

# Perifiton- funkcija i primjena u ocjeni stanja ekosustava

---

**Bauk, Klaudia**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:762972>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-30**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
BIOLOŠKI ODSJEK

PERIFITON- FUNKCIJA I PRIMJENA U OCJENI STANJA  
EKOSUSTAVA  
PERIPHYTON – FUNCTION AND APPLICATION IN  
ECOSYSTEM STATUS ASSESSMENT  
SEMINARSKI RAD

**Klaudia Bauk**

Preddiplomski studij Znanosti o okolišu

Mentor: izv.prof.dr.sc. Marija Gligora Udovič

Zagreb, listopad 2020.

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Kolonizacijski procesi.....	2
2.1. Faza 1 – kondicioniranje površine.....	2
2.2. Faza 2 – primarna kolonizacija .....	2
2.3. Faza 3 – sekundarna kolonizacija .....	2
2.4. Faza 4 – tercijarna kolonizacija .....	2
3. Životne zajednice perifitona .....	3
4. Dijatomeje u zajednici perifitona .....	4
5. Tipovi i strukture perifitona .....	6
6. Čimbenici rasta perifitona .....	7
6.1. Rast perifitona .....	7
6.2. Abiotički čimbenici.....	8
6.3. Biotički čimbenici .....	9
7. Perifiton kao indikator u praćenju promjena okoliša.....	9
8. Dijatomeje kao indikator kvalitete vode i ekološkog statusa .....	11
9. Fitobentos kao biološki element kakvoće vode u Hrvatskoj .....	11
10. Zaključak .....	13
11. Literatura .....	15
12. Sažetak .....	19
13. Summary .....	20

## 1. Uvod

Perifiton ili obraštaj predstavlja sastavni i neovisni mikroekosustav u vodenim ekosustavima, koji nosi biotičke komponente poput algi, gljiva, bakterija, protozoa, metazoa zajedno sa abiotičkim komponentama poput supstrata, ekstracelularnih polisaharida (EPS) i detritusa. Fotoautotrofi (npr. cijanobakterije i dijatomeje) i heterotrofi (npr. bakterije, gljivice i protozoa) zajedno nastanjuju samostvoreni zajednički mikroekosustav kojem vladaju međuodnosi vrsta, predatorstvo i kompeticija (Wu, 2016.).

Terminologija vezana uz perifiton je jako varijabilna kroz razna relevantna znanstvena područja te se mijenjala kroz povijest. Najčešće upotrebljavani sinonimi su obraštaj, biofilm, perifitonske naslage, fitobentos. Sukladno različitim terminologijama, za perifiton je korišten niz definicija i opisa. Tijekom povijesti se, uz izraz „*periphyton*“ (eng.), koristila i njemačka riječ „*aufwuchs*“ kao naziv za sve organizme (bakterije, gljive, protozoa, metazoa) koji su pričvršćeni ili se kreću po podlozi, a da pri tom ne prodiru u istu (Azim i sur. 2005). Opis koji je dugo bio istican je dao Wetzel te kaže da je perifiton mikroflorna zajednica koja živi pričvršćena na bilo koji supstrat pod vodom kao potopljeno bilje, kamenje ili sediment.

Perifiton se može naći u gotovo svim vrstama vodenih ekosustava, od malih ribnjaka preko rijeka i jezera do velikih oceana, s izuzetkom muljevitih i pjeskovitih dna. Što se tiče trofičkih uvjeta, nastanjuju veliki raspon od eutrofnih do oligotrofnih sustava. Uspijevaju u čistim i onečišćenim vodama. Perifiton služi kao indikator u vodenim okolišima, brzo reagirajući na promjene u okolišu. Sukladno tome, promjene u okolišu mogu mijenjati fiziološke karakteristike i distribuciju perifitona (Gaiser i sur., 2005.).

Perifiton ima veliku ulogu u vodenim ekosustavima. Nakupine perifitona tvore staništa pogodna za naseljavanje drugih organizama. Zajednice perifitona su bitni primarni proizvođači i izvor hrane za ribe i beskralježnjake u fluvijalnim ekosustavima te tako predstavljaju bazu vodenih hranidbenih lanaca. Služi kao indikator onečišćenja i promjena u kvaliteti vode koji se očituju kroz promjene biomase i sastava zajednica koji brzo reagiraju na kemijske i fizikalne promjene okoliša. Perifiton kontrolira kruženje tvari te pročišćuje vodu absorpcijom nutrijenata i metala. (Wu, 2016.)

## 2. Kolonizacijski procesi

Wahl (1989.) je predložio opis kolonizacije perifitona u fazama:

### **2.1. Faza 1 - kondicioniranje površine**

Faza kondicioniranja počinje od adsorpcije hranjivih sastojaka na potopljenim površinama sa stanjem dinamičke ravnoteže postignutom u roku od nekoliko sati nakon niza biokemijskih reakcija. Ova faza je slična u svim vrstama okoliša.

### **2.2. Faza 2 - primarna kolonizacija**

Proces adsorpcije bakterija je kombinacija adsorpcije i adhezije što dovodi do stvaranja polisaharidnih vlakana praćenih makromolekulama. Početni perifiton, koji se sastoji od mrtvih i živih bakterija, tada izlučuje sluz formirajući primarni perifiton.

### **2.3. Faza 3 - sekundarna kolonizacija**

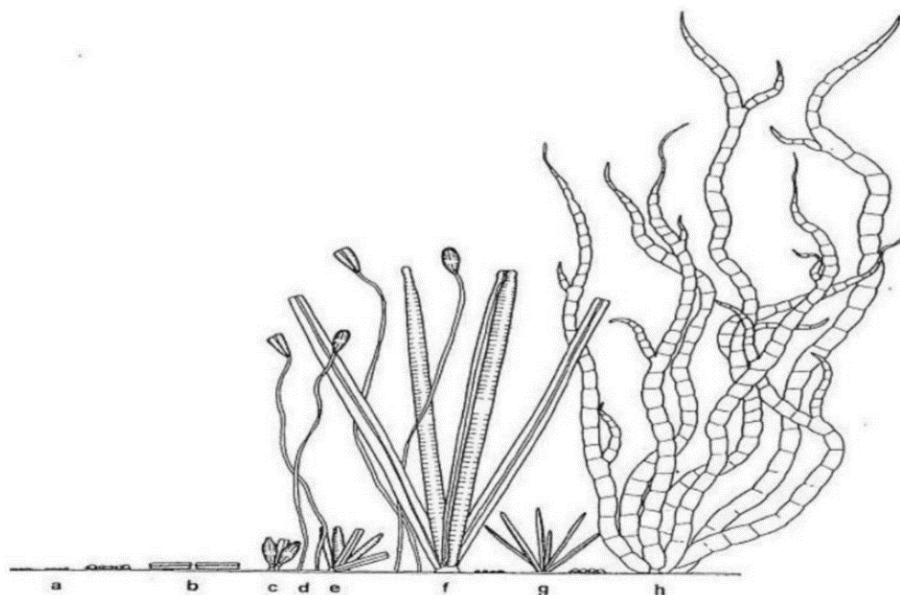
Kolonizaciju bakterija prate protozoa, dijatomeje, alge i cijanobakterije. Kolonizacija dijatomejama dovodi do nekoliko biokemijskih reakcija na površini supstrata. Protozoa su u prirodi sesilni ili predatori drugih mikroorganizama.

### **2.4. Faza 4 - tercijarna kolonizacija**

Kolonizacija višestaničnim organizmima je posljednja i najduža faza koja vodi do trodimenzionalne strukture perifitona.

Općenito, razvoj zajednica perifitona na čistom supstratu je pokrenut taloženjem sloja otopljenih organskih tvari (uglavnom aminokiselinama i mukopolisaharidima). U roku od nekoliko sati hidrofobnim reakcijama počinje se stvarati premaz bakterija. Otopljene i nežive čestice organskog materijala pospešuju vezanje i služe kao supstrat bakterijama. Kolonizacija bakterija preduvjet je za kasnije vezanje drugih organizama. U primarno fizičkom procesu, mukopolisaharidi proizvedeni od bakterija nude potencijalna mjesta vezanja za razne koloidne, organske i anorganske elemente. Bakterije također proizvode izvanstanične enzime koji značajno doprinose preradi otopljenih organskih tvari, posebno za razgradnju većih frakcija organskih molekula u asimilirajuće molekule manje težine kao i anorganske tvari. Kad bude dovoljno svjetla, alge će se nakon toga pričvrstiti i formirati glavnu strukturu perifitona u razvoju. Nakon nekoliko dana kolonizacije bakterija, male penatne dijatomeje (često *Cocconeis*, *Navicula*) mogu se prilijepiti organskom matriksu koji luče bakterije (Slika 1). Nakon njih slijede dijatomeje na stalcima ili u kolonijama. Tijekom vrhunca razvoja, zelene ili crvene alge mogu narasti u višeslojnu zajednicu u roku od nekoliko tjedana (Azim, 2009).

Sukcesijski proces u perifitskim zajednicama algi ovisi o složenom skupu interakcija između fizičkih karakteristika staništa, alogenskih faktora poput svjetlosti i temperature, autogenih promjena u zajednici i sastava vrsta. U posljednjoj fazi razvoja naseljavaju se eukariotski višestanični organizmi. Vrlo brojni mogu biti Rotatoria, Nematoda, Oligochaeta, Gastropoda, Bivalvia, Crustacea i ličinke kukaca s naglaskom na ličinke Chironomidae (Čerba i sur., 2009).



Slika 1. Slijed naseljavanja alga na podloge, gdje su a = bakterije; b = alge kremenjašice priljubljene uz podlogu; c = alge kremenjašice na kratkim stalcima; d = alge kremenjašice na dužim stalcima; e, f, g = alge kremenjašice u rozetama; h = filamentozne alge (Preuzeto iz Hoagland i sur., 1982.).

### 3. Životne zajednice perifitona

S obzirom na sustavne elemente, perifiton se dijeli na euperifiton i pseudoperifiton. Euperifiton ili „pravi perifiton“ predstavlja sesilne organizme pričvršćene na supstrat pomoću rizoida, želatinoznih stijenki, stapki, držaka, dok se pseudoperifiton ili metafiton odnosi na organizme koji se slobodno kreću među sesilnim (Azim i sur., 2005).

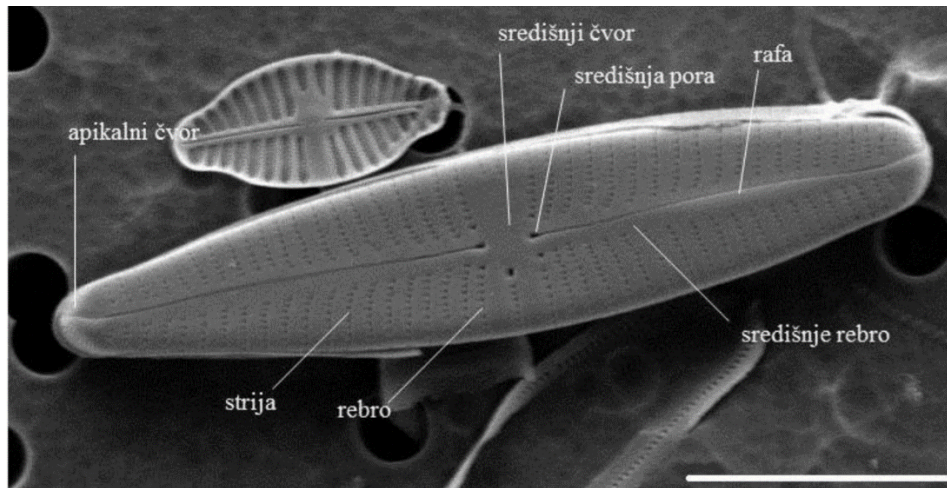
Sastav i biomasa zajednica variraju ovisno o kakvoći vode. U čistim vodama se nalaze zajednice velike raznolikosti, dok zasićenost hranjivim tvarima i povišena temperatura dovode do prekomjernog razvoja zajednica algi. Sastav perifitonskih zajednica također varira sezonski,

čak i kada je temperatura konstantna, zbog varijacija u intenzitetu svjetlosti (Hynes, 1970). Dijatomeje čine dominantnu zajednicu u proljeće i početkom ljeta, dok su cijanobakterije raširenije tijekom ljeta (Allan, 1995).

#### 4. Dijatomeje u zajednici perifitona

Dijatomeje ili alge kremenjašice (*Bacillariophyceae*, *Diatomeae*) su autotrofni, jednostanični protisti čija je stanična stijenka građena od silicijevog dioksida ili kremena ( $\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ ), a naziva se frustulom i sadrži silicijeve strukture koje se koriste kao determinacijsko svojstvo. Frustula se sastoji od dva dijela (*thecae*), gornjeg (*epitheca*) i donjeg (*hypotheca*) koji se preklapaju poput kutije i poklopca. Svaka ljušturica sastoji se od valve (epivalva, hypoalva) i pojasa (*cingulum* ili *mantellum*), a pojas čine *copulae* i *pleurae* koje se tijekom rasta mogu umnožavati. Na ljušturicama dijatomeja pod mikroskopom možemo razlikovati gornju valvalnu stranu i bočnu pleuralnu stranu.

U sistematici dijatomeja iznimno je važna simetrija i struktura frustule, stoga se razlikuju dijatomeje s radijalnom simetrijom (*Centriceae*) i one s bilateralnom simetrijom (*Pennatae*). Uzdužno kroz valvu se nalazi prorez (*rapha*) kod dijatomeja s bilateralnom simetrijom (Slika 2), koji može biti dvostruki ili jednostruki. Rafa završava središnjom porom (*porus centralis*) u ojačanom središnjem dijelu valve (središnjem čvoru, *nodulus centralis*), te apikalnom porom (*porus apicalis*) na vanjskom dijelu valve (apikalnom čvoru, *nodulus apicalis*, ili *n. terminalis*). U nekih dijatomeja s bilateralnom simetrijom rafa je reducirana i ne uočava se, pa su takve vrste nekada svrstavali u skupinu Araphidales te se nazivaju arafidne dijatomeje. U drugih je vidljiva samo na jednoj teki, pa su ih svrstavali u Monoraphidales. Struktura rafe omogućuje pokretanje stanice i komunikaciju s okolišem. Rebra ili *costae* su zadebljanja, tj. dodatne naslage silicija u unutrašnjosti ljušturice koja se mogu radijalno pružati od središnjeg rebra (*sternum*) koje prati apikalnu os. Između rebara nalaze se izdužene komorice (*alveolae*) koje su perforirane s gornje i donje strane. Te perforacije na valvalnoj strani nazivaju se areole ili pore (*areolae*), a nizovi areola između rebara nazivaju se strije. Funkcija pora je izmjena hranjivih tvari i produkata metabolizma, odnosno komunikacija s vanjskom okolinom.

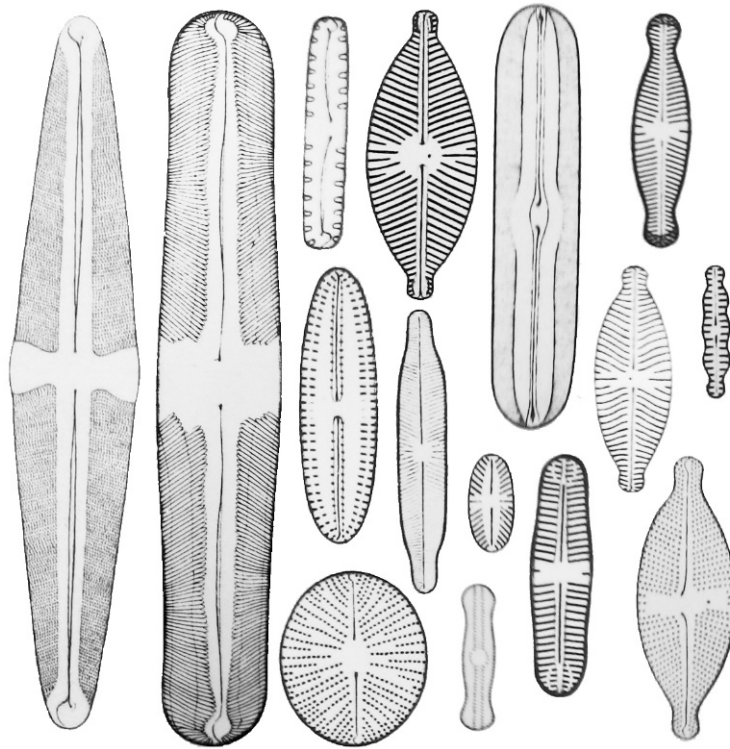


Slika 2. Glavne morfološke karakteristike ljušturice penatne diatomeje. (Preuzeto iz Sušnjara, M., 2016)

Dijatomeje za fotosintezu koriste klorofil  $a$  i  $c_2$ . Pomoćni pigmenti fukoksantin i  $\beta$  (beta) karoten daju kloroplastima karakterističnu zlatnu žutu boju. Uz krizolaminarin, dijatomeje kao rezervnu tvar nakupljaju ulje u vidu kapljica, zrnca volutina i polifosfatne granule. (Round i sur., 1990). Dijatomeje su uglavnom autotrofi i miksotrofi, no poznat je mali broj obligatnih heterotrofa iz roda *Nitzschia*, *Navicula* i *Hantzschia* (Li i Volcani, 1987). Dijatomeje su diplonti. Najčešće se razmnožavaju vegetativnom diobom stanica pri čemu se stanice dijele u valvalnoj ravnini tako da dvije teke majčinske stanice postaju epiteke stanica kćeri, dok se hipoteke nanovo stvaraju. Rezultat takve diobe je jedna manja stanica koja se uzastopnom diobom sve više smanjuje dok ne dosegne minimalnu kritičnu veličinu (30-40% od početne veličine).

Centrične dijatomeje su uglavnom planktonski organizmi, dok su penatne dijatomeje (Slika 3) dio fitobentosa, te su pričvršćene za podlogu. Različite morfološke prilagodbe frustula omogućile su dva načina pričvršćivanja dijatomeja na podlogu: pomoću stalaka ili ploča (npr. neke vrste roda *Cymbella*) ili prijanjanjem na supstrat najvećom površinom stanice (npr. rod *Cocconeis*). Mogu formirati veće ili manje kolonije.





Slika 3. Raznolikost oblika penatnih dijatomeja. (Preuzeto s poveznice: <https://diatoms.org/glossary/pennate>)

Vrste iz razreda Bacillariophyceae posebno su brojne u obraštajnim zajednicama jer imaju sposobnost brzog naseljavanja novih podloga, brzo se razmnožavaju i brzo se prilagođavaju promjenjivim uvjetima u okolišu (Biggs i sur., 1998). Najčešći rodovi dijatomeja koji su prisutni u perifitonskim zajednicama su *Achnanthes*, *Amphora*, *Cocconeis*, *Cyclotella*, *Cymbella*, *Diatoma*, *Diploneis*, *Epithemia*, *Fragilaria*, *Gomphonema*, *Gyrosigma*, *Mastogloia*, *Meridion*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Synedra*. Dominantni rodovi *Achnanthes*- *Cymbella*- *Fragilaria* u perifitonskim zajednicama Mediteranskih rijeka razvijaju se u ljeto kada i je period ubrzanog rasta i razvoja takvih zajednica (Caput i sur. 2005).

## 5. Tipovi i strukture perifitona

Ovisno o podlozi na kojoj se razvija, može se podijeliti na perifiton na prirodnoj podlozi (poput biljaka, stijena, sedimenata itd.) i umjetnoj podlozi (poput stakla, industrijskih nosača, polietilenskih ploča itd.) . Postoji nekoliko tipova perifitona s obzirom na prirodnu podlogu na kojoj se razvija u vodenim ekosustavima: epifiton (obraštaj na vodenom bilju), epizoon (obraštaj na životinjama), epipelon (obraštaj na muljevitim sedimentima), epipsamon (obraštaj

na pjeskovitim podlogama), epiliton (obraštaj na kamenitim podlogama) i epiksilon (obraštaj na drvenim podlogama) (Goldsborough i sur., 2005). Perifiton se na podlogu može vezati uspravno pomoću bazalnih dijelova tvoreći štapičaste ili nitaste oblike. Suprotno, može biti prilijepljen uz podlogu čineći stijenku ili nitasti sustav oko podloge (npr. želatinozni oblici) (Allan, 1995).

Struktura perifitona se odnosi na prostorni raspored bakterija, nakupina stanica, EPS i čestica, koje značajno određuju aktivnost perifitona utjecajem na prijenos tvari. Perifiton čine mnoge vrste i skupine organizama te tvore heterogene složene strukture koje sadrže šupljine, kanale, pore i niti sa stanicama raspoređenim u nakupine ili slojeve (de Beer i sur., 1994 ; Lu i sur., 2014).

Morfološka struktura perifitona jako se razlikuje zbog široke raznolikosti staništa i površina kojima su prilagođene perifitne alge. Oblici variraju od jednostavnih, nepokretnih pojedinačnih stanica do pokretnih, višestaničnih, nitastih struktura. Nepokretni oblici jednostaničnih, kolonijalnih ili nitastih algi na podlogu se vežu posebno prilagođenim stanicama i sekrecijom sluzi (Azim, 2009).

## **6. Čimbenici rasta perifitona**

### **6.1. Rast perifitona**

Rast perifitskog sloja odvija se u dvije faze. U početku, biomasa perifitona se eksponencijalno povećava kolonizacijom i rastom te doseže vrhunac koji se naziva „fazom gomilanja“. Tada dolazi do pomaka u dominaciji procesa te se događa gubitak kroz smrt, emigraciju i ispašu, što se naziva „fazom propadanja“ (Biggs, 1996). Može doći i do samopropadanja – prekomjernog rasta zajednice pa alge koje su blizu podloge ugibaju zbog nedovoljne količine svjetlosti i nutrijenata. Kako bi udovoljili prehrambenim zahtjevima rasta, zajednice perifitona neprestano asimiliraju okolne makronutrijente hvatajući čestice iz stupca vode (Adey i sur., 1993).

Veći udio u zajednicama perifitona u vodama čine alge. Te alge primaju Sunčevu energiju preko svojih molekula klorofila, apsorbiraju ugljični dioksid i druge hranjive tvari poput fosfora i dušika iz okolne vode, a zatim sintetiziraju organski ugljik u obliku novih ili povećanih stanica. Alge obično izlučuju dio ovog ugljika, a mnoštvo drugih organizama poput zajednica bakterija, gljivica i praživotinja tada živi od ovog materijala. Velike niti algi često su

supstrat za manje algi ili jednostanične alge. Tada se biomasa perifitona povećava i doseže svoj vrhunac za koji je često potrebno nekoliko dana do nekoliko mjeseci, ovisno o dostupnosti svjetlosti i hranjivih sastojaka te intenzitetu ispaše. Kada se stopa imigracija (dolazno kretanje) izjednači stopi iseljavanja (odlazno kretanje), postiže se ravnotežna biomasa perifitona. Na ovu ravnotežu utječu okolišni čimbenici koji reguliraju rast biomase poput hranjivih sastojaka, svjetlosti i temperature te čimbenici koji reguliraju gubitak biomase, uključujući poremećaje koji nastaju zbog nestabilnosti supstrata, brzine struje, suspendiranih čestica, ispaše beskralježnjaka i riba, bolesti, parazitizma (Wu, 2016.). Rast perifitonskog sloja ovisi o mnogim abiotičkim i biotičkim čimbenicima.

## 6.2. Utjecaj abiotičkih čimbenika

Vrijednost pH je važan čimbenik u razvoju perifitnih zajednica, ali na njega utječu i razine hranjivih sastojaka vodenih tijela prije i nakon alkalizacije. Supstrat pruža fizičku površinu za rast, dok njegova kemijska i fizička svojstva utječu na perifitni biofilm na razini mikrookoliša. Topografija i hrapavost površine podloge pomažu u smanjenju utjecaja vodenih struja na razvoj perifitne zajednice. Pukotine prisutne na površini podloge pomažu i u sprječavanju ispaše i štete zbog isušivanja.

Više svjetla rezultira većim stopama pretvorbe anorganskog materijala u organsku živu biomasu. Varijacije u dostupnosti i intenzitetu svjetlosti mogu duboko utjecati na strukturu, fiziologiju i rast perifitnih biofilmova (Petersen i sur., 2003). Zasjenjenost vodenih tijela smanjuje proizvodnju klorofila *a*. Na početku razvoja perifitona, biofilm se sastoji od bakterija i ekstracelularnih polisaharida (EPS). Ako nije uznemiren do 3 tjedna, raste broj vrsta i biomase. Razvija se značajna povezanost između organskog ugljika, klorofila *a* i proizvodnje EPS-a. U tim uvjetima dominiraju dijatomeje koje su učinkovitije od zelenih algi pri slaboj svjetlosti (Barranguet i sur., 2005.). Fotosintetski mehanizam algi ima sposobnost prilagodbe različitim svjetlosnim uvjetima. Tijekom fotoadaptacije u uvjetima slabog osvjetljenja, potražnja za dušikom se povećava zbog povećanja sadržaja proteina u fotosintetskim strojevima. Zbog ograničenosti dušikom tijekom ovog postupka, također je inhibirana brzina proizvodnje klorofila *a*.

Brzina protoka vode može imati razarajuću ili pogodan učinak na perifitne zajednice, ovisno o vrstama organizama koji se nalaze u biofilmu i debljini difuznog graničnog sloja.

Temperatura može utjecati na brzinu razmnožavanja, strukturu, sposobnost rasta, sukcesiju i metabolizam perifitnih zajednica. Ako temperatura padne, asimilacija dušika u zajednicama algi će se također smanjiti utječući na cjelokupno kruženje dušika u sustavu. Povišenje temperature utječe na stopu respiracije, fotosintezu, enzimsku aktivnost i stvaranje biofilma.

Što se tiče nutrijenata, za perifiton su najbitniji dušik i fosfor. Povećana dostupnost hranjivih sastojaka dovodi do promjena u taksonomskom sastavu i povećanju gustoće i debljine perifitona. Otopljena organska tvar u potocima može poslužiti kao izvor hranjivih sastojaka koji pospješuju rast algi i rast heterotrofnih bakterija.

### **6.3. Utjecaj biotičkih čimbenika**

Ishrana i kompeticija su najčešći biotički čimbenici koji utječu na perifiton. Intenzivna ishrana od strane životinja (ličinke insekata, rakovi i određene ribe) može rezultirati smanjenjem biomase perifitona, izmijenjenom stopom primarne proizvodnje i promjenom taksonomskog sastava i strukture zajednice. Međutim, umjerena ispaša može pomoći regeneraciji vegetacije i stimulirati stopu rasta poboljšanjem dostupnosti svjetlosti unutar zajednica perifitona i povećanom dostupnošću hranjivih sastojaka iz vode (Azim, 2009). Također, na perifiton mogu utjecati predatori te pojava parazitizma.

## **7. Perifiton kao indikator u praćenju promjena okoliša**

Povijesno gledano, kvaliteta vode procjenjivala se uspoređivanjem kemijske analize vode nizvodno od točkastih izvora s kemijskom analizom na točki samog izvora. Ovaj pristup zanemaruje mnoge procese u toku, kao što su odgovor bioloških sustava na kemijske promjene, pretvaranje tih kemikalija u druge spojeve, promjene u kemijskoj koncentraciji u različitim dijelovima tokova i fizičke promjene. Biološke metode su češće pouzdanije, brže i jeftinije. Perifiton se preferira kao biološki alat iz nekoliko razloga (Feminella, 2000) kao što su: (1) stanište uz podlogu onemogućava perifitonu da izbjegne onečišćenja; (2) bioraznost i raznolikost sastava omogućava odgovor na širok raspon onečišćenja; (3) brza rekolonizacija nakon što je došlo do poremećaja uzrokovanih vanjskim silama, kao što su promjene u protoku

ili kvaliteti vode; (4) jednostavno rukovanje i analiza tijekom monitoringa; (5) sveprisutni u vodenim okruženjima.

Perifiton je osjetljiv na poremećaje u fluvijalnim ekosustavima, rezultirajući promjenom u strukturi zajednice. Kontaminacije fluvijalnog ekosustava dovode do promjena u određenim obilježjima perifitona i upravo te varijacije omogućuju da se perifiton koristi kao vrijedan alat za praćenje kakvoće vode. Te varijacije uključuju biomasu, veličinu zajednice algi i taksonomski sastav perifitona. Biološki indeksi su sve više isticani zbog njihove sposobnosti da odražavaju stvarne uvjete i čine temelj upravljanja sustavima (Meng i sur., 2009.). Indeks se može definirati kao numerička vrijednost koja pomaže identificirati promjene u biološkim značajkama u odnosu na poremećaje i onečišćenje. Multimetrijski biološki indeksi i analize varijance sve se više koriste za praćenje odgovora dijatomeja na specifične stresore te za identifikaciju određenog biološkog čimbenika koji je najviše pogođen onečišćivačem.

Zagađenja pesticidima, herbicidima i proizvodi za osobnu njegu dopijevaju u tekućice te postaju dijelom fluvijalnih ekosustava. Mikroorganizmi su idealni za studije na razini zajednice zbog svoje veličine i kratkog generacijskog vremena. Jedan od najdrastičnijih učinaka tvari na perifitne zajednice je promjena u dominaciji i brojnosti vrsta. Testovi na razini zajednice bolji su od testova pojedinačnih vrsta jer povećavaju vjerojatnost otkrivanja osjetljivih vrsta. No, metaboličke promjene, poput fotosinteze i stope disanje, prikladnije su za određivanje kratkoročnih promjena u perifitnim zajednicama od strukturnih promjena kojima je potrebno dugotrajno izlaganje u niskim koncentracijama. Fiziološke značajke fotoautotrofnih zajednica čine ih ranjivijima na herbicide koji uglavnom inhibiraju fotosintetske procese.

Perifitske zajednice dobro su poznate po svojstvima nakupljanja metala. Glavni procesi koji sudjeluju u akumulaciji metala u algama su (1) vezanje za EPS, (2) adsorpcija na površinu stanice i (3) unutarstanični unos. Većina studija koje se odnose na toksičnost metala za biofilmove uzele su u obzir zajednice dijatomeja (Gold i sur., 2003.; Guasch i sur., 2003.; Soldo i Behra, 2000.).

Unutar zajednice perifitona, najčešće se koriste cijanobakterije i dijatomeje u istaživanjima kakvoće vode. Aboal (1989.) identificirao je cijanobakterije kao jedan od dominantnih organizama u fluvijalnim ekosustavima, a kasnije su identificirani kao dominantni organizmi u vodenim sustavima poremećenim eutrofikacijom kao i u gradskim otpadnim vodama (Vis i sur., 1998). Među cijanobakterijama postoji velika raznolikost te im se brojnost

razlikuje u različitim okruženjima. Neke od ovih vrsta dominiraju okolinama s čistom vodom, dok dominacija ostalih vrsta varira ovisno o vrsti onečišćivača i indeksu onečišćenja. Na primjer *Oscillatoria putrida* Schmidle, *O. tenuis* C.Agardh ex Gomont i *O. lauterbornii* Schmidle koriste se kao indikatori zagađenja, dok je *Rivularia* dominantni rod u okolišu s čistom vodom (Douterelo i sur., 2004.). Perifitonske dijatomeje su vrijedni u procjeni promjena u fluvijalnim ekosustavima kao rezultat točkastog onečišćenja anorganskim hranjivim tvarima iz ispuštanja kanalizacije. Ova vrsta zagađenja može rezultirati pomicanjem zajednice prema tolerantnijim vrstama dijatomeja i manjom varijabilnošću dijatomejske raznolikosti, posebno zimi (Dela-Cruz i sur., 2006.).

## 8. Dijatomeje kao indikator kvalitete vode i ekološkog statusa

Dijatomeje su jedan od najčešće korištenih bioloških pokazatelja za procjenu zbog svoje široke rasprostranjenosti i varijabilnosti. Definirane su njihove tolerancije i preferencije za pH, vodljivost, salinitet, vlažnost, količinu i tip organske tvari, trofičko stanje, potrebu za kisikom, hranjivim tvarima i trenutnu brzinu u slatkovodnim potocima, rijekama, jezerima, močvarama i ušću.

Dijatomeje se obično koriste kao bioindikator zbog svoje: (1) važnosti u prehrambenim mrežama; (2) uloge u oksigenaciji i biogeokemijskoj povezanosti; (3) učinkovitost kao bioindikator za brojna fizikalna, kemijska i biološka onečišćenja; (4) jednostavnosti upotrebe i identifikacije u usporedbi s drugim skupinama algi; (5) jeftinije metodologije.

Ekološke informacije koje daju dijatomeje obično se zbrajaju kroz jedan ili više indeksa temeljenih na dijatomejama, koji samo jednim brojem pokazuju trofičku razinu. Međutim, samo indeksi ne određuju kakvoću vode. Štoviše, kakvoća vode nije jedini čimbenik koji određuje ekološki status. Moraju se uzeti u obzir i drugi čimbenici poput strukture vegetacije ili hidrodinamike ekosustava. Većina široko korištenih indeksa dolazi iz jednadžbe Zelinke i Marvana (Zelinka i Marvan, 1961.), koja glasi:

$$\text{Indeks} = \Sigma (A_i \times v_i \times j_i) / A_i v_i$$

Gdje je A relativna brojnost vrste, v je vrijednost pokazatelja vrste i j njena osjetljivost.

Pristupi koji se odnose na procjenu kvalitete vode u potocima i rijekama pomoću dijatomeja podijelili su u četiri kategorije Lobo i sur. (1995): biotički indeksi, multivarijantne analize, indeksi raznolikosti i analize odnosa brojnosti i vrsta. Zajednice dijatomeja mogu se opisati njihovim vrstama i raznolikošću. Sastav vrsta može se analizirati pomoću biotičkih indeksa (npr. saprobni indeks, Pantle i Buck, 1955; Zelinka Marvan, 1961), a također i multivarijantnim metodama. Zatim se sklop može opisati numeričkim indeksima i/ili sastavom vrsta. Slično tome, raznolikost vrsta može se analizirati indeksima raznolikosti, poput Shannonovog indeksa, a također i modelima odnosa vrste i obilja, kao što je log-normalna raspodjela. Zatim se skup može opisati mjerama raznolikosti vrsta i / ili obrascima obilja vrsta. Novi pristup za ocjenu kvalitete vode pomoću dijatomeja znatno se povećava posljednjih godina, primjenom molekularnih tehnika (primjenom okolišne DNK – metabarcodinga ili barcodiranjem vrsta).

## 9. Fitobentos kao biološki element kakvoće vode u Hrvatskoj

Okvirna direktiva o vodama (ODV) je ključni dokument u upravljanju vodama u Europskoj uniji. Ocjenjivanje ekološkog stanja voda predstavlja mjerenje promjene stanja i funkcije ekosustava u odnosu na prirodno, odnosno referentno. U odnosu na veličinu promjene ocjenjuje se ekološko stanje kao jedna od 5 kategorija i prikazuje se odgovarajućom bojom (Tablica 1).

Kategorije ekološkog stanja	Boja
Vrlo dobro	Plava
Dobro	Zelena
Umjereno	Žuta
Loše	Narančasta
Vrlo loše	Crvena

Tablica 1. Kategorije ekološkog stanja (Preuzeto iz Hrvatske vode, 2015.)

Sastav i struktura zajednice fitobentosa, u prvom redu dijatomeja, nezaobilazan je biološki element u ekološkim ocjenama kakvoće slatkovodnih ekosustava, pri čemu su taksonomski sastav i (relativna) abundancija vrsta dvije ključne mjerljive sastavnice

fitobentosa. U ocjenjivanju ekološkog stanja rijeka na temelju fitobentosa koriste se dijatomeje i nedijatomejske skupine fitobentosa . (Tablica 2).

Trofički indeks ( $TID_{HR}$ ) dijatomeja je pokazatelj koji ukazuje na opterećenje vodnog tijela hranjivim tvarima tj. na njegov stupanj trofije na osnovi zastupljenosti dijatomejskih vrsta. Indikatorske veličine za svaku dijatomejsku vrstu definirane su s obzirom na specifičnosti hrvatskih tekućica te je za svaku vrstu izračunata indikatorska vrijednost (tolerantnost) i indikatorska težina (osjetljivost). Saprobnni indek ( $SI_{HR}$ ) je pokazatelj opterećenja (saprobnosti) koji ukazuje na količinu organskih tvari u tekućici. Saprobnni indeks (Pantle i Buck, 1955.; Zelinka i Marvan, 1961.) izračunava se na temelju saprobnih indikatorskih vrijednosti (tolerantnosti) za svaku dijatomejsku vrstu uz određenu indikatorsku težinu (osjetljivost) svake vrste.

Nedijatomejski indeks (NeD) daje informaciju o prisutnosti i postotnoj zastupljenosti svih skupina algi na istraživanoj postaji s ciljem utvrđivanja postotnog udjela Cyanobacteria i Chlorophyta/Charophyta u odnosu na druge skupine u pojedinom uzorku. Naime, značajnije prisustvo posebice nekih predstavnika navedenih skupina ukazuje na povećanje stupnja trofije.

Tablica 2. Pokazatelji/indeksi i moduli za ocjenu ekološkog stanja na temelju fitobentosa (Preuzeto iz Hrvatske vode, 2015.

Biološki element kakvoće	Pokazatelj/indeks	Opterećenje na koje ukazuje pojedini biološki indeks	Modul
Fitobentos	Trofički indeks dijatomeja ( $TID_{HR}$ )	Opterećenje hranjivim tvarima	Trofičnost
	Nedijatomejski indeks (NeD)	Opterećenje hranjivim tvarima	Trofičnost
	Saprobnni indeks ( $SI_{HR}$ )	Opterećenje organskim tvarima	Saprobnost

Za ocjenu ekološkog stanja se za svaki indeks izračunava omjer njegove ekološke kakvoće (OEK).

## 10. Zaključak

Modifikacija i degradacija vodenog okoliša utječu na kakvoću vode i stanište organizama i različite biokemijske puteve. Svojom raznolikošću perifiton je u stanju brzo i



predvidljivo odgovoriti na promjene. To perifiton čini idealnim bioindikatorom uz činjenicu da su prisutni u svim ekosustavima. Monitoring perifitona u svrhu detekcije onečišćenja i promjena u okolišu je pouzdaniji, brži i jeftiniji od korištenja kemijskih metoda. Reakcije perifitona na promjene u biomasi i brojnosti vrsta i strukturi. U vodenim ekosustavima tim zajednicama upravljaju različiti čimbenici, uključujući fizikalne, kemijske i biološke čimbenike. Ti čimbenici ponekad pojačavaju strukturne promjene zajednice koje mogu rezultirati potpunim uništenjem perifitonskih naslaga.

Zajednice dijatomeja nam najlakše i najbolje daju uvid u promjene i stanje vodenih okoliša. Lako se definiraju do vrste, poznate su granice tolerancije na okolišne promjene te im je kratko generacijsko vrijeme. U klasifikaciji ekološkog stanja vodenih tijela u Hrvatskoj, fitobentos, a u prvom redu dijatomeje, su nezaobilazan biološki element procjene pri čemu su taksonomski sastav i brojnost vrsta dvije ključne mjerljive sastavnice.

Modernijim metodama i molekularnoj identifikacija dijatomeja mogu se pružiti revolucionarna otkrića u taksonomiji koja mogu imati velike koristi za bioprocjenu, a time i bioremedijaciju vodenih sustava. Monitoring perifitona i dijatomeja predstavlja ekonomski izvedive i društveno prihvatljive metode praćenje i procjena kvalitete vode koji su prijeko potrebne su za vraćanje vodenih sustava u prirodno stanje.

## 11. Literatura

- Aboal, M. (1989). Epilithic algal communities from River Segura Basin, Southeastern Spain. *Archiv fur Hydrobiologie* 116, 113-124.
- Adey, W., Luckett, C., Jensen, K. (1993). Phosphorus removal from natural waters using controlled algal production. *Restoration Ecology* (1), 29-39.
- Allan, J.D. (1995). Autotrophs. In: *Stream Ecology*. Springer, Netherlands, pp. 83-108.
- Azim, M.E., Beveridge, M.C.M., van Dam, A.A., Verdegem, M.C.J. (2005). *Periphyton: Ecology, Exploitation and Management*. CABI Publishing.
- Azim, M.E. (2009). Photosynthetic periphyton and surfaces. U: Likens, G.E., ur., *Encyclopedia of Inland Waters*. Academic Press, Oxford, 184-191.
- Barranguet, C., Veuger, B., Van Beusekom, S.A.M., Marvan, P., Sinke, J.J., Admiraal, W. (2005). Divergent composition of algal-bacterial biofilms developing under various external factors. *European Journal of Phycology* 40 (1), 1-8.
- Biggs, B. (1990). Periphyton communities and their environments in New Zealand rivers, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 24 (3), 367-386.
- Biggs, B., (1996). Patterns in benthic algae of streams. U: Stevenson, R.J., Bothwell, M.L., Lowe, R.L., ur., *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems*. Academic Press. San Diego, California.
- Caput, K., Burić, Z., Olujić, G. (2005). Vertical distribution of periphytic diatoms in the karstic Zrmanja River (Croatia), *Acta Botanica Croatica* 64, 227-236.
- Čerba, D., Bogut, I., Vidaković, J., Palijan, G. (2009). Invertebrates in *Myriophyllum spicatum* L. stands in Lake Sakadaš, Croatia. *Ekologia* 28, 203-214.
- de Beer, D., Stoodley, P., Lewandowski, Z. (1994). Liquid flow in heterogeneous biofilms. *Biotechnology and Bioengineering* 44 (5), 636-641.
- Dela-Cruz, J., Pritchard, T.I.M., Gordon, G., Ajani, P. (2006). The use of periphytic diatoms as a means of assessing impacts of point source inorganic nutrient pollution in south-eastern Australia. *Freshwater Biology* 51 (5), 951-972.

- Douterelo, I., Perona, E., Mateo, P. (2004). Use of cyanobacteria to assess water quality in running waters. *Environmental Pollution* 127 (3), 377-384.
- Feminella, J.W. (2000). Correspondence between stream macroinvertebrate assemblages and 4 ecoregions of the southeastern USA. *Journal of the North American Benthological Society* 19 (3), 442-461.
- Gaiser, E.E., Trexler, J.C., Richards, J.H., Childers, D.L., Lee, D., Edwards, A.L., Scinto, L.J., Jayachandran, K., Noe, G.B., Jones, R.D. (2005). Cascading ecological effects of low-level phosphorus enrichment in the Florida Everglades. *Journal of Environmental Quality* 34 (2), 717-723.
- Gold, C., Feurtet-Mazel, A., Coste, M., Boudou, A. (2003). Impacts of Cd and Zn on the development of periphytic diatom communities in artificial streams located along a river pollution gradient. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 44 (2), 189-197.
- Goldsborough, L.G., McDougal, R.L., North, A.K. (2005). Periphyton in freshwater lakes and wetlands. CABI Publishing, 352
- Guasch, H., Admiraal, W., Sabater, S. (2003). Contrasting effects of organic and inorganic toxicants on freshwater periphyton. *Aquatic Toxicology* 64 (2), 165-175.
- Hoagland, K.D., Roemer, S.C., Rosowski, J.R. (1982). Colonization and community structure of two periphyton assemblages with emphasis on the diatoms (Bacillariophyceae). *American Journal of Botany* 69, 188-213.
- Hynes, H.B.N. (1970). *The Ecology of Running Waters*. University of Toronto Press.
- Hrvatske vode (2015). Metodologija uzrokovanja, laboratorijskih analiza i održivanja omjera ekološke kakvoće bioloških elemenata kakvoće
- Li, C.W., Volcani, B.E. (1987). Four new apochlorotic diatoms. *Journal of Phycology* 22, 375-382.
- Lobo, E.A., Katoh, K., Aruga, Y. (1995). Response of epilithic diatom assemblages to water pollution in rivers in the Tokyo Metropolitan area. *Freshwater Biology* 34, 191-204
- Lobo, E., Heinrich, C., Schuch, M., Wetzel, C., Ector, L., (2016). *Diatoms as Bioindicators in Rivers*. U: Necchi Jr., O., ur., *River Algae*, Springer International Publishing.

- Martin, G., Fernandez, M., (2012). Diatoms as Indicators of Water Quality and Ecological Status: Sampling, Analysis and Some Ecological Remarks. U: Voudouris, K., ur., Ecological Water Quality - Water Treatment and Reuse, InTech.
- Meng, W., Zhang, N., Zhang, Y., Zheng, B. (2009). Integrated assessment of river health based on water quality, aquatic life and physical habitat. *Journal of Environmental Sciences* 21 (8), 1017-1027.
- Pantle, R., Buck, H. (1955): Die biologische Überwachung der Gewässer die Darstellung der Ergebnisse.-Gas-und-Wasserfach 96, 604
- Pesce, S., Fajon, C., Bardot, C., Bonnemoy, F., Portelli, C., Bohatier, J. (2006). Effects of the phenylurea herbicide diuron on natural riverine microbial communities in an experimental study. *Aquatic Toxicology* 78 (4), 303-314.
- Petersen, J.C., Femmer, S.R., Geological, S. (2003). Periphyton Communities in Streams of the Ozarks Plateaus and Their Relations to Selected Environmental Factors. *National Water-Quality Assessment Program*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey; Branch of Information Services, Little Rock, Arkansas: Denver, Colorado.
- Round, F.E., Crawford R.M., Mann D.G. (1990). The Diatoms. Biology and Morphology of the Genera. Cambridge University Press, Cambridge.
- Soldo, D., Behra, R. (2000). Long-term effects of copper on the structure of freshwater periphyton communities and their tolerance to copper, zinc, nickel and silver. *Aquatic Toxicology* 47 (3), 181-189.
- Sušnjara, M. (2016). *Dijatomeje kao biološki pokazatelj ekološkog stanja izvora rijeke Gacke*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet
- Stevenson, J.R., Peterson, C.G. (1991). Emigration and immigration can be important determinants of benthic diatom assemblages in streams. *Freshwater Biology* 26 (2), 279-294.
- Szlauer-Lukaszewska, A. (2007). Succession of periphyton developing on artificial substrate immersed in polysaprobic wastewater reservoir. *Polish Journal of Environmental. Studies* 16, 753-762.
- Vis, C., Hudon, C., Cattaneo, A., Pinel-Alloul, B. (1998). Periphyton as an indicator of water quality in the St Lawrence river (Quebec, Canada). *Environmental Pollution* 101 (1), 13-24.

- Wahl, M. (1989). Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects. *Marine Ecology Progress Series* 58, 175-189.
- Wetzel, R.G., Likens, G.E. (2000). *Limnological Analyses*. Springer.
- Wu, Y. (2016). *Periphyton: Functions and Application in Environmental Remediation*. Elsevier
- Zelinka, M., Marvan, P. (1961). Zur Präzisierung der biologischen Klassifikation der Reinheit fließender Gewässer. *Archiv für Hydrobiologie* 57, 389-407.

## 12. Sažetak

Perifiton predstavlja obraštajnu zajednicu algi, cijanobakterija i heterotrofnih mikroorganizama zajedno spojeni neživim komponentama koje čine EPS i detritus te naseljavaju slobodne površine predmeta uronjenih u vodu čineći samostalni izdvojeni mikroekosustav. Perifitoni su sveprisutni u vodenim sustavima i igraju veliku ulogu u primarnoj proizvodnji i kruženju hranjivih tvari. Na strukturu i sastav perifitonske zajednice utječu brojni biotički i abiotički čimbenici. S tim u vezi, perifiton je izvrstan biološki pokazatelj za praćenje promjena u okolišu i ocjenu kakvoće vode. Idealan je pokazatelj onečišćenja višestrukim zagađivačima, uključujući organske i neorganske toksine.

Diatomeje su najbrojniji i najznačajniji organizmi u zajednici perifitona. Prednosti perifitona te perifitonskih dijatomeja kao indikatora u procjeni ekološkog stanja i monitoringu su velika taksonomska raznolikost, kratko generacijsko vrijeme te brz odgovor na stres, odnosno na promjene okolišnih uvjeta ili kakvoće vode te lakoća korištenja. U Hrvatskoj se za ocjenu kakvoće vode na temelju fitobentosa koriste dijatomejski indeksi trofički indeks dijatomeja ( $TID_{HR}$ ) i - indeks organskog opterećenja ( $SI_{HR}$ ) te jedan nedijatomejski indeks (NeD).

### **13. Summary**

Periphyton is a community of algae, cyanobacteria and heterotrophic microorganisms joined together by abiotic components that make up of EPS and detritus and together they inhabit the surfaces of objects immersed in water, forming an independent isolated microecosystem. Periphyton is ubiquitous in aquatic systems and plays a major role in the primary production and circulation of nutrients. The structure and composition of the periphytic community are influenced by a number of biotic and abiotic factors. In this regard, periphyton is an excellent biological indicator for monitoring environmental changes and water quality assesment. It is an ideal indicator of pollution by multiple pollutants, including organic and inorganic toxins.

The advantages of periphyton and periphytic diatoms as indicators in the assessment of ecological status and monitoring are great taxonomic diversity, short generation time and quick response to stress, ie changes in environmental conditions or water quality and ease of use. In Croatia, diatomaceous indices, trophic index of diatoms ( $TID_{HR}$ ) and - organic load index ( $SI_{HR}$ ) and one non-diatomaceous index (NeD) are used to assess water quality based on phytobenthos.