

SLAĐANA Č. ALAGIĆ,
MILE DIMITRIJEVIĆ

Originalni naučni rad
UDC:628.113.3.036

Uklanjanje policikličnih aromatičnih ugljovodonika u konstruisanim močvarama

Konstruisane močvare (mokra polja) su prirodna alternativa konvencionalnim metodama remedijacije kontaminiranih voda i zemljišta, zasnovana na iskorišćavanju kompleksnih procesa koji se uspostavljaju između biljaka, mikroorganizama, zemljišnog matriksa i polutanata. Dobro je poznato da ove sinergističke interakcije značajno doprinose uklanjanju neorganskih zagađivača iz životne sredine. Razumevanje kako biljka/mikroorganizmi/podloga/polutant reaguju među sobom na mestu kontaminacije, još uvek je nedovoljno, a posebno u slučaju organskih zagađivača. Ipak, neki eksperimenti tipa modelovanih pilot-projekata, koji su u najnovije vreme bili razvijeni za uklanjanje policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAHs), ukazuju da je aktivna zona reakcije u konstruisanim močvarama praktično zona korenja, tj. rizosfera. Postoje brojne različite tehnološke varijante u smislu dizajna konstruisanih močvara, spoljne opreme, itd., ali uobičajeno, glavna razlika ogleđa se u tipu podloge i primenjene biljne vrste. Najpodesniji sistem mora biti adaptiran za specifičan problem zagađenja, kao i uslove lokaliteta.

Ključne reči: PAHs, konstruisane močvare, bioremedijacija, fitoremedijacija

UVOD

Policiklični aromatični ugljovodonici (*polycyclic aromatic hydrocarbons*, PAHs), su polutanti organske strukture koji su široko rasprostranjeni u životnoj sredini. Posebna opasnost od ovih jedinjenja potiče od činjenice da su za neka od njih utvrđena mutagena i kancerogena svojstva. Podaci koji svedoče o alarmantnim vrednostima PAHs u životnoj sredini, prvenstveno zemljištu i vodi, prouzrokovali su ubrzan rad na poboljšanju postojećih, kao i iznalaženju potpuno novih tehnika remedijacije koje bi doprinele smanjenju ovih zagađenja. Tretmani koji su danas u upotrebi u svrhe dekontaminacije, su razni termalni, fizičko-hemijski i biološki tretmani. Biološki tretmani, kao isplative "environmental friendly" tehnologije, dobijaju sve više na značaju zahvaljujući pre svega, izvanrednom kapacitetu metabolizma različitih mikroorganizama kao bioloških agenasa, da transformišu ove organske zagađivače u jednostavnija, manje toksična jedinjenja, ili ih čak potpuno mineralizuju do ugljendioksida i vode [1-4].

U preduzetim istraživanjima, takođe je primećeno da mikroorganizmi mogu da deluju u sadejstvu sa višim biljkama i na taj način ostvare poboljšanu degradaciju bilo kojeg molekula organskog zagađivača. Ovo je sve dodatno dovelo do otkrića da i same više biljke, svojim metabolizmom, mogu da se uključe u procese remedijacije, što je pak za krajnju posledicu imalo razvoj nove metode bioremedijacije, poznate kao fitoremedijacija.

Adresa autora: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor

Primljeno za publikovanje: 02. 10. 2013.

Prihvaćeno za publikovanje: 18. 12. 2013.

Danas je fitoremedijacija tehnika koja se sastoji od niza inovativnih tehnologija za zaštitu životne sredine u čijem centru dominiraju jedinstvene ekstraktivne i metaboličke sposobnosti biljaka [5-9]. Kao specijalan vid ovakvih tehnologija, poslednjih decenija je nastala ekspanzija razvoja modelovanih (projektovanih) akvatičnih sistema koji imitiraju uslove koji vladaju u prirodnim močvarama i samim tim, primenjuju one biljne vrste koje pripadaju klasi vodenih makrofita. Upravljanje u ovakvim integrisanim ekosistemima fokusira se na korišćenje fitotehnologije za povećanje kapaciteta prirodnih sistema, ali u kontrolisanim uslovima, kako bi se ostvarila najbolja efikasnost u uklanjanju ne samo organskih, već i neorganskih zagađivača [10,11].

BIOREMEDIJACIJA PAHs

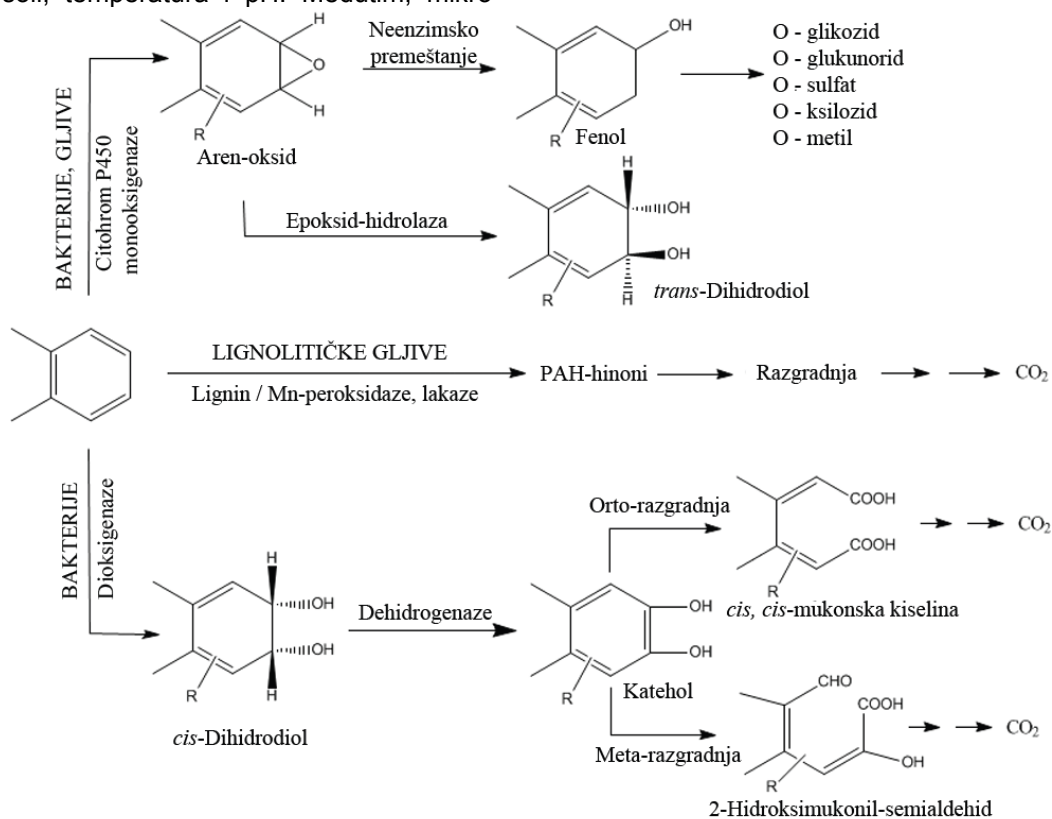
Bioremedijacija je skup postupaka za remedijaciju zagađenih zemljišta i voda, uz primenu bioloških agenasa. Glavni biološki agensi su mikroorganizmi, biljke i kombinovane zajednice biljke-mikroorganizmi, te se tako pod bioremedijacijom u užem smislu, podrazumeva remedijacija uz pomoć mikroorganizama, a u širem i uz pomoć biljaka (fitoremedijacija) [6, 7, 9, 12, 13].

Biološka degradacija PAHs mikroorganizmima se potvrdila najefikasnijom, jer se ona odvija u ćelijama mikroba koji poseduju enzimske sisteme izuzetno uspešne u razgradnji ovih poznatih kancerogena u odgovarajuće metabolite. Praktično, može se reći da molekuli PAHs jedinjenja služe kao izvor ugljenika, ali i energije za rast i razvoj mikroba koji ih mogu razgraditi do odgovarajućih kiselina, alkohola, fenola, hidroperoksida, karbonilnih jedinjenja, estara i na kraju do ugljen-dioksida i vode (slika 1). Zavisno od količine prisutnog kiseonika, bioremedijacija mikroorganizmima se može odvijati pod aerobnim i anaerobnim uslovima [1, 3, 14].

Aerobna razgradnja je najbrže i najkompletnije razlaganje većine organskih zagađivača. Početna biohemijska reakcija je ugrađivanje kiseonika u molekul organskog jedinjenja, enzimima (mono- i dioksigenaze) kataboličkog metabolizma, a zatim nastaje prevođenje nastalih proizvoda u intermedijere centralnih metaboličkih putanja (slika 1). Aerobnu razgradnju vrše aerobni mikroorganizmi i na nju, pored kiseonika, značajan uticaj ima prisustvo mineralnih soli, temperatura i pH. Međutim, mikro-

organizmi pokazuju veliku prilagodljivost i na uslove rasta i na temperaturu [1, 3, 14].

Anaeroban proces se odvija pod dejstvom anaerobnih mikroorganizama i on je toliko spor da je njegov značaj zanemarljiv. Ipak, u slučaju naftnih nalazišta, ustanovljeno je da anaerobna razgradnja može uzeti maha, pa se ovaj način razgradnje PAHs može primeniti za dublje slojeve, koji su praktično bez dotoka vazduha [14].



Slika 1 - Shema mogućih puteva kataboličke razgradnje PAHs aerobnim mikroorganizmima (adap. [3, 14])

Često je, međutim, veoma teško stvoriti dovoljno mikrobne populacije u prirodnom zemljištu koje bi imale značajni PAH-degradirajući kapacitet. Upotreba viših biljaka u procesima bioremedijacije mogla bi značajno da pomogne i donese prednosti koje se ogledaju u sledećem:

- biljke poboljšavaju strukturu zemljišta, a time i aeraciju i hidrološke aspekte koji mogu da budu ograničenje kod biodegradacije;
- pojedine biljke luče oksidativne enzime koji doprinose degradaciji PAH-ova,
- biljke fizički translociraju PAH-ove u svoje tkivo, a zatim ih mogu dalje biotransformisati,
- korenje biljaka obezbeđuje lako razgradiv ugljenik, energiju koja generalno povećava mikrobnu aktivnost u zemljištu, što može dovesti do poboljšane degradacije PAHs kroz direktni metabolizam, ili ko-metabolizam [6, 13, 15, 16].

Praktično, može se reći da je u postupku fitoremedijacije PAHs, iskorišćena sposobnost biljaka da se adaptiraju na stresne uslove, tj. uslove visokih koncentracija PAHs u okruženju, koja im omogućava da žive i napreduju u takvim uslovima. Kao i u slučaju ostalih organskih zagađivača, mehanizmi fitoremedijacije PAHs mogu obuhvatiti: fitoekstrakciju/fitoakumulaciju (usvajanje zagađivača biljnim korenjem i translokacija/akumulacija u nadzemnim izdancima i listovima), fitodegradaciju (biotransformacija zagađivača unutar biljnih tkiva), fitovolatilizaciju (transport zagađujućih materija u vazduh preko toka transpiracije), fitostabilizaciju (proizvodnja hemijskih jedinjenja da bi se zagađivači imobilisali na površini korena i zemljištu), poboljšanu rizosfernu biodegradaciju/rizoremedijaciju (degradacija neposredno oko korena biljke) i u manjoj meri hidrauličnu kontrolu (korišćenja drveća da prihvati i ispari velike količine podzemne, ili površine

ske vode radi kontrole zagađujućih materija) [4, 6, 7, 16].

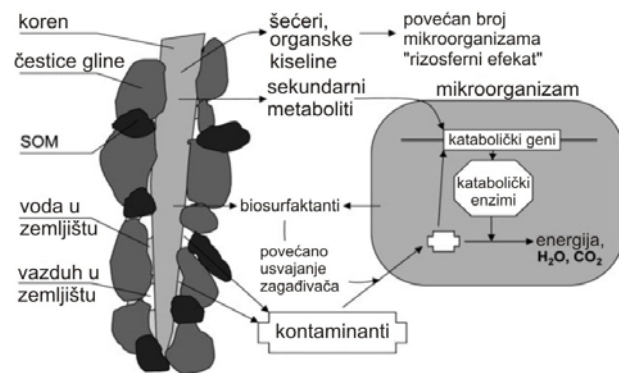
Radovi brojnih istraživača ukazali su da korenje biljaka apsorbira PAH-ove iz zemljišta direktno, ali da su njihove koncentracije u biljkama mnogo manje nego one koje se nalaze u samom zemljištu na kome biljke rastu, sa faktorima akumulacije manjim od jedinice. Biokoncentracijski faktori (BCFs) opisuju tendenciju bioakumulacije individualnih jedinjenja u pojedinim biljnim organima i ovi faktori se za PAH-ove obično kreću od 0,001 do 0,4, mada u slučajevima zasićenja zemljišta, mogu dostići i veće vrednosti, čak do 2 [4, 17-19].

Iako akumulacija ovih opasnih polutanata u biljnim tkivima nije značajna, potvrđeno je da PAH-ovi, kao i svi ostali POPs, podležu procesima detoksifikacije u biljnoj ćeliji i to u skladu sa konceptom "zelene jetre". Naime, metabolizam ksenobiotika u biljkama upoređuje se sa onim koji se odvija u jetri sisara kroz tri faze: transformacija (faza I), konjugacija (faza II) i ekskrecija (faza III), s tom razlikom da kod biljaka ne postoji mehanizam potpuno analogan fazi eliminacije kod sisara. Praktično, organski zagađivači koji prođu u biljnu ćeliju, bivaju podvrgnuti transformacijama enzimatskog tipa, pri kojima poprimaju forme koje su manje toksične [4, 6, 20, 21].

Funkcionalizacija je proces iz faze I, u kome molekul hidrofobnog organskog ksenobiotika stiče hidrofilnu funkcionalnu grupu zbog čega se poboljšavaju polaritet i odgovarajuća reaktivnost toksičnog molekula. Zbog uvođenja funkcionalne grupe poboljšani su polaritet i odgovarajuća reaktivnost toksičnog molekula. Ovo dalje dovodi do povećanog afiniteta enzima za njih, katalizujući dalju transformaciju. **Konjugacija** se sastoji u hemijskom vezivanju metabolita zagađivača za endogene supstance ćelija. Iako je konjugacija rasprostranjen odbrambeni mehanizam u višim biljkama, formiranje konjugata zadržava osnovnu molekularnu strukturu zagađivača, pa samim tim rezultira samo parcijalnim i privremenim smanjenjem njegove toksičnosti. Nažalost, povećan iznos duboke degradacije u regularne metabolite ćelije, ili u ugljendioksid i vodu (potpuna mineralizacija), moguć je jedino u slučaju linearne, ili nisko molekularne strukture kontaminanata. Proces **kompartmentalizacije** predstavlja konačno uklanjanje toksičnih delova iz metaboličkih tkiva u tačno definisanim pregradama u biljnoj ćeliji (vakuole, ili ćelijski zid) [4, 6, 21, 22].

Kako PAHs jedinjenja imaju izrazito složenu molekularnu građu, njihova potpuna degradacija do CO₂ i H₂O u samoj biljci, nažalost nije moguća, što su dosadašnja istraživanja i potvrdila [4]. Ova činjenica, kao i nizak nivo akumulacije u biljnim tkivima, mogli bi da učine biljke nedovoljno podesnim za fitoremedijaciju dizajniranu na klasičan način: apsorpcija korenom → translokacija u nadzemne delove → žetva → odlaganje, spaljivanje.

Međutim, eksperimenti brojnih istraživača su pokazali da mnoge biljne vrste, pre svega iz porodica trava (Poaceae) i leguminoza (Fabaceae), imaju sposobnost da uklone ove opasne kontaminante iz podloge u značajnom stepenu. Pokazalo se da glavnu ulogu u fitoremedijaciji PAHs igraju procesi rizoremedijacije, jer degradacija primarno postoji u oblasti rizosfere gde visoke koncentracije mikrobnih populacija koriste PAHs kao ugljenične supstrate za rast i razvoj, što sve rezultuje razaranjem i eventualno, potpunom mineralizacijom kontaminanata. Ovaj proces uobičajeno je poboljšan izlučivanjem ekskudata korenja (šećeri, alkoholi, kiseline, enzimi) i ugradnjom organskog ugljenika u podlogu (slika 2) [4, 6, 20, 21, 23, 24]. Rizodegradacijom se, dodatno, izbegavaju faze remedijacije kao što su žetva i odlaganje, ili uništavanje kontaminiranog biljnog materijala.



Slika 2 - Sinergističko delovanje biljaka i mikroorganizama u zoni rizosfere (adaptirano iz Reichenauer i Germida, 2008 [4])

SOM – soil organic matter

Saznanja o procesima koji se odvijaju unutar prirodnih močvara, a pre svega upravo o složenim interakcijama na relaciji mikroorganizmi/biljka/podloga, dovela su do razvoja novog, specijalno dizajniranog vida rizoremedijacije/fitoremedijacije PAHs koji je poznat kao remedijacija u modelovanim (projektovanim) akvatičnim sistemima. Ovi sistemi su u literaturi još poznati kao projektovani sistemi mokrih polja, ili kao veštačke, konstruisane močvare (constructed wetlands, CW). U odnosu na prirodne močvare, veštački sistemi omogućavaju ne samo veći stepen kontrole, već i izbor vegetacije, medijuma, a svakako i izbor lokacije, veličine, kontrolu proticanja vode i vremena zadržavanja [11].

REMEDIJACIJA U KONSTRUISANIM MOČVARAMAMA

Pojam modelovani, ili projektovani sistemi mokrih polja, u modernom smislu, potiče iz 60-tih godina prošlog veka, kada je Kathie Seidel prvi put izvela niz eksperimenata koristeći više vodene biljke za prečišćavanje otpadnih voda. Seidel je pokušala da poboljša kvalitet tretmana otpadnih voda iz domaćinstava u Nemačkoj, tako što je na plitke nasipe zasejala biljku *Phragmites australis*. Radi

poboljšanja efikasnosti tretmana, propuštala je otpadnu vodu kroz zemlju pomešanu sa peskom. Ovakav sistem nazvala je: "hidrobotanički metod". Njen sistem za prečišćavanje vode imao je dva toka kretanja vode: vertikalni i horizontalni, što predstavlja preteču modernim sistemima [11].

Remedijacija u konstruisanim (modelovanim) močvarama se danas uspešno koristi ne samo za tretman otpadnih voda iz domaćinstava, već i rudnika, industrije i poljoprivrede, ali i za tretman plitkih kontaminiranih akvifera različitog tipa, pa je njena primena poznata i pod nazivima kao što su: *Wastewater Gardens* – vrtovi otpadnih voda, ili *Living Machines* – žive mašine. Sistem je uvek projektovan tako da olakša prirodni proces čišćenja otpadnih voda, ili obnove jezera, reka i močvara [9]. Zajednički imenitelj ovih oštećenih ekosistema je da u njima vladaju uslovi nedovoljnog prisustva kiseonika, koji pak je neophodan za ostvarivanje što efikasnije bioremedijacije organskih zagađivača.

PROCESI KOJI SE ODVIJAJU U MODELOVANIM SISTEMIMA MOKRIH POLJA

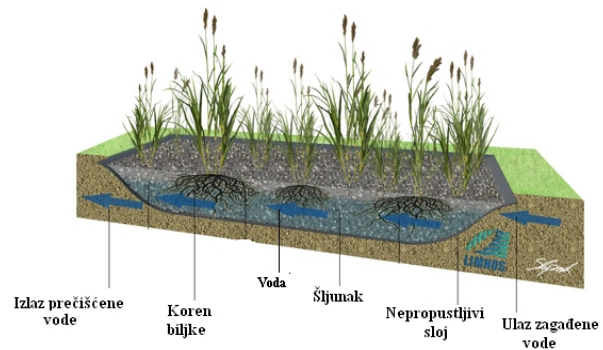
Procesi koji se odvijaju u modelovanim sistemima mokrih polja mogu se podeliti na:

- fizičke procese – filtracija, taloženje, adsorpcija i agregacija,
- hemijske procese - oksidacija, UV zračenje, izloženost biljnim izlučevinama, ili toksinima mikroorganizama i
- biološke procese – odnosi predacije od strane nematoda, protozoa i zooplanktona, razgradnja od strane bakterija i virusa, kao i prirodni procesi uginuća.

Danas se smatra da su procesi koji se odvijaju na relaciji biljka/rizosferni mikroorganizmi/podloga, oni koji su odgovorni za degradaciju organskih zagađivača, pri čemu se smatra da je formirana zajednica mikroorganizama, zaslužna za razgradnju i do 90% prisutnog zagađenja. Preostalo zagađenje razlaže se podstredstvom biljaka, u procesima metaboličkih biotransformacija, tako da je odabir odgovarajuće biljne vrste izuzetno značajan faktor prilikom planiranja dizajna odgovarajuće veštačke močvare [11]. Efikasnost detoksikacije, ili remedijacije u funkciji biljaka u ovim sistemima zavisi od: geohemije sedimenta, fizičko-hemijskih karakteristika vode, fiziologije biljke, genotipa biljke i prirode zagađivača, odnosno polutanta. *Može se konstatovati da je jedino dobrim poznavanjem međusobnih uticaja mikroorganizama i biljaka, koji vladaju i u prirodi, moguće uticati na poboljšanje kvaliteta vodnih i zemljišnih resursa favorizovanjem upravo tih interakcija* [9].

Svaki veštački močvarni sistem se zato uobičajeno pravi tako da se sastoji iz bazena (korita, ćelije) na čije dno se postavlja nepropusna folija (PVC), medijuma (od peska, šljunka, preko usitnjenog kamenja, prirodnih glina, do kompostirane

organske materije), vode koja se tretira i zajednice odgovarajućih biljaka (slika 3). Bazeni mogu biti povezani i u nizove, tj. serije.



Slika 3 - Presek pojedinačne ćelije konstruisane močvare sa slobodnom vodenom površinom [25]

Medijum koji se koristi za popunjavanje korita ima više funkcija: služi kao osnova za pričvršćivanje biljaka korenovim sistemom, zatim kao stanište mikroorganizama, deluje kao filtracioni medijum koji zadržava suspendovane čestice i doprinosi ravnomernom protoku. Na ulazu i na izlazu iz korita sa biljkama koje ograničava veštačko mokro polje, obično se nalaze barijere od krupnog kamenja, sintetičkih materijala, ili gline, čija je uloga da se obezbedi ravnomerna raspodela toka vode ("inflow" zona), odnosno one deluju kao kolektor pomoću kojih se obezbeđuje ujednačen nivo vode u samom koritu ("outflow" zona). Zavisno od uslova terena, ograničenje treba da sačuva tretiranu vodu od izlivanja van baze, ili da prevenira ulazak okolnih voda u sistem, kako ne bi došlo do razblaženja vode koju treba tretirati [26].

Biljke u modelovanim akvatičnim sistemima takođe služe kao fizičke prepreke koje pomažu da se spreči "kanalisani tok", tj. stanje koje postoji kada su tekuće vode skoncentrisane unutar ulaza i izlaza koji se nalaze na kratkom rastojanju, odnosno, one služe da rasporede tok vode kroz celo mokro polje, radi efikasnijeg tretmana. Biljke povećavaju vreme zadržavanja vode, što poboljšava sedimentaciju čestica i kontaminanata koji su na njih vezani. Ono što je najvažnije, vegetacija pruža stanište, odnosno, osnovu na kojoj mogu da egzistiraju mikroorganizmi koji su glavni razlagači organske materije. Po završenoj remedijaciji biljke mogu lako da se uklone, što se smatra jeftinijom alternativom mnogim tretmanima *ex situ*. Sa druge strane, postoji određeni rizik da bi životinje i insekti koji se hrane ovim biljkama mogle ponovo da uvedu ove toksikante u lance ishrane. To bi takođe moglo da obeshrabri korporacije koje razmišljaju o uvođenju čistijih tehnologija. Ipak, kako ovi tretmani ne zahtevaju stalni nadzor, ili skupe hemijske reakcije, njihova primena je i dalje ekološki krajnje prihvatljiva [10].

Sama podloga (sediment/medijum) sa svojim karakteristikama (hemijski sastav i fizički parametri kao što su: efektivna veličina pora, distribucija veličina pora, veličina unutrašnjosti pora i koeficijent permeabilnosti) značajno utiče na ukupan sistem ovog biotretmana. Fizički parametri ukazuju na hidraulično stanje podloge i imaju veliki uticaj na protok zagađene vode u konstruisanim močvarama, a u konačnom, na uklanjanje kontaminanata [11].

Praktično, može se reći da se procesi prečišćavanja najvećim delom odvijaju prilikom prolaska efluenta kroz medijum/podlogu konstruisanog sistema i kroz rizosferu. Suspendovane materije se tom prilikom, ili prirodno talože (sistemi sa površinskim tokom), ili se filtriraju kroz podlogu (sistemi sa potpovršinskim tokom) [11].

Dostupnost kiseonika u podlozi/medijumu projektovanih mokrih polja uslovljena je pre svega vodnim režimom, odnosno dinamikom plavljenja i dreniranja. Kod medijuma koji se dobro drenira, pore se ispunjavaju vazduhom čime se olakšava difuzija kiseonika u dublje slojeve i kroz prisutnu vodu. Kako voda gravitaciono prodire u dublje slojeve, tako se pore ponovo pune vazduhom. Međutim, kada se pore u potpunosti napune vodom, difuzija kiseonika dalje postaje znatno otežana. Kiseonik koji je ostao zarobljen u porama troši se na disanje korenja i mikroorganizama, kao i na hemijsku oksidaciju jedinjenja, što u krajnjem pak vodi njegovom deficitu. Veličina zrna podloge je iz ovih razloga veoma važna.

Snabdevanje projektovanih mokrih polja kiseonikom ostvaruje se i uz asistenciju biljaka. Naime, vodene biljke koje se koriste u ovim sistemima, sprovode kiseonik iz vazduha i preko svog korenja oslobađaju ga u okolnu sredinu, stvarajući na taj način povoljne uslove za rast mikroba, u krajnjem efektu - za bolju biodegradaciju [10]. Osim toga, rast korena utiče i na fizički, pre svega, hidraulični kvalitet podloge. Sa jedne strane, korenje i mikrobna biomasa mogu da "zapuše" pore podloge, dok sa druge strane, porast korena i mikrobna degradacija mrtvih delova korena uzrokuju stvaranje novih sekundarnih pora u podlozi [11].

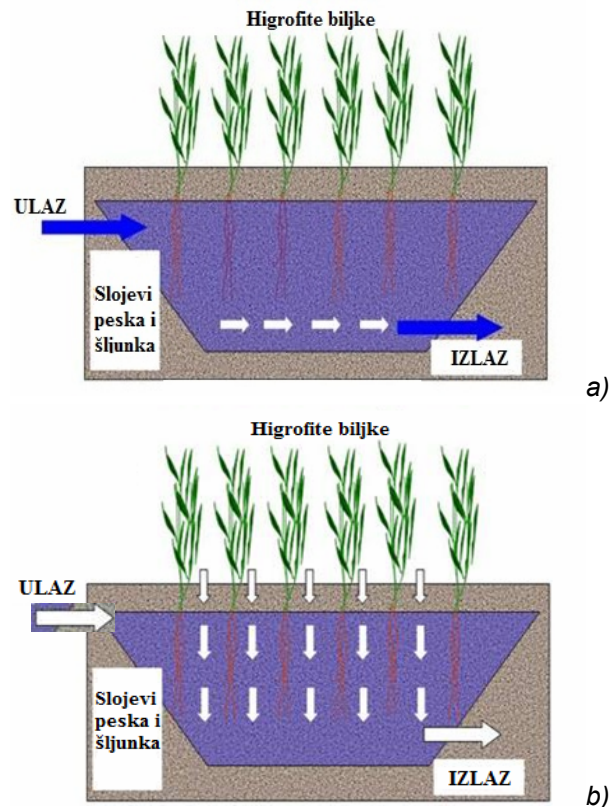
Osnovni tipovi ćelija modelovanih močvarnih sistema

U modelovanju močvarnih sistema mogu se upotrebiti tri tipa ćelija i to:

- ćelije sa slobodnom vodenom površinom (*free water surface*, FWS), sa nivoom kontaminirane vode iznad površine podloge (slika 3.),
- ćelije sa potpovršinskim protokom (*sub-surface flow*, SSF), sa nivoom kontaminirane vode ispod površine podloge (slika 4) i
- hibridne ćelije koje imaju i površinski i potpovršinski protok/strujanje.

Upotreba hibridnih ćelija koje kombinuju efekte FWS i SSF je danas česta, mada postoje i brojni primeri kombinacija predtretmana koji se odigrava-

ju u ćelijama bez zasađenih biljaka i tretmana u ćelijama sa biljkama.



Slika 4 - Ćelija sa potpovršinskim tokom: horizontalnim, a) i vertikalnim, b) [27]

Biljne vrste u modelovanim močvarnim sistemima

Biljke su specifično organizovani živi sistemi, koji poseduju jedinstvene ekobiološke karakteristike:

- više biljke su istovremeno u kontaktu sa zemljištem, vodom i vazduhom,
- dobro razvijen korenov sistem viših biljaka određuje interakciju podloga/biljka/mikroorganizam, što predstavlja jedinstven proces, koji značajno utiče na ukupni biljni metabolizam,
- velika asimilaciona površina biljnih listova (adaksial i abaksial) dozvoljava apsorpciju velike količine kontaminanata iz okolne sredine preko kutikule i stoma,
- jedinstveni unutrašnji transportni sistem u oba pravca, koji distribuira sva prodrta jedinjenja kroz celu biljku,
- autonomna sinteza organskih supstanci od vitalnog značaja,
- postojanje enzima univerzalno za sve biljne vrste, koji katalizuju oksidaciju, redukciju, hidrolizu, konjugaciju i druge reakcije višestepenih detoksikacionih procesa,
- veliki intracelularni prostor za odlaganje zagađivača i
- funkcionalizacija i dalja transformacija organskih zagađivača u biljnim ćelijama.

Dobro je poznato je da PAH-ovi, iako toksični kada su prisutni u visokim koncentracijama u okruženju, mogu da posluže biljkama kao izvor ugljenika i energije za njihov metabolizam i rast [28], te zato, biljke koje bi trebalo primeniti u modelovanim sistemima mokrih polja moraju da poseduju izvesne specifične karakteristike: da podnose visoke koncentracije PAHs, ali i soli (halofite biljke), da imaju dobar nivo rasta, kako podzemne tako i nadzemne biomase i da imaju visok nivo usvajanja nutritijenata. U ovom smislu, kao najuspešnijim rešenjima, pokazale su se više vodene biljke (higrofiti).

Biljke koje su najčešće u upotrebi u modelovanim akvatičnim sistemima su različite vrste ševara (*Typha sp.*), šaševa (*Scirpus sp.*) i trske (*Phragmites sp.*), koje sve pripadaju familiji trava (*Poaceae*). Sve ove visoke trave prirodno rastu u busenovima, po vlažnim i vodenim staništima umerenih i tropskih predela, gde pokazuju veliku moć preživljavanja u okruženju koje ne obiluje kiseonikom. Ove biljke su adaptirane na anoksične uslove u rizosferi na taj način što su razvile sposobnost da svoj korenov sistem snabdejavu kiseonikom iz atmosfere. Transport gasova iz nadzemnih delova ovih biljaka, kroz rizom, do najfinijih korenovih dlačica, omogućen je specifičnim delovima tkiva poznatim kao aerenhim. Zavisno od stepena adaptiranosti, ove komore za transport gasova mogu da zauzmu i do 60% od ukupne zapremine biljnog tkiva [11].

PILOT-POSTROJENJA MODELOVANIH MOČVARNIH SISTEMA ZA UKLANJANJE POLIcikličNIH AROMATIČNIH UGLJOVODONIKA

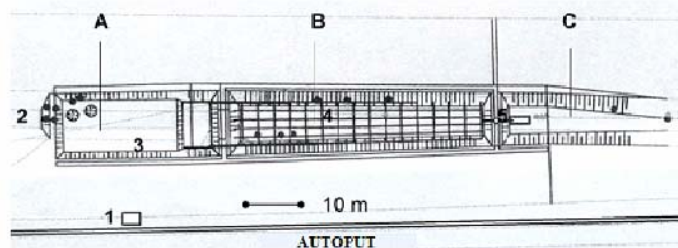
U cilju detekcije najefikasnije biljke za remedijaciju PAHs u modelovanim sistemima mokrih polja, autoi u [26] su ispitivali osetljivost različitih vrsta močvarnih biljaka na uticaj ovih opasnih kontaminanata. U svom eksperimentu koristili su staklenike u kojima su gajili vrste: *Baumea juncea*, *Baumea articulata*, *Schoenoplectus validus* i *Juncus subsecundus* i to i u zemljištu i u hidroponičnom sistemima [26]. Biljke su bile tretirane različitim koncentracijama PAH-ova. Za hidroponične kulture korišćen je naftalen, dok su biljke koje su rasle u zemljištu bile tretirane miksturom fenantrena i pirena (lipofilniji od naftalena).

Biomasa *S. validus* u hidroponičnoj kulturi je bila značajno porasla sa bilo kojom količinom dodatog naftalena, dok je biomasa *B. articulata* porasla značajno jedino sa relativno malom količinom dodatog naftalena. U hidroponičnim i zemljišnim uslovima, porast *B. juncea* je rastao dodavanjem PAHs, dok se rast *J. subsecundus* smanjivao u tretmanima sa relativno visokim koncentracijama fenantrena i pirena. Uklanjanje PAH-ova iz zemljišta nije bilo značajno kod *J. subsecundus* posle 70 dana rasta i kod *B. juncea* posle 150 dana. Porast *J. subsecundus* bio je blago uslovljen

ostacima PAHs u zemljištu. Rezultati eksperimenta su pokazali da bi uticaj PAHs na porast biljaka mogao da bude specifično uslovljen vrstom PAHs kao i medijumom/podlogom.

Zhang i sar. su ispitivali i toksično dejstvo miksture zagađivača na močvarnu biljku *Juncus subsecundus* [28]. U ovom eksperimentu, mešavina zagađivača se sastojala od PAH-ova i Cd. Primećeno je da interakcija između organskih i neorganskih zagađivača može značajno uticati na razvoj močvarnih biljaka, pa time i na uklanjanje samih zagađivača. Izloženost močvarnih biljaka visokim koncentracijama PAH-ova prouzrokuje inhibiciju rasta biljaka, dok izloženost niskim koncentracijama čak može stimulisati njihov rast. Koncentracija naftalena od 30 mg/L na primer, nije imala štetno dejstvo na rast močvarnih biljaka *Carex gracilis* i *Juncus effusus* iz jednog prethodnog eksperimenta. Međutim, autori [28] su pokazali da osetljivost biljaka na PAH-ove može biti povećana ukoliko je biljka bila izložena mešavini zagađivača PAH-ovi/metal. Rezultati eksperimenta pokazali su da je interakcija u mešavini zagađivača znatno uticala na rast i biomasu izabrane biljke. Primećeno je da je mešavina: niska koncentracija Cd sa niskom koncentracijom PAH-ova smanjila toksičnost Cd po razvoj biljke. Samim tim poboljšao se rast i povećala akumulacija Cd u biljnom tkivu, što je u konačnom olakšalo uklanjanje Cd iz podloge. Razlaganje PAH-ova u zemljištu (fenantrena i pirena), bilo je značajno uslovljeno interakcijama između PAHs, Cd i prisustvom, ili odsustvom biljaka. Ukupan broj mikroorganizama u zemljištu je bio znatno povećan prilikom dodavanja PAHs, što je očigledno pokazalo da su ovi molekuli poslužili kao dobar izvor ugljenika za njihov rast i razvoj. Uklanjanje fenantrena u različitim uslovima eksperimenta bilo je: 87-90%, dok je uklanjanje pirena bilo značajno manje: 11-70%. Uklanjanje fenantrena bilo je značajno uslovljeno dodavanjem Cd i PAHs, kao i prisustvom biljaka, dok je uklanjanje pirena bilo uslovljeno samo dodavanjem PAHs. Procenat uklanjanja fenantrena i pirena bio je značajno veći u tretmanima sa niskim sadržajem PAHs, nego u onim sa visokim sadržajima PAHs. Uklanjanje fenantrena opadalo je sa dodatkom Cd, što je bilo očiglednije u tretmanima bez vegetacije.

Ispitivanja otpadnih voda ispranih sa autoputeva [29], pokazala su da PAH-ovi nemaju štetno dejstvo na rast *Phragmites australis* [29]. Uz korišćenje ove biljke, oni su dizajnirali veštačku močvaru sa potpovršinskim vertikalnim tokom u blizini jednog od najprometnijih autoputeva u Holandiji (slika 5.) i u toku perioda od 20 meseci pratili procenat uklanjanja PAHs jedinjenja: antracen, fenantren, fluoranten, hrizen, benzo(a)antracen, benzo(k)fluorantren, benzo(a)piren i benzo(g,h,i)perilen.



Slika 5 - Konstrukcija sistema za prečišćavanje otpadnih voda sa auto-puta u eksperimentu Trompove i sar. (2012) [29]: A-Sabirnik voda ispranih sa auto-puta; B-Čelija sa vertikalnim potpovršinskim tokom; C-Izlivni bazen; 1-Lokalitet; 2-Mesto za zadržavanje krupnih predmeta; 3-Cev za uzorkovanje influenta; 4-Perforirane cevi u čeliji sa potpovršinskim tokom; 5-Cev za uzorkovanje efluenta

Konstrukcija se sastojala od tri bazena, među kojima je prvi predstavljao sabirnik voda ispranih sa auto-puta (A) i bio najveće površine: 228 m² (od kojih je 40 m² zauzimala podloga od šljunka) i zapremine: 79 m³. Iz ovog bazena, voda sa preostalim kontaminantima je bila usmerena na sledeći bazen u nizu (B), koji je praktično predstavljao čeliju sa vertikalnim potpovršinskim tokom i to slobodnim padom u dve perforirane cevi, koje su se nalazile na vrhu bazena ukupne površine 250 m². Ovaj bazen bio je obložen plastikom preko koje je bio nanešen sloj peskovito/šljunkovite podloge u kojoj su se pak razvijale biljke *P. australis*. Podloga je bila debljine 90 cm i sastojala se od sloja šljunka debljine 20 cm u kojem su bile smeštene perforirane "inflow" cevi, sloja peska od 40 cm u kojem je bila

ukorenjena trska, zatim sloja šljunka od 20 cm sa 4 paralelne odlivne cevi i na vrhu se nalazio sloj peska debljine samo 10 cm. Prečišćena voda odvođena je u treći bazen, izlivnik (C) površine 41 m² u kome se proveravala koncentracija zagađivača i konačno, ispuštala u podzemne vode.

Koncentracije PAH-ova (srednje vrednosti) koje su bile izmerene u efluentu (izlazna, prerađena voda) bile su značajno niže nego u uzorcima ulazne vode u sabirniku, kao i u uzorcima influenta (tabela 1). Najveći procenat uklanjanja (94%) bio je zabeležen u slučajevima benzo(a)pirena, benzo(a)antracena i fluorantena (tabela 2), a biljka *Phragmites australis* je izgledala zdravo, bez ikakvih znakova bilo kakvog oštećenja svojih tkiva, ili fiziologije.

Tabela 1 - Srednje vrednosti koncentracija PAHs u eksperimentu Trompove i sar. (2012) [29]

Jedinjenje	Voda u sabirniku	Influent	Efluent
	Prosečna vrednost (µg/L)		
Antracen	0.021 ± 0.02	0.003 ± 0.002	0.0009 ± 0.0013
Fenantren	0.20 ± 0.22	0.08 ± 0.12	0.02 ± 0.06
Fluoranten	0.78 ± 0.95	0.06 ± 0.07	0.004 ± 0.012
Benzo(a)antracen	0.19 ± 0.2	0.02 ± 0.02	0.0013 ± 0.0014
Hrizen	0.44 ± 0.51	0.05 ± 0.04	0.006 ± 0.010
Benzo(k)fluorantren	0.12 ± 0.12	0.02 ± 0.01	0.0017 ± 0.0015
Benzo(a)piren	0.25 ± 0.23	0.03 ± 0.02	0.0018 ± 0.0024
Benzo(g,h,i)perilen	0.36 ± 0.34	0.06 ± 0.05	0.008 ± 0.009

Tabela 2 - Procenat uklanjanja PAH-ova u eksperimentu Trompove i sar. (2012) [29]

Jedinjenje	% uklanjanja
Antracen	70
Fenantren	69
Fluoranten	94
Benzo(a)antracen	94
Hrizen	88
Benzo(k)fluorantren	91
Benzo(a)piren	94
Benzo(g,h,i)perilen	87

Fountoulakis i sar. (2009) su ispitivali efikasnost uklanjanja policikličnih aromatičnih ugljovodo-

nika iz gradskih otpadnih voda Herakliona (Krit, Grčka) u pilot postrojenju modelovanih močvara [30]. Sistem je bio dizajniran tako da se sastojao od kombinacije močvare sa slobodnom vodenom površinom (FWS, 42 m²), močvare sa podpovršinskim protokom (SSF, 45 m²) i posebnim filterom od šljunka (5 m²) postavljenih u nizu. Šljunak je takođe bio medijum/podloga u SSF močvarama, dok je medijum u FWS bio kombinacija sloja zemlje i sloja šljunka. U močvarama su bile zasađene dve vrste trske: *Phragmites australis* i *Arundo donax*. Prosečna koncentracija 16 PAH-ova u influentu (ulaznoj vodi) iznosila je 786±514 ng/L (tabela 3). Ustanovljeno je da su močvare sa potpovršinskim protokom pokazale najbolje uklanjanje kontaminanata, jer je bila zabeležena prosečna vrednost

uklanjanja PAH-ova od 79.2%, 68.2% i 73.3% za ćelije sa potpovršinskim protokom, za ćelije sa slobodnom vodenom površinom i za filter od šljun-

ka, respektivno. Takođe je bilo zaključeno da je apsorpcija na čvrstom medijumu bila glavni mehanizam u uklanjanju zagađivača.

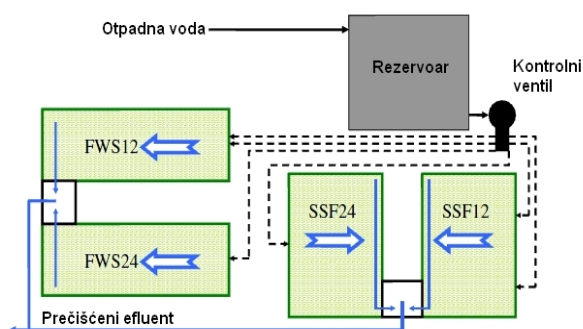
Tabela 3 - Koncentracija $\Sigma 16$ PAHs i procenat uklanjanja različitim tipovima močvara u eksperimentu Fountoulakisa i sar. (2009) [30]

Parametar	Influent	Efluent					
		FWS*		SSF**		GF***	
			% uklanjanja		% uklanjanja		% uklanjanja
$\Sigma 16$ PAHs ng/L)	786 \pm 514	250 \pm 211	68.2	164 \pm 175	79.2	210 \pm 165	73.3

*FWS - močvara sa slobodnom vodenom površinom, **SSF - močvara sa potpovršinskim tokom,

***GF - filter od šljunka

Uklanjanje PAH-ova su takođe ispitivali autori [31] u modelovanim močvarama sa *Arundo donax* i *Phragmites australis* [31]. Postrojenja koja su se sastojala od dve FWS i dve SSF ćelije (slika 6), postavili su pored auto-puta na 24 km od Herakli-ona (Krit, Grčka).



Slika 6 - Raspored močvarnih ćelija u sistemu za prečišćavanje otpadnih voda sa auto-puta u eksperimentu Terzakisa i sar. (2008) [31]

U močvarama je zasađeno ukupno 40 biljaka *Arundo donax* i *Phragmites australis*, raspoređenih podjednako po ćelijama. Močvare su navodnjavane otpadnim vodama sa autoputa koje su bile distribuirane sistemom cevi.

Koncentracija $\Sigma 16$ PAH u influentu iznosila je u proseku 12.01 $\mu\text{g/L}$, dok je $\Sigma 6$ PAHs (fluoranten, benzo(a)piren, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(g,h,i)perilen i indeno(1,2,3-c,d)piren) iznosila 0.51 $\mu\text{g/L}$. Srednje vrednosti uklonjenih $\Sigma 6$ PAHs u toku vremenskog perioda od godinu dana, ukazale su na relativno ujednačenu efikasnost u radu FWS i SSF ćelija (tabela 4). U odnosu na $\Sigma 16$ PAHs, SSF ćelije su pokazale bolju efikasnost. Nakon tretmana otpadnih voda u modelovanim močvarama, posle dve godine ispitivanja, pokazala se efikasnost uklanjanja od 59% za $\Sigma 16$ PAH.

Atoru [31] su u influentu i močvarnim ćelijama uočili dominantnu prisutnost jedinjenja sa nižom molekulskom masom: fenantren 48% i antracen 32%. Fluoranten, piren i hrizen su takođe bili prisutni u značajnim količinama. Ovih pet jedinjenja činilo je 95% od ukupne količine PAH-ova.

Rezultati ovog istraživanja još jednom su potvrdili da SSF ćelije imaju bolje performanse za uklanjanje hidrofobnih molekula PAHs (vezani na čestice, niska koncentracija organske materije), kao i da se uklanjanje ovih molekula ipak pre svega odvijalo fizičkim procesima, kroz filtraciju i sedimentaciju, dok su biološki procesi bili od manjeg značaja.

Tabela 4 - Srednje vrednosti parametara u eksperimentu Terzakisa i sar. (2008) [31]

Parametar	septembar 2006-avgust 2007							
	Tip močvare							
	SSF12*		SSF24**		FWS12***		FWS24****	
	$\mu\text{g/L}$	%	$\mu\text{g/L}$	%	$\mu\text{g/L}$	%	$\mu\text{g/L}$	%
PAH $\Sigma 6$	0.27	47	0.19	63	0.25	51	0.22	57
PAH $\Sigma 16$	4.91	59	3.54	71	6.13	49	5.10	58

*SSF12 - ćelije sa potpovršinskim tokom, vreme zadržavanja 12h, **SSF24 - ćelije sa potpovršinskim tokom, vreme zadržavanja 24h, ***FWS12 - ćelije sa slobodnom vodenom površinom, vreme zadržavanja 12h, **** FWS24 - ćelije sa slobodnom vodenom po vršinom, vreme zadržavanja 24h

ZAKLJUČAK

Fitoremedijacija je bioremedijacijska tehnologija koja koristi biljke za uklanjanje, prenos, stabilizaciju, ili uništavanje zagađivača u životnoj sredini. Za sredinu zagađenu policikličnim aromatičnim ugljovodonicima, mehanizmi fitoremedijacije mogu obuhvatiti: fitoekstrakciju, fitodegradaciju, fitostabili-

zaciju, poboljšanu rizosfernu biodegradaciju (rizodegradaciju) i u manjoj meri, hidrauličnu kontrolu i fitovolatilizaciju.

Činjenica da vegetacija zadržava i transformiše PAHs kroz procese razmene vazduh/podloga, favorizuje primenu metoda fitoremedijacije, iako potpuna degradacija ovih složenih organskih molekula

u samoj biljci nije moguća. Glavnu ulogu u fitoremedijaciji PAHs igraju procesi rizoremedijacije, jer degradacija primarno postoji u oblasti rizosfere gde visoke koncentracije mikrobnih populacija koriste PAHs kao ugljenične supstrate za rast i razvoj, što sve rezultuje razaranjem i eventualno, potpunom mineralizacijom kontaminanata. Ovaj proces uobičajeno je poboljšan izlučivanjem ekskudata korenja i ugradnjom organskog ugljenika u podlogu.

Saznanja o procesima koji se odvijaju unutar prirodnih močvara, pre svega sinergističke interakcije: mikroorganizmi/higrofitna biljka/podloga, iskorišćena su za razvoj novog, specijalnog vida rizoremedijacije/fitoremedijacije koji je poznat kao remedijacija u modelovanim (projektovanim) akvatičnim sistemima (projektovani sistemi mokrih polja, ili veštačke, konstruisane močvare), a koji se pokazao veoma primenjivim i u slučaju PAHs. U odnosu na prirodne močvare, veštački sistemi omogućavaju ne samo veći stepen kontrole, već i izbor vegetacije, medijuma, a svakako i izbor lokacije, veličine, kontrolu proticanja vode i vremena zadržavanja.

Biljke koje su najčešće u upotrebi u ovako modelovanim akvatičnim sistemima su različite vrste iz familije trava (*Poaceae*): ševari (*Typha sp.*), šaševi (*Scirpus sp.*) i trske (*Phragmites sp.*). Ove trave prirodno rastu u busenovima, po vlažnim i vodenim staništima umerenih i tropskih predela, gde pokazuju veliku moć preživljavanja u okruženju koje ne obiluje kiseonikom. One su adaptirane na anoksične uslove na taj način što su razvile specifična tkiva kroz koja mogu da svoj korenov sistem, ali i rizosferno okruženje, snabdejavu kiseonikom iz atmosfere. Osim toga, njihovi fibrozni korenovi sistemi, pružaju stanište za razvoj prirodne zemljišne mikroflore, tako da se sve one veoma uspešno primenjuju u različito dizajniranim sistemima mokrih polja koji se mogu sastojati od različitih tipova ćelija.

Literaturni izvori pružaju podatke da su se ćelije sa potpovršinskim protokom koje omogućavaju vertikalno strujanje, pokazale najuspešnijim u mnogim konkretnim slučajevima PAH-zagađenja. Dizajn ovih ćelija naime, omogućava da se uklanjanje molekula PAHs odvija ne samo kroz interakcije biljka/rizosferni mikroorganizmi, već i kroz adsorpciju na česticama podloge. Pri tome, izgleda da je veličina zrna čestica od posebnog značaja. Generalno, može se reći da se najefikasnije smanjenje sadržaja ovih opasnih kontaminanata postiže upravo dobro osmišljenim, simultanim delovanjem fizičkih, hemijskih i bioloških procesa. Kako su se pilot projekti konstruisanih močvara pokazali i kao relativno jeftini za izgradnju i održavanje, uz to i ekološki krajnje prihvatljivim, to se u narednom periodu može očekivati učestalija primena ovog specijalnog vida uklanjanja PAH-zagađenja iz životne sredine.

Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Projekat br. 46010).

LITERATURA

- [1] Alagić Č.S., Riznić T.D., Maluckov S.B. (2012) *In situ* bioremediation technologies for PAH-contaminated soil/*In situ* bioremedijacijske tehnologije za zemljišta zagađena PAH-ovima. *Ecologica*, 19(67), 416-421
- [2] Alagić Č.S., Dimitrijević D.M., Kukić S. (2013): Tretmani termalnog pospešivanja ekstrakcije policikličnih aromatičnih ugljovodonika iz zemljišta/ Thermally enhanced extraction of PAHs from soil. *Tehnika*, 64(3), 433-438.
- [3] Haritash, A.K., Kaushik, C.P. (2009): Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. *J Hazard Mater*, 169, 1–15.
- [4] Reichenauer T.G and Germida J.J. (2008): Phytoremediation of Organic Contaminants in Soil and Groundwater. *ChemSusChem*, 1, 708–717.
- [5] Alagić Č.S., Šerbula S.S., Tošić B.S., Pavlović N.A., Petrović V.J. (2013): Bioaccumulation of Arsenic and Cadmium in Birch and Lime from the Bor Region. *Arch Environ Contamin Toxic*, DOI 10.1007/s00244-013-9948-7.
- [6] Alagić Č.S., Maluckov S.B., Riznić T.D. (2013): Phytoremediation as an environmental friendly method for POPs removal from contaminated soils/ Fitoremedijacija kao ekološki prihvatljiva metoda za uklanjanje POPs iz kontaminiranih zemljišta. *Ecologica*, 20(70) 275-279.
- [7] Macek T., Mackova M., Kas J. (2000): Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. *Biotechnol Adv*, 18, 23-34.
- [8] Maric M., Antonijević M., Alagic S. (2013): The investigation of the possibility for using some wild and cultivated plants as hyperaccumulators of heavy metals from contaminated soil. *Environ Sci Poll Res*, 20(2), 1181-1188.
- [9] Prasad, M.N.V. in: S.N. Singh, R.D. Tripathi (Eds), (2007) *Environmental Bioremediation Technologies*, Springer-Verlag, Berlin, 259-274. Dostupno na: http://rd.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-34793-4_11
- [10] Dimitrijević D.M., Alagić Č.S. (2012): Pasivni tretman kiselih rudničkih voda/Passive Treatment of Acid Mine Drainage. *Bakar*, 37(1), 57-68.
- [11] Stottmeister U., Wießner A., Kuschk P., Kappelmeier U., Kastner M., Bederski O., Muller R.A., Moormann H. (2003): Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 22, 93– 117.
- [12] Kanaly R.A. and Shigeaki H. (2000): Biodegradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria. *J Bacteriol*, 182(8), 2059-2067.
- [13] Venkata Mohan, S., Kisa, T., Ohkuma, T., Kanaly, A. R., Shimizu, Y. (2006): Bioremediation technologies for treatment of PAH-contaminated soil and strate-

- gies to enhance process efficiency. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 5, 347–374.
- [14] Beškoski V.P., Gojgić-Cvijović G.Đ., Milić J.S., Ilić M.S., Miletić S.B., Jovančićević B.S., Vrvic M.M. (2012): Bioremedijacija zemljišta kontaminiranog naftom i naftnim derivatima: mikroorganizmi, putanje razgradnje, tehnologije. *Hem Ind*, 66(2), 275–289.
- [15] Cunningham S.D. and Ow D.W. (1996): Promises and Prospects of Phytoremediation. *Plant Physiol*, 110, 715–719.
- [16] Schnoor J.L., Licht L.A., McCutcheon S.C., Wolfe N.L., Carreira L.H. (1995): Phytoremediation of Organic and Nutrient Contaminants. *Environ Sci Technol*, 29(7), 318A–323A.
- [17] Kipopoulou A.M., Manoli E., Samara C. (1999): Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area. *Environ Pollut*, 106, 369–380.
- [18] Sojinu O.S., Sonibare O.O., Ekundayo O., Zeng E.Y. (2010): Biomonitoring potentials of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by higher plants from an oil exploration site, Nigeria. *J Hazard Mater*, 184, 759–764.
- [19] Tao S., Jiao X.C., Chen S.H., Liu W.H., Coveney Jr R.M., Zhu L.Z., Luo Y.M. (2006): Accumulation and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in rice (*Oryza sativa*). *Environ Pollut*, 140, 406–415.
- [20] Campos V.M., Merino I., Casado R., Pacios L.F., Gómez L. (2008): Review. Phytoremediation of organic pollutants. *Spanish J Agric Res*, 6, 38–47.
- [21] Singh O.V. and Jain R.K. (2003): Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Appl Microbiol Biotechnol*, 63, 128–135.
- [22] Hengren L., Goonetilleke A., Ayoko G.A., Mostert M.M.M. (2010): Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater in Queensland, Australia. *Environ Pollut*, 158, 2848–2856.
- [23] Gianfreda L. and Rao M. A. (2004): Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: A review, *Enzyme Microb Technol*, 35, 339–354.
- [24] Chekol T. (2005): Remediation of Persistent Organic Pollutants (POPs) in Two Different Soils. *Remediation Winter 2005*, DOI: 10.1002/rem.20074, 117–139.
- [25] http://www.limnos.si/eng/rastlinske_cistilne_naprave.php
- [26] Zhang Z., Rengel Z., Meney K. (2010): Polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) differentially influence growth of various emergent wetland species. *J Hazard Mater*, 182, 689–695.
- [27] http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/biodiversity/sahyadri_ews/newsletter/issue25/article2.htm
- [28] Zhang Z., Rengela Z., Meney K., Pantelic Lj., Tomanovic R. (2011): Polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) mediate cadmium toxicity to an emergent wetland species. *J Hazard Mater*, 189, 119–126.
- [29] Tromp K., Lima A.T., Barendregt A, Verhoeven J.T.A. (2012): Retention of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from road water in a constructed wetland and the effect of de-icing. *J Hazard Mater*, 203–204, 290–298.
- [30] Fountoulakis M.S, Terzakis S., Kalogerakis N., Manios T. (2009): Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and linear alkylbenzene sulfonates from domestic wastewater in pilot constructed wetlands and a gravel filter. *Ecol Eng*, 35, 1702–1709.
- [31] Terzakis S., Fountoulakis M., Georgaki I., Albantakis D., Sabathianakis I., Karathanasis A.D., Kalogerakis N., Manios T. (2008): Constructed wetlands treating highway runoff in the central Mediterranean region. *Chemosphere* 72, 141–149.

ABSTRACT

REMOVING OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS BY CONSTRUCTED WETLANDS

Constructed wetlands are a natural alternative to conventional methods of treatment of contaminated water and soil, which are based on complex processes involving plants, microorganisms, soil matrix and pollutants. It is well known that these synergistic interactions contribute significantly to the removing of inorganic contaminants from the environment. An understanding how plants, microorganisms, the soil bed and pollutant, interact with each other at the contaminated place, is still rather incomplete, especially in the case of organic contaminants. However, some small scale process modeling experiments, which currently have been developed for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removing, show that the active reaction zone of constructed wetlands is the root zone (or rhizosphere). There are numerous different technological variants in terms of design of constructed wetlands, peripheral equipment, etc., but usually, they are mainly distinguishable by the type of the soil bed and applied plant. The most suitable system can be adapted to specific waste problems and local conditions.

Ključne reči: PAHs, constructed wetlands, bioremediation, phytoremediation.

Scientific paper

Received for Publication: 02. 10. 2013.

Accepted for Publication: 18. 12. 2013.