Pregledni članak | Review paper | UDK: 579.68:628.16
Primljeno (Received): 15.02.2026; Prihvaćeno (Accepted): 30.07.2026.

CIJANOBAKTERIJE I CIJANOTOKSINI U SUSTAVIMA VODOOPSKRBE

dr. sc. Nikolina Bek
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Odjel za biologiju
Ulica cara Hadrijana 8/A, Osijek, Hrvatska
nbek@biologija.unios.hr

prof. dr. sc. Tanja Žuna Pfeiffer
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Odjel za biologiju
Ulica cara Hadrijana 8/A, Osijek, Hrvatska

prof. dr. sc. Dubravka Špoljarić Maronić
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Odjel za biologiju
Ulica cara Hadrijana 8/A, Osijek, Hrvatska

izv. prof. dr. sc. Filip Stević
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Odjel za biologiju
Ulica cara Hadrijana 8/A, Osijek, Hrvatska

prof. dr. sc. Mirna Habuda-Stanić
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Prehrambeno-tehnološki fakultet
Franje Kuhača 18, Osijek, Hrvatska

Cijanobakterije ili modrozelene alge su sastavni dio planktonskih i obraštajnih zajednica slatkovodnih ekosustava u kojima pridonose primarnoj produkciji i hranidbenim mrežama. Međutim, u uvjetima povišenih temperatura, povećanog unosa hranjivih tvari i hidrološke stabilnosti, sve se češće intenzivno razvijaju. Pritom stvaraju sekundarne metabolite, cijanotoksine, među kojima neki imaju toksično djelovanje te predstavljaju rizik za kvalitetu i sigurnost vode za ljudsku potrošnju, kao i za ljudsko zdravlje. U svrhu uklanjanja cijanobakterija i cijanotoksina primjenjuju se različite tradicionalne metode (koagulacija, flokulacija, sedimentacija, filtracija) te se razvijaju novi, inovativni pristupi obrade (npr. napredni oksidacijski procesi). Poseban se naglasak stavlja na razvoj i primjenu održivih prirodnih metoda pročišćavanja voda, poput primjene priobalne filtracije. Međutim, složeni operativni i tehnički zahtjevi, uz nedostatak spoznaja o djelovanju toksina u promjenjivim okolišnim uvjetima, uvelike utječu na praćenje i pravovremeno uklanjanje cijanobakterija. Navedeno ukazuje na potrebu za integriranim, lokalno prilagođenim pristupom osiguravanju kakvoće vode za ljudsku potrošnju. Takav pristup mora povezivati ekološko razumijevanje procesa u vodenim ekosustavima, učinkovite sustave praćenja stanja voda s posebnim naglaskom na prisutnost cijanobakterija te prilagodljive i modernizirane tehnologije obrade voda, uz istovremeno jačanje regulatornih okvira u uvjetima rastućih klimatskih i antropogenih pritisaka.

Ključne riječi: voda za ljudsku potrošnju, obrada vode, cvjetanje cijanobakterija

1.UVOD

Prekomjerna upotreba vode u domaćinstvima i različitim djelatnostima pridonijela je narušavanju kakvoće vodnih resursa na globalnoj razini, zbog čega je opskrba stanovništva dovoljnim količinama zdravstveno ispravne vode prepoznata kao jedan od najzahtjevnijih izazova današnjice (IFPRI 2015).

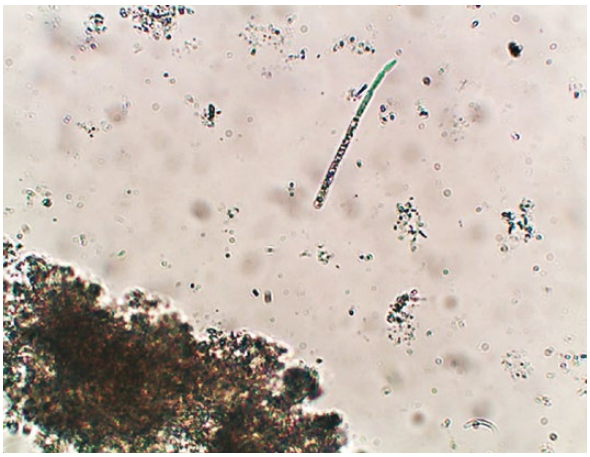
Zdravstvena ispravnost vode ocjenjuje se na temelju mikrobioloških, fizikalnih i kemijskih pokazatelja, a utvrđena odstupanja ukazuju na potencijalno postojanje problema pri obradi i distribuciji vode, što zahtijeva daljnje ispitivanje kakvoće vode i potencijalnog utjecaja na ljudsko zdravlje (Habuda-Stanić 2021). Prema izvještajima o zdravstvenoj ispravnosti vode za ljudsku potrošnju u Republici Hrvatskoj u razdoblju od 2019. do 2023. godine, zabilježeni su vrlo mali postoci neispravnosti utvrđeni na temelju analize mikrobioloških, kemijskih i indikatorskih parametara (Zadrović 2025), dok se u izvještaju za 2024. godinu navodi prisutnost mikrocistina-LR, ali u koncentracijama ispod granice kvantifikacije (Hrvatski zavod za javno zdravstvo 2025). Međutim, diljem svijeta je sve izraženiji problem intenzivnog razvoja cijanobakterija, prokariotskih fotosintetskih organizama povijesno poznatih i pod nazivom modrozelene alge, među kojima pojedine vrste imaju sposobnost stvaranja spojeva koji mogu toksično djelovati na organizme u vodenim ekosustavima, ali i na ljudsko zdravlje. Sve veća učestalost i trajanje intenzivnog razvoja odnosno cvjetanja cijanobakterija (engl. harmful

cyanobacterial blooms – cyanoHABs) na sve različitijim geografskim područjima povezana je s onečišćenjem vodenih ekosustava hranjivim tvarima, posebno fosforom i dušikom, te s utjecajem klimatskih promjena (Mantzouki i sur. 2018). To ih svrstava među značajnije izazove za sustave vodoopskrbe i odvodnje te javnozdravstvene institucije na međunarodnoj razini (Carey i sur. 2012; Huisman i sur. 2018). Stoga je praćenje širenja i intenzivnog razvoja ove skupine mikroorganizama u slatkovodnim ekosustavima, posebno onima povezanim s vodoopskrbnim sustavom, nužno u svrhu očuvanja kvalitete vode i ljudskog zdravlja. Cilj ovog rada je pregledom dostupne literature prikazati ekološke i javnozdravstvene rizike povezane s prekomjernim razvojem cijanobakterija i sintezom cijanotoksina te istaknuti izazove njihova praćenja i uklanjanja u sustavima obrade vode za ljudsku potrošnju.

2. POJAVNOST I OBILJEŽJA CIJANOBAKTERIJA

Cijanobakterije su prokariotski fotosintetski mikroorganizmi rasprostranjeni u svim vodenim ekosustavima, a veliku brojnost i raznolikost postižu u slatkovodnim ekosustavima (Burford i sur. 2019; Mihaljević i Stević 2011). Morfologija i ekologija cijanobakterija vrlo su raznolike. Prema međunarodnoj taksonomskoj bazi podataka AlgaeBase, koja objedinjuje informacije o algama i srodnim organizmima, uključujući nomenklaturu, klasifikaciju i rasprostranjenost taksona, do danas je poznato više od 6000 vrsta cijanobakterija. One su svrstane u carstvo Bacteria, koljeno Cyanobacteriophyta i razred Cyanophyceae, unutar kojeg je opisano 39 redova (Guiry 2024; Guiry i Guiry 2025).

Cijanobakterije se pojavljuju u različitim razvojnim stadijima, poput primarnih filamenata i spora, osobito tijekom jeseni. Neki se od tih oblika talože u sedimentu (slika 1), gdje preživljavaju nepovoljne uvjete (Hašler i sur. 2004). Faze mirovanja u obliku tzv. „banaka sjemena" mogu trajati od jedne godine do više od jednog stoljeća (Hairston i sur. 1995). Ključni čimbenici koji potiču njihov ponovni razvoj su povećan intenzitet svjetlosti, promjene temperature, unos visokih koncentracija hranjivih tvari te oslobađanje dušika, fosfora i sulfida ili sulfata iz sedimenta (Paerl 1988). Pojedine svojte cijanobakterija postižu veliku brojnost u stratificiranim ekosustavima zahvaljujući plinskim vezikulama koje im omogućuju prilagodbu položaja u vodenom stupcu (Walsby 2005). Velike kolonije plutajućih cijanobakterija migriraju u stupcu vode (Huisman i sur. 2018), a gusto cvjetanje cijanobakterija na samoj površini može potisnuti druge, često manje štetne vrste fitoplanktona.



Slika 1: *Raphidiopsis raciborskii* (Wołoszyńska) Aguilera et al. (*Cylindrospermopsis raciborskii* (Wołoszyńska) Seenayya & Subba Raju 1972) u sedimentu Sakadaškog jezera (Park prirode Kopački rit). Fotografija: Nikolina Bek

Cijanobakterije proizvode širok raspon sekundarnih metabolita, tzv. cijanotoksina, koji mogu biti iznimno štetni za ljudsko zdravlje (Chorus i Bartram 1999; Paerl i Otten 2013; Chorus i Welker 2021). Oslobođeni toksini imaju izražene ekotoksikološke učinke, mogu se bioakumulirati i prenositi trofičkom mrežom do čovjeka, uzrokujući akutna i teška trovanja (Villalobos i sur. 2025). Ovisno o mjestu djelovanja, cijanotoksini se razvrstavaju u hepatotoksine (npr. mikrocistini, nodularini), neurotoksine (npr. anatoksin-a, saksitoksini), citotoksine (npr. cilindrospermopsin) i dermatotoksine (npr. lingbiatoksini) (slika 2, Chorus i Welker 2021).

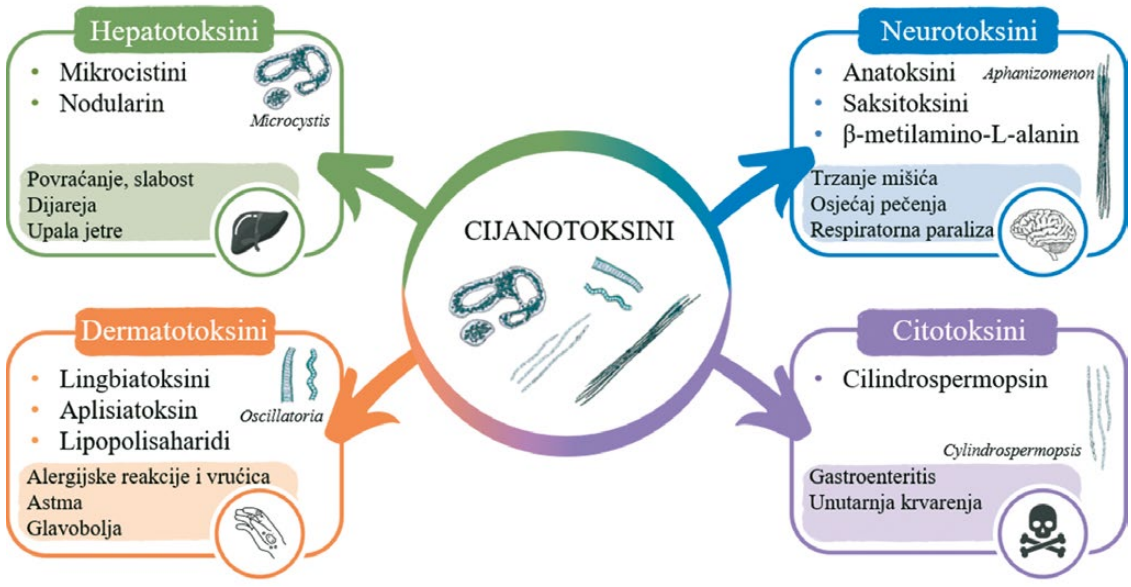
Mikrocistini, osobito mikrocistin-LR (MC-LR), među najčešćim su i najistraženijim cijanotoksinima te su poznati po snažnom hepatotoksičnom učinku i stabilnosti u vodenim ekosustavima (Chorus i Bartram 1999; Agha i sur. 2013). To su stabilni ciklički heptapeptidi s više od 300 poznatih analoga, pri čemu je MC-LR najtoksičniji. Proizvode ih rodovi *Microcystis, Anabaena, Oscillatoria, Planktothrix*, a djeluju inhibicijom protein-fosfataza PP1 i PP2A, uz specifično oštećenje stanica jetre. Ljudi mogu biti izloženi mikrocistinima putem vode za ljudsku potrošnju, hrane i dodataka prehrani te tijekom kontakta s vodom za rekreaciju zahvaćenom cvjetanjem cijanobakterija. Relativni doprinos pojedinog puta izloženosti (izvora) ovisi o uvjetima okoliša i načinu izloženosti, a osim jetre, ovi toksini mogu zahvatiti i druge organe poput bubrega, debelog crijeva, mozga, pluća i srca. Svjetska zdravstvena organizacija (World Health Organization, WHO) preporučila je maksimalnu vrijednost za MC-LR u vodi za ljudsku potrošnju od 1,0 µg/L, dok je u vodi za rekreacijske aktivnosti vrijednost 24 µg/L. Jednaku preporuku za ljudsku potrošnju navodi i Ministarstvo zdravstva Republike Hrvatske (Ministarstvo zdravstva 2023). Ove su vrijednosti prihvaćene u većini zemalja, a MC-LR je 2010. godine klasificiran kao „mogući karcinogen za ljude" (Villalobos i sur. 2025). U suzbijanju negativnih utjecaja cijanotoksina, WHO (2020) naglašava važnost pristupa temeljenog na procjeni rizika, koji uključuje praćenje pojave cvatnje cijanobakterija, procjenu potencijala stvaranja

toksina te primjenu odgovarajućih mjera upravljanja u sustavima obrade vode za ljudsku potrošnju. Nodularini su ciklički pentapeptidi strukturno slični mikrocistinima, a uglavnom ih proizvodi *Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet & Flahault, tipična vrsta bočatih voda. Inhibiraju PP1/PP2A, akumuliraju se većinom u jetri i induciraju oksidativni stres, a epidemiološki dokazi o trovanju ljudi su ograničeni (Villalobos i sur. 2025). Anatoksini su neurotoksični alkaloidi koji se vežu na acetilkolinske receptore ili inhibiraju acetilkolinesterazu te uzrokuju brzu paralizu i smrt kod životinja. U okolišu su relativno nestabilni i najčešće se oslobađaju u fazi odumiranja masovno razvijenih cijanobakterija. Saksitoksini su također neurotoksini koji blokiraju naponski regulirane natrijeve kanale i uzrokuju paralizu mišića te su primarno povezani s pojavom cyanoHABs-a u morskim ekosustavima. Ovi toksini identificirani su u različitim rodovima cijanobakterija (*Cylindrospermopsis, Dolichospermum, Aphanizomenon, Planktothrix, Lyngbya*), stabilni su u vodi tjednima te predstavljaju rizik za izloženost putem hrane i rekreacijskih aktivnosti (Villalobos i sur. 2025). Cilindrospermopsin je triciklički alkaloid s citotoksičnim djelovanjem koji zahvaća jetru i druge organe te je topljiv u vodi. U površinskim vodama zabilježene su toksične koncentracije do ~173 µg/L, ponekad uz istodobnu prisutnost mikrocistina (Villalobos i sur. 2025).

3. CIJANOTOKSINI: ZDRAVSTVENI RIZICI I DETEKCIJA

Cijanobakterije često veliku brojnost postižu u sporotekućim rijekama i akumulacijama (Paerl i sur. 2016). Ti su resursi uobičajeni izvori vode za ljudsku potrošnju pa posljedično mogu biti izloženi povećanom unosu cijanobakterija i njihovih toksičnih metabolita, cijanotoksina. Ovisno o klimatskim i hidrološkim uvjetima, cijanobakterije se u ovim sustavima mogu pojavljivati povremeno, ali razdoblja cvjetanja mogu trajati tjednima ili čak mjesecima (Huisman i sur. 2018). Međutim, nisu sve cvatnje toksične, a za prepoznavanje prisutnosti toksičnih svojti u vodenom sustavu nisu dovoljne samo morfološke analize ili analize pigmenata (Deblois i Juneau 2012), već se u novije vrijeme sve više primjenjuju i molekularne te biokemijske metode (Merel i sur. 2013). Intenzivan razvoj toksičnih cijanobakterija u područjima blizu vodocrpilišta predstavlja ozbiljan javnozdravstveni problem. Povećanje broja cijanobakterija i prisutnost cijanotoksina zabilježena je u rijeci Obrzyci, desnoj pritoci rijeke Odre i značajnom izvoru vode za stanovnike Zielone Gore, grada u zapadnoj Poljskoj, što je dovelo do smanjenja prozirnosti vode i bioraznolikosti (Piontek i sur. 2023). Prisutnost cijanobakterija utvrđena je i u nizu akumulacija koje se koriste za opskrbu vodom na području Srbije (Jovanović i sur. 2022). Višestruki smrtni slučajevi uslijed trovanja cijanotoksinima zabilježeni su u Brazilu još 1996. godine, što je u jednom od najpoznatijih slučajeva trovanja mikrocistinima putem vode za medicinsku uporabu značajno utjecalo na razvoj smjernica za upravljanje cijanotoksinima u vodi (Azevedo i sur. 2002). Slučajevi trovanja zabilježeni su i u Australiji, SAD-u (Wisconsin), Argentini i Urugvaju (Villalobos i sur. 2025). Izloženost cijanotoksinima ostvaruje se konzumacijom kontaminirane vode i zagađenih prehrambenih proizvoda, te tijekom rekreacijskih aktivnosti u vodi. Utjecaj na zdravlje vrlo je raznolik (Chorus i Bartram 1999), a očituje se pojavom akutnih simptoma poput mučnine i oštećenja jetre te kroničnih stanja, uključujući razvoj tumora (Chorus i Welker 2021).

U svrhu zaštite javnog zdravlja neke su agencije postavile standarde za dozvoljene koncentracije cijanotoksina u vodi za ljudsku potrošnju, ali postojeće smjernice su trenutno neobvezujuće (EPA 2025b). S obzirom na sve izraženije klimatske promjene i antropogene pritiske



Slika 2: Prikaz vrsta i učinaka štetnih cijanotoksina te najčešći rodovi cijanobakterija koji proizvode toksine (prilagođeno prema Verma i sur. 2023)

koji mogu utjecati na pojačan razvoj cijanobakterija i posljedično njihov unos u vodoopskrbne sustave, sve je veća potreba donošenja obvezujućih standarda kako bi se osigurala ujednačena zaštita. Američka agencija za zaštitu okoliša (U.S. Environmental Protection Agency – EPA) dala je preporuke za praćenje mikrocistina i cilindrospermopsina te definirala njihove granične vrijednosti u vodi za ljudsku potrošnju. Te vrijednosti iznose 0,3 µg/L za mikrocistin i 0,7 µg/L za cilindrospermopsin u vodi za djecu predškolske dobi i dojenčad, odnosno 1,6 µg/L i 3,0 µg/L za djecu školske dobi i odrasle (EPA 2025b). WHO je preporučila maksimalnu koncentraciju za cilindrospermopsin u vodi za ljudsku potrošnju od 0,7 µg/L, dok je u vodi za rekreacijske aktivnosti maksimalna koncentracija 6 µg/L. Za saksitoksin granična vrijednost iznosi 3 µg/L (odnosno 30 µg/L u rekreacijskim vodama) te za anatoksin-a 3 µg/L (odnosno 60 µg/L u rekreacijskim vodama) (Villabosos i sur. 2025). Prema Direktivi (EU) 2020/2184 Europskog parlamenta i Vijeća (2020) i hrvatskom zakonodavstvu (Ministarstvo zdravstva 2023) nisu definirane regulatorne granične vrijednosti za ostale značajne cijanotoksine, osim za već spomenuti mikrocistin.

Točna detekcija i praćenje cijanotoksina ključni su za upravljanje rizicima koje oni predstavljaju. Neke od metoda uključuju enzimski test na čvrstoj fazi (ELISA), test inhibicije proteina fosfataze (PPIA) te tekućinsku kromatografiju kombiniranu s masenom spektrometrijom (LC-MS) koja pruža visoku osjetljivost i specifičnost, ali zahtijeva specijaliziranu opremu (Hammoud i sur. 2021). Nedavni napredak uključuje primjenu molekularnih tehnika, poput kvantitativne lančane reakcije polimeraze (qPCR), koja omogućuje brzo otkrivanje gena odgovornih za sintezu toksina u cijanobakterijama te tako pridonosi ranom upozorenju na prisutnost potencijalno toksičnih cijanobakterija (Grant i sur. 2024). Ove su tehnike osobito vrijedne za vodovodne sustave koji primjenjuju proaktivno praćenje i odgovarajuće strategije djelovanja.

Unatoč tehnološkom napretku, i dalje postoje izazovi u standardizaciji metoda utvrđivanja i interpretaciji rezultata, osobito u pogledu odnosa između prisutnosti gena i stvarne produkcije toksina. Osim toga, pojava manje poznatih cijanotoksina i njihovih mogućih učinaka na zdravlje ljudi zahtijeva kontinuirana istraživanja radi proširenja mogućnosti detekcije i boljeg razumijevanja njihovih implikacija na sigurnost vode (Al Haffar 2024).

3.1. Primjer slučaja – akumulacija Butoniga

Iako na području Republike Hrvatske do sada nisu zabilježeni slučajevi štetnog djelovanja cijanotoksina na zdravlje ljudi, utvrđena je prisutnost cijanobakterija u akumulacijama iz kojih se voda koristi u sustavu vodoopskrbe. Jedna od njih je akumulacija Butoniga, smještena u dolini lijeve pritoke Mirne, nizvodno od spajanja njezina tri glavna bujična ogranka: Butoniga, Dragućki i Račički potok. Ona se većinom vodom opskrbljuje izravno iz površinskih tokova te u manjoj mjeri padalinama, a prikupljena voda namijenjena je vodoopskrbi (Hrvatske vode 2024). U sastavu tla u slivu akumulacije nalaze se primjese pješčenjaka, lapora, breča i konglomerata, koji su podložni eroziji i pogodni za apsorpciju raznih zagađivala, zbog čega se ona talože u zaplavnom području jezera (Volf i sur. 2023). Butoniga, površine sliva od oko 73 km^2, pripada relativno malim i plitkim akumulacijama, te je osjetljiva na procese eutrofikacije i degradacije prouzročene klimatskim promjenama i ljudskim aktivnostima u slivu (Volf i sur. 2023). Poznati pritisci uglavnom uključuju eroziju te unos nepročišćenih otpadnih voda iz naselja, koje se najčešće kroz sabirne jame ili kanalizaciju dreniraju u akumulaciju (Hajduk Černeha 2017; Volf i sur. 2023). Kvaliteta vode ovisi ponajprije o godišnjem dobu i količini vode u akumulaciji. Od travnja do listopada akumulacija je termalno stratificirana, što utječe na fizikalno-kemijska svojstva vode, dok glavni problem predstavlja povišena koncentracija hranjivih tvari, osobito fosfora, koji potiče biološku proizvodnju i eutrofikaciju. Hranjive tvari u akumulaciju uglavnom dospijevaju iz slivnog područja, dok se manji dio remobilizira iz sedimenta (Hajduk Černeha 2017; Volf i sur. 2023). Ovakvi uvjeti općenito povoljno utječu na masovni razvoj cijanobakterija. Dosadašnjim istraživanjima u akumulaciji utvrđena je prisutnost cijanobakterija, a posebno veću brojnost postižu vrste rodova *Konvophoron (ex Romeria), Anabaena, Chroococcus, Merismopedia, Phormidium, Pseudanabaena, Raphidiopsis, Lyngbya* (Šetin 2019; Volf i sur. 2023). Njihova prisutnost ukazuje na važnost praćenja cijanobakterija u ovakvim sustavima radi pravovremenog sprječavanja njihova potencijalno toksičnog djelovanja.

4. TEHNOLOGIJE UKLANJANJA CIJANOBAKTERIJA I CIJANOTOKSINA IZ VODE ZA LJUDSKU POTROŠNJU

Obrada vode opterećene cijanobakterijama i cijanotoksinima predstavlja složen tehnički i operativni izazov (Ghernaout i Elboughdiri 2020). U svrhu uklanjanja cijanobakterija i toksina iz vode za ljudsku potrošnju u postrojenjima za obradu vode, razvijene su i optimizirane različite tehnologije, od kojih svaka ima specifične prednosti i ograničenja.

Tradicionalne metode obrade vode uključujući koagulaciju, flokulaciju, sedimentaciju i filtraciju, uglavnom su, učinkovite u uklanjanju cijanotoksina koji se zadržavaju unutar neoštećenih stanica cijanobakterija (EPA 2025c). Međutim, ti su procesi manje učinkoviti u uklanjanju cijanotoksina oslobođenih iz stanica u vodeni okoliš (otopljeni cijanotoksini). Budući da oni nisu vezani na čestice, uspješno zaobilaze navedene postupke (Westrick i sur. 2010), posebno ako se ne primjenjuju dodatne faze obrade vode poput adsorpcije ili naprednih oksidacijskih procesa. Pri primjeni tradicionalnih metoda nužno je osigurati uklanjanje

cijanobakterija iz mulja preostalog nakon obrade vode, a poseban problem nastaje ako se taj mulj reciklira (EPA 2025c; Jalili i sur. 2022).

Za uklanjanje cijanobakterija i cijanotoksina iz vode za ljudsku potrošnju koriste se i metode filtracije primjenom različitih membranskih sustava poput reverzne osmoze (RO), mikrofiltracije (MF), ultrafiltracije (UF) i nanofiltracije (NF). Iako MF i UF imaju ograničenu učinkovitost u uklanjanju otopljenih toksina, vrlo su učinkovite u fizičkom izdvajanju cijanobakterija, pa tako i uklanjanju cijanotoksina koje one sadrže. Za razliku od njih, visokotlačne membrane, poput NF i RO, pokazuju bolju sposobnost zadržavanja cijanotoksina male molekularne mase (Dixon i sur. 2020). Međutim, visoki operativni troškovi i onečišćenje membrana i dalje onemogućavaju njihovu širu primjenu.

Oksidacijski procesi, među kojima su ozoniranje i kloriranje, razgrađuju cijanotoksine i druga organska zagađivala. Iako su učinkoviti u razgradnji određenih toksina, mogu uzrokovati i razgradnju stanica, pri čemu cijanotoksini ulaze u vodeni sustav, povećavajući kontaminaciju (Xu i sur. 2024). Ravnoteža između učinkovite oksidacije i sprječavanja razgradnje stanica vrlo je osjetljiva te zahtijeva preciznu kontrolu uvjeta obrade.

Napredni oksidacijski procesi (engl. Advanced Oxidation Processes - AOPs) uključuju stvaranje visoko reaktivnih spojeva, poput hidroksilnih radikala, koji razgrađuju organska zagađivala, uključujući cijanotoksine. Uobičajeni AOP postupci uključuju ozoniranje, UV/H2O2 i Fentonove reakcije. Utvrđeno je da ozoniranje učinkovito razgrađuje mikrocistine, pri čemu učinkovitost ovisi o dozi ozona, vremenu kontakta i parametrima kvalitete vode (Liang i sur. 2021). AOP procesi temeljeni na UV zračenju također mogu postići značajnu razgradnju toksina, ali zahtijevaju pažljivu kontrolu radnih uvjeta kako bi se spriječilo stvaranje štetnih nusprodukata (Schneider i Bláha 2020).

Adsorpcija je česta tehnika koja se koristi za uklanjanje otopljenih cijanotoksina iz vode, a provodi se pomoću aktivnog ugljena u praškastom (engl. Powdered Activated Carbon - PAC) ili granuliranom (engl. Granular Activated Carbon - GAC) obliku (EPA 2025c). Na učinkovitost adsorpcije utječu vrsta ugljena, vrijeme kontakta i prisutnost konkurentnih organskih tvari. Kako bi se poboljšala adsorpcijska sposobnost i selektivnost za određene cijanotoksine, novija su istraživanja usmjerena na uporabu modificiranih sorbenata, poput grafenova oksida, funkcionaliziranog mezoporoznog ugljika te površinski obloženih magnetskih nanočestica (Abbas i sur. 2020). Međutim, regeneracija i odlaganje iskorištenih adsorbensa mogu imati sekundarne nepovoljne utjecaje na okoliš.

Inovativni pristupi obrade vode, usmjereni na poboljšanje učinkovitosti uklanjanja cijanobakterija i cijanotoksina, obuhvaćaju i primjenu AOP procesa temeljenih na sulfatnim radikalima (engl. Sulfate Radical-based Advanced Oxidation Processes - SR-AOPs). Ti postupci primarno ciljaju radikalnu skupinu $SO_4^{\bullet-}$, koja pokazuje izraženu specifičnost prema supstratu i ima visoku selektivnost prema određenim organskim onečišćujućim tvarima, istovremeno pokazujući manju reaktivnost prema uobičajenim komponentama vodnog matriksa, što poboljšava učinkovitost uklanjanja cijanotoksina iz vodenih ekosustava (Verma i sur. 2023). Međutim, odabir i optimizacija metoda pročišćavanja vode značajno ovise o karakteristikama vode, ciljnim toksinima, operativnim troškovima i regulatornim zahtjevima.

Jedna od održivih prirodnih metoda pročišćavanja voda, priobalna filtracija (engl. Riverbank Filtration - RBF), primjenjuje se diljem svijeta u svrhu snabdijevanja stanovnika urbanih, prigradskih i ruralnih područja vodom za ljudsku potrošnju uz minimalne troškove (Satyaji Rao i sur. 2023; Salamon i Goda 2019). Međutim, ti su sustavi izloženi znatno većem antropogenom pritisku u usporedbi s drugim, prirodnim izvorima podzemnih voda. Zbog infiltracije riječne vode slabije kakvoće, prirodne podzemne vode mogu se onečistiti kemijskim i mikrobiološkim tvarima. U tim se sustavima mnogi organski onečišćujući spojevi razgrađuju, no pokazalo se da su neki spojevi relativno postojani, a obuhvaćaju industrijske kemikalije, farmaceutske proizvode i proizvode za osobnu higijenu te pesticide i herbicide (van Driezum i sur. 2019). Većina farmaceutskih proizvoda i proizvoda za osobnu higijenu u okoliš dospijeva putem uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Tijekom procesa obrade, ovisno o njihovu stupnju postojanosti, oni se djelomično uklanjaju ili u određenoj mjeri ostaju u izlaznom efluentu (Joss i sur. 2005; Radjenović i sur. 2009; van Driezum i sur. 2019). Zbog njihove postojanosti tijekom procesa obrade te prisutnosti u otpadnim vodama (glavni put ulaska u vodeni okoliš), pojedini su spojevi, poput inhibitora korozije benzotriazola, antiepileptika karbamazepina i antibiotika sulfametoksazola, prihvaćeni kao pokazatelji utjecaja otpadnih voda na prirodne vodene sustave (Jekel i sur. 2015). Utvrđeno je da kvaliteta podzemnih voda u sustavima vodoopskrbe s RBF bunarima smještenima uz izrazito dinamične rijeke, tijekom i neposredno nakon razdoblja visokih vodostaja, može biti smanjena (van Driezum i sur. 2019). Površinske vode sve su više opterećene farmakološki aktivnim spojevima (engl. Pharmaceutically Active Compounds - PhACs), što zbog nepotpune učinkovitosti priobalne filtracije može predstavljati potencijalni rizik za kakvoću vode. Analizom učinkovitosti priobalne filtracije pri uklanjanju 111 PhACs- ova u urbaniziranom dijelu Dunava (Kondor i sur. 2020), utvrđena je prisutnost 52 PhAC-a u Dunavu, te 32 PhAC-a u vodama crpilišta. Za većinu ispitanih spojeva učinkovitost priobalne filtracije bila je veća od 95 % i nije ovisila o koncentracijama izmjerenim u riječnoj vodi, dok je za karbamazepin, lidokain, tramadol i lamotrigin učinkovitost filtracije bila niska (<50 %). Zbog prostorno-vremenskih promjena u učinkovitosti priobalne filtracije, predviđanje pojave i koncentracija

navedenih četiriju PhAC-ova predstavlja dodatni izazov u osiguravanju sigurne opskrbe vodom za ljudsku potrošnju (Kondor i sur. 2020).

Nadzor te točna i pravovremena detekcija cijanobakterija i cijanotoksina ključni su za uspješnu obradu vode. U posljednje vrijeme u sustavima vodoopskrbe sve se češće primjenjuju *in situ* fikocijaninske sonde i drugi optički senzori, koji omogućuju kontinuirano praćenje biomase cijanobakterija u sirovoj vodi te predstavljaju važan alat sustava ranog upozorenja na pojavu cijanobakterijskih cvatnji i povećan rizik za kvalitetu vode (Wong i Hobbs 2020; Ma i sur. 2024).

Kako bi se spriječio unos cijanobakterija i cijanotoksina u vodna tijela, bitno je sustavno provođenje monitoringa slatkovodnih ekosustava, a sve se češće koriste i istraživanja na daljinu (engl. Remote Sensing – RS; Kangro i sur. 2025). Ipak, točnost ovakvih istraživanja ovisi o čimbenicima kao što su tip vodnog tijela, tehničke značajke senzora i dostupne analitičke metode (Wu i sur. 2025). Stoga su potrebni daljnji napori u razvoju sustava za praćenje u stvarnom vremenu te razvoju prediktivnih modela radi poboljšanja preventivnih sustava i učinkovitosti obrade vode. Osim toga, varijabilnost u sintezi toksina među vrstama cijanobakterija, posebno u različitim zajednicama planktona i bentosa, zajedno s ograničenjima postojećih tehnologija detekcije, otežava pravovremenu procjenu i odgovor (Wood i sur. 2020).

Tijekom posljednjih 20 godina cvjetanje cijanobakterija je sve učestalija pojava diljem svijeta (Wang i sur. 2023; EPA 2025a), što predstavlja dodatni izazov za sustave vodoopskrbe te zahtijeva razvoj prilagođenih pristupa monitoringu i obradi vode. Značajno im pridonose klimatske promjene koje se ogledaju u povišenju temperature i promjeni obrazaca oborina, što može povećati unos hranjivih tvari (posebno dušika i fosfora) i utjecati na stratifikaciju vodenih tijela, stvarajući povoljne uvjete za pojavu cvjetanja (Hu i sur. 2024; Wilk-Woźniak i sur. 2024). Navedeno dodatno komplicira tehnološke procese obrade vode jer mnogi sustavi za pročišćavanje vode i dalje nisu pripremljeni za povećan unos cijanobakterija niti mogu osigurati potpuno uklanjanje stanica, čija učinkovitost također ovisi i o samim vrstama cijanobakterija (Zamyadi i sur. 2013). Neravnoteža između dinamike cvjetanja i kapaciteta obrade vode naglašava potrebu za prediktivnim modelima i prilagodljivim strategijama upravljanja (Zhao i sur. 2019). Međutim, dodatni problem predstavlja i potreba za osiguranjem znatnih financijskih i tehničkih resursa (Risco-Martín i sur. 2023), koje zahtijeva uvođenje naprednih tehnologija i sustava praćenja.

5. ZAKLJUČAK

Globalni porast cvjetanja cijanobakterija, praćen oslobađanjem cijanotoksina, predstavlja složen i sve veći izazov u očuvanju vodnih tijela koja se koriste kao izvori vode za ljudsku potrošnju. Cvjetanje je potaknuto klimatskim promjenama, eutrofikacijom te specifičnostima cijanotoksina, što ih čini zahtjevnima za uklanjanje pomoću konvencionalnih postupaka obrade. Unatoč napretku u uspostavi metoda praćenja pojavnosti cijanobakterija te razvoju tehnologija obrade vode, još uvijek nedostaju standardizirani postupci. Usto nedostatak spoznaja o djelovanju toksina u promjenjivim okolišnim uvjetima dodatno otežava usporedbu i optimizaciju dostupnih rješenja. U tom kontekstu, dugoročna sigurnost vode za ljudsku potrošnju može se osigurati jedino kroz lokalno prilagođen pristup, koji povezuje pravovremeno praćenje, prilagođene postupke obrade i primjenu suvremenih tehnologija utemeljenih na razumijevanju ekoloških procesa u vodenim ekosustavima. Buduća istraživanja i upravljačke strategije moraju biti usmjerene na ekonomski održiva rješenja i jačanje regulatornih okvira kako bi se smanjili zdravstveni rizici i očuvala kakvoća vodnih tijela. ■

ZAHVALA

Rad je izrađen u sklopu projekta Bioindikatori i antropogeni pritisci u vodenim sustavima Rezervata biosfere Mura-Drava-Dunav (AQUA-BIOPRESS). Rad financira Europska unija – NextGenerationEU.

LITERATURA

Abbas, T., Kajjumba, G. W., Ejjada, M., Masrura, S. U., Marti, E. J., Khan, E., & Jones-Lepp, T. L. (2020). Recent advancements in the removal of cyanotoxins from water using conventional and modified adsorbents – A contemporary review. Water, 12(10), 2756. https://doi.org/10.3390/w12102756

Agha, R., Cirés, S., Wörmer, L., & Quesada, A. (2013). Limited stability of microcystins in oligopeptide compositions of Microcystis aeruginosa (Cyanobacteria): Implications in the definition of chemotypes. Toxins, 5(6), 1089–1104. https://doi.org/10.3390/toxins5061089

Al Haffar, M., Fajloun, Z., Azar, S., Sabatier, J. M., & Abi Khattar, Z. (2024). Lesser-known cyanotoxins: A comprehensive review of their health and environmental impacts. Toxins, 16(12), 551. https://doi.org/10.3390/toxins16120551

Azevedo, S. M. F. O., Carmichael, W. W., Jochimsen, E. M., Rinehart, K. L., Lau, S., Shaw, G. R., & Eaglesham, G. K. (2002). Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru–Brazil. Toxicology 181–182, 441–446. https://doi.org/10.1016/S0300-483X(02)00491-2

Burford, M. A., Carey, C. C., Hamilton, D. P., Huisman, J., Paerl, H. W., Wood, S. A., & Wulff, A. (2019). Perspective: Advancing the research agenda for improving understanding of cyanobacteria in a future of global change. Harmful Algae, 91, 101601. https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.04.004

Carey, C. C., Ibelings, B. W., Hoffmann, E. P., Hamilton, D. P., & Brookes, J. D. (2012). Eco-physiological adaptations

that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate. Water Research, 46(5), 1394–1407. https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.016

Chorus, I., & Bartram, J. (Eds.). (1999). Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. E & FN Spon. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/water-safety-and-quality/toxic-cyanobacteria---1st-ed.pdf?sfvrsn=338a8c22_1

Chorus, I., & Welker, M. (Eds.). (2021). Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management (2nd ed.). World Health Organization. https://doi.org/10.1201/9781003081449

Deblois, C. P., & Juneau, P. (2012). Comparison of resistance to light stress in toxic and non-toxic strains of Microcystis aeruginosa (Cyanophyta). Journal of Phycology, 48(4), 1002–1011. https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01191.x

Dittmann, E., & Wiegand, C. (2006). Cyanobacterial toxins – Occurrence, biosynthesis and impact on human affairs. Molecular Nutrition & Food Research, 50(1), 7–17. https://doi.org/10.1002/mnfr.200500162

European Parliament & Council of the European Union. (2020). Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast). Official Journal of the European Union, L 435, 1–62. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj

Dixon, M. B., Ho, L., & Antoniou, M. G. (2020). Removal of cyanobacteria and cyanotoxins by membrane processes. In M. G. Antoniou, L. Ho, & M. B. Dixon (Eds.), Water treatment for purification from cyanobacteria and cyanotoxins (pp. 85–112). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118928677.ch4

Environmental Protection Agency (EPA). (2025a). Climate Change and Freshwater Harmful Algal Blooms. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/habs/climate-change-and-freshwater-harmful-algal-blooms#:~:text=Warming%20water%20temperature&text=HAB%20forming%20cyanobacteria%20thrive%20in,magnitude%20and%20duration%20of%20cyanoHABs

Environmental Protection Agency (EPA). (2025b). EPA drinking water health advisories for cyanotoxins. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/habs/epa-drinking-water-health-advisories-cyanotoxins

Environmental Protection Agency (EPA). (2025c). Summary of cyanotoxins treatment in drinking water. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/summary-cyanotoxins-treatment-drinking-water

Ghernaout, D., & Elboughdiri, N. (2020). Dealing with cyanobacteria and cyanotoxins: Engineering viewpoints. Open Access Library Journal, 7, e6363. https://doi.org/10.4236/oalib.1106363

Grant, L., Botelho, D., & Rehman, A. (2024). Early detection methods for toxic cyanobacteria blooms. Pathogens, 13(12), 1047. https://doi.org/10.3390/pathogens13121047

Guiry, M. D. (2024). How many species of algae are there? A reprise. Four kingdoms, 14 phyla, 63 classes and still growing. Journal of Phycology, 60:214-228.

Guiry, M. D., Guiry, G. M. (2025). AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. https://www.algaebase.org/browse/taxonomy/#4351 (26. 10. 2025.)

Habuda-Stanić, M. (2021) Vodom do zdravlja. U: Zbornik radova s 13. međunarodnog znanstveno-stručnog skupa Hranom do zdravlja, 107-115.

Hairston, N. G., Van Brunt, R. A., Kearns, C. M., & Engstrom, D. R. (1995). Age and survivorship of diapausing eggs in a sediment egg bank. Ecology, 76(6), 1706–1711. https://doi.org/10.2307/1940704

Hajduk Černeha, B. (2017). Butoniga reservoir – Loads in the basin and water protection, Znanstveno stručni skup, Upravljanje jezerima i akumulacijama u Hrvatskoj, Rubinić (ed), pp 86-95, Biograd na Moru.

Hajduk Černeha, B. (2021). Akumulacija Butoniga u Istri – prva iskustva u korištenju za voodopskrbu. Simpozij z mednarodno udeležbo, Vodni dnevi, pp 55-65, Rimske Toplice.

Hammoud, N. A., Zervou, S.-K., Kaloudis, T., Christophoridis, C., Paraskevopoulou, A., Triantis, T. M., Slim, K., Szpunar, J., Fadel, A., Lobinski, R., & Hiskia, A. (2021). Investigation of the Occurrence of Cyanotoxins in Lake Karaoun (Lebanon) by Mass Spectrometry, Bioassays and Molecular Methods. Toxins, 13(10), 716. https://doi.org/10.3390/toxins13100716

Hašler, P., Poulíčková, A., & Lysáková, M. (2004). The survival and vitality of cyanobacteria and algae in fishpond bottom sediments. Czech Phycology, 4, 133–144.

Hrvatske vode (2024). Elaborat zaštite okoliša za postupak ocjene o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš. Rekonstrukcije brane Butoniga za osiguranje dodatnih količina vode za vodoopskrbu. Zagreb: Kaina d.o.o.

Hrvatski zavod za javno zdravstvo. (2025). Izvještaj o zdravstvenoj ispravnosti vode za ljudsku potrošnju u Republici Hrvatskoj za 2024. godinu. Služba za zdravstvenu ekologiju, Odjel za kontrolu zdravstvene ispravnosti voda i vodoopskrbu. https://www.hzjz.hr/sluzba-zdravstvena-ekologija/izvjestaj-o-zdravstvenoj-ispravnosti-vode-za-ljudsku-potrosnju-u-republici-hrvatskoj-za-2024-godinu/

Hu, Z., Li, A., Li, Z., & Mulholland, M. R. (2024). Editorial: The impacts of anthropogenic activity and climate change on the formation of harmful algal blooms (HABs) and its ecological consequence. Frontiers in Marine Science, 11, 1397744. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1397744

Huisman, J., Codd, G. A., Paerl, H. W., Ibelings, B. W., Verspagen, J. M. H., & Visser, P. M. (2018). Cyanobacterial

blooms. Nature Reviews Microbiology, 16(8), 471–483. https://doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1

IFPRI, International Food Policy Research Institute, Veolia (2015): The murky future of global water quality. New global study projects rapid deterioration in water quality. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Veolia Water North America, Washington, D.C. Chicago, IL, USA.

Jalili, F., Moradinejad, S., Zamyadi, A., Dorner, S., Sauvé, S., & Prévost, M. (2022). Evidence-Based Framework to Manage Cyanobacteria and Cyanotoxins in Water and Sludge from Drinking Water Treatment Plants. Toxins, 14(6), 410. https://doi.org/10.3390/toxins14060410

Jekel, M., Dott, W., Bergmann, A., Dünnbier, U., Gnirß, R., Haist-Gulde, B., Hamscher, G., Letzel, M., Licha, T., Lyko, S., Miehe, U., Sacher, F., Scheurer, M., Schmidt, C.K., Reemtsma, T., Ruhl, A.S., (2015). Selection of organic process and source indicator substances for the anthropogenically influenced water cycle. Chemosphere 125, 155–167. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.025

Joss, A., Keller, E., Alder, A.C., Göbel, A., McArdell, C.S., Ternes, T., Siegrist, H., (2005). Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. Water Res. 39, 3139–3152. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2005.05.031

Jovanović, J., Popović, S., Subakov Simić, G., Jovanović, V., Predojević, D., Jovanović, D., Karadžić, V. (2022). Freshwater cyanobacteria in waters intended for human consumption in Serbia: two decades of changes in diversity. Arch Biol Sci., 74(3), 217-226. https://doi.org/10.2298/ABS220518020J

Kangro, K., Pall, A.-M., Laugaste, R., Piirsoo, K., Maileht, K., Rahn, I.-A., & Alikas, K. (2025). Two decades of cyanobacterial bloom dynamics in a shallow eutrophic lake: Remote sensing methods in combination with light microscopy. Hydrobiologia, 852, 425–442. https://doi.org/10.1007/s10750-024-05546-x

Kondor, A. C., Jakab, G., Vancsik, A., Filep, T., Szebényi, J., Szabó, L., Maász, G., Ferincz, Á., Dobosy, P., & Szalai, Z. (2020). Occurrence of pharmaceuticals in the Danube and drinking water wells: Efficiency of riverbank filtration. Environmental Pollution, 265, 114893. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114893

Liang, D., Li, N., An, J., Ma, J., Wu, Y., & Liu, H. (2021). Fenton-based technologies as efficient advanced oxidation processes for microcystin-LR degradation. The Science of the total environment, 753, 141809. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141809

Ma, L., Dorner, S., & Prévost, M. (2024). Evidence-based framework to use in situ phycocyanin readings for cyanobacterial risk assessment within drinking water treatment plants. Environmental Science: Water Research & Technology, 10(3), 688–701. https://pubs.rsc.org/ew/article/10/3/688/808643/Evidence-based-framework-to-use-in-situ

Mantzouki, E., Lürling, M., Fastner, J., De Senerpont Domis, L., Wilk-Woźniak, E., Koreivienė, J., Seelen, L., Teurlincx, S., Verstijnen, Y., Krztoń, W., Walusiak, E., Karosienė, J., Kasperovičienė, J., Savadova, K., Vitonytė, I., Cillero-Castro, C., Budzyńska, A., Goldyn, R., Kozak, A., ... Ibelings, B. W. (2018). Temperature Effects Explain Continental Scale Distribution of Cyanobacterial Toxins. Toxins, 10(4), 156. https://doi.org/10.3390/toxins10040156

Merel, S., Walker, D., Chicana, R., Snyder, S., Baurès, E., & Thomas, O. (2013). State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins. Environment International, 59, 303–327. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.06.013

Mihaljević, M., Stević, F. (2011). Cyanobacterial blooms in a temperate river-floodplain ecosystem: the importance of hydrological extremes. Aquatic ecology, 45, 335–349. https://doi.org/10.1007/s10452-011-9357-9

Ministarstvo zdravstva. (2023). Pravilnik o parametrima sukladnosti, metodama analiza i monitorinzima vode namijenjene za ljudsku potrošnju (Narodne novine, br. 64/2023). https://narodne-novine.nn.hr/

Paerl H.W. (1988). Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine and inland waters. Limnology and Oceanography, 33, 823–847. https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.4part2.0823

Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. Microbial Ecology, 65(4), 995–1010. https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y

Paerl, H. W., Gardner, W. S., Havens, K. E., Joyner, A. R., McCarthy, M. J., Newell, S. E., Qin, B., & Scott, J. T. (2016). Mitigating cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems impacted by climate change and anthropogenic nutrients. Harmful Algae, 54, 213–222. https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.09.009

Piontek, M., Czyzewska, W., Mazur-Marzec, H. (2023). Effects of Harmful Cyanobacteria on Drinking Water Source Quality and Ecosystems. Toxins, 15, 703. https://doi.org/10.3390/toxins15120703

Radjenović, J., Petrović, M., Barceló, D., (2009). Fate and distribution of pharmaceuticals in wastewater and sewage sludge of the conventional activated sludge (CAS) and advanced membrane bioreactor (MBR) treatment. Water Res. 43, 831–841. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2008.11.043

Risco-Martín, J. L., Esteban, S., Chacón, J., Carazo-Barbero, G., Besada-Portas, E., & López-Orozco, J. A. (2023). Simulation-driven engineering for the management of harmful algal and cyanobacterial blooms. Simulation. https://doi.org/10.1177/00375497231184246

Salamon, E., Goda, Z. (2019). Coupling Riverbank Filtration with Reverse Osmosis May Favor Short Distances between Wells and Riverbanks at RBF Sites on the River Danube in Hungary. Water, 11, 113. https://doi.org/10.3390/w11010113

Satyaji Rao, Y. R., Prasad, Y. S., Chandra, G. N., Vijay, T. (2023) River Bank Filtration Process Using Groundwater Flow Modeling and Particle Tracking Approach in a Saline Coastal Aquifer. Journal of Hydrologic Engineering 28 (7). https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-5876

Schneider, M., Bláha, L. (2020). Advanced oxidation processes for the removal of cyanobacterial toxins from drinking water. Environ Sci Eur 32, 94. https://doi.org/10.1186/s12302-020-00371-0

Šetin, I. (2019). Fitoplankton kao biološki pokazatelj kakvoće vode akumulacije Butoniga (Diplomski rad, Biološki odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu). Zagreb, Hrvatska.

van Driezum, I. H., Derx, J., Oudega, T. J., Zessner, M., Naus, F. L., Saracevic, E., Kirschner, A. K. T., Sommer, R., Farnleitner, A. H., & Blaschke, A. P. (2019). Spatiotemporal resolved sampling for the interpretation of micropollutant removal during riverbank filtration. Science of the Total Environment, 649, 212–223. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.300

Verma, S., Kumar, P., & Lavrenčič Štangar, U. (2023). A perspective on removal of cyanotoxins from water through advanced oxidation processes. Global Challenges, 7(9), 2300125. https://doi.org/10.1002/gch2.202300125

Villalobos, T.; Suárez-Isla, B.; Garcia, C. (2025). Health and Environmental Impacts of Cyanobacteria and Cyanotoxins from Freshwater to Seawater. Toxins, 17, 126. https://doi.org/10.3390/toxins17030126

Volf, G., Atanasova, N., Kompare, B., Precali, R., Ožanić, N. (2015). Study of the impact of TIN/PO4 ratio on mucilage formation in the northern Adriatic using regression trees. Acta Adriatica. 56 (2), 207–222.

Volf, G., Žutinić, P., Gligora Udovič, M., Kulaš, A., & Mustafić, P. (2023). Model klorofila-a za akumulaciju Butoniga u Istri. Hrvatske vode, 31(125), 207–216.

Walsby, A. E. (2005). Stratification by cyanobacteria in lakes: A dynamic buoyancy model indicates size limitations met by Planktothrix rubescens filaments. New Phytologist, 168(2), 365–376. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01508.x

Wang, Y., Feng, L., & Hou, X. (2023). Algal blooms in lakes in China over the past two decades: Patterns, trends, and drivers. Water Resources Research, 59, e2022WR033340. https://doi.org/10.1029/2022WR033340

Westrick, J. A., Szlag, D. C., Southwell, B. J., & Sinclair, J. L. (2010). A review of cyanobacteria and cyanotoxins removal/inactivation in drinking water treatment. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 397(5), 1705–1714. https://doi.org/10.1007/s00216-010-3709-5

World Health Organization. (2020). Cyanobacterial toxins: Microcystins. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/microcystins-background-201223.pdf?sfvrsn=6d60aa6d_3

Wilk-Woźniak, E., Krztoń, W., Budziak, M., Walusiak, E., Žutinič, P., Gligora Udovič, M., Koreivienė, J., Karosienė, J., Kasperovičienė, J., Kobos, J., Toporowska, M., Bańkowska-Sobczak, A., Budzyńska, A., Domek, P., Dunalska, J., Frąk, M., Gołdyn, R., Grabowska, M., Jakubowska-Krepska, N., Jasser, I., Karpowicz, M., Kokociński, M., Kozak, A., Mazur-Marzec, H., Mądrecka-Witkowska, B., Messyasz, B., Napiórkowska-Krzebietke, A., Niedźwiecki, M., Pawlik-Skowrońska, B., Pasztaleniec, A., Pełechata, A., Pełechaty, M., Pęczuła, W., Rosińska, J., Szeląg-Wasielewska, E., Mankiewicz-Boczek, J., Wasilewicz, M., Stević, F., Špoljarić Maronić, D., & Žuna Pfeiffer, T. (2024). Harmful blooms across a longitudinal gradient in central Europe during heatwave: Cyanobacteria biomass, cyanotoxins, and nutrients. Ecological Indicators, 160, 111929. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111929

Wong, S., & Hobbs, W. O. (2020). Exploring the use of fluorometric sensors to monitor harmful algal blooms in lakes (Publication No. 20-03-010). Washington State Department of Ecology. https://fortress.wa.gov/ecy/publications/SummaryPages/2003010.html

Wood, S. A., Kelly, L., Bouma-Gregson, K., Humbert, J. F., Laughinghouse, H. D., IV, Lazorchak, J., McAllister, T., McQueen, A., Pokrzywinski, K., Puddick, J., Quiblier, C., Reitz, L. A., Ryan, K., Vadeboncoeur, Y., Zastepa, A., & Davis, T. W. (2020). Freshwater Biology, 65(10), 1824–1842. https://doi.org/10.1111/fwb.13532

Wu, J., Cao, Y., Wu, S., Parajuli, S., Zhao, K., & Lee, J. (2025). Current capabilities and challenges of remote sensing in monitoring freshwater cyanobacterial blooms: A scoping review. Remote Sensing, 17, 918. https://doi.org/10.3390/rs17050918

Xu, H., Yang, A., Pang, Y., & Pei, H. (2024). Advances and challenges in the technologies for cyanobacterial cells removal in drinking water treatment. Chemosphere, 359, 142338. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142338

Zadrović L. (2025) Zdravstvena ispravnost vode za ljudsku potrošnju u razdoblju od 2019. do 2023. godine u Republici Hrvatskoj. Zaštita okoliša, Kem. Ind. 74 (9-10), 432–436.

Zamyadi, A., Dorner, S., Sauvé, S., Ellis, D., Bolduc, A., Bastien, C., & Prévost, M. (2013). Species-dependence of cyanobacteria removal efficiency by different drinking water treatment processes. Water Research, 47(8), 2689–2700. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.040

Zhao, C. S., Shao, N. F., Yang, S. T., Ren, H., Ge, Y. R., Feng, P., Dong, B. E., & Zhao, Y. (2019). Predicting cyanobacteria bloom occurrence in lakes and reservoirs before blooms occur. Science of The Total Environment, 670, 837–848. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.161

CYANOBACTERIA AND CYANOTOXINS IN WATER SUPPLY SYSTEMS

Abstract. Cyanobacteria, or blue-green algae, are an integral part of planktonic and periphytic communities in freshwater ecosystems, where they contribute to primary production and food webs.. However, in increased temperature conditions, higher nutrient input and hydrological stability, they develop more intensively and create secondary metabolites, cyanotoxins, some of which have a toxic impact and pose a risk to the quality and safety of water intended for human consumption and to human health. For the removal of cyanobacteria and cyanotoxins, different traditional methods (coagulation, flocculation, sedimentation, filtration) are used and new innovative treatment approaches are developed (e.g. advanced oxidation processes), with a special emphasis on the development and application of sustainable natural water treatment methods, such as coastal filtration. However, complex operational and technical requirements and a lack of insights into the impacts of toxins in changeable environmental conditions are greatly influencing the monitoring and timely removal of cyanobacteria. All of this indicates a need of integrated, locally adapted approach for ensuring the quality of water intended for human consumption that integrates ecological understanding of the processes in aquatic environments, efficient water status monitoring systems with a special emphasis on cyanobacteria presence, adaptable and modernized water treatment technologies, as well as strengthening legislative frameworks in the conditions of increasing climate and anthropogenic pressures.

Key words: water intended for human consumption, water treatment; cyanobacteria blooms

CYANOBAKTERIEN UND CYANOTOXINE IN WASSERVERSORGUNGSSYSTEMEN

Zusammenfassung. Cyanobakterien oder Blaualgen sind ein integraler Bestandteil der planktonischen und Bewuchsgemeinschaften von Süßwasserökosystemen, wo sie zur Primärproduktion und zu den Nahrungsnetzen beitragen. Unter Bedingungen erhöhter Temperaturen, gesteigerter Nährstoffzufuhr und hydrologischer Stabilität vermehren sie sich jedoch zunehmend intensiv und produzieren Sekundärmetaboliten, Cyanotoxine, von denen einige toxische Wirkungen haben und ein Risiko für die Qualität und Sicherheit des Trinkwassers sowie für die menschliche Gesundheit darstellen. Zur Entfernung von Cyanobakterien und Cyanotoxinen werden verschiedene traditionelle Methoden (Koagulation, Flockung, Sedimentation, Filtration) eingesetzt. Es werden neue, innovative Verfahren entwickelt (z. B. fortgeschrittene Oxidationsprozesse), wobei besonderer Wert auf die Entwicklung und Anwendung nachhaltiger, natürlicher Methoden zur Wasserreinigung gelegt wird, beispielsweise die Küstenfiltration. Komplexe betriebliche und technische Anforderungen sowie mangelnde Kenntnisse über die Auswirkungen von Toxinen unter sich ändernden Umweltbedingungen beeinträchtigen jedoch die Überwachung und rechtzeitige Beseitigung von Cyanobakterien erheblich. Die obigen Ausführungen verdeutlichen die Notwendigkeit eines integrierten, lokal angepassten Ansatzes zur Sicherstellung der Wasserqualität für den menschlichen Gebrauch. Dieser Ansatz kombiniert ein ökologisches Verständnis der Prozesse in aquatischen Ökosystemen mit effektiven Wasserüberwachungssystemen, die besonderes Augenmerk auf das Vorkommen von Cyanobakterien legen, mit anpassungsfähigen und modernisierten Wasseraufbereitungstechnologien sowie mit einer Stärkung der regulatorischen Rahmenbedingungen angesichts des zunehmenden klimatischen und anthropogenen Drucks.

Schlüsselwörter: Trinkwasser; Wasseraufbereitung; Cyanobakterienblüte