

Sveučilište u Zagrebu
Metalurški fakultet

Ida Bulić

**Utjecaj klimatskih promjena na procjedne vode sa odlagališta
otpada**

Sisak, 2024.

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za kemiju, hidrometalurgiju i korozijska ispitivanja na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u suradnji sa tvrtkom Gospodarenje otpadom Sisak d.o.o. pod vodstvom prof.dr.sc. Anite Štrkalj i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2023./2024.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA.....	2
3. MATERIJALI I METODE	22
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	24
5. ZAKLJUČAK	35
6. POPIS LITERATURE	37
7. SAŽETAK	40
8. SUMMARY	40
9. ŽIVOTOPIS	41

1. UVOD

Klimatske promjene donose jedan od neznčajnih i najbrže rastućih izazova s kojima se današnje društvo susreće. Izuzev globalnog zagrijavanja i promjena u ekosustavima, klimatske promjene stvaraju izniman utjecaj na vodne resurse. U posljednjem desetljeću primijećene su dramatične promjene u oborinama, uzrokovane ekstremnim vremenskim događajima poput suša, poplava i uragana. Ovi ekstremi direktno utječu na ravnotežu vodenih ekosustava, što rezultira ne samo manjkom vode za potrebe ljudi, poljoprivrede i industrije, već i ozbiljnim poremećajima u ekosustavima koji ovise o vodenim resursima. Klimatske promjene također utječu na procese razgradnje otpada na odlagalištima, mijenjajući uvjete za različite biološke i kemijske reakcije.

Odlagalištem otpada naziva se objekt izveden za trajno, kontrolirano i sigurno odlaganje otpada. U tijelu odlagališta neprestano se odvijaju razne i nepredvidljive fizikalne i kemijske reakcije koje generiraju različite vrste emisija. Biološkom razgradnjom otpada oslobađaju se i difundiraju velike količine opasnih plinova [1].

Infiltracijom oborinskih voda kroz slojeve otpada nastaje procjedna voda, odnosno eluat, koji je pritom apsorbirao velike količine otopljenih i suspendiranih tvari. U ovisnosti o sastavu odloženog otpada te proizašlim produktima biokemijske reakcije, koncentracije onečišćujućih tvari u eluatu mogu biti veće ili manje [1].

Procjedne vode sa odlagališta otpada postaju podložnije povećanom riziku od onečišćenja okoliša. Klimatske promjene uzrokuju promjenu temperature i količine oborina te vrlo često i povećavanu opasnost od poplava. Navedene promjene znatno utječu na procese razgradnje otpada te sastav i količinu procjedne vode. Razumijevanje takvih dinamičnih promjena, uz inovativni pristup koji može poboljšati otpornost i održivost procjednih voda cilj je ovog istraživanja. U istraživanju je praćen utjecaj klimatskih promjena na procjedne vode odlagališta neopasnog otpada „Goričica“ koje je smješteno u neposrednoj blizini grada Siska.

2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

Fokus istraživanja odnosi se na parametre procjednih voda s odlagališta otpada koji su povezani s promjenom temperature i količinom oborina. Cilj ovog istraživanja bio je dublje razumjeti utjecaj temperature zraka i količine oborina na kvalitetu procjednih voda odlagališta otpada, te identificirati potencijalne ekološke i zdravstvene rizike.

Iako se u procjednim vodama odlagališta otpada određuje velik broj parametara, u ovom radu fokus je stavljen na kemijsku potrošnju kisika (KPK), biološku potrošnju kisika (BPK5), suspendirane tvari i ukupni organski ugljik (TOC) budući da su već dugi niz godina na odlagalištu koje je predmet ovog rada ovi parametri znatno iznad maksimalno dopuštenih koncentracija. Analizirana su razdoblja od 2018. do 2023. godine da bi se dobila cjelovita slika o utjecaju meteoroloških uvjeta (količina oborina i temperatura zraka) na odabrane parametre procjednih voda. Količina oborina i temperatura imaju ključnu ulogu u hidrološkim procesima unutar odlagališta otpada, posebice u procesu formiranja i kretanju procjednih voda. Razumijevanje ove povezanosti bitno je za procjenu utjecaja ekstremnih vremenskih uvjeta na kvalitetu vode i održivo upravljanje odlagalištem.

Otpad nastaje kao rezultat svih ljudskih aktivnosti, a njegov utjecaj može izazvati ispuštanje štetnih tvari u vodu, zrak i tlo, što može izazvati nepoželjne posljedice po zdravlje ljudi i okoliš. Razmjer tog utjecaja varira s obzirom na količinu i svojstva otpada, te način na koji se s njim postupa [1].

Prema Zakonu o gospodarenju otpadom [2] otpad se definira kao svaka tvar ili predmet koju posjednik odbacuje, namjerava ili mora odbaciti. Ovim Zakonom propisuju se mjere za sprečavanje negativnog utjecaja otpada na ljudsko zdravlje i okoliš putem smanjenja količina otpada koji nastaje ili se proizvodi. Također, uređuje se postupanje s otpadom bez primjene postupaka koji predstavljaju rizik za okoliš, potiče se korištenje vrijednih svojstava otpada te poboljšava učinkovitost upravljanja resursima. Odredbe Zakona preciziraju postupanje s otpadom, uključujući hijerarhiju, načela, ciljeve, i način gospodarenja otpadom, posebne kategorije otpada, strateške i planske dokumente, nadležnosti i obveze, lokacije i infrastrukturu za gospodarenje otpadom, djelatnosti u vezi s otpadom, prekogranični promet otpada, informacijski sustav za gospodarenje otpadom te administrativni i inspekcijski nadzor gospodarenja otpadom.

Implementacija sustava gospodarenja otpadom nužna je kako bi se postigla održiva budućnost, zaštitila okolina, očuvalo zdravlje ljudi te ostvarile ekonomske i društvene koristi.

Gospodarenje otpadom obuhvaća niz aktivnosti, uključujući prikupljanje, prijevoz, recikliranje (uključujući sortiranje), zbrinjavanje otpada, nadzor nad izvođenjem tih aktivnosti te kontrolu i implementaciju mjera na lokacijama gdje se otpad zbrinjava. Također obuhvaća radnje koje poduzimaju trgovci otpadom i posrednici u upravljanju otpadom [2].

Prema Pravilniku o katalogu otpada [3] otpad se razvrstava u grupe, podgrupe i vrste temeljem svojstava i mjesta nastanka, pri čemu se uzimaju u obzir kategorije otpada, opasna svojstva, porijeklo i sastav otpada te granične koncentracije opasnih tvari.

Katalog otpada sastoji se od detaljnog popisa sa više od 800 različitih vrsta otpada, organiziranih prema svojstvima i mjestu njihova nastanka. Dodatno, klasificiran je u 20 različitih skupina koje identificiraju vrste aktivnosti odakle otpad potječe. Svaka od tih skupina obuhvaća podskupine koje kategoriziraju otpad prema metodama korištenim u njegovoj proizvodnji. Ove podskupine otpada dalje su razvrstane u vrste prema fazi procesa u kojoj su nastale, a svaka vrsta otpada identificirana je pomoću šestoznamenkastog broja [4].

Uzimajući u obzir svojstva koja mogu utjecati na zdravlje ljudi i okoliš, otpad se kategorizira kao opasan, neopasan i inertan [4].

Prema mjestu nastanka otpad se može podijeliti u dvije glavne kategorije [4]:

1. komunalni otpad - obuhvaća otpad iz kućanstva i otpad iz proizvodnih ili uslužnih djelatnosti, pod uvjetom da je po svojstvima i sastavu sličan otpadu iz kućanstva i
2. proizvodni otpad - odnosi se na otpad generiran tijekom proizvodnog procesa u industriji, obrtu i drugim procesima, te se razlikuje od komunalnog otpada po sastavu i svojstvima. Ostaci iz proizvodnog procesa koji se ponovno koriste u proizvodnom procesu istog proizvođača ne smatraju se proizvodnim otpadom.

Nepримjereno gospodarenje otpadom može imati ozbiljan utjecaj na okoliš, ljudsko zdravlje i društvo. Kako bi se izbjegle štetne posljedice, Zakonom o gospodarenju otpadom [2] propisan je red prvenstva gospodarenja otpadom (slika 1): sprječavanje nastanka otpada, priprema za ponovnu uporabu, recikliranje, ostali postupci uporabe npr. energetska uporaba i zbrinjavanje.



Slika 1. Red prvenstva gospodarenja otpadom [5]

U hijerarhiji gospodarenja otpadom često se zanemaruje preventivno djelovanje u smislu sprječavanja stvaranja otpada, iako je to ključna faza u procesu osiguravanja učinkovitog gospodarenja otpadom. Smanjenje količine otpada može se postići povećanjem svijesti o strategijama smanjenja potrošnje, ponovnoj upotrebi predmeta, smanjenju kupnje ambalaže, recikliranju i poduzimanju drugih koraka za smanjenje proizvodnje otpada [6].

U tu svrhu poduzimaju se određeni koraci prije nego što tvar, materijal ili proizvod postanu otpad, usmjereni prema [6]:

- smanjenju količine otpada, uključujući pristupe poput ponovne uporabe ili produljenja životnog vijeka proizvoda,
- minimiziranju negativnog utjecaja otpada na okoliš i zdravlje ljudi i
- redukciji prisutnosti opasnih tvari u proizvodima i materijalima.

Priprema za ponovnu uporabu obuhvaća procese obnavljanja proizvoda ili dijelova proizvoda koji su postali otpadom. Ovaj proces uključuje provjeru, čišćenje ili popravak kako bi se proizvod pripremio za ponovnu uporabu, bez potrebe za dodatnim prethodnim tretmanima [2].

Recikliranje predstavlja svaki proces obnavljanja otpadnih materijala, uključujući ponovnu preradu organskih materijala, s ciljem pretvaranja u proizvode, materijale ili tvari namijenjene izvornoj ili drugoj svrsi, izuzev korištenja otpada u energetske svrhe ili pretvaranja u materijal koji se koristi kao gorivo ili za nasipavanje [2].

Oporaba otpada obuhvaća svaki proces čiji je primarni ishod korištenje otpada u korisne svrhe, gdje otpad zamjenjuje druge materijale koji bi inače bili korišteni u iste svrhe. Također, obuhvaća i pripremu otpada kako bi ga se moglo koristiti za određenu svrhu, bilo unutar postrojenja ili u širem ekonomskom kontekstu [2].

Zbrinjavanje otpada obuhvaća bilo koji proces koji se ne smatra uporabom otpada, uključujući i postupke koji, kao posljedicu mogu rezultirati obnavljanjem tvari ili energije [2].

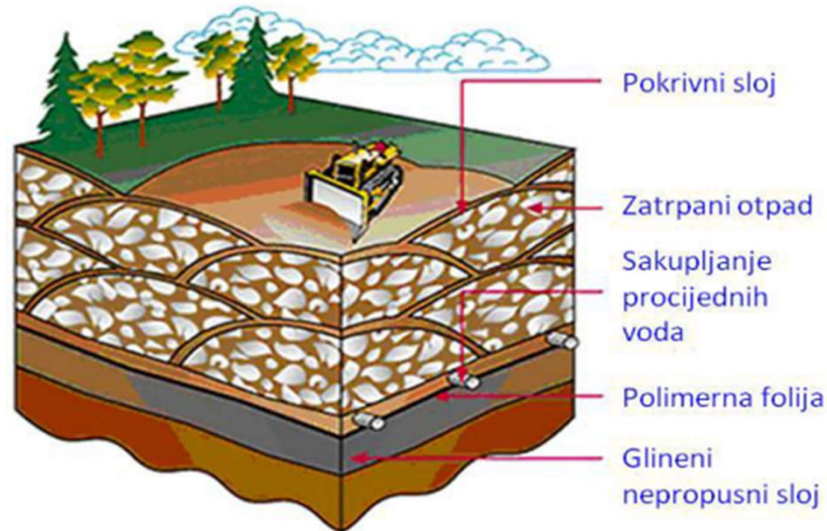
Svaki otpad koji nastane mora biti podložan procesima uporabe. S obzirom na prednost pripreme za ponovnu upotrebu nad recikliranjem i drugim metodama uporabe, zbrinjavanje otpada može se smatrati "rješenjem" jedino u određenim situacijama [7]:

- kada nije moguće daljnje korištenje otpada ili njegovih dijelova,
- kada su troškovi uporabe znatno veći od troškova zbrinjavanja otpada i
- kada zbrinjavanje otpada ima manji ekološki utjecaj od uporabe otpada, posebno kad se uzmu u obzir emisije tvari i energije u zrak, more, vodu i tlo, iskorištavanje prirodnih resursa te količina proizvedene energije.

Otpad čiji nastanak nije bilo moguće spriječiti, a čija materijalna ili energetska svojstva ne mogu biti ponovno iskorištena, odnosno otpad koji nije podložan uporabi, upućuje se na zbrinjavanje putem različitih postupaka, među kojima se ubraja i odlaganje otpada [7].

Odlaganje je proces trajnog, kontroliranog i organiziranog smještanja otpada na tlo ili u zemlju. Lokacija određena za tu svrhu naziva se odlagalište otpada. Preporučeni postupci zbrinjavanja otpada koji se ne može ili ne mora uporabiti definirani su u 15 skupina, označenih oznakama od D1 do D15 [7].

Odlagališta inertnog i neopasnog otpada namijenjena za odlaganje otpada u ili na tlo (D1) obično su smještena na površini zemlje, iako mogu biti i u tlu. Ona se koriste za zbrinjavanje jalovine, otpadnih minerala i stijena iz ekstraktivne industrije te predstavljaju konačno odredište otpada. Prije nego što se otpad odloži, podvrgava se određenom postupku obrade u skladu s vrstom odlagališta (odlagališta opasnog, neopasnog i inertnog otpada). Za odlaganje u tlo koriste se napušteni rudnici koji udovoljavaju odgovarajućim geološkim, hidrološkim i seizmičkim uvjetima. Odlaganje tekućeg, zapaljivog, korozivnog, eksplozivnog ili oksidativnog otpada, kao i otpada navedenog u posebnom propisu, strogo je zabranjeno. Otpad se na tlo nanosi i izravnavava po slojevima (slika 2), a potom zbija i zasipava [4].



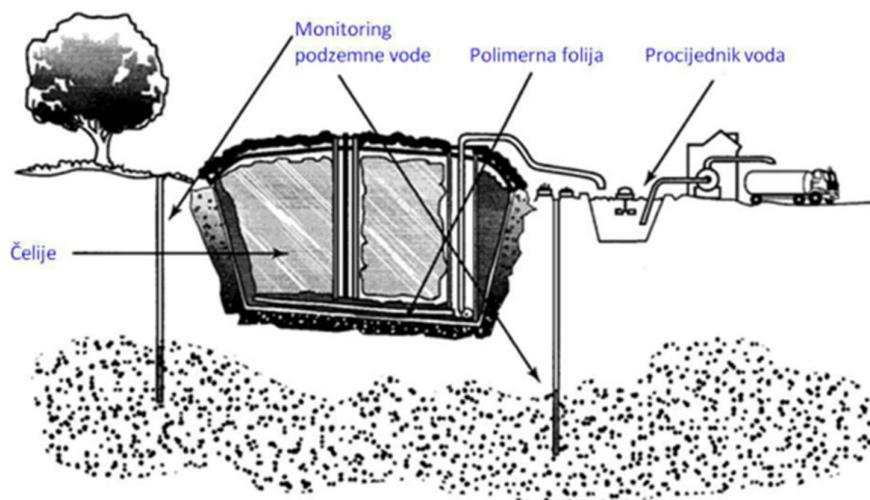
Slika 2. Presjek odlaganja otpada na tlo [4]

Odlaganje otpada u ili na tlo isključuje sljedeće aktivnosti:

- skladištenje prije uporabe/zbrinjavanja; D15 - pohrana otpada prije primjene bilo kojeg od postupaka zbrinjavanja D1 do D14 - osim privremenog skladištenja otpada na mjestu nastanka, prije sakupljanja i uporabe R13 - skladištenje otpada prije bilo kojeg od postupaka uporabe R1 do R12 - osim privremenog skladištenja otpada na mjestu nastanka, prije sakupljanja,
- upotreba inertnog otpada u građevinske svrhe ili radove prenamjene; D5 - deponiranje otpada na posebno pripremljenom odlagalištu - smještanje u povezane komore koje su zatvorene i izolirane jedna od druge i od okoliša itd.,
- korištenje inertnog otpada u građevinske svrhe ili radove prenamjene; R5 - recikliranje/obnavljanje drugih otpadnih anorganskih materijala, i
- odlaganje muljevitog, krutog ili tekućeg otpada u jame ili lagune; D4 - odlaganje otpada u površinske bazene [4].

Prilikom odabira lokacije biraju se tla s prirodnom nepropusnošću, koja ponekad mogu biti i umjetno stvorena, a kvaliteta nepropusnosti ovisi o svojstvima otpada. Lokacije koje su neprikladne za ove svrhe uključuju područja zaštićenih voda, kao i poplavna ili geološki nestabilna područja. U postupku odabira lokacije, važno je uzeti u obzir udaljenost od naselja kako bi se izbjegao arhitektonski i krajobrazni nesklad, promet teških vozila, buka uzrokovana

prometom te moguća emisija prašine i mirisa. Pregled odlagališta otpada na tlu može se pronaći u pojednostavljenoj shemi (slika 3) [4].



Slika 3. Shematski prikaz odlagališta otpada [4]

Pravilnikom o odlagalištima otpada [8], a u skladu s EU direktivom 2008/98/EZ utvrđene su različite kategorije odlagališta, postupci i ostali zahtjevi vezani uz odlaganje otpada. Propisane su i granične vrijednosti emisija u okoliš tijekom postupka odlaganja otpada te su navedeni uvjeti i mjere u vezi s planiranjem, izgradnjom, nadzorom tijekom operativnog razdoblja, zatvaranjem odlagališta, kao i postupci nakon njegovog zatvaranja.

Svrha ovih zahtjeva jest umanjiti negativne utjecaje na okoliš tijekom cijelog operativnog razdoblja odlagališta, posebno u smislu onečišćenja površinskih voda, podzemnih voda, tla i zraka. To uključuje i smanjenje emisija stakleničkih plinova te smanjenje rizika za ljudsko zdravlje koji bi mogao proizaći iz postupka odlaganja otpada i vijeka trajanja odlagališta [8].

Odlaganje otpada na tlo ima značajan utjecaj na okoliš i zahtijeva pažljiv pristup kako bi se minimizirali negativni učinci.

Odlagalište neopasnog otpada "Goričica" (slika 4) predstavlja službeno i jedino odlagalište na području grada Siska. Odlagalište otpada nalazi se na k.č. 56 k.o. Crnac koja je u vlasništvu Grada Siska. Na odlagalištu "Goričica" provode se postupci ravnjanja, sabijanja i prekrivanja odloženog otpada, uz prisutnost sustava za odvodnju i pročišćavanje procijednih

voda, regulacijskog bazena i sustava otplinjavanja. Dodatno, na odlagalištu se provode i ostali procesi gospodarenja otpadom, poput prihvata, sortiranja, obrade i nasipavanja otpada [9].



Slika 4. Prikaz odlagališta neopasnog otpada „Goričica“ [9]

Kontrolirano odlaganje otpada na trenutnoj lokaciji odlagališta odvija se od 1987. godine. Početni plan obuhvaćao je pregradu starog korita rijeke Save na dva dijela. Unutar tog područja, a na površini od 100 000 m², otpad se odlagao u iskopane kazete dimenzija 10 x 30 x 4 m, bez primjene posebnih mjera zaštite okoliša. Od 1987. do 1997. godine na odlagalištu je odloženo oko 140 000 tona ili oko 400 000 m³ otpada. Pritom je kapacitet iskopanih kazeta popunjen do 1997. godine. Radi usklađivanja s novom zakonskom regulativom te zbog proširenja kapaciteta za odlaganje otpada, 1997. godine proveden je projekt sanacije cijelog odlagališta. Projektiranim dimenzijama stvoren je dodatni kapacitet od oko 800 000 m³ odlagališnog prostora. Postojeće stanje odlagališta "Goričica" podvrgnuto je dvjema provedenim fazama sanacije, s daljnjim planovima za provedbu treće i četvrte faze [9].

U I. fazi sanacije 1998. godine, izvedena je nova ploha za odlaganje otpada površine 20 000 m², opremljena ključnim elementima poput postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda, plinsko - crpne stanice s bakljom te kontrolnim piezometarima. II. fazom sanacije, provedenom 2007. godine, obuhvaćeno je zatvaranje starog dijela odlagališta i izgradnja nove plohe za odlaganje, ukupne površine 30 000 m². Izvedeno je otplinjavanje postojećeg otpada, postavljen je temeljni brtveni sustav, drenažni sustav za prikupljanje procjedne vode s novog otpada, vertikalni bunari za otplinjavanje novog otpada te interna prometnica. Navedena ploha i danas je aktivna, a preostali kapacitet odlagališta, zaključno s 31. 12. 2019. godine iznosio je 315 540

t. Faza III. obuhvaća nadvišenje trenutno aktivne odlagališne plohe, dok se u fazi IV. planira zatvaranje nadvišenja. Očekivanim nadvišenjem stvorit će se dodatni kapacitet odlagališta od 66 000,00 m³ i mogućnost prihvata 59 358 t otpada, odnosno 65 954 m³ kompaktiranog otpada (s obzirom na omjer 1 m³ = 0,9 t). Uzevši u obzir da se na odlagalište neopasnog otpada "Goričica" godišnje odlaže oko 16 000 t otpada, nadvišenjem će se omogućiti odlaganje u razdoblju od četiri godine (od listopada 2020. do listopada 2024.). Implementacijom ovog proširenja osigurat će se ukupni kapacitet odlagališta od 395 509 t, odnosno 439 500 m³. Dnevne procijenjene količine miješanog komunalnog otpada koje će se odlagati iznose do 50 t na dan [9].

Na odlagalištu "Goričica" implementiran je temeljni brtveni sloj prema slijedećim specifikacijama [10]:

- izravnavajući sloj inertnog materijala,
- geokompozit (industrijski tepih od dva sloja geotekstila ispunjen granulama montmorionita, $k = 5 \times 10^{-11}$ m/s),
- geomembrana (industrijska folija od PEHD, debljine 2,5 mm, $k < 5 \times 10^{-15}$ m/s),
- geotekstil (500 g/m²),
- zaštita folije, šljunak (16/32 mm, sloj debljine 30 cm),
- PEHD cijevi (drenažne cijevi za procjednu vodu, promjera 315 mm) te
- razdjelni sloj (geotekstil 350 g/m²).

Temeljni brtveni sloj od iznimne je važnosti za očuvanje okoliša. Njime se sprječava nekontrolirani prodor tekućina i štetnih tvari u tlo čime se minimalizira rizik od onečišćenja podzemnih voda. Osim toga, pravilno postavljen brtveni sloj štiti okolne ekosustave od potencijalno štetnih utjecaja koje može uzrokovati otpad na odlagalištu [10].

Rješenjem o objedinjenim uvjetima zaštite okoliša [11] odlagalište „Goričica“ opremljeno je svim potrebnim elementima za pravilno zbrinjavanje otpada, uključujući ulaznu rampu i portirnicu, internu prometnu infrastrukturu, mosnu vagu, halu za sortiranje otpada, prostor za pranje vozila, separatori ulja i masti i dr.

Prema Dozvoli za gospodarenje otpadom [12] na predmetnom odlagalištu dopušteno je odlaganje 37 vrsta neopasnog otpada. U tablici 1 prikazana je ukupna količina odloženog otpada na odlagalište „Goričica“ u periodu od 2018. do 2023. godine.

Tablica 1. Ukupne količine odloženog otpada na odlagalište „Goričica“ u periodu od 2018. do 2023. godine

Godina	Količina (t)
2023.	16 151
2022.	17 359
2021.	18 775
2020.	15 691
2019.	16 358
2018.	16 677

Procjedne vode jedan su od najozbiljnijih problema kada je u pitanju zaštita zdravlja ljudi i okoliša tijekom odlaganja otpada. One ugrožavaju površinske i podzemne vode unutar i oko odlagališta. Ovisno o količini vode koja ulazi u odlagalište, svaki otpad odloženo u tijelo odlagališta stvorit će veće ili manje količine procjednih voda. Sastav i kvaliteta odloženog otpada direktno utječu na onečišćenje procjednih voda. Onečišćenje eluata na odlagalištima komunalnog otpada može biti od 5 do 10 puta veće od tipičnog onečišćenja kućanskih otpadnih voda. Na pokretljivost opasnih spojeva, odnosno njihovo curenje iz tijela odlagališta utječu fizikalni, kemijski i biološki čimbenici [13].

U primarne fizikalne čimbenike ubrajaju se [13]:

- vodopropusnost,
- gustoća odloženog otpada i
- specifične vanjske površine.

Na osnovi fizikalnih čimbenika određuju se brzina prolaza, vrijeme kontakta, površina kontakta te veza između otopine i krute tvari [13].

Kemijski čimbenici koji osobito djeluju na mobilnost opasnih spojeva su [13]:

- ukupne koncentracije,
- svojstva opasnih spojeva (npr. topljivost u vodi) i
- kemijske okolnosti (npr. pH).

Biološki čimbenici aktivniji su na odlagalištima s visokim udjelom biorazgradive komponente. Njihov učinak gotovo je zanemariv ukoliko je riječ o odlagalištima obrađenog (mineraliziranog) otpada. Utjecaj bioloških čimbenika izuzetno je teško predvidjeti, stoga njihovo upravljanje predstavlja ozbiljan izazov. Procjedne vode mogu biti onečišćene organskim molekulama i zasićene anorganskim spojevima u više stupnjeva. Osim spomenutih, u procjednim vodama otkrivene su i koncentracije zabranjenih koliformnih te opasnih bakterija. Utvrđeno je da eluat uključuje klice koje uzrokuju tifus, paratifus, crne boginje, tetanus, TBC i dizenteriju. Onečišćenje eluata, osobito kod odlaganja opasnog otpada, može rezultirati pojavom cijanida i teških metala [13].

U procjednim vodama s odlagališta otpada ispituju se različiti parametri kako bi se ocijenila kvaliteta i njihov potencijalni utjecaj na okoliš. Pri tome treba uzeti u obzir četiri ključna parametra: KPK, BPK5, suspendirane tvari i TOC.

KPK (kemijska potrošnja kisika) definirana je količinom kisika potrebnom za oksidaciju kemijskih spojeva u vodi. Često se koristi za procjenu razine onečišćenja vode organskim tvarima. Visoka koncentracija KPK ukazuje na prisutnost tvari koje mogu potrošiti kisik u procesu razgradnje, što može dovesti do smanjenja otopljenog kisika u vodi. Time dolazi do štetnih učinka na vodeni ekosustav, posebno na aerobne organizme koji ovise o otopljenom kisiku u vodi [13, 14].

BPK5 (biološka potrošnja kisika nakon pet dana) određuje količinu kisika koja je potrebna za biokemijsku razgradnju organskih tvari u vodi tijekom pet dana. BPK5 ne ukazuje na cjelokupnu potrošnju kisika za razgradnju organskih tvari. Za određivanje količine organske tvari koriste se pokazatelji poput kemijske potrošnje kisika (KPK) i ukupnog organskog ugljika (TOC) [14]. BPK5 važan je indikator kvalitete vode jer ukazuje na stupanj onečišćenja vode organskim materijalima koji su podložni biološkoj razgradnji. Ovaj parametar je osobito relevantan u procjeni utjecaja otpadnih voda, uključujući one koje dolaze s odlagališta otpada. Visoka razina BPK5 može ukazivati na prisutnost velike količine organskog otpada u vodi, što može ukazati potrebu za dodatnim tretmanima obrade [13, 14].

Suspendirane tvari čine krutine organskog ili anorganskog podrijetla koje plivaju ili lebde u vodi, veličine $> 1 \mu\text{m}$. Povećane razine suspendiranih tvari mogu uzrokovati zamućenost vode, smanjenje prozirnosti i utjecati na život u vodi. Mutnoća vode ometa prodor svjetlosti, što rezultira usporenim procesom fotosinteze. To dovodi do smanjenja koncentracije kisika u dubljim slojevima vode, povećavajući područje gdje se odvija anaerobna razgradnja.

Čestice u suspendiranom stanju često prenose pričvršćene ili apsorbirane zagađujuće tvari, kao što su teški metali ili organski spojevi ili druge kemikalije [14]. Praćenje suspendiranih tvari pomaže u procjeni transporta onečišćenja u vodnim tokovima, rijekama ili drugim vodenim sustavima.

TOC (ukupni organski ugljik) odnosi se na količinu organskih spojeva prisutnih u uzorku vode. Povišene razine često ukazuju na onečišćenje voda organskim tvarima, što može imati negativan utjecaj na vodeni ekosustav u smislu smanjenog otopljenog kisika u vodi [15]. TOC omogućuje praćenje promjena u kvaliteti vode, što je posebno važno za identifikaciju sezonskih varijacija ili iznenadnih promjena koje mogu utjecati na kvalitetu vode. TOC može sadržavati različite organske spojeve, uključujući one koji su potencijalno štetni za okoliš ili zdravlje ljudi. Praćenjem ovog parametra, mogu se identificirati potencijalno problematični spojevi [16].

Ukupne količine procjednih voda sastoje se od količina vanjskih voda, koje su ušle u tijelo odlagališta i količina unutarnjih voda [1].

Vanjske vode koje kod odlagališta, a osobito onih neuređenih, mogu ući u samo tijelo su [1]:

- oborinske vode,
- površinske, slivne vode i
- podzemne vode.

Otpad visokog udjela biološki razgradivih sastojaka, poput biorazgradivog otpada posjeduje veće količine vlage. Spomenuta vlažnost koja u tijelo odlagališta ulazi izravno iz otpada naziva se unutarnjom vodom [1].

Na odlagalištu otpada mogu nastati i druge vrste voda [1]:

- oborinske vode iz dijelova i površina na kojima nije odložen otpad,
- oborinske vode sa zatvorenih (saniranih) površina odlagališta,
- “strane” vode koje dotječu do područja odlaganja (vode iz hidrogeološkog medija),
- oborinske vode sa prometnica i krovnih površina unutar područja odlaganja,
- zauljene vode iz prostora za pranje vozila i
- otpadne vode iz sanitarnih čvorova.

Sve ove vrste odlagališnih voda se moraju zasebno obuhvatiti i prema potrebi predobraditi [1].

Osnovno načelo sigurnog odlaganja otpada nije samo izvedba, već i opremljenost kojom će se osigurati da koncentrirane onečišćujuće tvari ostanu trajno izolirane od okoliša. Primjenom brtvljenja sprječavaju se nekontrolirane emisije procjednih voda i plinova iz tijela odlagališta [1]. Temeljni brtveni sloj izvodi se na površini na kojoj će se odlagati otpad, a njegova svrha je sprječavanje istjecanje procjednih voda u tlo koje bi uzrokovalo onečišćenje podzemnih voda [17].

Podzemne vode su sve vode ispod površine tla u zoni zasićenja i u izravnom dodiru s površinom tla ili podzemnim slojem [18].

Utjecaj procjednih voda na podzemne vode očituje se kroz duži vremenski period i teže se kontrolira, a osobito kod velikih i neuređenih odlagališta. Razlog leži u ograničenoj količini otopljenog kisika koji je raspoloživ u slaboj disperziji. Eventualni nekontrolirani utjecaj eluata na podzemne vode kontrolira se pomoću mreže piezometara. Jednom onečišćena podzemna voda postaje neupotrebljiva kao izvor pitke vode [1].

Izravna odvodnja neobrađenog eluata u javnu kanalizaciju, posebice u okolne vodotoke strogo je zabranjena, a količina i onečišćenost ovise o starosti odlagališta i godišnjem dobu. Stoga je nužno kontinuirano analizirati, a potom eluat obraditi odgovarajućim postupcima u sklopu odlagališta [1].

Izbor metode za obradu treba se zasnivati na sastavu i laboratorijskoj obradi eluata, od kojih se razlikuju [1]:

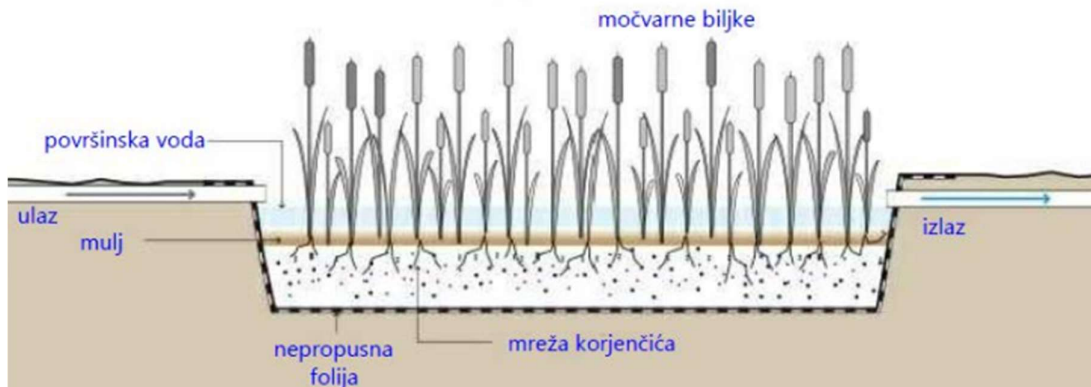
- natapanje prskanjem,
- recirkulacija kroz tijelo odlagališta i
- uređaj za obradu eluata.

Starenjem otpada na odlagalištu dolazi do brojnih biokemijskih reakcija koje uzrokuju promjene u sastavu procjednih voda. Kemijska i biološka potrošnja kisika, kao i količine metala i njihovih spojeva padaju kako odlagalište sazrijeva. Unatoč tome, koncentracije amonijaka mogu znatno porasti. Prema podacima u literaturi [1] obično nakon prve godine odlaganja otpada biološka potrošnja kisika (BPK5) počinje značajno opadati, a nakon 5 do 8 godina vrijednost BPK5 je gotovo jednaka nuli. Vrijednost kemijske potrošnje kisika nakon 6 do 8

godina postiže vrijednosti manje od 5 000 mg/l. Maksimalni sadržaj amonijaka postiže se i održava nakon 10 do 12 godina odlaganja otpada [1].

Temeljem ovih svojstava može se zaključiti da procjedne vode predstavljaju značajan rizik za okoliš. Prema stručnoj literaturi [1], a ovisno o arhitekturi i stanju odlagališta, odnosno vrsti odloženog otpada, procjedne vode mogu imati veću koncentraciju opasnih spojeva i veću količinu štetnih elemenata na određenom odlagalištu. Konkretno, pH eluata može varirati između 5,3 i 9,1. Koncentracija klora može premašiti vrijednost 55 000 mg/l. Kemijska potrošnja kisika (KPK) može dosegnuti 35 000 mg/l, a biološka potrošnja kisika (BPK5) 23 000 mg/l. Ukupni sadržaj dušika varira između 400 i 2 000 mg/l, dok koncentracija amonijaka može premašiti 15 000 mg/l. Istraživanja koja su provedena u svijetu pokazala su da su procjedne vode između ostalog zagađene organskim tvarima. Najčešće prisutne opasne tvari u onečišćenju procjednih voda su 198 odlagališta u Njemačkoj i 385 odlagališta u SAD-u su tetrakloreten i trikloroeten. Unatoč činjenici da je procjedna voda izuzetno organski onečišćena, KPK se smatra primarnim pokazateljem zagađenosti. Utvrđeno je da se razine kisika u recipijentu smanjuju i na račun BPK5 i na račun KPK. Kada se veće količine otpada odlože na površinu odlagališta, dolazi do sporije biološke razgradnje. Brža biološka razgradnja ostvaruje se manjim odlaganjem i recirkulacijom procjednih voda kroz tijelo odlagališta. Primarni učinak procjednih voda na površinske vode u blizini odlagališta očituje se u povećanoj potrošnji otopljenog sadržaja kisika. Time se mogu ozbiljno ugroziti flora i fauna. Nadalje, anorganski i organski spojevi koji se ne mogu razgraditi bioprocima ulaze u floru i faunu kao opasne i kancerogene tvari, a time i u ljudski prehrambeni lanac [1].

Vrlo često se na odlagalištima otpada, postavljaju biljni uređaji kojima je svrha pročišćavanje otpadnih voda odlagališta otpada. Biljni uređaj definiran je kao uređaj stvoren i podignut izvan prirodnog okruženja koristeći koncepte močvarnog sustava (biljka, vodeni medij i supstrat) u cilju kontroliranog pročišćavanja otpadnih voda. Korištenje biljnih sustava za obradu otpadnih voda upotrebljavale su i drevne egipatske i kineske kulture. Obrada procjednih voda provodi se koristeći kombinaciju fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa protjecanjem vode kroz medij sastavljen od biljaka, supstrata i mikroorganizama. Pri tome se tvari sadržane u procjednoj vodi uklanjaju raznim mehanizmima, pa se tako ukupne suspendirane tvari uklanjaju sedimentacijom i filtracijom, organske tvari biološkom degradacijom i sedimentacijom, dušik nitrifikacijom i sedimentacijom, a fosfor sedimentacijom, filtracijom i adsorpcijom [13, 19]. Na slici 5 nalazi se prikaz površinskog biljnog uređaja.



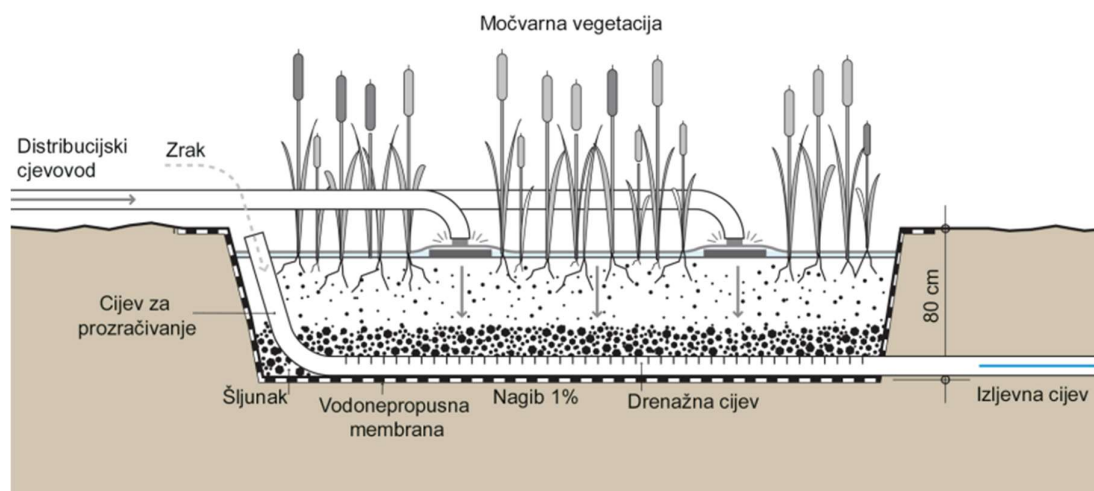
Slika 5. Prikaz površinskog biljnog uređaja [20]

U biljnim uređajima kao makrofiti najčešće se koriste vodene biljke kojima je prirodno stanište najčešće u obalnim područjima močvara i jezera - helofiti. U skupinu helofita ubrajaju se *Phragmites australis* i vrste rodova *Carex*, *Scirpus* i *Typha*. Kao supstrat u biljnim uređajima najčešće se koristi pijesak ili šljunak različite granulacije. Pravilan odabir supstrata znatno utječe na učinkovitost uklanjanja otpadnih tvari [13].

S obzirom da u procjednoj vodi prevladavaju organske tvari, mikroorganizmi su glavni čimbenici koji pročišćavaju procjednu vodu obzirom da koriste organske tvari kao hranu i izvor energije. Većina mikroorganizama nalazi se na površini korijena ili supstrata. Procjedna voda uglavnom sadrži vrlo male količine otopljenog kisika, stoga su organizmi koji djeluju anaerobne, a u rjeđim slučajevima i fakultativno aerobne prirode. No bez obzira na pretežito anaerobne uvjete, vrijednosti BPK i KPK znatno se smanjuju prolaskom procjedne vode kroz biljno biološki uređaj. Iako je kisik teško topljiv u vodenom mediju, a rast biljaka i mikroorganizama može bit ograničen, navedene biljke koje se koriste prilagođene su rastu u području sa siromašnim kisikom. Otopljeni kisik u otpadnoj vodi koja prolazi biljnim uređajem rezultat je procesa fotosinteze, fizikalnog prijenosa kisika iz zraka u vodu, prijenosa kisika zbog prolaska vode u supstrat i prijenosa kisika iz biljke u vodu [13].

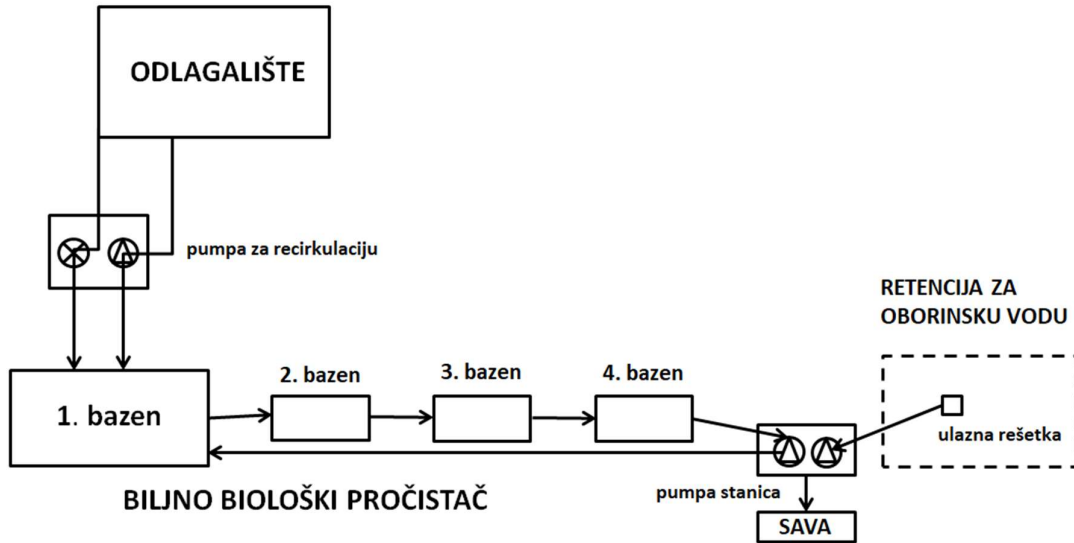
Biljke mikroorganizmima služe za stanište i kao izvor potrebnog kisika. Korijenje, listovi i stabljike biljaka sačinjene su od šupljina, kroz koje zrak dolazi do korijenja te se širi u supstrat i tlo. Stoga dio tla ostaje bez kisika što posljedično dovodi do djelovanja anaerobnih mikroorganizama. Nakon razgradnje, organske tvari ugrađuju se u tkivo biljaka, a procjedna voda se pročisti. Prednost biljaka je i pročišćavanje odnosno sakupljanje teških metala i formaldehida [13].

Uz već postojeće biljne uređaje za pročišćavanje, napredni uređaji koji koriste aeracijski sustav predstavljaju dodatan korak u poboljšanju učinkovitosti. Ovi napredni uređaji koriste visoku tehnologiju pročišćavanja kako bi dodatno smanjili koncentraciju BPK5 i postigli još viši stupanj čistoće u procjednoj vodi. Ključna inovacija leži u pasivnoj integraciji aeracijskih cijevi direktno u podlogu, kao što je prikazano na slici 6. Ova tehnologija omogućuje optimalan prijenos kisika kroz podlogu, što je ključno za učinkovitu oksidaciju amonijaka i razgradnju organskih tvari [13].



Slika 6. Ugradnja aeracijskih cijevi u podlogu biljnog pročišćača [20]

Oborine koje natope površinu otvorenog lica odlagališta djelomično isparavaju, dok preostali dio prodire kroz otpad. Ova voda, vođena gravitacijski kroz slojeve otpada, sudjeluje u procesu razgradnje otpada i nosi sa sobom topive štetne tvari. Na odlagalištu Goričica se procjedne vode kroz drenažni sustav skupljaju unutar odlagališta, izvode izvan nasipa i putem sabirnih cijevi duž vanjskog ruba nasipa preusmjeravaju u biljno - biološki pročišćač (slika 7) [10].



Slika 7. Shematski prikaz biljno biološkog uređaja za pročišćavanje procjednih voda na odlagalištu Goričica [10]

Za obradu procjednih voda izgrađen je biljno biološki pročišćivač s četiri bazena, precrcpne stanice i kontrolnog okna ukupnog volumena od približno 420 m³. Ovaj uređaj simulira prirodne uvjete pročišćavanja vode u močvarnom okruženju, a ključnu ulogu u tom procesu igraju mikroorganizmi naseljeni na korijenima biljaka i u supstratu. Stvaranje aerobne zone duboko u bazenima omogućeno je putem transporta kisika kroz biljke, dok dio supstrata ostaje bez kisika, omogućavajući sudjelovanje anaerobnih mikroorganizama u procesu razgradnje. Procjedne vode, skupljene na dnu odlagališta putem drenažnih cijevi i kanalizacije, akumuliraju se u prihvatnom bazenu, koji također djeluje kao taložnik (slika 8). Iz ovog bazena, voda se može ponovno usmjeriti na odlagalište ili preusmjeriti gravitacijski u drugi bazen biljno biološkog pročišćivača [10].



Slika 8. Prihvatni bazen (1. bazen biljno biološkog pročišćača)

Drugi bazen služi kao sustav filtracije za zadržavanje toksičnih tvari i provodi djelomično anaerobno i aerobno pročišćavanje. U supstratu drugog bazena posađene su sadnice sita. Voda iz drugog bazena putuje na isti način u treći bazen, u čijem je supstratu posađena trska (slika 9) [10].

Četvrti bazen (slika 10) ima istu strukturu kao i prethodna dva, sa sadnicama šaša u supstratu. Voda iz ovog bazena gravitacijski odlazi u izlazno okno koje sadrži dvije crpke. Jedna crpka vraća vodu u prvi bazen, dok druga može ispustiti vodu u recipijent. Iako je planirano dovoditi vodu iz retencije oborinskih voda u izlazno okno kako bi se dodatno razrijedila prije ispuštanja u recipijent, dosad nije bilo potrebe za ispuštanjem vode iz uređaja u recipijent već se vraća na tijelo odlagališta [10].



Slika 9. Bazeni za pročišćavanje (2. i 3. bazen biljno biološkog pročišćača)



Slika 10. Retencijski bazen (4. bazen biljno biološkog pročišćača)

Temperatura procjedne vode uglavnom je veća od temperature ulazne vode. U ovisnosti je o geografskom smještaju izvora otpadne (procjedne) vode, tehnološkom procesu u kojem nastaje i godišnjem dobu, a vrijednosti se kreću od 10 °C do 21 °C [13].

Temperatura okoliša, a time i vodenog medija, oscilira dnevno, sezonski i regionalno, utječući na različite kemijske i biološke procese, poput ciklusa transformacije dušika koji je izrazito osjetljiv na temperaturne oscilacije. Prilikom izgradnje uređaja važno je uzeti u obzir temperaturu okoline i otpadne vode. Fluktuacije temperature vodenog medija biljnog uređaja mogu se klasificirati kao dnevne ili sezonske. Dnevne oscilacije usko su povezane sa sunčevim zračenjem, odnosno ciklusom dan - noć. Kao rezultat toga, s malim kašnjenjem, temperatura vodenog medija uglavnom prati dnevne oscilacije temperature atmosfere. Sezonske temperaturne oscilacije uzrokovane su sezonskom insolacijom, zbog čega se učinkovitost biljnog uređaja mijenja s godišnjim dobima [13].

Temperatura je važan čimbenik u pročišćavanju procjednih (otpadnih) voda upravo zbog brzine kemijskih reakcija. Topljivost kisika smanjuje se povećanjem temperature zraka. Optimalna temperatura za odvijanje mikrobiološke aktivnosti je između 25 °C i 37 °C. Kemijski i biološki procesi koji se odvijaju unutar biljno biološkog uređaja ovise i o pH vrijednosti. Optimalno područje pH za većinu bakterija nalazi se unutar $4,0 < \text{pH} < 9,5$. Tako se u močvarama, gdje se prirodno odvija biljno biološko pročišćavanje, pH vrijednosti kreću od blago alkalnih (pH 7-8) do jako kiselih (pH 3-4) [13, 21].

Temperatura otpadne vode kontrolira učinkovitost uklanjanja onečišćivača onim biološkim reakcijama koje su temperaturno ovisne. Smanjenje BPK5, odnosno brzina razgradnje organskih tvari, smanjuje se sa temperaturom. No ipak, mikroorganizmi na supstratu i zimi mogu provoditi biološku razgradnju, čak i pri niskim temperaturama zbog toga što se pri nekim biokemijskim procesima oslobađa toplina. Učinkovitost uklanjanja organskih tvari ovisi o sezonskim promjenama stoga i vrijednosti BPK5, KPK, dušika i ukupnog fosfora često pokazuje sezonska odstupanja. Uklanjanja organskih tvari obično su učinkovitija u proljeće i ljeto pa su tada i vrijednosti za KPK i BPK5 niže [13].

Utjecaj klimatskih promjena određen je nizom čimbenika, a ozbiljnost utjecaja ovisi o geografskom položaju, stupnju razvijenosti i osjetljivosti. S obzirom na navedeno, Republika Hrvatska se nalazi u mediteranskoj regiji koja je poznata kao „vruća točka“ s već ostvarenim prosječnim porastom temperature od 1,5 °C i vrlo vidljivim učincima klimatskih promjena poput porasta razine mora, širenje suhih područja i ekstremnim vremenskim prilikama [22].

U razdoblju 2011. – 2040. godine ljeti se očekuje porast broja vrućih dana (kad je maksimalna temperatura veća od 30 °C), što bi moglo prouzročiti i produžena razdoblja s visokom temperaturom zraka (toplinski valovi). Pretpostavlja se da će se porast broja vrućih dana nastaviti i u razdoblju 2041. – 2070. godine [22].

Visoke temperature uzrokuju povećano isparavanje procjednih voda, što može rezultirati smanjenjem njihova volumena i otežanom obradom na biljnom uređaju. Porast temperature ubrzava procese kemijske razgradnje otpada, što može dovesti do povećane koncentracije onečišćujućih tvari u procjednim vodama i povećati rizik od ispuštanja štetnih tvari u okoliš [13].

Osim navedenog, porast temperature direktno utječe na biološku aktivnost u procjednim vodama. Pritom mikroorganizmi brže razgrađuju organske tvari, što dovodi do veće potrošnje kisika koja se očituje u BPK5 parametru. Međutim, vrlo visoke temperature uzrokuju „stres“ za mikroorganizme, a time i njihovu smanjenu aktivnost. Ove promjene u BPK5 mogu utjecati na kvalitetu vode, posebice ako su temperature visoke tijekom duljeg vremenskog razdoblja [13]. Povećanje BPK5 može utjecati na ekosustave voda, uključujući rijeke, jezera i podzemne vode. Promjene u kvaliteti vode mogu utjecati na riblje populacije, biljni svijet i druge organizme u vodenim ekosustavima, što može imati nepovoljne učinke na ljude koji ovise o tim ekosustavima.

Pretpostavlja se da će promjene u količini oborina u bliskoj budućnosti biti (2011.-2040.) relativno male, ograničene na manje lokacije i varirati u predznaku ovisno o sezoni. Najveća promjena količine oborine može se predvidjeti na Jadranu u jesen, u količini od najviše 45 do 50 mm. Međutim, jesenski pad oborine nije statistički značajan. Promjene oborina u Hrvatskoj vjerojatno će postati očitije u drugoj eri buduće klime (2041. - 2070.). Zbog toga se predviđa smanjenje oborine ljeti u gorskoj Hrvatskoj i uz Jadransku obalu. Smanjenja su statistički značajna i dosežu vrijednost od 45 do 50 mm. U sjevernoj Hrvatskoj i na Jadranu prognozira se porast oborina zimi [22].

Ove promjene su vrlo važne budući da povećane oborine mogu značajno utjecati na sastav procjednih voda s odlagališta otpada. Oborinske vode koje prolaze kroz otpad ispiru organske tvari iz otpada, povećavajući vrijednosti BPK5 i drugih organskih spojeva u procjednim vodama. Povećane oborine povećavaju rizik od poplava na odlagalištu, što može dovesti do ispiranja veće količine tvari iz otpada, uključujući onečišćujuće tvari. Osim toga, količina oborina može utjecati na pH vrijednost procjednih voda. Odlagališta otpada često generiraju kisele procjedne vode zbog prisutnosti kiselih tvari u otpadu, pa povećane oborine mogu dodatno sniziti pH vrijednost [13].

Suspendirane čestice mogu djelovati kao nosači onečišćujućih tvari [13]. Povećane količine oborina omogućuju lakši transport teških metala, pesticida ili drugih kemijskih spojeva u procjedne vode. Pojačane količine oborina povećavaju mogućnost plavljenja odlagališta. Poplave i izlivanje mogu uzrokovati otjecanje ogromnih količina onečišćujućih tvari iz otpada u obližnje vodotoke ili podzemne vode, uzrokujući promjene u kvaliteti vode [1].

3. MATERIJALI I METODE

Uzorci korišteni za ovo ispitivanje uzimani su na odlagalištu otpada "Goričica" koje se nalazi nasuprot naftne luke na lijevoj obali rijeke Save, oko 6,5 kilometara južno od središta Siska [9]. Sadašnju opremu postrojenja čine četiri slivna bazena iz kojih su uzimani uzorci periodički, u ožujku i rujnu u periodu od 2018. do 2023. godine.

Tijekom analize određivanje su suspendirane tvari, ukupni organski ugljik (TOC), kemijska potrošnja kisika (KPK), te biokemijska potrošnja (BPK5) [23].

Osim toga praćena je količina oborina i promjena temperature u navedenim periodima. Vrijednosti temperatura očitane su sa meteorološke stanice koja je postavljena na odlagalištu Goričica. Količine oborina preuzete su od Državnog hidrometeorološkog zavoda [24].

Procjedna voda na odlagalištu otpada Gorčica uzimala se iz retencijskog bazena procjedne vode. Uzorkovanje je provedeno pomoć teleskopskog štapa sa sabirnom posudom. Voda je uzimana sa ruba retencijskog bazena na način da se voda pomoću štapa i sabirne posude zgrabila po dubini koliko je to moguće uz pomicaaje sabirne posude duž ruba bazena. Na ovaj način se uzorak uzimao više puta u isti spremnik iz kojeg je razdijeljen u više laboratorijskih boca [23].

U ovako uzetim uzorcima određivana je suspendirana tvar, ukupni ugljik , KPK i BPK5. Suspendiranu tvar određivana je gravimetrijskom metodom kojom se određuje maseni udio svih čestica koje ostaju na filteru od staklenih vlakana [23].

Prethodno pripremljeni i odvagani filter postavljen je na opremu za filtraciju, a prethodno homogeniziran i odmjeran uzorak je profiltriran. Nakon toga je filter uz pomoć pincete postavljen na aluminijsku foliju te sušen u sušioniku na 105°C do konstantne mase. Iz dobivene razlike mase filtera poslije i prije filtracije te volumena uzorka izračunata je koncentracija suspendirane tvari [23].

Kemijska potrošnja kisika određivana je dikromatnim postupkom. Određeni volumen uzorka uz pomoć koncentrirane sulfatne kiseline uz srebro sulfat te dodatak kalijeva dikromata zagrijavan je 120 minuta na 150 °C uz povratno hladilo. Nakon hlađenja uzorka uz indikator feroin provedena je titracija se suviškom dikromata sa FAS-om (otopina amonij željezo (II)

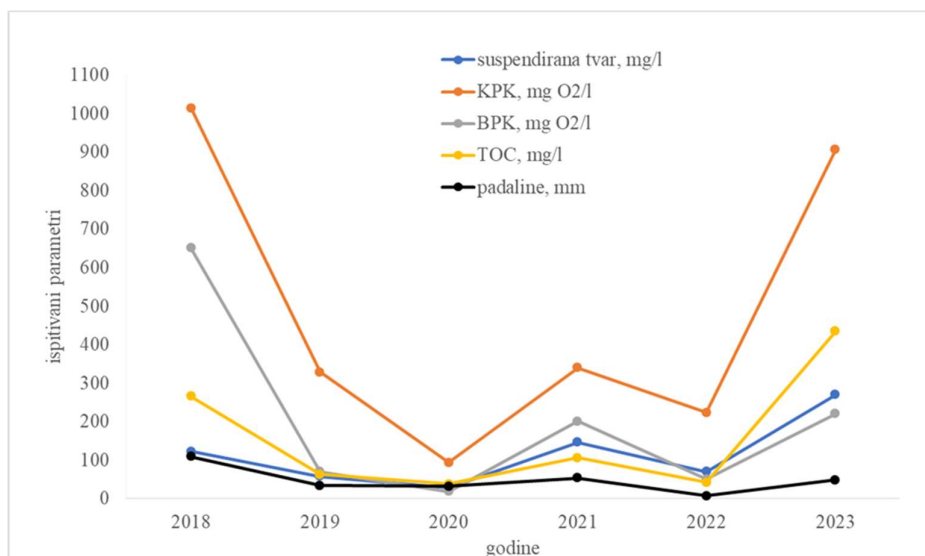
sulfata) [7]. Iz utroška FAS-a za titraciju uzorka i utroška FAS-a za slijepu probu, te vrijednosti koncentracije FAS-a, izračunata je vrijednost kemijske potrošnje kisika, KPK [23].

BPK5 vrijednost pokazuje biokemijsku potrošnju kisika tijekom 5 dana pri temperaturi od 20°C u tamnim bocama uz aeraciju. Prema očekivanoj BPK5 vrijednosti iz tablice (norma) je očitani potrebni volumen uzorka koji se odmjerio u bocu, stavljen je magnetski mješač, dodan je određeni broj nitrifikacijskih kapi te se boca zatvorila oxitop čepom. Oxitop čep se nulirao na početak očitavanja te se boca stavila u termostat na 20 °C kroz pet dana. Nakon toga se očitavala vrijednost koja je pomnožena određenim faktorom, koji ovisi o volumenu postavljenog uzorka, što predstavlja vrijednost BPK5 [23].

Određivanje ukupnog organskog ugljika provedeno je na analizatoru ugljika TOC-L + TNM-L + ASS-L proizvođača Shimadzu [23].

4. REZULTATI I RASPRAVA

Na slici 11 prikazane su vrijednosti suspendiranih tvari, ukupnog organskog ugljika (TOC), kemijska potrošnja kisika (KPK), te biokemijska potrošnja (BPK5) u ovisnosti o količini oborina u mjesecu ožujku (period 2018. - 2023. godine)



Slika 11. Ovisnost sadržaja suspendiranih tvari, KPK, BPK5 i TOC-a u procjednim vodama o količini oborina u ožujku

Iz slike 11 je vidljivo da je KPK u ožujku 2018. i 2023. bilo vrlo visok i iznosio je 1014 mg O₂/l odnosno 528 mgO₂/l. U ožujku 2019., 2020., 2021. i 2022. g. KPK je znatno niži uz manji porast 2021. godine. Varijacije u KPK su u skladu s varijacijama oborina što je i očekivano. Budući da je KPK mjera količine kisika koja je potrebna za razgradnju organskih tvari u vodi i ukazuje na ukupno onečišćenje vode [19] vidljivo je da je najveće onečišćenje procjednih voda bilo kod veće količine oborina. Razlog tome može biti činjenica da se porastom količine oborina ispire više štetnih tvari sa samog odlagališta. Osim toga, povećanje količine oborina može potaknuti razgradnju organskih tvari na odlagalištu. Ovaj proces oslobađa različite spojeve u vodu, uključujući one koji mogu povećati KPK. Iako je prema Rješenju o objedinjenim uvjetima zaštite okoliša [11] propisana maksimalna dopuštena koncentracija (MDK) za KPK koja iznosi 100 mg O₂/l iz slike 11 vidljivo je da analizirani podaci gotovo za sve promatrane godine pokazuju povećane vrijednosti KPK posebno u situacijama kada je povećana količina oborina.

Postojeće pročišćavanje otpadnih voda biljnim uređajem koje se trenutno koristi na odlagalištu „Goričica“ je zadovoljavajuće za sušne periode ili periode kada su oborine manje što je vidljivo u ožujku 2020. g. (KPK je iznosio 93 mg O₂/l, a ukupna mjesečna količina oborina svega 31,3 mm). Međutim, u narednim godinama mogu se očekivati iznenadne i obilne oborine kao posljedica klimatskih promjena što će vrlo vjerojatno utjecati na KPK u procjednim vodama. Sve navedeno ukazuje na potrebu unapređenja postupaka pročišćavanja otpadnih voda na odlagalištu.

Vrijednosti za BPK5 prikazane na slici 11 pokazuju da BPK5 raste sa količinom oborina. Maksimalno opterećenje BPK5 izmjereno je u ožujku 2018. i 2023. i iznosi 650, odnosno 220 mg O₂/l. U ovom periodu je ujedno zabilježena i najveća količina oborina. Promjene vrijednosti BPK5 pokazuju isti trend kao i promjene KPK što je i očekivano budući da oba parametra ukazuju na sposobnost razgradnje organske tvari djelovanjem mikroorganizama. Navedeni porast je vrlo vjerojatno posljedica bržeg i većeg dotoka, odnosno produkcije procjedne vode u biljnom uređaju. Visoke vrijednosti BPK5 ukazuju na prisutnost veće količine organskih tvari koje mikroorganizmi nisu uspjeli obraditi. Vidljivo povećanje BPK5 može nastati i zbog prekomjerne aktivnosti mikroorganizama u supstratu biljaka.

Mikroorganizmi čine glavnu ulogu u pročišćavanju otpadnih voda. Organske tvari koriste kao izvor hrane, a zatim je transformiraju u biomasu i energiju [25]. Većina mikroorganizama se nalazi u supstratu ili površini korijena. Razgradnja organskih tvari odvija se u pretežito anaerobnim uvjetima, a vrijednosti BPK5 trebale bi se smanjivati prolaskom otpadne vode kroz biljni uređaj [13]. Zadovoljavajuće vrijednosti BPK5 zabilježene su u ožujku 2020. g. (BPK5 je iznosio 18 mg O₂/l, a ukupna mjesečna količina oborina svega 31,3 mm). Budući da ostale vrijednosti znatno premašuju maksimalno dopuštene koncentracije koje iznose 20 mg O₂/l [11], vjerojatno povećanje oborina dovodi do prekomjerne aktivacije mikroorganizama. Dodavanje enzima u sustav pročišćavanja procjednih voda tijekom perioda velikih oborina može biti korisna mjera za poboljšanje učinkovitosti procesa. Enzimi u procesu pročišćavanja procjednih voda mogu poboljšati aktivaciju mikroorganizama i ubrzati razgradnju organskih tvari.

Slika 11 pruža uvid u koncentracije suspendiranih tvari u promatranom periodu istraživanja. Analizirajući rezultate jasno je uočljivo značajno povećanje koncentracije suspendiranih tvari tijekom razdoblja intenzivnih oborina. Unatoč očekivanjima da će se maksimalna koncentracija suspendiranih tvari ostvariti s razdobljem najvećih oborina,

prikazani rezultati u ožujku 2023. g. otkrivaju nešto neočekivano. U ovom periodu oborine nisu bile na vrhuncu, ali je zapažena maksimalna koncentracija suspendiranih tvari od 269 mg/l (MDK=25 mg/l [11]). Ovaj neusklađeni rezultat potiče na detaljniju analizu i razmatranje mogućih čimbenika koji su utjecali na ovaj obrnuti odnos između oborina i koncentracije suspendiranih tvari.

Pored toga, oborine imaju ključnu ulogu u transportu suspendiranih čestica iz otpada na odlagalištu u procjedne vode. Erozija tla na odlagalištu povećava se s intenzitetom oborina, što rezultira ispiranjem suspendiranih čestica u kanale za sakupljanje procjedne vode. Suspendirane čestice uključuju razne tvari poput tla, otpadnih čestica, otopljenih metala i drugih nečistoća koje su se taložile na odlagalištu. Ovo ispiranje može rezultirati značajnim povećanjem koncentracije suspendiranih čestica u procjednim vodama za vrijeme obilnih oborina. Intenzivne oborine povećavaju protok vode na odlagalištu. Povećan protok može nositi suspendirane čestice, otopljeni otpad i sedimente s površine odlagališta u procjedne vode. Brz protok vode može dodatno potaknuti ispiranje tvari i transport čestica [1, 13]. Zbog očekivanog porasta količina oborina uzrokovanih klimatskim promjenama očekuje se i daljnji porast koncentracije suspendiranih čestica. Postavljanje sustava za filtriranje vode može značajno smanjiti koncentraciju suspendiranih čestica. Filtriranje vode može se postići korištenjem prepreka, sedimentacijskih bazena ili sustava filtracije. Dodatno, razmatranje prilagodbi infrastrukture odlagališta, uključujući promjene u drenažnim sustavima može pomoći u boljoj kontroli i upravljanju transportom suspendiranih čestica.

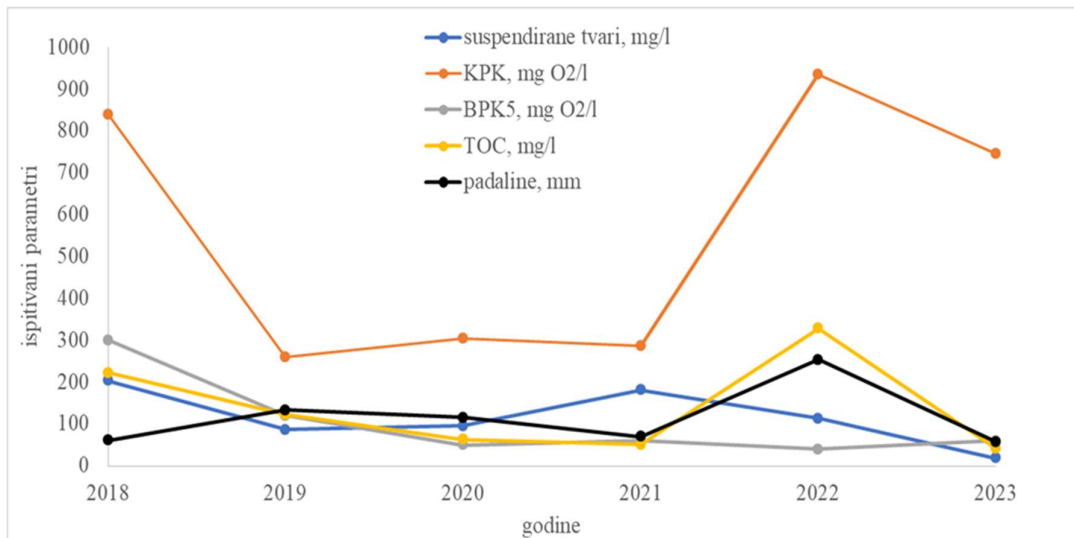
Na temelju prikazanih rezultata, povećane koncentracije TOC-a tijekom razdoblja većih oborina ukazuju na značajan unos organskih tvari u procjedne vode. Organske tvari u procjednoj vodi proizlaze iz povećane razgradnje i otapanja različitih otpadnih materijala uslijed obilnih oborina. Ova povezanost između oborina i TOC-a može prikazati aktivnost mikroorganizama prisutnih u supstratu biljaka. Mikroorganizmi, uključujući bakterije i gljivice, koriste organske tvari kao izvor hranjivih tvari. Povećana koncentracija TOC-a u procjednim vodama može poticati intenzivniju aktivnost mikroorganizama, što rezultira povećanom potrošnjom organskih tvari u vodi. Prevelike količine organskih tvari mogu izazvati ozbiljne posljedice, uključujući odumiranje mikroorganizama. Važno je napomenuti da mikroorganizmi pri razgradnji organske tvari troše kisik u procesu aerobne razgradnje. U uvjetima povećane aktivnosti mikroorganizama uzrokovane povećanim TOC-om, može doći do smanjenja razine kisika u vodi. Isto tako, prevelika količina organskih tvari u vodi može dovesti do povećane konkurencije među mikroorganizmima za hranjive tvari. Navedena konkurencija može

rezultirati smanjenim pristupom hranjivim tvarima. Nedostatak kisika, ali i prevelika količina organskih tvari može dovesti do odumiranja manje prilagodljivih mikroorganizama [26, 27]. Nadalje, praćenje aktivnosti enzima koji sukladno raspoloživosti organskih tvari kataliziraju njihovu razgradnju može pružiti dodatan uvid u mikrobiološke procese. Enzimi poput lipaza, proteaza i amilaza sudjeluju u razgradnji različitih tipova organskih spojeva, a njihova aktivnost može biti direktno povezana s koncentracijom TOC-a. [13].

Osim toga, treba napomenuti da je jedan od ključnih utjecaja obilnih oborina promjena pH vrijednosti u procjednoj vodi. Razrjeđivanje procjedne vode s oborinama može rezultirati značajnim fluktuacijama u pH vrijednosti. Povećana količina oborinske vode može razrijediti koncentraciju kiselih ili lužnatih tvari prisutnih u vodi, što direktno utječe na pH. Na primjer, oborinske vode s visokom koncentracijom sulfata mogu pridonijeti povećanju kiselosti. S druge strane, razrjeđivanje otopljenog CO₂ iz atmosfere može stvarati ugljičnu kiselinu, snižavajući pH vrijednost [13, 19]. Odlagalište Goričica smješteno je u blizini industrijske zone grada Siska zbog čega je moguća pojava kiselih kiša koje mogu promijeniti pH procjednih voda što neposredno utječe na promjene u ponašanju mikroorganizama. Kao posljedica toga mogu se javiti promjene i nelogičnosti u dobivenim rezultatima ispitivanih tvari u procjednim vodama.

U konačnici, integracija rezultata ispitivanih parametara s proučavanjem mikrobioloških procesa na odlagalištu pruža holistički pristup razumijevanju dinamike organskih tvari i ekosustava vodenog okoliša. Ovo znanje od ključne je važnosti za razvoj održivih strategija upravljanja odlagalištem, usmjerenih na očuvanje kvalitete vode i održavanje biološke raznolikosti u vodnom okolišu. Odvojeno prikupljanje biorazgradivog otpada može smanjiti količinu biološki razgradive komponente koja se odlaže odlagalište. Time bi se uvelike smanjio izvor organskih tvari zaslužan za povećane koncentracije KPK, BPK5, TOC-a i suspendiranih tvari.

Na slici 12 prikazane su vrijednosti suspendiranih tvari, ukupnog organskog ugljika (TOC), kemijska potrošnja kisika (KPK), biokemijska potrošnja kisika (BPK5) u ovisnosti o količini oborina u mjesecu rujnu (period 2018. - 2023. godine).



Slika 12. Ovisnost sadržaja suspendiranih tvari, KPK, BPK5 i TOC-a u procjednim vodama o količini oborina u rujnu

Iz slike 12 vidljivo je da koncentracija KPK u procjednoj vodi sa odlagališta ne mora nužno rasti sa povećanom količinom oborina. Navedeni trend posebno je izražen u rujnu 2018. godine kada je KPK iznosio 840 mg O₂/l uz izrazito niske oborine od 60,4 mm. Razlozi za ovo odstupanje povezanost mogu imati u različitim uvjetima tla u biljno biološkom pročištaču, utjecaju oborina na mikroorganizme u supstratu i vremenskim uvjetima. U ožujku, povećana količina oborina može rezultirati zasićenjem tla vodom, što može ograničiti prodiranje kisika u tlo.

Anaerobni uvjeti koji nastaju uslijed zasićenja mogu inhibirati aktivnost aerobnih mikroorganizama odgovornih za razgradnju organske tvari. To može dovesti do smanjenja razgradnje organskih tvari, odnosno smanjenja KPK-a u procjednoj vodi. S druge strane, u rujnu tlo može biti suše, što pridonosi boljoj aeraciji tla i poticanju aktivnosti mikroorganizama, čime se održava relativno stabilna koncentracija KPK-a. [13]. Primjena bioloških agenasa može biti korisna mjera kako bi se poboljšala razgradnja organskih tvari, smanjila koncentracija KPK-a i potaknula biološka aktivnost u tlu, posebno u uvjetima niskih oborina i nižih temperatura u rujnu.

Vrijednosti prikazane na slici 12 ukazuju na različito ponašanje koncentracije BPK5 u ovisnosti o oborinama, ali i drugačiji trend u odnosu na KPK vrijednosti. U rujnu 2018. godine, unatoč niskim oborinama, koncentracija BPK5 u procjednoj vodi sa odlagališta pokazala je porast od 300 mg O₂/l te ujedno predstavlja maksimalno izmjerenu koncentraciju u

promatranom periodu. Moguće je da je u tom razdoblju došlo do povećanog unosa organskih tvari na odlagalište iz drugih izvora, poput odlaganja otpada s visokim sadržajem organskih tvari. Unatoč tome što su vrijednosti za BPK5 u rujnu nešto niže u odnosu na ožujak (u svim promatranim godinama) i dalje su iznad maksimalno dopuštene koncentracije od 20 mg O₂/l.

Stoga je neophodna implementacija dodatnih mjera za poboljšanje kvalitete što sigurno može osigurati dugoročnu održivost. Proaktivni pristup i kontinuirano praćenje su ključni kako bi se osiguralo da koncentracija BPK5 ostane unutar prihvatljivih parametara.

Opisivanje situacije prikazane na slici 12 u kojoj koncentracija suspendiranih tvari pokazuje suprotno ponašanje u rujnu 2018. i rujnu 2022. godine, unatoč različitim količinama oborina, uključuje razmatranje različitih faktora koji bi mogli utjecati na to ponašanje. U rujnu 2018. godine, unatoč niskim oborinama, koncentracija suspendiranih tvari u procjednoj vodi sa odlagališta pokazala je značajan porast, dosežući maksimalnu koncentraciju od 203 mg/l. Mogući faktori koji su vrlo vjerojatno doprinijeli ovom scenariju uključuju smanjen unos tvari na odlagalište. Niske oborine mogu rezultirati manjim ispiranjem tvari iz odlagališta, što dovodi do akumulacije suspendiranih tvari u procjednoj vodi. Nedostatak oborina može dovesti do stagnacije vode na odlagalištu, što povećava kontakt između otopljene tvari u vodi i suspendiranih tvari, pridonoseći njihovoj koncentraciji. Iako su oborine u rujnu 2022. dosegle maksimalne razinu od 253,6 mm, brza odvodnja s odlagališta ublažila je kontakt vode s tvarima na površini. Pretpostavlja se da je ovaj proces rezultirao smanjenim unosom suspendiranih tvari u procjednu vodu, što je dovelo do značajnog pada njihove koncentracije.

Moguće promjene u topografiji odlagališta, poput izmjena u nagibu terena mogle su pridonijeti ubrzanom otjecanju vode s površine, smanjujući time koncentraciju suspendiranih tvari unatoč visokim količinama oborina [1]. Dodatno, fizičke i kemijske promjene u tlu izazvane obilnim oborinama, mogle su smanjiti mobilnost suspendiranih tvari, rezultirajući značajnim smanjenjem njihove koncentracije [13]. Temeljem navedenih činjenica moguće je uočiti sezonske varijacije u biološkim procesima na odlagalištu, potaknute specifičnim uvjetima u rujnu 2022. godine, a koje su mogle doprinijeti ubrzanom razgradnjom i smanjenju koncentracije suspendiranih tvari u procjednoj vodi.

Unatoč nižim koncentracijama suspendiranih tvari u rujnu u odnosu na ožujak, vrijednosti i dalje prelaze maksimalno dopuštenu koncentraciju (25 mg/l) [11]. U cilju daljnjeg smanjenja koncentracije suspendiranih tvari u procjednoj vodi s odlagališta, unatoč sezonskim varijacijama i promjenama u količinama oborina, mogu se poduzeti određene mjere. Sadnja

biljaka i vegetacije može pridonijeti stabilizaciji tla i smanjenju erozije, čime se minimizira unos suspendiranih tvari u vodu. Vegetacija također može potaknuti biološke procese koji doprinose smanjenju koncentracije suspendiranih tvari [13]. Mogućnost prilagodbe rasporeda odlaganja otpada predstavlja dodatnu mjeru za smanjenje izloženost vode štetnim tvarima u razdobljima intenzivnih oborina.

Opisivanje situacije u kojoj koncentracija TOC-a, prikazana na slici 12, pokazuje različito ponašanje u rujnu 2022. i rujnu 2018., unatoč različitim količinama oborina te zahtijeva razmatranje različitih faktora koji mogu utjecati na tu dinamiku. U rujnu 2022. godine, koncentracija TOC-a u procjednoj vodi s odlagališta značajno je porasla i dostigla koncentraciju od 328 mg/l (MDK = 30 mg/l [11]). Ovo povećanje može biti povezano s najvećom količinom oborina tijekom tog razdoblja. Mogući faktori koji doprinose ovom scenariju uključuju intenzivno ispiranje i transport tvari. Obilne oborine mogu pridonijeti eroziji tla na odlagalištu, uzrokujući povećanje TOC-a. Dodatno, povećane količine vode općenito mogu potaknuti biološke procese, ali istovremeno onemogućiti odgovarajuću bakterijsku razgradnju organskih tvari zbog naglog i velikog dotoka organskih tvari, što također dovodi do povećane koncentracije TOC-a [13, 26, 28]. U rujnu 2018. godine, unatoč niskim količinama oborina, koncentracija TOC-a pokazuje rastući trend. Niske količine oborina mogu rezultirati manjim ispiranjem tvari s odlagališta, čime se smanjuje unos organskih tvari, odnosno ukupnog organskog ugljika u procjednu vodu. Nedostatak vlage može smanjiti biološke procese razgradnje organskih tvari u otpadu, što može rezultirati zadržavanjem TOC-a na odlagalištu [13]. Ovako opisane razlike mogu pridonijeti boljem postavljanju preporuka za upravljanje kvalitetom procjedne vode. Proaktivnim održavanjem sustava za pročišćavanje pridonosi se smanjenju unosa TOC-a u procjednu vodu. Primjena adsorpcijskih materijala na odlagalištu koji mogu vezati organske tvari i smanjiti njihov transport prema procjednoj vodi također predstavlja efikasnu mjeru.

U tablici 2 prikazane su srednje mjesečne vrijednosti temperature za ožujak i rujan promatranog razdoblja.

Tablica 2. Srednje mjesečne vrijednost temperature za ožujak i rujan promatranog razdoblja (2018.-2023. godine)

		Srednje mjesečne vrijednosti temperature (°C)				
Mjesec/ godina	2018.	2019.	2020.	2021.	2022.	2023.
Ožujak	6,7	7,2	7,7	6,5	9,3	12
Rujan	17	20	17,6	16	17,7	18,2

Iz tablice 2 vidljivo je da su srednje mjesečne temperature više u rujnu nego u ožujku. Međutim, unatoč razlikama u temperaturama za promatrane mjesece nema ekstremnih odstupanja. Temperature u ožujku 2022. i 2023. i rujnu 2023. su nešto više u odnosu na temperature ostalih promatranih godina. Stoga ove promjene u temperaturi ne bi trebale uzrokovati značajnije promjene niti u samom odlagalištu niti u radu biljno biološkog pročistača. To je vidljivo i kroz vrijednosti za KPK, BPK5, suspendirane tvari i TOC. Naime niti jedan od ispitivanih parametara ne pokazuje značajniju ovisnost o temperaturi.

Kao što je već navedeno promjene temperature mogu značajno utjecati na samo odlagalište pa samim time i na sastav procjednih voda, ali i na uspješnost rada biljno biološkog pročistača. Povišene temperature mogu značajno utjecati na mikroorganizme koji su uključeni u pročišćavanje procjedne vode sa odlagališta što se direktno vidi po vrijednostima za KPK. Povišene temperature obično potiču ubranu aktivnost mikroorganizama odgovornih za biološku razgradnju organskih tvari. Temperaturni uvjeti značajno utječu na brzinu biokemijskih procesa, uključujući procese razgradnje organskih tvari. Topliji uvjeti potiču bržu potrošnju kisika tijekom aerobne razgradnje, što može utjecati na KPK. Dodatno, mikroorganizmi u biljnom uređaju, poput bakterija, koriste organske tvari kao izvor hrane. Važno je napomenuti da ekstremne temperature, osobito ako su izvan optimalnog raspona za određene mikroorganizme, mogu negativno utjecati na njihovu aktivnost. Previsoke temperature mogu dovesti do stresa ili čak oštećenja mikroorganizama, smanjujući njihovu učinkovitost u pročišćavanju vode [26]. Usporedbom rezultata prikazanih na slikama 11 i 12 te tablici 2 vidljivo je da temperatura nema značajan utjecaj na promjenu KPK vrijednosti. Vjerojatno je razlog tome u vrsti mikroorganizama, odnosno temperaturnom intervalu koji je optimalan za rast i razmnožavanje mikroorganizama. Osim toga, promjene temperatura u

odnosu na promatrane mjesece i godine ne pokazuju nikakve ekstreme niti u rastu niti u padu što pa samim time nema ni posebnih „šokova“ za mikroorganizme.

Osim toga, povišenje temperature okoline neposredno utječe i na povišenje temperature tla što u konačnici može potaknuti bržu biološku razgradnju organskih tvari na samom odlagalištu. Uslijed bioloških procesa u samom tijelu odlagališta nastaje voda (neovisno o tome ima li oborina) koja također čini procjednu vodu. U ovom slučaju je procjedna voda bogatija organskim tvarima koje mikroorganizmi ne mogu dovoljno brzo razgraditi što se u konačnici očituje kroz povećanje BPK5 [26]. Dnevne oscilacije povezane sa sunčevim zračenjem i ciklusom dan-noć mogu značajno utjecati na povećanje BPK5 u procjednoj vodi. Ciklus dan-noć regulira fotoperiod, tj. trajanje izloženosti svjetlu tijekom dana. U prisutnosti sunčevog zračenja, biljke u biljnom uređaju provode fotosintezu, proces tijekom kojeg se organske tvari proizvode iz ugljičnog dioksida i vode. Ovaj proces može povećati BPK5 jer mikroorganizmi kao izvor hrane koriste organske tvari proizvedene fotosintezom umjesto organskih tvari iz procjedne vode. Sunčeva svjetlost može potaknuti aktivnost fotosintetskih mikroorganizama, uključujući alge [27]. Ovi mikroorganizmi sudjeluju u procesima pročišćavanja vode, te njihova aktivnost također može doprinijeti smanjenju BPK5. Ciklus dan-noć uzrokuje fluktuacije temperature u vodenom mediju biljnog uređaja. Ove promjene temperature mogu utjecati na brzinu bioloških procesa, uključujući biokemijsku razgradnju organskih tvari. Povećana temperatura obično potiče aktivnost mikroorganizama, što može rezultirati smanjenjem BPK5. Sunčeva svjetlost također može potaknuti procese oksigenacije vodenog medija. Povećana koncentracija kisika može poboljšati uvjete za aerobne mikroorganizme, koji će tada brže i više razgrađivati organske tvari što će se vidjeti kroz smanjenje BPK5 [13, 26]. S obzirom da vrijednosti za BPK5 pokazuju sličan trend kao i KPK vrijednosti, a oba su slična trendu oborina moglo bi se zaključiti da oborine imaju znatno veći utjecaj na promjene KPK i BPK5 nego temperatura. Jedina sličnost u promjeni temperature i BPK5 vrijednosti je u rujnu 2023. g. Naime u navedenom periodu dolazi do blagog povećanja BPK5 iako vrijednosti oborina opadaju. Temperatura je u navedenom periodu nešto viša u odnosu na ostale periode što bi moglo ukazivati na blagi utjecaj temperature koja vjerojatno uzrokuje povećaniju biorazgradnju otpada na odlagalištu, a moguće i da pospješuje fotosintezu biljaka u biljno biološkom pročištaču.

Već je ranije spomenuto da u rujnu promjene u koncentraciji suspendiranih tvari ne pokazuju istu tendenciju kao promjene u oborinama (slika 12). Kao razlozi su navedene promjene u tlu, manje ispiranje tla, količina odloženog otpada i sl. Uz navedene razloge moguće

je da i temperatura ima utjecaj. Naime u rujnu 2019. g. zamijećena je neznatno više temperatura u odnos na rujan drugih promatranih godina. Naime, utjecaj dnevnih oscilacija na suspendirane tvari ovisi o specifičnim uvjetima na odlagalištu, vrsti tvari prisutnih u vodi te svojstvima tla i vegetacije. Tijekom dana, izloženost sunčevom zračenju može uzrokovati zagrijavanje tla i promicanje procesa erozije [13, 29]. Drugačiji trend rasta i pada suspendiranih tvari u odnosu na količinu oborina primijećen je i 2018., 2021. i 2022. godine kada nije bilo značajnijih promjena u temperaturi. Iako naizgled temperatura nema utjecaja, Sunčeva svjetlost može potaknuti termalne konvekcije i vjetar, što rezultira miješanjem vode u odlagalištu. Navedena pojava može uzrokovati ponovno suspendiranje tvari koje su se eventualno taložile tijekom noći. Dnevne oscilacije temperature uzrokovane ciklusom dan-noć također mogu utjecati na toplinske fluktuacije u vodenom mediju. Ove fluktuacije mogu uzrokovati promjene u gustoći vode, što može pokrenuti suspendiranje tvari. Toplinske promjene tijekom dana mogu utjecati na procese raspadanja organskih tvari u vodi. Povećana temperatura može potaknuti mikrobiološku aktivnost, što dovodi do otpuštanja dodatnih suspendiranih tvari [26].

Sezonske promjene temperature dovode do varijacija u toplinskim uvjetima u vodenom mediju odlagališta. Toplinske promjene mogu utjecati na gustoću vode, rast mikroorganizama, brzinu biokemijskih procesa te na transport suspendiranih tvari. Različite temperature tijekom godišnjih doba mogu utjecati na aktivnost mikroorganizama prisutnih u vodi. Na primjer, više temperature potiču bržu mikrobiološku aktivnost, što može rezultirati intenzivnijim biološkim procesima i promjenama u sastavu suspendiranih tvari. Niske temperature tijekom zimskih mjeseci također mogu utjecati na suspendirane tvari. Proces smrzavanja mogu uzrokovati promjene u fizičkim svojstvima vode, što može utjecati na transport suspendiranih tvari. Temperaturne oscilacije u tlu odlagališta mogu utjecati na aktivnost mikroorganizama u supstratu, što također ima utjecaj na kvalitetu vode [13, 26].

Nadalje, temperatura vodenog medija prati dnevne oscilacije temperature atmosfere, što može imati značajan utjecaj na koncentraciju TOC-a u procjednoj vodi. Promjene u temperaturi mogu utjecati na brzinu razgradnje organskih tvari u vodi. Toplinske fluktuacije uzrokuju oscilacije u metabolizmu mikroorganizama, što može rezultirati promjenama u količini TOC-a. Dnevne oscilacije temperature mogu utjecati na sedimente na dnu vodenog tijela. Povećanje temperature može potaknuti procese razgradnje organskih tvari u sedimentu, čime se otpuštaju dodatni organski spojevi u vodu. Toplinske oscilacije mogu utjecati na metaboličke procese biljaka, što može rezultirati otpuštanjem organskih spojeva iz biljaka u vodu [13].

Učinkovitost pročišćavanja procjednih voda biljnim uređajem može značajno varirati ovisno o sezonskim i regionalnim toplinskim oscilacijama. Temperaturne promjene mogu utjecati na vrste i raznolikost mikroorganizama u biljnom uređaju. Ovisno o temperaturnim uvjetima, neke vrste mikroorganizama mogu postati dominantne ili smanjiti svoju aktivnost, što može utjecati na učinkovitost pročišćavanja. Toplinska stratifikacija u vodenom mediju može se pojaviti tijekom toplijih razdoblja, a zatim nestati u hladnijim sezonama. Ova promjena može utjecati na cirkulaciju vode, oksigenaciju i raspodjelu tvari u vodenom mediju. U toplijim sezonama, mikroorganizmi imaju sklonost bržoj inkubaciji i reprodukciji, što može poboljšati učinkovitost pročišćavanja. U hladnijim sezonama, ta aktivnost može biti smanjena [26].

Promjene u koncentracijama TOC-a u rujnu vrlo vjerojatno su više pod utjecajem temperature nego oborina i to posebno 2018. budući da vrijednosti TOC-a u rujnu ne slijede varijacije u oborinama, a i činjenicu da su u rujnu temperature bile više nego u ožujku (u svim promatranim godinama) navedene varijacije mogle bi se povezati s gore opisanim promjenama.

Već je ranije naglašeno da se procjedne vode odlagališta Goričica nakon izlaza iz biljno biološkog pročišćavača ne ispuštaju u prirodni recipijent već se vraćaju na odlagalište. Unatoč tome posebnu pozornost treba usmjeriti na povećanje bilo kojih parametara u procjednim vodama. Stoga je važno pravilno praćenje i upravljanje svim procesima na odlagalištu što svakako uključuje i pročišćavanje voda jer to sigurno može pomoći u optimizaciji i pridonijeti učinkovitosti pročišćavanja vode, čak i uz dnevne oscilacije uzrokovane sunčevim ciklusom

5. ZAKLJUČAK

Zaključak ovog istraživanja odnosi se na razumijevanje kompleksne interakcije između klimatskih promjena i kvalitete procjednih voda sa odlagališta Goričica. Analizom ključnih parametara, kao što su KPK, BPK5, TOC i suspendirane tvari, identificirane su značajne promjene u njihovim koncentracijama, ukazujući na ozbiljan utjecaj ekstremnih vremenskih uvjeta, posebice visokih oborina i temperatura.

Visoke koncentracije KPK, koje su izmjerene iznad graničnih vrijednosti ukazuju da ekstremni meteorološki uvjeti značajno utječu na ovaj ključni parametar kvalitete procjednih voda. Takvo povećanje koncentracije KPK sugerira na povećanu biološku aktivnost u vodama, što može imati ozbiljne posljedice na vodeni ekosustav. Visoke oborine su pokazatelj intenzivnijeg ispiranja organskih tvari sa odlagališta u procjedne vode. Ovaj proces dovodi do povećanja koncentracije KPK, čime se stvara ozbiljan izazov za pročišćavanje putem biljno biološkog pročištača. S druge strane, povećane temperature mogu dodatno potaknuti biokemijske reakcije u procjednoj vodi, što rezultira povećanom potrebom za kisikom i stvaranjem dodatnih tvari koje doprinose koncentraciji KPK.

Analizom rezultata jasno je vidljivo da visoke oborine i promjene u temperaturi također imaju značajan utjecaj na koncentraciju BPK5, čime se otvaraju bitna pitanja o prilagodbi sustava pročišćavanja i održavanju ekološke ravnoteže. Intenzivne kiše, posebice u rujnu izazivaju ispiranje bioloških komponenti s odlagališta, povećavajući opterećenje organskim spojevima u procjednoj vodi. Takvo opterećenje predstavlja izazov u pročišćavanju voda putem biljno biološkog pročištača, čime se dolazi do zaključka da tradicionalni sustavi možda nisu dovoljno učinkoviti u suočavanju s klimatskim promjenama. Smanjenje BPK5 u procjednoj vodi može se ostvariti unapređenjem pročišćavanja putem pasivne integracije aeracijskih cijevi u podlogu.

Intenzivne oborine imaju direktan utjecaj na mikroorganizme u tlu i vodama. Mikroorganizmi u svojoj ključnoj ulozi u biokemijskim procesima aktivno sudjeluju u razgradnji organskih tvari, stvarajući kompleksan ekološki sustav koji je osjetljiv na promjene u uvjetima okoliša. Povećanje temperature dodatno utječe na aktivnost mikroorganizama. Toplina potiče brže biokemijske reakcije, što može rezultirati ubrzanom razgradnjom organskih spojeva i povećanjem koncentracije TOC-a. Navedeni utjecaj vidljiv je u ožujku 2023. g. uz

najvišu temperaturu zraka od 12 °C, što se poklapa s razdobljem kada je koncentracija TOC-a dosegla svoj maksimum od 434 mg/l.

Koncentracije suspendiranih tvari pokazuju tendenciju povećanja nakon perioda visokih oborina. Ova promjena upućuje na probleme u sustavu taloženja i sedimentacije na odlagalištu, koji postaje manje učinkovit u zadržavanju čestica suspendiranih tvari.

Bitno je istaknuti nužnost prilagodbe postojećih upravljačkih sustava na odlagalištu Goričica kako bi se umanjili negativni učinci klimatskih promjena na kvalitetu procjednih voda. Ključni elementi u postizanju održivosti i zaštite okoliša uključuju implementaciju održivih tehnoloških rješenja, sustavno praćenje meteoroloških uvjeta i redovito nadziranje kvalitete voda.

6. POPIS LITERATURE

- [1] Z. Milanović, Deponij trajno odlaganje otpada, Zagreb, svibanj 1992.
- [2] Zakon o gospodarenju otpadom, Narodne novine 84/2021.
- [3] Pravilnik o katalogu otpada, Narodne novine 90/2015.
- [4] J. Pichtel, Waste management, practices, municipal, hazardous, and industrial, Taylor & Francis Group, London, 2014.
- [5] Reciklažno dvorište Solin; Hijerarhija gospodarenja otpadom, <http://www.reciklaznodvoriste.solin.hr/index.php/gospodarenje-otpadom/hijerarhijagospodarenja-otpadom>, pristupljeno 28.11.2023.
- [6] Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva (SL L 312, 22.11.2018.).
- [7] T. Sofilić, I. Brnardić, Održivo gospodarenje otpadom, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2015.
- [8] Pravilnik o odlagalištima otpada, Narodne novine 04/2023.
- [9] Hudec plan d.o.o., Elaborat zaštite okoliša za zahvat Sanacija odlagališta neopasnog otpada „Goričica“ i nastavak odlaganja otpada, Grad Sisak, Sisačko–moslavačka županija za ocjenu o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš, Zagreb, 2021.
- [10] I. Zorko, Postupanje s komunalnim otpadom u Gradu Sisku, Uspostava sustava gospodarenja komunalnim otpadom, ur. Ž. Glavinić i dr., Grad Sisak, 2003., 1-30.
- [11] Rješenje o objedinjenim uvjetima zaštite okoliša, KLASA: UP/I-351-03/13-02/63, URBROJ: 517-06-2-2-1-16-56, Zagreb, 29. veljače 2016. godine, Republika Hrvatska, Ministarstvo zaštite okoliša i prirode.
- [12] Dozvola za gospodarenje otpadom, KLASA: UP/I-351-01/22-16/07, URBROJ: 2176/09-03/4-23-10, Sisak, 21. lipanj 2023. godine, Republika Hrvatska, Sisačko-moslavačka županija.

- [13] N. Ružinski, A. Anić Vučinić, Obrada otpadnih voda, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb, 2010.
- [14] V. Simeon, Otopine - otpadne vode, Tehnička enciklopedija, Svezak 10, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1986, 57–64.
- [15] M. El-Haloty, W. M. Kamel, Y. H. Mohamed, Principles and Applications of Total Organic Carbon Analyzer: Technique for Measurement of Total Organic Carbon in Central Laboratory of Greater Cairo Drinking Water Company, LAP LAMBERT Academic Publishing, London, 2013.
- [16] G. Visco, L. Campanella, V. Nobili, Organic carbons and TOC in waters: An overview of the international norm for its measurements, *Microchemical Journal* 79(2005), 185-191.
- [17] Hidroplan d.o.o., Elaborat sektorskog odlaganja otpada za odlagalište komunalnog otpada Goričica, Sisak, Zagreb, 2009.
- [18] Zakon o vodama, Narodne novine 66/2019.
- [19] B. Tušar, Pročišćavanje otpadnih voda. Kigen d.o.o, Zagreb, 2009.
- [20] L. Kraljević, Opskrba vodom i odvodnja- Alternativni sustavi pročišćavanja otpadnih voda, završni rad, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku Građevinski fakultet Osijek, Osijek, 2017.
- [21] T. J. Casey, Unit treatment processes in water and wastewater engineering, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [22] Državni hidrometeorološki zavod, Klima i klimatske promjene https://mete.o.hr/klima.php?section=klima_modeli¶m=klima_promjene, pristupljeno 18.12.2023.
- [23] Podaci tvrtke Hidro.Lab. d.o.o.
- [24] Državni hidrometeorološki zavod, Ukupna mjesečna i godišnja količina oborine, https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci¶m=k2_1, pristupljeno 18.12.2023.

- [25] T. W. N., Walker, Microbial temperature sensitivity and biomass change explain soil carbon loss with warming, *Natural Climate Change*, 8(2018), 885– 889.
- [26] R. Degerman , J. Dinasquet, L. Riemann, S. S. de Luna, A. Andersson, Effect of resource availability on bacterial community responses to increased temperature, *Aquatic Microbial Ecology*, 68(2013), 131–142.
- [27] P. V. McCormick, J.Cairns, Algae as indicators of climate change, *Journal of Applied Phycology*, 6(1994), 509–526.
- [28] N. Počuča, Voda – zagađenje i prečišćavanje, AGM knjiga d.o.o., Beograd, 2018.
- [29] O. Bonacci, D. Trninić, T. Roje-Bonacci, Analysis of the water temperature regime of the Danube and its tributaries in Croatia. *Hydrological Processes*, 22(2008)7, 1014-1021.

7. SAŽETAK

Rad istražuje utjecaj klimatskih promjena na kvalitetu procjednih voda s odlagališta neopasnog otpada Goričica. Fokus je stavljen na analizu ključnih parametara kao što su KPK, BPK₅, TOC i suspendirane tvari te njihove promjene iznad dopuštenih koncentracija u kontekstu ekstremnih klimatskih uvjeta, uključujući visoke oborine i temperature. Rezultati ukazuju na povećane koncentracije tih parametara, što implicira izazove u pročišćavanju voda. Naglašava se nužnost prilagodbe tehnologija pročišćavanja, sustavnog praćenja meteoroloških uvjeta i redovitog nadzora kvalitete voda kao ključnih koraka u očuvanju održivosti i zaštiti okoliša na odlagalištu otpada Goričica.

8. SUMMARY

The paper investigates the impact of climate change on the quality of leachate from the non-hazardous waste disposal site in Goričica. The focus is on the analysis of key parameters such as COD, BOD₅, TOC and suspended solids and their changes above permissible concentrations in the context of extreme climatic conditions, including high precipitation and temperatures. The results indicate increased concentrations of these parameters, which implies challenges in water purification. The necessity of adapting treatment technologies, systematic monitoring of meteorological conditions and regular monitoring of water quality as key steps in preserving sustainability and environmental protection at the Goričica landfill is emphasized.

9. ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI:

- Ime i prezime: Ida Bulić
- Datum i mjesto rođenja: 27. siječanj 2001., Sisak
- E-mail: ibulic565@gmail.com

OBRAZOVANJE:

- Osnovna škola: Osnovna škola Braća Ribar, Sisak
- sudjelovanje na državnom natjecanju iz atletike, Rijeka, 2013.
- Srednja škola: Tehnička škola Sisak, smjer ekološki tehničar, Sisak
 - Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, preddiplomski sveučilišni studij Sigurnost, zdravlje na radu i radni okoliš

VJEŠTINE:

- Rad na računalu
- Strani jezik: Engleski
- Vozački ispit – B kategorija
- Uvjerenje za utvrđivanje alkoholiziranosti radnika na radu

NAGRADE:

Posebna dekanova nagrada

Priznanje za ostvarene izvrsne ocjene i najbolje ocijenjen završni rad u 2022./2023. akademskoj godini- ZIRS Učilište i Znanstveno-stručni časopis „Sigurnost“