

Fitoremedijacijski potencijal vodene leće

Križanović, Kristina

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:883414>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STRUČNI STUDIJ PREHRAMBENE TEHNOLOGIJE
PRERADA MLIJEKA

Kristina Križanović

FITOREMEDIJACIJSKI POTENCIJAL VODENE LEĆE

Završni rad

Karlovac, studeni 2016.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STRUČNI STUDIJ PREHRAMBENE TEHNOLOGIJE
PRERADA MLIJEKA

Kristina Križanović

FITOREMEDIJACIJSKI POTENCIJAL VODENE LEĆE

Završni rad

Mentor: Ines Cindrić, dipl. ing

Karlovac, studeni 2016.

Za početak hvala mojim roditeljima Svjetlani i Juri, koji mi u niti jednom trenutku nisu radili pritisak i bili su mi podrška u svim životnim situacijama.

Hvala mom Loranu, mojoj velikoj podršci.

Veliko hvala mojoj strpljivoj profesorici i mentorici Ines Cindrić.

A ovo sve posvećujem jednoj osobi – bratu Kristijanu!

Zbog njega je moj svijet bogatiji i ljepši.

FITOREMEDIJACIJSKI POTENCIJAL VODENE LEĆE

SAŽETAK

U novije vrijeme sve se više istražuje vodena leća *Lemna Minor* L. za primjenu u fitoremedijaciji. Ona ima niz pozitivnih karakteristika koje ju čini pogodnom za upotrebu: brzo raste i ima velik prinos, lako se održava, lako podnosi ekstremne koncentracije zagađivača, ima visok bioakumulacijski kapacitet te se može koristiti za veći broj onečišćivača istovremeno. Kako pokazuju nalazi istraživanja prikazani u ovom radu, izuzetno je učinkovita u fitoakumulaciji teških metala: željeza, bakra, kadmija, cinka, olova, nikla, kroma i arsena. Manje je uspješna u primjeni na herbicidima i farmaceuticima, za što su potrebna dodatna istraživanja.

Ključne riječi: Fitoremedijacija, *Lemna Minor* L., otpadne vode, vodena leća

PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF DUCKWEED

ABSTRACT

Lemna Minor L. have been widely studied for their application in phytoremediation. They possess several characteristics that make them uniquely qualified: they have fast growth and yield, are easily maintained, are resilient to extreme contaminant concentration, have high bioaccumulation capacity and can be applied on multiple pollutants simultaneously. As the gathered research in this paper shows, they are considered to be hyperaccumulants for different kinds of heavy metals: iron, copper, cadmium, zinc, lead, nickel, chrome and arsenic. They are less effective in application on herbicides and pharmaceuticals, for which more research is needed.

Keywords: Duckweed, *Lemna Minor* L., Phytoremediation, wastewater

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. TEORIJSKI DIO | |
| 2.1. Onečišćenje vodenih eko sustava | 2 |
| 2.1.1. Onečišćenje voda..... | 2 |
| 2.2. Izvori onečišćenih voda..... | 3 |
| 2.2.1. Organski onečišćivači | 3 |
| 2.2.2. Anorganski onečišćivači (soli i metali) | 4 |
| 2.2.3. Novi onečišćivači (opasni spojevi) | 5 |
| 2.2.4. Ostali onečišćivači | 5 |
| 2.3. Fitoremedijacija..... | 7 |
| 2.3.1. Fitostabilizacija | 7 |
| 2.3.2. Rizofiltracija..... | 9 |
| 2.3.3. Fitoekstrakcija | 10 |
| 2.3.4. Fitovolatilizacija..... | 12 |
| 2.3.5. Fitodegradacija (fitotransformacija)..... | 12 |
| 2.3.6. Rizodegradacija..... | 12 |
| 2.4 Vodena leća | 13 |
| 2.4.1. Uzgoj i rast vodene leće | 14 |
| 3. RASPRAVA | |
| 3.1. FITOREMEDIJACIJSKI POTENCIJAL VODENE LEĆE | 16 |
| 3.2. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za željezo (Fe) | 18 |
| 3.3. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za bakar (Cu) | 19 |
| 3.4. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za kadmij (Cd) | 20 |
| 3.5. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za cink (Zn) | 22 |
| 3.6. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za olovo (Pb) | 23 |
| 3.7. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za nikal (Ni)..... | 24 |
| 3.8. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za krom (Cr) | 25 |
| 3.9. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za arsen (As)..... | 26 |
| 3.10. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za herbicide..... | 27 |
| 3.11. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za farmaceutike..... | 29 |
| 4. ZAKLJUČAK | 30 |
| 5. LITERATURANI POPIS..... | 31 |
| 6. POPIS ILUSTRACIJA..... | 33 |
| Popis slika | 34 |
| Popis tablica | 34 |

1. UVOD

Slatkovodne zalihe su od izuzetnog značaja, ali su i iscrpljive te se njezine količine alarmantno smanjuju, što je razlog radi koje je problem onečišćenja voda jedna je od ključnih tema današnjice. Ima sve više različitih zagađivača koji, kao produkt industrijalizacije i ljudske aktivnosti, ulaze u zalihe vode, kao što su teški metali, boje, farmaceutici, pesticidi, fluoridi, fenoli, insekticidi, pesticidi i deterdženti. Svi oni mogu imati štetne posljedice za ljudsko zdravlje i vodeni ekosustav te je stoga čista voda, oslobođena toksičnih kemikalija i patogena, esencijalna za ljudsko zdravlje.

Fitoremedijacija predstavlja niz tehnoloških postupaka u kojima se biljke koriste za uklanjanje teških metala iz kontaminiranih voda, zemljišta i zraka. Pritom se, ovisno o vrsti kontaminanta, mjestu kontaminacije, količini potrebnog pročišćavanja i tipu biljke, koriste tehnologije za pohranjivanje (fitostabilizacija) ili uklanjanje (fitoekstrakcija i fitovolatizacija) kontaminanta. Vodena leća (fam. *Araceae*, subfam. *Lemnoideae*) pripada grupi viših biljaka te je monokotiledona biljka, koja se nalazi u vodama stajaćicama i rukavcima rijeka. Naširoko je proučavana za potencijalnu primjenu u fitoremedijaciji te nalazi dosadašnjih istraživanja ukazuju na iznimni potencijal biljke na unos i akumulaciju teških metala, radionuklida te metaloida, u čemu prednjače pred algama i ostalim vodenim makrofitima.

U radu će se analizirati fitoremedijacijski potencijal vodene leće, pri čemu će naglasak biti na rezultatima recentnih istraživanja. Cilj rada je upoznati fitoremedijacijske tehnologije i mogućnost njihovog korištenja u svrhu pročišćavanja voda korištenjem vodene leće.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. ONEČIŠĆENJE VODENIH EKOSUSTAVA

Voda prekriva 71% zemljine površine, a 97% nje otpada na morsku vodu koja se, radi velikih količina soli, ne može koristiti za piće. Preostalih 3% ukupnih količine vode je slatkovodno, od čega je 77% je zarobljeno u santama leda i snijegu. Na površinsku vodu (rijeke, jezera, bare) otpada samo 1% ukupne količine vode na planeti.

Slatkovodne zalihe su, dakle, od najvećeg značaja za ljude, ali su i iscrpljive te se njezine količine alarmantno smanjuju. Pritom, nedostatak vode ne izaziva samo povećanje svjetske populacije već i smanjenje količine vode u rijekama, isušivanje jezera i močvara, utjecaj šumskih sječa i drugih aspekata djelatnosti te zagađenje otpadnih voda. Prema procjenama Ujedinjenih naroda, od šest milijardi ljudi, koliko se procjenjuje da ih živi na Zemlji, njih čak 1,2 milijarde svakodnevno ne raspolaže dovoljnim količinama pitke vode (Brezovnjački, 2011). Procjene su sve lošije za budućnost, pa UN navodi da bi 2050. godine između dvije i sedam milijardi ljudi moglo biti suočeno s nedostatkom pitke vode, što bi, u najgorem slučaju, činilo čak dvije trećine svih ljudi na Zemlji. Prema procjenama UN-a, poznate obnovljive količine pitke vode mogu zadovoljiti potrebe devet milijardi stanovnika, no s obzirom na to da potrošnja vode raste dvostruko brže nego broj stanovnika, doći će do ukupne potrošnje svih dostupnih količina pitke vode prije nego broj stanovnika dostigne 10 milijardi ljudi (za što se pretpostavlja da će biti oko 2050. godine).

Radi navedenoga, problem onečišćenja voda jedna je od ključnih tema današnjice.

2.1.1. Onečišćenje voda

Sve je veći broj različitih zagađivača koji, kao produkt industrijalizacije i ljudske aktivnosti, ulaze u zalihe vode, kao što su teški metali, boje, farmaceutici, pesticidi, fluoridi, fenoli, insekticidi, pesticidi i deterdženti. Oni mogu imati štetne posljedice za ljudsko zdravlje i vodeni ekosustav te je stoga čista voda, oslobođena toksičnih kemikalija i patogena, esencijalna za ljudsko zdravlje (Reddy i Lee, 2012). To je razlog zbog kojeg se provode iscrpna istraživanja ne bi li se našle alternative tretmanu voda i otpadnih voda kako bi se iz njih uklonili toksični onečišćivači. Neke od do sad korištenih metoda uključuju koagulaciju, membranske procese, adsorpciju, dijalizu, osmozu, fotokatalitičku degradaciju i različite biološke metode. Njihovu širu primjenu, međutim, ograničavaju faktori poput niske efikasnosti obrade, visokih energetskehtkih zahtjeva, komplicirane infrastrukture i niske ekonomske koristi.

Onečišćenje voda definira se kao svako kvalitativno i kvantitativno odstupanje od normalnog i prirodnog kemijskog, fizičkog i biološkog sastava i kvalitete, koje ima neželjene posljedice po zdravlje živih organizama, ekosustav i gospodarstvo (Rastovčan- Mioč, 2009).

Za utvrđivanje onečišćenosti prirodnih voda koriste se sljedeći pokazatelji (Rastovčan- Mioč, 2009):

- fizikalni pokazatelji odnose se na promjene osnovnih fizikalnih svojstava kao što su boja i prozirnost, odnosno zamućenje, miris, temperatura, radioaktivnost, sadržaj krutih čestica i dr.,
- kemijski pokazatelji uključuju promjena pH-vrijednosti, mineralnog sastava, količine otopljenog kisika, sadržaja organskih tvari, anorganskih pokazatelja i dr.,
- biološki pokazatelji odnose se na prisutnost patogenih bakterija, virusa, gljivica, ličinka, parazita, životinjskih bjelančevina, ugljikohidrata i dr.

2.2. Izvori onečišćenja voda

U nastavku će ukratko biti objašnjeni osnovni onečišćivači voda koji uključuju organske onečišćivače, anorganske onečišćivače (soli i metale), surfakante i herbicide.

2.2.1. Organski onečišćivači

Organske su tvari one koje sadrže ugljik i mogu se anaerobno razgraditi. Ovakva razgradnja organskih tvari odvija se u sustavima u kojima postoje anaerobne zone. Uz ugljik, organske tvari sadrže vodik i kisik, a u nekim slučajevima i dušik. Također mogu biti prisutni elementi poput sumpora, fosfora i željeza.

Osnovne grupe spojeva koje čine organske tvari su proteini, ugljikovodici te masti i ulja. Proteini imaju kompleksnu kemijsku strukturu i velike molekularne mase te su relativno nestabilni, radi čega se mogu razgrađivati na više načina. Osnovni je proces hidroliza kojom se proteini razgrađuju do aminokiselina. Ugljikovodici u svojim molekulama sadrže ugljik, vodik i kisik. U njih spadaju šećeri, škrob, celuloza i drvena vlakna, a, između ostaloga, razlikuju se po nejednakoj topljivosti i mogućnost razgradnje. Ulja i masti su jedni od glavnih sastojaka hrane i često se nalaze u otpadnim vodama. Nisu topljivi u vodi te stvaraju koloidne ili micelarne otopine a topljivi su u organskim otapalima. Sadržaj masti i ulja može uzrokovati više problema u sustavu odvodnje i u uređajima za obradu otpadne vode.

Organski onečišćivači mogu se generalno podijeliti u tri skupine: otpad, sintetički organski spojevi te goriva. Otpadne vode poput kanalizacija, voda iz industrije obrade hrane, klaonica, tvornica papira, pivovara itd. imaju visoke koncentracije biorazgradljivih organskih spojeva u suspendiranom, koloidnom ili otopljenom obliku (Boyd, 2015). Otopljeni kisik dostupan u vodi troši se za aerobnu oksidaciju organske tvari prisutne u takvim otpadnim vodama, radi čega dolazi do manjka otopljenog kisika, što ima negativan utjecaj na vodeni život.

Sintetički organski spojevi uključuje pesticide, sintetičke deterdžente, dodatke hrani, farmaceutike, insekticide, boje, sintetička vlakna, plastiku itd. Ulaze u ekosistem tijekom njihove proizvodnje, prolijevanja u toku transporta i upotrebom.

Goriva poput nafte i katrana sastoje se od kompleksne mješavine ugljikovodika, a razgrađuju se bakterijskim djelovanjem. Kako je nafta lakša od vode, nakon prolijevanja širi se njenom površinom, onemogućavajući doticaj vode sa zrakom, što dovodi do smanjenja otopljenog kisika. Također, umanjuje prolaz svjetlosti kroz površinu vode, čime se smanjuje fotosintetična aktivnost vodenih biljaka. Uz navedeno, ovaj je onečišćivač odgovoran i za ugrožavanje ptica i obalnih biljaka.

2.2.2. Anorganski onečišćivači (soli i metali)

U anorganske onečišćivače spadaju mineralne kiseline, anorganske soli, metali i metalni spojevi, sulfati, cijanidi itd.

Teški metali definiraju se kao grupa elemenata čija specifična težina prelazi vrijednost od 5 g/cm^3 , odnosno čiji je atomski broj veći od 20 (Zenk, 1996), a postoji oko 40 elemenata koji spadaju u ovu skupinu. Kao posljedica industrijske revolucije postoji ogromna i konstantno rastuća potražnja za teškim metalima, što dovodi do njihove emisije u atmosferu u obliku čestica prašine ili plinova, ali se u velikim količinama zadržavaju u vodi i tlu. Onečišćenje vode teškim metalima rezultat je industrijskih izljeva i otpada, rudarskih aktivnosti, topljenja metalnih ruda, proizvodnje energije i goriva, sagorjevanja fosilnih goriva, prometnih sredstava, ispušnih plinova, primjene mineralnih i organskih gnojiva i pesticida itd. (Nešić, 2011).

Teški metali na sva živa bića djeluju izrazito toksično jer se talože u organizmu bez mogućnosti izlučivanja. Metalni ioni bakra (Cu^{2+}) i cinka (Zn^{2+}) ključni su elementi u tragovima jer sudjeluju u redoks reakcijama, prijenosu elektrona, različitim reakcijama kataliziranim enzimima i strukturalnim funkcijama u metabolizmu nukleinske kiseline. Osim

navedenih, ioni mangana, željeza, nikla, selena, molibdena esencijalni su mikronutrijenti biljaka. S druge strane, isti teški metali, ali i potentniji ioni kadmija, željeza, srebra itd, otrovni su za enzime osjetljive na metal, te dovode do smanjenja rasta i smrti organizma.

Neki metali, poput kadmija, žive, olova, arsena, uranija i talijska mogu se također naći u industrijskim i drugim otpadnim vodama, no oni nemaju nikakvu biološku vrijednost za žive organizme. Dapače, toksični su i u relativno malim koncentracijama, a problem je to što ulaze u prehrambeni lanac te se godinama mogu gomilati. Na taj način mogu uzrokovati ozbiljne zdravstvene probleme viših organizama.

2.2.3. Novi onečišćivači (opasni spojevi)

Surfaktanti ili tenzidi su površinski aktivne tvari koje smanjuju površinsku napetost tekućine, odnosno, umanjuju sile koje djeluju na graničnim plohamo između dvije faze. Njihovim djelovanjem nastaje pjena, stvaraju se vodene emulzije s tekućinama s kojima se voda inače ne miješa (npr. s uljem) te nastaju vodene suspenzije s tvarima koje voda inače ne kvasi (npr. s masnoćom). Glavni su sastojci deterdženata i industrijskih sredstava za uklanjanje nečistoća. Prisutnost surfaktanata u vodenom okolišu dovodi do direktnih i indirektnih oštećenja u živim organizmima uslijed oštećenja stanica.

Herbicidi se primjenjuju za suzbijanje korova, a kontinuirano se ispuštaju u vodeni sustav, prilikom čega ove kemikalije, izravno ili neizravno, utječu na zdravlje i ljudi i ekosustava zbog izazivanja značajnih prijetnji na vodene sustave i pitku vodu.

2.2.4. Ostali onečišćivači

Patogeni mikroorganizmi ulaze u vodene zalihe kroz kanalizaciju ili otpadne vode različitih industrija (npr. klaonice). Virus i bakterije mogu uzrokovati različite bolesti što se prenose vodom, poput kolere, tifusa, dizenterije, dječje paralize ili zaraznog hepatitisa.

Onečišćenje vode hranjivim tvarima rezultat je odlijeva iz poljoprivrede, otpadnih voda iz industrije gnojiva i kanalizacije. Ovakvo zagađenje stimulira rast fitoplanktona u vodi i može dovesti do eutrofikacije (Boyd, 2015).

Suspendirane tvari i sedimente čine mulj, pijesak i minerali, a pojavljuju se u vodi erozijom površine zemlje tijekom kišnih sezona i putem kanalizacije. Prisutnost suspendiranih tvari može umanjivati dopiranje svjetlosti u vodu, što je ključno za fotosintezu vegetacije. Također,

njihova prisutnost može poremetiti normalna vodeni život i umanjiti raznolikost vodenih ekosistema. U slučaju da su suspendirane tvari organskog podrijetla, dolazi do njihove razgradnje, što rezultira pojavom anaerobnih uvjeta (Boyd, 2015).

Značajno termalno onečišćenje rezultat je izlivanja vruće vode iz termoelektrana, nuklearnih elektrana i industrija u kojima se voda koristi za rashlađivanje. Kao rezultat ispuštanja vruće vode u neku prirodno tijelo vode, temperatura se povećava, što smanjuje razinu otopljenog kisika. Ukoliko je u vodi prisutan organski materijal, povećava se bakterijska aktivnost, što, opet, brzo smanjuje količinu kisika. Također, dolazi do termalne stratifikacije vode, pri čemu ona topla ostaje pri vrhu.

Radioaktivni materijali nalaze se u rudarskoj industriji, nuklearnim elektranama i reaktorima, a koriste se i u znanstvene, poljoprivredne, medicinske i industrijske svrhe te testiranje i razvoj nuklearnog oružja. Ovi onečišćivači sadrže izotope koji su toksični za različite vrste, a akumuliraju se u kostima i zubima te mogu uzrokovati ozbiljne smetnje u organizmima.

2.3. FITOREMEDIJACIJA

Fitoremedijacija predstavlja niz tehnoloških postupaka u kojima se biljke koriste za uklanjanje teških metala iz kontaminiranih voda, zemljišta i zraka. Pojam fitoremedijacija nastao je od grčke reči *φυτο* (*fito*) što znači biljka i latinske riječi *remedium* što znači ponovno uspostavljanje ravnoteže odnosno izlječenje (Milenković, 2014).

Iako je pojam relativno nov (potječe iz 1991. godine), u praksi se ovakav način uklanjanja zagađivača odavno primjenjuje. Naime, primijećeno je da su neke biljke, koje rastu na zemljištima bogatim metalima, razvile sposobnost akumuliranja velikih količina prisutnih metala u svoja tkiva bez pokazivanja simptoma toksičnosti (Nešić, 2011). Fitoremedijacija se primjenjuje kod onečišćenja tla, podzemnih i površinskih voda, otpadnih voda te kod onečišćenja zraka.

Primjene fitoremedijacije mogu se klasificirati ovisno o uključenim mehanizmima, u koje spadaju ekstrakcija kontaminanata iz zemlje ili vode, degradacija kontaminanata različitim biotičkim ili abiotičkim procesima, isparavanje kontaminanata iz biljaka u zrak, imobilizacija kontaminanata u području korijena, hidraulična imobilizacija kontaminanata u području korijena, hidraulična kontrola kontaminirane podzemne vode te kontrola erozije i infiltracije u vegetaciju (National Risk Management Research Laboratory, 2000).

Kako bi se jasnije opisale primjene fitoremedijacije s obzirom na uključene mehanizme, koristi se nekoliko različitih termina: fitostabilizacija, rizofiltracija, fitoekstrakcija i fitovolatilizacija. Pritom se, ovisno o vrsti kontaminanta, mjestu kontaminacije, količini potrebnog pročišćavanja i tipu biljke, koriste tehnologije za pohranjivanje (fitostabilizacija) ili uklanjanje (fitoekstrakcija i fitovolatizacija) kontaminanta.

Neki autori u tehnike fitoremedijacije ubrajaju i fitodegradaciju i rizodegradaciju.

2.3.1. Fitostabilizacija

Fitostabilizacija se odnosi na:

- imobilizaciju kontaminanata u tlu putem apsorpcije i akumulacije od strane korijena, apsorpciju kroz korijenje ili taloženje unutar korijenske zone biljaka i
- upotrebu biljaka i njihovog korijena u svrhu širenja kontaminanata putem vjetra, erozije vode, disperzije zemlje itd.

Fitostabilizacijom se može promijeniti topljivost metala ili utjecati na mobilnost i degradaciju organskih spojeva, čime se sprječava njihova migracija u podzemne vode ili zrak, a koristi se u tretmanu zemlje, sedimenata i muljeva. S obzirom na to da se kontaminanti ne uklanjaju s mjesta onečišćenja, nego se stabiliziraju akumulacijom u korijenu ili precipitacijom unutar korijenske zone, često se koristi u situaciji kad je potrebno količinu onečišćenja na nekom području dovesti ispod graničnih vrijednosti. Upravo je zato ovaj postupak efikasan u obnovi prvotnog vegetacijskog pokrova zemljišta na kojem je prirodna vegetacija iščeznula zbog visokih koncentracija metala.

Karakteristike biljaka koje se koriste u fitostabilizaciji uključuju: tolerantnost na visoke količine kontaminanta kojeg se želi stabilizirati, visoka produkcija korijenske biomase koja je sposobna imobilizirati kontaminant apsorpcijom, precipitacijom ili redukcijom, sposobnost zadržavanja kontaminanta u korijenu (Radić Lakoš i Radačić).

Prednosti ove metode su:

- nije potrebno uklanjanje tla,
- niže je cijene i manje poremeti sustav od ostalih tehnologija poboljšanja tla,
- ponovna vegetacija pospješuje obnovu ekosustava,
- nije potrebno zbrinjavanje opasnih materijala ili biomase.

Nedostaci metode su:

- kontaminanti ostaju na mjestu te može biti potrebno dugotrajno održavanje vegetacije i tla kako bi se spriječilo njihovo otpuštanje,
- vegetacija može zahtijevati opsežnu fertilizaciju ili modifikaciju tla,
- moraju se izbjegavati unos metala u biljke i premještanje metala u površinske dijelove biljke,
- potrebna je kontrola korijenske zone, izlučevina korijena i kontaminanata kako bi se spriječilo povećanje topljivosti metala i njegovog ispiranja,
- fitostabilizacija se ne može smatrati dugotrajnim rješenjem.

Tehnologija fitostabilizacije najučinkovitija je u primjeni za:

- metale: arsen, kadmij, krom, bakar, merkur, olovo, cink.

2.3.2. Rizofiltracija

Uklanjanje metala iz industrijskih otpadnih voda i iz podzemnih voda obično se vrši kroz procese precipitacije ili flokulacije, koje prate sedimentacija i odlaganje mulja. Obećavajuća alternativa ovoj konvencionalnoj metodi je rizofiltracija, fitoremedijacijska tehnika pogodna za uklanjanje metala iz vodene sredine. Rizofiltracija se može koristiti kao tretman površinskih i podzemnih voda, industrijskih i komunalnih izljevova ili otpadnih voda koje nastaju kao posljedica pranja čestica sa različitih površina uslijed atmosferskih padalina, razblaženog mulja.

Proces uključuje uzgajanje biljaka i njihovo presađivanje u vode koje su zagađene teškim metalima gdje one apsorbiraju metale u svom korijenu i vršcima. Eksudati korijena i promjene pH u rizosferi mogu dovesti do precipitacije metala na površini korijena. Kako postaju zasićeni metalima korijeni ili cijele biljke se kose i uklanjaju. Pokošeni biljni dijelovi bogati akumuliranim metalima lako se suše, sagorijevanjem se pretvaraju u pepeo ili se kompostiraju. Neki metali mogu se ponovno koristiti zahvaljujući procesu njihove ekstrakcije iz pepela, što dodatno smanjuje količinu stvorenog opasnog otpada i dovodi do brže recirkulacije.

Biljke pogodne za rizofiltraciju mogu ukloniti teške metale sa velikom efikasnošću zahvaljujući brzom rastu korijena. Poslije ispitivanja stotina biljnih vrsta identificirane su određene inačice suncokreta kao biljke koje imaju najveći kapacitet za uklanjanje teških metala od svih identificiranih biljaka. U roku od nekoliko sati korijenje suncokreta je uspjelo ukloniti različite teške metale iz vode do koncentracija koje su ispunjavale prihvaćene standarde za koncentraciju ovih metala u vodi. Posebno je zanimljivo korištenje drvenastih vrsta poput vrba i topola u rizofiltracijskim sustavima jer im je životni vijek izuzetno dugačak, a sa sobom nose i najmanje troškove odražavanja. Različite vrste topole koje imaju mogućnost prodiranja korijena i do 9 metara uspješno se koriste za remedijaciju podzemnih voda.

Tehnologija rizofiltracije najučinkovitija je u primjeni za:

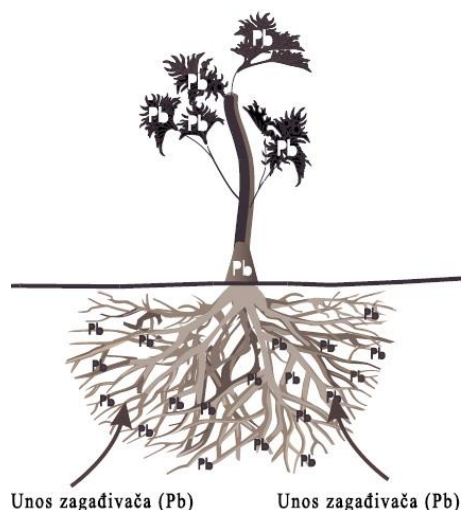
- metale: olovo, kadmij, bakar, nikal, cink, krom,
- radionuklide: uranij, stroncij,

2.3.3. Fitoekstrakcija

Pojam fitoekstrakcija odnosi se na upotrebu biljaka koje akumuliraju zagađivače u svrhu uklanjanja metala ili organskih tvari iz zemlje. Ovaj se proces često događa sa teškim metalima, radionuklidima i određenim organskim spojevima koji su otporni na metabolizam biljaka (Singh i Jain, 2003). Provodi se na način da se kontaminirajuće tvari iz tla korijenskim sustavom biljke prenose iz tla u biljku, od kuda se premještaju u površinske dijelove biljke, kao što je prikazano na slici 1.

Neke biljke, koje se još nazivaju i hiperakumulatori, akumuliraju iznimno velike količine tvari. One mogu nakupljati kontaminante čak i u koncentracijama većim od 1.000 mg po kilogramu suhe biomase. U prirodi postoje različiti hiperakumulatori, koji mogu akumulirati i 10-500 puta više razine elemenata od prosječnih biljaka. Nakon nekog vremena, biljke se uklone i obrade paljenjem, ili, u slučaju organskih onečišćivača, kompostiraju za recikliranje.

Hiperakumulatori koji se upotrebljavaju u fitoremedijaciji moraju biti otporni na onečišćivače, brzo rasti, imati korijenje koje duboko prodire u tlo, imati sposobnost razgrađivanja onečišćivača u tlu i podzemnim vodama te moraju imati sposobnost nakupljanja onečišćivala u staničnim i međustaničnim prostorima



Slika 1. Fitoekstrakcija olova (Pb) (National Risk Management Research Laboratory, 2000).

Osnovna prednost ove tehnike je u tome što biomasa biljke u koju je ekstrahiran kontaminant može biti vrijedan resurs. Primjerice, biomasa koja sadrži selen, jedan od esencijalnih nutrijenata, koristi se za prehranu životinja u područjima koja su siromašna tim elementom (National Risk Management Research Laboratory, 2000).

Do sad je opisano preko 400 vrsta hiperakumulaturnih biljaka iz porodica *Brassicaceae*, *Euphorbiaceae*, *Asteraceae*, *Lamiaceae* i *Scrophulariaceae*. Neki od poznatijih primjera su (National Risk Management Research Laboratory, 2000):

- smeđa gorušica (*Brassica juncea*) koja može akumulirati olovo, krom, kadmij, bakar, nikal, cink, selen i bor,
- *Thlaspi caerulescens*, učinkovita u akumulaciji nikla, cinka i kadmija,
- *Thlaspi rotundifolium ssp. Cepaeifolium*, jedna od rijetkih biljaka koje se u literaturi spominju za akumulaciju olova,
- Suncokret akumulira cezij i stroncij (od čega cezij ostaje u korijenju)

Tablica 1 prikazuje koji teški metali se najčešće akumuliraju u hiperakumulatorima. Vidljivo je da najviše taksonomskih grupa akumulira nikal, kojeg slijede kobalt, bakar i cink.

Tablica 1. Broj taksonomskih grupa hiperakumulatora koje akumuliraju određeni metal (National Risk Management Research Laboratory, 2000).

| Metal | Broj taksonomskih grupa |
|--------------|--------------------------------|
| Nikal | >300 |
| Kobalt | 26 |
| Bakar | 24 |
| Cink | 18 |
| Mangan | 8 |
| Olovo | 5 |
| Kadmij | 1 |

Tehnologija fitoekstrakcije najučinkovitija je u primjeni za:

- metale: srebro, kadmij, kobalt, krom, bakar, živa, mangan, molibden, nikal, olovo i cink,
- radionuklide: stroncij (^{90}Sr), cezij (^{137}Cs), plutonij (^{239}Pu), uranij (^{238}U , ^{234}U),
- nemetale: bor,
- organski spojevi.

Fitoekstrakcija ima, kao i ostale tehnologije, svoje prednosti i nedostatke. Ona je ekonomski najisplativija, dovodi do mogućeg oporavka tla/vode te ponovnog korištenja, nema štetnog utjecaja na okoliš, a rezultati dosadašnjih istraživanja idu joj u prilog. S druge strane, ovisi o

veličini korijenja biljaka te su tretmani obično dugotrajni zbog sporog rasta biljaka i niske biomase.

2.3.4. Fitovolatilizacija

Fitovolatilizacija se odnosi na unos, a zatim i isparavanja kontaminanata. Naime, kroz korijenje se onečišćivači unose u biljku, ali se zatim u modificiranom obliku (plinovitom) ispuštaju u atmosferu. Na taj se način u okoliš mogu prenijeti teški metali kao što su selen, arsen i živa.

Volatilizaciju metala iz tkiva biljke omogućuje mehanizam detoksifikacije. Zagovarači ove metode remedijacije ističu da se njome tek minimalno utječe na samo tlo, smanjuje se mogućnost erozije, a nema niti potrebe za odlaganjem kontaminiranog biljnog tkiva.

2.3.5. Fitodegradacija (fitotransformacija)

Fitodegradacija se odnosi na razgradnju kontaminanata unesenog u biljke kroz metaboličke procese ili na njihovu razgradnju izvan biljaka putem sastojaka (npr. enzima) koje biljke otpuštaju.

2.3.6. Rizodegradacija

Rizodegradacija se odnosi na razgradnju polutanata u zemljištu zahvaljujući mikroorganizmima, čija je aktivnost povećana prisustvom korijenja biljaka.

Tehnologija rizodegradacije najučinkovitija je u primjeni za:

- Ukupne naftne ugljikovodike (eng *Total Petroleum Hydrocarbons*, skr. TPH),
- Policikličke aromatske ugljikovodike (eng. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, skr. PAH),
- Benzene, toluene, etilbenzene i ksilene (skr. BTEX),
- Pesticide, surfaktante, klorirana otapala.

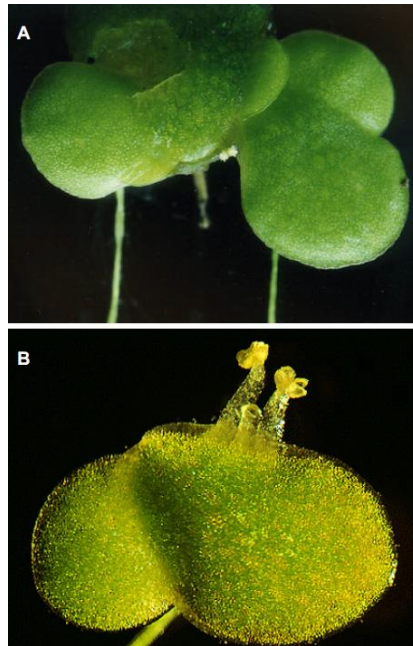
2.4. VODENA LEĆA

Vodena leća (fam. *Aracae*, subfam. *Lemnoideae*) pripada grupi viših biljaka te je monokotiledona biljka. To je mala plutajuća biljka koja se nalazi u vodama stajaćicama i rukavcima rijeka.

Vrlo je jednostavno građena, pri čemu njezino tijelo nalikuje na listić iz kojeg izlazi jedan tanki korjenčić (slika 2). Dakle, nema pravi korijen niti izdanak s listovima, a neke vrste leće niti nemaju korjenčice (*Wolffiella* i *Wolffia*). Leće plutaju po površini vode, s korjenčićima uronjenim u nju. Duljina korjenčića ovisi o okolinskim uvjetima.

Spada u najmanje i najjednostavnije cvijetnice. Raste u debelim slojevima na vodama stajaćicama koje su bogate hranjivim tvarima. Nije karakteristična za tropske vode niti za one s niskom razinom nutrijenata (hranjivih tvari). Iako je inače otporna, i leća je osjetljiva na toksičnost i salinitet vode.

U posljednje vrijeme sve se više istražuje zbog zanimljivih svojstava. Naime, primijećeno je da se mijenja uslijed promjena u okolišu, npr. pojavi li se onečišćenje vode na njenom staništu. Biljka tada može promijeniti boju u žućkastu, usporiti rast ili odbaciti korjenčić. Daljnjim istraživanjima znanstvenici su otkrili da u biljci nastaju i mnoge druge promjene koje nisu vidljive okom, ali laboratorijskim ih je metodama moguće otkriti i izmjeriti. Rasprostranjena je po svijetu, a u industriji služi za počišćivanje vode i smanjivanje eutrofikacije.



Slika 2. *Lemna Minor* L. u a) vegetativnom stanju i b) tijekom cvata (Mkandawire i Dudel, 2007).

2.4.1. Uzgoj i rast vodene leće

Vodenu leću karakterizira brz, invazivan rast (brzo prekriva vodenu površinu), pri čemu je za novu biljku potrebno 30 do 40 sati. Upravo radi toga te niske cijene i jednostavnog održavanja u kulturi ova je porodica pogodna za različita laboratorijska istraživanja.

Uzgoj vodene leće zahtjeva svakodnevnu optimizaciju i prorjeđivanje populacije; sa druge strane, nema velike potrebe za staništem i raste u bilo kojoj razini vode, od 1 cm nadalje, iako je poželjna dubina od 20-50 cm. Vodena leća podnosi temperature od 6 °C do 33 °C, sa optimumom 17.5 °C do 30 °C, pH vode od 5 do 9, sa optimumom od 5.5 do 7.5 (Mkandawire i Dudel, 2007).

Utjecaj vjetra može biti poguban za koloniju; u slučaju da vjetar otpuše sve biljke na jednu stranu vodene površine, njihova gustoća na površini blokira prodor svjetla do donjih slojeva koji radi toga počinju venuti. Upravo se zato preporuča uzgoj na uskim vodenim površinama koje su situirane okomito na dominantne vjetrove u području uzgoja, okomitih stranica visine koja uračunava rast razine vode uslijed obilnijih padalina.

Rast vodene leće je funkcija raspoloživih hranjivih tvari, temperature, sunčevog svjetla i gustoće populacije. Rast je eksponencijalan pri čemu jedna generacija traje otprilike 16 sati, a jedna biljka daje do 20 listića koji nastavljaju proces na isti način kao matična biljka kada

sazriju (razmnožavanje slično kloniranju). Takav rast se nastavlja dok ne nestane hranjivih tvari ili mjesta u staništu, tako da se ohrabruje periodična proreda populacije kako bi se trend nastavio. Najbolji izvori nutrijenata su sve vrste životinjskog izmeta, organski otpad iz kućanstava svake vrste, većina otpada postrojenja za proizvodnju hrane i klaonica. Krute tvari kao životinjsko gnojivo i kućanski otpad se mogu namakati u vodi prije dodavanja u koloniju. Otpad koji sadrži fekalije mora proći početnu obradu od nekoliko dana u anaerobnim bazenima prije puštanja u koloniju vodene leće. Preporučeno je da dovod fekalnih tvari i otpadnih voda u vodenu površinu bude jarcima, a ne cijevima zbog mogućih začepjenja. Zbog relativno visokog zahtjeva za dušikom i brzom gubitku dušika iz hidrosfere, kolonije koje koriste fekalije kao hranjive tvari su ograničene dušikom, a samim time i rastom i razvojem. Kolonije vodene leće koje se koriste u tretiranju kanalizacijskih otpadnih voda stoga zahtijevaju dodavanje dušika anorganskog podrijetla kako bi zadržale populaciju. Ostali bitni nutrijenti su fosfor i kalij.

Ureja je prihvatljivi izvor anorganskog dušika sa otprilike 45% dušika koji se brzo pretvara u amonijak u normalnim uvjetima; ali treba pratiti razinu amonijaka u vodi, koncentracije od 100mg NH₃ su toksične za biljku. Nutrijenti se apsorbiraju kroz sve površine lista. Postoje tri učestale metode dohrane vodene leće; otapanjem u vodi, raspršivanjem otopine po površini biljaka i ubacivanje krute tvari i samo jezero na kojem kolonija pluta (Mkandawire i Dudel, 2007).

Sijanje leće je vrlo bitno kada se stvara nova kolonija u novim stajaćicama; ovisno od vrste leće, od 40 kg do 60 kg sjemena na 100m² kako bi se stvorila dovoljna gustoća i pokrivenost u roku od tri dana, prije nego se uspiju stvoriti konkurentne kolonije algi u dubljim slojevima.

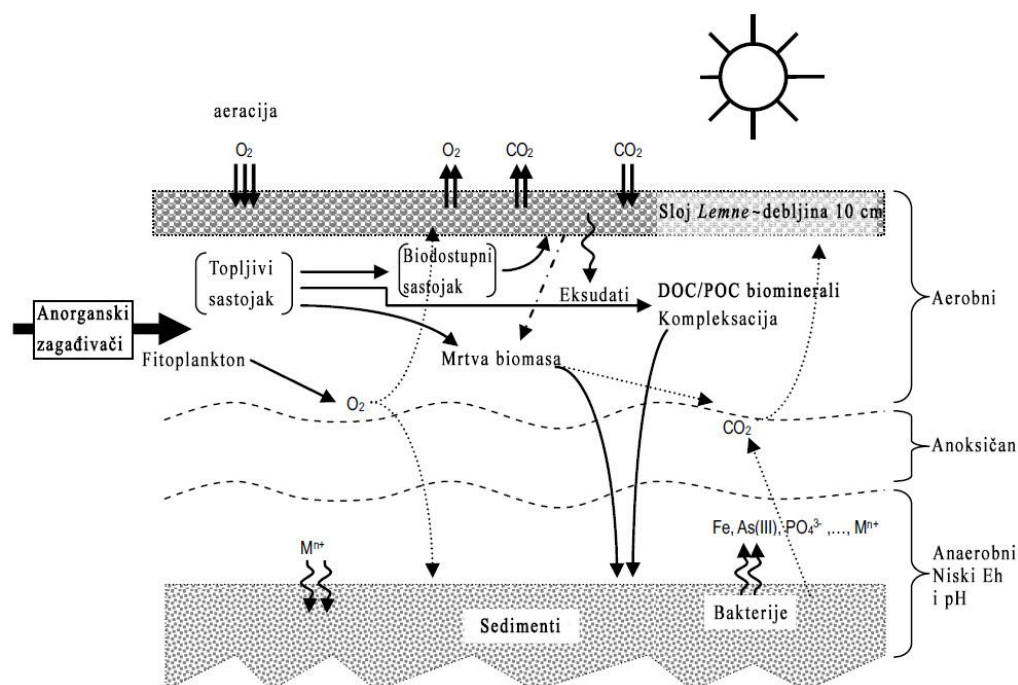
Kratkotrajno potapanje biljaka vrši se pri visokim temperaturama kako se gornji dio biljke ne bi osušio i uvenuio. Produktivnost vodene leće povećava se proporcionalno sa gustoćom kolonije iznad površine vode, do razine kada kolonija potpuno prekrije površinu i onda ostane konstantna.

Kako bi se održala dobra produktivnost i spriječila konkurentnost fitoplanktona ili plutajućih algi, gustoća mora biti održavana na toj ili nešto višoj razini. Fitoplankton guši korijenje vodene leće, što uzrokuje žutilo, smanjeni rast, sušenje i odumiranje biljke. Visoke količine algi umanjuju dostupne nutrijente i tako smanjuju stopu rasta kolonije.

3. RASPRAVA

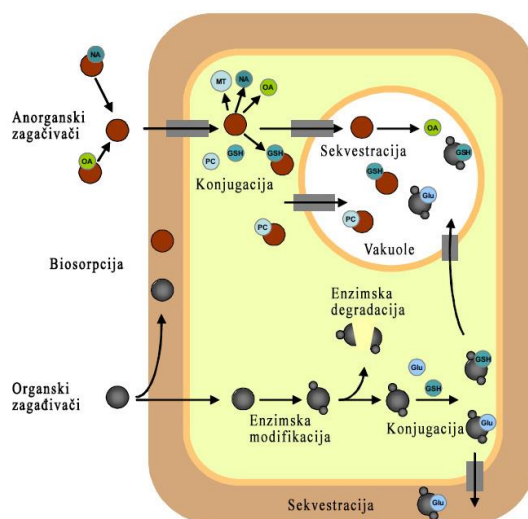
3.1. FITOREMEDIJACIJSKI POTENCIJAL VODENE LEĆE

Vodena leća naširoko je proučavana za potencijalnu primjenu u fitoremedijaciji te nalazi dosadašnjih istraživanja ukazuju na iznimni potencijal biljke na unos i akumulaciju teških metala, radionuklida te metaloida, u čemu prednjače pred algama i ostalim vodenim makrofitima (Zimmo i sur., 2002). Akumulacije metala i metaloida u vodenim lećama rezultat je kvalitetne biomase za biosorpciju na površini stanice i visoke razine metabolički uvjetovane ugradnje kontaminanata u stanice. Pritom, biosorpcija je sposobnost određenih vrsta neaktivne biomase da na sebe veže i koncentrira metale (fiksira ih) tako da djeluje poput kemijske supstance ili kroz razmjenu iona. Proces fitoremedijacije vodene leće prikazan je na slici 3.



Slika 3. Biološki procesi u vodenom fitoremedijacijskom sistemu za anorganske onečišćivače (Mkandawire i Dudel, 2007).

Čini se da većina vodenih leća dobro podnosi visoke koncentracije kontaminanata radi toga što ih sekvstrira i kompartmentalizira u stanične organele, što je i prikazano na slici 4 (za organske i anorganske onečišćivače). Pritom, detoksifikacija uključuje sekvestaciju u dijelove stanice u kojima tvari mogu stvoriti najmanje problema. U taj proces, tijekom konjugacije, uključeni su kelatori glutation (GSH), glukoza (Glu), metalotioneini (MT), nikotianamini (NA) te organska kiselina (OA) (Mkandawire i Dudel, 2007).



Slika 4. Mehanizam tolerancije za anorganske i organske onečišćivače u *Lemna Minor L.* stanicama (Mkandawire i Dudel, 2007).

Biljne vrste pogodne za fitoremedijaciju trebale bi biti u stanju ekstrahirati i akumulirati, transformirati ili razgraditi kontaminante čija je koncentracija toksična za ostale biljke te brzo rasti i imati visok prinos.

Generalno gledajući vodene se leće smatraju brzorastućima te imaju velik prinos, što ih čini pogodnima za fitoremedijaciju. Nadalje, karakteriziraju ih lako održavanje i velik kapacitet za čišćenje kontaminanata. Također, dobro podnose ekstremne koncentracije onečišćivača sekvestracijom te njihovim „spremanjem“ (kompartimentalizacijom) u stanične organele, što je ranije napomenuto. Uz to, imaju visok bioakumulacijski kapacitet, sposobnost za regulaciju kemijske specijacije i biodostupnost (bioraspoloživost) nekih onečišćivača u svom okruženju te se mogu koristiti za veći broj onečišćivača istovremeno.

Kako je ranije spomenuto, hiperakumulatori akumuliraju elemente u količini iznad 1.000 mg po kilogramu suhe biomase. Iako se vrijednosti akumuliranih metala za različite vrste vodenih leća razlikuju u literaturi, generalno se može reći da *Lemna Minor L.* svakako spada u hiperakumulatore metala, posebno cinka, bakra, aluminija, kroma i kadmija. Neki fizikalno-kemijski pokazatelji učinkovitosti djelovanje *Lemne Minor L.* prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Postotno smanjenje fizikalno-kemijskih parametara kao rezultat djelovanja *Lemna Minor* L. (100% otpadna voda) (Ugya i sur., 2015).

| Parametar | Početno | Konačno | Smanjenje (%) |
|-------------------------------------|---------|---------|---------------|
| Biokemijska potrošnja kisika (mg/L) | 84 | 24 | 71 |
| Kadmij (µg/L) | 15.3 | 0.056 | 96 |
| Provodljivost (µm/cm) | 422 | 234 | 45 |
| Kemijska potrošnja kisika (mg/L) | 68.3 | 15.3 | 77 |
| Otopljeni kisik (mg/L) | 6.1 | 2.1 | 66 |
| Živa (µg/L) | 6.7 | 0.8574 | 87 |
| Mangan (µg/L) | 56.9 | 0.5187 | 99 |
| Nitrat (mg/L) | 1.98 | 0.1003 | 95 |
| Olovo (µg/L) | 28 | 0.1794 | 100 |
| pH | 8.37 | 7.5 | - |
| Ukupne otopljene tvari (mg/L) | 286 | 44.6 | 84 |
| Ukupne suspendirane tvari (mg/L) | 158 | 1 1 | 80 |
| Zamućenost (NTU) | 94.3 | 37.3 | 60 |
| Cink (µg/L) | 72.1 | 2.5384 | 96 |

Kako je i vidljivo iz tablice 2, nalazi provedenog istraživanja pokazuju da se *Lemna Minor* L. u fitoremedijaciji pokazuje izuzetno uspješnom u smanjenju različitih fizikalno-kemijskih pokazatelja zagađenja otpadne vode. Posebno se ističe u uklanjanju metala poput olova, mangana, cinka i kadmija, sa uklanjanjem spomenutih metala u rasponu od 95-100%. U nastavku će se detaljnije prikazati nalazi dosadašnjih istraživanja o učinkovitosti vodene leće na smanjenje koncentracije teških metala, farmaceutika, herbicida. Pritom, za posljednje dvije skupine potrebno je provesti dodatna istraživanja.

3.2. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za željezo (Fe)

Željezo je biogeni je element za sve organizme, no otrovan je u velikim koncentracijama. Nužan je za enzimsku sintezu klorofila i kao sastavni dio hemoglobina (Košić i sur., 2016).

Posljedice unošenja prevelike količine željeza u organizam ovise o topljivosti i stabilnosti spoja. Unos veći od 10 mg po kilogramu težine uzrokuje ubrzano disanje i puls, zagušenje

krvnih žila, visoki krvni tlak i pospanost, što povećava opasnost od patogenih organizama, s obzirom da mnogi od njih trebaju željezo za rast (Kant i Kant, 2010).

Jedno od provedenih istraživanja fitoremedijacije *Lemne Minor* L. izučavalo je njezinu sposobnost akumulacije željeza iz tekućina prikupljenih blizu rudnika i u botaničkom vrtu. Zaključeno je da *Lemna Minor* L. pokazuje sposobnost za uklanjanje visokih koncentracija željeza, pri čemu se maksimalna akumulacija postiže u nekoliko dana (Teixeira i sur., 2014).

3.3. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za bakar (Cu)

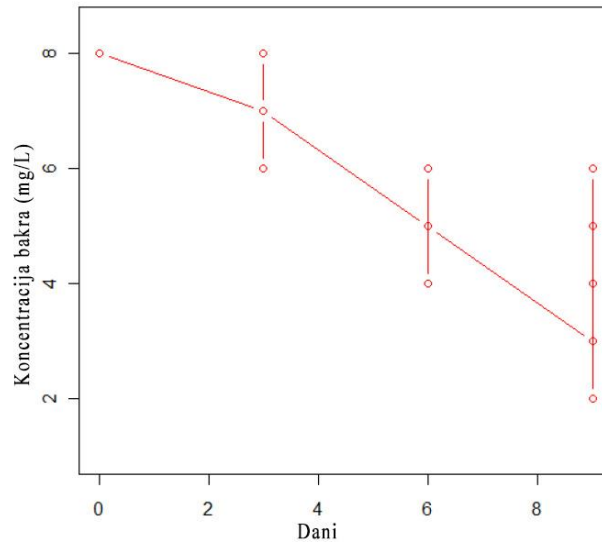
Bakar je bitan bioelement za biljke i životinje, ali je za kralješnjake toksičan u velikim koncentracijama. Ljudi i svinje mogu podnijeti razmjerno velike koncentracije ovog elementa, dok su ovce i krave vrlo osjetljive na trovanje bakrom (Košić i sur., 2016). Biljke podnose velike koncentracije bakra u tlu ukoliko je tlo bogato organskim karbonatima.

Pretjerana količina bakra u organizmu ljudi (iznad 470 mg) je toksična i može uzrokovati hipertenziju, sporadičnu groznicu, uremiju pa čak i komu (Kant i Kant, 2010). Također, uzrokuje patološke promjene u moždanom tkivu. No, također je bitan za organizam, te njegov manjak uzrokuje anemiju, inhibiciju rasta i probleme cirkulacije.

Antropogeni izvori bakra ulaze u otpadne vode industrijskom prašinom, procesima taljenja, putem bakrenih cijevi i kao otpad industrija poput proizvodnje elektronike.

U nedavno provedenom istraživanju (Apelt, 2010) proučavala se koncentracija bakra u otopini za dvije skupine – kontrolnu te tretmansku koja je sadržavala vodenu leću *Lemnu Minor* L. Nalazi su jasno pokazali da je u soluciji sa lećom dolazilo do smanjenja koncentracije bakra (došlo je do fitoakumulacije u vodenoj leći) sa najvećim smanjenjem od 55% devetog dana tretmana, što je i prikazano na slici 5. S druge strane, u kontrolnom uzorku došlo je do jedva primjetnog pada u spomenutoj koncentraciji, tek oko 4.16% tijekom devet dana.

U novijem istraživanju (Rofkar i sur., 2014) proučavana je učinkovitost fitoremedijacije *Lemne Minor* L. u slučaju otopine arsena, bakra i silikona te su nalazi pokazali apsorpciju bakra u razini do 452 mg/kg. No, izloženost bakru ima i negativan utjecaj na vodenu leću, na način da dolazi do smanjenja proizvodnje biomase i smanjenja u količini klorofila u biljci.



Slika 5. Smanjivanje koncentracije bakra u otpadnoj vodi kao rezultat djelovanja *Lemne Minor* L. (Apelt, 2010).

3.4. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za kadmij (Cd)

Kadmij u okoliš dospijeva preko otpada, razgradnjom boja i zaštitnih sredstava, a nije biogeni element te je otrovan za ljude i životinje dok ga neke biljke akumuliraju u korijenu (Košić, Habulan i Filipašić, 2016). Čak 50 mg kadmija u ljudskom organizmu uzrokuje povraćanje, proljev, abdominalne bolove te gubitak svijesti. Za kronično trovanje kadmijem potrebna je izloženost u trajanju od 5 do 10 godina, pri čemu dolazi do smanjenja crvenih krvnih stanica, oštećenja koštane srži, smetnji u metabolizmu kalcija, mekšanja kostiju, lomova, skeletalnih deformacija, oštećenja bubrega, pluća i jetre, hipertenzije, genetskih mutacija, srčanih bolesti itd. (Kant i Kant, 2010).

Jedno od istraživanja u kojima se proučavao fitoremedijacijski potencijal vodene leće imalo je za cilj utvrditi postotno smanjenje kadmija u tekućini. Pritom se uklanjanje metala računalo prema sljedećoj jednadžbi (Chaudhuri i sur., 2014):

$$R (\%) = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) * 100$$

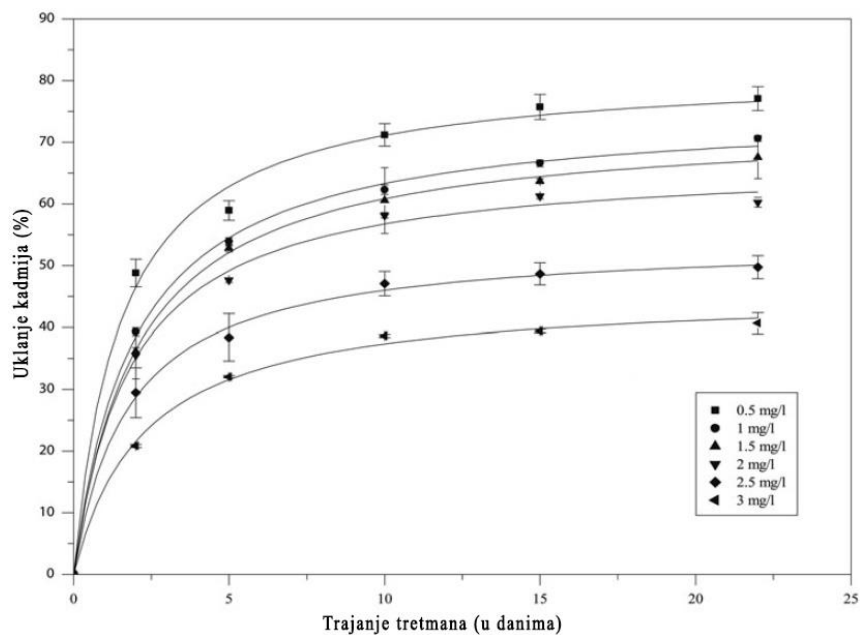
Pri čemu je:

R = postotno smanjenje koncentracije metala

C_0 = početna koncentracija metala

C_z = konačna koncentracija metala

Iz slike 6 vidljivo je da je za sve količine *Lemne Minor* L. (u rasponu od 0.5 do 3 mg/L) dolazilo do smanjenja koncentracije kadmija u otopini tijekom 22 dana tretmana. Kako je očekivano, do većeg uklanjanja metala dolazilo je u slučaju veće količine vodene leće, iako ta povezanost nije proporcionalna. Sadržaj apsorbiranog kadmija kretao se od otprilike 1647 mg/kg (pri 0.5 mg/L *Lemne Minor* L.) do 3372 mg/kg (pri 3.0 mg/L *Lemne Minor* L.), što su uistinu impresivne vrijednosti. Uslijed izloženosti kadmiju došlo je i do značajnog pada sadržaja klorofila, čak i pri najnižim koncentracijama kadmija.



Slika 6. Uklanjanje kadmija (u postocima) pomoću *Lemne minor* L.(Chaudhuri i sur., 2014).

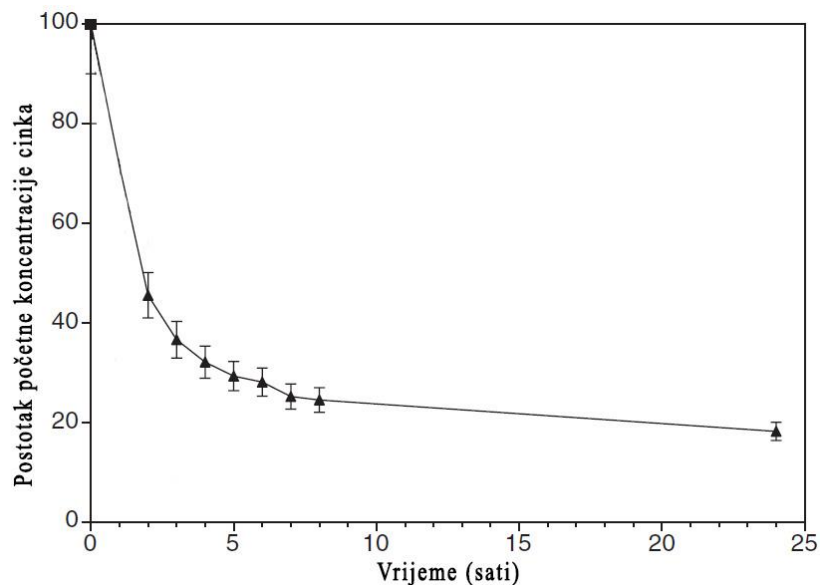
U jednom od istraživanja (Bianconi i sur.), uz apsorpciju kadmija, izučavali su se i brzina rasta biljke te tolerancija na toksičnost metala. Utvrđeno je da *Lemna Minor* L. dobro podnosi toksično okruženje kadmija te da je do najveće apsorpcije metala došlo nakon 72 sata, što je u skladu s ranije spomenutim istraživanjem čiji su rezultati prikazani na gornjem grafu.

3.5. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za cink (Zn)

Cink je esencijalan element u tragovima za sve organizme. Prisutan je u metalnim enzimima i proteinima, a općenito je njegova otrovnost mala (povećana koncentracija je umjereno otrovna za biljke, dok je za sisavce slabo otrovna). Ako je koncentracija cinka veća od 300 mg/kg onda se primjećuje smanjenje rasta biljaka (Košić i sur., 2016).

Cinkove se komponente upotrebljavaju pri uzgoju svinja i pilića kako dodaci prehrani. On se raspršuje u okoliš kroz pigmente boja, pocinčano željezo, baterije, otpadne vode i topionice, dok se u prirodi nalazi u tlu, u mineralima i stijenkama u obliku sulfida, sulfata, karbonata, fosfata i hidratiziranih silikata

U jednom od objavljenih istraživanja (Basile i sur., 2012) o fitoremedijaciji cinka vodenom lećom izučavala se i lokalizacija metala u organizmu biljke te je nađeno da se koncentracija cinka progresivno povećava od gornje površine lista i mezofila prema unutrašnjoj površini i stabljici, a isti je slučaj i sa kadmijem. Bakar, s druge strane, taloži se suprotnim redoslijedom – najviše ga ima pri donjim dijelovima, a najmanje na gornjim dijelovima lista. Što se uklanjanja cinka iz metalne otopine tiče, *Lemna Minor* L. se pokazala izuzetno učinkovitim u promatranom periodu od 24 sata, što je i prikazano na slici 7.



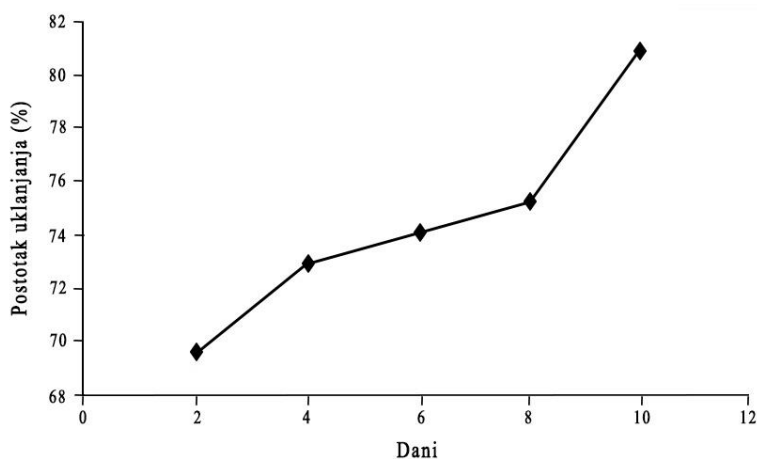
Slika 7. Uklanjanje cinka *Lemnom Minor* L. (Basile i sur., 2012).

3.6. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za olovo (Pb)

Olovo nije esencijalni element te je vrlo je otrovan za biljke i životinje (Košić i sur., 2016) te više od 400 mg u ljudskom tijelu može izazvati oštećenje mozga, povraćanje, gubitak apetita, konvulzije, nekontrolirane pokrete tijela i komu. Taloži se u jetri, bubrezima, mozgu, mišićima, mekanom tkivu i kostima. Dovodi do visoke razine spontanih pobačaja, utječe na kožu i respiratorni sistem, oštećuje bubrege, jetru i moždane stanice. Također, narušava endokrini sustav, a dugotrajna izloženost može izazvati i smrt (Kant i Kant, 2010).

U nedavnom istraživanju utvrđivao se potencijal vodene leće u uklanjanju olova iz otpadnih voda pute fitoremedijacije (Singh i sur., 2012). Na slici 8 prikazano je postotno uklanjanje olova iz otpadne vode kao rezultat djelovanja *Lemne Minor* L. te je očita njezina uspješnost. Analizirano je i u kojim uvjetima dolazi do bolje akumulacije, te nalazi pokazuju da je biljka najuspješnija u fitoakumulaciji pri nižoj koncentraciji olova (30 mg/L, u usporedbi sa 40 i 50 mg/L) pri pH 6 i temperaturi od 28 °C. u tim uvjetima, u trajanju od 10 dana, došlo je do uklanjanja olova iz otpadne vode u iznosu od 89%.

Također, olovo je imalo i negativan učinak na vodenu leću, te se s povećanjem njegove koncentracije smanjivao sadržaj klorofila.



Slika 8. Postotak uklanjanja olova *Lemnom minor* L. pri pH 6 i temperaturi od 28 °C (Singh i sur., 2012).

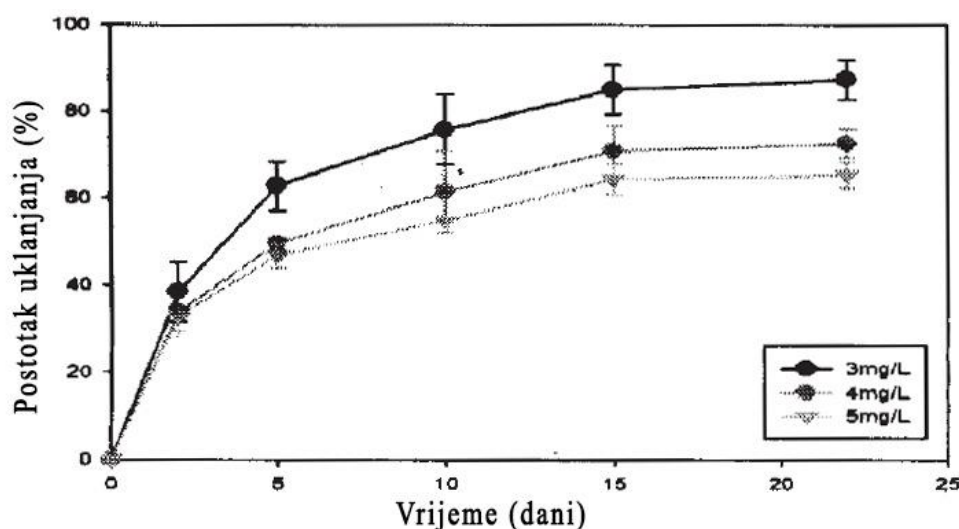
Doduše, ima i istraživanja koja su naišla na oprečne rezultate. Naime, iz slike je vidljivo da količina uklonjenog olova iz tekućine varira unutar deset promatranih dana. No, jedan od nalaza pokazuje da fitoremedijacija olova, ali i kroma i bakra, većinom završava unutar prvih

24 sata te da nema statistički značajne razlike u apsorpciji između razine nakon 24 sata i nakon 7 dana (Üçüncü i sur., 2013). Sličan je nalaz potvrđen i drugim istraživanjima. Primjerice, dokazano je da *Lemna Minor* L. uklanja i do 95% olova iz tekućine, pri čemu se 85 % uklanjanja dogodi unutar prvog dana (Hurd i Sternberg, 2008).

3.7. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za nikal (Ni)

Nikal je za neke vrste esencijalni, a za neke ne-esencijalni element. Vrlo je otrovan za biljke u koncentracijama većim od 50 mg/kg, a umjereno je otrovan za sisavce (Košić i sur., 2016). Što se ljudi tiče, više od 30 mg nikla u organizmu može izazvati promjene u mišićima, mozgu, plućima, jetri i bubrezima, ali i dovodi do karcinoma, tremora, paralize pa čak i smrti (Kant i Kant, 2010).

Što se tiče istraživanja na temu fitoakumulacije nikla u slučaju vodene leće, nedavno je jedno provedeno te je dokazano da, u periodu od 22 dana, *Lemna Minor* L. učinkovito uklanja metal iz tekućine (Goswami i sur., 2015). Pritom su proučavane vrijednosti za tri koncentracije nikla u otopini – 3 mg/L, 4 mg/L i 5 mg/L. Kako je vidljivo iz slike 9, postotak uklonjenog nikla bio je najviši u slučaju niže koncentracije nikla, prelazeći 80%. Na temelju rezultata autori zaključuju da je nikal, u višim koncentracijama, toksičan za biljku.



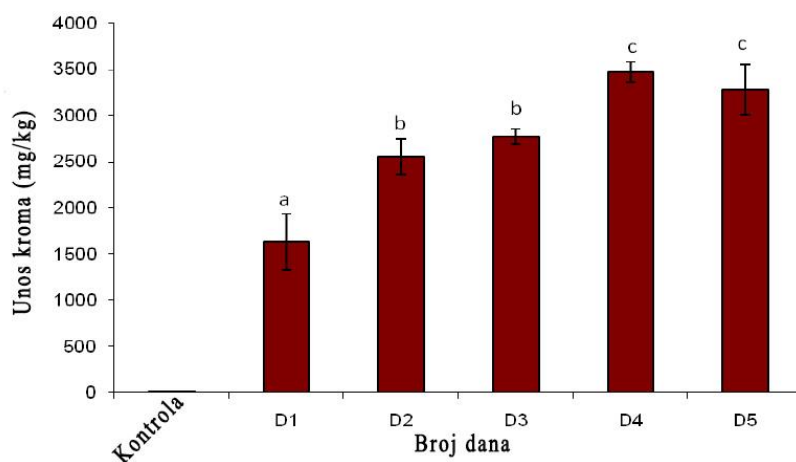
Slika 9. Postotak uklanjanja nikla *Lemnom Minor* L. pri različitim početnim koncentracijama (Goswami i sur., 2015).

3.8. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za krom (Cr)

Svi spojevi kroma su toksični, posebice heksavalent kroma u količini većoj od 70 mg. Uzrokuje karcinom, anuriju, nefritis, probavne čireve i perforaciju u patriciji nosa. Ulazi u stanične membrane te oštećuje središnji živčani sustav. Osim navedenog, uzrokuje respiratorne probleme, tumore pluća (kad je udahnut), komplikacije tijekom trudnoće itd (Kant i Kant, 2010). Krom ulazi u okoliš radi njegove upotrebe u bojama i pigmentima, tekstilu, pri obradi drva i različitim elektro-industrijama.

Prošlogodišnje istraživanje fitoremedijacijske učinkovitosti *Lemnom Minor* L. bavilo se upravo akumulacijskom sposobnosti kroma. Apsorpcija kroma od strane *Lemnom Minor* L. prikazana je na slici 10, te se jasno vidi kako prosječna apsorpcija (u mg/kg) ovisi o koncentraciji kroma, pri čemu je unos najveći za najvišu korištenu koncentraciju, iako te biljke nisu preživjele. Uzimajući ponovo u obzir činjenicu da bi dobre akumulacijske biljke trebale biti u stanju akumulirati više od 1.000 mg elementa po kilogramu suhe mase, može se zaključiti da je vodena leća, i u slučaju kroma, hiperakumulator.

Također, istraživanje je pokazalo da u otopinama sa većim početnim koncentracijama kroma (iznad 4mg/L) dolazi do se smanjenja prosječnog rasta vodene leće i preko 70%.



Slika 10. Unos kroma *Lemne Minor* L. s vremenom (Thayaparan i sur., 2015).

Također, već spomenuto istraživanje (Üçüncü i sur., 2013) pokazalo je da je ova biljka odlična u fitoremedijaciji kroma, pa čak i u većoj mjeri nego što je to za bakar i olovo.

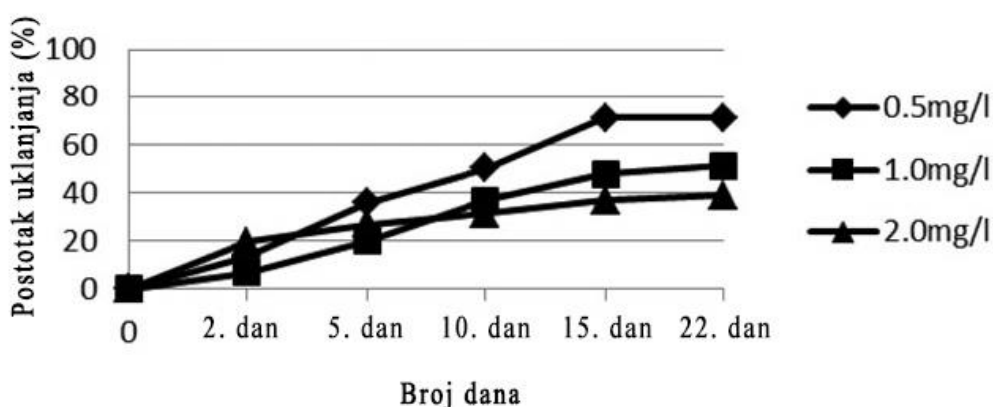
3.9. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za arsen (As)

Arsen je otrovan za ribe, životinje i ljude. Čak i male količine, iznad 25 mg arsena, dovode do povraćanja, mučnine, iritacije nosa i grla, abdominalnih bolova, upala kože pa i smrti. Također, može uzrokovati karcinom kože, pluća i jetre, kromosomska oštećenja, gangrenu, gubitak sluha, oštećenja živčanog tkiva, jetre i bubrega (Kant i Kant, 2010). Pri izloženosti manjim dozama arsena pojavljuju se simptomi poput gubitka težine i kose, mučnina, depresija, umor te bijelih linija po noktima.

U jednom istraživanju (Goswami i sur.,) detaljno su proučavani utjecaji arsena na vodenu leću te njezina sposobnog fitoakumulacije u trima otopinama sa različitim koncentracijama navedenog metala (0.5 mg/L, 1 mg/L te 2 mg/L). nađeno je da na biomasu *Lemne Minor L.* ne utječu niže koncentracije arsena u otopini, ali nakon dulje izloženosti (iznad 15 dana) listovi počinju žutjeti. Isto se događa pri višim koncentracijama, mada u tom slučaju dolazi i do smanjenja biomase. Nadalje, sa povećanjem koncentracije arsena dolazi do smanjenja relativnog faktora rasta vodene leće.

Na slici 11 prikazano je postotno uklanjanje arsena fitoakumulacijom *Lemnom Minor L.*, pri čemu je nađeno da je učinkovitost najveća (iznad 70%) pri najmanjoj koncentraciji arsena, petnaestog dana promatranja. S druge strane, za najviši stupanj koncentracije uspješnost uklanjanja je najmanja, što ukazuje na toksičnost metala.

Iz navedenog se može zaključiti da bi se *Lemna Minor L.* mogla efikasno upotrebljavati za remedijaciju arsena iz vodenih medija, pri njegovim nižim koncentracijama.



Slika 11. Postotno uklanjanje arsena *Lemne Minor L.* (Goswami i sur., 2014).

Posebno su zanimljivi i nalazi već spomenutog istraživanja u kojem je proučavana fitoakumulacija u slučaju otopine arsena, bakra i silikona (Rofkar i sur., 2014) te je nađeno da prisutnost bakra u otopini povećava unos arsena za *Lemnu Minor* L. čak 2.5 puta, u usporedbi sa akumulacijom bez prisutnosti bakra u otapalu. Tako je bez bakra unos bio 141 mg/kg, a sa njim 324 mg arsena po kilogramu biljnog tkiva.

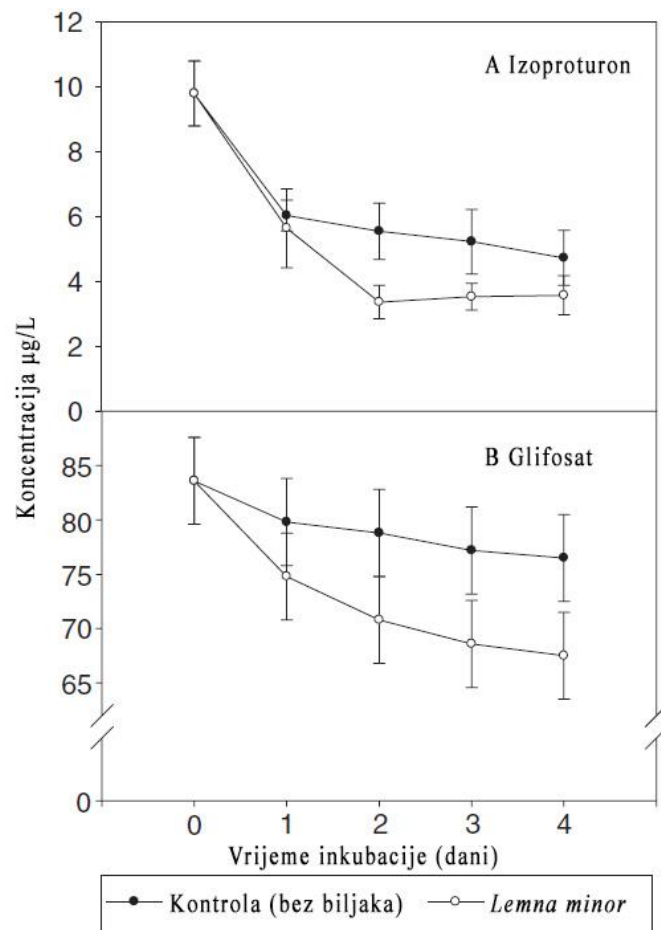
3.10 Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za herbicide

Čišćenje vodenih sustava koji su zagađeni herbicidima skupo je i energetski neisplativo. U posljednjih desetak godina upotreba biljaka za remedijaciju tla i voda stekla je popularnost kao novčano i ekološki isplativa i učinkovita tehnologija za pročišćavanje.

U jednom od novijih istraživanja ispitivan je efekt fitoakumulacije izoproturona i glifosata, kao dva uobičajena predstavnika herbicida, što se često koriste u poljoprivredi i vinogradarstvu (Dosnon-Olette i sur., 2011). Nakon 24 sata izloženosti, stopa rasta *Lemne Minor* L. umanjena je za 17% i 33% u prisutnosti izoproturona u koncentracijama od 5 i 20 µg/l. U slučaju glifosata, rast je umanjen za 14-20% pri 20 µg/l te za 24-26% pri koncentraciji od 120 µg/l.

Nadalje, u uzorku sa i bez biljaka dolazilo je do brzog smanjenja koncentracije izoproturona u mediju, iako je smanjenje bilo brže u njihovoj prisutnosti, barem tijekom prva četiri dana, nakon čega značajne razlike među uzorcima nije bilo (slika 12 a). Kad su uzorci sadržavali glifosat, također je dolazilo do smanjenja koncentracije u kontrolnom uzorku (bez biljaka) i onom sa vodenom lećom (slika 12 b).

Zaključno, nakon četiri dana inkubacije, koncentracija herbicida pala je za 25% za izoproturon te za 8% za glifosat, što je daleko manje nego smanjenje do kojih je dolazilo u slučaju do sad opisivanih teških metala.

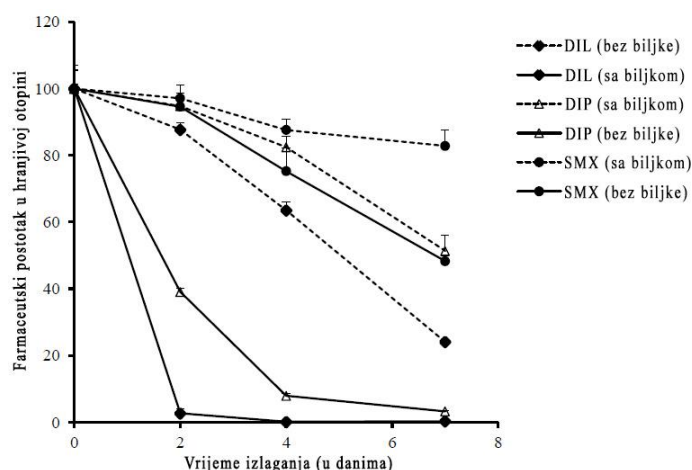


Slika 12. Koncentracija µg/L izoproturona i glifosata u mediju nakon inkubacije bez biljaka (kontrola) i u prisutnosti *Lemne Minor* L. (Dosnon-Olette i sur., 2011).

3.11. Fitoremedijacijski potencijal vodene leće za farmaceutike

Posljednjih se godina velika pažnja posvećuje djelovanju farmaceutika na okoliš. Naime, njihovi aktivni sastojci tek se djelomično transformiraju u tijelima ljudi i životinja, radi čega se u obliku mješavine metabolita i bioaktivnih formi ispuštaju u kanalizacijski sustav (Carvalho i sur., 2014).

Jedno od ispitivanja učinaka fitoremedijacije na tri vrste farmaceutika provedeno je 2014. godine (Maharjan, 2014), a uključeni su bili: diltiazem (DIL), aktivna tvar lijekova koji služe blokadi kalcijevih kanala, difenhidramin (DIP), jedan od prvih antihistaminika te sulfametoksazol (SMX), antibakterijski agens. Rezultati su prikazani na slici 13, a pokazuju da za sva tri farmaceutika smanjenje nastupa pri uključivanju vodene leće, ali i bez nje. Gubitak DIL nutrijentske solucije bez biljaka kretao se između 58 i 98%, a dodatno se povećavao s vremenom. 50% početne DIP koncentracije ostalo je nepromijenjeno bez biljaka do kraja promatranja, dok je u soluciji izloženoj vodenoj leći koncentracija pala na 8%. Konačno, 50% koncentracije SMX uklonjeno je vodenom lećom.



Slika 13. Postotak farmaceutika preostalog u 100 µg/L hranjive otopine sa i bez izlaganja *Lemne Minor L.* pri različitom trajanju tretmana (u danima) (Maharjan, 2014).

Akumulirane koncentracije DIL farmaceutika bile su najviše u prvih 98 sati a kretale su se od 3 do 50 µg/L, pri čemu su se taložile većinom u korijenu. DIP farmaceutik zastupljeniji je u lišću, s akumuliranim koncentracijama od otprilike 7 do 42 µg/L. najniže vrijednosti bile su za SMX farmaceutik, ispod 1 µg/L. U ostalim istraživanjima autori su izvještavali o inhibiciji rasta *Lemne Minor L.* u slučaju eritromicina i ibuprofena (Carvalho i sur., 2014), no značajni rezultati u pogledu uklanjanja farmaceutika do sad su potvrđeni samo za klofibrinsku kiselinu i kafein.

4. ZAKLJUČAK

Zbog smanjenja količina slatkovodnih zaliha, problem onečišćenja voda aktualna je tema te se konstantno provode nova istraživanja ne bi li se osigurali učinkovitiji i ekonomski isplativiji načini pročišćavanja voda, tla i zraka.

Jedan od takvih je fitoremedijacija, skup tehnologija čija primjena ovisi o vrsti kontaminanta, mjestu kontaminacije, količini potrebnog pročišćavanja i tipu biljke.

U radu je predstavljena vodena leća, koja pripada grupi viših biljaka te je monokotiledona biljka, a nalazi se u vodama stajaćicama i rukavcima rijeka. Naširoko je proučavana za potencijalnu primjenu u fitoremedijaciji zbog poželjnih karakteristika kao što su brz rast i velik prinos, lako održavanje, lako podnošenje ekstremnih koncentracija onečišćivača, visok bioakumulacijski kapacitet te mogućnost korištenja na većem broju onečišćivača istovremeno. Do sad provedena istraživanja upućuju na visoku sposobnost leće u smanjenju različitih fizikalno-kemijskih pokazatelja zagađenja otpadne vode. Posebno se ističe u uklanjanju metala poput olova, mangana, cinka i kadmija, sa uklanjanjem spomenutih metala u rasponu od 95-100%.

Prema nalazim istraživanja, vodena leća pokazuje sposobnost za uklanjanje visokih koncentracija željeza, pri čemu se maksimalna akumulacija postiže u nekoliko dana. Nadalje, nalazi pokazuju da je učinkovita u akumulaciji bakra, iako uslijed izloženosti njemu dolazi do smanjenja proizvodnje biomase i smanjenja u količini klorofila u biljci.

Izloženost *Lemne Minor* L. dovodi do značajnog smanjenja koncentracije kadmija u otopini, iako pri izloženosti njemu dolazi i do značajnog pada sadržaja klorofila vodene leće, čak i pri najnižim koncentracijama kadmija. *Lemna Minor* L. se pokazala izuzetno učinkovitim u fitoremedijaciji cinka i olova vodenom lećom. Pritom, olovo ima i negativan učinak na vodenu leću, te se s povećanjem njegove koncentracije smanjivao sadržaj klorofila. Nadalje, *Lemna Minor* L. učinkovito uklanja nikel iz tekućine, iako je on u višim koncentracijama toksičan za biljku. Također, istraživanja pokazuju da je ova biljka odlična u fitoremedijaciji kroma i arsena. Iako, s obzirom na toksičnost arsena, može se efikasno upotrebljavati za njegovu remedijaciju arsena iz vodenih medija, pri nižim koncentracijama.

Dosadašnja istraživanja na herbicidima i farmaceuticima pokazuju određene razine uspješnosti vodene leće, iako su potrebna dodatna istraživanja kako bi se istražili efekti.

5. LITERATURNI POPIS

APELT, M. (2010): *Phytoremediation of copper contaminated waste water using lemna minor*. Virginia Commonwealth University.

BASILE, A., SORBO, S., CONTE, B., COBIANCHI, R., TRINCHELLA, F., CAPASSO, C., i dr. (2012): Toxicity, accumulation, and removal of heavy metals by three aquatic macrophytes. *International journal of phytoremediation* , **14** (4), 374-387.

BIANCONI, D., PIETRINI, F., MASSACCI, A., IANNELLI, M. (2013): Uptake of Cadmium by Lemna minor, a (hyper?-) accumulator plant involved in phytoremediation applications. *E3S Web of Conferences* , **1**.

BOYD, C. (2015): *Water Quality: An Introduction*. Auburn: Springer.

Brezovnjački, A. (2011): Zašto je voda najveće hrvatsko bogatstvo? *Vijenac* , **444**.

CARVALHO, P., BASTO, M., ALMEIDA, C., BRIX, H. (2014): A review of plant–pharmaceutical interactions: from uptake and effects in crop plants to phytoremediation in constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research* , **21** (20), 11729-11763.

CHAUDHURI, D., MAJUMDER, A., MISRA, A., BANDYOPADHYAY, K. (2014): Cadmium Removal by Lemna minor and Spirodela polyrhiza. *International journal of phytoremediation* , **16** (11), 1119-1132.

DOSNON-OLETTE, R., COUDERCHET, M., OTURAN, M., OTURAN, N., EULLAFFROY, P. (2011): Potential use of Lemna minor for the phytoremediation of isoproturon and glyphosate. *International journal of phytoremediation* , **13** (6), 601-612.

GOSWAMI, C., MAJUMDER, A., BANDYOPADHYAY, K. (2015): Role of duckweed (Lemna Minor) as Nickel hyperaccumulator in aqueous solution. *Journal of the Institution of Public Health Engineers* , **2**, 1-8.

GOSWAMI, C., MAJUMDER, A., MISRA, A., BANDYOPADHYAY, K. (2014): Arsenic uptake by Lemna minor in hydroponic system. *International journal of phytoremediation*, **16** (12), 1221-1227.

HURD, N., STERNBERG, S. (2008): Bioremoval of aqueous lead using Lemna minor. *International journal of phytoremediation*, **10** (4), 278-288.

KANT, R., KANT, K. (2010): Unit I: Effects and Sources of Water Pollution. U: R. Kant, K. Kant, Water Pollution: Management, Control and Treatment. New Delhi: New Age International.

- KOŠIĆ, M., HABULAN, N., FILIPAŠIĆ, V. (2016): Određivanje mase teških metala koju je moguće ukloniti fitoremedijacijom pomoću čestih samoniklih biljaka sa zelenih površina grada Varaždina. Zagreb: Geotehnički fakultet.
- MAHARJAN, R. (2014): Phytoremediation of Selected Pharmaceuticals by and their Phytotoxicity to Aquatic Plants. University of Toledo.
- MILENKOVIĆ, M. (2014): Ispitivanje uticaja teških metala na rast industrijske konoplje. Niš: Prirodno-matematički fakultet.
- MKANDAWIRE, M., DUDEL, E. (2007): Are Lemna spp. effective phytoremediation agents. *Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability* , **1** (1), 56-71.
- NATIONAL RISK MANAGEMENT RESEARCH LABORATORY (2000): Introduction to Phytoremediation. Ohio: U.S. Environmental Protection Agency.
- NEŠIĆ, N. (2011): Fitoremedijacija i biljke pogodne za fitoremedijaciju voda zagađenih teškim metalima. Beograd: Institut za multidisciplinarna istraživanja.
- RADIĆ LAKOŠ, T. i RADAČIĆ, M. Upotreba hiperakumulatora teških metala u remedijaciji onečišćenog tla. Šibenik: Veleučilište u Šibeniku. http://bib.irb.hr/datoteka/582661.Hiperakumulatori_tekih_metala.pdf, pristupljeno 21. 8.2016.
- RASTOVČAN- MIOČ, A. (2009): *Uvod u ekologiju - predavanja*. Sisak: Metalurški fakultet.
- REDDY, D., LEE, S. (2012): Water pollution and treatment technologies. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology* , **2** (5), 1-2.
- ROFKAR, J., DWYER, D., BOBAK, D. (2014): Uptake and Toxicity of Arsenic, Copper, and Silicon in *Azolla caroliniana* and *Lemna minor*. *International journal of phytoremediation* , **16** (2), 155-166.
- SINGH, D., GUPTA, R., TIWARI, A. (2012): Potential of duckweed (*Lemna minor*) for removal of lead from wastewater by phytoremediation. *Journal of Pharmacy Research* , **5** (3), 1578-1582.
- SINGH, O., JAIN, R. (2003): Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied microbiology and biotechnology* , **63** (2), 128-135.
- TEIXEIRA, S., VIEIRA, M., MARQUES, J., PEREIRA, R. (2014): Bioremediation of an iron-rich mine effluent by *Lemna minor*. *International journal of phytoremediation*, **16** (12), 1228-1240.

THAYAPARAN, M., IQBAL, S., IQBAL, M. (2015): Phytoremediation Potential of Lemna minor for Removal of Cr (VI) in Aqueous Solution at the Optimum Nutrient Strength. *OUSL Journal* , **9**, 97-111.

ÜÇÜNCÜ, E., TUNCA, E., FIKİRDEŞİCİ, Ş., ÖZKAN, A., ALTINDAĞ, A. (2013): Phytoremediation of Cu, Cr and Pb mixtures by Lemna minor. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* , **91** (5), 600-604.

UGYA, A., TOMA, I., ABBA, A. (2015): Comparative studies on the efficiency of Lemna minor L., Eicchorniacrassipes and Pistiastratiotes in the phytoremediation of refinery waste water. *Science World Journal* , **10** (3), 32-36.

ZENK, M. (1996): Heavy metal detoxification in higher plants - a review. *Gene* , **179** (1), 21-30.

ZIMMO, O., VAN DER STEEN, N., GIJZEN, H. (2002) Process performance assessment of algae-based and duckweed-based wastewater treatment systems, **45** (1), *Water Science and Technology* , 45 (1), 91-101.

6. POPIS ILUSTRACIJA

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 1. Fitoekstrakcija olova (Pb)..... | 10 |
| Slika 2. <i>Lemna Minor L.</i> u a) vegetativnom stanju i b) tijekom cvata | 14 |
| Slika 3. Biološki procesi u vodenom fitoremedijacijskom sistemu za anorganske zagađivače | 16 |
| Slika 4. Mehanizam tolerancije za anorganske i organske zagađivače u <i>Lemna Minor L.</i> stanicama..... | 17 |
| Slika 5. Smanjivanje koncentracije bakra u otpadnoj vodi kao rezultat djelovanja <i>Lemne Minor L.</i> | 20 |
| Slika 6. Uklanjanje kadmija (u postocima) pomoću <i>Lemne Minor L.</i> | 21 |
| Slika 7. Uklanjanje cinka <i>Lemnom minor L.</i> | 22 |
| Slika 8. Postotak uklanjanja olova <i>Lemnom Minor L.</i> pri pH 6 i temperaturi od 28 °C..... | 23 |
| Slika 9. Postotak uklanjanja nikla <i>Lemnom Minor L.</i> pri različitim početnim koncentracijama | 24 |
| Slika 10. Unos kroma <i>Lemne Minor L.</i> s vremenom..... | 25 |
| Slika 11. Postotno uklanjanje arsena <i>Lemne minor L.</i> | 26 |
| Slika 12. Koncentracija µg/L izoproturona i glifosata u mediju nakon inkubacije bez biljaka (kontrola) i u prisutnosti <i>Lemne minor L.</i> | 28 |
| Slika 13. Postotak farmaceutika preostalog u 100 µg/L hranjive otopine sa i bez izlaganja <i>Lemne Minor L.</i> pri različitom trajanju tretmana (u danima) | 29 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Broj taksonomskih grupa hiperakumulatora koje akumuliraju određeni metal | 11 |
| Tablica 2. Postotno smanjenje fizikalno-kemijskih parametara kao rezultat djelovanja <i>Lemne Minor L.</i> (100% otpadna voda) | 18 |