

Univerzitet u Beogradu
Građevinski fakultet

OSNOVE EKOLOŠKOG INŽENJERSTVA

Zorana Naunović

Nenad Jaćimović

Dušan Kostić

Marko Ivetić

Beograd, 2014

Zorana Naunović, Nenad Jaćimović, Dušan Kostić, Marko Ivetić
OSNOVE EKOLOŠKOG INŽENJERSTVA

Recenzenti

Prof. dr Dejan Ljubisavljević

Prof. dr Aleksandar Jovović

Odobreno za štampu odlukom Nastavno-naučnog veća Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 10.4.2014. godine

Lektor

Svetlana Ćirković

Izdavač

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

Glavni i odgovorni urednik

Prof. dr Dušan Najdanović, dekan

Štampa i povez

DEDRAPLAST, Ljube Davidovića 12, Beograd

Sadržaj

1	Ekološki otisak.....	1
1.1.	Metodologija računanja ekološkog otiska.....	2
1.1.1.	Otisak emisije ugljen-dioksida.....	3
1.1.2.	Otisak ishrane.....	4
1.1.3.	Otisak stanovanja.....	5
1.1.4.	Potrošački otisak.....	6
1.2.	Koliko planeta nam je potrebno?.....	6
1.3.	Kako živeti od resursa jedne planete.....	12
1.3.1.	Povećanje ili održavanje biokapaciteta.....	12
1.3.2.	Poboljšanje efikasnosti upotrebe resursa.....	12
1.3.3.	Smanjenje potrošnje resursa po osobi.....	12
1.3.4.	Smanjenje globalne populacije.....	13
1.4.	Koračaj lagano.....	13
1.5.	Literatura.....	13
2	Vodni resursi.....	15
2.1.	Hidrološki ciklus.....	17
2.2.	Upotreba vode.....	19
2.3.	Vodni bilans.....	23
2.4.	Literatura.....	26
3	Zagađenje vode.....	27
3.1.	Materije koje troše kiseonik.....	29
3.2.	Nutrijenti.....	30
3.3.	Patogeni organizmi.....	31
3.4.	Suspendovane materije.....	31
3.5.	Soli.....	33
3.6.	Prioritetne zagađujuće supstance.....	33
3.6.1.	Teški metali.....	33
3.6.2.	Organska jedinjenja.....	34
3.6.3.	Pesticidi.....	36
3.7.	Hormonski aktivne supstance.....	36
3.8.	Farmaceutski proizvodi i proizvodi za ličnu negu.....	39
3.9.	Toplota.....	39
3.10.	pH vrednost.....	39

3.11.	Literatura.....	40
4	Ekološki, hemijski i trofički status površinskih voda.....	45
4.1.	Ekološki status površinskih voda	45
4.2.	Hemijski status površinskih voda	48
4.3.	Klasifikacija površinskih voda prema mogućnostima njihove upotrebe.....	50
4.3.1.	Opis klasa površinskih voda	54
4.4.	Trofički status površinskih voda	55
4.4.1.	Indeks trofičkog statusa – Karlsonov indeks trofičnosti.....	57
4.5.	Rezultati naučnog projekta	59
4.6.	Merenje kvaliteta vode u akumulaciji „Ćelije“	61
4.7.	Daljinska detekcija hlorofila <i>a</i> i ukupnog fosfora	66
4.8.	Matematičko modeliranje pokazatelja kvaliteta vode	67
4.9.	Literatura.....	69
5	Podzemne vode	73
5.1.	Karakteristike porozne sredine i pojava podzemne vode.....	74
5.2.	Raspored podzemne vode	76
5.3.	Strujanje podzemne vode.....	77
5.4.	Bunari.....	83
5.5.	Izvori zagađenja podzemnih voda	87
5.6.	Mehanizmi transporta zagađujućih materija u podzemnim vodama	91
5.7.	Zaštita izvorišta podzemnih voda	97
5.8.	Literatura.....	99
6	Priprema vode za piće	101
6.1.	Kvalitet prirodnih vodnih resursa	101
6.2.	Tehnološki procesi pripreme vode za piće.....	103
6.2.1.	Površinske vode	103
6.2.2.	Podzemne vode	108
6.3.	Literatura.....	109
7	Prečišćavanje otpadnih voda	111
7.1.	Literatura.....	118
8	Aerozagađenje	119
8.1.	Sumpor-dioksid i oksidi azota	120
8.2.	Suspendovane čestice	122
8.3.	Ugljen-monoksid.....	123

8.4.	Benzen i benzo(a)piren	123
8.5.	Prizemni ozon	124
8.6.	Teški metali.....	125
8.7.	Supstance koje oštećuju ozonski omotač.....	126
8.8.	Gasovi sa efektom staklene bašte	126
8.9.	Kontrola zagađenja vazduha	128
8.10.	Literatura	131
9	Energetski resursi.....	133
9.1.	Fosilna goriva	133
9.2.	Obnovljivi izvori energije	135
9.3.	Potrošnja energije.....	139
9.4.	Literatura	141
10	Upravljanje čvrstim otpadom	143
10.1.	Reciklaža komunalnog otpada	146
10.2.	Insineracija komunalnog otpada	148
10.3.	Biološki tretman komunalnog otpada	150
10.4.	Deponovanje komunalnog otpada.....	151
10.5.	Literatura	154

Osnove ekološkog inženjerstva

Predgovor

Knjiga „Osnove ekološkog inženjerstva“ nastala je iz potrebe za udžbenikom koji predstavlja osnovu istoimenog predmeta na prvoj godini Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. U knjizi se razmatraju osnovne teme iz oblasti zaštite životne sredine. Posebna pažnja je posvećena negativnim uticajima čovekovih aktivnosti na prirodno okruženje, a među merama za ublažavanje nepovoljnih posledica promovišu se one koje su usklađene sa principima održivog razvoja. Sve teme obrađene u knjizi stavljene su u kontekst domaćeg i evropskog zakonodavstva.

U četvrtom poglavlju knjige opisani su rezultati naučnog projekta TR37009 „Merenje i modeliranje fizičkih, hemijskih, bioloških i morfodinamičkih parametara reka i vodnih akumulacija“, koji je finasiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije i čiji je nosilac Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Projekat obezbeđuje sistematsko praćenje parametara kvaliteta vode u akumulacijama „Ćelije“ i „Gruža“, koje su glavna izvorišta kruševačkog i kragujevačkog vodovoda, kao i modeliranje uticaja zagađujućih materija koje se nekontrolisano ispuštaju u ove dve akumulacije. Pisanje knjige završava se neposredno nakon cvetanja populacija cijanobakterije *Planktothrix rubescens* u akumulaciji „Vrutci“, zbog čega građani Užica nisu imali vodu za piće više od 40 dana. Značaj projekta se svakim danom potvrđuje brojnim vestima o ekološkim incidentima u zemlji i inostranstvu, a u najvećem broju slučajeva uzrok je čovekov nemaran odnos prema životnoj sredini.

Autori

Februar 2014.

Osnove ekološkog inženjerstva

1 Ekološki otisak

Održivi razvoj podrazumeva ravnotežu između potrošnje prirodnih resursa i sposobnosti prirodnih sistema da zadovolje potrebe budućih generacija. Održivi razvoj se ostvaruje kada upotreba resursa ne prevazilazi regenerativni (obnovljivi) biokapacitet planete Zemlje. Biokapacitet planete Zemlje je njen ukupni regenerativni, prirodni kapacitet koji je na raspolaganju da zadovolji ljudske potrebe. Biokapacitet predstavlja ukupnu površinu ekosistema i bioma koji se mogu koristiti za stanovanje i proizvodnju energije, hrane, dobara, kao i za apsorpciju emisije ugljen-dioksida (CO₂) koja nastaje usled ovih antropogenih aktivnosti. Reč *emisija* podrazumeva ispuštanje i isticanje zagađujućih materija u gasovitom, tečnom i čvrstom agregatnom stanju iz antropogenih izvora zagađivanja u životnu sredinu. *Zagađujuće materije* su materije koje vode poreklo iz antropogenih izvora zagađivanja i mogu imati štetne efekte po zdravlje ljudi i životnu sredinu.

Biokapacitet nekog područja izračunava se množenjem stvarne, fizičke površine nekog područja sa faktorom ekvivalencije i faktorom prinosa (Amend i dr., 2010). Faktor ekvivalencije temelji se na produktivnosti i dobija se pretvaranjem određenog tipa zemljišta u univerzalnu jedinicu za biološki produktivne površine – globalni hektar (gha). Jedan globalni hektar predstavlja produktivni kapacitet jednog hektara zemljišta prosečne produktivnosti. Na primer, jedan hektar plodnog zemljišta u oblasti sa visokim padavinama ima veću vrednost gha od jednog hektara pustinje, takođe izraženog u gha. Faktor prinosa je faktor na osnovu kojeg se izračunavaju razlike u produktivnosti koju pojedine države ostvaruju na određenom tipu zemljišta. Svaka država prilaže godišnje faktore prinosa za oranice, pašnjake, šume i ribarstvo. Trenutni biokapacitet planete Zemlje je oko 15,7 gha po osobi.

Kako proceniti da li se resursi troše brže ili sporije od njihove regenerativne sposobnosti i da li ljudi žive u skladu sa principima održivog razvoja? Za ovu svrhu koristi se metoda analize ekološkog otiska, pomoću koje se vodi resursno računovodstvo. Ekološki otisak je mera potrošnje prirodnog kapitala, dok analiza ekološkog otiska poredi ekološki otisak sa raspoloživim biokapacitetom. Ekološki otisak ukazuje na to kolika je površina zemljišta i okeana, izražena u globalnim hektarima, potrebna za

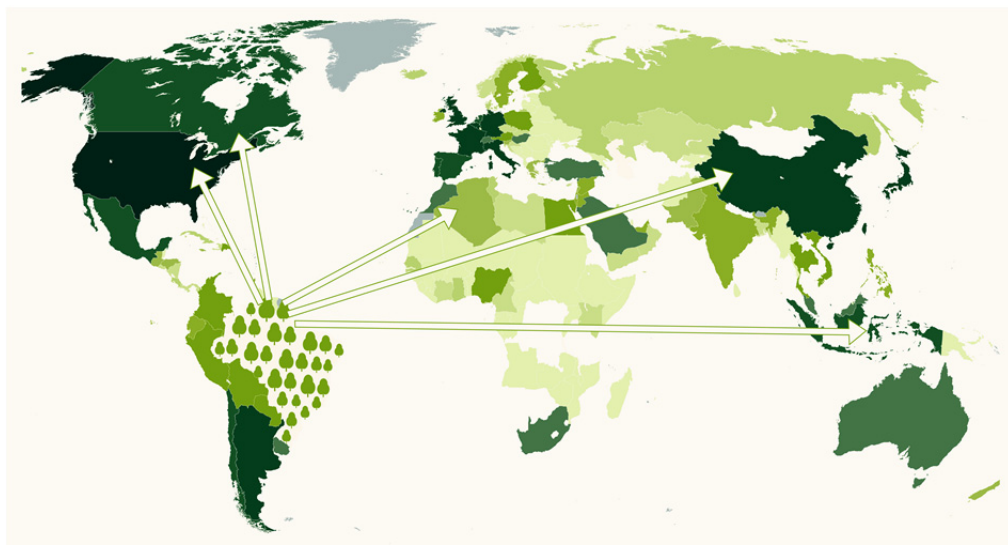
smeštaj infrastrukture (kuće, fabrike, putevi, itd.), korišćenje obnovljivih resursa (usevi, riba, drvo, itd.) i apsorpciju ugljen-dioksida koji nastaje usled antropogenih aktivnosti. Ekološki otisak sve ukupne ljudske aktivnosti svodi na jednu meru – jedinicu površine izraženu u globalnim hektarima i daje odgovor na pitanje da li ljudi žive u okviru svog ekološkog budžeta ili konzumiraju prirodne resurse brže nego što ih planeta obnavlja.

1.1. Metodologija računanja ekološkog otiska

Ekološki otisak se može računati u odnosu na: pojedinca, preduzeće, grad, državu, regiju i ukupan broj stanovnika na godišnjem nivou. Otisak svih stanovnika na Zemlji naziva se globalni ekološki otisak ili ekološki otisak čovečanstva. Nacionalne vrednosti za ekološki otisak se dobijaju na osnovu podataka međunarodnih organizacija (Ujedinjene nacije i Svetska banka). Pri proračunu nacionalnog ekološkog otiska računa se neto potrošnja svake države uz dodavanje uvoza i oduzimanje izvoza te države. Na slici 1.1. ilustrativno je prikazan izvoz drvne građe i drvnih proizvoda iz Brazila tokom 2007. godine. Ekološki otisak uzrokovan izvozom drvne građe i drvnih proizvoda računa se za državu koja je uvoznik drvnih proizvoda.

Pri proračunu ekološkog otiska pojedinca preuzimaju se prosečne nacionalne vrednosti po glavi stanovnika za različite kategorije potrošnje, a zatim se date prosečne vrednosti prilagođavaju (određenim dodavanjem ili oduzimanjem od prosečnih vrednosti) prema definisanom ličnom izboru, stilu života i navikama.

Ekološki otisak čine: otisak emisije ugljen-dioksida, otisak ishrane, otisak stanovanja i potrošački otisak. Otisak je podeljen i prema tipu ekosistema i bioma na: oranice (obradivo zemljište), pašnjake, šume i morska lovišta riba.



Slika 1.1. Ilustrativan prikaz trgovinskih tokova izvoza drvne građe i drvnih proizvoda iz Brazila u druge države u 2007. godini (Svetski fond za prirodu, 2010). Države uvoznici (potrošači) prikazane su različitim nijansama zelene boje (tamnozeleno označava zemlje sa većim obimom uvoza, a svetlije nijanse predstavljaju zemlje sa manjim obimom uvoza).

1.1.1. Otisak emisije ugljen-dioksida

Otisak emisije ugljen-dioksida predstavlja površinu šuma i okeana koja je potrebna za apsorpciju emisije ugljen-dioksida koji nastaje sagorevanjem fosilnih goriva u termoenergetskim postrojenjima, industriji i vozilima.

Zemljina klima zavisi od sunčevog zračenja. Zemlja apsorbuje deo sunčevog zračenja / energije, dok se deo reflektuje u svemir. Prirodni sloj atmosferskih gasova apsorbuje deo reflektovane radijacije. Ovaj proces održava temperaturu na Zemlji dovoljno visokom za održavanje života na njoj i naziva se prirodni efekat staklene bašte. U odsustvu ovog efekta prosečna temperatura Zemlje bila bi -18°C umesto sadašnjih 15°C .

U prirodi okeani i šume apsorbuju ugljen-dioksid. Poznato je da se u atmosferu emituje više ugljen-dioksida nego što priroda može da apsorbuje. Višak ugljen-dioksida akumulira se u atmosferi. Ugljen-dioksid pripada grupi gasova koji doprinose efektu staklene bašte i globalnom zagrevanju. Naučni dokazi ukazuju na povećanje prirodnog efekta staklene bašte usled

emisije gasova sa efektom staklene bašte u atmosferu iz antropogenih izvora, što za rezultat ima povećanje temperature na Zemlji. Ova pojava se naziva *globalno zagrevanje*.

Otisak emisije ugljen-dioksida pojedinca varira u odnosu na klimatske zone, veličinu životnog prostora, način korišćenja i uštede energije u domaćinstvu, kao i u odnosu na izbor prevoznih sredstava. Ljudi koji žive u područjima umerene klime, koriste čistije izvore energije, žive u energetski efikasnim kućama, u urbanim sredinama i koriste vozila samo kad je neophodno imaju niži otisak emisije ugljen-dioksida. Stanovanje u hladnijim klimatskim uslovima zahteva više energije za grejanje, osvetljenje i kuvanje. Međutim, u toplim i vlažnim klimatskim područjima potrebno je više energije za hlađenje prostorija i hrane. Ne može se lako izvršiti procena i doneti zaključak u vezi sa tim da li je više energije potrebno za stanovanje u hladnijim ili toplijim i vlažnim klimatskim zonama. Ipak, postoji statistička korelacija na osnovu koje se izračunava da stanovanje u hladnijim oblastima zahteva više energije.

Pri proračunu otiska emisije ugljen-dioksida uzima se u obzir procenat potrošene energije u domaćinstvu koje potiče iz obnovljivih izvora energije, kao i mere uštede energije koje članovi domaćinstva primenjuju. Na primer, energetski efikasni („zeleni“, štedljivi) uređaji koriste dva do deset puta manje energije od običnih uređaja za istu efikasnost u radu. Utvrđeno je da kompaktne fluorescentne sijalice koriste četiri puta manje energije i traju osam puta duže od običnih sijalica.

Otisak emisije ugljen-dioksida je komponenta ukupnog ekološkog otiska koja ima najizraženiji rast i od 1961. godine povećan je 11 puta (Global Footprint Network, 2012). Smanjenje emisije ugljen-dioksida je najvažnji zadatak koji ljudi mogu da preduzmu da bi se ekološki otisak približio biokapacitetu planete Zemlje.

1.1.2. Otisak ishrane

Otisak ishrane predstavlja površinu oranica, pašnjaka i morskih lovišta riba potrebnu za proizvodnju hrane, kao i površinu šuma i okeana koja je neophodna za apsorpciju emisije ugljen-dioksida nastalog usled proizvodnje, prerade i transporta hrane.

Vegetarijanska ishrana zahteva znatno manju površinu zemljišta i energije nego ishrana sa visokim procentom mesa, ribe, morskih plodova i

mlečnih proizvoda. Vegetarijanska ishrana zahteva 0,18 hektara po osobi godišnje, dok ishrana na bazi mesa zahteva 0,85 hektara po osobi godišnje i to zbog prostora koji je potreban životinjama. Proizvodnja mesa povezana je sa sećom šuma, radi dobijanja pašnjaka, i zahteva potrošnju velike količine energije za preradu i transport, tako da je i otisak emisije ugljen-dioksida veći za ljude koji jedu meso.

Na otisak ishrane utiče i razdaljina između mesta proizvodnje i potrošnje namirnica, kao i vrsta i količina ambalaže koja se koristi za pakovanje namirnica. Ako hrana stiže iz udaljenih država (vansezonski proizvodi uvezeni iz drugih kontinenata), potrebno je mnogo energije za transport i održavanje odgovarajuće temperature za namirnice. Ambalaža u koju su upakovane namirnice utiče na potrošnju prirodnih resursa i stvaranje otpada (predlaže se da se koriste proizvodi bez ambalaže ili u ambalaži koja može da se reciklira).

1.1.3. Otisak stanovanja

Otisak stanovanja obuhvata površinu zemljišta koju zauzima određena stambena jedinica, šumsko područje potrebno za proizvodnju proizvoda od drveta koji se koriste u izgradnji i opremanju kuća i zgrada, kao i površinu zemljišta i okeana koji su neophodni za apsorpciju emisije ugljen-dioksida koji nastaje usled izgradnje i održavanja.

Otisak stanovanja zavisi od tipa stambene jedinice, količine i vrste zemljišta koje zauzima stambena jedinica, uređenja stambenog prostora, korišćenja uređaja za smanjenje potrošnje vode i izbora proizvoda za čišćenje. Otisak stanovanja je najmanji za manje stanove u urbanim sredinama, koji su izgrađeni u skladu sa tehnikama zelene gradnje i opremljeni polovnim nameštajem ili nameštajem koji je sertifikovan (proizveden u skladu sa održivim razvojem ili od recikliranih materijala).

Upotrebom tehnika zelene gradnje značajno se smanjuje potrošnja energije, vode i sirovina tokom projektovanja, izgradnje, upravljanja, održavanja i uklanjanja zgrade. Zelena gradnja smanjuje potrošnju energije za kompletan životni ciklus zgrade. Primenom pasivnog solarnog grejanja, upotrebom uređaja koji smanjuju potrošnju vode, primenom recikliranih materijala i projektovanjem u skladu sa „zelenim karakteristikama dizajna i materijala“ u zgradama se može uštedeti do 30% energije, može se smanjiti emisija jedinjenja ugljenika za 35%, smanjiti potrošnja vode za 30 do 50% i

uštedeti 50 do 90% troškova za odlaganje otpada. Otisak stanovanja manji je za stanove kod kojih je moguće uštedeti vodu na različite načine i ako stanari koriste biorazgradive proizvode za čišćenje.

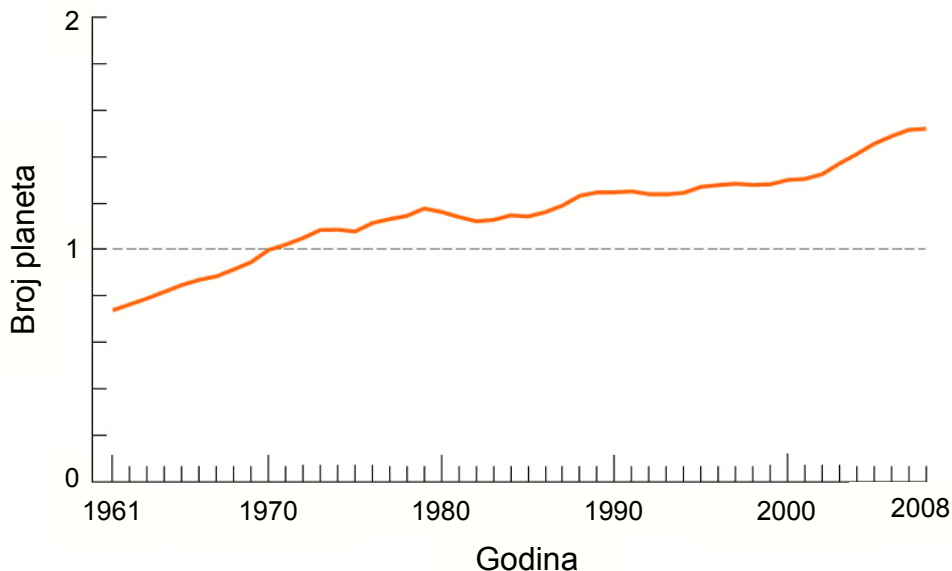
1.1.4. Potrošački otisak

Potrošački otisak računa se na osnovu površina potrebnih za nastajanje i prodaju proizvoda koje kupujemo, kao i površine šuma i okeana koje su potrebne za apsorpciju emisije ugljen-dioksida koji nastaje usled proizvodnje, transporta i odlaganja tih proizvoda. Potrošački otisak zavisi od nivoa razvijenosti države i ostvarenih prihoda pojedinca, potrošačkih navika, načina odlaganja otpada i reciklaže. Potrošački otisak je veći u razvijenijim državama, gde pojedinci ostvaruju veće lične prihode. Međutim, postoji i reverzibilni trend da pojedinci u visoko razvijenim državama sa razvijenom ekološkom svešću kupuju kvalitetne proizvode i uređaje koji duže traju i ređe se zamenjuju, savesno biraju proizvode napravljene od recikliranih ili biorazgradivih materijala i stvaraju manje otpada.

Što se više kupuju novi proizvodi, brže se troše prirodni resursi. Cilj današnje ekonomije i marketinga je da ubedi kupca da često i puno kupuje i menja proizvode koji su još uvek funkcionalni i u dobrom stanju. Planirano zastarevanje proizvoda (namerna proizvodnja proizvoda sa kraćim rokom trajanja) dodatno povećava problem ubrzane potrošnje prirodnih resursa i povećanog stvaranja otpada. Jedno od rešenja je popravka stvari pre nego što se odbace i kupovina proizvoda koji su napravljeni da duže traju. Reciklaža otpada dovodi do ekološke i ekonomske koristi u vidu smanjenja prostora potrebnog za deponovanje otpada, smanjenja potrošnje sirovina i energije, smanjenja zagađenosti vazduha i vode i smanjenja računa za odnošenje otpada.

1.2. Koliko planeta nam je potrebno?

Kada bi svi živeli u okviru ekološkog budžeta planete Zemlje, ljudima bi bila dovoljna jedna planeta Zemlja za sve ljudske potrebe. Međutim, sedamdesetih godina prošlog veka, usled ekspanzije industrijske revolucije i eksponencijalnog rasta populacije, premašen je nivo biološkog kapaciteta Zemlje, što je ilustrovano na slici 1.2.



Slika 1.2. Ekološki otisak čovečanstva (Svetski fond za prirodu, 2012)

Danas se u proseku troši oko 50% više resursa nego što je to ekološki održivo. To znači da je Zemlji potrebno godinu i po dana da obnovi (regeneriše) resurse koje čovečanstvo protroši za samo godinu dana. Kako čovečanstvo može da koristi kapacitet 1,5 planeta kada je naš dom samo jedna planeta Zemlja? Moguće je požnjati obnovljive resurse brže nego što se oni regenerišu, saseći više drveća iz šume svake godine nego što ponovo naraste i uloviti više ribe tempom koji je brži od obnovljivosti ribljeg fonda na godišnjem nivou. Ovakvo ponašanje moguće je samo na određeno vreme, jer dolazi do iscrpljenja prirodnih resursa, gubitka biodiverziteta i globalnog zagrevanja.

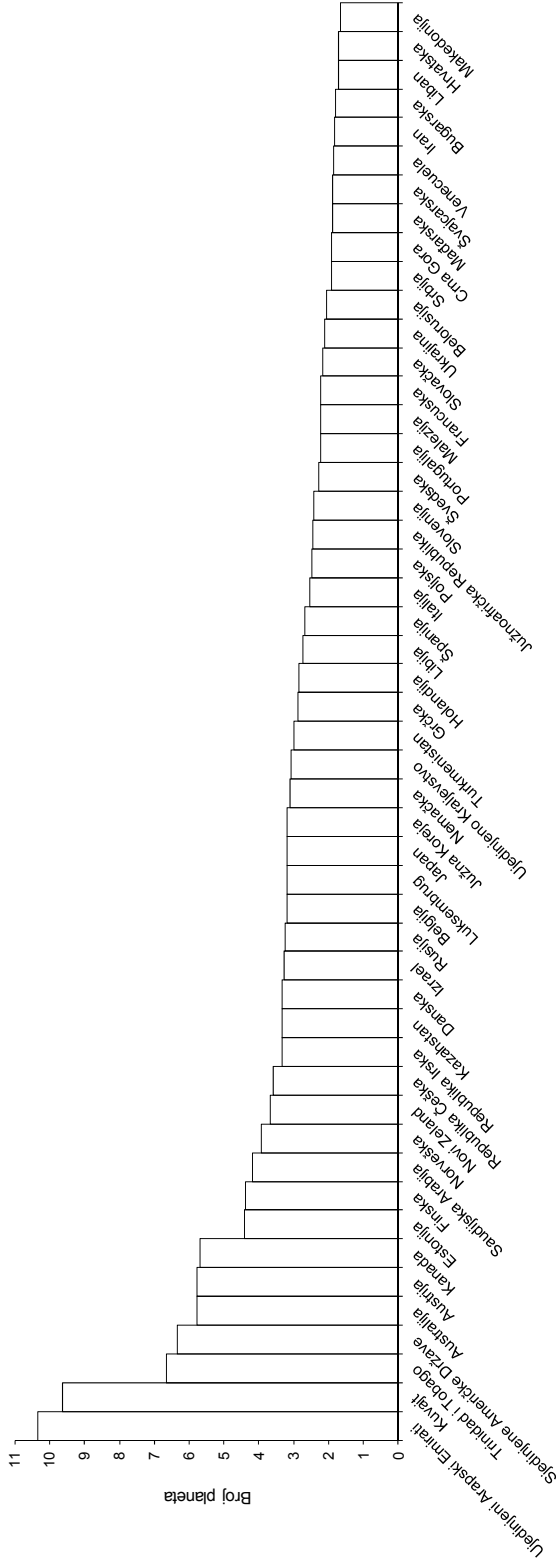
Sa porastom populacije raste i potražnja za resursima, a smanjuje se raspoloživ broj gha po osobi, što vodi ka ekološki neodrživom sistemu. Stanovnici država u razvoju, kao što su Kina, Brazil, Indonezija i Indija, teže potrošačkom društvu i neodrživom stilu života, koji preovlađuje u razvijenim državama gde je ekološki otisak znatno viši nego u državama u razvoju. Formulisanje ekološkog otiska je pokušaj da se ukaže na probleme neodrživog načina života i kako se to odražava na planetu Zemlju.

Izračunavanjem ličnog ekološkog otiska dobija se broj globalnih hektara potrebnih da se održi određeni životni stil. Izračunati broj se pretvara u broj planeta koji bi bio potreban u slučaju da celo čovečanstvo živi istim načinom života. Na graficima ispod (slika 1.3.) prikazan je broj planeta koji bi bio potreban da svi ljudi žive kao stanovnici pojedinih država. Kada bi svi živeli kao zaposlen stanovnik gradskog područja Kanade ili SAD-a, potrebno bi bilo oko šest planeta. Kada bi svi živeli kao prosečan stanovnik Srbije, bile bi potrebne dve planete.

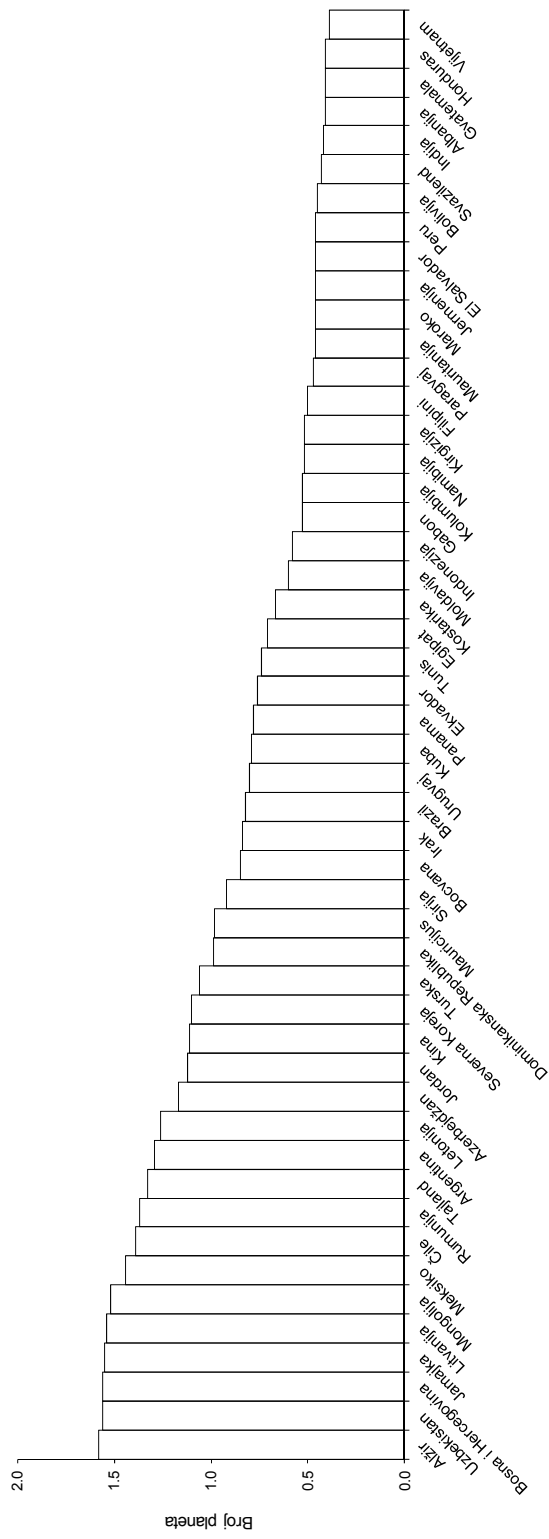
Najveći ekološki otisak imaju stanovnici Ujedinjenih Arapskih Emirata i Kuvajta. U Dubaiju su prisutne velika potrošnja prirodnog gasa i razvijena izgradnja infrastrukture (veštačka ostrva, neboderi, bazeni koji se hlade, zatvorena skijališta, itd.) usred pustinje. U Kuvajtu su cene goriva vrlo niske i javni prevoz je slabo razvijen, što podstiče građane da koriste svoje automobile.

Osnove ekološkog inženjerstva

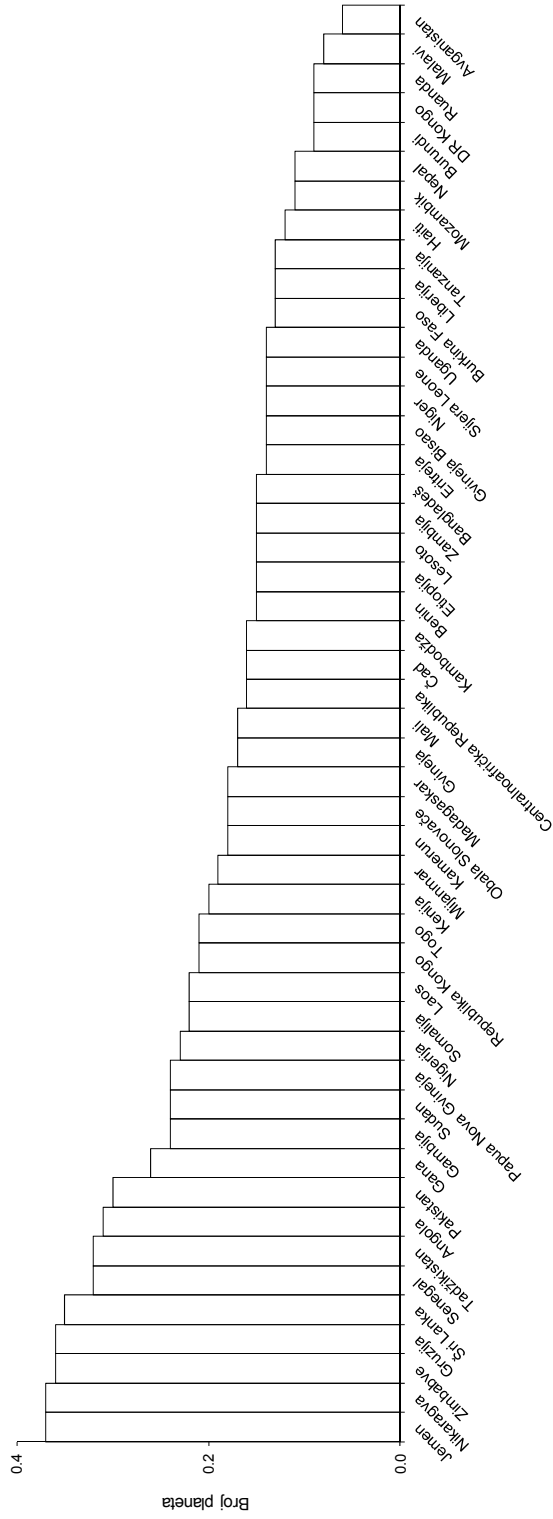
Ekološki otisak



Slika 1.3. Broj planeta koji bi bio potreban da svi ljudi žive kao stanovnici pojedinih država (prema podacima Centra za održivu ekonomiju)



Slika 1.3. (nastavak). Broj planeta koji bi bio potreban da svi ljudi žive kao stanovnici pojedinih država (prema podacima Centra za održivu ekonomiju)



Slika 1.3. (nastavak). Broj planeta koji bi bio potreban da svi ljudi žive kao stanovnici pojedinih država (prema podacima Centra za održivu ekonomiju)

1.3. Kako živeti od resursa jedne planete

Ekološki otisak čovečanstva može se smanjiti:

- povećanjem ili održavanjem biokapaciteta;
- poboljšanjem efikasnosti upotrebe resursa;
- smanjenjem potrošnje resursa po osobi;
- smanjenjem globalne populacije.

Mere usmerene ka redukciji ekološkog otiska se moraju primenjivati istovremeno i usklađeno u cilju najveće efikasnosti.

1.3.1. *Povećanje ili održavanje biokapaciteta*

Mere za povećanje ili održavanje biokapaciteta su:

- zaštita zemljišta od erozije i degradacije, kao i očuvanje obradivog zemljišta (oranica) za poljoprivredu (izbeći urbani razvoj);
- zaštita rečnih slivova i močvarnih polja koja obezbeđuju zalihe sveže vode;
- održavanje zdravih šuma i ribljih lovišta;
- aktivnosti za zaštitu ekosistema od klimatskih promena;
- eliminisanje upotrebe toksičnih hemikalija koje degradiraju ekosisteme.

1.3.2. *Poboljšanje efikasnosti upotrebe resursa*

Tokom proteklih 40 godina tehnološki napredak je omogućio povećanje efikasnosti upotrebe resursa u proizvodnim sistemima (smanjenje količina ulaznih sirovina i nastajanja otpada). Povećanje efikasnosti upotrebe resursa, iako od presudnog značaja, nije bilo dovoljno kao samostalna mera da zaustavi rast ekološkog otiska čovečanstva, pored porasta populacije, potrošnje i smanjenja raspoloživog biokapaciteta po glavi stanovnika.

1.3.3. *Smanjenje potrošnje resursa po osobi*

Potencijal za smanjenje potrošnje po osobi zavisi delimično od individualnog nivoa prihoda. Bogati pojedinci mogu da smanje svoj otisak, bez ugrožavanja kvaliteta svog života, smanjenjem potrošnje dobara i usluga sa velikim otiskom.

1.3.4. *Smanjenje globalne populacije*

Rast stanovnika u državama sa visokim natalitetom može se smanjiti boljim obrazovanjem žena, ekomonjskim merama i podsticajima i boljom zdravstvenom zaštitom. Krajem 2011. godine populacija na Zemlji je dostigla sedam milijardi. Uprkos opštem padu nataliteta svetska populacija se uvećava za oko 83 miliona ljudi svake godine. Ovaj rast će se nastaviti u decenijama koje dolaze i sa sobom nosi izazov naše sposobnosti da se prehrane buduće generacije i istovremeno sačuvaju prirodni resursi na kojima se bazira naša egzistencija. Kina i Indija su dom skoro trećini ljudi na svetu. Sjedinjene Američke Države, Brazil i Indonezija zaokružuju listu sa pet najmnogoljudnijih država. Mongolija je najslabije naseljena zemlja na svetu, sa manje od tri miliona stanovnika.

1.4. *Koračaj lagano*

Niko ne ustaje ujutru i odlučuje da doprinese globalnom zagrevanju ili da pomogne seču tropskih šuma. Naizgled bezazlene dnevne odluke ljudi, uglavnom u razvijenim industrijskim državama, veoma često imaju dalekosežne posledice na planetu. Ekološki otisak je uticaj svakodnevnih aktivnosti svakog čoveka na planeti.

Svaki obrok, uključivanje svetla, ulazak u automobil, odlazak na godišnji odmor ili kupovina doprinosi ekološkom otisku pojedinca. Na osnovu otiska obračunava se koliko zemlje i okeana je potrebno da se obezbedi hrana i sirovine koje se koriste u svakodnevnom životu pojedinca. Otisak je merilo količine šume i okeana koja je potrebna da apsorbuje emisije ugljen-dioksid koji se stvara pri upotrebi fosilnih goriva.

Svaki čovek ima svoj otisak. Nije pogrešno imati otisak. Pitanje je samo koliki je taj otisak i koliki je doprinos svakog pojedinca ukupnom ekološkom otisku čovečanstva.

1.5. *Literatura*

Amend, T., Barbeau, B., Beyers, Bert; Burns, S., Eißing, S., Fleischhauer, A., Kus, B., i Pati Poblete (2010). *A Big Foot on a Small Planet? Accounting with the Ecological Footprint. Succeeding in a world with growing resource constraints* (2nd

ed.). Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).

Centar za održivu ekonomiju (Center for Sustainable Economy). Ecological Footprint Quiz. Dostupno na <http://myfootprint.org/>

Global Footprint Network (2012). Dostupno na http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/carbon_footprint/

Svetski fond za prirodu (World Wide Fund for Nature – WWF) (2010). *Living Planet Report 2010 - Biodiversity, biocapacity and development*. Gland, Switzerland: WWF International.

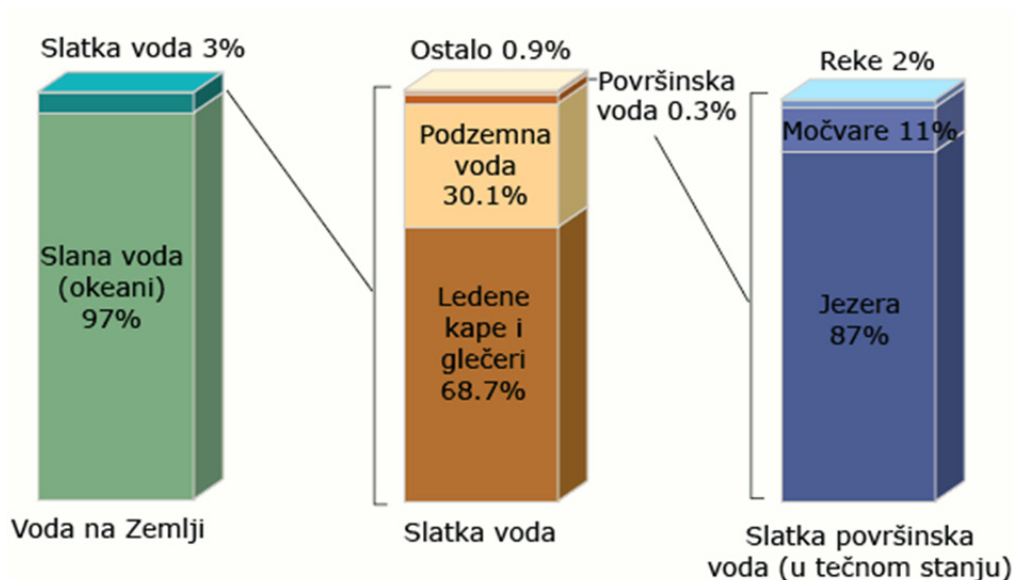
Svetski fond za prirodu (World Wide Fund for Nature – WWF) (2012). *Living planet report 2012 - Biodiversity, biocapacity and better choices*. Gland, Switzerland: WWF International.

2 Vodni resursi

Na planeti Zemlji postoji jedinstvena kombinacija temperature i pritiska, koja omogućava prisustvo vode u tri agregatna stanja. Oko 70% Zemljine površine pokriveno je vodom. Voda se nalazi u okeanima, rekama, jezerima, u vidu podzemnih voda i kao led. Voda je u najvećim količinama zastupljena u tečnom stanju i u čvrstom stanju kao led. Kada bi se sva zaleđena voda na Zemlji otopila, nivo okeana bi porastao za 70 metara.

Ukupna količina vode na Zemlji danas je ista kao i pri nastanku Zemlje zahvaljujući vodenom ili hidrološkom ciklusu kroz koji voda menja agregatna stanja, prelazi iz jednog rezervoara (mesta akumulacije) u drugi i istovremeno se prečišćava. Prirodni rezervoari vode su: okeani, atmosfera, akumulacije leda i snega, akumulacije slatke vode (reke, jezera, močvare) i akumulacije podzemnih voda.

Vodni resursi obuhvataju sve površinske i podzemne vode, i po količini i prema kvalitetu. Preko 96% ukupne količine vode na Zemlji predstavlja slana voda. Od ukupne količine slatke vode preko 68% je zarobljeno u ledu i glečerima. Najveći deo ledene mase (90%) nalazi se na Antarktiku, dok ledena kapa Grenlanda sadrži samo 10% ukupne globalne ledene mase. Led glečera pokriva 10 do 11% kopna. Od slatke vode 30% čine podzemne vode, dok površinske slatke vode (reke i jezera) čine samo oko 0,03% slatkovodnih vodenih resursa Zemlje. Na slici 2.1. ilustrovana je raspodela vode na Zemlji, dok je u tabeli 2.1. prikazana globalna raspodela vode.



Slika 2.1. Raspodela vode na Zemlji (Agencija za geološka istraživanja SAD, 2013)

Tabela 2.1. Globalna raspodela vode (Agencija za geološka istraživanja SAD, 2013)

Rezervoari vode u prirodi	Zapremina vode [km ³]	Procenat slatke vode [%]	Procenat ukupne količine vode [%]
Okeani, mora i zalivi	1.338.000.000		96,5
Ledene kape, glečeri i stalni sneg	24.064.000	68,7	1,74
Podzemna voda	23.400.000		1,7
Slatka voda	10.530.000	30,1	0,76
Slana voda	12.870.000		0,94
Zemljišna vlaga	16.500	0,05	0,001
Podzemni led i permafrost	300.000	0,86	0,022
Jezera	176.400		0,013
Slatka voda	91.000	0,26	0,007
Slana voda	85.400		0,006
Atmosfera	12.900	0,04	0,001
Voda iz močvare	11.470	0,03	0,0008
Reke	2.120	0,006	0,0002

2.1. Hidrološki ciklus

Sunce je izvor energije koji direktno učestvuje u procesima hidrološkog ciklusa. Vetar, vremenske prilike i gravitacija takođe utiču na hidrološki ciklus, kao i ljudi. Ciklus kruženja vode u prirodi prikazan je na slici 2.2.



Slika 2.2. Ciklus kruženja vode u prirodi (Agencija za geološka istraživanja SAD, 2013)

Osnovni procesi hidrološkog ciklusa su evaporacija, evapotranspiracija, kondenzacija i padavine.

Evaporacija (isparavanje) je prelazak vode iz tečnog stanja u gasovito stanje (vodenu paru) uz utrošak energije. Energija koja se troši u procesu evaporacije najvećim delom potiče od direktnog sunčevog zračenja. Sunce zagreva površine jezera, reka i okeana, dolazi do isparenja vode i akumulacije vodene pare u atmosferi. Evaporacija okeana predstavlja osnovu prelaska vode u atmosferu. Molekul vode koji ispari sa površine vodnog tela

provede oko 10 dana u atmosferi pre nego što se vrati na Zemlju u vidu padavina. Na globalnom nivou količina vode koja isparava je skoro ista količini vode koja se u vidu padavina vraća na Zemlju. Oko 80% padavina potiče od evaporacije sa površine okeana. Brzina evaporacije se povećava sa povećanjem brzine vetra i sa temperaturom, a smanjuje se sa povećanjem vlažnosti vazduha.

Evapotranspiracija je isparavanje vode sa kopnenih površina, iz biljaka i zemljišta. Biljke povlače hranljive materije i vodu u tečnom stanju kroz koren iz zemljišta. Tokom fotosinteze biljke absorbuju ugljen-dioksid iz atmosfere i istovremeno oslobađaju kiseonik i vodenu paru. Proces odavanja vode (u vidu vodene pare) sa površine biljaka, naročito sa površine listova je *transpiracija*. Veći deo vode koja se u atmosferu oslobađa putem evapotranspiracije potiče od procesa transpiracije. Procenjuje se da oko 10% vlage dospeva u atmosferu putem transpiracije.

Mali deo vode dospeva u atmosferu putem *sublimacije*, tokom koje se sneg i led transformišu direktno u vodenu paru. Sublimacija se odvija pri niskim temperaturama i niskom atmosferskom pritisku. Za proces sublimacije potrebna je energija koja se dobija iz sunčevog zračenja. Lokacija na kojoj dolazi do sublimacije je južna strana planine Mont Everest, gde se javljaju uslovi niske temperature, niskog atmosferskog pritiska, jakih vetrova i intenzivne sunčeve svetlosti.

Uzlazne vazdušne struje podižu vodenu paru u atmosferu, u kojoj usled niskih temperatura dolazi do *kondenzacije*, prelaska vode iz gasovitog u tečno stanje. Tokom kondenzacije dolazi do formiranja kapljica vode i oblaka koje vazdušne struje nose oko planete.

Padavine predstavljaju vodu koja se oslobađa iz oblaka u vidu kiše, ledene kiše, susnežice, snega ili grada. Padavine su osnovni vid povratka vode iz atmosfere na Zemlju. Padavine se javljaju kada se kapljice vode u atmosferi adsorbuju na česticama prašine, soli ili dima i uvećavaju putem sudara sa drugim kapljicama vode dok ne dostignu dovoljnu masu da mogu da padnu na Zemlju. Potrebni su milioni kapljica da se stvori samo jedna kap kiše. Činjenica je da padavine nisu prostorno ravnomerno raspoređene, neke oblasti su veoma vlažne, dok su druge veoma suve. Pored toga, padavine nisu ni vremenski ravnomerno raspoređene. To dovodi do vlažnih perioda (poplava) i sušnih perioda (suša).

U zonama kontinentalne klime sneg se otapa početkom proleća i dolazi do *snežnog oticaja*. Brzo otapanje snega može izazvati poplave, pojave klizišta i odrone. Ako je u određenoj oblasti (slivu) bilo malo snežnih padavina u toku zime, nedostatak vode akumulirane u snežnom pokrivaču će se reflektovati na manji prolećni snežni oticaj. *Sliv* je deo površine kopna sa kojeg se sva voda sliva do određene tačke na jednom vodotoku, na sastavu dva vodotoka ili na ušću u jezero ili more. Priliv vode u nizvodne rezervoare biće manji i uticaće na ukupnu količinu raspoložive vode za navodnjavanje i vodosnabdevanje naselja u slivu.

Kiše koje padnu na kopno delom se *infiltriraju* u zemljište ili se vraćaju u atmosferu putem evapotranspiracije ili teku po površini terena i nazivaju se *površinski oticaj*. Na količinu vode koja se infiltrira u zemljište utiču propusnost i vlažnost zemljišta, prisustvo vegetacije i propustljivost terena (stepen urbanizacije). Što je zemljište više urbanizovano i manje propustljivo, odnos površinskog oticaja i infiltrirane vode biće veći.

Deo površinskog oticaja se sliva u reke i kreće se kao rečni tok prema okeanima, dok se jedan deo akumulira kao slatka voda u jezerima. Površinski oticaj može da dovede do erozije tla i zagađenja površinskih voda. Ako je količina padavina velika i zemljište zasićeno, može doći do poplava.

Infiltracijom se prihranjuju podzemne vode. Plitke podzemne vode mogu se prazniti u površinske vode. Neke podzemne vode nalaze otvore na površini terena i pojavljuju se u vidu slatkovodnih izvora. Vremenom voda nastavlja da se kreće, dospeva do okeana gde se ciklus kruženja vode završava i počinje.

2.2. Upotreba vode

U istoriji ljudske upotrebe vode razlikuju se tri perioda. Prvi period počinje razvojem civilizacije i naziva se *Doba oslanjanja na prirodne vodne resurse*. Tokom ovog perioda ljudi su koristili vodu koja im je bila na raspolaganju kroz prirodni hidrološki ciklus. Ljudi su živeli kraće, u proseku do 35 godina, i umirali su od komplikacija tokom porođaja, gladi i bolesti koje se prenose putem kontaminirane vode (na primer kolera).

Drugi period naziva se *Doba manipulacije vodnim resursima* i počinje oko 1800. godine. Ljudi počinju da upravljaju delom hidrološkog ciklusa i da obezbeđuju viši životni standard inženjerskim inovacijama kao što su

navodnjavanje i izgradnja brana i kanala. Inovacije su omogućile da se voda akumulira u veštačkim rezervoarima, što je obezbedilo dovoljne količine vode za razvoj poljoprivrede i stočarstva, kao i za potrebe industrije i gradova. Otpadna voda se prikupljala i ispuštala nizvodno od gradova i otpad se odnosio van granica mesta stanovanja. Sprovedene sanitarne mere su uticale na smanjenje pojava bolesti i smrtnost i omogućile rast populacije.

Treći period se naziva *Doba krize vodnih resursa* i počinje pedesetih godina dvadesetog veka. Ubrzan razvoj dovodi do potražnje za vodom dobrog kvaliteta i globalno se troši više vode nego što se prirodno obnavlja. U prethodnom veku potrošnja vode se udvostručila u odnosu na broj stanovnika, dok su količine raspoloživih vodnih resursa ostale iste. U proteklih 50 godina potrošnja vode u svetu se utrostručila, dok trećina svetske populacije i dalje nema pristup dovoljnim količinama kvalitetne vode, što uzrokuje 2,5 miliona smrtnih slučajeva godišnje.

Danas se oko 70% dostupnih svetskih slatkovodnih resursa troši za navodnjavanje u poljoprivredi i stočarstvu, dok se 22% troši u industriji i 8% u domaćinstvima. Velika potrošnja vode u poljoprivredi, stočarstvu i industriji ukazuje na veliku potrošnju za ljudsku ishranu i razne proizvode. Kao što ekološki otisak prikazuje potrošnju prirodnih resursa od strane ljudi, tako vodeni otisak oslikava njihovu neutoljivu žeđ i potrošnju vodnih resursa. Vodeni otisak predstavlja ukupnu količinu upotrebljene slatke vode za nastanak određenog proizvoda ili pružanje određene usluge, i to u svim fazama proizvodnje, prodaje i upotrebe, uključujući i otpadnu vodu koja se ispušta u recipijente. *Recipijenti* su prirodni i veštački vodotokovi, jezera, akumulacije i zemljište, u koje se ispuštaju otpadne vode. Uzima se u obzir i stepen prečišćavanja otpadnih voda pre ispuštanja u recipijente, odnosno koncentracija zagađujućih materija u otpadnim vodama koje se ispuštaju.

Vodeni otisak čine sledeće komponente: zelena, plava i siva voda. *Zelena voda* je zapremina padavina (kiše) koja se iskoristi u procesu fotosinteze odnosno produkcije biomase. *Plava voda* je zapremina slatkovodnih površinskih i podzemnih resursa koja se iskoristi tokom proizvodnje hrane i materijalnih dobara. *Siva voda* je zapremina vode potrebna da razblaži zagađenje nastalo usled ispuštanja tehnoloških (industrijskih) otpadnih voda iz proizvodnih procesa do kvaliteta propisanog zakonskom regulativom za recipijente otpadnih voda.

Vodeni otisak nacije definiše se kao ukupna količina slatke vode potrošene za proizvodnju hrane, robe i usluga koju konzumiraju stanovnici jedne države. Slično kao i kod računanja ekološkog otiska gde se upotreba resursa i zagađenje pripisuje državi korisnici proizvoda, pri računanju vodenog otiska slatkovodni resursi potrošeni u proizvodnji proizvoda se pripisuju državi gde se finalni proizvodi konzumiraju.

U periodu od 1996. do 2005. godine prosečna svetska potrošnja slatkovodnih resursa iznosila je 9.087 milijardi kubnih metara godišnje vode i sastojala se od zelene, plave i sive vode u odnosu 74 : 11 : 15 (Hoekstra i Mekonnen, 2012). Od toga, 92% svetske potrošnje vode je bilo za poljoprivredne aktivnosti. Jedna petina svetskog vodenog otiska se odnosila na proizvodnju za izvoz. Prosečan vodeni otisak pojedinca bio je 1.385 kubnih metara (m³) godišnje. Vodeni otisak u Sjedinjenim Američkim Državama bio je 2.842 m³ po stanovniku godišnje, u Kini 1.071 m³ po stanovniku godišnje, a u Indiji 1.089 m³. Potrošnja žitarica doprinela je najvećem delu vodenog otiska prosečnog potrošača (27%), zatim proizvodnja mesa (22%) i mlečnih proizvoda (7%). Vodeni otisak potrošača zavisi od sledećih faktora: šta i koliko potrošači troše i koliki je vodeni otisak konzumiranih proizvoda. Vodeni otisak konzumiranih proizvoda zavisi od načina proizvodnje u mestima porekla različitih proizvoda.

Pored razlika u obrascima potrošnje važan faktor koji doprinosi razlikama u prosečnim nacionalnim vodenim otiscima je efikasnost potrošnje vodnih resursa u datoj državi, odnosno potrošnja vode i stvaranje zagađenja po jedinici proizvoda. Pored Sjedinjenih Američkih Država, Španije i Portugalije među najvećim svetskim potrošačima slatke vode nalaze se Nigerija, Bolivija i Brazil. Poslednje tri države nisu među najvećim potrošačima vode usled relativno velike potrošnje (iako relativno velike potrošnje mesa mogu veoma uticati), već usled male efikasnosti upotrebe vode i velikog vodenog otiska po toni proizvedenog proizvoda. U Boliviji, na primer, potrošnja mesa je 1,3 puta veća od svetskog proseka, ali vodeni otisak po toni mesa je pet puta viši od svetskog proseka. U Nigeriji potrošnja žitarica po stanovniku je 1,4 puta veća od svetskog proseka, dok je vodeni otisak po toni žita šest puta viši od svetskog proseka. U tabeli 2.2. dat je uporedni prikaz nacionalnog vodenog otiska potrošnje za Srbiju i Crnu Goru i svetski prosek u periodu od 1996. do 2005. godine (Mekonnen i Hoekstra, 2011). U analiziranom periodu godišnja potrošnja mesa u Srbiji i Crnoj Gori

bila je blizu svetskog proseka, dok je vodeni otisak potrošnje mesa za isti period u Srbiji i Crnoj Gori bio duplo viši od svetskog proseka. Količina proizvedenih sivih voda iz industrijskih procesa bila je dvadeset i dva puta veća od svetskog proseka. Razlog za ovakvo stanje je nedovoljno prečišćavanje tehnoloških (industrijskih) otpadnih voda pre ispuštanja u recipijente. Određeni napredak u ovoj oblasti je postignut počevši od 2005. godine u Srbiji, ali ima još dosta potreba i mogućnosti za unapređenje u oblasti prečišćavanja otpadnih voda.

Ograničavajući aspekt analize vodenog otiska je da se potrošnja vodnih resursa posmatra na nacionalnom nivou, dok je korišćenje vode problem koji dolazi do izražaja na lokalnom nivou. Usled toga potrebno je znati bilans i kvalitet voda na nivou rečnog sliva.

Tabela 2.2. Uporedni prikaz nacionalnog vodenog otiska potrošnje za Srbiju i Crnu Goru i svetskog proseka u periodu od 1996. do 2005. godine (Mekonnen i Hoekstra, 2011)

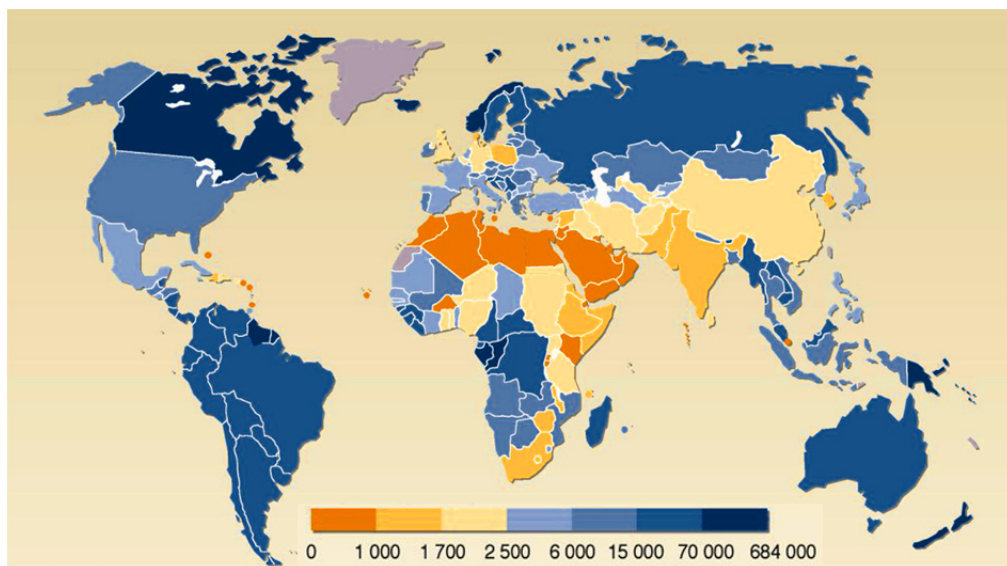
	Vodeni otisak potrošnje poljoprivrednih proizvoda [m ³ po stanovniku godišnje]					
	Domaćih			Uvoznih		
	Zelena voda	Plava voda	Siva voda	Zelena voda	Plava voda	Siva voda
Srbija i Crna Gora	1.224,5	10,8	98,4	107,5	25,7	10,7
Svetski prosek	796,6	107,1	90,3	218,8	33,2	21,4

	Vodeni otisak potrošnje industrijskih proizvoda [m ³ po stanovniku godišnje]				Vodeni otisak potrošnje vode u domaćinstvima [m ³ po stanovniku godišnje]	
	Domaćih		Uvoznih			
	Plava voda	Siva voda	Plava voda	Siva voda	Plava voda	Siva voda
Srbija i Crna Gora	40,4	764,3	2,2	32,6	7,3	65,4
Svetski prosek	3,8	34,3	2,3	24,6	6,8	45,8

	Ukupni vodeni otisak nacionalne potrošnje [m ³ po stanovniku godišnje]			
	Zelena voda	Plava voda	Siva voda	Ukupno
Srbija i Crna Gora	1.332,1	86,3	971,3	2.390
Svetski prosek	1.015,4	153,3	216,5	1.385

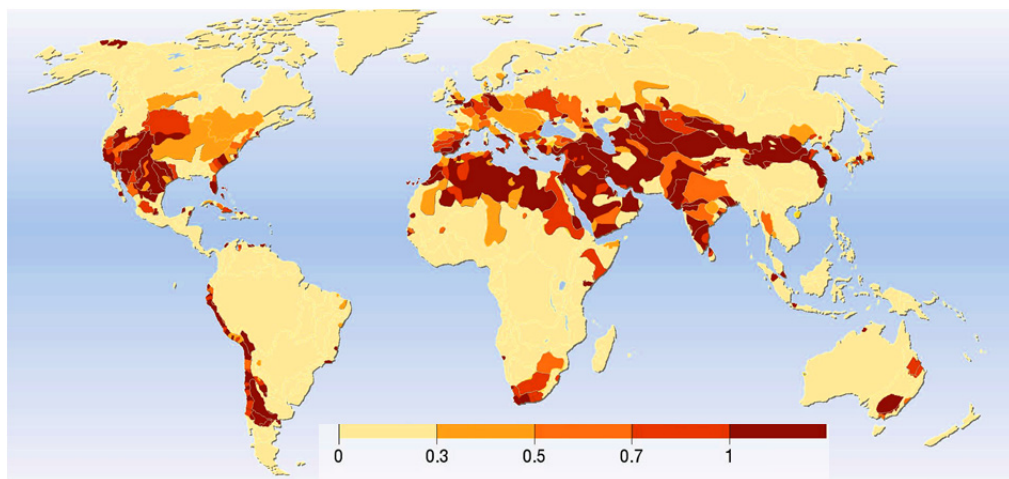
2.3. Vodni bilans

Svetska raspodela vodnih resursa je neravnomerna, kao i količine vodnih resursa koji se crpe u pojedinim državama ili rečnim slivovima. Na slici 2.3. prikazana je godišnja nacionalna raspoloživost slatkovodnih resursa po stanovniku.



Slika 2.3. Raspoloživost slatkovodnih resursa izražena u metrima kubnim po stanovniku godišnje na nacionalnom nivou (Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu, 2008)

Na slici 2.4. prikazan je indeks eksploatacije vode u svetskim rečnim basenima. Ovaj indeks predstavlja odnos ukupne godišnje količine zahvaćenih vodnih resursa i obnovljivih vodnih resursa. Zahvaćeni vodni resursi obuhvataju ukupnu godišnju zapreminu zahvaćene površinske i podzemne vode od strane industrije, poljoprivrede, domaćinstava i drugih korisnika. Obnovljivi vodni resursi obuhvataju zapreminu rečnog oticaja (padavine umanjene za stvarnu evaporaciju i evapotranspiraciju) i promenu zapremine podzemnih voda, generisanih u prirodnim uslovima isključivo padavinama na nacionalnoj teritoriji (interni dotok), kao i zapreminu stvarnog dotoka površinskih i podzemnih voda iz susednih zemalja (eksterni dotok) i izračunavaju se kao višegodišnji prosek za najmanje 20 uzastopnih godina.



Slika 2.4. Indeks eksploatacije vode u svetskim rečnim basenima (Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu, 2008)

Indeks eksploatacije vode svojom vrednošću ukazuje da ozbiljni problemi (vodni stres) mogu nastupiti ako indeks prelazi 0,2, a smatra se da je granica iznad 0,4 zona sa ekstremnim vodnim stresom. Vrednosti indeksa eksploatacije voda ukazuju na neodrživo korišćenje vodnih resursa u datom rečnom basenu. Do ovakvih situacija dolazi kada se prekomerno eksploatišu i zagađuju površinske i podzemne vode i pri neefikasnom korišćenju slatkovodnih resursa. Do smanjenja zapremine ili isušivanja reka ili jezera može doći usled prekomerne upotrebe vode za navodnjavanje ili nepravilno upravljanje branama u gornjim delovima sliva. U priobalnim naseljima prekomerna eksploatacija slatkih voda može dovesti do prodora okeanske vode u podzemne vode, koje tada postaju slane i nepodesne za ljudsku upotrebu.

Za održivo korišćenje vodnih resursa potrebno je znati vodni bilans. Vodni bilans je kvantitativni i kvalitativni odnos raspoloživih i potrebnih količina površinskih i podzemnih voda na određenom prostoru i u određenom vremenu. Osnovna prostorna jedinica za bilansiranje voda je sliv. Bilans vode se zasniva na principu održanja mase, gde je razlika ulaznih i izlaznih količina vode jednaka promeni zapremine u slivu. Dotok voda potiče od padavina, površinskog oticaja i pritanja vode iz podzemlja. Odliv voda se javlja u vidu infiltracije vode u zemljište i podzemne vode, evaporacije, evapotranspiracije i izlaznog protoka vode sa slivnog područja.

Ako se proračunom bilansa vode za sliv na godišnjem nivou kao rezultat dobije negativna promena zapremine, ona ukazuje na neto gubitak vode iz sliva i neodrživ način upravljanja vodama na slivu. Hidrologija je nauka koja proučava vode na Zemlji, njihove osobine, prostorni i vremenski raspored i kretanje u prirodi. Hidrologija se bavi slatkim vodama i postala je nezamenljiva disciplina za uspešno upravljanje vodama na lokalnom i globalnom nivou. Pod upravljanjem se smatra dovođenje dovoljne količine vode, zadovoljavajućeg kvaliteta, na mesto gde je potrebna.

2.4. Literatura

Agencija za geološka istraživanja Sjedinjenih Američkih Država (U.S. Geological Survey) (2013). Hidrološki ciklus. Dostupno na <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleserbian.html>

Hoekstra, A. Y., i Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232–3237.

Mekonnen, M.M., i Hoekstra, A.Y. (2011). *National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption*. Value of Water Research Report Series No 50. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu (United Nations Environment Programme – UNEP) (2008). *Vital Water Graphics - An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters* (2nd ed.). Nairobi, Kenya: UNEP.

Svetski fond za prirodu (World Wide Fund for Nature – WWF) (2010). *Living Planet Report 2010 – Biodiversity, biocapacity and development*. Gland, Switzerland: WWF International.

3 Zagađenje vode

Zagađenje vode je svaka promena kvaliteta vode koja negativno utiče na zdravlje ljudi, kvalitet vodenih ekosistema i upotrebnu vrednost vode za vodosnabdevanje, navodnjavanje i rekreaciju (plivanje, ribolov, plovidba). Zagađenje vode utiče na organizme vodenih ekosistema (mikroorganizmi, alge, vodene makrofite, vodeni beskičmenjci, ribe), kao i na ptice i sisare koji direktno zavise od vodenih ekosistema. Uticaj zagađenja vode na jednu životinjsku ili biljnu vrstu ugrožava druge vrste u ekosistemu koje se nalaze u istom lancu ishrane. Ovo poglavlje se bavi glavnim kategorijama zagađujućih materija, izvorima zagađenja i uticajima ljudskih aktivnosti na kvalitet vode.

Kao što je prethodno navedeno, *zagađujuće materije* su materije koje vode poreklo iz antropogenih izvora zagađivanja i mogu imati štetne efekte po zdravlje ljudi i životnu sredinu. *Emisija* je ispuštanje i isticanje zagađujućih materija u gasovitom, tečnom i čvrstom agregatnom stanju iz antropogenih izvora zagađivanja u životnu sredinu. *Izvor zagađenja* može biti mesto, mesta ili područja odakle se zagađujuće materije emituju u životnu sredinu, ili gde nastaje buka (Porteous, 1996). Razlikuju se tačkasti izvori koje predstavljaju veliki pojedinačni zagađivači, netačkasti (difuzni, površinski) izvori i linijski izvori (zagađenje iz vozila i buka).

Tačkaste izvore predstavljaju pojedinična mesta (tačke) emisije zagađujućih materija u recipijent. *Recipijenti* su prirodni i veštački vodotokovi, jezera, akumulacije i zemljište, u koje se ispuštaju otpadne vode. Otpadne vode se prema poreklu dele na komunalne i tehnološke. *Komunalne otpadne vode* su upotrebljene vode iz domaćinstava, ustanova, bolnica i ugostiteljskih objekata. *Tehnološke otpadne vode* nastaju u različitim tehnološko-proizvodnim procesima.

Primeri tačkastih izvora zagađenja su septička jama, kanalizacioni ispušt, odlagalište otpada, fabrika, postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda i emisija iz fabričkog dimnjaka (Grant i Hawkins, 1995). Zagađenje koje potiče iz tačkastih izvora može se smanjiti ili eliminisati smanjenjem zagađenja na mestu nastanka i pravilnim prečišćavanjem otpadnih voda pre ispuštanja u recipijent.

Netačkasto (difuzno) zagađenje je posledica mnogih aktivnosti, a ispoljava se kroz kisele kiše, površinski oticaj sa poljoprivrednih i urbanih površina i slično. *Izvori difuznog zagađenja* mogu biti atmosferski ili površinski. Površinski izvori difuznog zagađenja su poljoprivredne površine, farme životinja, rudnici, urbane površine, gradilišta i smetlišta. Difuzne izvore zagađenja je teže kontrolisati i regulisati od tačkastih izvora zagađenja.

Površinski oticaj sa poljoprivrednog zemljišta je difuzni izvor zagađenja usled koga u vodna tela dospevaju nutrijenti, toksična organska jedinjenja i suspendovane materije. Nutrijenti (biljne hranljive materije, pre svega nitrati i fosfati) potiču iz đubriva sa poljoprivrednih površina koje usevi nisu apsorbovali. Toksična organska jedinjenja potiču iz pesticida, dok se suspendovane materije javljaju usled erozije zemljišta. Primenom adekvatnih metoda upravljanja u poljoprivredi može se smanjiti prekomerno korišćenje đubriva i pesticida, koje uz primenu mera za kontrolu erozije doprinose ekonomskoj uštedi i zaštiti vodnih tela od zagađenja sa poljoprivrednih površina.

U tabeli 3.1. navedeni su primarni izvori zagađenja voda i glavne kategorije zagađujućih materija koje se emituju.

Tabela 3.1. Primarni izvori zagađenja voda i glavne kategorije zagađujućih materija koje se emituju

Kategorije zagađujućih materija	Tačkasti izvori zagađenja		Difuzni izvori zagađenja	
	Komunalne otpadne vode	Tehnološke otpadne vode	Površinski oticaj sa poljoprivrednih površina	Površinski oticaj sa urbanih površina
Materije koje troše kiseonik	X	X	X	X
Nutrijenti	X	X	X	X
Patogeni organizmi	X	X	X	X
Suspendovane materije	X	X	X	X
Soli		X	X	X
Teški metali		X		X
Organska jedinjenja	X	X	X	X
Pesticidi		X	X	
Hormonski aktivne supstance	X	X	X	
Farmaceutski proizvodi	X	X	X	
Proizvodi za ličnu negu	X			
Toplota		X		

3.1. Materije koje troše kiseonik

Materije čija oksidacija u vodnom recipijentu zahteva potrošnju rastvorenog molekularnog kiseonika nazivaju se materije koje troše kiseonik. Ova grupa zagađivača obuvata biorazgradive organske materije, ali uključuje i određena neorganska jedinjenja. Smanjenje koncentracije rastvorenog kiseonika u vodi predstavlja opasnost za ribe i druge vodene organizme kojima je potreban kiseonik za život. Minimalna koncentracija rastvorenog kiseonika potrebna za održanje života različitih vrsta varira. Na primer, potočna pastrmka zahteva vodna staništa u kojima je koncentracija rastvorenog kiseonika oko 7,5 mg/L, dok šaran može da preživi pri

koncentraciji rastvorenog kiseonika od 3 mg/L. Materije koje troše kiseonik u komunalnim otpadnim vodama pre svega potiču od ljudskog otpada i ostataka hrane. Tehnološke otpadne vode sa najvećim sadržajem materija koje troše kiseonik dolaze iz prehrambene industrije i proizvodnje papira. Skoro sve prirodne organske materije, kao što su životinjska balega, ostaci useva ili lišće, koje dospevaju u vodu iz netačkastih izvora, doprinose potrošnji rastvorenog kiseonika.

Biohemijska potrošnja kiseonika (BPK) je pokazatelj sadržaja biorazgradivih organskih supstanci u prirodnim i otpadnim vodama. Biohemijska potrošnja kiseonika (BPK) je količina kiseonika (O₂) neophodna za razgradnju organskih materija u otpadnim vodama od strane aerobnih mikroorganizama. Biohemijska oksidacija teoretski traje beskonačno jer je brzina oksidacije proporcionalna količini preostale organske materije. U toku prvih pet dana oksidiše se oko 60 do 70% organskih materija dok se za 20 dana oksidiše 95 to 99% ukupnih organskih materija (Tchobanoglous, Burton i Stensel, 2003). Iz praktičnih razloga, najčešće se koristi petodnevni BPK test (BPK₅), pri čemu se meri potrošnja rastvorenog kiseonika u uzorku ispitivane vode koji se drži u zatvorenoj boci na 20°C.

3.2. Nutrijenti

Nutrijenti (glavni predstavnici su azot i fosfor) su potrebni za rast živih bića i njihovo prisustvo u rekama i jezerima deo je prirodnog lanca ishrane. Usled antropogenog dejstva dolazi do povećane koncentracije nutrijenata u prirodnim vodnim telima, što utiče na prebrzo umnožavanje pojedinih organizama (algi i drugih vodenih biljaka) i narušavanje prirodnog lanca ishrane. *Cvetanje algi* nastaje kada ima previše nutrijenata u vodi, a pogoršava se sa povećanjem temperature. Iako alge rastu brzo, one brzo i odumiru jer asimiluju sve prisutne nutrijente. Pri razlaganju alge se obično izdvajaju na površini vode i stvaraju zelenu sluz. Razlaganjem algi troše se velike količine rastvorenog kiseonika u vodi. *Eutrofikacija* predstavlja obogaćivanje površinske vode nutrijentima (jedinjenjima azota i/ili fosfora), koje uzrokuje ubrzan rast algi i složenih biljnih organizama izazivajući poremećaj ravnoteže organizama prisutnih u vodi i degradaciju kvaliteta vode (Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u

površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje, 2012).

Izvori nutrijenata su komunalne otpadne vode (deterdženti na bazi fosfora, urin), površinsko oticanje sa poljoprivrednih površina (azotna i fosforna đubriva, životinjska balega) i otpadne vode iz fabrika za preradu hrane. Koncentracija fosfata u komunalnim otpadnim vodama se može smanjiti zamenom deterdženata na bazi fosfora sa deterdžentima koji sadrže supstance bezbednije za životnu sredinu, kao što su zeoliti i jedinjenja koja su biodegradabilna.

3.3. Patogeni organizmi

Patogeni organizmi su agensi koji uzrokuju bolesti. Mikroorganizmi koji se mogu naći u otpadnim vodama su bakterije, virusi i protozoe, koje izlučuju oboleli ljudi ili životinje. Pri ispuštanju otpadnih voda u površinske vode može doći do mikrobiološkog zagađenja što čini vodu nebezbednom za kupanje, ribolov i naročito za piće. Određene školjke mogu biti toksične jer koncentrišu patogene organizme u tkivu, tako da nivo toksičnosti u školjki može biti mnogo veći od nivoa toksičnosti u okolnoj vodi.

Kolera i tifusna groznica su endemske bolesti koje se šire konzumiranjem zagađene vode. Godine 2012. Svetskoj zdravstvenoj organizaciji (SZO) prijavljeno je 245.393 slučajeva kolere i 3.034 smrtna ishoda (SZO, 2013). Najviše slučajeva je prijavljeno na Haitiju, dok je u prošlosti kolera bila najrasprostranjenija na afričkom kontinetu. Prema podacima Instituta za zdravstvenu metriku i evaluaciju Univerziteta u Vašingtonu (2013), registrovana su 190.242 smrtna slučaja usled oboljenja tifusnom i paratifusnom groznicom u 2010. godini.

U razvijenim državama mikroorganizmi koji često uzrokuju širenje bolesti kroz konzumiranje vode su *Giardia lamblia* i *Cryptosporidium parvum*. Ove patogene protozoe potiču iz ljudskih i životinjskih izvora.

3.4. Suspendovane materije

Izraz *suspendovane materije* koristi se za mineralne (neorganske) i organske čestice koje su suspendovane u vodi (i-SeLaR, 2011a). Materije se u vodi pojavljuju u suspendovanom obliku usled turbulentnog strujanja. Najčešće su to čestice gline i mulja koje potiču od erozije poljoprivrednih

zemljišta i površinskih kopova, kao i sa gradilišta (izgradnja zgrada, puteva, mostova). Pri smanjenim brzinama vode, na primer pri ulivu reke u rezerovar ili jezero, dolazi do taloženja suspendovanih materija na dnu vodnog tela u vidu sedimenta. Koloidne čestice, koje se teško talože, uzrokuju mutnoću površinskih voda. Organske suspendovane materije mogu dovesti do potrošnje rastvorenog kiseonika u vodi.

Jake kiše dovode do erozije zemljišta, a brze vodene struje dovode do podizanja naslaga na dnu potoka i reka. Geološke karakteristike slivnog područja utiču na količinu erodiranog materijala koji dospeva u vode. Ove prirodne varijacije mogu biti pojačane ljudskim aktivnostima u slivnom području. Uklanjanje vegetacije duž obala reke može dovesti do pojačane erozije obala. Izgradnja puteva i čišćenje zemljišta zbog opšteg razvoja, poljoprivrednih potreba i seče šuma, samo su neki od primera aktivnosti koje povećavaju eroziju i dovode do povećane mutnoće u potocima i rekama.

Suspendovane materije smanjuju prodiranje sunčeve svetlosti i tako dovode do manje prozirnosti vode. Smanjenje količine svetlosti ima nekoliko posledica:

- primarni producenti (fitoplankton, alge, druge vodene biljke) proizvode manju količinu kiseonika;
- ribe i drugi organizmi se manje efikasno hrane u mutnim vodama;
- taloženjem suspendovanih čestica stvaraju se nepovoljni uslovi za razmnožavanje i rast beskičmenjaka koji žive na dnu vodenog sistema, što dovodi do postepenog smanjenja broja beskičmenjaka koji služe kao izvor hrane ribama i ostalim predatorima. Jaja pojedinih vrsta riba mogu se razvijati i izleći samo u koritima reka na čijem dnu je rastresit šljunak. Ako se pore između oblutaka napune sedimentom, jaja se guše i populacija riba se smanjuje;
- sa velikim unosom sedimentnih materija može doći do oštećenja ili začepljenja škrge riba;
- suspendovane materije sadrže nutrijente koji se vezuju za različite polutante, kao što su metali i bakterije;
- prozirnost vode utiče na percepciju kvaliteta vode od strane ljudi. Smanjena prozirnost vode daje utisak da je voda prljava ili zagađena.

3.5. Soli

Sve prirodne vode sadrže određenu količinu soli. Prisustvo soli u slatkim vodama iznad dozvoljenih koncentracija ugrožava opstanak prirodne populacija biljaka i životinja i smanjuje mogućnost korišćenja vode za vodosnabdevanje i navodnjavanje. Mnoge tehnološke otpadne vode sadrže visoke koncentracije soli. Smeša natrijum-hlorida (NaCl) i kalcijum-hlorida (CaCl₂) koja se upotrebljavlja na putevima tokom zime površinskim oticajem dospevaju u vodne recipijente, naročito tokom prolećnog otapanja snega.

3.6. Prioritetne zagađujuće supstance

Prioritetne zagađujuće supstance su supstance koje predstavljaju značajan rizik za zdravlje ljudi i životnu sredinu i regulisane su Uredbom o graničnim vrednostima prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovi za njihovo dostizanje (2011). Teški metali, toksične organske supstance i pesticidi spadaju u grupu prioriternih zagađujućih supstanci.

Mnoge prioritetne zagađujuće supstance su toksične, postojane i bioakumulativne. Vodeni organizmi apsorbuju i akumuliraju zagađujuće supstance iz vode, sedimenta i kroz ishranu. Ovaj proces se naziva *bioakumulacija*. Bioakumulacije se najčešće javlja kada je supstanca postojana i sporo se metaboliše, ima malu rastvorljivost u vodi i veliku rastvorljivost u mastima. Koncentracija metala u vodenim organizmima može biti veća za nekoliko redova veličina u odnosu na njihov sadržaj u vodi.

3.6.1. Teški metali

Teški metali koji su na listi prioriternih supstanci izazivaju otežano disanje kod ljudi, negativno utiču na metabolizam i rast organizama, a u pojedinim slučajevima izazivaju rak i poremećaje imunog, endokrinološkog i nervnog sistema. Teški metali na listi prioriternih supstanci su kadmijum, olovo, živa, nikl i jedinjenja ovih teških metala.

Teški metali dospevaju u vodne recipijente izlivanjem otpadnih voda iz rudarske i metaloprerađivačke industrije, izlivanjem procednih voda nesaniranih deponija, površinskim oticajem sa urbanih površina i atmosferskim padavinama u područjima zagađenog vazduha. Teški metali

su bioakumulativni. Konzumiranje ribe i drugih morskih plodova iz voda zagađenih živom predstavlja posebnu opasnost za trudnice (ometa normalni razvoj embriona) i za decu do 12 godina, jer utiče na razvoj nervnog sistema. Kadmijum, olovo i živa spadaju i u klasu hormonskih aktivnih supstanci.

3.6.2. *Organska jedinjenja*

Organska jedinjenja koja se nalaze na listi prioriternih supstanci svrstana su u sledeće grupe zagađivača:

- aromatični i policiklični aromatični ugljovodonici;
- isparljiva organska jedinjenja;
- polihlorovani ugljovodonici;
- fenoli.

Benzen je najjednostavniji aromatični ugljovodonik (ugljovodonici stabilne ciklične ili prstenaste strukture) molekulske formule C_6H_6 . Benzen se koristi u proizvodnji plastike, smole, najlona i sintetičkih vlakana, kao i nekih maziva, boja, deterdženata, lekova i pesticida. Benzen je komponenta sirove nafte, benzina i duvanskog dima. Benzen je kancerogen i deluje štetno na imunološki i nervni sistem (Agencija za toksične supstance i registraturu bolesti SAD, 2011).

Policiklični aromatični ugljovodonici (*eng. polycyclic aromatic hydrocarbons - PAH*) su molekuli koji sadrže dva aromatična prstena ili više njih. Policiklični aromatični ugljovodonici su grupa od preko 100 različitih hemikalija, ulaze u sastav nafte i naftnih derivata, a nastaju i u procesima nepotpunog sagorevanja biomase (drvo), fosilnih goriva i čvrstog otpada. Nastaju i pri sagorevanju duvana i tokom roštiljanja mesa na ćumuru. Jedinjenja iz klase policikličnih aromatičnih ugljovodonika koja se nalaze na listi prioriternih supstanci imaju kancerogena, mutagena i teratogena svojstva (ometaju normalan embrionalni razvoj).

Isparljiva organska jedinjenja (*eng. volatile organic compounds - VOC*) se proizvode u velikim količinama i povezana su sa velikim brojem proizvoda kao što su plastika, lepila, boje, benzin, sredstva za hlađenje i hemijsko čišćenje. Rasprostranjena i dugotrajna upotreba isparljivih organskih jedinjenja, koja su hemijski stabilna i mobilna usled izražene rastvorljivosti u vodi i slabog afiniteta ka akumulaciji u sedimentima, utiče na opasnost od zagađenja izvorišta pijaćih voda (Moran, Hamilton i Zogorski, 2006).

Lako isparljiva organska jedinjenja ispuštaju se u životnu sredinu putem izduvnih gasova benzinskih motora, iz industrijskih emitera u vazduh, iz rezervoara koji cure, septičkih jama, nesanitarnih deponija i na izlivima atmosferskih i komunalnih otpadnih voda. Sva jedinjenja sa liste prioriternih supstanci imaju kancerogeno, mutageno i teratogeno dejstvo.

Polihlorovani ugljovodonici su organska jedinjenja koja u svom molekulu sadrže supstituisane hlorove atome. Industrijski značaj ovih jedinjenja povezan je sa početkom proizvodnje plastičnih materijala (polivinil-hlorida, PVC), sintetičkih rastvarača (npr. trihloroetilen), pesticida (dieltrin, DDT) i sintetičkih transformatorskih ulja (piralensko ulje). Utvrđeno je da je veliki broj hlorovanih ugljovodonika otrovan i opasan za okolinu (Gavrančić i Skala, 2000). Opasnost je prouzrokovana izuzetnom hemijskom stabilnošću ovih jedinjenja, što sprečava njihovo razlaganje do bezopasnih supstanci i dobrom rastvorljivošću u mastima, što olakšava apsorpciju i akumulaciju ovih jedinjenja u živim organizmima (bioakumulacija). Veliki broj ovih jedinjenja ima kancerogena, mutagena i teratogena svojstva. Među ovim jedinjenjima nalaze se i polihlorovani bifenili (*eng. polychlorinated biphenyls - PCB*) ili piralensko ulje, koji su se najviše upotrebljavali u transformatorima kao rashladni medij jer ne provode struju i podnose visoke temperature (do 170°C). Proizvodnja polihlorovanih bifenila je zabranjena sedamdesetih godina 20. veka usled otkrivenog kancerogenog i teratogenog efekta. Polihlorovani bifenili su bioakumulativni. Spadaju i u grupu hormonski aktivnih supstanci – imaju tendenciju vezivanja za estrogene receptore u telu što uzrokuje abnormalnu aktivnost estrogena (Gavrančić i Skala, 2000).

Fenol i fenolna jedinjenja su jedinjenja sa aromatičnim prstenom koji je vezan za hidroksilnu grupu (-OH). Fenolna jedinjenja se koriste u proizvodnji:

- fenolnih smola koje se koriste kao adheziv u građevinskoj i automobilskoj industriji i industriji električnih uređaja;
- bisfenola A koji se koristi u proizvodnji polikarbonatne plastike, epoksidne smole i drugih sintetičkih polimera;
- u proizvodnji najlona i drugih sintetičkih vlakana.

Fenoli se koriste i kao antiseptici, sredstva za dezinfekciju, pesticidi (za kontrolu razvoja bakterija i gljivica) i u medicinskim preparatima (losioni, tečnosti za ispiranje usta). Fenoli se javljaju i kao nusprodukti u rafinerijama

nafta i kao emisije materije sa nesanitarnih deponija industrijskog i rudarskog otpada. Niske koncentracije fenola narušavaju organoleptičke osobine vode (izazivaju „medicinski“ ukus i miris vode), dok veće koncentracije mogu biti toksične za ljude i za vodene organizme (Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država, 2009). Fenoli su bioakumulativni u vodenim sredinama. Na listi prioritetnih supstanci nalazi se pentahlorofenol koji se koristi u zaštiti drveta.

3.6.3. *Pesticidi*

Pesticidi su hemijska sredstva koja se upotrebljavaju za uništavanje štetnih i nepoželjnih biljaka, životinjskih štetočina ili gljivica koje uzrokuju bolesti poljoprivrednih useva. Primer za pesticid sa prioritetne liste supstanci je herbicid atrazin koji je u zemljama Evropske unije (u daljem tekstu EU) izbačen iz prometa i upotrebe 2004. godine, a u Srbiji 2007. godine. Atrazin ima teratogeni efekat i utiče na rad endokrinog i reproduktivnog sistema. Atrazin se u vodama Srbije detektuje u koncentracijama koje su znatno niže od maksimalno dozvoljenih koncentracija (Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije, 2012; PMF UNS, 2010). Pretpostavka je da je prisustvo atrazina u vodotokovima posledica ranije primene, velike pokretljivosti atrazina i dobre rastvorljivosti u vodi kao i slabog afiniteta ka akumulaciji u sedimentima.

3.7. Hormonski aktivne supstance

Hormonski aktivne supstance (HAS) pripadaju klasi jedinjenja koja izazivaju poremećaje endokrinog sistema (*eng. endocrine-disrupting chemicals*). U ovom delu biće predstavljene HAS koje se ne nalaze na listi prioritetnih supstanci, s tim da je više istraživanja koja ukazuju na značajan negativni efekat ovih supstanci na životnu sredinu i zdravlje ljudi. Ove supstance su fenoli, ftalati i parabeni.

Endokrini sistem je važan za zdravlje ljudi i životinja, jer reguliše i kontroliše oslobađanje hormona. Hormoni regulišu telesne funkcije kao što su metabolizam, rast i razvoj, san i raspoloženje. Poremećaji rada endokrinog sistema mogu biti uzročnici bolesti kao što su dijabetes, gojaznost, neplodnost i rak (Evropska agencija za bezbednost hrane, 2013). Hormonska regulacija je naročito važna u kritičnim fazama razvoja fetusa i tokom ranog

detinjstva jer poremećaji rada endokrinog sistema u ovim razvojnim dobima mogu izazvati nepravilni razvoj fetusa i smanjiti sposobnost učenja kod dece, a mogu uzrokovati ozbiljne bolesti tokom kasnijih faza razvoja (Evropska agencija za bezbednost hrane, 2013).

HAS menjaju normalnu fiziološku funkciju endokrinog sistema, utiču na sintezu i delovanje hormona u telu. HAS mogu da oponašaju prirodne hormone, blokiraju dejstvo hormona ili dovedu do promena nivoa hormona u telu.

HAS se obično uvode u životnu sredinu spiranjem proizvoda za ličnu negu sa tela, metabiličkom ekskrecijom i ispuštanjem komunalnih otpadnih voda, otpadnih voda sa farmi životinja kojima se kroz ishranu dodaju hormoni rasta i procednih voda sa nesanitarnih deponija.

U hormonski aktivne supstance spadaju fenolna jedinjenja bisfenol A (*eng. bisphenol A - BPA*) i triklosan. Bisfenol A (BPA) imitira ženski hormon estrogen. BPA se koristi u proizvodnji polikarbonatne plastike, epoksidne smole i drugih sintetičkih polimera. Od polikarbonatne plastike prave se kontejneri za vodu i hranu, flašice za bebe i plastični tanjiri i pribor za jelo. Epoksidne smole oblažu unutrašnjost konzervi za hranu i piće i koriste se u izradi termalnog papira za potrošačke računare. Utvrđeno je da se BPA oslobađa iz proizvoda i materijala koji se svakodnevno koriste (Evropska agencija za zaštitu životne sredine, 2013). BPA se oslobađa iz polikarbonatnih kontejnera i flašica za bebe pri normalnim uslovima upotrebe, a pojačano ako se plastika koja sadrži BPA zagreje (u mikrotalasnoj peći ili sipanjem vruće hrane i vrućeg mleka u plastične kontejnere). Polikarbonatna plastika je obično označena brojem 7 kao reciklažnim znakom.

U januaru 2011. godine usvojena je evropska Direktiva 2011/8/EU (2011), kojom se zabranjuje korišćenje BPA za proizvodnju polikarbonatnih bočica i flašica za hranjenje odojčadi.

Triklosan je antimikrobno sredstvo koje se akumulira u našem telu, dovodi do poremećaja rada endokrinog sistema i doprinosi razvoju bakterija otpornih na antibiotike i antibakterijske proizvode. Triklosan se nalazi u širokom spektru antibakterijskih sapuna i deterdženata, kao i u mnogim dezodoransima, pastama za zube, kozmetičkim preparatima, tkanini i plastici. Triklosan je prvobitno razvijen za upotrebu u operacionim salama, ali u poslednjih nekoliko godina postao je uobičajeni dodatak nizu potrošačkih proizvoda, kao što su kuhinjske ploče za sečenje, kese za smeće,

igračke, posteljina, čarape i cipele, sa namenom da ubije bakterije i gljivice i spreči neprijatne mirise. Međutim, dokazano je da triklosan može da bude opasan i nepotreban. Agencija za hranu i lekove Sjedinjenih Američkih Država nije pronašla dokaze da su antibakterijski sapuni i tečnosti efikasniji u odnosu na običan sapun i vodu u zaštiti potrošača od bakterija (Agencija za hranu i lekove Sjedinjenih Američkih Država, 2012). Triklosan dospeva u površinske vode izlivanjem komunalnih otpadnih voda. Triklosan je bioakumulativna supstanca i akumulira se u masnim tkivima organizama.

Ftalati su grupa aromatičnih jedinjenja koja se koriste kao plastifikatori u proizvodnji plastičnih masa (polivinilhlorid – PVC) i smola. Plastifikatori povećavaju fleksibilnost, transparentnost, trajnost i dugovečnost plastike. Ftalati se nalaze i u različitim industrijskim proizvodima: ambalaži za hranu, dečijim igračkama, proizvodima za negu beba, proizvodima za ličnu negu, hemijskim stabilizatorima u kozmetici, vinil-podovima, mazivima, lepkovima, elektronicima, plastelinu, štamparskim bojama, lakovima, farmaceuticima, medicinskim uređajima i tekstilu. Prema Uredbi EU br. 1907/2006 o registraciji, evaluaciji, odobravanju i ograničavanju hemikalija i osnivanju Evropske agencije za hemikalije (2006), ftalati koji se najčešće nalaze u proizvodima za decu su zabranjeni u svim igračkama. Uredbom EU br. 1223/2009 o kozmetičkim proizvodima (2009) uvedene su i zabrane upotrebe ftalata u kozmetici.

Bisfenol A, triklosan i ftalati su identifikovani u krvi pupčane vrpce novorođenčadi (Schuiling i Van der Naald, 2005).

Parabeni su klasa jedinjenja koja je u širokoj upotrebi kao konzervansi u kozmetičkoj i farmaceutskoj industriji. Koriste se za sprečavanje rasta mikroorganizama u kozmetičkim proizvodima, a mogu da se apsorbuju preko kože, krvi i digestivnim sistemom. Parabeni se pojavljuju uglavnom u proizvodima za ličnu negu koji sadrže značajne količine vode, kao što su šamponi, omekšivači za kosu, losioni i sredstva za čišćenje lica. Najveći deo parabena dospeva u životnu sredinu iz otpadnih voda kupatila, spiranjem sa površine tela i ekskrecijom apsorbovane supstance. Ova jedinjenja su identifikovana u uzorcima sa biopsije tumora dojke (Darbre i Harvey, 2008).

Pojedine HAS se koriste u lekovima (pilule za kontracepciju koje sadrže sintetički estrogen, hormonskoj terapiji kod bolesti štitaste žlezde) upravo zbog svog dejstva na funkcije endokrinog sistema. Aktivne supstance

iz lekova putem metaboličke ekskrecije dospevaju u prirodne vode i zagađuju ih.

3.8. Farmaceutski proizvodi i proizvodi za ličnu negu

Grupa jedinjenja koja se naziva farmaceutski proizvodi i proizvodi za ličnu negu (*eng. Pharmaceuticals and Personal Care Products - PPCP*) obuhvata proizvode koji se koriste iz zdravstvenih ili kozmetičkih razloga i za podsticanje rasta i zdravlja stoke. Tu spadaju terapijski lekovi, veterinarski lekovi, parfemi i kozmetički proizvodi. Mnogi od navedenih proizvoda sadrže supstance koje ostaju biološki aktivne i kada se odbace na odlagališta otpada ili ispuste u vodne recipijente.

Prisustvo farmaceutskih proizvoda je detektovano u vodnim telima i istraživanja pokazuju da određeni lekovi mogu delovati štetno po vodeni svet. Prisustvo estrogena u vodi doprinosi ispoljavanju karakteristika ženskog ponašanja kod riba muškog pola (Evropska agencija za životnu sredinu, 2010).

3.9. Toplota

Temperaturni režim vodenog ekosistema utiče na sastav biološke zajednice (i-SeLaR, 2011b). Svaki vodeni organizam ima optimalnu temperaturu pri kojoj najbolje funkcioniše.

Rastvorljivost kiseonika u vodi je obrnuto proporcionalna temperaturi vode. Na primer, na 0°C voda može maksimalno da sadrži 14,6 mg/L rastvorenog kiseonika (u tački zasićenja), dok je na 30°C koncentracija rastvorenog kiseonika 7,5 mg/L. Više temperature utiču na brže metaboličke procese, disanje i veće potrebe za kiseonikom riba i drugih vodenih organizama. Proces koji uzrokuje eutrofikaciju brže se odvija pri većim temperaturama vode. Najznačajniji izvori termičkog zagađenja vode su otpadne vode iz termoenergetskih postrojenja.

3.10. pH vrednost

pH vrednost je mera relativnog alkaliteta ili aciditeta vode i definiše se kao negativan logaritam koncentracije vodonik-jona:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

Iako se u vodi nalaze H_3O^+ -joni tradicionalno se koristi oznaka H^+ -jon i pH vrednost. pH skala se kreće u opsegu od 0 (pH vrednost za najkiselije rastvore) do 14 (pH vrednost za najbaznije rastvore) i ukazuje na aciditet (kiselost) rastvora. Čista, obična kišnica ima pH vrednost između 5,0 i 5,5, što se smatra blago kiselim rastvorom. Svako povećanje pH jedinice za 1 uslovljava deset puta veću koncentraciju vodonik-jona i obratno.

Optimalna pH vrednost za opstanak živog sveta u vodi je u opsegu od 6 do 9. Prirodne vode mogu biti kisele usled zagađenja vode, što izaziva nestanak ribe i ostalih stanovnika u vodi i utiče na lanac ishrane.

Do povećanja kiselosti površinskih vode može doći usled kiselih kiša. Vodena para reaguje sa zagađivačima iz vazduha, sa sumpor-dioksidom i oksidima azota koji nastaju sagorevanjem fosilnih goriva u termoelektromotornim postrojenjima i motorima sa unutrašnjim sagorevanjem. Nastaju sumporna i azotna kiselina, smanjuje se pH vrednost atomsferskih padavina. Izlivanje kiselih rudarskih i industrijskih otpadnih voda takođe može dovesti do promene pH vrednosti vodnih tela.

3.11. Literatura

Agencija za hranu i lekove Sjedinjenih Američkih Država (United States Food and Drug Administration) (2012). Triclosan: What Consumers Should Know. Dostupno na

<http://www.fda.gov/forconsumers/consumerupdates/ucm205999.htm>

Agencija za toksične supstance i registraturu bolesti Sjedinjenih Američkih Država (United States Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2011). Toxic Substances Portal – Benzene. Dostupno na

<http://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxicid=14>

Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije (2012). *Izveštaj o stanju životne sredine u Republici Srbiji za 2011. godinu*. Beograd: Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine.

Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (United States Environmental Protection Agency) (2009). Terms of Environment – Phenols. Dostupno na

[http://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&vocabName=Terms%20of%20Env%20\(2009\)](http://ofmpub.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&vocabName=Terms%20of%20Env%20(2009))

Darbre, P. D., i Harvey, P. W. (2008). Paraben esters: review of recent studies of endocrine toxicity, absorption, esterase and human exposure, and discussion of potential human health risks. *Journal of Applied Toxicology*, 28(5), 561–578.

Evropska agencija za bezbednost hrane (European Food Safety Authority) (2013). Endocrine active substances. Dostupno na <http://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/eas.htm>

Evropska agencija za životnu sredinu (European Environment Agency – EEA) (2010). *Pharmaceuticals in the environment*. EEA Technical report No 1/2010. Copenhagen, Denmark: EEA.

Evropska agencija za životnu sredinu (European Environment Agency – EEA) (2013). *Environment and human health*. EEA Report No 5/2013. Copenhagen, Denmark: EEA.

Gavrančić, S., i Skala, D. (2000). Polihlorovani bifenili – osobine, primena i tehnologije razgradnje. *Hemijska industrija*, 54(2), 53–63.

Grant, M., i Hawkins, R. (1995). *The concise lexicon of environmental terms*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.

Institut za zdravstvenu metriku i evaluaciju Univerziteta u Vašingtonu (Institute for Health Metrics and Evaluation University of Washington) (2013). The Global Burden of Disease. Dostupno na <http://www.healthmetricsandevaluation.org/gbd>

i-SeLaR – Integrated management information system related to Serbian Lakes and Reservoirs (2011a). Suspendovane materije. Dostupno na <http://selar.pmf.kg.ac.rs/sites/iselar/wiki/Pages/Suspended%20Substances.aspx>

i-SeLaR – Integrated management information system related to Serbian Lakes and Reservoirs (2011b). Temperatura vode. Dostupno na <http://selar.pmf.kg.ac.rs/sites/iselar/wiki/Pages/Water%20Temperature.aspx>

Moran, M. J., Hamilton, P. A., i Zogorski, J. S. (2006). *Volatile Organic Compounds in the Nation's Ground Water and Drinking-water Supply Wells: A Summary*. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Porteous, A. (1996). *Dictionary of Environmental Science and Technology*. (2nd ed.) Chichester, UK: John Wiley & Sons.

Prirodno-matematički fakultet (PMF) Univerziteta u Novom Sadu (UNS) (2010). *Istraživanje prisustva prioriternih supstanci u vodi i sedimentu u zaštićenim zonama i odabranim lokacijama površinskih voda u AP Vojvodini*. Novi Sad: PMF, Departman za hemiju, Katedra za hemijsku tehnologiju i zaštitu životne sredine.

Schuilin, J., & Van der Naald, W. (2005). *A Present for Life: hazardous chemicals in umbilical cord blood*. Greenpeace Nederland, Greenpeace International and WWF-UK.

Svetska zdravstvena organizacija – SZO (World Health Organization - WHO) (2013). Number of reported cholera cases and deaths. Dostupno na http://www.who.int/gho/epidemic_diseases/cholera/cases_deaths/en/index.html

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., i Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse* (4th ed.). New York, USA: McGraw-Hill.

Zakonodavstvo

Uredba o graničnim vrednostima prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovi za njihovo dostizanje (2011). Službeni glasnik Republike Srbije br. 35/11.

Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje (2011, 2012). Službeni glasnik Republike Srbije br. 67/11 i 48/12.

Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje (2012). Službeni glasnik Republike Srbije br. 50/12.

Uredba EU br. 1907/2006 o registraciji, evaluaciji, odobravanju i ograničavanju hemikalija i osnivanju Evropske agencije za hemikalije – Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC [2006] Official Journal of the European Union L 396/1.

Uredba br. 1223/2009 o kozmetičkim proizvodima – Regulation (EC) No 1223/2009 of the European Parliament and of the Council of 30 November 2009 on cosmetic products [2009] Official Journal of the European Union L 342/59.

Direktiva 2011/8/EU – Commission Directive 2011/8/EU of 28 January 2011 amending Directive 2002/72/EC as regards the restriction of use of Bisphenol A in plastic infant feeding bottles [2011] Official Journal of the European Union L 26/11.

Osnove ekološkog inženjerstva

Zagađenje vode

4 Ekološki, hemijski i trofički status površinskih voda

U zavisnosti od antropogenog uticaja, kao i sposobnosti da delimično neutrališu taj uticaj, površinske vode mogu imati različit kvalitet. Aspekti kvaliteta površinskih voda su: fizičko-hemijski, biološki, mikrobiološki, hidromorfološki, toksikološki, sanitarno-higijenski itd. Od kvaliteta površinskih voda zavise sastav i brojnost vodene i priobalne biološke zajednice, kao i mogućnost njihove upotrebe od strane ljudi.

U domaćem zakonodavstvu kvalitet površinskih voda propisan je trima podzakonskim aktima Zakona o vodama (2010). Kvalitet vodenog ekosistema, kao staništa raznolike (tzv. biodiversifikovane) vodene zajednice, vrednuje se ekološkim i hemijskim statusom koji su propisani Pravilnikom o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametrima hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda (2011) i Uredbom o graničnim vrednostima prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovima za njihovo dostizanje (2011). Klase kvaliteta površinske vode, sa stanovišta mogućnosti njihovog korišćenja za ljudsku upotrebu, utvrđene su Uredbom o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje (2012).

4.1. Ekološki status površinskih voda

Prema Pravilniku o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametrima hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda (2011), *kvalitet površinskih voda* podrazumeva određivanje ekološkog i hemijskog statusa neizmenjenih vodnih tela površinskih voda (reka i jezera) ili određivanje ekološkog potencijala i hemijskog statusa za značajno izmenjena vodna tela (akumulacije na rekama) i veštačka vodna tela (npr. jezera koja su nastala veštačkim punjenjem vodom, iskopanih ili prirodnih udubljenja, zatim veštački kanali itd.). Kada se govori o ekološkom statusu površinskih voda, u obzir se uzimaju: fizičko-hemijski, biološki, mikrobiološki i hidromorfološki elementi kvaliteta. Hidromorfološki elementi odnose se na hidrološki režim, kontinuiranost vodenog toka, (ne)postojanje prepreka za migracije vodenih organizama, morfometrijske karakteristike rečnog korita ili jezersko-akumulacionih basena. Ovi

pokazatelji su deskriptivni i nisu detaljno obrađeni u postojećeg domaćoj zakonskoj regulativi, pa se neće pominjati u daljem tekstu. Za stajaće vode, kao što su jezera, akumulacije i veštačka vodna tela, relevantni su i pokazatelji eutrofikacije, koji se vrednuju trofičkim indeksima.

Da bi se odredili ekološki, hemijski i trofički status vodnih tela, neophodno je da postoje pouzdana merenja odgovarajućih pokazatelja kvaliteta vode. Svake godine Vlada Republike Srbije donosi Uredbu o utvrđivanju godišnjeg programa monitoringa statusa voda. Ovaj monitoring sprovodi Agencija za zaštitu životne sredine. Naučno-istraživačke institucije i ustanove koje se brinu o zaštiti javnog zdravlja takođe sprovode monitoring površinskih voda u skladu sa sopstvenim programima i specifičnim potrebama.

Ekološki status površinskih voda ukazuje na stepen u kom posmatrani vodeni ekosistem odstupa od neporemećenih uslova, po fizičko-hemijskim, biološkim i mikrobiološkim parametrima (za stajaća vodna tela, relevantna su odstupanja i po indikatoru trofičkog statusa). Ekološki potencijal, koji se određuje za značajno izmenjena i veštačka vodna tela, malo je komplikovaniji pokazatelj, jer treba da ukaže na stepen u kom posmatrani vodeni ekosistem odstupa od očekivanog stanja, koje bi bilo postignuto u slučaju da ne postoji antropogeni uticaj.

Ekološki status prirodnih vodnih tela, površinskih voda, klasifikuje se kao: odličan (I), dobar (II) i umeren (III). Vodno telo ima odličan ekološki status ako nijedna grupa relevantnih parametara ne odstupa od vrednosti karakterističnih za potpuno prirodne uslove kada ne postoji antropogeni uticaj. Na primer, nekom vodnom telu koje ima fizičko-hemijske parametre u dozvoljenim granicama, ali je zbog neodgovornog poribljavanja ili slučajnog unosa vrsta kojima to vodno telo nije prirodno stanište (tzv. alohtone vrste) došlo do narušavanja prirodne biološke ravnoteže, ne može se pripisati odličan ekološki status. Dobar ekološki status može imati vodno telo kod koga relevantni parametri blago odstupaju do vrednosti u neporemećenim uslovima. Umeren ekološki status definiše vodno telo u kome je u letnjem periodu karakteristično intenzivirano i produženo cvetanje fitoplanktonske populacije itd. Ekološki potencijal za značajno izmenjena i veštačka vodna tela klasifikuje se kao: maksimalan (I), dobar (II) i umeren (III). Sve površinske vode koje imaju ekološki status ili potencijal niži od umerenog klasifikuju se kao slabe (IV) ili loše (V). Vode koje pokazuju znake većih

promena vrednosti bioloških elemenata kvaliteta klasifikuju se kao slabe. Površinske vode koje ispoljavaju znake većih promena vrednosti bioloških elemenata kvaliteta, i u kojima relevantne biološke zajednice značajno odstupaju od uobičajenih u neporemećenim uslovima, klasifikuju se kao loše.

U tabeli 4.1. date su granične vrednosti hemijskih i fizičko-hemijskih parametara za ocenu klase ekološkog statusa za vodotok TIP 2. Vodotokovi ovog tipa su velike reke u kojima dominira nanos srednje krupnoće (izuzev reka Panonske nizije). Ovom tipu vodotoka pripadaju reke Ibar, Timok, Velika, Zapadna i Južna Morava, Lim, Kolubara itd. S obzirom na to da se ekološki status ocenjuje na osnovu graničnih vrednosti više parametara, merodavan je onaj parametar po kome je postignut najnepovoljniji ekološki status. To znači da ako jedan ili više parametara ekološkog statusa ili ekološkog potencijala prekoračuju granične vrednosti dobrog ekološkog statusa, ekološki status ili ekološki potencijal površinskih voda može biti klasifikovan najviše kao umeren. Ako vrednost parametara ekološkog statusa, odnosno ekološkog potencijala odgovara vrednosti na granici između klasa, vodno telo površinskih voda svrstava se u lošiju klasu.

U slučaju da postoje kontinualna merenja vrednost parametara za godišnji ili višegodišnji period određuje se kao percentil ranga 80, dok se za rastvoreni kiseonik određuje kao percentil ranga 10. U slučaju da postoje podaci samo za jedno merenje, ili za mali broj merenja, onda se ekološki status određuje na osnovu tih raspoloživih vrednosti, ali se naglašava da je u tom slučaju postignut srednji ili nizak nivo pouzdanosti u oceni ekološkog statusa.

Tabela 4.1. Hemijske i fizičko-hemijske granice klasa ekološkog statusa za vodna tela TIP 2 (Pravilnik o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametrima hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda, 2011)

Parametar	Jedinice	Granice između klasa ekološkog statusa			
		I–II	II–III	III–IV	IV–V
pH vrednost	-	6,5–8,5	6,5–8,5	6,5–8,5	<6,5 ili >8,5
Rastvoreni kiseonik	mg/L	8,5	7,0	5,0	4,0
BPK ₅	mg/L	1,8	4,5	6,0	20,0
Ukupni organski ugljenik	mg/L	2,0	5,0	7,0	23,0
Amonijum-jon (NH ₄ -N)	mg/L	0,05	0,1	0,8	1,0
Nitrati (NO ₃ -N)	mg/L	1,50	3,0	6,00	15,0
Ortofosfati (PO ₄ -P)	mg/L	0,02	0,1	0,2	0,5
Ukupni rastvoreni fosfor (P)	mg/L	0,05	0,2	0,4	1,0
Hloridi	mg/L	50	100	-	-

4.2. Hemijski status površinskih voda

Hemijski status pokazuje da li je vodno telo pod uticajem zagađenja prioritetnim i prioritetnim hazardnim supstancama. Granične vrednosti prioritetnih i prioritetnih hazardnih supstanci propisane su Uredbom o graničnim vrednostima prioritetnih i prioritetnih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovima za njihovo dostizanje (2011). Granične vrednosti date u Uredbi odnose se na prosečne godišnje koncentracije (PGK) i maksimalno dozvoljene koncentracije (MDK). Granične vrednosti prioritetnih i prioritetnih hazardnih supstanci ne zavise od klase ekološkog statusa. Hemijski status vodnih tela ocenjuje se na osnovu rezultata monitoringa kao *dobar status* ili *nije postignut dobar status*. Hemijski status vodnih tela ocenjuje se kao *nije postignut dobar status* u slučaju da je prekoračena makar jedna granična vrednost propisana pomenutom Uredbom. U tabeli 4.2. date su granične vrednosti za prioritetne i prioritetne hazardne supstance, tzv. standardi kvaliteta životne sredine u površinskim vodama. Tu se nalazi čitav niz različitih jedinjenja kao što su: ciklodienski pesticidi, heksahlorna jedinjenja, poliaromatični ugljovodonici, organohlorna jedinjenja itd.

Tabela 4.2. Granične vrednosti za prioritetne i prioritetne hazardne supstance u površinskim vodama - standardi kvaliteta životne sredine za prioritetne i prioritetne hazardne supstance u površinskim vodama (Uredba o graničnim vrednostima prioritetnih i prioritetnih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovima za njihovo dostizanje, 2011)

Ime prioritetne supstance (PS)	Numerička identifikacija (CAS No.)	Prioritetne hazardne supstance (PHS)	Prosečna godišnja koncentracija (PGK) [µg/L]	Maksimalno dozvoljena koncentracija (MDK) [µg/L]
Atrazin	1912-24-9		0,6	2,0
Benzen	71-43-2		10	50
Kadmijum i njegova jedinjenja (u zavisnosti od klase tvrdoće vode) ¹	7440-43-9	X	≤0,08 (klasa 1) 0,08 (klasa 2) 0,09 (klasa 3) 0,15 (klasa 4) 0,25 (klasa 5)	≤0,45 (klasa 1) 0,45 (klasa 2) 0,6 (klasa 3) 0,9 (klasa 4) 1,5 (klasa 5)
Ugljen-tetrahlorid	56-23-5		12	/
Ciklodienski pesticidi: Aldrin Dieldrin Endrin Izodrin	309-00-02 60-57-1 72-20-8 465-73-6	X	suma 0,01	/
Ukupni DDT	/		0,025	/
Para-para- DDT	50-29-3		0,01	/
1,2-dihloretan	107-06-2		10	/
Endosulfan	115-29-7	X	0,005	0,01
Heksahlorobenzen	118-74-1	X	0,01	0,05
Heksahlorobutadien	87-68-3	X	0,1	0,6
Heksahlorocikloheksan	608-73-1	X	0,02	0,04
Olovo i njegova jedinjenja	7439-92-1		7,2	/
Živa i njena jedinjenja	7439-97-6	X	0,05	0,07
Naftalen	91-20-3		2,4	/
Nikl i njegova jedinjenja	7440-02-0		20	/
Pentahlorofenol	87-86-5		0,4	1

Osnove ekološkog inženjerstva
Ekološki, hemijski i trofički status površinskih voda

Ime prioritete supstance (PS)	Numerička identifikacija (CAS No.)	Prioritetne hazardne supstance (PHS)	Prosečna godišnja koncentracija (PGK) [µg/L]	Maksimalno dozvoljena koncentracija (MDK) [µg/L]
Poliaromatični ugljovodnici (PAU)	/	X	/	/
Benzo(a)piren	50-32-8	X	0,05	0,1
Benzo(b)fluoranten	205-99-2	X	Suma 0,03	/
Benzo(k)fluoranten	207-08-9	X		
Benzo(g,h,i)perilen	191-24-2	X	Suma 0,002	/
Indeno(1,2,3-cd)piren	193-39-5	X		
Simazin	122-34-9		1	4
Tetrahaloroetilen	127-18-4		10	/
Trihaloroetilen	79-01-6		10	/
Tributikalajna jedinjenja	36643-28-4	X	0,0002	0,0015
Trihalorobenzeni (svi izomeri)	12002-48-1		0,4	/
Trihalorometan	67-66-3		2,5	/
Trifluralin	1582-09-8		0,03	/
Polihalorovani bifenili (PHB)	1336-36-3	X	/	/

¹ Za kadmijum i njegova jedinjenja granične vrednosti zavise od tvrdoće vode koja je klasifikovana u pet kategorija (Klasa 1: <40 mg CaCO₃/L; Klasa 2: 40 do <50 mg CaCO₃/L; Klasa 3: 50 do <100 mg CaCO₃/L; Klasa 4: 100 do <200 mg CaCO₃/L i Klasa 5: ≥200 mg CaCO₃/L).

4.3. Klasifikacija površinskih voda prema mogućnostima njihove upotrebe

Granične vrednosti ostalih zagađujućih supstanci date su u Uredbi o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje (2012). Na osnovu tih graničnih vrednosti površinske vode se svrstavaju u pet klasa prema mogućnostima njihove upotrebe od strane ljudi. U tabeli 4.3. date su vrednosti ostalih zagađujućih materija u površinskim vodama na granici klasa. Pored opštih parametara na ovoj listi nalaze se: elementi kiseoničnog

režima, nutrijenti, salinitet, metali, organske supstance i mikrobiološki pokazatelji. Granice ovih klasa se prema opštim fizičko-hemijskim parametrima poklapaju sa granicama klasa ekološkog statusa, ali je lista supstanci čije se prisustvo ograničava proširena, jer je klasifikacija i nastala prema kriterijumu o mogućnosti upotrebe površinskih voda od strane ljudi. To je logično s obzirom na to da se zaštititi javnog zdravlja daje apsolutini prioritet. Za navedenu klasifikaciju relevantan je i sadržaj prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci u površinskim vodama. Ocenjivana površinska voda svrstava se u onu klasu prema najboljšem rezultatu koji je ostvaren po pojedinačnom parametru. U tabeli 4.4. dati su kriterijumi za određivanje klase površinskih voda prema sadržaju prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci.

Tabela 4.3. Granične vrednosti ostalih zagađujućih materija u površinskim vodama TIP2 (Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje, 2012)

Parametar	Jedinica mere	Granične vrednosti				
		Klasa I	Klasa II	Klasa III	Klasa IV	Klasa V
<i>Opšti</i>						
pH		6,5–8,5	6,5–8,5	6,5–8,5	6,5–8,5	<6,5 ili > 8,5
Suspendovane materije	mg/L	25	25	-	-	-
Rastvoreni kiseonik	mgO ₂ /L	8,5	7	5	4	<4
Zasićenost	%					
Epilimnion		90–110	70–90	50–70	30–50	<30
Hipolimnion		70–90	70–50	30–50	10–30	<10
Nestratifikovana voda		70–90	50–70	30–50	10–30	<10
BPK ₅	mgO ₂ /L	1,5–2,5	4–5	7	25	>25
HPK (K ₂ Cr ₂ O ₇)	mgO ₂ /L	10	15	30	125	>125
HPK (KMnO ₄)	mgO ₂ /L	5	10	20	50	>50
Ukupni organski ugljenik	mg/L	2	5	15	50	>50
<i>Nutrijenti</i>						
Ukupan azot	mg N/L	1	2	8	15	>15
Nitrati	mg N/L	1,5	3	6	15	>15
Nitriti	mg N/L	0,01	0,03	0,12	0,3	>0,3
Amonijum-jon	mg N/L	0,05	0,1	0,6	1,5	>1,5
Nejonizovani amonijak (NH ₃)	mg/L	0,005	0,025	-	-	-
Ukupan fosfor	mg P/L	0,05	0,1	0,4	1	>1
Ortofosfati	mg P/L	0,02	0,05	0,2	0,5	>0,5
<i>Salinitet</i>						
Hloridi	mg/L	50	100	50	250	>250

Osnove ekološkog inženjerstva
Ekološki, hemijski i trofički status površinskih voda

Parametar	Jedinica mere	Granične vrednosti				
		Klasa I	Klasa II	Klasa III	Klasa IV	Klasa V
Ukupni zaostali hlor	mg/L	0,005	0,005	-	-	-
Sulfati	mg/L	50	100	200	300	>300
Ukupna mineralizacija	mg/L	>1.000	1.000	13.000	15.000	>1.500
Elektroprovodljivost	mS/cm	>1.000	1.000	1.500	3.000	>3.000
Metali						
Arsen	µg/L	<5	10	50	100	>100
Bor	µg/L	300	1.000	1.000	2.500	>2.500
Bakar	µg/L	5; T=10 22; T=50 40; T=100 112; T=300	5; T=10 22; T=50 40; T=100 112; T=300	500	1.000	>1.000
Cink	µg/L	30; T=10 200; T=50 300; T=100 500; T=300	300; T=10 700; T=50 1.000; T=100 2.000; T=300	2.000	5.000	>5000
Hrom (ukupni)	µg/L	25	50	100	250	>250
Gvožđe (ukupno)	µg/L	200	500	1.000	2.000	>2.000
Mangan (ukupni)	µg/L	50	100	300	1.000	>1000
Organske supstance						
Fenolna jedinjenja	µg/L	<1	1	20	50	>50
Naftni ugljovodonici		Ne smeju biti prisutni u vodi tako da formiraju vidljiv film				
Površinski jon aktivne supstance	µg/L	100	200	300	500	>500
Adsorbujući organski halogen	µg/L	10	50	100	250	>250

Mikrobiološki parametri						
Fekalni koliformi	cfu/100 mL	100	1.000	10.000	100.000	>100.000
Ukupni koliformi	cfu/100 mL	500	10.000	100.000	1.000.000	>1.000.000
Crevne enterokoke	cfu/100 mL	200	400	4.000	40.000	>40.000
Broj aerobnih heterotrofa	cfu/100 mL	500	10.000	100.000	750.000	>750.000

T – tvrdoća vode (mg/L CaCO₃)

Tabela 4.4. Primena graničnih vrednosti (standarda životne sredine) prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci za utvrđivanje klase površinske vode (Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje, 2012)

Klasa	Sadržaj prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci u površinskim vodama
I	U toku godišnjeg ispitivanja izmerena vrednost ne sme da prekorači prosečnu godišnju koncentraciju, PGK
II	Izmerena vrednost je manja ili jednaka PGK
III i IV	Izmerena vrednost je veća od PGK i manja ili jednaka maksimalnoj dozvoljenoj koncentraciji, MDK
V	Izmerena vrednost je veća od MDK

4.3.1. Opis klasa površinskih voda

U ovom delu teksta dat je opis klasa površinskih voda prema mogućnostima njihove upotrebe za sledeće svrhe: rekreacija na vodi, navodnjavanja, vodosnabdevanja, u industriji itd. Prethodno je napomenuto da ovih pet klasa odgovaraju klasama ekološkog statusa, s tim što je lista parametara proširena dodatnim zagađujućim supstancama, čije se prisustvo ograničava u površinskim vodama zbog mogućnosti da ugroze zdravlje ljudi.

Prema graničnim vrednostima opštih parametara:

- *Klasa I* odgovara odličnom ekološkom statusu. Površinske vode Klase I mogu se koristiti u sledeće svrhe: za snabdevanje vodom za piće uz

prethodni tretman filtracijom i dezinfekcijom, za kupanje i rekreaciju, navodnjavanje, industrijsku upotrebu (procesne i rashladne vode).

- *Klasa II* odgovara dobrom ekološkom statusu ili potencijalu. Površinske vode Klase II mogu se koristiti u iste svrhe kao i površinske vode Klase I.
- *Klasa III* odgovara umerenom ekološkom statusu ili potencijalu. Površinske vode Klase III mogu se koristiti u sledeće svrhe: za snabdevanje vodom za piće uz prethodni tretman koagulacijom, flokulacijom, filtracijom i dezinfekcijom, za kupanje i rekreaciju, navodnjavanje, industrijsku upotrebu (procesne i rashladne vode).
- *Klasa IV* odgovara slabom ekološkom statusu ili potencijalu. Površinske vode Klase IV mogu se koristiti u sledeće svrhe: za snabdevanje vodom za piće uz unapređenje procesa prečišćavanja, za navodnjavanje, industrijsku upotrebu (procesne i rashladne vode).
- Opis *Klase V* odgovara lošem ekološkom statusu ili potencijalu. Površinske vode koje pripadaju ovoj klasi ne mogu se koristiti ni u jednu svrhu.

4.4. Trofički status površinskih voda

Trofički status površinskih voda predstavlja meru kojom se određuje u kom stepenu je neko vodno telo stajace površinske vode zahvaćeno eutrofikacijom. Iako je indeks trofičkog statusa (*Trophic State Index – TSI*) samo jedan od parametara za određivanje ekološkog statusa prirodnih jezera i ekološkog potencijala značajno izmenjenih i veštačkih vodnih tela, ovom pokazatelju će se posvetiti nešto više pažnje, jer je široko rasprostranjen u literaturi i usvojen u praksi širom sveta.

U limnologiji, nauci o jezerima, u upotrebi je definicija da je trofički status mera za *produktivnost jezera*, koja predstavlja njegovu sposobnost da podrži život vodene flore i faune. Na samom početku vodenog lanca ishrane nalaze se mikroskopski sitne alge koje sačinjavaju populaciju fitoplanktona i više biljke, koje sačinjavaju populaciju makrofitu. Ove dve populacije zajedno predstavljaju primarne proizvođače, s obzirom na to da poseduju pigment hlorofil *a*, pa imaju sposobnost da sintetišu organsku materiju u procesu fotosinteze. U prisustvu sunčeve svetlosti, makroelemenata (jedinjenja azota i fosfora) i mikroelementata (cink, magnezijum, kalijum itd.), primarni

proizvođači iz neorganske materije sintetišu organsku materiju. Fitoplanktonom se hrane mikroskopski sitni, do okom vidljivi organizmi (uglavnom račići), koji su predstavnici zajednice zooplanktona i planktivorne vrste riba, kakav je npr. tolstolobik. Zooplanktonom se hrane sitne ribe i riblja mlađ. Krupnije ribe grabljivice hrane se sitnom ribom. Lanac ishrane zatvaraju bakterije i organizmi bentosa (jezerskog dna), koji se hrane neživom organskom materijom. To je pojednostavljeni prikaz lanca ishrane, opisan dominantnim članovima.

Produktivnost jezera se meri stepenom rasta primarnih proizvođača u prisustvu dostupnih nutrijenata. Visoko produktivna jezera imaju velike količine azotnih i fosfornih jedinjenja i u skladu sa tim imaju veliku biomasu primarnih proizvođača. Njihova velika biomasa nije poželjna, jer se veoma teško uravnotežava sa biomasom ostalih elemenata u lancu ishrane. Ovo je jasno, s obzirom na to da se alge i makrofitne mnogo brže razmnožavaju i uvećavaju biomasu od npr. riba i rakova. Taj „višak“ primarnih proizvođača, koji ne biva konzumiran u lancu ishrane, na kraju vegetativnog perioda, postaje neživa ogranska materija koja počinje da se raspada i troši rastvoreni kiseonik u procesu mineralizacije. Tada dolazi do promena organoleptičkih osobina vode, pojave anoksičnih zona u blizini dna, smanjenja prozračnosti i izmena u strukturi i brojnosti biološke zajednice. Takva jezera su *eutrofna*. Niskoproduktivna jezera imaju male količine nutrijenata i malu biomasu primarnih proizvođača, pa se nazivaju *oligotrofna jezera*. Voda im je prozirna i bogata kiseonikom, a sediment sadrži uglavnom materije neorganskog porekla. Na prelazu iz oligotrofnih u eutrofne nalaze se *mezotrofna jezera*.

Usled postepenog povećanja primarne produkcije svako jezero teži da postane močvara, zatim bara i na kraju livada. U prirodnim uslovima ovaj proces može da traje hiljadama godina (Chapra, 1997). Ipak, neka jezera ne povećavaju primarnu produkciju još od ledenog doba. Jezero Tahoe u Severnoj Americi ima malu produktivnost već milionima godina (Davis i Masten, 2008). Antropogeni uticaj, koji se ogleda u seči šuma, urbanizaciji sliva, primeni agrotehničkih mera i produkciji otpadnih voda, dovodi do ubrzanog zasipanja jezera i akumulacija nanosom koji dospeva sa sliva. Dolazi do povećanog unosa jedinjenja azota i fosfora, koja predstavljaju neophodne makroelemente za rast biomase primarnih proizvođača. Na taj način se prirodna eutrofikacija višestruko ubrzava, pa se tada govori o

kulturnoj eutrofikaciji (Henderson-Sellers, 1984). U literaturi se za ubrzanu eutrofikaciju može sresti i naziv *eutrofizacija*.

4.4.1. Indeks trofičkog statusa – Karlsonov indeks trofičnosti

Kao što je već rečeno, indeks trofičkog statusa je mera produktivnosti jezera. Postoji nekoliko formulacija indeksa trofičkog statusa, ali je najviše korišćena ona koju je dao Karlson (Carlson, 1977). Pretpostavlja se da je produktivnost jezera direktno povezana sa količinom hlorofila *a* (eng. *Chlorophyll a – Chl*), količinom ukupnog fosfora (eng. *Total Phosphorus – TP*) i optičkom prozračnošću vode (eng. *Secchi Depth – SD*). Koncentracija hlorofila *a* je direktna mera biomase primarnih proizvođača – algi. U slatkovodnim vodenim ekosistemima najčešće je fosfor Liebigov element u minimumu (eng. *Liebig's law of the minimum*). To znači da rast primarnih proizvođača direktno zavisi od raspoloživih količina fosfora. Fosfor je deficitaran hemijski element, ima ga jako malo u Zemljinoj kori i u vodenoj sredini. Čak i da su svi ostali preduslovi ispunjeni, primarni proizvođači neće uvećavati biomasu ukoliko su zalihe fosfora ograničene ili nedostupne. Eutrofna jezera imaju veliku mutnoću koja najčešće potiče od prisustva algi i shodno tome malu prozračnost. Prozračnost se meri dubinom na kojoj iz vidnog polja posmatrača iščezava crno-beli disk, tzv. seki disk (eng. *Secchi disk*) prečnika 20 centimetara (slika 4.1.).

Seki disk se uranja u vodu između 10 i 14 časova, u senci (tako da nema refleksije sunčevih zraka o vodeno ogledalo). Na kalibrisanom užetu beleži se dubina na kojoj disk prestaje da se vidi. Postoji i pristup prema kome se disk uroni ispod dubine do koje je vidljiv, pa se potom izvlači i beleži se dubina na kojoj se on pojavljuje. Dubina iščezavanja iz vidnog polja i dubina ponovnog pojavljivanja seki diska se po pravilu razlikuju, pa se može uzeti i njihova srednja vrednost.



Slika 4.1. Seki disk za merenje prozračnosti vode. Disk ima prečnik od 20 centimetara, uranja se u vodu, i na kalibrisanom užetu se beleži dubina na kojoj on izčezava iz vidnog polja.

Zbog svega navedenog, indeks trofičkog statusa (*eng. Trophic State Index – TSI*) je definisan preko koncentracije hlorofila *a* (Chl) u $\mu\text{g/L}$, koncentracije ukupnog fosfora (TP) u $\mu\text{g/L}$, i seki dubine (SD) u metrima, i može se izračunati uz pomoć sledećih formula:

$$\text{TSI}(\text{SD}) = 60 - 14,42 \cdot \ln(\text{SD})$$

$$\text{TSI}(\text{Chl}) = 9,81 \cdot \ln(\text{Chl}) + 30,6$$

$$\text{TSI}(\text{TP}) = 14,42 \cdot \ln(\text{TP}) + 4,15$$

Za vrednosti indeksa trofičnosti manje od 40 jezero ili akumulacija imaju oligotrofan status, a za vrednosti indeksa preko 50 su eutrofni. Za vrednosti indeksa između 40 i 50 trofički status odgovara mezotrofnom. Karlson je definisao indeks na taj način da povećanju indeksa za deset odgovara dvostruko smanjivanje prozračnosti vode. Pod uslovom da važi pretpostavka po kojoj je fosfor limitirajući makroelement i da prozračnost zavisi direktno od prisustva algi, vrednost indeksa trofičkog statusa, koja se dobija na osnovu navedena tri parametra, trebalo bi da bude skoro identična. U praksi to nije uvek tako, s obzirom na to da u nekim slučajevima azot može biti limitirajući makroelement, ili pak rast algi može biti limitiran velikim

brojem njihovih predatora. Prozirnost nije uvek posledica prisustva algi, već može da zavisi i od prisustva suspendovanih i obojenih materija. Zbog toga je dato tumačenje vrednosti indeksa trofičkog statusa kada se preko tri parametra dobijaju različite vrednosti TSI (tabela 4.5).

Tabela 4.5. Tumačenje TSI vrednosti, kada odstupaju od uobičajenih (Brown i Simpson, 2001)

TSI odnos	Moguća interpretacija
TSI (CHL) = TSI (SD)	Prozirnost vode zavisi od algi
TSI (CHL) > TSI (SD)	Neke alge, kao npr. Aphanizomenon se grupišu u krupne „pahulje“, pa i pored visoke koncentracije hlorofila <i>a</i> , prozirnost ostaje velika.
TSI (TP) = TSI (SD) > TSI (CHL)	Suspendovane ili obojene materije dominantno utiču na prozirnost vode.
TSI (SD) = TSI (CHL) >= TSI (TP)	Fosfor je limitirajući makroelement
TSI (TP) > TSI (CHL) = TSI (SD)	Rast algi je limitiran azotom ili predatorstvom zooplanktona

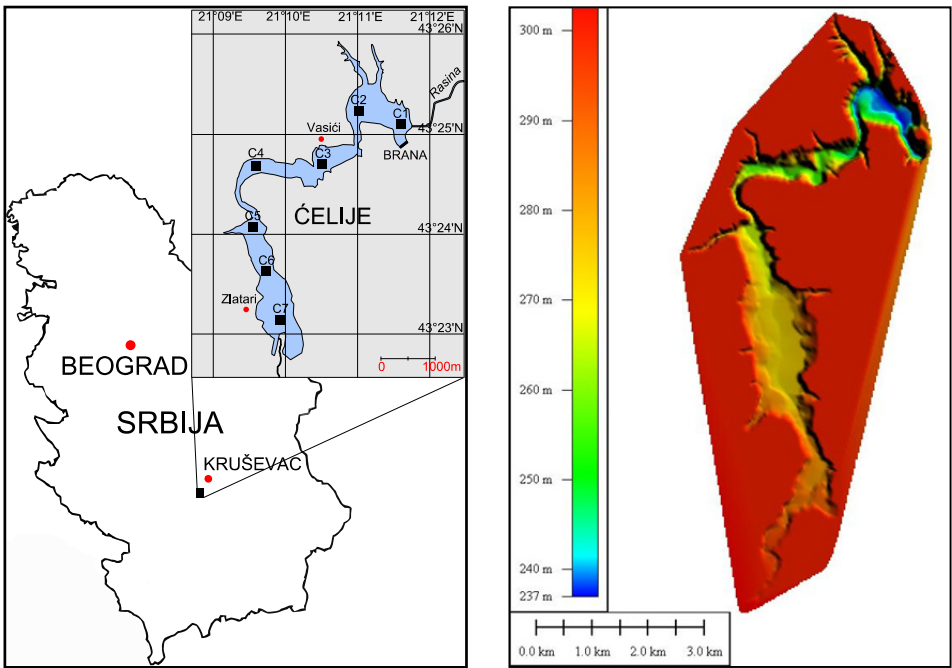
Interesantno je da je najveća prijavljena seki dubina od 41,7 metara izmerena u japanskom jezeru Masyuko. Zbog toga je Karlson pretpostavio najveću moguću teorijsku prozirnost od 64 metra i definisao TSI(SD), tako da ima vrednost nula za tu dubinu.

4.5. Rezultati naučnog projekta

Autori ove knjige najveći deo istraživačkih aktivnosti realizuju u okviru naučnog projekta „Merenje i modeliranje fizičkih, hemijskih, bioloških i morfodinamičkih parametara reka i vodnih akumulacija“, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Predmet istraživanja su akumulacije „Ćelije“ i „Gruža“, koje su glavna izvorišta kruševačkog i kragujevačkog vodovoda. Iz ove dve akumulacije vodom se snabdeva skoro pola miliona stanovnika i lokalna industrija. Pored njihovog nesumnjivog vodoprivrednog značaja u obe ove akumulacije uliva

se neprečišćena otpadna voda, zbog čega postoji neprestan rizik da se kvalitet vode trajno naruši. Počev od septembra 2012. godine jednom mesečno se mere pokazatelji kvaliteta vode u ove dve akumulacije. Uporedo se razvijaju matematički modeli kojima se simuliraju sezonske promene temperature vode i režim rastvorenog kiseonika. U nastavku teksta biće predstavljeni rezultati istraživanja na akumulaciji „Ćelije“.

Akumulacija „Ćelije“ na reci Rasini pijaćom vodom snabdeva stanovništvo i industriju Kruševca i okolnih naselja. Dodatne namene su joj odbrana od poplava, oplemenjivanje malih voda i prihvatanje nanosa čime se štiti đerdapska akumulacija od zasipanja. Akumulacija je formirana 1978. godine pregrađivanjem reke Rasine kamenom nasutom branom, udaljenom oko 25 km uzvodno od grada Kruševca. Akumulacija ima izdužen oblik sa tri uočljiva basena: Vodozahvat (u blizini pregradnog mesta), Vasići (srednji deo akumulacije) i Zlatari (uzvodni deo akumulacije). Akumulacija je vremenom postala popularno izletišta i omiljena ribolovačka destinacija. Dužina akumulacije je 9,4 km, kota normalnog uspora je na nadmorskoj visini od 277 m, a pri koti maksimalnog uspora (284 m n.m.), zapremina akumulacije iznosi 64 miliona m³, maksimalna dubina je 45 m, a maksimalna širina 800 m. Površina sliva do profila brane iznosi 606 km², a višegodišnji srednjemesečni proticaj u profilu brane iznosi 5,84 m³/s. Srednje vreme zadržavanja vode u akumulaciji iznosi oko 80 dana. U akumulaciju „Ćelije“ se ulivaju netretirane komunalne i industrijske otpadne vode iz opština Brus i Blace. Zbog povećanog unosa nutrijenata i organske materije akumulacija pati od ubrzane eutrofikacije, koja ugrožava kvalitet vode i dovodi do hipoksije i anoksije u dubljim slojevima u toku leta (Nenadić i dr., 2013). Analizom sedimenta utvrđen je povišen nivo huminskih kiselina (Jokic i dr., 1995). Mikrobiološkim analizama otkrivena je visoka brojnost bakterioplanktona, koji je indikator sredine bogate nutrijentima (Ćirić i dr., 2012). Poseban problem akumulacije vezuje se za prisustvo toksičnih vrsta modrozelenih algi u poslednjoj deceniji (Grašić i dr., 2004; Svirčev i dr., 2007), kao i za pojavu gvožđa i mangana u povišenim koncentracijama (Nikić, Nikolić i Dokmanović, 2008). Na slici 4.2.a) prikazana je akumulacija „Ćelije“, njena lokacija na mapi Srbije, kao i položaji mernih mesta na kojima se uzorkuje kvalitet vode. Na slici 4.2.b) dat je prikaz batimetrije, odnosno digitalni model reljefa jezerskog dna.



a) Položaj akumulacije i mernih mesta

b) Batimetrija akumulacije Čelije

Slika 4.2. Akumulacija „Čelije“: a) lokacija akumulacije na mapi Srbije i položaji mernih mesta za uzorkovanje kvaliteta vode. Akumulacija se nalazi na reci Rasini, na putu Kruševac – Brus; b) Digitalni model reljefa jezerskog dna, tzv. batimetrija.

4.6. Merenje kvaliteta vode u akumulaciji „Čelije“

Kvalitet vode akumulacije „Čelije“ meri se jednom mesečno na prethodno naznačenim mernim mestima, primenom multiparametarskih sonde. Multiparametarske sonde su uređaji kojima je moguće istovremeno meriti veći broj pokazatelja kvaliteta vode, kao što su:

- dubina vode u metrima;
- temperatura vode u stepenima Celzijusa;
- koncentracija rastvorenog kiseonika u mg/L;
- pH vrednost;
- oksido-redoks potencijal u mV;
- mutnoća vode u NTU;

- elektroprovodljivost u $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- ukupna mineralizacija u g/L ;
- koncentracija hlorofila a u $\mu\text{g}/\text{L}$.

Na slici 4.3. prikazane su multiparametarske sonde koje se koriste za merenje kvaliteta vode. One se sastoje od kućišta sa sensorima, koje je kablom povezano sa ručnim čitačem podataka.



a) HORIBA U54G



b) YSI ProODO

Slika 4.3. Multiparametarske sonde za istovremeno merenje različitih pokazatelja kvaliteta vode u terenskim uslovima

Sonde se iz čamca uranjaju u vodu i kvalitet vode se meri od površine do dna. Rezultat merenja su vertikalni rasporedi pojedinih pokazatelja kvaliteta vode, tzv. vertikalni profili. Na slici 4.4. dat je prikaz sezonskih promena temperature vode i koncentracije rastvorenog kiseonika po dubini na uporednim dijagramima za merno mesto C1 u akumulaciji „Čelije“. Za posmatrani period, od decembra 2012. godine do januara 2014. godine, prikazano je ukupno šest dijagrama. Vertikalna osa predstavlja dubinu, gornja (primarna) horizontalna osa odnosi se na temperaturu vode (T), a donja (sekundarna) horizontalna osa odnosi se na koncentraciju rastvorenog kiseonika (*eng. dissolved oxygen – DO*). Vertikalni profil temperature je označen plavom bojom, dok je vertikalni profil koncentracije rastvorenog kiseonika crven. Temperatura vode i koncentracija rastvorenog kiseonika su po mišljenju mnogih istraživača dva najvažnija abiotička pokazatelja stanja vodenog ekosistema. Svi fizički, hemijski i biohemijski procesi u jezerima i akumulacijama su termodinamički, odnosno zavisni od temperature vode.

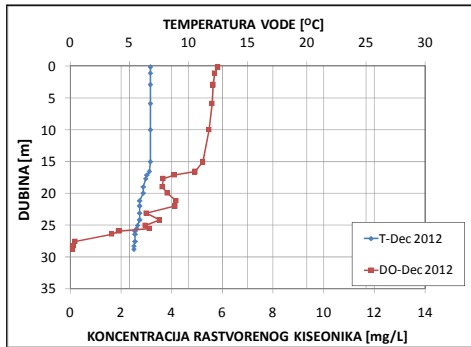
Nedovoljno prisustvo kiseonika rastvorenog u vodi ugrožava opstanak svih živih organizama. Odatle potiče značaj poznavanja kiseoničnog režima u otvorenim vodama. Sadržaj rastvorenog kiseonika u vodi takođe zavisi od temperature vode, s obzirom na to da je prema Henrijevom zakonu (*eng. Henry's Law*) rastvorljivost gasova u vodi zavisna od temperature vode.

Na početku zime (slika 4.4.a) voda u akumulaciji ima nisku temperaturu (između 5 i 7°C). Profil temperature po dubini je približno vertikalnan, što znači da je i gustina vode po dubini konstantna, pa su stvoreni uslovi da i slabi vetrovi mešaju vodenu kolonu od površine do dna. Posledica toga je i da su koncentracije rastvorenog kiseonika relativno uniformne (od 5 do 5.8 mg/L) u prvih 15 metara dubine, kada počinju da opadaju ka dnu. U blizini dna vladaju anoksični uslovi, s obzirom na to da se kiseonik troši na kontaktu voda – sediment u procesima razgradnje organske materije. Treba napomenuti da je u ovom periodu akumulacija bila relativno siromašna sadržajem rastvorenog kiseonika, s obzirom na to da je 2012. godina bila izuzetno sušna, pa nije bilo značajnijeg priliva kiseonika pritokom. Krajem zime i početkom proleća u mesecu martu (slika 4.4.b), voda u akumulaciji se dodatno ohladila i obogatila rastvorenim kiseonikom. U slivu reke Rasine nalaze se delovi planinskih masiva Goča, Željina i Kopaonika, pa se topljenjem snega, povećao priliv sveže vode, bogate kiseonikom. U drugoj polovini juna temperature vode u površinskom sloju su izuzetno visoke (slika 4.4.c). Na samoj površini izmerene su temperature vode od 27°C i one opadaju postepeno prema dnu, gde iznose oko 6°C. U površinskom sloju, epilimnionu, koji je i najosvetljeniji, živi velika populacija fitoplanktona, koji u procesu fotosinteze proizvodi rastvoreni kiseonik. Zbog njihovog prisustva neposredno ispod površine vode koncentracije rastvorenog kiseonika premašuju 13 mg/L, što je velika vrednost za datu temperaturu vode. Uginuli fitoplankton i produkti njegovog metabolizma sačinjavaju tzv. *neživu čestičnu organsku materiju*, koja tone do dubine na kojoj se nalazi i voda koja ima identičnu gustinu. Tu organsku materiju razlažu bakterije trošeći kiseonik. Zbog toga na dubini od oko 7 metara vladaju hipoksični uslovi (koncentracije rastvorenog kiseonika su ispod 2 mg/L). Organska materija razlaže se i na samom dnu što uslovljava da su na najvećim dubinama takođe niske koncentracije rastvorenog kiseonika.

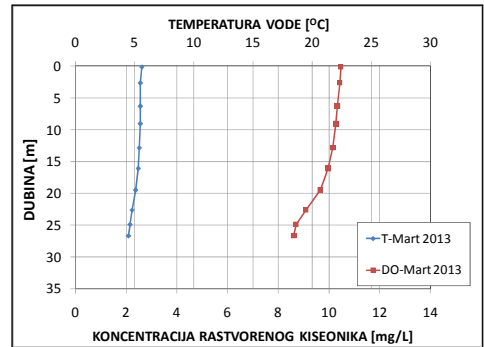
U avgustu, na vertikalnom profilu temperature, jasno je uočljiv nagli pad temperature na dubini od 5 metara, slika 4.4.d. Dubina na kojoj se nalazi

najveći gradijent temperature, predstavlja termoklinu. Ona razdvaja sloj površinske tople vode – epilimnion, od dubljeg sloja sa vodom niže temperature. Razlika u gustini vode površinskog i dubinskog sloja sprečava transfer materije i količine kretanja kroz termoklinu, pa ova dva sloja poprimaju potpuno različite fizičko-hemijske karakteristike. Hipolimnion je odsečen od izvora kiseonika (fotosinteza i reaeracija) na površini, pa se količina rastvorenog kiseonika u hipolimnionu sve više smanjuje. I dalje je prepoznatljiv „trbuh“ na dijagramu rastvorenog kiseonika u hipolimnionu, ali je njegova osnovica uža, a maksimum manji nego onaj u mesecu junu. U intervalima od 7 do 17 i od 27 do 35 metara dubine, vladaju anoksični uslovi, pa u tim zonama vodene kolone ne mogu biti prisutne ribe i drugi organizmi kojima je kiseonik neophodan za obavljanje osnovnih životnih funkcija. U novembru (slika 4.4.e) akumulacija je počela da se meša od površine ka dnu, ušla je u fazu tzv. jesenjeg konvektivnog mešanja. Voda na površini se hladi i postaje teža od vode koja se nalazi ispod nje, pa počinje polako da tone. Ovo mešanje dovodi do izjednačenosti u vrednostima pokazatelja kvaliteta vode. Zbog toga su i temperatura vode i koncentracija rastvorenog kiseonika skoro konstantne do dubine od 15 metara. U ovom periodu godine završen je period intenzivne vegetacije fitoplanktona, a prethodno je i hipolimnion ostao bez rastvorenog kiseonika u procesima aerobne razgradnje organske materije, nitrifikacije i respiracije živih organizama. Zbog toga je u ovom periodu (ako nema značajnog dotoka pritokom) akumulacija siromašna sadržajem rastvorenog kiseonika. Do 15 metara dubine koncentracije rastvorenog kiseonika su niske i iznose oko 4 mg/L, dok na većim dubinama vladaju anaerobni uslovi. U ovom periodu godine ribe kojima je potrebno više kiseonika pomeraju se uzvodno, prema ušću pritoke. Ukoliko sušni period potraje, pritoka neće sa sobom doneti dovoljne količine sveže vode, pa su mogući i pomori ribe. Samo plitak površinski sloj ima nešto više kiseonika, koji difuzijom prodire u vodu iz atmosfere procesom koji se naziva *reaeracija*. U januaru 2014. godine temperatura vode je konstantna po dubini i izosi nešto manje od 6°C. Akumulacija je termički homogena, odnosno destratifikovana. I koncentracije rastvorenog kiseonika su relativno uniformne po dubini. Do dubine od 30 metara koncentracije rastvorenog kiseonika nalaze se u uskom opsegu od 5 do 7 mg/L. Čak i na samom dnu nisu potpuno anaerobni uslovi, jer koncentracija rastvorenog kiseonika iznosi oko 2 mg/L (slika 4.4.f).

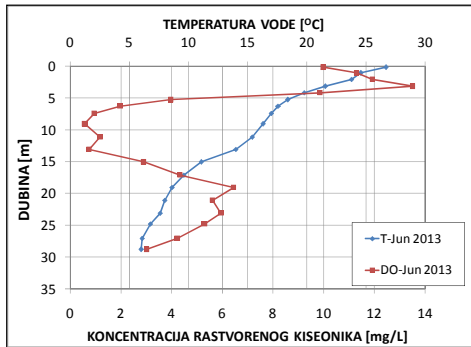
Osnove ekološkog inženjerstva
Ekološki, hemijski i trofički status površinskih voda



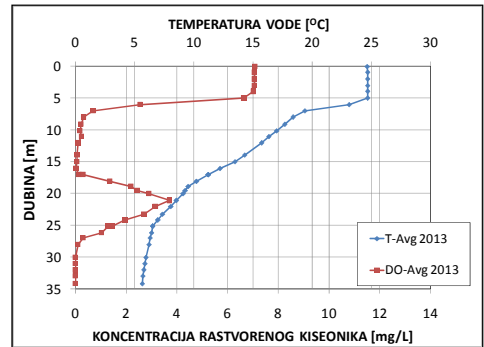
a) Decembar 2012



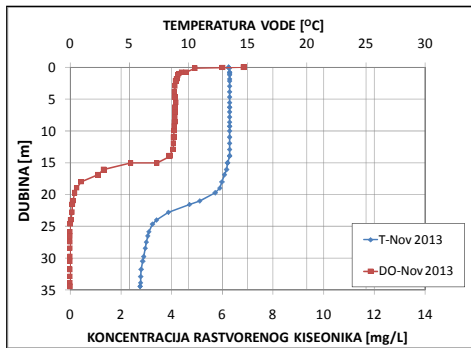
b) Mart 2013



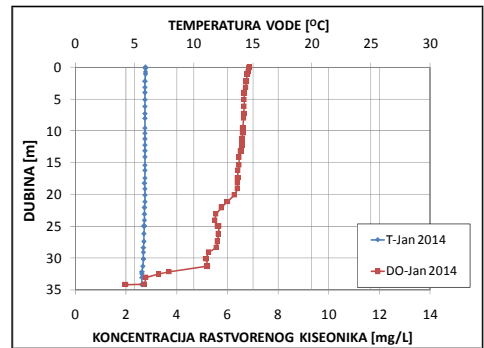
c) Jun 2013



d) Avgust 2013



e) Novembar 2013

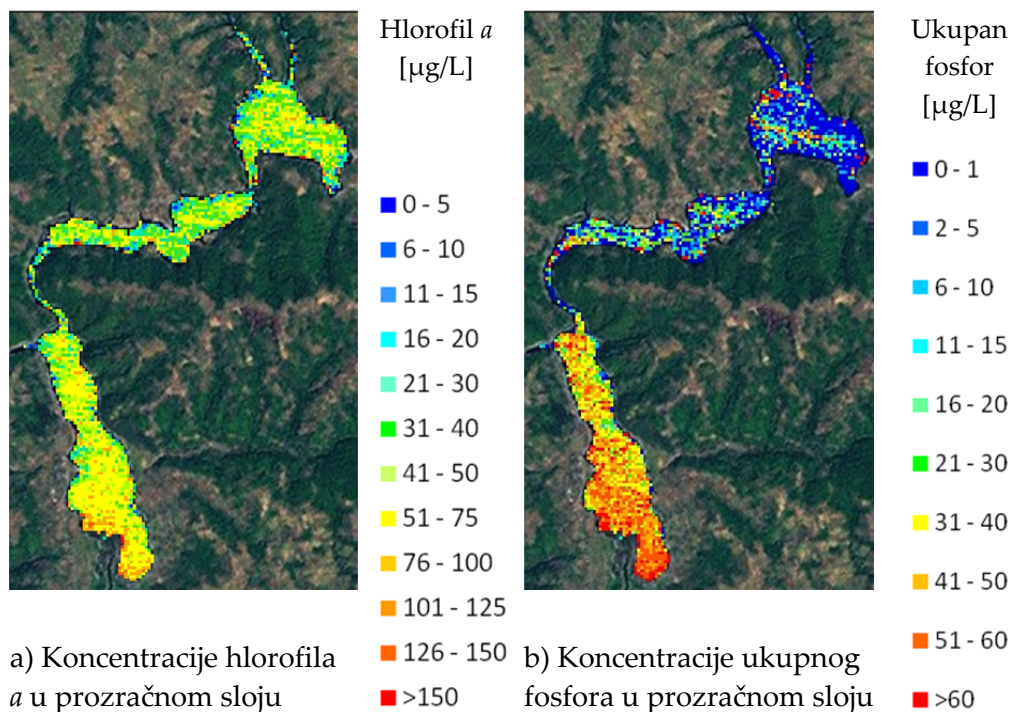


f) Januar 2014

Slika 4.4. Vertikalni profili temperature vode i rastvorenog kiseonika u akumulaciji „Čelije“ u periodu od decembra 2012. do januara 2014. godine

4.7. Daljinska detekcija hlorofila *a* i ukupnog fosfora

Spektralnom analizom satelitskih snimaka moguće je u prozračnom sloju vodene kolone odrediti, osrednjene po dubini tog sloja, koncentracije nekih od osnovnih pokazatelja eutrofikacije, kao što su hlorofil *a* i ukupni fosfor. Kao što je već bilo reči, hlorofil *a* je indikator prisustva primarnih proizvođača, organizama koji obavljaju fotosintezu. Za veliku većinu njih neophodni makroelementi su azotna i fosforna jedinjenja. Analizom snimaka, satelitske misije LANDSAT, moguće je u prozračnom sloju vodene kolone, u rezoluciji 30x30 metara u osnovi, odrediti koncentracije: hlorofila *a*, ukupnog fosfora, fikocijanina (indikator prisustva cijanobakterija, tzv. modrozelenih algi), zatim temperaturu vode i dubinu prozračnog sloja. Na slici 4.5. prikazani su daljinski detektovane koncentracije hlorofila *a* i ukupnog fosfora u akumulaciji „Ćelije“, koje su dobijene obradom satelitskog snimka od 28. avgusta 2011. godine. Na slici 4.5.a različitim bojama kodirani su opsezi koncentracije hlorofila *a*. Preovlađuju pikseli žute boje, koji predstavljaju opseg koncentracije hlorofila od 50 do 75 µg/L. Slika 4.5.b prikazuje koncentracije ukupnog fosfora u prozračnom sloju. Na prvi pogled je očigledno da je podužna raspodela ukupnog fosfora anizotropna, odnosno mnogo više fosfora ima u uzvodnom delu akumulacije. Izvor fosfora su deterdženti, veštačka đubriva, ali fosfor dolazi i spiranjem sa sliva. U uzvodnom delu akumulacije, u basenu Zlatari, preovlađuju pikseli narandžastih nijansi i crvene boje, a oni zajedno predstavljaju delove površinskog sloja sa koncentracijama ukupnog fosfora preko 40 µg/L. Prema Karlsonovoj klasifikaciji, akumulacija se prema ova dva parametra svrstava u eutrofna vodna tela.



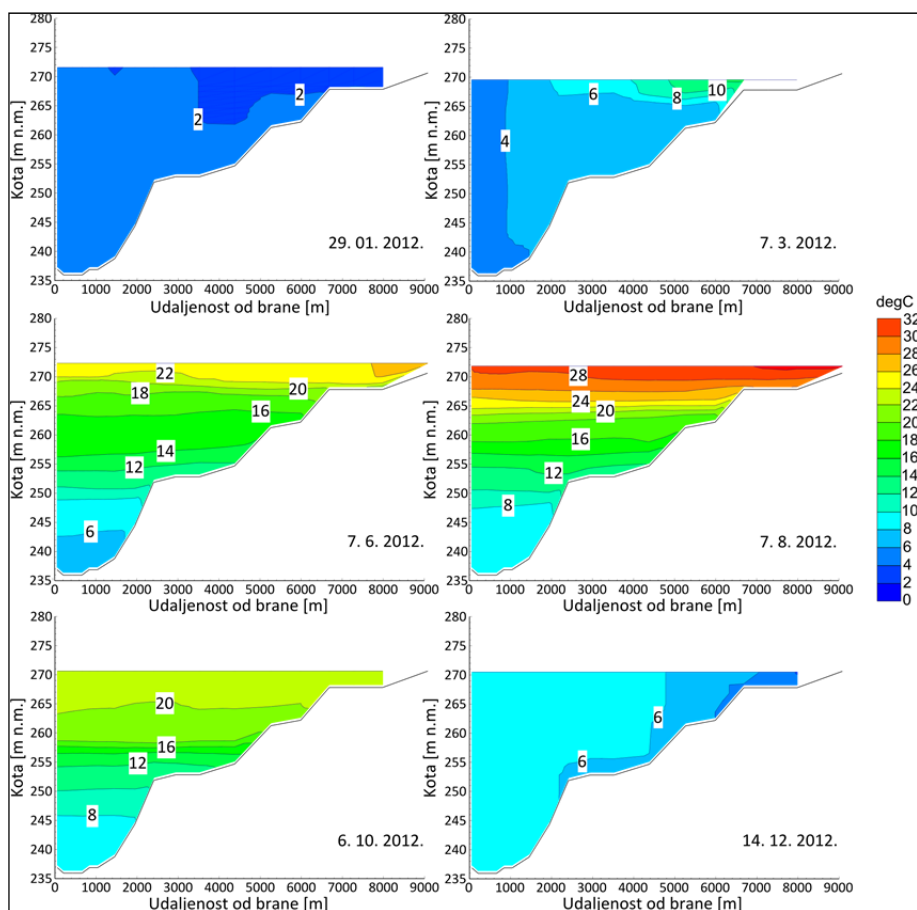
Slika 4.5. Daljinski detektovane koncentracije hlorofila a i ukupnog fosfora u akumulaciji „Čelije“, dobijene su obradom digitalnog snimka satelita LANDSAT, od 28. avgusta 2011. godine.

4.8. Matematičko modeliranje pokazatelja kvaliteta vode

Sezonska dinamika i prostorni raspored pokazatelja kvaliteta vode, simuliraju se primenom matematičkih modela. Na osnovu rezultata modela, mogu se dobiti informacije o kvalitetu vode na mestima u akumulaciji i u periodima kada on nije meren. Vrednosti koje se izmere na terenu ili one koje se daljinski detektuju, zajedno sa hidrometeorološkim podacima, koriste se u procesu kalibracije parametara modela, kao i za definisanje početnih i graničnih uslova. Osnovna svrha matematičkih modela je pomoć u procesu održivog i višenamenskog upravljanja akumulacijom. To znači, da akumulacijom treba upravljati na način koji najmanje ugrožava kvalitet vode u njoj, ali i u vodotoku nizvodno. Na modelu se proveravaju efekti različitih režima rada vodozahvata i temeljnih ispusta, zatim različiti

hidrometeorološki scenariji i vrednuju se njihovi uticaji na promene u pokazateljima kvaliteta vode.

Sezonske promene temperature vode u akumulaciji „Čelije“ simulirane su primenom matematičkog modela CE-Qual-W2. Model je prethodno kalibrisan rezultatima koji su izmereni u toku 2012. godine. Kalibracijom modela njegovi parametri se podešavaju tako da se računate vrednosti što bolje podudaraju sa izmerenim. Na slici 4.6. dat je grafički prikaz rezultata matematičkog modeliranja temperature vode za period januar–decembar 2012. godine. Na horizontalnoj osi predstavljeno je rastojanje od pregradnog mesta mereno u smeru uzvodno, dok se na vertikalnoj osi nalazi nadmorska visina u metrima nad morem (mnm). Različite boje odgovaraju različitim temperaturama vode, kao što je dato u legendi, a što je slično prikazivanju rezultata dobijenih obradom satelitskih snimaka za koncentracije hlorofila *a* i ukupnog fosfora. Tačke sa istim temperaturama povezane su linijama koje se zovu izoterme (ili konturne linije), a ovakav tip dijagrama naziva se *konturni dijagram*. U januaru najveća masa vode u akumulaciji ima temperaturu od 4°C, pri kojoj je gustina vode maksimalna. Uzvodni deo akumulacije izloženiji je spoljnim uticajima zbog velike površine vodnog ogleдалa i male dubine vode, pa ima nešto nižu temperaturu (oko 2°C) od ostatka akumulacije. U martu započinje postepeno zagrevanje akumulacije posredstvom kratkotalasnog solarnog zračenja i dugotalasnog atmosferskog zračenja, pa se uzvodni deo postepeno zagreva, dok je u blizini brane stanje skoro nepromenjeno u odnosu na mesec januar, jer je vodena kolona destratifikovana i vodena masa se nalazi u neprestanom kretanju pod dejstvom vetra. Početak juna vezuje se za pojavu stabilne termičke stratifikacije, pa se primećuje i da su izoterme približno horizontalne. U avgustu se jasno uočava površinski sloj tople vode, koja usled manje gustine leži na sloju hladnije i gušće vode. Od avgusta akumulacija postepeno počinje da se hladi, termoklina se spušta ka većoj dubini, ali je stratifikacija prisutna sve do oktobra, kada započinje jesenje konvektivno mešanje. Kao što je već bilo reči, voda na površini postaje hladnija i postepeno tone, a istovremeno toplija i lakša voda iz dubljih slojeva vodene kolone isplivava ka površini. Tako se formira izmešan površinski sloj čija debljina raste, a spoljne temperature se smanjuju. U decembru je akumulacija termički homogena, a uzvodni deo se ponovo najbrže hladi zbog izloženosti atmosferskim uticajima i priliva hladne pritoke.



Slika 4.6. Rezultati matematičkog modeliranja temperature vode u akumulaciji „Čelije“ u 2012. godini

4.9. Literatura

Carlson, R.E. (1977). *A trophic state index for lakes*. Limnology and Oceanography. 22:2 361-369.

Chapra, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling*. New York, USA: McGraw-Hill.

Henderson-Sellers, B. (1984). *Engineering limnology*. Boston, MA, USA: Pitman Advanced Pub. Program.

Davis, M. L., i Masten, S. J. (2009). *Principles of environmental engineering and science* (2nd ed.). New York, NY, USA: McGraw-Hill.

Brown, T., i Simpson, J. (2001). Managing Phosphorus Inputs to Urban Lakes I. Determining the Trophic State of Your Lake. *Watershed Protection Techniques*, 3(4), 771-781.

Nenadić, N., Kostić, D., Jaćimović, N., Naunović, Z., i Ivetić, M. (2013). Modeliranje sezonskih promena temperature vode akumulacije Čelije. *Voda i sanitarna tehnika*, 43(6), 31-40.

Jokic, A., Srejac, R., Pfendt, P. A., i Zakrzewska, J. (1995). Characterization of lake sediment humic acids from the Čelije Lake system near Kruševac (Central Serbia) by ¹³C and ¹H solution NMR and ¹³CPMAS NMR. *Water, air and soil pollution*, 84(1-2), 159-173.

Ćirić, S., Milošević, B., Spasić, Z., Knežević, J., i Anđelković, S. (2012). Seasonal and Vertical Distributions of Bacterioplankton in Lake Čelije, Serbia. *Proceedings of the Fifth International Scientific Conference on Water, Climate and Environment BALWOIS 2012*, Ohrid, FYR of Macedonia.

Grašić, S., Vasiljević, B., Marković, B., Nikolić, G., Tadić, S. i Jovanović, B. (2004). Cijanobakterijsko cvetanje jezera Čelije. *Zbornik 33. godišnje konferencije o aktuelnim problemima korišćenja i zaštite voda - Voda 2004*, Borsko jezero, Srbija.

Nikić, Z., Nikolić, J., i Dokmanović, P. (2008). Regional geology and water quality in some storage lakes of central Serbia. *Proceeding of 24th Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management*, Bled, Slovenia.

Svirčev, Z., Simeunović, J., Subakov-Simić, G., Krstić, S., i Vidović, M. (2007). Freshwater cyanobacterial blooms and cyanotoxin production in Serbia in the past 25 years. *Geographica Pannonica*, 11, 32-38.

Zakonodavstvo

Zakon o vodama (2010). Službeni glasnik Republike Srbije br. 30/10.

Pravilniko o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametrima hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda (2011). Službeni glasnik Republike Srbije br. 74/11.

Uredba o graničnim vrednostima prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovi za njihovo dostizanje (2011). Službeni glasnik Republike Srbije br. 35/11.

Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje (2012). Službeni glasnik Republike Srbije br. 50/12.

Osnove ekološkog inženjerstva
Ekološki, hemijski i trofički status površinskih voda

5 Podzemne vode

Podzemna voda, kao resurs koristi se za potrebe svakodnevnog života od najranijih vremena. Sasvim je sigurno da dugo nije postojalo razumevanje i svest o tome kako voda dospeva pod zemlju i na osnovu kojih zakonitosti se strujanje podzemne vode može opisati. Naime, smatra se da su prva namenska istraživanja i fizičke interpretacije zakonitosti strujanja vode u poroznoj sredini započeta tek polovinom 19. veka. Ipak, to nije bila prepreka da se i pre toga razviju efikasni sistemi da se podzemna voda transportuje na površinu i koristi.

O značaju podzemne vode u vodnom bilansu dovoljno govori činjenica da se od ukupne količine raspoložive slatke vode na Zemlji, čak 97% nalazi u rezervoarima podzemne vode, dok se preostala 3% uglavnom odnosi na reke i jezera (UNESCO, 2006). U mnogim zemljama podzemna voda je osnovni izvor vodosnabdevanja. Smatra se da preko 75% stanovništva u Evropi koristi podzemnu vodu. U Srbiji je taj udeo takođe preko 80%, pri čemu se u Vojvodini, na primer, podzemna voda gotovo isključivo koristi za vodosnabdevanje stanovništva i industrije. Na tom području se u proseku crpi 6,8 m³/s podzemne vode (Vodoprivredna osnova Rep. Srbije, 2002). Istovremeno, merenja nivoa podzemnih voda ukazuju da navedena eksploatacija predstavlja „rudarenje“ ovog resursa, odnosno, predstavlja veću količinu u odnosu na prirodnu moć prihranjivanja rezervi podzemne vode na ovom području. To se ogleda kroz trajno sniženje nivoa podzemnih voda, i do 35 m u odnosu na prirodne nivoe.

Prema Vodoprivrednoj osnovi Republike Srbije, potencijalni kapacitet podzemnih voda za vodosnabdevanje u Srbiji iznosi oko 67 m³/s, odnosno 108 m³/s zajedno sa veštačkim prihranjivanjem, pri čemu se trenutno koristi oko 23 m³/s. Ono što daje prednost podzemnoj vodi u odnosu na druge izvore vodosnabdevanja je njena dostupnost, kvalitet vode koji često ne zahteva nikakav ili ograničen dodatni tretman da bi mogla da se koristi za potrebe stanovništva, temperatura vode koja je povoljna i uniformna u toku cele godine, kao i povoljniji uslovi zaštite izvorišta. Značajna uloga podzemne vode kao resursa zahteva posebnu pažnju kada je reč o gazdovanju podzemnim vodama, kao i zaštiti kvaliteta podzemnih voda. Tome u prilog ide i činjenica da je nakon eventualnog zagađenja, izuzetno

teško vratiti kvalitet podzemne vode u prvobitno stanje. Radi se o procesu koji može da traje desetinama, pa i stotinama godina.

Podzemna voda se već dugo ne posmatra samo kao resurs. Ona predstavlja značajan element hidrološkog ciklusa kruženja vode u prirodi, pa time predstavlja i značajan ekološki faktor. Takođe, praktično svi inženjerski izazovi vezani za geotehničke fenomene imaju veze sa strujanjem podzemne vode, ili su direktna posledica tog strujanja. Kao primeri navode se problemi nosivosti i sleganja terena, stabilnosti kosina, zemljotresa i sl.

5.1. Karakteristike porozne sredine i pojava podzemne vode

Praktično svi površinski slojevi Zemljine kore, bez obzira na to kako su nastali ili koliko su stari, sadrže određen procenat šupljina, odnosno pora. Te pore mogu biti delimično ili potpuno ispunjene vodom, kada se govori da je porozna sredina zasićena.

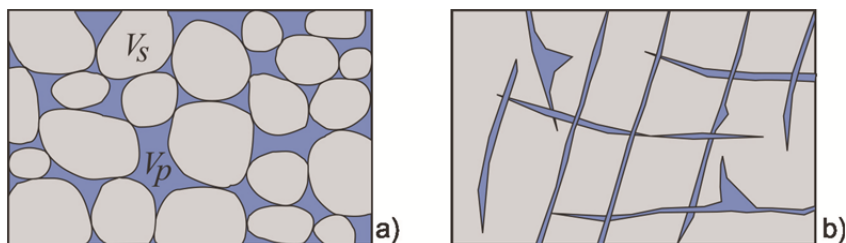
Iako se pod terminom *podzemna voda* podrazumeva sva voda koja se nalazi ispod površine zemlje, sa stanovišta korišćenja podzemnih voda uglavnom se podrazumevaju takve geološke formacije čije su pore potpuno ispunjene vodom (zasićene) i koje su tako povezane da omogućavaju značajnije kretanje podzemne vode. Takva geološka formacija se naziva *izdan* ili *akvifer*. Ovde je važno je istaći razliku između pojma *poroznost*, koji označava prisustvo pora u nekoj stenskoj masi, i pojma *vodopropusnost*, koji označava karakteristiku stenskih masa da mogu da propuste vodu. Naime, velika poroznost ne podrazumeva i veliku vodopropusnost, kao što je to slučaj kod zemljišta sa visokim sadržajem glinovitog materijala. Ukratko, da bi stena bila vodopropusna, potrebno je da pore budu i dovoljno povezane, pri čemu u kvalitativnom smislu veća vodopropusnost podrazumeva intenzivnija strujanja pri istim uslovima.

Razlikuju se dve osnovne vrste poroznosti:

- međuzrnska (intergranularna) poroznost, karakteristična za nevezane ili slabo vezane sedimentne stene, kao što su peskovi ili šljunkovi;
- pukotinska poroznost, kod koje su pore obično male u jednom pravcu, a izražene u druga dva pravca i koja se javlja kod čvrstih i koherentnih tipova stena.

Neke stene mogu da sadrže oba navedena oblika poroznosti i tada se govori o dvojnjoj poroznosti. Poseban oblik poroznosti čine pojave koje se

javljaju u karbonatnim stenama (dolomiti, krečnjaci) ili sulfatnim stenama, gde voda vremenom rastvara stensku masu i formira provodnike i forme izuzetno velikih dimenzija u vidu različitih karstnih fenomena.



Slika 5.1. Dva tipa poroznosti: a) intergranularna i b) pukotinska poroznost

Ako ukupnu zapreminu uzorka porozne sredine (V) čini zbir zapremine pora (V_p) i zapremine čvrste faze (zrna tla – V_s), poroznost (n) se kvantifikuje odnosom zapremine pora po jedinici ukupne zapremine uzorka:

$$n = \frac{V_p}{V}$$

U zavisnosti od krupnoće i zastupljenosti pojedinih frakcija, poroznost kod šljunka iznosi između 25 i 40%, kod peska u intervalu 25-50%, dok kod glina varira između 40 i 70%.

Sadržaj vlage predstavlja odnos zapremine vode u odnosu na zapreminu uzorka:

$$\theta = \frac{V_v}{V}$$

Maksimalna vrednost sadržaja vlage u tom slučaju ne može imati veću vrednost od poroznosti:

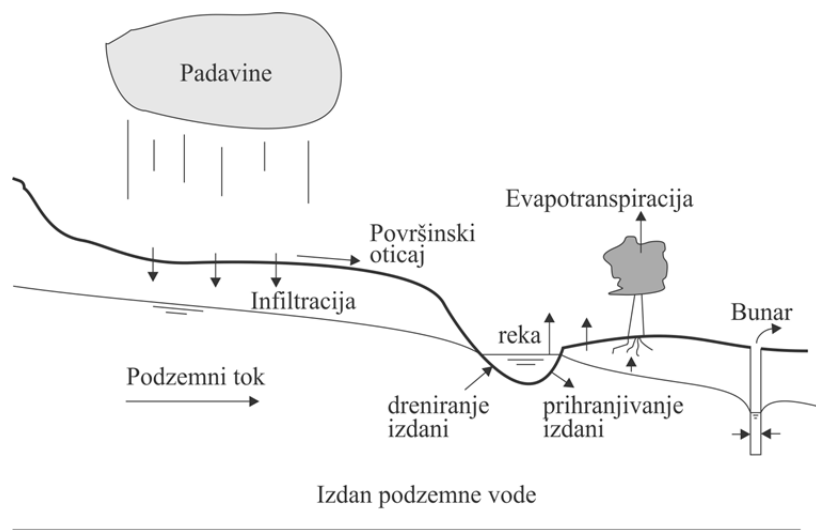
$$0 \leq \theta \leq n$$

Sadržaj vlage se može izraziti i preko zasićenosti, što predstavlja odnos zapremine vode i zapremine pora u uzorku:

$$S = \frac{V_v}{V_p}$$

Zasićenost može da ima vrednost između nula i jedan ($0 \leq S \leq 1$).

Kao što je već navedeno, podzemna voda predstavlja deo hidrološkog ciklusa neprestanog kretanja vode između okeana, atmosfere i zemljišta. Na zemlju voda dospeva u vidu padavina, gde se delom odmah formira površinski oticaj (npr. rečni tok), delom se voda zadrži na površini terena pre nego što se vrati u atmosferu putem evapotranspiracije (isparavanja i transpiracije biljaka), a delom infiltrira pod zemlju usled dejstva gravitacije i kapilarnih sila. Tu se voda akumulira i u dugotrajnom procesu ispunjava raspoloživi porni prostor. U poroznoj sredini se takođe formira tok pod uticajem gravitacije, a koji u zavisnosti od hidrogeoloških uslova i karakteristika zemljišta može da prihranjuje površinske tokove. Upravo je i u tome izuzetan značaj podzemnih voda kao elementa životne sredine, kada u sušnim periodima praktično predstavljaju jedini izvor vode za površinske tokove.



Slika 5.2. Shematski prikaz podzemne vode kao elementa hidrološkog ciklusa

5.2. Raspored podzemne vode

Ukoliko se posmatra raspored podzemne vode po vertikalnoj osi, mogu se uočiti dve osnovne zone: zasićena zona, gde su pore zemljišta potpuno ispunjene vodom, i nezasićena zona koja se nalazi iznad zone

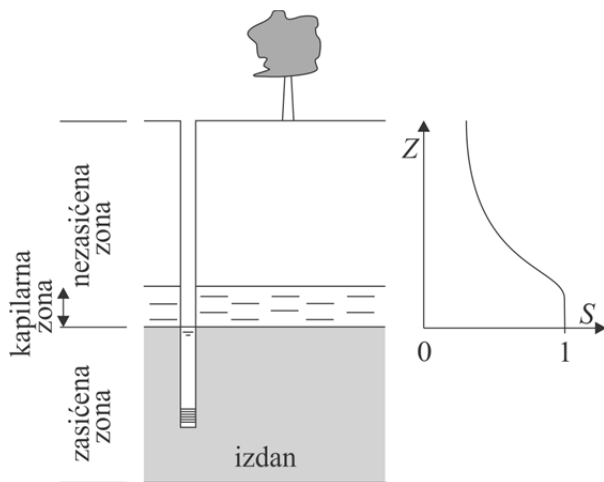
zasićenja i gde su pore zemljišta samo delimično ispunjene vodom. Ne postoji oštra granica između ove dve zone, već je promena sadržaja vode u tlu kontinualna. Usled efekta površinskog napona, postoji i kapilarna zona koja, u zavisnosti od strukture zemljišta, može da varira od nekoliko centimetara (šljunak) do više od deset metara (gline).

Za izdan se kaže da je pod pritiskom, ukoliko je sa donje i gornje strane ograničena slabije propusnim slojem (akvitard), dok je *izdan sa slobodnim nivoom* ona koja sa gornje strane nije ograničena, odnosno gornja granica izdani odgovara pijezometarskom nivou. Za izdan pod pritiskom moguće je da se pijezometarski nivo nalazi iznad površine terena, kada se govori o *artesknoj izdani*. Pridev *arteska* potiče od imena provincije u južnoj Francuskoj – Artoa (Artois), gde su početkom 12. veka izrađeni prvi bunari koji su davali vodu na površini terena.

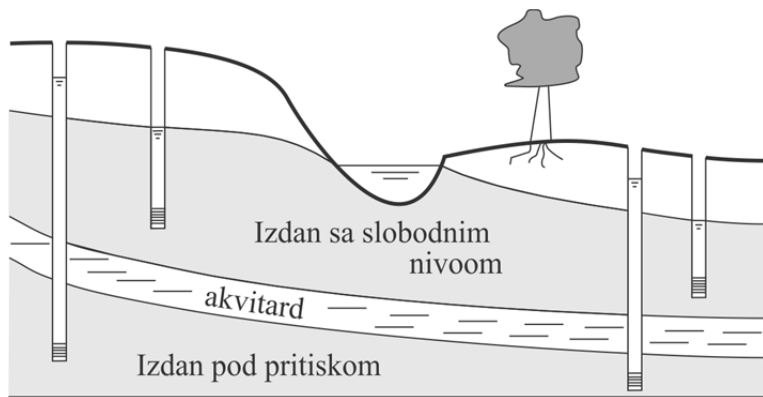
U slučaju da se nivo izdani pod pritiskom nalazi ispod površine terena, govori se o *subartesknoj izdani*.

5.3. Strujanje podzemne vode

Uslovi strujanja i mirovanja podzemne vode podležu istim fizičkim zakonitostima kao i za bilo koju drugu materiju na zemlji. Razlika se odnosi na konturne uslove koje nameće porozna sredina, a koju je teško ili nemoguće matematički opisati u mikro-razmeri. Zbog toga se kod strujanja podzemnih voda primenjuje makro-pristup, gde se sve promenljive od interesa na odgovarajući način osrednjavaju po prostoru i na taj način postaju kontinualne veličine na koje je moguće primeniti tradicionalne matematičke alate (npr. diferencijalni račun).



Slika 5.3. Shematski prikaz rasporeda podzemne vode i dijagram zasićenosti. Treba naglasiti da je zasićenost promenljiva veličina i da zavisi od padavina/infiltracije, evapotranspiracije, promena nivoa podzemne vode, itd.



Slika 5.4. Izdan sa slobodnim nivoom i izdan pod pritiskom razdvojene slabopropusnim slojem (akvitard). S obzirom na to da su nivoi u izdani pod pritiskom viši u odnosu na slobodnu izdan, prihranjivanje gornje izdani se vrši i kroz slabopropusni sloj.

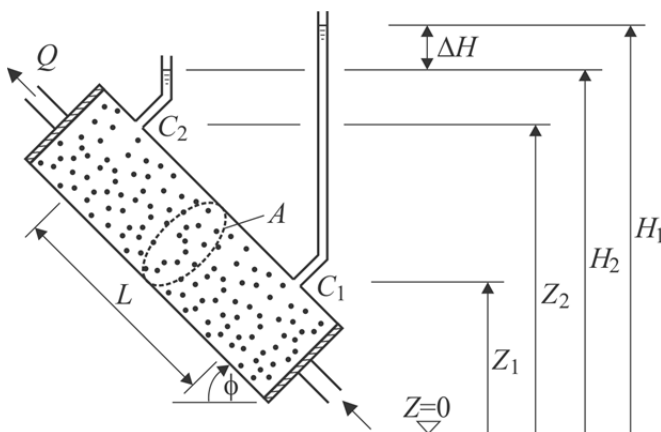
Pionirskim korakom u izučavanju i interpretaciji uslova strujanja vode u poroznoj sredini smatraju se eksperimentalna istraživanja francuskog istraživača Darsija. Zakonitost do koje je Darsi došao kroz rezultate eksperimenata i danas najčešće predstavlja polaznu tačku kod izučavanja i

najsloženijih uslova strujanja fluida (voda, nafta, gas) u poroznoj sredini. Strujanje vode u zasićenoj poroznoj sredini se često naziva *filtracija*.

Posmatra se eksperimentalna instalacija prikazana na slici 5.5, koja se sastoji od uzorka porozne sredine (na primer, peska) koji je smešten u sud cilindričnog oblika čiji poprečni presek ima površinu A . Kroz uzorak se propušta konstantan (ustaljen) protok fluida, u ovom slučaju vode, intenziteta Q izraženog kao protekla zapremina fluida u jedinici vremena. Cilindar je moguće rotirati i tako menjati ugao ϕ u odnosu na horizontalnu ravan. Duž cilindra, u dva preseka (C_1 i C_2) koji se nalaze na položajnim kotama Z_1 i Z_2 , na rastojanju L postavljene su providne cevčice, otvorene sa gornje strane, na kojima je moguće očitati nivo vode u njima (H_1 , odnosno H_2) u odnosu na referentnu ravan $Z=0$.

Variranjem intenziteta protoka kroz instalaciju i smera strujanja fluida moguće je ustanoviti sledeće zakonitosti (za pozitivan protok usvojen je smer od C_1 ka C_2):

- kada je protok pozitivan ($Q > 0$), nivo H_1 je veći od H_2 ($H_1 > H_2$);
- kada je protok negativan ($Q < 0$), nivo H_1 je manji od H_2 ($H_1 < H_2$);
- kada je protok jednak nuli ($Q = 0$), nivo H_1 je jednak nivou H_2 ($H_1 = H_2$).



Slika 5.5. Eksperimentalna instalacija za ispitivanje filtracionih karakteristika porozne sredine

Takođe, variranjem protoka ustanovljeno je da je protok linearno proporcionalan razlici nivoa H_1 i H_2 :

$$Q \sim (H_1 - H_2)$$

Važno je istaći nekoliko osobina strujanja u opisanom sistemu, a koje se lako mogu proveriti izvođenjem eksperimenta:

- za isti material, veći protok odgovara većoj razlici nivoa H_1 i H_2 ;
- nagib instalacije, odnosno ugao ϕ , pri istom protoku nema uticaja na izmerene nivoe H_1 i H_2 ;
- ukoliko bi se cilindar sa uzorkom podužno podelio na dva jednaka dela umetanjem ravne nepropusne ploče duž ose cilindra, tako da oba dela imaju površinu poprečnog preseka jednaku polovini površine A , čime bi i protok u obe polovine cilindra bio jednak $Q/2$, nivoi H_1 i H_2 se ne bi promenili. Ovo upućuje da je zapravo jedinični protok, odnosno protok po jedinici površine poprečnog preseka, veličina koja utiče na čitanja nivoa H_1 i H_2 . Ovako definisan specifičan protok se zove *Darsijeva brzina filtracije* („Darsijeva“ se često izostavlja):

$$v = \frac{Q}{A}$$

- promena rastojanja L , pri istom protoku, linearno utiče na razliku nivoa H_1 i H_2 , pri čemu je koeficijent proporcionalnosti 1. Drugim rečima, odnos $(H_1 - H_2)/L$ je konstantan pri istom protoku, bez obzira na kom rastojanju se nalaze tačke C_1 i C_2 .

Uzimajući u obzir navedene osobine, može se uspostaviti sledeća zakonitost koja se, prema autoru, u stručnoj literaturi naziva *Darsijev zakon*:

$$v = -K \frac{\Delta H}{L}$$

Znak '-' označava da je smer toka (filtracije) u smeru pada nivoa H . Uvedeni koeficijent proporcionalnosti (K) između brzine filtracije i pada nivoa se zove *koeficijent filtracije* i predstavlja meru vodopropusnosti porozne sredine.

Treba istaći da koeficijent filtracije sadrži i uticaj fluida koji struji kroz poroznu sredinu. Naime, i intuitivno je jasno da pri istim uslovima (na primer, pri istoj razlici nivoa ΔH), neće biti ista brzina filtracije za dva fluida različitih viskoznosti. Razumno je očekivati da će kroz isti materijal i pri istoj razlici nivoa, voda imati veću brzinu filtracije u odnosu na naftu.

Prema autoru, navedena zakonitost ne važi za brzine filtracije veće od 10 do 11 cm/s. Objašnjenje granice važenja Darsijevog zakona zahteva analizu koja prevazilazi potrebe ove knjige, pa se ovde neće navoditi. Ovaj uslov nije toliko restriktivan te u najvećem delu inženjerske prakse nije narušen.

Prethodno opisano zahteva objašnjenje merenog nivoa H , koji očigledno ima ključnu ulogu u odnosu na smer i brzinu filtracije podzemne vode. Napisani Darsijev zakon jako podseća na Ohmov zakon za jačinu struje kroz provodnik, gde je otpor provodnika analogan koeficijentu filtracije (obrnuto proporcionalan). Prema analogiji, nivo H predstavlja potencijal vode, a brzina filtracije je proporcionalna razlici potencijala, odnosno naponu. Ovo upućuje da H predstavlja nekakav potencijal fluida u smislu strujanja kroz poroznu sredinu, a iz opisanog eksperimenta može se videti da se taj potencijal troši u pravcu kretanja.

H predstavlja mehaničku energiju po jedinici težine fluida. Tu energiju čini zbir potencijalne i kinetičke energije po jedinici težine fluida:

$$H = \Pi + \frac{v^2}{2g}$$

gde je Π *pijezometarska kota* ili *pijezometarski nivo*, mera potencijalne energije fluida koju čine položajna kota i hidrostatički pritisak.

S obzirom na to da se kod filtracije kroz poroznu sredinu uglavnom radi o veoma malim brzinama, drugi član u gornjem izrazu je obično zanemarljivo mali, zbog čega nivo H odgovara *pijezometarskoj koti* fluida.

Filtracija fluida kroz porni prostor je mehanički proces uz prisustvo i dominantnu ulogu trenja. Zbog toga se mehanička energija fluida nepovratno troši prilikom kretanja/filtracije. Darsijev zakon to opisuje, ali iz jednačine možda nije toliko očigledno: filtracija je uvek usmerena od lokacije sa većim *pijezometarskim nivoom* ka lokaciji sa nižim *pijezometarskim nivoom*.

Darsijev zakon se može generalizovati za bilo koji pravac u proizvoljnom koordinatnom sistemu. Za Dekartov koordinatni sistem ($x_1, x_2,$

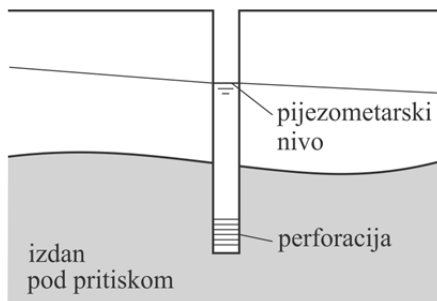
x_3), u diferencijalnom obliku može se napisati za izotropnu poroznu sredinu (sredina u kojoj koeficijent filtracije ima istu vrednost u svim pravcima):

$$v_i = -K \frac{\partial \Pi}{\partial x_i}, i = 1, 2, 3$$

Darsijeva brzina je fiktivna (računska) brzina strujanja podzemne vode. Predstavlja protok podeljen sa ukupnom površinom poprečnog preseka porozne sredine. Imajući u vidu da voda struji samo kroz pore sredine, jasno je da stvarna (efektivna) brzina mora da bude veća od Darsijeve, u zavisnosti od poroznosti sredine:

$$v_{stvarno} = \frac{v}{n}$$

Kako je brzinu vode u poroznoj sredini izuzetno teško meriti direktno, preostaje da se mere pijezometarski nivoi, a da se brzine određuju posredno, na osnovu Darsijevog zakona. Pijezometar je osnovni uređaj za merenje pijezometarskog nivoa podzemne vode, odnosno za osmatranje režima podzemnih voda. Radi se o cevi, najčešće prečnika 50 ili 75 mm, koja se postavlja u bušotinu i koja je perforirana na mestu gde se želi izmeriti pijezometarski nivo (Slika 5.6). Merenjem vrednosti kote nivoa u cevi određen je i pijezometarski nivo, dok je formiranjem mreže pijezometara na nekom području moguće dobiti prostorni raspored pijezometarskog nivoa, a time i sliku strujanja podzemnih voda (strujnu sliku). Pijezometri se takođe koriste za uzorkovanje podzemne vode i ispitivanje njenih mikrobioloških i fizičko-hemijskih karakteristika.



Slika 5.6. Pijezometar i pijezometarski nivo

Porozna sredina se može deliti prema vodopropusnosti, izraženu preko koeficijenta filtracije, na sredinu visoke vodopropusnosti, sredinu srednje vodopropusnosti i praktično vodonepropusnu sredinu. Sredina kod koje koeficijent filtracije ima vrednost veću od $1 \cdot 10^{-5}$ m/s, smatra se sredinom visoke vodopropusnosti (pesak, šljunak). Sredina srednje vodopropusnosti ima vrednost koeficijenta filtracije od $1 \cdot 10^{-5}$ do $1 \cdot 10^{-8}$ m/s, dok se sredine sa koeficijentom filtracije manjim od $1 \cdot 10^{-8}$ m/s mogu smatrati praktično vodonepropusnim (gline i neispucale čvrste stene).

5.4. Bunari

Osnovna namena bunara je eksploatacija podzemnih voda. Bunari se mogu koristiti i za druge namene, kao što je zaštita objekata od podzemnih voda, privremeno snižavanje nivoa podzemnih voda u cilju obezbeđenja izvođenja građevinskih ili drugih radova, ispitivanje karakteristika izdani, remedijacija podzemnih voda i sl. Postoji nekoliko tipova bunara (kopani, bunari sa horizontalnim drenovima, utisnuti bunari, bušeni cevasti bunari), međutim, najčešće se izvode takozvani cevasti bunari, o kojima će dalje biti reči.

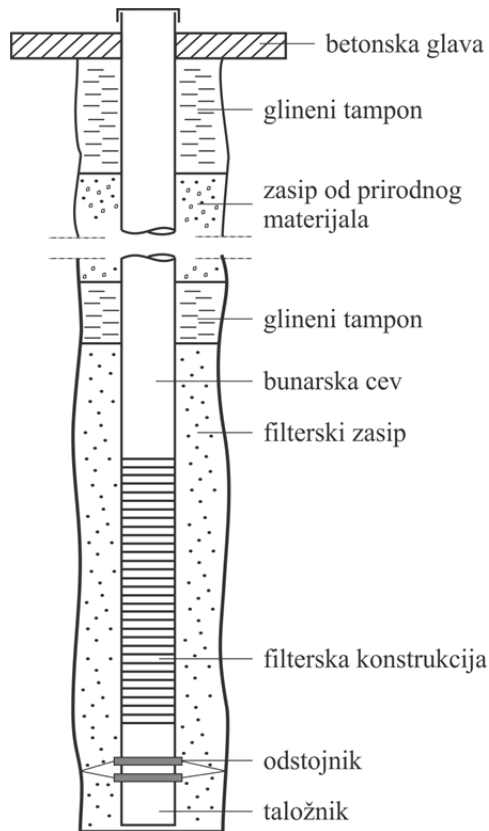
Bez obzira na namenu većinu cevastih bunara čini bunarska garnitura koja se postavlja u prethodno napravljenu bušotinu, a koja se obično formira do donje granice izdani ili nekoliko metara niže. Bunarsku garnituru čine (Slika 5.7):

- ploča prečnika nešto manjeg od prečnika bušotine koja se postavlja na dno bušotine i koja služi za oslanjanje bunarske garniture;
- taložnice dužine nekoliko metara, koju čini neperforirana cev i koja služi za prikupljanje čestica materijala koje dospevaju u bunar iz okolne sredine;
- filterska konstrukcija, koju čini perforirana cev, obično izrađena od nerđajućeg čelika ili PVC-a, i koja predstavlja osnovni deo bunara kroz koji voda iz okolne sredine ulazi u bunar;
- nastavak cevi punog zida do površine terena. Bunar se na površini završava tzv. bunarskom glavom.

Prostor između filterske konstrukcije i zida bušotine se ispunjava filterskim zasipom, koga čini nevezani materijal propisane granulacije, a čija je uloga najpre da spreči prodor čestica sredine u bunarsku konstrukciju, a

zatim i da omogući nesmetanu filtraciju vode ka bunaru. Bunarska pumpa kojom se voda potiskuje ka površini terena obično se smešta u sam bunar, mada je ponekad moguća i tzv. suva izvedba, ukoliko to hidraulički uslovi dozvoljavaju, kada se pumpa sa horizontalnom osovinom nalazi na površini terena. Prostor između bunarske garniture i zida bušotine bliže površini terena se ispunjava glinovitim materijalom ili betonom, kako bi se sprečio eventualni prodor površinskih voda ka izdani.

Svi pobrojani elementi bunara se pažljivo projektuju u zavisnosti od lokalnih hidrogeoloških uslova, kako bi se obezbedila trajnost rada bunara u smislu obezbeđenja zahtevane količine vode u što dužem vremenskom periodu, a da se pri tome ne naruši stabilnost skeleta sredine (što bi moglo, na primer, da dovede do sleganja terena).



Slika 5.7. Tipična konstrukcija cevastog bunara

Uticaj rada bunara na nivo podzemne vode može se odrediti primenom Darsijevog zakona i jednačine održanja mase. Ako se posmatra ustaljeno strujanje ka bunaru u izdani pod pritiskom, koeficijenta filtracije K i debljine izdani M , na osnovu principa održanja mase može se zaključiti da je protok kroz fiktivni omotač cilindra čiji je radijus r jednak protoku koji se crpi iz bunara (Slika 5.8):

$$Q_b = v \cdot 2r\pi M = K \frac{d\Pi}{dr} 2r\pi M$$

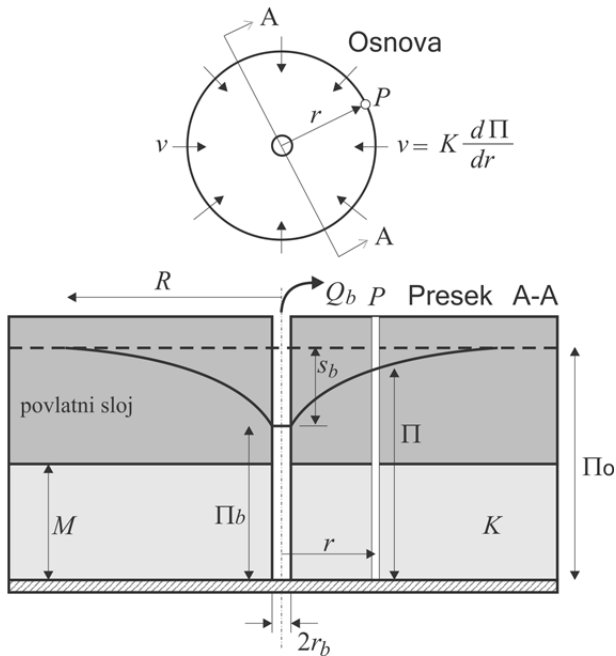
gde je iskorišćen Darsijev zakon u izrazu za brzinu filtracije. Integracijom prethodnog izraza u granicama između r , gde je pijezometarski nivo Π , i $r=R$, gde je neporemećeni pijezometarski nivo Π_0 , dobija se izraz za sniženje pijezometarskog nivoa, kao razlike neporemećenog nivoa i nivoa u uslovima rada bunara:

$$s = \Pi_0 - \Pi = \frac{Q_b}{2\pi KM} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

Navedeni izraz daje veličinu sniženja pijezometarskog nivoa u izdani pod pritiskom na rastojanju r od bunara usled crpljenja protokom Q_b , u odnosu na početni, statički nivo. Na isti način može se izračunati koliko će biti sniženje u samom bunaru:

$$s_b = \Pi_0 - \Pi_b = \frac{Q_b}{2\pi KM} \ln\left(\frac{R}{r_b}\right)$$

Prilikom izvođenja prethodnih izraza za sniženje nivoa usled rada bunara, usvojeno je nekoliko bitnih pretpostavki: izdan pod pritiskom je homogena i konstantne debljine, kao i da postoji konačno rastojanje R , na kome je nivo neporemećen. Ovo rastojanje se naziva *radijus dejstva bunara* i obično se daje u formi empirijskih izraza u zavisnosti od koeficijenta filtracije K , debljine izdani M , i protoka koji se crpi na bunaru. Pretpostavljeno je takođe da se vertikalna komponenta brzine može zanemariti, odnosno da se radi o horizontalnom, ravanskom strujanju. U slučaju da neka od ovih pretpostavki nije ispunjena u konkretnom slučaju, potrebno je koristiti složenije matematičke alate za rešavanje takvih problema, a koji prevazilaze namenu ove knjige.



Slika 5.8. Ustaljeno strujanje ka bunaru u izdani pod pritiskom

Sa praktičnog stanovišta veoma je korisno приметiti da ukoliko postoje merenja nivoa na dva pijezometra (Π_1 i Π_2), koja se nalaze na rastojanjima od bunara r_1 , odnosno r_2 , iz prethodnih izraza je moguće odrediti proizvod koeficijenta filtracije i debljine izdani pod pritiskom (KM). Oduzimanjem izraza za sniženje u jednom, odnosno drugom pijezometru, dobija se:

$$\Pi_1 - \Pi_2 = \frac{Q_b}{2\pi KM} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$$

odnosno:

$$T = KM = \frac{Q_b}{2\pi(\Pi_1 - \Pi_2)} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$$

Ova veličina se zove *transmissionost* ($T=KM$) i ima dimenziju L^2/t (dužina na kvadrat kroz vreme).

Jednačina sniženja nivoa usled crpljenja vode na bunaru je linearna. Zahvaljujući tome, moguće je primeniti *princip superpozicije*, kada se traži rešenje za sniženje nivoa u slučaju rada više bunara. Drugim rečima, sniženje nivoa u nekoj tački će biti suma pojedinačnih sniženja svakog od bunara. Na

primer, sniženje nivoa u proizvoljnoj tački A , koja se nalazi na rastojanju od bunara „ i “ r_{Ai} , pri čemu je $i=1, \dots, N$, a N ukupan broj bunara će biti:

$$s_A = \sum_i s_i = \sum_i \frac{Q_{bi}}{2\pi T} \ln\left(\frac{R}{r_{Ai}}\right)$$

Istim postupkom moguće je dobiti i izraz za strujanje ka bunaru u izdani sa slobodnim nivoom. Osnovna razlika je u tome što u tom slučaju debljina izdani nije konstantna, pa se dobija izraz u obliku:

$$\Pi_0^2 - \Pi^2 = \frac{Q_b}{\pi \cdot T} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

5.5. Izvori zagađenja podzemnih voda

Pod zagađenjem voda, pa tako i podzemnih voda, može se smatrati izmena, odnosno pogoršanje, fizičko-hemijskih i mikrobioloških karakteristika vode u odnosu na prirodne uslove usled dejstva antropogenih uticaja. Zagađujuća materija koja može da ugrozi zdravlje ljudi ili prirodne ekosisteme može da bude i prirodnog porekla. Primeri neorganskih materija su brojni, ali se često navodi, i kod nas je aktuelan, arsen, koji dospeva u podzemnu vodu kao posledica interakcije vode sa geološkom sredinom u kojoj se nalazi. Međutim, u ovakvim situacijama ne može se govoriti o zagađenju, jer je kvalitet vode prirodno uslovljen procesima na koje se ne može uticati.

Antropogeni uticaj na kvalitet podzemnih voda, prema izvoru zagađenja, može se podeliti na zagađenje koje potiče iz urbanih sredina, industrije i poljoprivrede. U mnogo slučajeva ovi uticaji se preklapaju. Potencijalni izvori zagađenja podzemnih voda su aktivnosti poput nehigijenskog odlaganja tečnog i čvrstog otpada, akcidentnih izlivanja, korišćenja pesticida u poljoprivredi, rudarstva i pratećih aktivnosti, komunalnih i industrijskih otpadnih voda, kišnog oticaja sa urbanih slivova, itd.

Izvori zagađenja mogu biti distribuirani ili lokalni. Distribuiranim izvorima zagađenja se smatra infiltracija zagađene vode sa poljoprivrednih ili urbanih površina, dok se pod lokalnim (tačkastim) izvorima smatraju curenja

sa deponija komunalnog i industrijskog otpada, deponija industrijskog materijala, akcidentna izlivanja ili procurivanja i sl.

Prema podacima EPA (Američka agencija za zaštitu životne sredine), najznačajni i najrašireniji izvor zagađenja podzemnih voda predstavlja infiltracija sa poljoprivrednih i urbanih površina. Ove vode mogu da sadrže visoke koncentracije teških metala, organskih jedinjenja, pesticida i drugih supstanci. Podaci EPA pokazuju da je voda iz 1% svih bunara u SAD opterećena pesticidima.

Posledica primene agrotehničkih mera može biti pojava nitrata i pesticida u podzemnoj vodi. Od tri osnovna elementa veštačkih đubriva (N, P i K), azot u formi NO_3^- predstavlja najčešću supstancu koja izaziva zagađenje podzemnih voda (Freeze i Cherry, 1979). Sadržaj nitrata u podzemnoj vodi predstavlja verovatno jedan od najučestalijih razloga za zatvaranje izvorišta podzemnih voda u svetu. Nitrati su izuzetno rastvorljivi u vodi, ne adsorbuju značajno na čvrstu fazu, zbog čega su vrlo mobilni u podzemnoj vodi. Pored poljoprivrede značajni izvori nitrata su i komunalne otpadne vode.

Istraživanja uticaja poljoprivrede na kvalitet podzemnih voda u zapadanoj Australiji pokazala su da poljoprivrednici u proseku unose između četiri i sedam puta više azota nego što biljke mogu da absorbuju (Pionke, Sharma i Hirschberg, 1990). Koncentracije nitrata u vodi ispod zone korena biljaka su osmotrene do 200 mg N/L. Istovremeno, koncentracije u podzemnoj vodi su izmerene između 10 i 70 mg N/L (Pionke, Sharma i Hirschberg, 1990; Lantzke, 1999), za razliku od koncentracije nitrata u podzemnoj vodi ispod površina sa prirodnom vegetacijom koje su manje od 1 mg N/L.

Sa stanovišta nitrata najosetljivija su peskovita zemljišta sa malim sadržajem organskih materija. Azotna jedinjenja u ovakvoj sredini veoma brzo podležu procesu nitrifikacije, a zbog relativno velike vodopropusnosti infiltracija je brza.

Pored ruralnih područja gde ne postoji organizovano odvođenje komunalnih otpadnih voda, zagađenje podzemnih voda se javlja i u urbanim sredinama usled curenja i lošeg održavanja kanizacionih sistema. Komunalne otpadne vode mogu da budu uzrok mikrobiološkog zagađenja podzemnih voda, a zagađujuće materije uključuju i različite supstance koje se koriste u domaćinstvu ili industriji, pri čemu su nitrati ponovo jedna od

supstanci koje se najčešće detektuju u podzemnoj vodi. Faktori koji utiču na zagađenje podzemnih voda komunalnim otpadnim vodama uključuju (Aigner idr., 1998):

- tip zemljišta;
- nivo podzemne vode u odnosu na kanalizacionu mrežu;
- kvalitet ugradnje kanalizacionih sistema;
- tip i specifični broj spojeva kanalizacionih cevi;
- ukupna dužina kanalizacionih cevi;
- broj revizionih silaza;
- godišnja visina padavina;
- starost sistema za prikupljanje komunalnih voda.

Rudarstvo i aktivnosti koje ga prate mogu da predstavljaju značajan izvor zagađenja podzemnih voda. Otvoreni kopovi, kao što su rudnici lignita kod nas, pored potencijalnog zagađenja, direktno uništavaju resurse podzemnih voda, ali i povećavaju ranjivost podzemnih voda u okruženju uklanjanjem slabije propusnih / povlatnih zaštitnih slojeva zemljišta. Teški metali i sulfati su najčešće zagađujuće materije koje se javljaju u podzemnoj vodi kao posledica ovih aktivnosti.

Neuređene deponije otpada i deponije industrijskih sirovina predstavljaju ozbiljne potencijalne zagađivače podzemnih voda, bilo u vidu procurivanja zagađujućih materija, bilo infiltracije padavina opterećene zagađujućim materijama iz deponija. Ovde se uglavnom radi o tzv. prioritarnim i prioritarnim hazardnim supstancama prema domaćoj zakonskoj regulativi. Tabela 5.1. daje pregled 25 najčešće detektovanih hazardnih supstanci u podzemnoj vodi u zoni deponija otpada, među kojima se 9 odnosi na teške metale, a 16 na organske materije (NRC, 1994).

Od lokalnih akcidentnih zagađenja najzastupljenija su curenja podzemnih rezervoara, gde se najčešće radi o derivatima nafte. Prema istraživanjima EPA u SAD, od ukupnog broja podzemnih rezervoara u kojima se čuvaju derivati nafte, približno 25% potencijalno curi (EPA, 1988). Problem kod ovih zagađivača jeste njihova detekcija, jer se obično registruje tek kada se zagađujuće materije pojave na nekom zahvatu podzemne vode ili izvoru, odnosno kada je zbog sporih procesa, proteklo dosta vremena i kada je velika količina zagađujuće materije već dospela u podzemnu vodu.

Tabela 5.1. Najčešće opasne materije u podzemnoj vodi na lokacijama deponija otpada (NRC, 1994)

Rang	Zagađujuća materija	Izvor
1.	Trihloroetilen	Odmašćivači, industrijska ulja
2.	Olovo	Pogonska goriva, rudarska industrija, građevinski materijali
3.	Tetrahaloroetilen	Odmašćivači, industrijska ulja
4.	Benzen	Pogonska goriva, industrija
5.	Toluen	Pogonska goriva, industrija
6.	Hrom	Metalna industrija
7.	Metilen-hlorid	Rastvarači
8.	Cink	Industrija, rudarska industrija
9.	1, 1, 1 – Trihloroetan	Industrija
10.	Arsen	Industrija, rudarska industrija
11.	Trihlorometan	Rastvarači
12.	1, 1 – Dihloroetan	Rastvarači
13.	1, 2 – Dihloroeten	Transformacioni produkt 1,1,1–Trihloroetana
14.	Kadmijum	Rudarstvo
15.	Mangan	Industrija, rudarstvo
16.	Bakar	Industrija, rudarstvo
17.	1, 1 – Dihloroeten	Industrija
18.	Vinil-hlorid	Industrija plastike
19.	Bor	Industrija
20.	1,2 – Dihloroetan	Odmašćivači
21.	Etilbenzen	Pogonska goriva, putna industrija
22.	Nikl	Industrija, rudarstvo
23.	Di(2-etilheksil) ftalat	Industrija plastike
24.	Ksilen	Pogonska goriva, rastvarači,
25.	Fenol	Medicina, industrija, rudarstvo

Zagađujuće materije koje dospevaju u podzemnu vodu mogu biti rastvorljive u vodi ili samo delimično rastvorljive, kao što je to slučaj sa derivatima nafte, gde su pojedina jedinjenja ugljovodonika rastvorljiva u određenoj meri. Dalje će biti reči samo o rastvorenoj zagađujućoj supstanci u

podzemnoj vodi, a čija će se zastupljenost u podzemnoj vodi izražavati preko koncentracije C , u jedinicama M/L^3 (masa po jedinici zapremine rastvora). Rastvorene supstance su najčešće znatno mobilnije u poroznoj sredini u odnosu na nerastvorljive, jer je transport materije, između ostalog, posledica strujanja same podzemne vode.

5.6. Mehanizmi transporta zagađujućih materija u podzemnim vodama

Postoji nekoliko osnovnih mehanizama koji utiču na rasprostiranje zagađujućih materija u podzemnoj vodi:

- advekcija;
- molekularna difuzija, i
- mehanička disperzija.

Advekcija (često se koristi i pojam *konvekcija*) predstavlja mehanizam transporta rastvorene materije brzinom kojom struji sama podzemna voda, odnosno rastvor. Važno je istaći da se rastvorena materija kreće efektivnom brzinom podzemne vode, koja je veća od Darsijeve brzine. Fluks mase zagađujuće materije po jedinici površine porozne sredine usled advekcije iznosi:

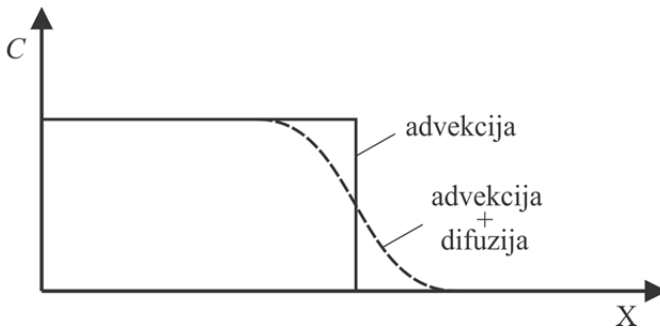
$$q_{adv} = nCv_{eff}$$

gde je v_{eff} efektivna brzina strujanja podzemne vode upravno na površinu kroz koju se posmatra fluks mase zagađujuće materije.

Molekularna difuzija predstavlja proces rasprostiranja rastvorene materije usled postojanja gradijenta koncentracije i opisuje se prvim Fikovim zakonom. Na primer, u pravcu x fluks mase po jedinici površine porozne sredine iznosi:

$$q_{dif} = -nD_M \frac{\partial C}{\partial x}$$

gde je D_M koeficijent molekularne difuzije za datu materiju. Znak minus govori da se fluks difuzijom odvija u pravcu pada koncentracije, a sam proces doprinosi rasprostiranju ali i razblaženju fronta zagađujuće materije (Slika 5.9).



Slika 5.9. Efekat difuzije na front propagacije rastvorene materije

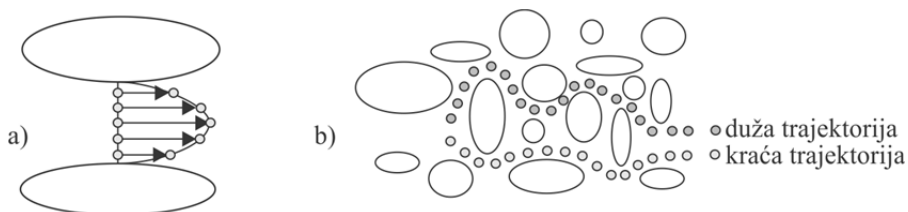
Mehanička disperzija je mehanizam koji za posledicu ima isti efekat na transport rastvorene materije kao i molekularna difuzija, ali je u pitanju posledica neuniformnosti polja brzina u mikro-razmeri, kao i zakrivljenosti trajektorija kojima voda struji kroz pore sredine (Slika 5.10). S obzirom na to da je konačan efekat sličan kao kod difuzije, i disperzija se obično opisuje Fikovim zakonom:

$$q_{disp} = -nD_{DISP} \frac{\partial C}{\partial x}$$

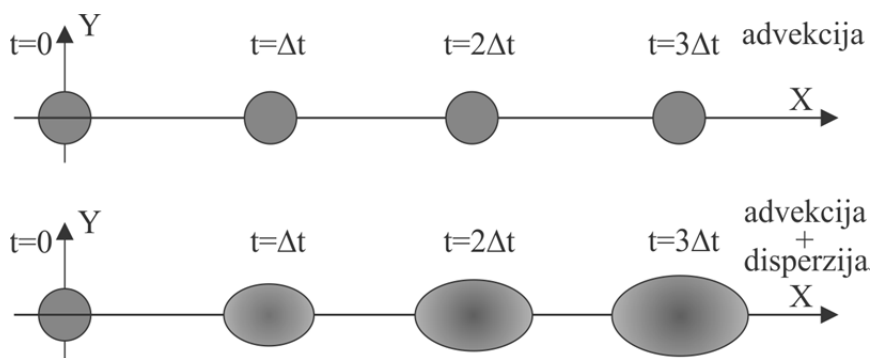
gde je D_{DISP} koeficijent mehaničke disperzije. Ovaj proces zavisi od strukture porozne sredine, odnosno njene *disperzivnosti*, ali i brzine filtracije. Može se pretpostaviti da će pri većim brzinama i disperzija biti izraženija, odnosno koeficijent mehaničke disperzije veći. Zbog toga, ovaj koeficijent se upravo tako i formuliše: kao proizvod karakteristične disperzivnosti sredine (ima dimenziju dužine) i brzine filtracije. Disperzivnost porozne sredine se određuje eksperimentalno, namenskim traserskim eksperimentima. Gotovo uvek je mehanička disperzija znatno dominantniji proces od molekularne difuzije, odnosno $D_{DISP} \gg D_M$.

Iz praktičnih razloga mehanizmi molekularne difuzije i mehaničke disperzije se najčešće objedinjuju u jedinstveni mehanizam koji se naziva *hidrodinamička disperzija*:

$$D_{HD} = D_M + D_{DISP}$$



Slika 5.10. Mehanizmi mehaničke disperzije: a) usled neuniformnosti brzina na mikro-nivou, b) usled različitih trajektorija kretanja vode, odnosno rastvorene materije.



Slika 5.11. Efekat disperzije na transport materije u homogenoj poroznoj sredini kada brzina filtracije ima komponentu samo u pravcu X

Na slici 5.11. ilustrativno je prikazan efekat disperzije na transport rastvorene materije u ravni. Na početku ($t=0$) u struju podzemne vode je unešena određena koncentracija rastvorene materije. Ukoliko bi se radilo o čistoj advekciji, ta koncentracija bi se nizvodno kretala neporemećena efektivnom brzinom filtracije podzemne vode (gornji dijagram na slici). Mehanizam disperzije se ogleda u deformaciji / širenju oblaka zagađujuće materije, kako u pravcu brzine, tako i u drugim pravcima (donji dijagram na slici).

Navedeni mehanizmi transporta rastvorene materije u poroznoj sredini su dovoljni za opisivanje rasprostiranja tzv. *idealnog traser*a, odnosno materije koja nema interakciju sa skeletom porozne sredine i koja ne podleže biohemijskim procesima razgradnje. Međutim, činjenica je da u prirodi ne postoji idealni traser, odnosno da sve supstance u određenoj meri podležu

fizičkim i/ili biohemijskim procesima koji utiču na njihovu sudbinu u podzemlju. Najznačajniji od ovih procesa su *sorpcija* i *biohemijska razgradnja*. Upravo ova dva procesa su ključni elementi tzv. fenomena *samoprečišćavanja* podzemnih voda tokom filtracije kroz poroznu sredinu, koji se ogleda u popravljanju kvaliteta.

Sorpcija je proces vezivanja rastvorene materije za skelet porozne sredine, odnosno za čestice zemljišta i u užem smislu obuhvata procese adsorpcije i apsorpcije. U ovom procesu čvrsta faza predstavlja *sorbent*, dok rastvorena materija koja se vezuje za sorbent predstavlja *sorbat*. Jasno je da ovaj proces zavisi od karakteristika sorbenta i sorbata.

Filtracija u poroznoj sredini je spor proces, što najčešće omogućava da se proces sorpcije ostvari do ravnotežnog stanja, koje se može opisati pomoću različitih matematičkih funkcija. Intenzitet sorpcije za pojedine materije se određuje eksperimentalno, a rezultati merenja se prikazuju preko dijagrama gde se na jednoj osi nanose koncentracija sorbata u rastvoru, a na drugoj sadržaj na sorbentu. S obzirom na to da se eksperimenti izvode pri konstantnoj temperaturi, dobijene funkcije se izražavaju preko tzv. izoterma. Na primer, linearna Frojndlihova (Freundlich) izoterma se može izraziti kao:

$$S = K_d C$$

gde je S sadržaj supstance na skeletu sredine (bez dimenzije jer predstavlja masu sorbata po jedinici mase sorbenta), a K_d predstavlja koeficijent raspodele (u smislu raspodele između rastvora i čvrste faze).

Poznato je da teški metali imaju izuzetnu sklonost ka sorpciji, dok na primer fenoli ili nitrati sorbuju u znatno manjoj meri.

Efekat sorpcije na transport materije podzemnom vodom se ogleda u usporenju transporta, gde se usporenje može izraziti preko *faktora retardacije*, kao odnosa brzine transporta idealnog trasera i brzine transporta materije koja podleže sorpciji. Gruba aproksimacija faktora retardacije se može odrediti na osnovu izraza u kome figuriše koeficijent raspodele (Freeze i Cherry, 1979):

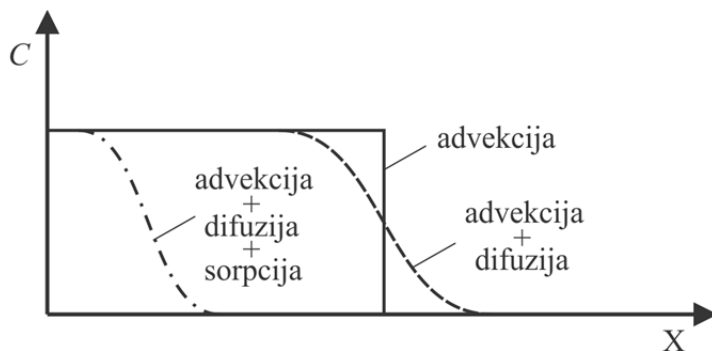
$$R_d = (1 + 4K_d) \div (1 + 10K_d)$$

Pod *biohemijskom razgradnjom* se podrazumevaju svi hemijski i biološki procesi koji doprinose razgradnji zagađujućih materija, njihove

mineralizacije, a time i popravljanju kvaliteta podzemne vode. Treba istaći da u ovim procesima biološka razgradnja najčešće ima najznačajniju ulogu. Biorazgradnja podrazumeva razgradnju organskih materija od strane mikroorganizama, najčešće bakterija, do delimične ili potpune mineralizacije.

Tabela 5.2. Tipične vrednosti koeficijenta raspodele K_d [L/kg] za pojedine hemijske elemente (Charbeneau, 2000)

Hemijski element	Pesak	Glina
C	5	1
Cd	80	560
Mn	50	180
Ni	400	650
Pb	270	550
Zn	200	2.400



Slika 5.12. Efekat sorpcije na brzinu propagacije rastvorene materije

Biohemijske procese u praksi je teško izolovati, pa se gotovo uvek objedinjuju u jedinstven proces. Brzina uklanjanja zagađujuće materije se opisuje jednačinama hemijske kinetike, a najčešće se opisuje kinetikom prvog reda, prema kojoj je brzina opadanja koncentracije zagađujuće materije proporcionalna samoj koncentraciji na prvi stepen:

$$\frac{dC}{dt} = -KC$$

Konstanta K predstavlja koeficijent intenziteta biohemijske razgradnje. Integracijom prethodne jednačine dobija se funkcija promene koncentracije u vremenu u odnosu na početno stanje C_0 :

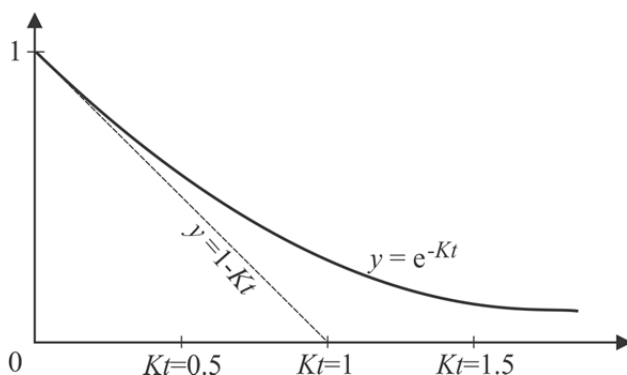
$$C = C_0 e^{-Kt}$$

Koeficijent K ima dimenziju 1/vreme, a njegova fizička interpretacija se najbolje vidi na slici 5.13. Može se videti da je navedenu eksponencijalnu funkciju moguće aproksimovati pravom ($y=1-Kt$) ukoliko je vrednost eksponenta Kt manja od približno 0,5. To znači da, na primer, vrednost $K=0.3$ 1/dan označava brzinu razgradnje pri kojoj se u toku jednog dana razgradi 30% (0,3) početne koncentracije. Ukoliko je vrednost koeficijenta veća od 0,5, potrebno je promeniti dimenzije, tako da se dobije vrednost manja od 0,5, a koja se opet može interpretirati na navedeni način (na primer, 1/dan pretvoriti u 1/mes. ili 1/god.).

Koeficijent brzine biohemijske razgradnje se često izražava preko vremena poluraspada zagađujuće materije ($T_{1/2}$). Veza se lako izvodi tako što se u prethodnoj jednačini zameni koncentracija $C=C_0/2$, kojoj odgovara vreme poluraspada $t=T_{1/2}$. Dobija se:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{K} = \frac{0,693}{K}$$

U tabeli 5.3. navedene su karakteristične vrednosti vremena poluraspada za neke od zagađujućih materija u podzemnoj vodi. Vrednosti su date u širokom rasponu, što ukazuje da proces biorazgradnje, pored karakteristika materije, dosta zavisi od uslova sredine u kojoj se odvijaju procesi (sadržaja kiseonika, raspoloživosti nutrijenata, itd.).



Slika 5.13. Eksponencijalna funkcija kojom se opisuje biohemijsku razgradnja u podzemnoj vodi

Tabela 5.3. Tipične vrednosti vremena poluraspada za pojedine zagađujuće materije (Charbeneau, 2000)

Supstanca	Vreme poluraspada [dani]
Benzen	10–730
Ugljen-tetrahlorid	7–365
Etilbenzen	6–228
Metil-hlorid	14–56
Fenol	0,5–7
Piren	420–3.800
Ksilen	14–365

5.7. Zaštita izvorišta podzemnih voda

Izvorišta podzemnih voda se sastoje od grupe bunara, koji utiču na sliku strujanja podzemnih voda na širem prostoru izvorišta. Na osnovu poznate strujne slike, moguće je odrediti oblast koja gravitira ka izvorištu, odnosno oblast ispod koje trajektorije podzemne vode završavaju u bunarima izvorišta. Ova oblast predstavlja tzv. *zonu prihranjivanja* izvorišta. Ukoliko na ovom prostoru zagađujuća materija dospe u podzemnu vodu, potencijalno postoji mogućnost da se pojavi na bunarima izvorišta kombinacijom prethodno opisanih mehanizama transporta. Zbog toga je od izuzetne važnosti poznavanje režima podzemnih voda u široj zoni izvorišta.

Domaća zakonska regulativa propisuje formiranje zona sanitarne zaštite oko izvorišta podzemne vode kao zaštićenih oblasti u cilju zaštite kvaliteta vode na izvorištu. Zaštita se sprovodi utvrđivanjem granica pojedinih zona sanitarne zaštite na površini terena, kojima se ograničavaju dozvoljene aktivnosti unutar tako definisanih zona. Ograničenja aktivnosti su restriktivnija za zone bliže izvorištu.

Domaćom regulativom predviđeno je formiranje 3 zone sanitarne zaštite (Zakon o vodama, 2010):

- zona I – zona neposredne zaštite;
- zona II – uža zona sanitarne zaštite;
- zona III – šira zona sanitarne zaštite.

Kriterijum za određivanje i održavanje zone neposredne zaštite (zona I) proizlazi iz uslova da u neposrednu blizinu bunara može da pristupi samo ovlašćeno lice. Ova zona se formira oko svakog pojedinačnog vodozahvatnog objekta na način da se neposredni prostor oko objekta ogradi. U ograđenom prostoru može se saditi dekorativno zelenilo, rastinje koje nema duboki koren. Pravilnikom se propisuje da, ukoliko u ograđenom prostoru boravi stalno zaposlena osoba, ograda mora biti udaljena najmanje 10 m od vodozahvata. U suprotnom, ograda mora biti udaljena najmanje 3 m od vodozahvatnog objekta koji se okružuje. Ovu zonu je moguće uspostaviti kao jedinstvenu zonu za sve bunare na izvorištu.

Zona II (uža zona sanitarne zaštite) formira se prvenstveno sa ciljem zaštite od patogenih organizama, ali i drugih zagađujućih materija. Određivanje ove zone zasniva se na vremenu putovanja idealnog trasera do vodozahvata. Sa visokim nivoom sigurnosti može se očekivati da će za to vreme doći do izumiranja patogenih mikroorganizama i virusa. Smatra se da u tom smislu minimalno potrebno vreme putovanja vode iznosi 50 dana. Rastojanje od bunara na izvorištu koje odgovara vremenu putovanja od 50 dana se može odrediti na osnovu izračunatih brzina filtracije podzemne vode. U ovoj zoni se zabranjuje stambena izgradnja, upotreba pesticida, herbicida i insekticida, prirodnog ili veštačkog đubriva, uzgoj i ispaša stoke, eksploatacija peska i šljunka, sportske aktivnosti i okupljanja, itd.

Zona III (šira zona sanitarne zaštite) formira se u cilju nadzora i sprečavanja transporta zagađenja sa područja koje gravitira ka vodozahvatu u smislu prihranjivanja izvorišta. Za određivanje granica ove zone neophodno je sagledati pravce strujanja podzemnih voda, a time i oblast koja

prihranjuje izvorište. Ukoliko je izdan zaštićena, odnosno ukoliko postoje povlatni slojevi koji umanjuju uticaj zagađivača sa površine terena, moguće je delimično smanjenje ove zone u odnosu na područje prihranjivanja izdani. U ovoj zoni se zabranjuje proizvodnja, transport, privremeno ili trajno skladištenje opasnih materija, izgradnja saobraćajnica bez objekata za prikupljanje atmosferskih voda, eksploatacija nafte, gasa, uglja i mineralnih sirovina, nekontrolisano deponovanje komunalnog i drugog otpada, površinski i potpovršinski radovi kojima se zadire u vodonosni sloj, itd.

Kao obavezan deo mera zaštite izvorišta podzemne vode, propisuje se redovni monitoring režima i kvaliteta podzemnih voda unutar uspostavljenih zona sanitarne zaštite. Monitoring podrazumeva dovoljan broj pijezometara i učestalost uzorkovanja, koji omogućavaju pravovremeno registrovanje eventualne pojave zagađujućih materija u podzemnoj vodi i primenu mera za revitalizaciju podzemnih voda.

5.8. Literatura

Charbeneau, R. J. (2000). *Groundwater hydraulics and pollutant transport*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.

Freeze, R.A., i Cherry J.A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall.

Lantzke, N.C. (1999). Phosphorus and nitrate loss from horticulture on the Swan Coastal Plain. Proceedings of the International Conference of Diffuse Pollution – Solutions and Innovations, Perth, Australia.

National Research Council (1994). *Alternatives for Ground Water Cleanup*. Washington D.C., USA: National Academy Press.

Pionke, H. B., Sharma, M. L., i Hirschberg, K. J. (1990). Impact of irrigated horticulture on nitrate concentrations in groundwater. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 32(1), 119-132.

Zakonodavstvo

Zakon o vodama (2010). Službeni glasnik Republike Srbije br. 30/10.

Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanja (2008). Službeni glasnik Republike Srbije br. 92/08.

Vodoprivredna osnova Republike Srbije (2002). Službeni glasnik Republike Srbije br. 11/02.

6 Priprema vode za piće

Voda za piće je voda koja se koristi za piće, preradu i proizvodnju hrane i predmeta opšte upotrebe, kao i za ostale potrebe ljudi (Zakon o vodama, 2010). Izvori pitke vode su podzemne i površinske vode. Ukoliko su koncentracije zagađujućih supstanci u vodi veće od dozvoljenih, zahvaćena (sirova) voda se mora prethodno prečistiti (pripremiti) da bi bila:

- bezbedna za ljudsku upotrebu (u skladu sa propisanim mikrobiološkim i fizičko-hemijskim pokazateljima kvaliteta vode);
- prijatnog ukusa i mirisa.

Zahtevani kvalitet vode za piće propisan je Pravilnikom o higijenskoj ispravnosti vode za piće (1998, 1999). Pravilnikom se definišu:

- dozvoljene mikobiološke karakteristike vode za piće;
- maksimalno dopuštene koncentracije neorganskih materija u vodi za piće;
- maksimalno dopuštene koncentracije organskih materija u vodi za piće;
- dozvoljene koncentracije pesticida u vodi za piće;
- fizičke, fizičko-hemijske i hemijske karakteristike vode za piće koje mogu izazvati primedbe potrošača (npr. boja, miris, ukus, mutnoća, prisustvo vodonik-sulfida).

Odabir tehnološkog procesa (kombinacije odgovarajućih postupaka obrade vode) za pripremu vode za piće se vrši na osnovu parametara kvaliteta sirove vode i zahtevanog kvaliteta vode za piće propisanog Pravilnikom o higijenskoj ispravnosti vode za piće (1998, 1999).

6.1. Kvalitet prirodnih vodnih resursa

Slatkovodne površinske vodne resurse čine jezera, akumulacije i reke. Površinske vode su izložene prirodnim i antropogenim dejstvima i mogu biti kontamirane mikroorganizmima, organskim i neorganskim materijama. Površinske vode mogu da imaju loše organoleptičke osobine. Organoleptičke osobine su osobine vode koje mogu biti opažene čulima – boja, ukus, miris i mutnoća vode.

Boja vode potiče od rastvorenih materija jona gvožđa i mangana, prirodnih organskih materija (huminskih kiselina koje vodi daju žućkastu boju) i industrijskih boja.

Ukus i miris vode potiču od raspadanja organskih materija (algi), organskih i neorganskih sulfida (merkaptana, rastvorenog vodonik-sulfida), rastvorenih soli (magnezijum-hlorida, magnezijum-bikarbonata) i industrijskih otpadnih voda (fenola).

Mutnoću vode čine suspendovane i koloidne čestice u vodi. Mutnoća vode potiče od:

- suspendovanih čestica gline;
- čestica mulja;
- finih, sitnih organskih i neorganskih materija;
- rastvorenih, obojenih organskih materija;
- mikroskopski sitnih živih organizama i planktona.

Tvrdoća vode potiče od rastvorenih soli kalcijuma (Ca^{2+}) i magnezijuma (Mg^{2+}). Ova karakteristika vode usko je povezana sa izdvajanjem teško rastvorljivih karbonata iz vode i stvaranjem naslaga, što ima uticaja na tehnološke procese u industriji i kućne instalacije.

Kvalitet rečne vode zavisi od karakteristika sliva i u velikoj meri je pod uticajem zagađenja iz gradova, industrije i poljoprivrede. Zamućenost rečne vode se može značajno povećati tokom snežnog oćicaja i kišnih perioda. Tokom toplijih meseci cvetanje algi može da izazove neprijatan ukus i miris vode.

Podzemne vode su obično manje zagađene od površinskih voda, ali mogu sadržati supstance koje nepovoljno utiču na organoleptičke osobine vode i imaju povišenu tvrdoću. Podzemne vode mogu biti kontaminirane usled akcidentnih izliva zagađujućih supstanci, prekomerne eksploatacije i geoloških karakteristika.

Kvalitet podzemnih vodnih resursa je manje podložen promenama od kvaliteta površinskih vodnih resursa. U tabeli 6.1. dat je uporedni pregled uobičajenih karakteristika podzemnih i površinskih voda.

Tabela 6.1. Uporedni prikaz karakteristika podzemnih i površinskih vodnih resursa

Podzemni vodni resursi	Površinski vodni resursi
Konstantan sastav vode	Promenljiv sastav vode
Viši sadržaj minerala	Niži sadržaj minerala
Niži stepen zamućenosti	Viši stepen zamućenosti
Mogu biti mikrobiološki ispravne	Prisustvo mikroorganizama
Bez rastvorenog kiseonika	Prisustvo rastvorenog kiseonika
Veća tvrdoća vode	Manja tvrdoća vode
Prisustvo vodonik-sulfida, gvožđa i mangana	Loš ukus i miris vode
Mogućnost prisustva toksičnih jedinjenja	Mogućnost prisustva toksičnih jedinjenja

6.2. Tehnološki procesi pripreme vode za piće

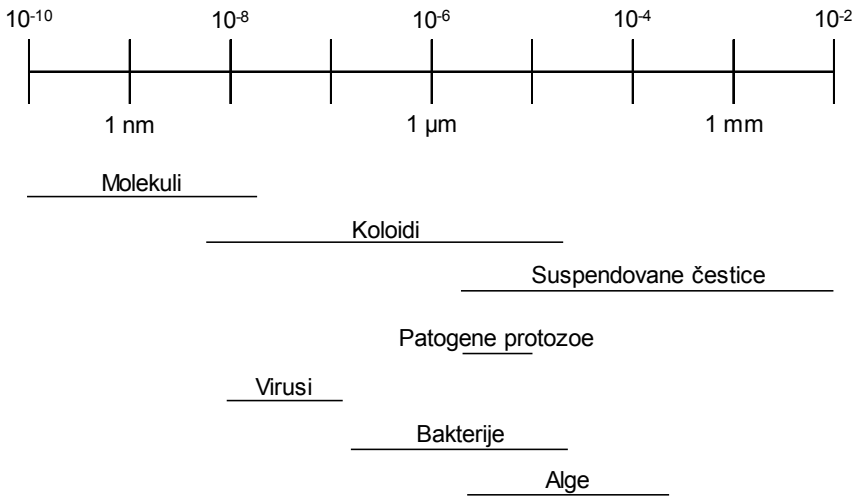
6.2.1. Površinske vode

Konvencionalnim postupkom pripreme vode za piće iz površinskih resursa uklanjaju se boja, mutnoća, ukus, miris, organske materije i mikroorganizmi pomoću:

- bistrjenja (koagulacija, flokulacija, taloženje);
- filtracije;
- dezinfekcije.

Ukoliko je izvorište vode termički stratifikovano jezero, pre navedenih procesa izvodi se aeracija vode.

Na vodozahvatu sirove vode postavljaju se rešetke i sita koja sprečavaju da krupne plutajuće materije i otpad (grane, lišće, ribe) dospeju u postrojenje za pripremu vode, radi zaštite opreme (pumpi, mešalica) i neometanog odvijanja narednih faza obrade. Rešetke uklanjaju čestice veće od 6 mm i imaju zaštitu ulogu, a fina sita, sa otvorima manjim od 6 mm, mogu ostvariti i značajnije uklanjanje suspendovanih materija iz sirove vode. Veličina čestica u prirodnim vodama varira u vrlo širokom opsegu, od nekoliko nanometara za rastvorene zagađivače, do nekoliko stotina mikrometara, za suspendovane materije. Opseg prečnika zagađivača koji su prisutni u prirodnim vodama prikazan je na slici 6.1.



Slika 6.1. Spektar veličina čestica zagađivača koje se javljaju u vodama

Procesom bistrenja se iz sirove vode izdvajaju suspendovane i koloidne čestice. Koloidne čestice su obično manje od $1\text{ }\mu\text{m}$ i imaju malu brzinu taloženja. Koloidi utiču na boju i mutnoću vode i čine ih materije kao što su glina, metalni oksidi, organske materije i mikroorganizmi. Koloidne čestice je lakše izdvojiti kada su grupisane i formiraju krupnije čestice, međutim do agregacije ne dolazi spontano jer ove čestice imaju negativno naelektrisanje i međusobno se odbijaju. Dodatkom koagulanta, hemijskog jedinjenja koje je po hemijskom sastavu so , kod kog je katjon (pozitivno naelektrisan jon) obično viševalentni jon metala, neutrališe se negativno naelektrisanje koloidnih čestica, lakše se ukрупnjavaju (dolazi do agregacije) i talože iz vode. Kao koagulanti najčeće se koriste soli aluminijuma i gvožđa. Primer za često korišćen koagulant je aluminijum-sulfat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, koji u vodi disosuje na jone Al^{3+} i SO_4^{2-} . Voda u koju se dodaje koagulant se na početku brzo meša da bi se hemikalija rastvorila i ravnomerno distribuirala po celoj zapremini vode.

Nakon koagulacije voda dotiče u rezervoar, gde se mešalicama obezbeđuje sporo mešanje. Tokom mešanja manje čestice se grupišu i formiraju krupnije čestice, koje se nazivaju flokule (*eng. floc*). Najpoželjnije je da flokule budu veličine od $0,1$ do 3 mm , što se postiže odgovarajućom

brzinom mešanja. Pri velikim brzinama mešanja flokule se raspadaju na sitne čestice koje je teško ukloniti taloženjem ili filtracijom.

Flokule se gravitaciono talože u taložniku. Izbristrena voda, sa malom koncentracijom čestica, teče ka filteru, gde se uklanjaju finije čestice.

U dvoslojnim ili višeslojnim filterima slojevi ispuna su raspoređeni tako da se voda kreće progresivno kroz materijal sa manjim porama. U dvoslojnim filterima ispunu mogu činiti antracit i pesak. Veličine zrna antracita i peska su u opsegu između 1,2 i 2,5 mm i 0,5 i 1 mm respektivno. Veće čestice iz vode se zadržavaju u sloju antracita, a u peščanom sloju izdvajaju se ostale čestice. Filtracija se odvija kombinacijom mehanizama fizičke separacije i adsorpcije.

Prolaskom vode kroz filtersku ispunu fizičkom separacijom izdvajaju se čestice / flokule, koje su manje od pora filterske ispune. Adsopcijom se gasovite ili rastvorene materije iz vode vezuju površinskim silama za adsorbente (zrna filterske ispune). Adsopcija predstavlja značajan mehanizam filtracije kojim se iz vode mogu ukloniti vrlo sitne čestice.

Filtracija se odvija u bazenima sa filtracionom ispunom. Nakon određenog vremena dolazi do zasićenja filtracione ispune i filter se mora ispirati. Ispiranje filtera se vrši suprotnim tokom vode pri čemu dolazi do suspendovanja čestica nečistoća i filterske ispune. Čestice nečistoća su lakše od čestica filtracione ispune i ispiraju se.

Većina patogenih mikroorganizama (bakterije i virusi) su mikroskopskih dimenzija i ostaju u vodi nakon prethodnih postupaka obrade. Mikroorganizmi se onesposobljavaju dejstvom hemijskih dezinfektanata (npr. hlorisanjem) i/ili fizičkim metodama kao što je dezinfekcija ultraljubičastim (UV) zračenjem. Hemijska dezinfekciona sredstva onesposobljavaju patogene mikroorganizme uništavanjem ili oštećenjem njihove ćelijske strukture, ometanjem metabolizma i sprečavanjem biosinteze i rasta. Hlorisanje vode, metoda dezinfekcije koja je do danas najčešće upotrebljavana, primenjuje se zbog rezidualnog dejstva i sprečavanja naknadnog razvijanja mikroorganizama u cevima distributivnog sistema. Međutim, u prisustvu prirodnih organskih materija i viška hlora stvaraju se sporedni proizvodi dezinfekcije, najčešće jedinjenja trihalometana, koja su štetna po ljudsko zdravlje. Strategija za smanjenje formiranja sporednih proizvoda dezinfekcije se bazira na izbegavanju dodavanja hemijskih dezinfekcionih sredstava pre filtracije vode i doziranja samo

onoliko dezinfektanta koliko je potrebno za postizanje adekvatne dezinfekcije.

Dezinfekcija vode pomoću UV zračenja je efikasan metod za inaktivaciju širokog spektra bakterija (vegetativnih ćelija i spora), virusa i protozoa (Cabaj, Sommer i Schoenen, 1996; Meng i Gerba, 1996; Abbaszadegan i dr., 1997). Pokazalo se da je UV zračenje efikasno i pri inaktivaciji mikrobioloških patogena otpornih na hemijske metode dezinfekcije, kao što je *Cryptosporidium parvum* (Bukhari i dr., 1999). Pri dejstvu UV zračenja u ospegu talasnih dužina između 200 i 300 nm (glavna emisiona talasna dužina lampi sa živom je 253,7 nm), dolazi do inaktivacije patogenih mikroorganizama, tj. promena u genetskom materijalu mikroorganizma. Ako je doza UV radijacije koju mikroorganizam primi dovoljna, promene u genetskom materijalu mikroorganizma su nepovratne i mikroorganizam gubi sposobnost da se reprodukuje i ne može da zarazi osobu koja konzumira tako dezinfikovanu vodu. Efikasnost sa kojom su UV dezinfekcioni reaktori u stanju da inaktiviraju mikroorganizme zavisi od hidrauličkih karakteristika reaktora, intenziteta polja zračenja unutar reaktora i kinetike inhibicije reprodukcije mikroorganizama (Naunovic, Lim i Blatchley, 2008).

Upotrebom kombinacije dve različite metode dezinfekcije – hemijske i fizičke – postiže se dvostruka dezinfekcija koja:

- omogućava bolju mikrobiološku zaštitu jer različiti dezinfektanti su manje ili više efikasni pri onesposobljavanju pojedinih mikrobioloških vrsta;
- pokriva veći spektar mikrobioloških patogena;
- omogućava primenu manjih doza jedinjenja hlora i smanjuje mogućnost formiranja sporednih proizvoda dezinfekcije.

Nakon dezinfekcije voda je spremna za upotrebu i konzumiranje.

Sve veće varijacije u kvalitetu prirodnih površinskih tokova, kao i prisutvo zagađujućih supstanci koje se ne mogu ukloniti klasičnim postupkom prerade, zahtevaju uvođenja dodatnih procesa obrade vode, kao što su ozonizacija i adsorpcija na aktivnom uglju.

Ozon je aktivan oblik kiseonika sa tri atoma po molekulu i predstavlja jako oksidaciono i dezinfekciono sredstvo. Ozon je nestabilan gas i generiše se na licu mesta u ozongeneratorima prolaskom struje kroz tečni kiseonik. Ozonizacija je najefikasnija ako se primenjuje na dva mesta u sistemu

pripreme vode za piće. Predozonizacija se primenjuje pre procesa bistrenja. U toku predozonizacije ozon primarno ima ulogu oksidacionog sredstva i postižu se efekti:

- poboljšane koagulacije i flokulacije i povećanje efikasnosti procesa naknadne filtracije;
- oksidacija redukovanih oblika gvožđa (Fe^{2+}), mangana (Mn^{2+}) i sulfida (S^{2-}). Oksidacijom gvožđa i mangana formiraju se manje rastvorna jedinjenja $\text{Fe}(\text{OH})_3$ i MnO_2 , koja se uklanjaju iz vode tokom procesa bistrenja i filtracije. Nerastvorni oblici jedinjenja gvožđa i mangana nepoželjni su jer u vodovodu stvaraju taloge crne boje (MnO_2) i boje rđe ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), koji izazivaju fleke na odeći tokom pranja;
- oksidacija (razgradnja) jedinjenja koja utiču na boju, ukus i miris vode;
- oksidacija fenolnih jedinjenja, pesticida i drugih postojanih organskih molekula;
- oksidacija organskih materija, smanjuje se potencijal stvaranja sporednih proizvoda dezinfekcije tokom naknadnog hlorisanja vode.

Predozonizacijom se, usled biocidnog dejstva ozona, sprečava i rast algi i razvoj biofilma u postrojenju za pripremu vode.

Procesom glavne ozonizacije, koji se primenjuje nakon bistrenja i pre filtracije vode, vrši se oksidacija neorganskih i organskih jedinjenja koja nisu oksidisana u predozonizaciji. Ozon rastvoren u vodi izaziva i fizičko-hemijsko oštećenje genetskog materijala patogenih mikroorganizama.

Aktivni ugalj je porozni materijal sa velikom aktivnom površinom za adsorciju zagađivača. Granulisani aktivni ugalj (GAU) se dobija od organskih materijala sa visokim sadržajem ugljenika, kao što su koštice, kokos, orah, drvo, lignit i ugalj. Formiranje porozne ugljenične strukture se obezbeđuje pirolizom na temperaturama od 600 do 900°C. Aktivacija aktivnog uglja se postiže oksidacijom vodenom parom ili ugljen-dioksidom na temperaturama od 600 do 1200°C, pri čemu se kiseonik vezuje za površinu ugljenika. Prečnik čestica granulisanih aktivnog uglja je od 1,2 do 1,6 mm. Dimenzije unutrašnjih pora GAU se deli u tri kategorije:

- makropore prečnika preko 50 nm;
- mezopore prečnika između 2 i 50 nm;
- mikropore prečnika manjeg od 2 nm.

Adsorpcijom u kolonama sa granulisanim aktivnim ugljem (GAU) iz vode se uklanjaju:

- organski molekuli koji su nosioci neprijatnog ukusa i mirisa;
- rastvorena sintetička organska jedinjenja (uključujući pesticide, fenole, hlorovane ugljovodonike);
- prirodne organske materije koje vodi daju žućkastu boju i mogu da reaguju sa hlorom formirajući sporedne proizvode dezinfekcije;
- teški metali.

Granulisani aktivni ugalj se regeneriše zagrevanjem na 800°C i sagorevanjem adsorbovanih zagađivača.

6.2.2. Podzemne vode

Podzemne vode imaju relativno stabilan kvalitet i zahtevaju jednostavnija tehnološka rešenja obrade vode. Konvencionalan postupak pripreme vode za piće iz podzemnih resursa sastoji se od sledećih procesa obrade:

- aeracije;
- filtracije;
- dezinfekcije hlorisanjem vode.

Fontanskom aeracijom voda se raspšava u vazduhu povećavajući kontaktnu površinu između vazduha i kapljica vode. Aeracijom vode potiče se:

- oksidacija redukovanih oblika gvožđa (Fe^{2+}) i mangana (Mn^{2+});
- uklanjanje rastvorenih gasova kao što su ugljen-dioksid (CO_2) i vodonik-sulfid (H_2S).

Oksidacijom gvožđa i mangana formiraju se manje rastvorna jedinjenja $\text{Fe}(\text{OH})_3$ i MnO_2 , koja se uklanjaju iz vode filtracijom. Ugljen-dioksid se lako rastvara u vodi i formira ugljenu kiselinu, čime se povećava kiselost vode (snižava se pH vrednost), što može da izazove koroziju cevi u distributivnom sistemu. Vodonik-sulfid ima karakterističan neprijatan miris na pokvarena jaja.

6.3. Literatura

Abbaszadegan, M., Hasan, M. N., Gerba, C. P., Roessler, P. F., Wilson, B. R., Kuennen, R., i Van Dellen, E. (1997). The disinfection efficacy of a point-of-use water treatment system against bacterial, viral and protozoan waterborne pathogens. *Water Research*, 31(3), 574-582.

Bukhari, Z., Hargy, T. M., Bolton, J. R., Dussert, B., & Clancy, J. L. (1999). Medium-pressure UV for oocyst inactivation. *Journal-American Water Works Association*, 91(3), 86-94.

Cabaj, A., Sommer, R., i Schoenen, D. (1996). Biodosimetry: model calculations for UV water disinfection devices with regard to dose distributions. *Water Research*, 30(4), 1003-1009.

Meng, Q. S., i Gerba, C. P. (1996). Comparative inactivation of enteric adenoviruses, poliovirus and coliphages by ultraviolet irradiation. *Water Research*, 30(11), 2665-2668.

Naunovic, Z., Lim, S., i Blatchley, E. R. (2008). Investigation of microbial inactivation efficiency of a UV disinfection system employing an excimer lamp. *Water research*, 42(19), 4838-4846.

Zakonodavstvo

Zakon o vodama (2010). Službeni glasnik Republike Srbije br. 30/10.

Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće (1998, 1999). Službeni glasnik Republike Srbije br. 42/98, 44/99.

7 Prečišćavanje otpadnih voda

Otpadne vode su vode sa izmenjenim prirodnim fizičkim, hemijskim i/ili biološkim osobinama kao rezultat ljudske aktivnosti (Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje, 2011, 2012). Koncentracije zagađujućih materija u otpadnim vodama se obično izražavaju u miligramima zagađujuće materije po litru otpadne vode (mg/L).

Prema poreklu otpadne vode se dele na:

- komunalne;
- tehnološke (industrijske);
- atmosfenske.

Komunalne otpadne vode su upotrebljene vode iz domaćinstava, ustanova, bolnica i ugostiteljskih objekata.

Tehnološke otpadne vode nastaju u različitim tehnološko-proizvodnim procesima. Pored različitih toksičnih materija ove vode mogu imati i visoke temperature. Temperatura utiče na odvijanje većine fizičko-hemijskih i bioloških procesa u vodenoj sredini i njene ekstremne vrednosti se smatraju zagađenjem. Tehnološke otpadne vode se moraju prethodno prečistiti pre ispuštanja u sistem javne kanalizacije ili direktno u recipijent, u skladu sa Uredbom o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje (2011, 2012). *Recipijenti* su prirodni i veštački vodotokovi, jezera, akumulacije i zemljište, u koje se ispuštaju otpadne vode.

Atmosfenske otpadne vode su padavine koje se sa površine terena spiraju i odnose različite materije. Kvalitet padavina može biti narušen još u atmosferi jer kišne kapi apsorbuju čestice aerosola, prašine i molekule različitih gasova i isparenja koja dospevaju u vazduh.

Otpadne vode se kanizacionom mrežom sprovode do postrojenja za prečišćavanje pre ispuštanja vode u recipijent. Ova mreža je izgrađena od sistema ukopanih cevi i kolektora koji otpadnu vodu sprovode od kućnih i drugih kanizacionih instalacija i kišnog slivnika do recipijenta. Atmosfenske i komunalne otpadne vode se mogu prikupljati zajedničkom kanalskom mrežom i takav sistem se zove opšti (mešoviti) kanizacioni sistem. Ukoliko su cevi koje transportuju otpadne vode atmosfenskog porekla odvojene od kanalske mreže za transport komunalnih otpadnih voda, govori se o

separacionom kanalizacionim sistemu. Savremena naselja imaju separacione sisteme kanalisanja. U opštim sistemima kanalisanja atmosferske vode smanjuju efikasnost rada postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda usled razblaživanja koncentracija zagađivača i većeg hidrauličkog opterećenja.

Odgovarajuće prečišćavanje otpadnih voda je obrada otpadnih voda bilo kojim postupkom i/ili načinom kojim se postižu zahtevane granične vrednosti emisije (GVE), odnosno ne narušava dobar status površinske vode nakon ispuštanja u recipijent (Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje, 2011, 2012).

Postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV) prečišćavaju otpadnu vodu na nivo bezbednog ispuštanja u životnu okolinu (vodno telo, tj. recipijent). Procesi u komunalnim PPOV se baziraju na imitaciji prirodnih procesa samoprečišćavanja u rekama i jezima (recipijentima). Uloga PPOV je da ubrza i kontroliše prirodne procese, jer ispuštanje neprečišćenih voda u recipijente najčešće prevazilazi prirodni samoprečišćavajući potencijal vodnih tela.

U prirodnim recipijentima bakterije i drugi mikroorganizmi se hrane prisutnim biorazgradivim organskim materijama. Pri asimilovanju organskih materija dolazi do stvaranja biomase (novih mikroorganizama) i ugljen-dioksida. Tokom asimilacije mikroorganizmi troše kiseonik.

Ako u recipijent dospe manja količina neprečišćenih otpadnih voda, mikroorganizmi će razgraditi organske materije uz istovremeno odigravanje prirodne reaeracije (obogaćivanje kiseonikom) recipijenta. Problemi nastaju kada se veće količine neprečišćenih otpadnih voda ispuste u prirodne recipijente. Tada mikroorganizmi usled razgradnje organskih materija mogu da iscrpe raspoložive količine rastvorenog kiseonika koji je neophodan za opstanak riba i drugih vodenih organizama.

Usled rasta populacije i sve većeg zagađenja otpadnih voda priroda ne može da prihvati nastale količine otpadnih voda bez negativnih posledica po životnu sredinu. PPOV se koriste kao dopuna, da pomognu prirodnim kapacitetima samoprečišćavanja. U PPOV mikroorganizmi razgrađuju organske materije u kontrolisanim uslovima. Otpadne vode sadrže i supstance koje mikroorganizmi ne mogu u potpunosti da uklone, kao što su nutrijenti (azot i fosfor), teški metali i sintetička organska jedinjenja. Ove supstance se uklanjaju tercijarnim procesima u PPOV, nakon biološke

obrade otpadnih voda. Dezinfekcija na kraju procesne linije inaktivira patogene mikroorganizme.

Postupci prečišćavanja vode u PPOV se dele na: prethodno prečišćavanje vode, primarne, sekundarne i tercijarne postupke i dezinfekciju.

Prethodno prečišćavanje voda (predtretman) je uklanjanje grubog suspendovanog i plivajućeg materijala, inertnog materijala, plivajućeg ulja i ujednačavanje protoka otpadne vode i koncentracije zagađujućih materija u otpadnim vodama (Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje, 2011, 2012). Prethodni tretman podrazumeva uklanjanje grubog, suspendovanog plivajućeg materijala pomoću rešetki i sita na ulazu otpadne vode u PPOV. Uklanjanjem krupnog materijala smanjuje se mogućnost začepijavanja cevni i kanalskih veza u postrojenju i smanjuje habanje opreme. Širina otvora između šipki rešetke je od 15 do 75 mm. Sita su žičane mreže ili perforirane ploče sa otvorima manjim od 6 mm (Ljubisavljević, Đukić i Babić, 2004). Ukoliko do postrojenja dolazi voda iz opšteg sistema kanalizacije, nakon rešetki i sita primenjuju se peskolovi, u kojima se taloži pesak, šljunak i druge inertne suspendovane materije koje imaju veliku brzinu taloženja. Flotacijom se uklanjaju masti i ulja, a retenzionim bazenima ujednačava se protok otpadne vode pre ulaza u PPOV.

Primarno prečišćavanje je prečišćavanje otpadnih voda fizičkim i/ili hemijskim postupkom koji obuhvata taloženje suspendovanih materija ili druge postupke u kojima se BPK₅ ulaznih otpadnih voda smanjuje za najmanje 20% pre ispuštanja, a ukupne suspendovane materije ulaznih otpadnih voda se smanjuju za najmanje 50% (Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje, 2011, 2012).

Primarno prečišćavanje se obično odvija u betonskom bazenu koji se naziva primarni taložnik. U primarnom taložniku se pod hidraulički mirnim uslovima i malom brzinom vode gravitaciono talože nerastvorne organske i neorganske materije. Taloženje se može pospešiti dodavanjem koagulanata. Formira se talog ili primarni mulj, koji se dalje obrađuje procesima zgušnjavanja, anaerobne digestije uz iskorišćenje biogasa (kada se meša sa sekundarnim muljem) i/ili odvajanjem vode (dehidratacije). Nakon obrade mulj se svrsishodno koristi ili deponuje na sanitarnim deponijama. Filtrat

izdvojen iz mulja u procesu zgušnjavanja se vraća u liniju prerade otpadne vode pre primarnog taložnika. U primarnim taložnicama uklanjaju se i masti i ulja koja isplivavaju na površinu otpadne vode.

Ostaci od prečišćavanja komunalnih otpadnih voda se prema Uredbi o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje (2011, 2012) mogu koristiti u poljoprivredne i druge svrhe (npr. za prekrivanje deponija, unapređenje izgleda pejzaža) ukoliko je sastav propisanih organskih i neorganskih supstanci ispod graničnih vrednosti izraženih kao miligram supstance po kilogramu mase suvog ostatka od prečišćavanja (mg/kg). Pre upotrebe nastali ostaci od prečišćavanja komunalnih otpadnih voda moraju se tretirati tako da se smanji i broj patogena i prilagode osobinama za odgovarajuću namenu. Tretman ostataka koji potiču od prečišćavanja tehnoloških otpadnih voda se sprovodi u skladu sa zakonom kojim se uređuje upravljanje otpadom.

Sekundarno prečišćavanje je prečišćavanje otpadnih voda postupkom koji uključuje biološko prečišćavanje sa sekundarnim taloženjem ili drugi postupak kojim se uklanja 70–90% BPK₅ ulaznih otpadnih voda i 75% HPK ulaznih otpadnih voda (Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje, 2011, 2012). HPK ili hemijska potrošnja kiseonika je hemijski potrebna količina kiseonika za oksidaciju organskih komponenata i neorganskih soli, a izražava se potrošnjom kiseonika (O₂) u mg/L (Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje, 2011, 2012). Prisutnost biološki nerazgradivih materija u otpadnoj vodi manifestuje se većom vrednošću HPK u odnosu na BPK. U biološki nezagradive komponente spadaju celuloza, lignin, tanin i većina sintetičkih organskih jedinjenja. Odnos HPK/BPK₅ je karakteristika svake otpadne vode i utvrđuje se laboratorijskim putem.

Sekundarni ili biološki tretman se najčešće odvija u bazenima sa prinudnom aeracijom. Dovod kiseonika je neophodan da bi se obezbedili uslovi za ubranu biološku asimilaciju organske materije iz vode. Aerobni heterotrofni organizmi koriste organsku materiju iz vode i ugrađuju je (asimiluju) u svoju biomasu. Razvoj biomase dovodi do obrazovanja bioloških flokula koje se nazivaju aktivni mulj. Flokule aktivnog mulja imaju apsorpciono dejstvo i pri taloženju vezuju i uklanjaju nerastvorne organske i

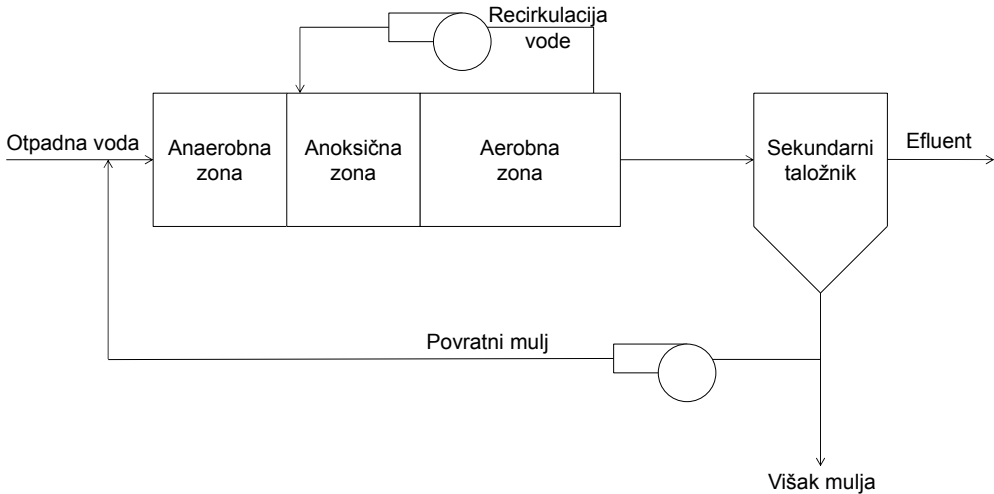
neorganske materije iz otpadne vode, uključujući i biološki teško razgradive i toksične materije.

Voda iz aeracionih bazena se upušta u sekundarne taložnike gde se aktivni mulj taloži, a izbistrena voda (efluent) preliva i dalje odvodi na tercijarni tretman, dezinfekciju ili direktno u recipijent. Deo izdvojenog mulja se izdvaja iz linije prečišćavanja otpadne vode, a deo se vraća u aeracione bazene radi održavanja potrebne populacije mikroorganizama.

Modifikovanim procesima biološkog tretmana mogu se značajno smanjiti koncentracije makronutrijenata, azota i fosfora, u otpadnoj vodi. Pravilnim projektovanjem i rukovođenjem biološkim procesom prečišćavanja sa aktivnim muljem, nitrifikacijom, denitrifikacijom i biološkim ukljanjanjem fosfora mogu se zadovoljiti standardi (granične vrednosti emisije) za efluent u pogledu koncentracije ukupnog azota i fosfora od 10 mg/L i 1 mg/L respektivno. Sekundarni tretman se odvija fazno, tako što formiraju tri zone:

- anaerobna zona (bez rastvorenog kiseonika);
- anoksična zona (odsustvo kiseonika, prisustvo nitrata);
- aerobna zona (prisustvo rastvorenog kiseonika).

Sistem za uklanjanje azota i fosfora sastoji se od anaerobnog rezervoara koji je postavljen ispred anoksičnog i aerobnog rezervoara. Ovakav raspored omogućava razvoj različitih (aerobnih i anaerobnih) mikroorganizama koji imaju svoju ulogu u procesima transformacije jedinjenja azota i apsorpcije fosfora. Šematski dijagram zonskog rasporeda u okviru sekundarnog tretmana za simultano ukljanjanje azota i fosfora prikazan je na slici 7.1.



Slika 7.1. Šematski dijagram zonskog rasporeda u okviru sekundarnog tretmana za simultano uklanjanje azota i fosfora

Azot je u neprečišćenoj otpadnoj vodi prisutan kao organski (urea) i amonijačni azot (NH_3 , NH_4^+). Deo organskog azota se u kanalizacionom sistemu prevodi u amonijak pre ulaza otpadne vode u PPOV, amonifikacijom (degradacijom anaerobnim bakterijama). Sekundarni tretman u PPOV, koji podrazumeva simultano uklanjanje azota i fosfora, takav je da se otpadna voda prvo izlaže anaerobnim, a zatim anoksičnim i aerobnim uslovima. U anaerobnim uslovima dolazi do bakterijske dekompozicije organskog azota do amonijaka. U aerobnim uslovima i u prisustvu grupe bakterija koja se naziva nitrifikatori, amonijak se oksidiše do nitrata (NO_3). Nitrati su manje štetni jer ne troše rastvoren kiseonik u prirodnim recipijentima i nisu toksični za ribe. Ipak, nitrati mogu da izazovu eutrofikaciju i poželjno je dodatno smanjiti koncentracije nitrata u efluentu konverzijom nitrata u elementarni azot, denitrifikacijom. Denitrifikacija se odigrava u anoksičnim uslovima (u odsustvu kiseonika i u prisustvu nitrata) i uz dejstvo grupe bakterija koje se nazivaju dentrifikatori. Elementarni azot se izdvaja iz sistema kao gas azot i na ovaj način se biološkim putem smanjuje koncentracija azota u otpadnim vodama, koja može da izazove eutrofikaciju u recipijentu. Ovo se praktično postiže recirkulacijom otpadne vode iz aerobne zone i ponovnim uvođenjem u anoksičnu zonu.

Fosfor je u neprečišćenoj otpadnoj vodi prisutan u obliku:

- ortofosfata (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4), koji čine najveći udeo ukupnog fosfora u neprečišćenim otpadnim vodama;
- polifosfata (kompleksni molekuli sa dva ili više atoma fosfora koji se sporom hidrolizom prevode u ortofosfate);
- fosfora vezanog u organskim jedinjenjima (poreklom iz tehnoloških otpadnih voda).

Uklanjanje ili smanjenje koncentracije fosfora se vrši radi kontrole procesa eutrofikacije, jer je fosfor limitirajući nutrijent u većini slatkovodnih sistema. Vodeni organizmi mogu direktno koristiti fosfor u obliku ortofosfata za svoje metaboličke aktivnosti bez prethodne razgradnje. U anaerobnim uslovima sekundarnog tretmana otpadnih voda specifični mikroorganizmi oslobađaju fosfor da bi u aerobnim uslovima apsorbirali više rastvorenog neogranskog fosfora nego što su prethodno oslobodili i više nego što im je biološki neophodno. Ovi specifični mikroorganizmi se nazivaju organizmi koji akumuliraju fosfor (*eng. phosphorous accumulating organisms – PAOs*). Izdvajanjem ovih mikroorganizama iz vodene faze taloženjem smanjuje se koncentracija ukupnog fosfora u efluentu. Održavanje potrebne populacije organizama koji akumuliraju fosfor u anaerobnoj zoni se postiže recirkulacijom dela mulja iz sekundarnog taložnika do anaerobne zone sekundarnog tretmana.

Fosfor se može dodatno ukloniti i hemijskom precipitacijom uz dodavanje koagulanta. U prisustvu koagulanta, koji se može dodavati pre primarnog taložnika ili sekundarnog tretmana (pre ili posle bazena sa aktivnim muljem), fosfor se prevodi u nerastvoran taložni oblik.

Tercijarno prečišćavanje je prečišćavanje otpadnih voda postupkom kojim se uz sekundarno prečišćavanje dodatno uklanja fosfor za 80% i/ili azot za 70–80% (Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje, 2011, 2012). Tercijarni tretman je vrlo važan ukoliko se prečišćena otpadna voda (efluent) ispušta u recipijente podložne eutrofikaciji. Primer tercijarnog tretmana je filtracija vode kroz peščane filtre sa prethodnim dodatkom hemikalija koje podstiču precipitaciju jedinjenja fosfora i suspendovanih materija. Dobro projektovanim sistemima tercijarne filtracije mogu se postići vrlo niske izlazne koncentracije ukupnog fosfora.

Sistemi projektovani sa simultanim uklanjanjem azota i fosfora primenom bioloških, hemijskih i fizičkih metoda mogu da postignu izlazne koncentracije ukupnog azota i ukupnog fosfora manje od 5 mg/L i 0,1 mg/L respektivno (Udruženje za vodu i životnu sredinu, 2009).

Prema Uredbi o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vodi i rokovima za njihovo dostizanje (2011, 2012), dezinfekcija otpadne vode je obavezna ukoliko se efluent ispušta u površinske vode koje se koriste za kupanje i rekreaciju, vodosnabdevanje i navodnjavanje. Dezinfekcija je poslednji proces pre ispuštanja efluenta u recipijent. U prošlosti najčešće se primenjivalo hlorisanje vode gasnim hlorom ili rastvorom natrijum-hipohlorita (NaOCl). Pre ispuštanja hlorisane vode u recipijent rezidualni hlor prisutan u efluentu se mora ukloniti usled toksičnog dejstva hlora na vodene organizme. Dehlorisanje se vrši dodavanjem jedinjenja sumpora (SO₂) pri čemu se stvaraju manje toksične forme hlora. Međutim, sporedni proizvodi dezinfekcije (organohlorna jedinjenja) koji se mogu formirati pri hlorisanju vode se ne uklanjaju procesom dehlorinacije. Ova jedinjenja su štetna po zdravlje ljudi, postojana i bioakumulativna, što može imati dugoročne negativne efekte na korišćenje voda recipijenta za različite namene.

Usled problema koji se javljaju pri hlorisanju efluenta sve češće se primenjuje dezinfekcija efluenta pomoću ultraljubičastog zračenja.

7.1. Literatura

Ljubisavljević, D., Đukić, A., i Babić, B. (2004). *Prečišćavanje otpadnih voda*. Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet.

Udruženje za vodu i životnu sredinu (Water Environment Federation – WEF) (2009). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants* (5th ed.). Manual of Practice No 8. Alexandria, VA, USA: WEF Press.

Zakonodavstvo

Zakon o vodama (2010). Službeni glasnik Republike Srbije br. 30/10.

Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje (2011, 2012). Službeni glasnik Republike Srbije br. 67/11, 48/12.

8 Aerozagađenje

Atmosfera je Zemljin gasoviti omotač koji razdvaja Zemlju od vakuuma svemira i sastavljena je od različitih slojeva. Svaki sloj ima svojstvene termičke karakteristike, hemijski sastav i gustinu. Atmosferu čine sledeći slojevi:

- troposfera (prostire se od Zemljine površine do visine od 7 km iznad polova i do 20 km iznad ekvatora);
- stratosfera (proteže se do 50 km iznad Zemljine površine);
- mezosfera (proteže se do 80 km iznad Zemljine površine);
- termosfera (proteže se do 320 km iznad Zemljine površine).

Troposfera je sloj u kome se odvija život i odigravaju vremenske promene. Sloj atmosfere koji sadrži ozon (O_3) nalazi se u nižem delu stratosfere. Ozonski omotač sprečava da solarna ultravioletna (UV) radijacija prodre do nižih slojeva atmosfere. Troposfera, stratosfera, mezosfera i termosfera imaju ulogu zaštinog omotača jer održavaju temperaturu na Zemlji van ekstrema (ledenih ili previsokih temperatura).

Vazduh je složena mešavina raznih hemijskih jedinjenja. Primarne komponente su azot (N_2) i kiseonik (O_2). Oko 99% vazduha čine azot (78%) i kiseonik (21%), dok preostali deo čine ugljen-dioksid (CO_2), metan (CH_4), vodonik (H_2), argon (Ar) i helijum (He).

Prirodne pojave kao što su erupcije vulkana, šumski požari i polen zagađuju vazduh. Međutim, kada se govori o zagađenju vazduha, misli se na zagađenje koje je nastalo usled antropogenih aktivnosti. Antropogeni izvori zagađivanja mogu biti stacionarni i pokretni. Primeri stacionarnih izvora su postrojenja za sagorevanje i industrijska postrojenja. Postrojenje za sagorevanje je tehnički sistem (ložište) u kome se gorivo oksiduje u cilju korišćenja na taj način proizvedene toplote (Zakon o zaštiti vazduha, 2009). Pokretni izvor zagađivanja je motor sa unutrašnjim sagorevanjem ugrađen u transportno sredstvo ili radne mašine (Zakon o zaštiti vazduha, 2009).

Ocenjivanje kvaliteta vazduha vrši se obavezno u pogledu koncentracija sumpor-dioksida, azot-dioksida i oksida azota, suspendovanih čestica, olova, benzena i ugljen-monoksida, prizemnog ozona, arsena, kadmijuma, nikla i benzo(a)pirena (Zakon o zaštiti vazduha, 2009). Loš kvalitet vazduha može da izazove akutne (kratkoročne) i hronične (dugoročne) zdravstvene efekte. Akutni efekti obično se ispoljavaju odmah i

moгу biti reverzibilni kada prestane izlaganje. Akutni efekti mogu biti: iritacija očiju, glavobolja i mučnina. Hronični efekti se ne ispoljavaju odmah po izlaganju i često nisu reverzibilni. Hronični efekti mogu biti: smanjeni kapacitet pluća i rak pluća. U grupu visokog rizika spadaju starije osobe, deca, trudnice i hronični bolesnici (srčane bolesti i bolesti disajnih puteva). Deca spadaju u visoko rizičnu grupu jer su aktivnija napolju i njihova pluća su u razvoju.

8.1. Sumpor-dioksid i oksidi azota

Sumpor-dioksid (SO_2) je gas koji se stvara pri reakciji sumpora sa kiseonikom na visokim temperaturama tokom sagorevanja fosilnih goriva, prerade nafte ili topljenja ruda i metala. Ključni antropogeni doprinosi ambijentalnim koncentracijama SO_2 u Srbiji i Evropskoj uniji potiču od energetskog sektora, tj. sagorevanja fosilnih goriva koja sadrže sumpor u termoenergetskim postrojenjima (Evropska agencija za životnu sredinu, 2013; Agencija za zaštitu životne sredine, 2013). U Srbiji bitan uticaj, ali višestruko manji od dominantnog uticaja energetskog sektora, na emisije SO_2 ima drumski saobraćaj (Agencija za zaštitu životne sredine, 2013).

Epidemiološke studije pokazuju da SO_2 može da utiče na respiratorni sistem i funkcije pluća i da izaziva iritaciju očiju. Upala respiratornog trakta izaziva kašalj, lučenje sluzi, pogoršanje astme i hroničnog bronhitisa, i povećava sklonost ka infekcijama respiratornog trakta. Sumpor-dioksid može da izazove glavobolje, opštu nelagodnost i anksioznost.

Glavni efekt zagađenja vazduha sumpor-dioksidom je stvaranje kiselih kiša. Sumpor-dioksid se rastvara u kapljicama vode u atmosferi i stvara se sumporna kiselina (H_2SO_4), koja se taloži iz vazduha sa kišom ili snežnim padavinama. Sumpor-dioksid je i jedan od glavnih prekursora za formiranje $\text{PM}_{2.5}$ koje su povezane sa značajnim zdravstvenim efektima.

NO_x je uopštena formula za monoazotne okside, azot-monoksid (NO) i azot-dioksid (NO_2). Pri sagorevanju na visokim temperaturama u termoenergetskim postrojenjima i motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, reakcijom atmosferskog azota i kiseonika u plamenu nastaje smeša oksida azota, u kojoj je najzastupljeniji NO sa oko 95% učešća. Emitovan NO se u atmosferi dalje oksidiše do NO_2 . U Srbiji i EU najveće emitovane količine oksida azota potiču iz energetskog sektora (proizvodnje i distribucije

energije) i drumskog saobraćaja (Evropska agencija za životnu sredinu, 2013; Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije, 2013).

Oksidi azota (NO_x) utiču na respiratorni sistem. Kratkoročna izloženost oksidima azota može da dovede do neželjenih efekata po zdravlje poput promena u funkciji pluća kod visoko rizične populacije, dok dugoročno izlaganje može da dovede do ozbiljnijih efekata, kao što su povećana osetljivost na respiratorne infekcije. Epidemiološke studije su pokazale da su simptomi bronhitisa kod dece sa astmom izraženiji pri dugoročnoj izloženosti povećanim ambijentalim koncentracijama NO_2 . Smanjena funkcija pluća je takođe povezana sa azot-dioksidom pri koncentracijama koje su trenutno prisutne u gradovima Evrope i Severne Amerike (Evropska agencija za životnu sredinu, 2013). Oksidi azota mogu da utiču i na jetru, slezinu i krv.

U atmosferi oksidi azota (NO_x) reaguju sa isparljivim organskim jedinjenjima i dolazi do formiranja prizemnog ozona kroz niz lančanih reakcija. Oksidi azota se u atmosferi oksiduju do azotne kiseline (HNO_3). Kao i sumporna kiselina, azotna kiselina doprinosi nastajanju kiselih kiša, a doprinosi i eutrofikaciji prirodnih voda.

Atmosferske padavine uvek sadrže određene nečistoće. U atmosferi se nalaze kiseline poreklom od prirodnih procesa, kao što su:

- ugljena kiselina (H_2CO_3) koja nastaje rastvaranjem ugljen-dioksida poreklom iz prirodnih izvora;
- azotna kiselina (HNO_3) koja nastaje iz oksida azota poreklom od šumskih požara i iz zemljišta;
- sumporna kiselina (H_2SO_4) koja nastaje oksidacijom sumpornih gasova poreklom iz erupcija vulkana.

U atmosferi se nalaze i bazna jedinjenja, uključujući amonijak (NH_3) poreklom iz biosfere i kalcijum-karbonat (CaCO_3) poreklom iz suspendovane zemljane prašine. U prisustvu navedenih prirodnih nečistoća prirodne kiše imaju pH vrednost između 5 i 5,5, što se smatra blago kiselim rastvorom. Termin *kisele kiše* odnosi se na padavine sa pH vrednošću ispod 5 i nastaju kada je atmosfera zagađena primarno sumpor-dioksidom i oksidima azota poreklom iz antropogenih izvora. Visoki dimnjaci elektrana izgrađeni radi zaštite kvaliteta lokalnog vazduha ubrizgavaju sumpor-dioksid i okside azota visoko u atmosferu, gde su vetrovi jaki i omogućavaju transport ovih

jedinjenja na velike razdaljine, što dovodi do pojave kiselih kiša daleko od urbanih izvora zagađenja.

Kisele kiše rastvaraju kalcijum-karbonat (krečnjak), koji je baznog sastava, u građevinama i statuama i izazivaju koroziju metalnih konstrukcija. One smanjuju pH vrednost u slatkovodnim površinskim vodnim resursima, što dovodi do degradacije škrge riba i razgradnje njihovog karbonatnog kostura, rastvaraju toksične metale kao što je aluminijum u zemljištu i rečnim sedimentima, koji mogu biti otrovni za živi svet koji ih apsorbuje. Kisele kiše utiču i na povećano luženje nutrijenata, kao što su kalijum i magnezijum, iz zemljišta što šteti biljkama i smanjuje njihovu otpornost na suše, zagađenje vazduha i zaraze.

8.2. Suspendovane čestice

Suspendovane čestice (*eng. particulate matter – PM*) ili aerosoli su kvazistabilne male čestice u tečnom ili čvrstom agregatnom stanju, raspršene u vazduhu. Većina suspendovanih čestica nalazi se u donjoj troposferi gde im je vreme zadržavanja nekoliko dana. Iz atmosfere se uklanjaju kišom ili snegom ili gravitacionim taloženjem većih čestica. Neke čestice, kao što su čestice prašine, čađi i dima, dovoljno su velike ili tamne da se mogu videti. Druge čestice su jako sitne i pojedinačno se mogu videti samo pod elektronskim mikroskopom.

Suspendovane čestice se dele na dve frakcije: suspendovane čestice aerodinamičkog prečnika do 10 mikrometara (PM_{10}) i suspendovane čestice aerodinamičkog prečnika do 2,5 mikrometara ($PM_{2.5}$).

Suspendovane čestice u vazduh dospevaju usled prirodnih procesa kao što je disperzija morske soli, podizanja prašine i raznošenje polena tokom vetrovitih uslova. Suspendovane čestice takođe potiču od sagorevanja fosilnih goriva u termoelektranama, individualnog grejanja i iz izduvnih gasova motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Fine suspendovane čestice ($PM_{2.5}$) uglavnom nastaju usled prisustva gasovitih zagađujućih materija u atmosferi. Sumpor-dioksid, oksidi azota i amonijak u atmosferi podležu oksidaciji i transformaciji u vodenoj sredini koju čine oblaci, kapljice magle ili tečni filmovi na atmosferskim česticama. Usled ovih reakcija nastaju fino dispergovane čestice amonijum-nitrata (NH_4NO_3) i amonijum-sulfata ($(NH_4)_2SO_4$). Isparljiva organska jedinjenja takođe podležu transformaciji u

atmosfera i nastaju manje isparljiva organska jedinjenja koja mogu da opstanu kao gasovi ili da se kondenzuju kao čestice aerosola.

Usled svojih mikroskopskih veličina zagađujuće suspendovane materije kroz disajne puteve dospevaju u pluća i krvotok. Čestice prečnika manjeg od 0,1 mikrometar mogu da prodru i u mozak kroz nos (Breyse i dr., 2013). Inhalacija suspendovanih materija može da izazove ili pogorša kardiovaskularne i bolesti pluća, srčane napade i aritmije, utiče na centralni nervni i reproduktivni sistem i može da izazove rak. Ishod može biti prerana smrt.

8.3. Ugljen-monoksid

Ugljen-monoksid (CO) je gas koji nastaje usled nepotpunog sagorevanja ugljenika. U Srbiji i EU najznačajniji izvori emisija CO su drumski saobraćaj, toplane snage manje od 50 MW i individualno grejanje (Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije, 2013; Evropska agencija za životnu sredinu, 2013). Uvođenjem katalitičkih konvertora koji oksiduju CO do CO₂ značajno su smanjene emisije CO u EU poreklom od drumskog saobraćaja.

Ugljen-monoksid ulazi u telo kroz pluća. Vezuje se za hemoglobin u crvenim krvnim ćelijama, smanjujući njihovu sposobnost da prenose kiseonik do različitih delova tela. Može da izazove kardiovaskularne bolesti i oštećenje nervnog sistema. Takođe, može da izazove glavobolju, vrtoglavice i umor.

8.4. Benzen i benzo(a)piren

Benzen (C₆H₆) nastaje usled nepotpunog sagorevanja goriva. Benzen je aditiv za benzin, i 80–85% emisija benzena u EU potiču od drumskog saobraćaja (Evropska agencija za životnu sredinu, 2013). Drugi izvori benzena su individualno grejanje i prerada nafte, kao i rukovanje, distribucija i skladištenje benzina.

Uklanjanje benzena iz atmosfere odigrava se uglavnom putem fotohemijske degradacije. Ova degradacija doprinosi stvaranju prizemnog ozona. Benzen često može da opstane i nekoliko dana u atmosferi, što je dovoljno dug period da se transportuje na veće udaljenosti. Benzen doprinosi i formiranju organskih aerosola.

Inhalacija je dominantni put unosa benzena u organizam. Benzen je kancerogen. Najznačajniji neželjeni efekat dugoročnog izlaganja je oštećenje genetskog materijala ćelija, koje može da izazove rak. Može da izazove leukemiju i teratogene efekte, a utiče i na centralni nervni i imuni sistem.

Benzo(a)piren je policiklični aromatični ugljovodonik (*eng. polycyclic aromatic hydrocarbons – PAH*) i sastoji se od pet aromatičnih prstenova. Nalazi se u finim čestičim materijama koje potiču iz nepotpunog sagorevanja raznih goriva. Glavni izvori benzo(a)pirena u EU su spaljivanje otpada, proizvodnja koksa i čelika, vozila i individualno grejanje, naročito sagorevanje drva (Evropska agencija za životnu sredinu, 2013).

Prenatalno izlaganje policikličnim aromatičnim ugljovodonicima povezano je sa značajno smanjenom težinom novorođenčadi (Choi i dr., 2006) i negativnim uticajem na kognitivni razvoj male dece (Edwards i dr., 2010).

8.5. Prizemni ozon

Prizemni ozon je ozon koji se nalazi u najnižim slojevima troposfere (Zakon o zaštiti vazduha, 2009). Nastaje usled složenih hemijskih reakcija između oksida azota i isparljivih organskih jedinjenja u prisustvu sunčeve svetlosti. Supstance koje doprinose formiranju prizemnog ozona se nazivaju *prekursori* ozona (Zakon o zaštiti vazduha, 2009).

Isparljiva organska jedinjenja za koja se određuju maksimalne nacionalne emisije (*eng. Non-Methane Volatile Organic Compounds – NMVOC*) su sva organska jedinjenja koja potiču od ljudskih aktivnosti, osim metana, koja mogu da proizvode fotohemijske oksidante, reagujući sa oksidima azota u prisustvu sunčeve svetlosti (Uredba o graničnim vrednostima emisija zagađujućih materija u vazduh, 2010, 2011). Na kontinentalnom nivou metan (CH₄) i ugljen-monoksid (CO) takođe igraju ulogu u formaciji prizemnog ozona. Ozon i jedinjenja iz kojih nastaje se mogu preneti stotine kilometara od mesta nastanka, uzrokujući zagađenje daleko od mesta nastanka. Ozon je najzastupljenije jedinjenje u fotohemijskom smogu i spada u gasove sa efektom staklene bašte.

U Srbiji emisije NMVOC potiču od drumskog saobraćaja, proizvodnje i distribucije energije, poljoprivrede, upotrebe rastvarača i industrijskih proizvoda i toplana snage manje od 50 MW, kao i od individualnog grejanja (Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije, 2013). Najznačajnije

emisije NMVOC u EU potiču od upotrebe rastvarača i industrijskih proizvoda (Evropska agencija za životnu sredinu, 2013). Poljoprivreda je glavni sektor odgovoran za emisiju metana u EU, zatim slede upravljanje otpadom i energetske sektor.

Prizemni ozon je jako oksidirajuće sredstvo i može imati značajan efekat na ljudsko zdravlje i životnu okolinu. Prekomerna koncentracija ozona u vazduhu može dovesti do respiratornih problema, kao što su problemi u disanju, astma, smanjena funkcija pluća i druge bolesti pluća.

Visoki nivoi ozona mogu oštetiti biljke, narušiti reprodukciju i rast, što dovodi do smanjena prinosa poljoprivrednih useva, smanjenog rasta šuma i smanjenog biodiverziteta. Ozon smanjuje fotosintezu i biljnu apsorpciju ugljen-dioksida. Ozon takođe utiče na ubrzano propadanje zgrada.

8.6. Teški metali

Veći deo atmosferskih emisija arsena (As), kadmijuma (Cd), olova (Pb), žive (Hg) i nikla (Ni) posledica je različitih industrijskih aktivnosti i sagorevanja uglja. Iako je atmosferska koncentracija ovih metala niska, ona i dalje doprinosi taloženju i akumuliranju sadržaja teških metala u zemljištu, sedimentu i organizmima. Teški metali se ne razlažu i neki se bioakumuliraju. Postojanost teških metala i potencijal za prenos na velike razdaljine dovode do toga da atmosferska emisija teških metala utiče i na najudaljenija područja (SZO, 2007).

Izlaganje arsenu povezano je sa povećanim rizikom od raka kože i pluća. Iako arsen ne pripada grupi teških metala, uticaj arsena na zdravlje ljudi i životnu sredinu razmatra se zajedno sa ostalim teškim metalima usled njegove toksičnosti.

Kadmijum je povezan sa bubrežnim i koštanim oboljenjima i rakom pluća. Izlaganje olovu utiče na razvoj fetusa, beba i dece. Kod odraslih olovo izaziva visok pritisak.

Elementarna živa i njena neorganska jedinjenja su toksična, ali najviše pažnje se obraća na organska jedinjenja žive koja sadrže metil grupu i koja su biokumulativna. Konzumiranje predatorskih riba i drugih morskih plodova iz prirodnih voda zagađenih živom može predstavljati ozbiljan zdravstveni rizik za trudnice (odnosno za plod) i decu do 12 godina, čiji nervni sistem je

još u razvoju. Nikl ima kancerogena dejstva i utiče na respiratorni, imuni i endokrini sistem.

8.7. Supstance koje oštećuju ozonski omotač

Supstance koje oštećuju ozonski omotač su: hlorofluorougljenici, haloni, ugljen-tetrahlorid, 1,1,1-trihloroetan (metil-hloroform), metil-bromid, bromofluorougļjovodonici, hlorofluorougļjovodonici i bromohlorometan.

Stratosferski ozonski omotač štiti život na Zemlji od štetnog sunčevog zračenja u opsegu talasnih dužina ultraljubičastog (UV) spektra od 200 do 300 nm. Ovaj opseg zračenja oštećuje ćelije i izaziva opekotine i prerano starenja kože u malim dozama. U većim dozama može da izazove rak kože i oštećenje imunog sistema.

Godine 1974. hemičari Šervud Roland i Mario Molina identifikovali su glavnu pretnju ozonskom omotaču – rast atmosferske koncentracije antropogenih industrijskih hemikalija pod imenom hlorofluorougļjenici (*eng. chlorofluorocarbons – CFCs*), koji su u to vreme bili u širokoj upotrebi kao rashladni fluid u aerosolnim sprejevima i u proizvodnji plastične pene. CFC molekuli su inertni, akumuliraju se u troposferi i vremenom se transportuju do stratosfere, gde se fotolizom oslobađaju atomi hlora (Cl). Reaktivni atomi hlora kroz ciklične reakcije dovode do raspadanja molekula ozona i smanjenja debljine ozonskog omotača. Kasnije je utvrđeno da i jedinjenja broma doprinose uništavanju ozonskog omotača.

Primer smanjenja debljine ozonskog omotača je godišnja prolećna pojava ozonske rupe iznad Antartika od ranih osamdesetih godina 20. veka. Ozonska rupa predstavlja oblast u stratosferi sa niskim koncentracijama ozona. Današnji prolećni nivoi ozona iznad Antarktiku su upola manji od nivoa zabeleženih tokom šezdesetih godina. Devedesetih godina otkrivena je i prolećna ozonska rupa iznad Artika, ali ne toliko ekstenzivna kao na Antarktiku.

8.8. Gasovi sa efektom staklene bašte

Gasovi sa efektom staklene bašte su gasovi koji apsorbuju i re-emituju infracrveno zračenje i u atmosferu dospevaju kao posledica prirodnih procesa, ali i usled ljudskih aktivnosti (Zakon o zaštiti vazduha, 2009). U poglavlju 1.1.1. opisana je pojava globalnog zagrevanja koja nastje usled

akumulacije gasova sa efektom staklene bašte u atmosferi i koja utiče na klimatske uslove.

Gasovi sa efektom staklene bašte su ugljen-dioksid (CO_2), metan (CH_4), azot-suboksid (N_2O), fluorougljovodonici (*eng. hydrofluorocarbons – HFCs*), perfluorougljenici (*eng. perfluorinated compounds – PFCs*) i sumporheksafluorid (SF_6).

Ljudske aktivnosti kojima se podiže atmosferska koncentracija gasova staklene bašte uključuju:

- sagorevanje fosilnih goriva (emisija CO_2 i manjih količina CH_4 i N_2O);
- krčenje šuma (smanjuje se broj stabala koja vezuju CO_2 i oslobađa se CO_2 koji je vezan u njima);
- deponovanje otpada (CH_4) i prečišćavanje otpadnih voda (CH_4 , N_2O);
- stočarstvo (CH_4 , N_2O);
- gajenje pirinča (CH_4);
- upotreba đubriva (N_2O);
- industrijski procesi (HFC, PFC, SF_6).

U periodu od 1880. do 2012. godine prosečna kombinovana temperatura kopna i površine okeana je porasla za oko $0,85\text{ }^\circ\text{C}$ (Međuvladin panel za promenu klime, 2013). Svaka od poslednje tri decenije je sukcesivno bila toplija nego bilo koja prethodna decenija od 1850. godine (predindustrijsko doba). Na severnoj hemisferi period od 1983. do 2012. godine je verovatno najtopliji tridesetogodišnji period u poslednjih 1.400 godina. U periodu od 1901. do 2010. godine srednji nivo mora je porastao za 0,19 m. Atmosferska koncentracija ugljen-dioksida, metana i azot-suboksida su dostigle najviši nivo u poslednjih 800.000 godina. Atmosferska koncentracija ugljen-dioksida je porasla za 40% u odnosu na predindustrijsko doba, uglavnom usled sagorevanja fosilnih goriva i prenamene zemljišta (pretvaranja šuma u pašnjake i oranice). Okean je apsorbovao oko 30% emitovanog antropogenog ugljen-dioksida, izazivajući pad pH vrednosti okeanskih voda.

Nastavak emisije gasova staklene bašte može za posledicu imati dalji porast prosečne temperature na Zemlji. Promene prosečnih temperatura bi mogle da dovedu do učestalih pojava ekstremnih vremenskih događaja (suša, poplava i sl.), izmene režima padavina, ugrožavanja priobalnih područja usled povećanja nivoa mora i povećanje rizika od pojedinih

tropskih bolesti usled stvaranja novih staništa za razmnožavanje insekata koji prenose infektivne bolesti.

Sprečavanje i smanjenje zagađenja vazduha koje utiče na promenu klime sprovodi se (Zakon o zaštiti vazduha, 2009):

- razvojem i korišćenjem čistijih tehnologija kojima se sprečava ili smanjuje emisija gasova sa efektom staklene bašte;
- podsticanjem korišćenja obnovljivih izvora energije;
- podsticanjem energetske efikasnosti;
- aktivnostima kojima se povećava odstranjivanje gasova sa efektom staklene bašte iz atmosfere.

8.9. Kontrola zagađenja vazduha

Stacionarni izvori emisije, kao što su termoenergetska postrojenja, čeličane, livnice, rafinerije i cementare, ispuštaju zagađujuće materije u atmosferu u vidu čestica i gasova. Otpadni gasovi su gasovi ispušteni u vazduh, koji sadrže zagađujuće materije u čvrstom, tečnom ili gasovitom stanju (Uredba o graničnim vrednostima emisija zagađujućih materija u vazduh, 2010, 2011). Emisije otpadnih gasova kontrolišu se upotrebom širokog spektra uređaja i procesa za kontrolu zagađenja vazduha. Izbor odgovarajuće tehnologije za prečišćavanje otpadnih gasova određuju karakteristike otpadnih gasova i zahtevani stepen prečišćavanja prema Uredbi o graničnim vrednostima emisija zagađujućih materija u vazduh (2010, 2011). Karakteristike otpadnih gasova uključuju protok, temperaturu, vlažnost, korozivnost i reaktivnost, kao i specifičnosti zagađujućih materija (opseg veličina čestica, koncentracija zagađujućih materija).

Ponekad je moguće smanjiti emisiju zagađujućih materija kroz modifikaciju procesa u kome one nastaju, kontrolom procesa sagorevanja i upotrebom čistijih goriva. Međutim, u većini slučajeva potreban je dodatni oblik kontrole zagađenja vazduha, kao što je prečišćavanje otpadnih gasova u različitim uređajima pre njihovog ispuštanja u atmosferu. Često se koristi kombinacija više tipova uređaja u nizu da bi se postigao zahtevani stepen prečišćavanja vazduha. Među uobičajene vrste uređaja za prečišćavanje otpadnih gasova spadaju cikloni, skruberi, vrećasti filteri i elektrostatički taložnici (elektrofilteri).

Ciklon je jednostavan uređaj za uklanjanje većih čestica i može da radi na povišenim temperaturama. Cikloni se obično koriste za uklanjanje čestica prečnika većeg od 50 μm , ali moguće je postići efikasnost uklanjanja od 90% za čestice prečnika od 10 μm (Udruženje za upravljanje vazduhom i otpadom, 2007). Efikasnost uklanjanja zagađujućih materija eksponencijalno raste sa prečnikom čestica i padom pritiska kroz ciklon. Cikloni se često koriste za uklanjanje krupnijih čestica pre korišćenja tehnologija za tretman finijih frakcija zagađujućih materija.

Otpadni gasovi se uvode tangencijalno u odnosu na kružni poprečni presek ciklona, formirajući spiralni vrtlog unutar ovog uređaja. Vrtložno kretanje otpadnih gasova stvara centrifugalne sile. Usled inercije veće čestice zagađujućih materija se sudaraju sa zidom ciklona, klize niz zid i skupljaju se u levku na dnu ciklona. Čestice izdvojene iz otpadnih gasova se dalje tretiraju ili se odlažu na deponije.

Skruberi su uređaji u kojima se otpadni gasovi dovode u kontakt sa tečnošću (najčešće vodom). Prečišćavanje otpadnih gasova se odvija usled prelaska čestica i gasova u vodu i izdvajanjem nastale otpadne vode. Voda se ubrizgava na različite načine zavisno od konstrukcije skrubera. Skruberi su korisni u postrojenjima koja istovremeno emituju suspendovane čestice i gasove rastvorljive u vodi, kao što su termoenergetska postrojenja koja sagorevaju ugalj i postrojenja za proizvodnju cementa i asfalta. Pri odsumporavanju otpadnih gasova iz termoenergetskih postrojenja pored vode u skruber je potrebno ubrizgati suspenziju kalcijum-karbonata (CaCO_3) ili kalcijum-hidroksida (Ca(OH)_2) kao hemijski reagens. Pri reakciji sumpordioksida sa ovim reagensima u prisustvu vazduha stvara se kalcijum-sulfat (CaSO_4), poznat kao gips.

Skruberi se konstruišu tako da omogućе što bolje mešanje otpadnih gasova i tečnosti koja se ubrizgava. U venturi skruberu otpadni gasovi prolaze kroz suženje ispred koga se ubrizgava tečnost. Usled postojanja suženja dolazi do povećanja brzine otpadnih gasova i tečnosti i njihovog turbulentnog mešanja. Nakon suženja kapljice vode koje su apsorbivale čestice zagađujućih materija sjedinjuju se u veće kapljice i talože u levak na dnu skrubera. Venturi skruberi se primenjuju za uklanjanje čestica prečnika od 5 do 10 μm . Nedostatak primene skrubera je stvaranje otpadnih voda koje se moraju dalje prečistiti.

Vrećasti filteri rade po istom principu kao i kućni usisivači. Otpadni gasovi prolaze kroz porozni filtracioni materijal, na čijoj površini se zadržavaju. Izdvajanjem čestica na površini filtracionog materijala stvara se sloj zadržanih čestica ili *pogača*, koja doprinosi povećanju efikasnosti procesa filtracije otpadnih gasova. Rastom debljine pogače dolazi do pada pritiska filtracije i u određenom trenutku pogača se mora ukloniti pulsiranjem vrećastog filtera ili produvanjem vazduha u suprotnom smeru od smera strujanja otpadnih gasova. Izdvojene čestice pri tome padaju u levak na dnu uređaja.

Filtracioni materijal mora biti postojan na najvećim očekivanim temperaturama otpadnih gasova i kompatibilan sa sadržajem izduvnih gasova. Kao filtracioni materijali koriste se pamuk, vuna, poliester, teflon, keramičke i mineralne materije i preden nerđajući čelik.

Vrećasti filteri se koriste za prečišćavanje otpadnih gasova iz termoenergetskih postrojenja, čeličana, livnica i drugih industrijskih procesa. Najčešće se koriste za ukljanjanje čestica prečnika od 1 do 100 μm .

Elektrostatički taložnici se sastoje od niza paraleleno postavljenih pozitivno naelektrisanih ploča, između kojih se nalaze negativno naelektrisane elektrode. Strujanjem otpadnog gasa između ploča dolazi do naelektrisanja čestica pod uticajem elektroda. Pozitivno naelektrisane ploče privlače negativno naelektrisane čestice koje se na njima talože, grupišu i klize niz ploče do levka na dnu uređaja, ponekad potpomognute mehaničkim otresanjem ploča. Elektrostatičkim taloženjem ukljanjanju se vrlo sitne čestice prečnika ispod 1 μm . Ovi uređaji se koriste za prečišćavanje otpadnih gasova termoenergetskih postrojenja, čeličana, fabrika papira, topionica, cementara i rafinerija nafte.

Pri potpunom sagorevanju benzina i dizel goriva u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem nastaju voda i ugljen-dioksid. U realnosti sagorevanje goriva je nepotpuno i pored vode i ugljen-dioksida u vazduh se emituju i nesagoreni ugljovodonici, ugljen-monoksid, oksidi azota i sumora i isparljiva organska jedinjenja. Redukcija emisije ovih zagađujućih materija iz pokretnih izvora zagađivanja se ostvaruje ugradnjom katalitičkih konvertora u izduvni sistem vozila. Katalitički konvertor čini keramička ili metalna noseća struktura u obliku saća preko koje se nanosi sloj aluminijum-oksida u kome su suspendovani katalitički materijali. Uloga aluminijum-oksida je da formira poroznu, nepravilnu strukturu koja povećava aktivnu površinu, tj.

površinu koja je na raspolaganju da reaguje sa zagađujućim materijama iz izduvnih gasova. Katalizatori su plemeniti metali, platina, paladijum i rodijum, koji se zajedno koriste da bi se postigla trostruka konverzija:

- redukcija oksida azota do elementarnog azota;
- oksidacija ugljen-monoksida do ugljen-dioksida;
- oksidacija nesagorenih ugljovodonika do ugljen-dioksida i vode.

Kod dizel-motora, dodatni filter zadržava čestice čađi iz izduvnih gasova.

8.10. Literatura

Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije (2013). *Izveštaj o stanju životne sredine u Republici Srbiji za 2012. godinu*. Beograd, Srbija: Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine Republike Srbije.

Breyse, P. N., Delfino, R. J., Dominici, F., Elder, A. C., Frampton, M. W., Froines, J. R., ... i Wexler, A. S. (2012). US EPA particulate matter research centers: summary of research results for 2005–2011. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 6(2), 333–355.

Choi, H., Jedrychowski, W., Spengler, J., Camann, D. E., Whyatt, R. M., Rauh, V., ... i Perera, F. P. (2006). International studies of prenatal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and fetal growth. *Environmental health perspectives*, 114(11), 1744–1750.

Edwards, S. C., Jedrychowski, W., Butscher, M., Camann, D., Kieltyka, A., Mroz, E., ... i Perera, F. (2010). Prenatal exposure to airborne polycyclic aromatic hydrocarbons and children's intelligence at 5 years of age in a prospective cohort study in Poland. *Environmental health perspectives*, 118(9), 1326–1331.

Evropska agencija za životnu sredinu (European Environment Agency – EEA) (2013). *Air quality in Europe – 2013 report*. EEA Report No 9/2013. Copenhagen, Denmark: EEA.

Međuvladin panel za promenu klime (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) (2013). Summary for Policymakers. In Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.

Svetska zdravstvena organizacija – SZO (World Health Organization – WHO) (2007). Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution. Joint WHO/Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution. Copenhagen, Denmark: WHO.

Udruženje za upravljanje vazduhom i otpadom (Air & Waste Management Association – A&WMA) (2007). *Fact Sheet: Air Pollution Emission Control Devices for Stationary Sources*. Pittsburgh, PA, USA: A&WMA.

Zakonodavstvo

Zakon o zaštiti vazduha (2009). Službeni glasnik Republike Srbije br. 36/09.

Uredba o graničnim vrednostima emisija zagađujućih materija u vazduh (2010, 2011). Službeni glasnik Republike Srbije br. 71/10 i 06/11.

9 Energetski resursi

Prirodni resursi se mogu podeliti na obnovljive i neobnovljive. Obnovljivi izvori energije (OEI) su izvori energije koji se nalaze u prirodi i obnavljaju se u celosti ili delimično, posebno energija vodotokova, vetra, neakumulirana sunčeva energija, biomasa i geotermalna energija (Nacionalna strategija održivog korišćenja prirodnih resursa i dobara, 2012). Fosilna goriva (nafta, gas, uglj) su neobnovljivi izvori energije.

9.1. Fosilna goriva

Fosilna goriva su nastala dekompozicijom biljaka i životinja i delovanjem toplote i pritiska unutar Zemljine kore tokom više miliona godina. Različite vrste fosilnih goriva su formirane u zavisnosti od postojeće kombinacije životinjskih i biljnih ostataka, vremena boravka pod anaerobnim uslovima i uslovima temperature i pritiska tokom procesa dekompozicije.

Nafta i prirodni gas potiču od organizama koji su živeli u vodi i koji su se razlagali ispod rečnih, morskih i okeanskih sedimenata. Dugo nakon što su praistorijske reke i mora nestali, organske materije istaložene ispod sedimenata su nastavile da se razlažu pod dejstvom anaerobnih bakterija, toplote i pritiska. Ovim procesom došlo je do stvaranja nafte. U dubljim, toplijim podzemnim regijama proces razlaganja je nastavljen do formiranja prirodnog gasa. Vremenom deo nafte i i prirodnog gasa je počeo da migrira nagore kroz zemljinu koru. Rezerve nafte i prirodnog gasa nastale su akumulacijom ovih fosilnih goriva ispod neporoznih stenskih masa.

Sirova nafta je mešavina različitih ugljovodnika koja se prerađuje u rafinerijama destilacijom. Destilacijom se razdvajaju različite frakcije ugljovodnika na osnovu njihovih tački ključanja. Manji molekuli imaju nižu tačku ključanja. Proizvodi destilacije se koriste kao transportna goriva (benzin, kerozin, dizel), maziva, masti i za proizvodnju plastike, boja, pesticida, odeće, kozmetičkih i farmaceutskih proizvoda.

Sagorevanje nafte i naftnih derivata dovodi do emisije zagađujućih materija u atmosferu. Eksploatacija i brodski transport sirove nafte često dovode do zagađenja mora i okeana i pomora vodene flore i faune usled izlivanja nafte u akcidentnim situacijama. Zagađenje životne sredine naftom i naftnim derivatima može se dogoditi i usled havarija u rafinerijama, izlivanja

nafte iz nepropisnih skladišta i nebezbednog kopnenog prevoza, kao i neodgovornim ponašanjem pojedinaca koji ove proizvode ispuštaju u kanalizaciju i slivnike za atmosferske vode.

Prirodni gas je mešavina gasovitih jedinjenja, među kojima je najprisutniji metan (CH₄). Prilikom migracije nafte i prirodnog gasa kroz Zemljinu koru i formiranja podzemnih akumulacija, prirodni gas se često sakupljao iznad naftnog sloja. Eksploatacijom nafte može se sakupljati i prirodni gas. Na mnogim mestima gde ne postoji distributivna cevovodna mreža za prirodni gas, on se ne sakuplja već sagoreva na baklji. Akumulacije prirodnog gasa koje su se formirale odvojeno od naftnih akumulacija takođe se eksploatišu. Prirodni gas se koristi kao energent u domaćinstvima za kuvanje, grejanje i zagrevanje vode u bojlerima. Prirodni gas se koristi u elektranama za proizvodnju električne energije i kao gorivo za automobile, autobuse i kamione. Od svih fosilnih goriva prirodni gas ima najmanji negativni uticaj na životnu sredinu. Sagorevanjem prirodnog gasa emituje se manje ugljen-dioksida po jedinici energije nego kod drugih fosilnih goriva.

Ugalj potiče od ostataka drveća, paprati i drugih biljaka koje su živele pre 300–400 miliona godina. U nekim oblastima ugalj je formiran u močvarama okeanskog priobalnog pojasa. Morska voda je sadržala velike količine sumpora, i kada su mora presušila, zaostali sumpor se pomešao sa organskom materijom koja se razlagala i postao je njen sastavni deo. Ugalj koji se eksploatiše sastoji se od ugljenika, vodonika, kiseonika, azota i različitih količina sumpora i drugih primesa (nečistoća), kao što su teški metali (npr. živa). Postoji više vrsta uglja sa različitim sadržajem ugljenika. Ugalj sa većim sadržajem ugljenika ima veću energetska vrednost. Najveću energetska vrednost ima kameni ugalj, pa mrki ugalj, mrkolignitski ugalj i lignit.

Ugalj sagoreva u termoenergetskim prostrojenjima koja proizvode električnu energiju. Oko 41% električne energije koja se koristi u svetu potiče iz elektrana na ugalj, dok je ovaj procenat u Kini čak 80%. Ugalj se koristi i kao energent u industrijskim procesima kao što su proizvodnja gvožđa i čelika.

Svaki deo životnog ciklusa uglja kao energenta ima negativne uticaje na životnu sredinu. Životni ciklus uglja kao energenta obuhvata rudarstvo, sagorevanje i skladištenja nastalog otpada, jalovine i pepela. Rudarstvo degradira zemljišta, menja hemijske karakteristike površinskog oticaja

(snižava pH vrednost) i zagađuje vodne recipijente. Termoelektrane koje rade na uglj su najznačajniji emiteri ugljen-dioksida. Tokom procesa sagorevanja emituju se i oksidi azota, sumpor-dioksid, suspendovane čestice i živa. Prečišćavanje otpadnih gasova iz termoelektrana može rezultirati stvaranjem otpadnih voda i muljeva koji se moraju dalje prečistiti ili skladištiti.

U Republici Srbiji 99% energetske rezerve fosilnih goriva čine različite vrste uglja sa najvećim udelom lignita (Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, 2014). Najznačajnije rezerve lignita koje se danas eksploatišu u okviru Elektroprivrede Srbije nalaze se u Kolubarskom i Kostolačkom basenu. Rezerve uglja su takve da prema projekcijama potrošnje zadovoljavaju potrebe do kraja ovog veka.

9.2. Obnovljivi izvori energije

Ukupni tehnički raspoloživ potencijal obnovljivih izvora energije u Republici Srbiji se procenjuje na 5,65 miliona tona ekvivalente nafte (ten) godišnje (Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, 2014). Jedna tona ekvivalentne nafte jednaka je količini energije koja se dobija sagorevanjem jedne tone nafte i iznosi 41,868 gigadžula (GJ). U tabeli 9.1. dat je pregled tehnički iskoristivog potencijala OIE u Republici Srbiji na osnovu podataka iz 2012. godine.

Tabela 9.1. Tehnički raspoloživ godišnji potencijal OEI u Republici Srbiji (Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, 2014)

Vrsta OIE	Raspoloživi tehnički potencijal koji se koristi [10⁶ ten /god]	Neiskorišćeni raspoloživi tehnički potencijal [10⁶ ten /god]	Ukupni raspoloživi tehnički potencijal [10⁶ ten /god]
BIOMASA	1,054	2,394	3,448
Poljoprivredna biomasa	0,033	1,637	1,67
Ostaci od poljoprivrednih kultura	0,033	0,99	1,023
Ostaci u voćarstvu, vinogradarstvu i preradi voća	-	0,605	0,605
Tečni stajnjak	-	0,042	0,042
Drvena (šumska) biomasa	1,021	0,509	1,53
Energetski zasadi	-	-	nije dostupno
Biorazgradivi otpad	0	0,248	0,248
Biorazgradivi komunalni otpad	0	0,205	0,205
Biorazgradivi otpad (osim komunalnog)	0	0,043	0,043
HIDRO ENERGIJA	0,909	0,770	1,679
Za instalisane kapacitete do 10 MW	0,004	0,151	0,155
Za instalisane kapacitete od 10 MW do 30 MW	0,020	0,102	0,122
Za instalisane kapacitete preko 30 MW	0,885	0,517	1,402
ENERGIJA VETRA	≈0	0,103	0,103
ENERGIJA SUNCA	≈0	0,240	0,240
Za proizvodnju električne energije	≈0	0,046	0,046
Za proizvodnju toplotne energije	≈0	0,194	0,194
GEOTERMALNA	≈0	0,175	0,180
Za proizvodnju električne energije	≈0	≈0	≈0
Za proizvodnju toplotne energije	0,005	0,175	0,180
UKUPNO IZ SVIH OIE	1,968	3,682	5,65

Energija biomase se najviše koristi u zemljama u razvoju za grejanje i kuvanje. Spaljivanje biomase u primitivnim pećima je veoma neefikasno i generiše velike količine zagađujućih materija, među kojima su suspendovane čestice (čad), oksidi sumpora i azota i ugljen-monoksid, koji je posebno štetan kada se oslobađa u slabo ventilisanim kućama.

Napredne tehnologije koje efikasno koriste biomasu nude mnogo veće mogućnosti, kao što je proizvodnja goriva za prevozna sredstva iz biljnih izvora. Na farmama se u digesterima pod dejstvom anaerobnih bakterija razlaže životinjski izmet i stvara se biogas, koji obično sadrži oko 60% metana i 40% ugljen-dioksida. Biogas se može iskoristiti za proizvodnju električne energije. Slično se može tretirati i otpadni mulj iz postrojenja za prečišćavanje komunalnih otpadnih voda. Na deponijama čvrstog otpada obavezno je sakupljanje biogasa koji nastaje razlaganjem odloženog organskog otpada, koji se takođe može iskoristiti za proizvodnju električne energije. U Srbiji se koristi 1,05 miliona ten biomase godišnje, najvećim delom kao ogrevno drvo.

Hidroenergija se koristi širom sveta i snabdeva oko 7% svetskih energetske potrebe (BP, 2013). Hidroenergija se dobija pregrađivanjem reka i stvaranjem akumulacija vode sa uzvodne strane brane. Potencijalna energija akumulirane vode se pretvara u kinetičku energiju pri tečenju vode, koja se koristi za okretanje turbina i proizvodnju električne energije. Akumulacije hidroelektrane često se koriste kao rezervoari vode za piće i za sportsko-turističke namene (ribolov, plovidba). Izgradnja velikih hidroelektrana dovodi do promena prirodnog sistema:

- potapanja zemljišta radi formiranja akumulacija;
- promene protoka reka i prirodnog bilansa voda;
- promene parametara kvaliteta voda kao što su temperatura, koncentracije rastvorenog kiseonika i nutrijenata;
- degradacija nizvodnih močvarnih, plavnih područja i delti usled zadržavanja sedimentnih materija i nutrijenata sa uzvodne strane brane;
- otežavanja prirodnog kretanja riba i drugih vodenih vrsta.

Povećanje svetskog hidroenergetskog kapaciteta je ograničeno jer je ostalo malo povoljnih lokacija na raspolaganju za izgradnju hidroenergetske infrastrukture većih kapaciteta, uglavnom u Africi, Aziji i Latinskoj Americi.

U Srbiji se proizvodi 909 hiljada ten hidroenergije godišnje. Postoje neiskorišćeni potencijali za razvoj hidroelektrana sa manjim instalisanim

kapacitetima, koje imaju manje negativan uticaj na životnu sredinu od uticaja velikih hidroelektrana.

Rotacijom elise vetroturbine kinetička enerija vetra se pretvara u električnu energiju. Turbine i vetroparkovi se mogu graditi na kopnu i u plitkim priobalnim vodama. Da bi energija vetra imala merljiv doprinos svetskim energetske potrebama, potrebna je izgradnja velikog broja vetroparkova. Glavni problem je nalaženje odgovarajućih lokacija za izgradnju vetroparkova, jer pored uslova koji su potrebni, kao što su brzina i trajanje vetrova, postoji odbojnost građana prema izgradnji vetroparkova u blizini mesta gde žive ili koje koriste za odmor. Neki građani smatraju da vetroelektrane narušavaju pejzaž područja i negoduju zbog buke koja se stvara pri okretanju elise vetroturbine. Za korišćenje energije vetra najbolja područja u Srbiji su Vojvodina (južni Banat) i istočna Srbija.

Solarni sistemi proizvode električnu energiju na dva načina. Fotonaponske ćelije koriste poluprovodne materijale kao što je silicijum za proizvodnju električne energije iz sunčeve svetlosti; kada svetlost pogodi ćelije, u materijalu se oslobađaju elektroni koji migriraju, stvarajući električnu energiju u domaćinstvima i poslovnim prostorima (krovni sistemi) ili u većim solarnim elektranama. Drugi vid proizvodnje električne energije je upotreba velikog broja ogledala koja koncentrišu sunčevu energiju ka centralnom tornju u kome se nalazi fluid (voda ili rastvor soli) koji akumulira toplotnu energiju. Akumulirana toplotna energija se dalje koristi za zagrevanje vode do pare koja pokreće gasne turbine za proizvodnju električne energije. Solarna energija može da se koristi i za grejanje vode u domaćinstvima cirkulisanjem vode ili drugog fluida kroz solarni krovni sistem.

Koncentrisanje solarne energije je primenljivo za elektrane u oblastima sa jakim sunčevim zračenjem. Fotonaponski sistemi i solarno grejanje vode mogu se koristiti u širokom klimatskom području. Efikasnost konverzije sunčeve energije u električnu energiju putem komercijalnih fotonaponskih sistema za stambene jedinice je do 21,5%. Potrebno je pokriti velike površine solarnim panelima da bi se generisale značajne količine električne energije. Godišni potencijal korišćenja sunčeve energije u Srbiji je izračunat uz pretpostavku da se solarni termalni sistemi postave na 50% raspoloživih objekata u zemlji.

Tokom proizvodnje pojedinih vrsta fotonaponskih sistema može doći do stvaranja otpadnih voda i mulja sa toksičnim materijama koji se moraju

posebno tretirati. Ova činjenica je posebno važna pri proizvodnji solarnih sistema u zemljama sa manje striktnom regulativom u oblasti zaštite životne sredine. Na kraju svog radnog veka (trenutno oko 20 godina) solarni paneli se recikliraju da bi se iskoristili vredni materijali iz njih, ali i zbog toga što mogu sadržati materije štetne po zdravlje ljudi i životnu sredinu.

U geotermalnim elektranama voda se pumpa u bunare, zagreva visokim podzemnim temperaturama i vraća u vidu pare koja pokreće turbine za generisanje električne energije. Ova tehnologija je ekonomski isplativa na geološki pogodnim lokacijama, na primer na Islandu, gde se veći deo energije proizvodi na ovaj način. Geotermalni izvori mogu se koristiti za proizvodnju toplotne energije u banjama, za zagrevanje vode i grejanje u domaćinstvima i za zagrevanje staklenika i ribnjaka.

9.3. Potrošnja energije

Najveći deo energetske potrebe u svetu danas se zasniva na upotrebi neobnovljivih resursa. Ukupna potrošnja primarne energije u svetu 2012. godine iznosila je 1.2476,6 miliona ten (BP, 2013). Učešće energenata u svetskoj potrošnji u 2012. godini procentualno je iznosilo:

- ugalj 30%;
- nafta 33%;
- prirodni gas 24%;
- nuklearna energija 4%;
- hidroenergija 7%;
- drugi obnovljivi izvori energije 2%.

Energetske resurse i potencijale Republike Srbije čine fosilna, konvencionalna (ugalj, nafta i prirodni gas) i nekonvencionalna goriva (uljni škriljci), kao i obnovljivi izvori energije (Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, 2014).

Potrošnja primarne energije u Republici Srbiji 2010. godine je iznosila 15,531 miliona ten (Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, 2014). Učešće energenata u potrošnji primarne energije u 2010. godini procentualno je iznosilo:

- ugalj 50,7%;
- nafta 23,7%;
- prirodni gas 12,1%;

- hidroenergija 6,7%;
- biomasa 6,7%.

Potrebne količine uglja, koji učestvuje u potrošnji primarne energije sa 50,7%, obezbeđuju se iz domaće proizvodnje sa preko 90%. Uvoze se metalurški koks i kvalitetnije vrste uglja. Za razliku od uglja, oko 70% sirove nafte i 84,5% prirodnog gasa obezbeđuje se iz uvoza. Uvoze se naftni derivati (primarni benzin, tečni naftni gas, evrodizel, bazna ulja), dok se izvoze ulja i maziva, mazut, mlazno gorivo i bitumen.

Ukupna potrošnja finalne energije u Srbiji 2010. godine iznosila je 9,696 miliona ten (Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, 2014). Učešće sektora u potrošnji finalne energije u 2010. godini je bilo sledeće strukture:

- domaćinstva 32,5%;
- industrija 24,7%;
- saobraćaj 23,1%;
- poljoprivreda 1,8%;
- ostali potrošači 9,6%;
- neenergetska potrošnja 8,3%.

Projekcije finalne potrošnje energije u Republici Srbiji do 2030. godine baziraju se na dva scenarija:

- referentni scenario;
- scenario sa primenom mera energetske efikasnosti.

Referentni scenario podrazumeva nastavak dosadašnje prakse u proizvodnji i potrošnji energije, dok se drugi scenario zasniva na maksimalnoj primeni mera energetske efikasnosti u svim fazama energetskog ciklusa. Prema referentom scenariju predviđa se da će finalna potrošnja energije u 2030. godini iznositi 12,435 miliona ten. Sa maksimalnom primenom mera energetske efikasnosti projekcije ukazuju da će potrošnja finalne energije u 2030. godini iznositi 11,076 miliona ten. U oba scenarija predviđa se povećanje učešća obnovljivih izvora energije (OIE) u bruto finalnoj potrošnji na 27% do 2020. godine. Korišćenje OIE značajno doprinosi efikasnijem korišćenju sopstvenih potencijala u proizvodnji energije, smanjenju emisija gasova staklene bašte, smanjenju uvoza fosilnih goriva, razvoju lokalne industrije i otvaranju novih radnih mesta.

9.4. Literatura

BP (2013). *BP Statistical Review of World Energy 2013*. London, UK: Pureprint Group Limited.

Strategije

Nacionalna strategija održivog korišćenja prirodnih resursa i dobara (2012). Službeni glasnik Republike Srbije br. 33/12.

Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine – Nacrt (2014). Vlada Republike Srbije. Dostupno na http://www.srbija.gov.rs/vesti/dokumenti_sekcija.php?id=45678

10 Upravljanje čvrstim otpadom

Otpad nastaje usled aktivnosti kao što su proizvodnja i potrošnja energije, hrane, dobara i različitih proizvoda. U Evropskoj uniji u 2011. godini najveći deo otpada je bio poreklom od građenja i rušenja (34%), iz eksploatacije ruda i mineralnih sirovina (27%) i iz industrije (11%) (Evropska komisija, 2014). Oko 9% otpada je bio otpad iz domaćinstva. Otpad iz domaćinstva pripada kategoriji *komunalnog otpada*, koji uključuje i otpad iz preduzeća, ustanova i drugih institucija koji je po svom sastavu sličan otpadu iz domaćinstva. U ovom poglavlju biće reč o upravljanju komunalnim otpadom.

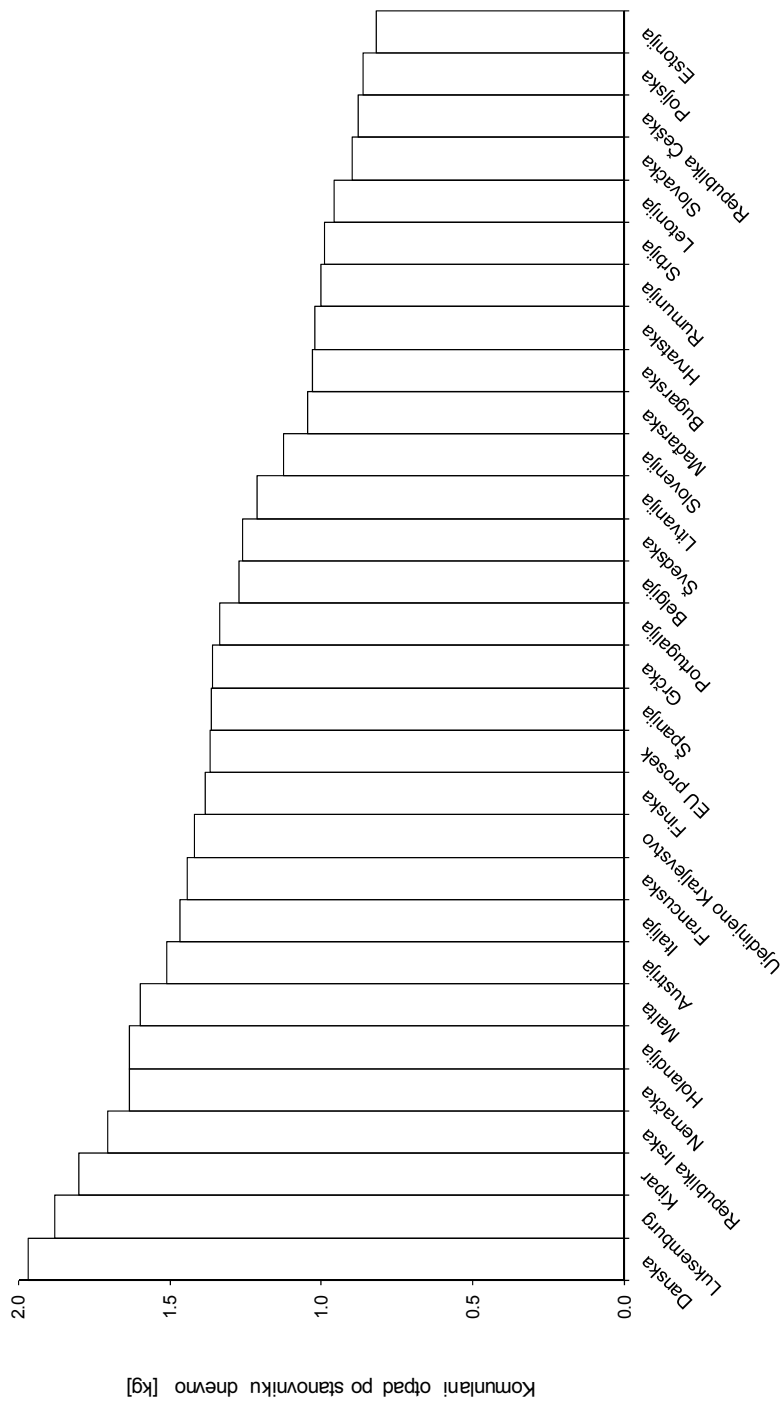
Komunalni otpad je specifičan usled raznovrsnog sastava na koji utiču ekonomska razvijenost, stepen industrijalizacije i potrošačke navike stanovništva. U nerazvijenim državama, najveći deo komunalnog otpada je organskog porekla, dok sa porastom životnog standarda u razvijenijim državama raste udeo papira, kartona, plastike, metala i stakla. Pravilo je da stanovnici razvijenih država stvaraju više komunalnog otpada nego stanovnici država u razvoju. Prema podacima iz 2011. godine, u Evropskoj uniji se u proseku stvara oko 1,4 kg komunalnog otpada po stanovniku dnevno, a u Srbiji oko 1 kg komunalnog otpada po stanovniku dnevno (Evropska komisija, 2014). Na slici 10.1. prikazana je prosečna količina komunalnog otpada koja se stvara po stanovniku dnevno u državama Evropske unije i u Srbiji (Evropska komisija, 2014).

Opcije tretmana komunalnog otpada koji skupljaju opštinske komunalne službe su sledeće:

- reciklaža;
- insineracija (spaljivanje);
- biološki tretman;
- deponovanje.

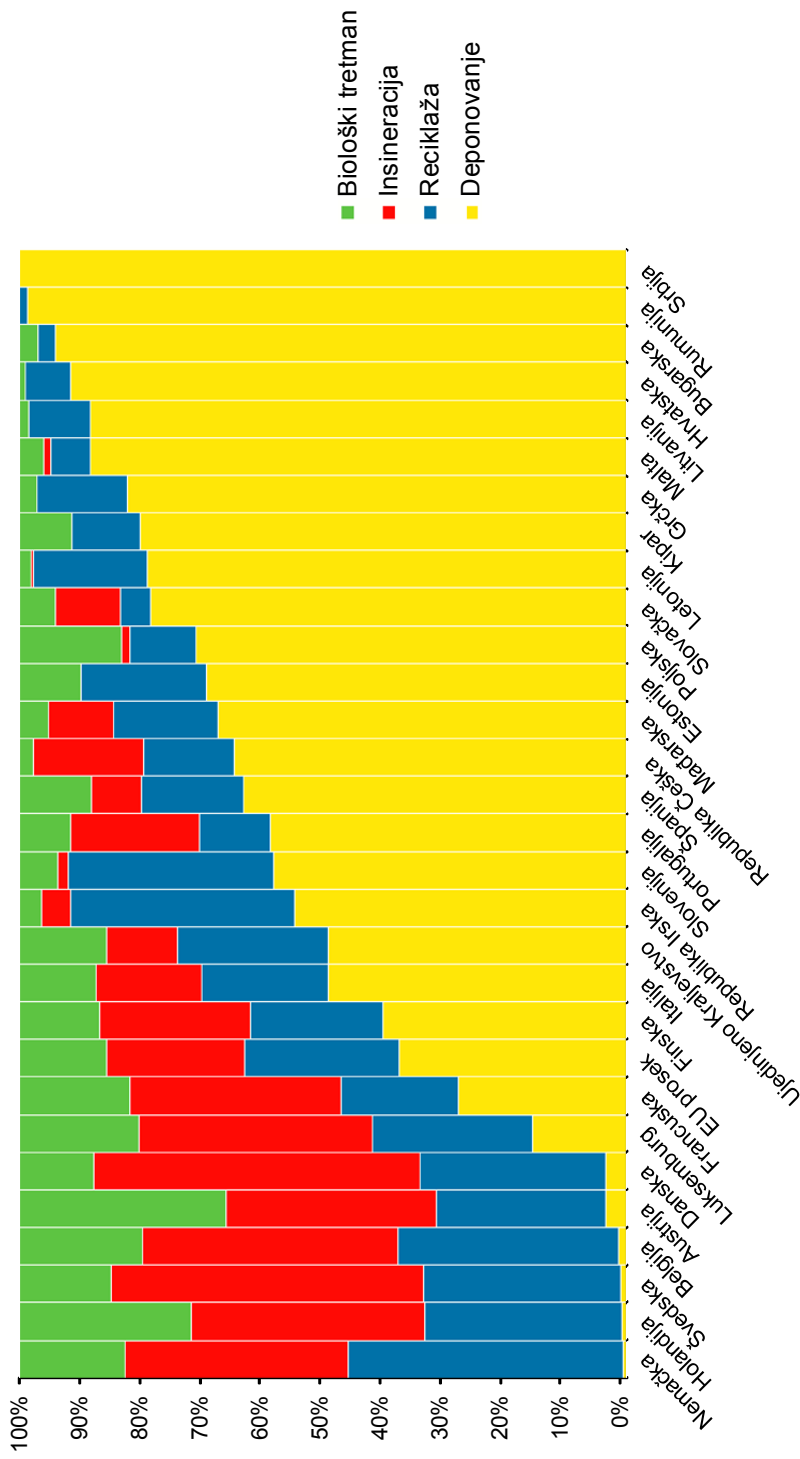
Na slici 10.2. prikazana je zastupljenost pojedinih metoda tretmana komunalnog otpada u državama Evropske unije i u Srbiji. Uočljivo je da je deponovanje otpada najzastupljenija opcija upravljanja komunalnim otpadom u siromašnijim državama, dok se stepen reciklaže i insineracije otpada povećava sa povećanjem ekonomske razvijenosti država.

Osnove ekološkog inženjerstva
Upravljanje čvrstim otpadom



Slika 10.1. Prosečne količine komunalnog otpada po stanovniku dnevno u državama Evropske unije i u Srbiji prema podacima iz 2011. godine (Evropska komisija, 2014)

Osnove ekološkog inženjerstva
Upravljanje čvrstim otpadom



Slika 10.2. Zastupljenost metoda tretmana komunalnog otpada u Evropskoj uniji i Srbiji u 2011. godini (Evropska komisija, 2014)

U ovom poglavlju opisane su glavne karakteristike različitih metoda za tretman komunalnog otpada. Odluka o izboru najpogodnije kombinacije metoda za tretman otpada donosi se kroz analizu životnog ciklusa otpada, uz sagledavanje karakteristika sredine i lokacije na kojoj otpad nastaje (Strategija upravljanja otpadom za period 2010–2019. godine, 2010).

10.1. Reciklaža komunalnog otpada

Reciklaža je proces sakupljanja, transporta i prerade otpadnih materijala radi dobijanja sekundarnih sirovina za proizvodnju istog ili drugog proizvoda. Iz komunalnog otpada se najviše recikliraju ambalažni materijali kao što su papir i karton, tetrapak ambalaža, metal, staklo i plastika. Reciklažom se ostvaruju značajni pozitivni efekti kao što su:

- smanjenje količine otpada koji se odlaže na deponije (produžava se radni vek deponija);
- smanjenje potrošnje primarnih sirovina dobijenih eksploatacijom prirodnih resursa (usporava se proces iscrpljivanja prirodnih resursa);
- ušteda energije (manji utrošak energije za proizvodnju pri korišćenju sekundarnih sirovina);
- smanjenje zagađenja vode i vazduha (manje zagađujućih materija se emituje tokom proizvodnje iz sekundarnih sirovina).

Ostvaruje se i ekonomska dobit:

- pojedincima koji recikliraju smanjuje se račun za odnošenje otpada;
- preduzeća koje se bave reciklažom ostvaruju dobit prodajom sekundarnih sirovina;
- povećanje obima reciklaže dovodi do otvaranja novih radnih mesta.

Reciklaža podrazumeva postojanje tržišta koje je zainteresovano za plasman sekundarnih sirovina. U suprotnom, dolazi do stvaranja neupotrebljivih materijala uz utrošak novca, energije i emisije zagađujućih materija tokom sakupljanja, transporta i prerade. Na tržištu se zahteva visok kvalitet sekundarnih sirovina (nezagađene sirovine) i pouzdan dotok sirovina u dovoljnim količinama. Države zakonima i različitim merama mogu da utiču na uspešnost programa recikliranja. Zakonom o upravljanju otpadom (2009, 2010) zabranjeno je odlaganje otpada koji se može ponovo koristiti. Države mogu finansijski da stimulišu preduzeća koja se bave skupljanjem, preradom i prodajom recikliranih materijala, kao i preduzeća

koje koriste sekundarne sirovine u svojim proizvodnim procesima (oslobađanje od poreza i slične mere). Prodavci električnih i elektronskih uređaja državi plaćaju taksu koja se koristi za stimulaciju preduzeća koja se bave reciklažom otpada koji nastaje na kraju radnog veka ovih uređaja.

Građani komponente otpada koje se mogu reciklirati odvajaju na mestu nastanka otpada i odlažu na dva načina:

- u specijalnim kesama ili kutijama za reciklažu koje se dobijaju od komunalnih preduzeća odvaja se mešoviti reciklabilni otpad;
- u kontejnere za reciklažu odlažu se pojedinačne komponente reciklabilnog otpada kao što su papir i karton, aluminijumske konzerve i plastična ambalaža.

Odlaganjem pojedinačnih komponenti reciklabilnog otpada u posebne kontejnere manje se zagađuju sakupljeni materijali i manji su troškovi pripreme materijala za tržište, ali zahteva se angažovanost posebnih vozila koja imaju odvojene komore za različite materije. Odvajanje reciklabilnog otpada u posebne kontejnere zahteva značajnu građansku aktivnost i može biti efikasno u slučaju da su kontejneri za reciklažu postavljeni u blizini mesta odlaganja kućnog otpada koji se ne reciklira.

Skupljanje mešovitog reciklabilnog otpada obično daje bolje rezultate od odlaganja otpada u kontejnere za reciklažu pojedinačnih reciklabilnih komponenti otpada. U Beogradu javno komunalno preduzeće „Gradska čistoća“ zainteresovanim građanima dodeljuje ekokese u kojima se odlažu papir i karton, tetrapak ambalaža (kutije od sokova i mlečnih proizvoda), aluminijumske limenke od napitaka i plastičnu ambalažu od polietilen tereftalata (PET). PET ambalaža je označena brojem 1 kao reciklažnim znakom i u ekokesu se mogu odložiti providne i neprovidne plastične boce od napitaka, providne boce od jestivog ulja, zatvarači i providna ambalaža od sredstava za ličnu higijenu (JKP Gradska čistoća, 2014). Ekokese se iznose ispred kuće ili pored kontejnera za otpad koji se ne reciklira jednom nedeljno, po određenom rasporedu za svaku opštinu.

Pri skupljanju mešovitih reciklabilnih komponenti otpada nema potrebe za specijalizovanim vozilima (kamionima), što smanjuje troškove skupljanja koji mogu biti značajna komponenta troškova procesa reciklaže. Mane skupljanja mešovitog otpada, u poređenju sa odlaganjem pojedinačnih komponenti reciklabilnog otpada u specijalizovane kontejnere, su veći potencijal za kontaminaciju krajnjeg proizvoda (sortiranih sekundarnih

sirovina) i veća količina otpada koji ostaje nakon procesa prerade (nesortiranog materijala).

Sortiranje mešovitog reciklabilnog otpada odvija se u postrojenju za separaciju reciklabilnog otpada i pripremu sekundarnih sirovina. U postrojenjima za separaciju reciklabilnog otpada razdvajanje različitih materijala se vrši ručno uz intenzivno korišćenje radne snage i uz različite stepene mehanizacije i automatizacije u postupku prerade. Mehaničko i automatsko sortiranje materijala se vrši na osnovu različitih osobina materijala, kao što su veličina, težina, gustina, magnetne i električne osobine. Magnetna separacija se koristi za izdvajanje materijala koji sadrže gvožđe (npr. čeličnih limenki) iz mešovitog otpada. Prolazom otpada kroz uređaj koji indukuje struju u provodnim materijalima razdvajaju se aluminijum i plastika.

Na kraju procesne linije, razdvojeni materijali se baliraju (papir, plastika), presuju (metal) i na druge slične načine pripremaju za transport i prodaju kao sekundarne sirovine.

10.2. Insineracija komunalnog otpada

Insineracija (spaljivanje) je termički tretman otpada. Insineracijom se zapremina otpada smanjuje za oko 90%, a masa za 70–80%. Energija koja se dobija iz procesa insineracije može se iskoristiti za dobijanje toplotne i električne energije.

U postrojenjima za insineraciju otpada (insineratori) spaljuje se netretirani komunalni otpad ili komunalni otpad iz kojeg su već odvojene reciklabilne i biorazgradive frakcije. Kod insineracije netretiranog komunalnog otpada, predtretman može obuhvatiti izdvajanje nesagorivih komponente otpada kao što su metal i staklo. Metode koje se koriste za separaciju slične su kao pri sortiranju mešovitog reciklabilnog otpada u procesu reciklaže.

Postrojenje za insineraciju otpada čine različite konstrukcije peći i kotlova sa pratećom opremom potrebnom za prethodnu pripremu materijala radi obezbeđenja efikasnog sagorevanja otpada, kontrole emisija i energetskog iskorišćenja toplote koja nastaje u procesu oksidacije otpada. U postrojenjima za insineraciju temperatura procesnih gasova mora da dostigne najmanje 850°C i vreme zadržavanja na toj temperaturi mora biti najmanje

dve sekunde (Uredba o vrstama otpada za koje se vrši termički tretman, uslovima i kriterijumima za određivanje lokacije, tehničkim i tehnološkim uslovima za projektovanje, izgradnju, opremanje i rad postrojenja za termički tretman otpada, postupanju sa ostatkom nakon spaljivanja, 2010, 2012). Ovim tehničkim kriterijumom obezbeđuje se potpuno sagorevanje otpada i sprečava formiranje organskih jedinjenja štetnih po zdravlje ljudi i životnu sredinu.

Pri sagorevanju otpada izdvajaju se toplotna energija, procesni gasovi i čvrsti ostatak. Energija koja se dobije sagorevanjem otpada može se koristiti direktno kao toplota za grejanje bojlerske vode (koja se koristi u sistemima daljinskog grejanja) ili indirektno za pokretanje gasne turbine i prevođenja u električnu energiju.

Čvrste ostatke nakon sagorevanja otpada čine šljaka i pepeo iz ložišta. Iz ovih ostataka mogu se izdvojiti metali za reciklažu kao što su gvožđe, aluminijum i bakar. Šljaka i pepeo se mogu upotrebiti u građevinarstvu kod izgradnje nasipa i puteva ukoliko se analizom pokaže da neće doći do luženja zagađujućih materija koje mogu biti prisutne u šljaci i pepelu. Šljaka i pepeo se mogu odložiti i na deponije.

Procesni gasovi nastaju tokom sagorevanja (oksidacije) otpada i sastoje se uglavnom od suspendovanih čestica, CO₂, H₂O, SO₂, NO_x, HCl i HF. Procesni gasovi mogu sadržati i teške metale ukoliko su bili prisutni u tretiranom komunalnom otpadu. Za prečišćavanje procesnih gasova koristi se kombinacija više tipova uređaja u nizu da bi se zadovoljile granične vrednosti emisije zagađujućih materija propisane Uredbom o vrstama otpada za koje se vrši termički tretman, uslovima i kriterijumima za određivanje lokacije, tehničkim i tehnološkim uslovima za projektovanje, izgradnju, opremanje i rad postrojenja za termički tretman otpada, postupanju sa ostatkom nakon spaljivanja (2010, 2012).

Insineracija zahteva visoke investicione i eksploatacione troškove, koji se delom mogu nadoknaditi prodajom električne i toplotne energije. Veliki deo troškova nastaje usled potrebe za sofisticiranim sistemom za prečišćavanje otpadnih gasova da bi se zadovoljile granične vrednosti emisije zagađujućih materija propisane zakonskom regulativom.

Insineracijom komunalnog otpada ostvaruju se značajni pozitivni efekti kao što su:

- smanjenje količine otpada koji se odlaže na deponije (produžava se radni vek deponija);
- proizvodnja toplotne i električne energije.

Proizvodnjom toplotne i električne energije iz komunalnog otpada može se smanjiti potreba za proizvodnjom energije iz uglja koja prati i smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte koji u tom procesu nastaju (Mikic i Naunovic, 2013).

10.3. Biološki tretman komunalnog otpada

Biološki tretman obuhvata kompostiranje i anaerobnu digestiju. Kompostiranje je razlaganje biorazgradivog otpada (papira, kartona, baštenskog i kuhinjskog otpada) pod dejstvom aerobnih mikroorganizama u kontrolisanim uslovima. Proizvod kompostiranja je materijal za kondicioniranje zemljišta (kompost). Kompostiranje ima najveći efekat ako se odvija u domaćinstvima sa dvorištem ili ako građani u stambenim zgradama odvajaju biorazgradiv otpad u specijane kese ili kante koje komunalna preduzeća odnose prema unapred utvrđenom rasporedu. Neke opštine imaju i posebno određene lokacije za kompostiranje gde građani sami donose svoj otpad. Kompost dobijen na ovaj način može biti dobrog kvaliteta bez prisustva zagađujućih materija kao što su teški metali i plastika, i može se koristiti za kondicioniranje zelenih gradskih površina.

U okviru mehaničko-biološkog predtretmana iz otpada koji stiže na deponije izdvaja se organski otpad koji se kompostira. Kompost dobijen na ovaj način je podložan zagađenju i može da sadrži čestice stakla, metala i plastike, što ograničava njegovu primenu za kondicioniranje zemljišta i on se deponuje, spaljuje u insineratorima ili dodatno tretira za proizvodnju čvrstog otpada. Kompostiranjem se postiže stabilizacija otpada uz smanjenje zapremine. Deponovanjem kompostiranog, stabilizovanog otpada postižu se sledeći pozitivni efekti:

- produženje radnog veka deponije usled smanjenja zapremine biorazgradivog otpada koji se odlaže;
- smanjenje zagađenja vode i vazduha:
 - intenzitet anaerobne razgradnje u deponovanom otpadu se višestruko smanjuje što dovodi do manjih emisija ugljen-

- dioksida, metana i delimično razgrađenih organskih jedinjenja koja zagađuju vazduh i infiltrirane atmosferske padavine;
- smanjene količine infiltriranih atmosferskih padavina usled manje vodopropustljivosti kompostiranog otpada u odnosu na netretiran biorazgradiv otpad.

Anaerobna digestija je proces u kome se biorazgradiv otpad razlaže u odsustvu kiseonika i izdvaja se biogas, koji obično sadrži oko 60% metana i 40% ugljen-dioksida i može se koristiti kao energent. Anaerobna digestija se koristiti kao dopunski predtretman biorazgradivog otpada na deponijama ili kao zaseban proces za digestiju odvojeno sakupljenog biorazgradivog otpada.

10.4. Deponovanje komunalnog otpada

Sanitarne deponije predstavljaju tehnički uređen prostor na kome se odlaže otpad. Postoje tri tipa deponija za odlaganje otpada:

- deponije za odlaganje neopasnog otpada;
- deponije za odlaganje inertnog otpada;
- deponije za odlaganje opasnog otpada.

Komunalni otpad se odlaže na deponije neopasnog otpada. Deponije su neizostavni element integrisanog sistema za upravljanje otpadom jer i uz primenu različitih metoda tretmana otpada uvek ostaje rezidualni deo otpada koji se mora deponovati. Otpad se na sanitarnim deponijama odlaže na način koji ne ugrožava zdravlje ljudi i životnu sredinu (podzemne i površinske vode, zemljište i vazduh). Uredbom o odlaganju otpada na deponije (2010) definisani se minimalni standardi koji se moraju zadovoljiti pri planiranju, projektovanju, izgradnji, eksploataciji i održavanju deponije nakon zatvaranja.

Biorazgradiv otpad odložen na deponije se razgrađuje pod aerobnim i anaerobnim uslovima. Usled razlaganja otpada, dolazi do stvaranja ugljen-dioksida, metana, vode i delimično razgrađenih organskih jedinjenja. Atmosferske padavine sa površine deponije se delom infiltriraju kroz telo deponije i rastvaraju proizvode razlaganja otpada, kao i prisutne neorganske materije. Telo deponije predstavlja prostor za odlaganje otpada. Vode koje se sakupljaju na dnu deponije nazivaju se *procedne vode* i u najvećoj meri potiču od infiltriranih atmosferskih padavina. Koncentracije pojedinih zagađujućih

materija u procednim vodama mogu da budu 5–10 puta veće od koncentracija koje se javljaju u komunalnim otpadnim vodama (Ljubisavljević i dr., 2001). Od najvećeg značaja su visoke koncentracije organskih materija (BPK₅ i HPK) i jedinjenja azota (Ehrig i Robinson, 2010).

Mešavina gasova koja se emituje usled razgalanja otpada naziva se *deponijski gas*. Osnovni sastojci deponijskog gasa su ugljen-dioksid i metan. Sastojci deponijskog gasa prikazani su u tabeli 10.1.

Tabela 10.1. Komponente deponijskog gasa (Tchobanoglous i Keith, 2002)

Komponenta	Procenat [%] na bazi suvog zapreminskog udela
Metan (CH ₄)	45–60
Ugljen-dioksid (CO ₂)	40–60
Azot (N ₂)	2–5
Kiseonik (O ₂)	0,1–1,0
Amonijak (NH ₃)	0,1–1,0
Sulfidi, disulfidi, merkaptani	0–1,0
Vodonik (H ₂)	0–0,2
Ugljen-monoksid (CO)	0–0,2
Komponente u tragovima	0,01–0,6

Ukoliko se otpad odlaže na neodgovarajuće pripremljen prostor, dolazi do zagađenja vazduha usled emisije deponijog gasa i zagađenja zemljišta, podzemnih i površinskih voda procednim vodama.

Da bi se smanjili rizici po zdravlje ljudi i životnu sredinu, telo deponije se oblaže vodonepropusnim podlogama i oprema sistemima za prikupljanje i tretman procednih voda i deponijskih gasova. Dno i bočne strane tela deponije treba da se sastoje od prirodne geološke barijere (npr. kompaktirane gline) i veštačke zaptivne obloge radi zaštite tla, podzemnih i površinskih voda (Uredba o odlaganju otpada na deponije, 2010). Kao veštačke zaptivne obloge često se koriste folije od polietilena visoke gustine (*eng. high density polyethylene – HDPE*).

Procedne vode se skupljaju drenažnim sistemom perforiranih cevi na dnu deponije i gravitaciono se slivaju do sabirnih šahtova na najnižim tačkama. Iz sabirnih šahtova procedne vode se pumpaju ili se gravitaciono transportuju do postrojenja za tretman. Prečišćene vode se mogu ispuštati u površinske vode ili u sistem javne kanalizacije na dalju preradu u

postrojenjima za prečišćavanje komunalnih otpadnih voda. Procedne vode mogu se i recirkulisati u telo deponije pomoću horizontalnih infiltracionih (perforiranih) cevi, raspoređenih u telu deponije. Recirkulacija procednih voda se vrši radi povećanja vlažnosti otpada u cilju efikasnije stabilizacije biorazgradivog otpada i poboljšanja uslova za produkciju deponijskog gasa, što je važno kod deponija sa sistemom za iskorišćenje deponijskog gasa u energetske svrhe.

Da bi se procedne vode ispustile u površinske vode, moraju se prečistiti do nivoa propisanog Uredbom o граниčnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje (2011, 2012) za deponijske procedne vode. Usled visokog sadržaja organskih materija i azotnih jedinjenja u sirovim procednim vodama, prečišćavanje do nivoa propisanog Uredbom može zahtevati biološki tretman sa nitrifikacijom i denitrifikacijom uz membransku separaciju (ultrafiltraciju) suspendovanih materija (Robinson, Carville i Robinson, 2013).

Stepen infiltracije atmosferskih padavina kroz telo deponije i količina procednih voda koja nastaje zavise od sastava deponovanog otpada i stepena zbijenosti (kompaktiranosti) otpada. Po prijemu otpada na deponiju vrši se mehaničko-biološki predtretman. Rezidualni otpad koji ostaje nakon odvajanja reciklabilnog i biorazgradivog otpada odlaže se na deponiju sa zrelim kompostom. Pri deponovanju otpad se razastire i kompaktira. Ovim postupcima povećava se gustina i smanjuje zapremina odloženog otpada i smanjuje infiltracija atmosferskih voda. Na kraju radnog dana, otpad se prekriva inertim materijalom radi sprečavanja raznošenja otpada i dodatnog smanjenja infiltracije atmosferskih voda kroz deponovan otpad.

Kod aktivnih deponija unutrašnji pritisak je veći od spoljašnjeg (atmosferskog) i deponijski gas se oslobađa konvekcijom i difuzijom. Ovaj princip se koristi kod pasivnih sistema kontrole kretanja gasa. Vertikalni bunari za evakuaciju deponijskog gasa instaliraju se u telu deponije. Ukoliko se deponijski gas ne koristi za dobijanje energije, obično se spaljuje bakljom pod kontrolisanim uslovima (900°C) radi konverzije metana u ugljen-dioskid, koji je manje potentan kao gas sa efektom staklene bašte od metana.

Kod aktivnih sistema, evakuacija deponijskog gasa se obezbeđuje pomoću vakuuma. Ovaj metod se obično primenjuje na deponijama gde se deponijski gas koristi za dobijanje energije. Kod sistema koji koriste deponijski gas kao pogonsko gorivo, ulazni deponijski gas se priprema /

prečišćava, filtracijom i kompresijom. Termičkom razgradnjom u prisustvu kiseonika u specijalno projektovanim postrojenjima deponijski gas se prevodi u ugljen-dioksid, sumpor-dioksid i okside metana. Minimalna temperatura sagorevanja je 850°C. Energija koja se dobije sagorevanjem deponijskog gasa metana može se koristiti direktno kao toplota za grejanje bojlerske vode ili indirektno za pokretanje gasne turbine i prevođenje u električnu energiju.

10.5. Literatura

Ehrig, H.-J., i Robinson, H. (2010). Landfilling: Leachate Treatment. In Christensen, T. H. (Eds), *Solid Waste Technology & Management, Chapter 10.11*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.

Evropska komisija (European Commission) (2014). *Eurostat Environmental Data Centre on Waste*. Dostupno na

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/introduction>

JKP Gradska čistoća (2014). *Eko kesa za čistiji grad*. Dostupno na <http://www.gradskacistoca.rs/?p=326>

Ljubisavljević, D., Babić, B., Đukić, A., i Jovanović, B. (2001). *Komunalna hidrotehnika – primeri iz teorije i prakse*. Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet.

Mikic, M., i Naunovic, Z. (2013). A sustainability analysis of an incineration project in Serbia. *Waste Management & Research*, 31(11), 1102–1109.

Robinson, H., Carville, M., i Robison, T. (2013). Biological nitrification and denitrification of landfill leachates. *Proceedings of the Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium*, Margherita di Pula – Cagliari, Sardinia, Italy.

Tchobanoglous, G., i Kreith, F. (2002). *Handbook of solid waste management*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.

Zakonodavstvo

Zakon o upravljanju otpadom (2009, 2010). Službeni glasnik Republike Srbije br. 36/09 i 88/10.

Uredba o odlaganju otpada na deponije (2010). Službeni glasnik Republike Srbije br. 92/10.

Uredba o vrstama otpada za koje se vrši termički tretman, uslovima i kriterijumima za određivanje lokacije, tehničkim i tehnološkim uslovima za projektovanje, izgradnju, opremanje i rad postrojenja za termički tretman otpada, postupanju sa ostatkom nakon spaljivanja (2010, 2012). Službeni glasnik Republike Srbije br. 102/10 i 50/12.

Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje (2011, 2012). Službeni glasnik Republike Srbije br. 67/11, 48/12.

Strategije

Strategija upravljanja otpadom za period 2010–2019. godine (2010). Službeni glasnik Republike Srbije br. 29/10.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

502(075.8)
628.1/.4(075.8)

OSNOVE ekološkog inženjerstva / Zorana
Naunović ... [et al.]. - Beograd :
Građevinski fakultet, 2014 (Beograd :
Dedraplast). - 155 str. : ilustr. ; 24 cm

Na vrhu nasl. str.: Univerzitet u Beogradu. -
Tiraž 1.000. - Bibliografija uz svako
poglavlje.

ISBN 978-86-7518-164-4

1. Науновић, Зорана, 1976- [аутор]
а) Животна средина - Заштита

COBISS.SR-ID 207586316