se ovaj proces vodi kroz EU integracijski mehanizam.

10.5. Uloga hidrobiologije u zaštiti i zagađenju voda

Hidrobiologija ima ključnu ulogu u proučavanju, praćenju i sanaciji zagađenja vodenih ekosistema. Kao interdisciplinarna nauka, ona povezuje biologiju, hemiju, fiziku i hidrologiju u cilju razumijevanja načina na koji zagađivači utiču na biološke zajednice i funkcionisanje vodenih ekosistema (shema 10.5.1).



Shema 10.5.1. Uloga hidrobiologije u zaštiti i zagađenju voda

Hidrobiologija ima ključnu ulogu u analizi bioindikatora i biocenoza vodenih ekosistema, čime se omogućava razumijevanje njihove strukture, funkcionalnosti i ekološke stabilnosti. Hidrobiolozi analiziraju biološke indikatore i sastav biocenoza (fitoplankton, perifiton, makrofite, makrozoobentos, ribe) kako bi utvrdili stepen očuvanosti ekosistema i prisustvo poremećaja izazvanih antropogenim uticajima. Promjene u sastavu i brojnosti vrsta unutar biocenoze ukazuju na organsko, hemijsko ili biološko zagađenje, kao i na degradaciju staništa. Posebnu pažnju hidrobiolozi posvećuju detekciji i praćenju invazivnih vrsta, koje predstavljaju oblik biološkog zagađenja. Analizom strukture biocenoze i identifikacijom invazivnih taksa hidrobiolozi prepoznaju rane pokazatelje degradacije, što omogućava pravovremeno planiranje preventivnih mjera za očuvanje ekološke ravnoteže.

Hidrobiologija čini osnovu biološkog monitoringa prema ODV. Biološki parametri služe za procjenu:

- ekološkog statusa površinskih voda,
- ekološkog potencijala vještačkih i znatno izmijenjenih voda,
- efekata antropogenih pritisaka (industrija, poljoprivreda, otpadne vode, hidroenergetski zahvati).

Primjenjuju se indeksi (npr. Saprobni indeks, te biotički indeksi EBI, BMWP, ASPT, kao i indeksi diverziteta), koji kvantifikuju stepen zagađenja kroz biološki odgovor ekosistema.

Utvrđivanje izvora i posljedica zagađenja: Hidrobiološka istraživanja omogućavaju da se precizno identifikuju:

- tačkasti izvori zagađenja (ispusti otpadnih voda, kanalizacije, industrijski ispusti),
- difuzni izvori zagađenja (poljoprivredno zemljište, erozija, deponije).

Na osnovu promjena u sastavu biocenoze, hidrobiolozi mogu prepoznati i hronična, dugotrajna zagađenja koja se ne mogu utvrditi samo hemijskim analizama.

Sanacija i restauracija vodenih ekosistema: Rezultati hidrobioloških istraživanja koriste se pri planiranju:

- restauracije vodnih tijela (npr. revitalizacija močvara, jezera, riječnih tokova),
- upravljanja biološkim resursima (ribljim fondom, makrofitskim zajednicama),
- određivanja biološkog minimuma (ekološkog protoka),
- kontrole eutrofikacije i invazivnih vrsta.

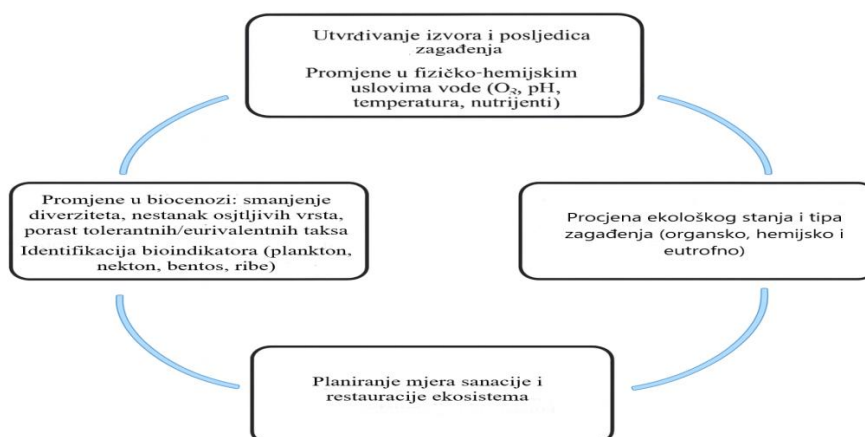
Uloga hidrobiologa u interdisciplinarnim timovima: Hidrobiolozi učestvuju u izradi:

- elaborata o procjeni uticaja na okoliš,
- planova upravljanja vodnim područjima,
- monitoringa kvaliteta voda i
- Natura 2000 i Ramsar projekata.

Hidrobiologija ima ključnu ulogu u praćenju, analizi i tumačenju posljedica klimatskih promjena na biocenoze vodenih ekosistema. Klimatske promjene mijenjaju temperaturni režim, hidrološku dinamiku, hemijski sastav i biološku strukturu voda, što direktno utiče na ekološku ravnotežu i funkcionalnost vodenih zajednica. Hidrobiolozi kroz dugoročna praćenja bioloških elemenata kvaliteta (fitoplankton, makrozoobentos, makrofite, ribe) i ekoloških parametara utvrđuju:

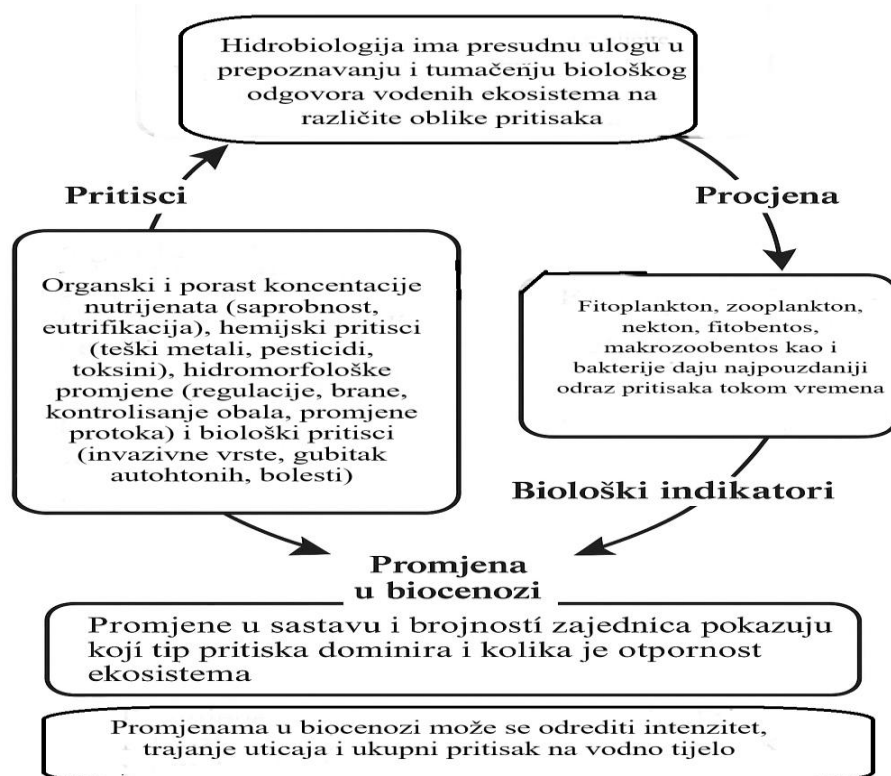
- promjene u sezonskoj dinamici i fenologiji vrsta (raniji razvoj, duže vegetacione faze),
- pomjeranje areala i gubitak hladnovodnih taksa, naročito u planinskim i krškim ekosistemima,
- pojavu termofilnih i invazivnih vrsta koje mijenjaju strukturu zajednica,
- smanjenje rastvorljivosti kiseonika i porast biološke potrošnje kiseonika (BPK),
- poremećaje u proizvodno–destruktivnoj ravnoteži i kruženju materije.

Na globalnom nivou, hidrobiološka istraživanja doprinose razumijevanju uticaja porasta temperature i nivoa mora na priobalne i estuarijske sisteme. Uticaja povećane frekvencije suša i poplava na kontinentalne vode, zakiseljavanja okeana i eutrofikacije, te promjena u karbonskom ciklusu i emisijama metana iz vodenih tijela. Kroz integraciju bioloških i fizičko-hemijskih podataka, hidrobiologija pruža naučne osnove za adaptacione strategije, predviđanje ranjivosti ekosistema i planiranje održivog upravljanja vodnim resursima u uslovima klimatskih promjena. Analiza bioloških komponenti dopunjuje fizičko-hemijske i hidromorfološke pokazatelje, čime se postiže cjelovita procjena ekološkog integriteta vodenih ekosistema (shema 10.5.2).



Shema 10.5.2. Značaj i uloga hidrobiologije u oblasti zagađenja i zaštite voda

Značaj hidrobiologije u procjeni pritisaka na vode: Hidrobiologija ima ključnu ulogu u procjeni pritisaka koji djeluju na vodene ekosisteme, jer omogućava razumijevanje načina na koji različiti antropogeni uticaji mijenjaju strukturu i funkciju živog svijeta u vodi. Za razliku od hemijskih i fizičkih analiza koje prikazuju trenutno stanje, hidrobiološki pokazatelji odražavaju dugoročne, kumulativne i sinergijske efekte pritisaka, pa predstavljaju najpouzdaniji pokazatelj stvarnog ekološkog integriteta vodenog tijela. Biološke zajednice, fitoplankton, fitobentos, makrozoobentos, makrofite i ribe, reagiraju na sve oblike pritisaka: organske i nutrijentne, hemijske, hidromorfološke ili biološke. Promjene u njihovom sastavu, brojnosti i dominaciji ukazuju na to koji tip pritiska dominira i u kojem je stepenu narušena ekološka ravnoteža. Primjerice, dominacija tolerantnih vrsta bentosa upućuje na organsko zagađenje, dok smanjenje diverziteta riba i nestanak reofilnih vrsta može značiti hidromorfološku degradaciju ili smanjeni protok. Hidrobiološki pokazatelji imaju i integrativni značaj: u njima se „ogledaju“ sve promjene koje su se odvijale tokom vremena, pa oni predstavljaju svojevrsnu „memoriju ekosistema“ (shema 10.5.3). Analiza biocenoze omogućava ne samo procijenu trenutnog stanja, nego i trajanje, intenzitet i tip pritiska, kao i sposobnost ekosistema da se oporavi nakon prestanka uticaja. Time hidrobiologija postaje nezamjenjiva u procjeni rizika i određivanju vjerovatnoće da vodno tijelo ne postigne dobro ekološko stanje. U primjeni, hidrobiolozi učestvuju u povezivanju bioloških pokazatelja s hemijskim i hidromorfološkim parametrima, čime se dobija cjelovita slika uticaja čovjeka na vodene ekosisteme. Na taj način, hidrobiologija ne samo da opisuje stanje, nego i doprinosi planiranju mjera zaštite, restauracije i održivog korištenja voda.



Shema 10.5.3. Uloga hidrobiologije u prepoznavanju pritisaka i biološkog odgovora vodenih ekosistema

Hidrobiološka istraživanja imaju i edukativni, planerski i preventivni značaj. Rezultati se koriste za izradu strategija zaštite voda, strategiju o vodama, identifikaciju prioriternih područja za očuvanje biodiverziteta i procjenu rizika od degradacije ekosistema. U modernim pristupima upravljanja vodama, hidrobiološki podaci integrišu se s GIS analizama, modelima toka i socio-ekonomskim pokazateljima, što omogućava donošenje održivih odluka u skladu s principima ekosistemskog upravljanja i klimatske adaptacije

11. Literatura

- Agassiz, L. (1850). *Lake Superior: Its physical character, vegetation, and animals*. Boston: Gould, Kendall and Lincoln.
- Allan, J. (1995). *Stream ecology, structure and function of running waters*. London, Chapman & Hall, 388 pp.
- Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*. 2nd edition. Dordrecht: Springer.
- Alsaleh, M. (2024). The impact of aquaculture economics expansion on marine water quality in the EU Region, *Regional Studies in Marine Science*, 77, 103625.
- AQEM consortium (2002). *Manual for the application of the AQEM system. A comprehensive method to assess European streams using benthic macroinvertebrates, developed for the purpose of the Water Frame Directive*. Version 1.0.
- Baldi, E. (1949). The biological cycle of Lake Maggiore. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, 5, 1–90.
- Ballesteros, E. (2006). Mediterranean coralligenous assemblages: A synthesis of present knowledge. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 44, 123–195.
- Banarescu, P. (1972). Types of distributions among freshwater animals. *Rev. Roum. Boil. – Zool.*, 17, 3: 23–30.
- Bauernfeind, E., Humpesch, U.H. (2001). *Die Eintagsfliegen Zentraleuropas (Insecta: Ephemeroptera). Bestimmung und Ökologie*. Verlag des Naturhistorischen Museums Wien, 239 pp.
- Baustian, M. M., Hansen, G. J. A., de Kluijver, A., Robinson, K., Henry, E. N., Knoll, L. B., Rose, K. C., & Carey, C. C. (2014). *Linking the bottom to the top in aquatic ecosystems: mechanisms and stressors of benthic-pelagic coupling*. In P. F. Kemp (Ed.), *Eco-DAS X Symposium Proceedings* (pp. 25–47). Association for the Sciences of Limnology and Oceanography (ASLO)
- Belkin, S., Urbanič, G., et al. (2019). Developing a standard approach for assessing the hydromorphology of lakes in Europe. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(3), 345–359.
- Berg, K. (1938). Studies on the bottom animals of Esrom Lake. *Biologiske Skrifter*, 3, 1–255.
- Bešta-Gajević, R., Sulejmanović, J., Selović, A. et al. (2025). Exploring *Barbus Meridionalis Petenyi* Heckel, 1847 as a Bioindicator of Aquatic Pollution in Miljacka River, Bosnia and Herzegovina. *Water Air Soil Pollut* 236, 955
- Bonacci, O. (2003). *Ekohidrologija*. Split: Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.

- Birge, E.A., Juday, C. (1922). *The inland lakes of Wisconsin: The plankton*. Madison: Wisconsin Geological and Natural History Survey.
- Cummins, K.W. (1962). An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. *Am.Midl.Nat.*, 67, 477-504.
- Cummins, K. W., & Klug, M. J. (1979). *Feeding ecology of stream invertebrates*. Annual Review of Ecology and Systematics, 10, 147–172.
- Cummins, K.W., Minshall, G.W., Cushing, C.E., Peterson, R.C. (1984). Stream ecosystem theory. *Verhandlungen internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, 22: 1818–1827.
- Delebecque, A. (1898). *Les lacs français*. Paris: Chamerot et Renouard.
- Dussart, B. (1966). *Limnologie: L'étude des eaux continentales*. Paris: Gauthier-Villars.
- Dug, S., Drešković, N., Trožić-Borovac, S., Mušović, A., Vesnić, A., Trakić, S., Gajević, M., Bešta Gajević, R., Šljuka, S., Mirić, R., Korjenić, E., Škrijelj, R. (2020). Biomonitoring akvatičnih ekosistema Izdavač. Univerzitet u Sarajevu, pp. 343
- Đukić, A.D., Gajin, K.S., Matavulj, N.M., Mandić, G.L. (2000). Mikrobiologija voda. IP Prosveta A.D., Beograd, 279 pp.
- Eggleton, F. E. (1931). A limnological study of the profundal bottom fauna of certain freshwater lakes. *Ecological Monographs*, 1, 231–331.
- Einsele, W. (1936). Über den Stoffhaushalt von Seen. *Archiv für Hydrobiologie*, 30, 664–686.
- Ekman, S. (1915). *Tiergeographie der Binnengewässer*. Leipzig: Barth.
- Ekman, S. (1922). Zoogeography of the Swedish freshwater fauna. *Arkiv för Zoologi*, 14, 1–76.
- Ejiohuo, O., Onyeaka, H., Akinsemolu, A., Forstinus, O., Favour Siyanbola, Phemelo. N.K., Zainab, T. Al-Sharify, T. (2025). Ensuring water purity: Mitigating environmental risks and safeguarding human health, *Water Biology and Security*, 4, (2), 100341,
- Elster, H. J. (1958). Limnology and water management. *Archiv für Hydrobiologie*, 54, 1–20.
- Ercegović, A. (1949). Život u moru – biologijska oceanografija. Izdavački zavod Jugoslavenske Akademije znanosti i umjetnosti. Zagreb, 412p
- European Union (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy (Water Framework Directive). Official Journal of the European Communities, L327, 1–73.
- Evans, D.H. (1980). Osmotic and Ionic Regulation by Freshwater and Marine Fishes. In: Ali, M.A. (eds) *Environmental Physiology of Fishes*. NATO Advanced Study Institutes Series, vol 35. Springer, Boston, MA.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied hydrogeology* (4th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

- Findenegg, I. (1935). Limnologische Untersuchungen an Kärntner Seen. *Archiv für Hydrobiologie*, 28, 1–60.
- Forbes, S. A. (1887). The lake as a microcosm. *Bulletin of the Scientific Association of Peoria*, 1887, 77–87.
- Forel, F.A. (1892). Le Léman: Monographie limnologique (Tome 1). Lausanne: F. Rouge.
- Forel, F.A. (1895). Le Léman: Monographie limnologique (Tome 2). Lausanne: F. Rouge.
- Forel, F.A. (1904). Le Léman: Monographie limnologique (Tome 3). Lausanne: F. Rouge.
- Frey, D.G. (1963). Limnology in North America. Madison: University of Wisconsin Press.
- Fry, F. E. J. (1947). Effects of the environment on animal activity. *University of Toronto Studies, Biological Series*, 55, 1–62.
- Ghangrekar, M.M. (2022). Self-purification of Natural Streams. In: Wastewater to Water. Springer, Singapore.
- Gerking, S.D. (1975). Influence of fishing on fish populations. New York: Academic Press.
- Giller, P.S., Malmqvist, B. (1998). The biology of streams and rivers. Oxford, Oxford University press: 296 pp.
- Grbec, B., Morović, M. (2004). Development of marine research in Croatia. *Acta Adriatica*, 45(Suppl.), 5–20.
- Guidetti, P., Frascchetti, S., Terlizzi, A. *et al.* (2003). Distribution patterns of sea urchins and barrens in shallow Mediterranean rocky reefs impacted by the illegal fishery of the rock-boring mollusc *Lithophaga lithophaga*. *Marine Biology*, 143, 1135–1142.
- Hasler, A. D. (1947). Eutrophication of lakes by domestic drainage. *Ecology*, 28, 383–395.
- Hayes, F. R. (1957). On the variation in bottom fauna and plant production in lakes. *Limnology and Oceanography*, 2, 1–12.
- Horie, S. (1962). Paleolimnological studies of Japanese lakes. *Japanese Journal of Limnology*, 23, 1–15.
- Haeckel, E. (1891). Plankton-Studien. *Jenaische Zeitschrift für Naturwissenschaft*, 25, 232–336.
- Hamzić, A. (2003). Akvakultura u Bosni i Hercegovini. Coron, s, Sarajevo, 133 pp.
- Harrison, A. D. & Elsworth, J. F. (1958). Hydrobiological studies on the Great Berg River, Western Cape Province. Part 1. General description, chemical studies and main features of the flora and fauna. *Trans, roy. Soc. S. Afr.* 35:125–226

- Hensen, V. (1887). Über die Bestimmung des Planktons oder des im Meere treibenden Materials. Bericht der Kommission zur wissenschaftlichen Untersuchung der deutschen Meere in Kiel, 5, 1–107.
- Hillbricht-Ilkowska, A. (1977). Trophic structure and energy flow in lake ecosystems. Polish Ecological Studies, 3, 5–98.
- Huet, M. (1949). Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. Aquatic Sciences-Research Across Boundaries, 11(3), 332–351.
- Huet, M. (1959). Profiles and Biology of Western European Streams as Related to Fish Management, Transactions of the American Fisheries Society, 88:3, 155-163
- Hutchinson, G. E. (1957). A Treatise on Limnology: Vol. I. Geography, Physics, and Chemistry. John Wiley & Sons.
- Hynes, H.B.N. (1977). A Key to the adults and nymphs of the British Stoneflies (Plecoptera). With notes on their Ecology and Distribution. Freshwater Biological Association. Scientific Publication No.7, 90 pp.
- Hynes, H.B.N. (1970). The ecology of running waters. Liverpool, Liverpool University Press: 555 pp
- Illies, J. (1978). Limnofauna Europaea. 2. Auflage. Stuttgart, New York, Gustav Fischer Verlag: 532 pp.
- Illies, J. (1961). Versuch einer allgemeinen biozönotischen Gliederung der Fließgewässer. International Review of Hydrobiology, 46(2), 205–213.
- Illies, J., Botosaneanu, L. (1963). Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique. S.I.L. Mitteilung, 12, 1–57.
- Institute of Oceanography and Fisheries. (2000). *70 years of the Institute of Oceanography and Fisheries Split*. Split: Institute of Oceanography and Fisheries.
- Jacobus, L. M., Macadam, C. R., & Sartori, M. (2019). Mayflies (Ephemeroptera) and Their Contributions to Ecosystem Services. Insects, 10(6), 170.
- Jónasson, P. M. (1972). Ecology and production of profundal benthos in lakes. Oikos Supplement, 14, 1–148.
- Jordan, D. S. (1905). The origin of species through isolation. *Science*, 22, 545–562.
- Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. In: Dodge, D. P. (Ed.), Proceedings of the International Large River Symposium (LARS). Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 106, 110–127.
- Kačanski, D. (1971). Plecoptera sliva gornjeg toka rijeke Bosne. GZM, Sarajevo, 10: 103-118.

- Kaćanski, D. (1978). Plekoptera sliva rijeke Neretve. Godišnjak Biološkog institute Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 31: 57-68.
- Kaćanski, D., Stilinović, B., Muratspahić, D., Blagojević, S., Hafner, D., Ratković, V., Tanasijević, M., Vagner, D. (1983). Dinamika biocenoza ekosistema rijeke Vrbas (do Jajca). Biološki institut Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 90 pp.
- Kafoid, C. A. (1903). The plankton of the Illinois River. Bulletin of the Illinois State Laboratory of Natural History, 6, 95–635.
- Kjer, K.M., Blahnik, R.J., Holzentel, R.W. (2001). Phylogeny of Trichoptera (caddisflies):n Characterisation of signal and noise within multiple datasets. Syst. Biol., 50, 6: 781–816.
- Kolkwitz, R. & Marsson M. (1908). Ökologie der pflanzlichen Saprobien. Ber. Dt. Bot. Gessellschaft, 26: 505–519.
- Kolkwitz, R. & Marsson M. (1909). Ökologie der tierischen Saprobien. Int. Rev. ges. Hydrobiol., 2: 126–152
- Konstantinov, A.S. (1980). Opća hidrobiologija. Moskva. Visoka škola, Moskva
- Konstantinov, A.S. 1967. Opća hidrobiologija.(1izdanje).Visoka škola, 431 pp.
- Krebs, C. (1989). Ecological Methodology. Harper Collins, New York.
- Krek, S., Kaćanski, D., Tanasijević, M. (1976). Biocenološka analiza naselja insekata (Ephemeroptera, Plecoptera, Simuliidae i Psychodidae) sliva rijeke Sutjeske. Godišnjak Biološkog institute Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo. 29: 23-54.
- Kuznetsov, S.I., Dubinina, G.A., Lapteva, N.A. (1979). Biology of oligotrophic bacteria. Annual Review of Microbiology, 33, 377–387.
- Liebmann, H. (1962). Handbuch der Frischwasser- und Abwasserbiologie (2nd ed.). München: Oldenbourg.
- Lindeman, R. L. (1942). The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology Ecology, 23: 399–418
- Lloyd, J. T. (1927). Limnological studies of freshwater systems. Transactions of the American Microscopical Society, 46, 1–40.
- Lund, J. W. G. (1965). The ecology of freshwater phytoplankton. Biological Reviews, 40, 231–293.
- Macan, T. T. (1970). *Biological studies of the English lakes*. London: Longman.
- Mackay, R.J. Wiggins, G.B. (1979). Ecological diversity in Caddisfly. Ann. Rev. Entomology, 24: 185–208.
- Mader, S.S. (1996). Biology. The McGraw-Hill Companies, Boston etc., 942 pp.
- Margalef, R. (1983). Limnología. Barcelona: Omega.

- Margalef, R. (1984). The Science and Praxis of Complexity. Ecosystems: Diversität and Connectivity as measurable components of their complication. In Aida, et al. (Ed.). United
- Marinković-Gospodnetić, M. (1970). Description of some species of Trichoptera from Yugoslavia. *Godišnjak Biološkog instituta*. Sarajevo, Sarajevo, 23: 77-84.
- Marinković-Gospodnetić, M. (1978). The caddis-flies (Trichoptera, Insecta) of Herzegovina. *Godišnjak Biološkog instituta Unaiverziteta u Sarajevu*, Sarajevo, 31: 115-131.
- Matoničkin, I., Pavletić, Z. (1972). *Život naših rijeka*. Školska knjiga, Zagreb, 198p
- Minshall, G.W. (1984). Aquatic insect-substratum relationships, v *The Ecology of Aquatic Insects*. Praeger Scientific. New York. 358-400.
- Minder, L. (1923). Limnologische Studien an Schweizer Seen. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 1, 1–50.
- Moog, O., (1995). *Fauna Aquatica Austriaca*, Version (1995). Wasserwirtschaftskataster, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien.
- Moog, O. (2002). *Fauna Aquatica Austriaca: A comprehensive species inventory of Austrian aquatic organisms*. Wien: Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management.
- Mordukhai-Boltovskoi, P. D. (1960). The Caspian Fauna in the Azov and Black Sea basin. *Izd. Acad. Nauk SSSR*, M.-L.:1–288
- Mortimer, C. H. (1941). The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. *Journal of Ecology*, 29, 280–329.
- Mučibabić, S., Kačanski, D., Tanasijević, M., Marinković-Gospodnetić, M., Krek, S. (1973). *Lašva u kompleksu ekosistema sliva gornjeg toka rijeke Bosne*. Prvi kongres ekologa Beograd.
- Mučibabić, S., Blagojević, S., Čepić, V., Hafner, D., Kosorić, Đ., Krek, S., Marinković-Gospodnetić, M., Tanasijević, M. (1979). Neke karakteristike biocenoza Krivaje. *Ekologija*. Zagreb, 825-836.
- National Institute of Biology – Marine Biology Station Piran. (n.d.). About the station. Retrieved February 14, 2026, from <https://www.nib.si/mbp/en/>
- Naumann, E. (1919). Några synpunkter angående limnoplanktons ekologi med särskild hänsyn till fytoplankton. *Botaniska Notiser*, 129–163.
- Naumann, E. (1921). Some aspects of the ecology of limnoplankton, with special reference to phytoplankton. *Svensk Botanisk Tidskrift*, 15, 1–32.
- Naumann, E. (1932). *Grundzüge der regionalen Limnologie*. Stuttgart: Schweizerbart.

- Needham, J. G., Lloyd, J. T. (1916). *The Life of Inland Waters: An Elementary Text Book of Freshwater Biology*. Comstock Publishing Company.
- Needham, J. G., Needham, P. R., (1972). *A Guide to the Study of Freshwater Biology*. 5th edition. Holden-Day, San Francisco.
- Ohle, W. (1956). Der Stoffhaushalt der Seen als Grundlage einer allgemeinen Stoffwechsellehre der Gewässer. *Kieler Meeresforschungen*, 12, 107–120.
- Pantle, R., Buck, H. (1955). Die biologische Überwachung der Grewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas. und Wasserfach* 96: 604.
- Patrick, R. (1949). A proposed biological measure of stream conditions. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 101, 277–341.
- Pearsall, W. H. (1932). Phytoplankton in the English lakes. *Journal of Ecology*, 20, 241–262.
- Persoone, G., De Pauw, N. (1979). Systems of biological indicators for water quality assessment, *Biological Aspects of Freshwater Pollution*. Oxford, Pergamon Press, 39–75.
- Rawson, D. S. (1956). Algal indicators of trophic lake types. *Limnology and Oceanography*, 1, 18–25.
- Reighard, J. (1894). The biological examination of water supplies. *Bulletin of the Michigan Fish Commission*, 6, 1–50.
- Renuka, Patyal, D. (2025). Bioaccumulation and Biomagnification: The Cascading Effects of Toxic Metals in the Biosphere. In: Mehmood, M.A., Bhat, R.A., Dar, G.H. (eds) *Global Perspectives of Toxic Metals in Bio Environs*. Springer, Cham.
- Redžić S., Barudanović, S., Radović, M. (2008). *Bosna i Hercegovina: Zemlja raznolikosti*. Prvo nacionalno izvješće Bosne i Hercegovine za Konvenciju o biološkoj raznolikosti. Federalno ministarstvo okoliša i turizma, Sarajevo, 153 pp.
- Rigler, F. H. (1964). The phosphorus fractions and turnover time in lakes. *Limnology and Oceanography*, 9, 511–518.
- Riis, T., & Sand-Jensen, K. (1998). Aquatic plant growth and morphology in relation to environmental factors. *Aquatic Botany*, 60(2), 87–104.
- Rodhe, W. (1948). Environmental requirements of freshwater plankton algae. *Symbolae Botanicae Upsalienses*, 10, 1–149.
- Rodhe, W. (1969). Crystallization of eutrophication concepts in Northern Europe. In *Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives* (pp. 50–64). Washington, DC: National Academy of Sciences.
- Ruttner, F. (1952). *Fundamentals of limnology*. Toronto: University of Toronto Press.
- Ruttner, F. (1963). *Fundamentals of Limnology*. Toronto (2nd ed.): University of Toronto Press.

- Ruttner-Kolisko, A. (1974). Plankton rotifers: Biology and taxonomy. *Archiv für Hydrobiologie Supplement*, 44, 1–146.
- Schmidt-Kloiber, A., Hering, D. (2015). An online tool that unifies, standardises and codifies more than 20,000 European freshwater organisms and their ecological preferences. *Ecological Indicators*, 53, 271–282.
- Shannon, C.E. W. Weaver, (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. The University of Illinois Press, Urbana, IL.
- Simpson, E.H. (1949). Measurement of Diversity. *Nature*, 163: 688 – 688.
- Sioli, H. (1975). Tropical rivers as expressions of their terrestrial environments. In F. B. Golley & E. Medina (Eds.), *Tropical ecological systems* (pp. 275–288). New York: Springer.
- Sládeček, V. (1973). System of water quality from the biological point of view. *Archiv für Hydrobiologie, Beihefte Ergebnisse der Limnologie*, 7, 1–218.
- Sommer, U., Adrian, R., De Senerpont Domis, L., Elser, J. J., Gaedke, U., Ibelings, B., Jeppesen, E., Lürding, M., Molinero, J. C., Mooij, W. M., van Donk, E., & Winder, M. (2012). Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) model: Mechanisms driving plankton succession. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 43, 429–448.
- Sorokin, Y. I. (1973). *The Black Sea: Ecology and oceanography*. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations.
- Souty-Grosset, C., Holdich M.D., Noël, P.Y., Reynolds, J.D., Haffner, D. (2006). *Atlas of Crayfish in Europe*. Publications Scientifiques du Muséum. Paris, 188 pp.
- Stanford, J.A. & Ward J.V. (1993). An ecosystem perspective of alluvial rivers: connectivity and the hyporheic corridor. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 12(1):48-60.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38 (6), 913–920.
- Strom, K. M. (1931). The physical limnology of Norwegian lakes. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 3, 1–40.
- Studdemann, D., Landolt, P., Sartori, M., Hefti, D., Tomka, I. (1992). Ephemeroptera. In: Schweizerische Entomologische Gesellschaft (ed.). *Insecta Helvetica – Fauna*. Bd. 9, 173 pp.
- Talling, J. F. (1966). The annual cycle of stratification and phytoplankton growth. *International Review of Hydrobiology*, 51, 545–621.
- Tanasijević, M. (1979). Prilog poznavanju vrste *Ephemerella ikonovski* Puthz (Insecta: Ephemeroptera), *Godišnjak Biološkog instituta Univerziteta u Sarajevu*, Sarajevo, 32:163-169.

- Thienemann, A. (1926). Der Nahrungskreislauf im Wasser. Verh. Deut. Zool. Ges. 31:29-79
- Thomas, E. A. (1949). Limnological investigations in Swiss lakes. Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, 11, 1–40.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M. (2013). *Recirculating Aquaculture* (2nd ed.). Cayuga Aqua Ventures.
- Tutin, W. (1955). The vegetation of British lakes. Journal of Ecology, 43, 1–20.
- Toman, M. J. (2004). Biologija celice in ekologija z varstvom okolja. Ljubljana, Slovenia: Državna založba Slovenije (DZS). 208 pp
- Toman, M. J., Sernec, K., Kopčavar, V., Omerzel Vujić, E. (2018). Biologija celice in ekologija z varstvom okolja. Ljubljana, Slovenia: Državna založba Slovenije (DZS). 232 pp
- Tóth, L. T., Stathakopoulos, A., Kuffner, I. B., Ruzicka, R. R., Colella, M. A., Shinn, E. A. (2018). The unprecedented loss of Florida's reef-building corals and the emergence of a novel coral-reef assemblage. Ecology, 99(4), 961.
- Toumi, H., Bejaoui, M., Boumaiza, M. (2015). Cyclomorphosis in *Daphnia magna* and *Ceriodaphnia reticulata* (Cladocera) from northern Tunisian groundwater: influence of temperature and invertebrates? Crustaceana, 88(10-11), 1139-1148.
- Trenberth, K. E. (1999). Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change*, 42, 327–339.
- Tonolli, V., & Tonolli, L. (1951). The plankton of Lake Maggiore. Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, 6, 1–120.
- Trožić-Borovac, S. (2011). Priručnik iz hidrobiologije-za studente Biotehničkih nauka. Univerzitet u Sarajevu Prirodno-matematički fakultet, Sarajevo
- Trožić-Borovac, S. (2002). Makrobeskičmenjaci bentosa rijeke Bosne i pritoka u ocjeni kvaliteta vode (Doktorska disertacija). Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Sarajevu.
- Trožić-Borovac, S., Gajević, M., Borovac, B. (2019). Makrozoobentos krenona (izvorišta) tekućica. Voda i mi, 100, 55–68.
- Trožić-Borovac, S., Muhamedagić, S., Milinković, M., Borovac, B., Ahemtagić, J. (2018). Pojava invazivne vrste *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) u hidroakumulacijama Bosne i Hercegovine. Radovi Poljoprivredno-prehrambenog fakulteta Univerziteta u Sarajevu, 68 (2), 83–91.
- Trožić-Borovac, S., Škrijelj, R., Đug, S., Gajević, M. (2016). Uloga i značaj bioloških parametara u upravljanju vodama Bosne i Hercegovine. U Zborniku radova Prvi BiH kongres o vodama (str. 90).

- Trožić-Borovac, S., Škrijelj, R., Imamović, A., Đug, S., Gajević, M., Vesnić, A. (2015). Macrozoobenthos as a determinant of ecological status of the Bosna River. Works of the Faculty of Forestry University of Sarajevo, 1, 52–65.
- Trenberth, K.E., et al. (2007) Observations: Atmospheric Surface and Climate Change//Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 235-336.
- Uhlmann, D. (1975). *Hydrobiologie: Ein Grundriß für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Stuttgart: Gustav Fischer.
- Urbanič, G. (2004). Ekologija in razširjenost mladoletnic (Insecta: Trichoptera) v nekaterih vodotokih v Sloveniji. Doktorska disertacija. Biotehniški fakultet Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 182 pp.
- Urbanič, G., Mihaljević, Z., Petkovska, V., & Pavlin Urbanič, M. (2021). Back to ecology: Reference conditions as a basis for assessment, restoration and sustainable management of large rivers. *River Research and Applications*, 37(9), 1251–1265.
- Urbanič, G., Germ, M., Toman, M. J. (2021). Responses of freshwater diatoms and macrophytes along stressor gradients across river systems. *Science of the Total Environment*, 754, 142164.
- Urbanič, G., Mihaljević, Z., Petkovska, V., Pavlin Urbanič, M. (2020). Disentangling the Effects of Multiple Stressors on Large Rivers Using Benthic Invertebrates - A Study of Southeastern European Large Rivers with Implications for Management. *Water*, 12(3), 621.
- Vallentyne, J. R. (1974). *The algal bowl: Lakes and man*. Ottawa: Department of the Environment.
- Vannote, R.L., Sweeney, B.W. (1980). Geographic analysis of thermal equilibria: A conceptual model for evaluating the effect of natural and modified thermal regimes on aquatic insect communities. *Am.Nat.*, 112, 833-843.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., Cushing, C. E., (1980). The river continuum concept. In: Andersen, N.R., Zahuranec, B.J. (Eds.), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 371, 130–137.
- Vinberg, G.G. (1960). *Pervičnaja produkcija vodojmov*. Minsk: Akademija nauk BSSR.
- Vuković, T. (1977). *Ribe Bosne i Hercegovine*. Svjetlost, Sarajevo, 205 pp.
- Ward, H. B., Whipple, G. C. (1918). *Freshwater biology*. New York: Wiley.
- Wallace, I.D., Wallace B., Philipson, G.N. (1990). A key to the case-bearing caddis lar-vae of Britain and Ireland. *Freshwater Biological Association. Scientific Publication No. 51*, 1-237.
- Waringer, J., Graf W. (1997). *Atlas der österreichischen Köcherfliegenlarven unter Einschluß der angrenzenden Gebiete*. Facultas Universitätsverlag, Wien,

- Wegl, R. (1983). Index für die Limnosaprobität. *Wasser und Abwasser*, 26: 1–175.
- Wedderburn, E. M. (1907). Temperature observations in Scottish lakes. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 45, 407–489.
- Welch, P. S. (1935). *Limnology*. McGraw-Hill Book Company.
- Welch, P. S. (1952). *Limnology* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3rd edition. San Diego: Academic Press.
- Whipple, G. C. (1901). The value of biological examinations of water. *Science*, 13, 353–357.
- Winberg, G. G. (1971). *Methods for the estimation of production of aquatic animals*. London: Academic Press.
- Yoshimura, S. (1936). Limnological studies of Japanese lakes. *Japanese Journal of Limnology*, 6, 1–25.
- Zarkogiannis, S. D., Wood, T. J., Miller, C. G., Stukins, S. (2025). Reassessing the HMS Challenger collection as a late 19th century surface ocean indicator using X-ray micro-computed tomography. *Frontiers in Marine Science*
- Zelinka, M., Marvan, P. (1961). Zur Präzisierung der biologischen Klassifikation der Reinheit fließender Gewässer. *Archiv für Hydrobiologie*, 57, 389–407.
- Zwick, P. (2004). Key to the West Palaearctic genera stoneflies (Plecoptera) in the larval stage. *Limnologica*, 34, 315–348.
- Šumanović, M., Pozojević, I., Vilenica, M., Matoničkin Kepčija, R., Mihaljević, Z., Gulin Beljak, V., Miliša, M. (2024). Reassessing the indicator value of the EPT group in karst rivers under hydromorphological pressure. *Water Supply*, 24(3), 889–900.
- Šumanović, M., Pozojević, I., Mihaljević, Z., Vučković, N., Dorić, V., Miliša, M. (2021). Invertebrate functional responses to hydromorphological degradation in Mediterranean Croatian rivers. *Fundamental and Applied Limnology*, 194(3), 259–270.
- The GLOBE Program. (n.d.). *Water transparency: Secchi disk*.
<https://www.globe.gov/documents/11865/16867649/WATER+TRANSPARENCY+-+Secchi+Disk+-+PDF.pdf> (pristupljeno 21. 10. 2025).
- U.S. Geological Survey (USGS). (2019). *Where is Earth's water?* Dostupno na:
<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/where-earths-water>
 (pristupljeno 21. 10. 2025).
- UN World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace Dostupno na:
<https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024>
 (pristupljeno 22.10.2025)

- Water Footprint Network. (n.d.). *Water footprint and virtual water trade*. Preuzeto sa <https://www.waterfootprint.org> (pristupljeno 20. 10. 2025).
- FLOW project. (n.d.). FLOW – free learning of water quality. Angler Union Jena e.V. <https://www.anglerunion-jena.de/projekt-flow.php> (pristupljeno 12. 10. 2025).
- U.S. Geological Survey. (2018). *Diagram of how groundwater occurs underground*. Water Science School. <https://www.usgs.gov/media/images/diagram-how-groundwater-occurs-underground> (pristupljeno, 21.10.2025)
- Aquaportal. (n.d.). Tipovi izvora (krenonska područja). Preuzeto s <https://www.aquaportal.com>, (pristupljeno 10.10.2025).
- SlideServe. (bez godine). *Zooplankton – Filter Feeder: Copepod* [online prezentacija]. Dostupno na: <https://www.slideserve.com/damian-clements/zooplankton> (pristupljeno: 2023/12/12).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (n.d.). *Ocean facts*. NOAA National Ocean Service. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/> (pristupljeno 21. 10. 2025).
- Ehrnsten, E., et al. (n.d.). Image. Wikimedia Commons. Licensed under CC BY-SA 4.0. (pristupljeno 21. 01. 2026).