

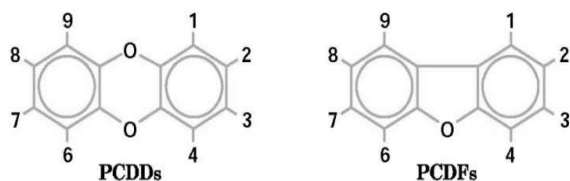
## Dioksini u zemljištu - izvori zagađenja i raspodela

Maja Đolić<sup>1</sup>, Tatjana Vasiljević<sup>2</sup>,  
Ljiljana Janković-Mandić<sup>1</sup>, Antonije Onjia<sup>1</sup>

Originalni naučni rad  
UDC:504.53.052

### UVOD

Polihlorovani dibenzo-p-dioksini (PCDD<sub>S</sub>) i polihlorovani dibenzo-furani (PCDF<sub>S</sub>) su široko rasprostranjeni ekološki polutanti koji zajedno čine grupu organskih jedinjenja koja se obično naziva dioksini (PCDD/DF<sub>S</sub>) [1]. Oni su nepolarni, lipofilni, postojani u životnoj sredini i lako se akumuliraju u lancu ishrane, čime direktno predstavljaju opasnost po zdravlje ljudi. PCDD<sub>S</sub> i PCDF<sub>S</sub> predstavljaju nenamerne industrijske nusprodukte [2] i spadaju u najtoksičnije supstance. Sastoje se od dva benzenova prstena koji su povezani preko kiseonikovih atoma. Atomi vodonika mogu biti supstituisani atomima hlora na osam različitih mesta u molekulu (slika 1). Na ovaj način, razlikuje se ukupno 210 jedinjenja, od čega se 17 smatra toksičnim – oni sa sva četiri supstituisana atoma hlora na pozicijama 2,3,7,8. Što je veći broj Cl atoma u ortopoložaju – 1,4,6,9 (slika 1), toksičnost kongenera se smanjuje. Najpoznatiji predstavnik dioksina je 2,3,7,8-tetrahlorodibenzo-p-dioksin (2,3,7,8-TCDD) [3]. Uprkos sličnosti u strukturalnoj formuli, različite polihlorovane grupe kongenera pokazuju određene fizičko-hemijske osobenosti u pogledu postojanosti, transporta i raspodele u spoljašnjoj sredini.



Slika 1 - Strukturne formule polihlorovanih dibenzo-p-dioksina (PCDD<sub>S</sub>) i polihlorovanih dibenzo-furana (PCDF<sub>S</sub>)

### Faktor toksične ekvivalencije

Uzimajući u obzir da se dioksini uvek nalaze u smeši brojnih kongenera i dioksin sličnih (eng. *dioxin like*) polihlorovanih bifenila (PCB<sub>S</sub>), veoma je

teško izračunati njihovu toksičnost. Teorijski, poznato je 75, 135 i 209 mogućih kongenera PCDD<sub>S</sub>, PCDF<sub>S</sub> i PCB<sub>S</sub>, respektivno [3]. Faktor toksične ekvivalencije (eng. *toxicity equivalence factor*, TEF) koristi se u proceni rizika pri određivanju relativne toksičnosti među specifičnim hemikalijama ili njihovim smešama. Vrednost TEF faktora za 2,3,7,8-TCDD je 1, što ukazuje na najveću toksičnost. Svi drugi TEF se izražavaju u odnosu na ovu referentnu vrednost i pokazuju relativnu toksičnost svih ostalih jedinjenja iz ove klase [4].

Toksični potencijal smeše, TEQ je zbir proizvoda TEF-a svake pojedinačne komponente i njene koncentracije. Ova vrednost je poznata i kao toksični ekvivalent smeše (eng. *International Toxic Equivalent*, I-TEQ<sub>PCDD/DF<sub>S</sub></sub>), odnosno ukupna toksičnost dioksina u mešavini kongenera [5]. Oznaka Svetske zdravstvene organizacije WHO TEQ, podrazumeva da su u smešu uključeni i PCB<sub>S</sub> i taj koncept je danas univerzalno prihvaćen.

TEQ se računa po sledećoj formuli:

$$TEQ = \sum(PCDDi \times TEFi) + \sum(PCDFi \times TEFi) + \sum(PCBi \times TEFi), \quad (1)$$

gde je: PCDDi, PCDFi i PCBi – koncentracija pojedinačnih kongenera u uzorku, a TEFi – njihove odgovarajuće TEF vrednosti.

### 1. IZVORI ZAGAĐENJA

Dioksini nastaju u različitim industrijskim procesima. a glavni izvori emisije dioksina su: insineratori otpada, energetska postrojenja i sistemi za grejanje (sagorevanje uglja i drveta), korišćenje dizel goriva proizvodnja papira, pesticida, čelika i drugih metala [6, 7]. Prirodni izvori dioksina su šumski požari i vulkanska aktivnost. Uglavnom se formiraju i oslobađaju u toku procesa sagorevanja u vidu produkata nepotpunog sagorevanja (eng. *products of uncomplete combustion*, PIC). Sve češće se povezuju sa komunalnim čvrstim otpadom, medicinskim otpadom i industrijskim insineratorima, koji predstavljaju najveće izvore emisije [8].

Adrese autora: <sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, <sup>2</sup>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

*Insineratori otpada*

Spaljivanje je važan metod za eliminaciju biomedicinskog i medicinskog otpada, kao i smanjenje ukupne zapremine i mase otpada. Ovaj proces se odvija na visokim temperaturama (od 850°C do 1100°C), smanjuje se sadržaj organskih materija i uništavaju se bakterije i virusi. Nažalost, spaljivanje nije čist proces. Usled prisustva hlora u otpadnoj plastici i papiru, oslobađaju se kiseli gasovi, toksični metali, kao i PCDD/DF<sub>S</sub> [9]. Količina dioksina nastalih tokom procesa spaljivanja otpada zavisi od temperature, koncentracije O<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>, i naročito od sadržaja hlora u otpadu. Temperature od 200°C do 400°C favorizuju nastanak PCDD/DF<sub>S</sub>, dok temperature preko 800°C uništavaju PCDD/DF<sub>S</sub> [8]. Shibamoto i saradnici [10] pokazali su da isti uzorci otpada spaljivani na različitim temperaturama imaju različite TEQ vrednosti; niske temperature indukuju više TEQ vrednosti nego više temperature. Glavni izvor dioksina još uvek su bolničke spalionice, pri čemu je polivinilhlorid (PVC) plastika dominantan izvor organski vezanog hlora u medicinskom otpadu. U 2001. godini, emisija PCDD/DF<sub>S</sub> iz bolničkih spalionica otpada u Evropskoj Uniji procenjena je na 200-400g I-TEQ godišnje, čineći oko 25% od ukupne emisije [6].

Dioksini se u Evropskoj regulativi svrstavaju u listu supstanci koje podležu odredbama za upravljanje otpadom [11]. Prema Evropskoj direktivi 2000/76/EC, trenutno granična vrednost emisije (u vazduh) iznosi 0,1 ng/m<sup>3</sup> TEQ PCDD/DF<sub>S</sub> [12]. U tabeli 2. dat je pregled Međunarodnih konvencija vezanih za kontrolu emisije perzistentnih organskih zagađujućih materija (eng. *persistent organic pollutants*, POP<sub>S</sub>), u koje spadaju PCDD<sub>S</sub> i PCDF<sub>S</sub>.

POP<sub>S</sub> kao vrlo toksične supstance se mogu naći svuda u svetu. Pored toga što su postojane, obično su lipofilne (dakle, bioakumulativne), poliusparljive i otrovne. Neki POP<sub>S</sub> su proizvedeni namerno u industriji za širok spektar upotrebe (tj. pesticidi; PCB<sub>S</sub>; polihlorovani naftaleni, PCN<sub>S</sub>). Drugi su formirani slučajno (industrijske nesreće) ili kao nusproizvod raznih aktivnosti, kao što su industrijski procesi ili sagorevanje (tj. PCDD/DF<sub>S</sub>; policiklični aromatični ugljovodonici, PAH<sub>S</sub>) [13].

*Industrijske aktivnosti*

Drugi izvori dioksina podrazumevanju emisije iz energetskih postrojenja na čvrsta (prvenstveno uglj i drvo) ili tečna goriva (dizel), kao i sagorevanje dioksin sličnih polihlorovanih bifenila. Ukupna globalna emisija PCDD/DF<sub>S</sub> uzrokovanih sagorevanjem drveta za grejanje stambenih objekata procenjena je na 945 g I-TEQ na godišnjem nivou [14]. Dioksini prisutni u otpadnim vodama potiču iz proizvodnje papira gde se koristi hlor ili hemikalije koje sadrže hlor u procesima izbeljivanja. Otpadni mate-

rijal u proizvodnji celuloze u Kini uzrokovao je emisiju dioksina koncentracije od 300 pg/l I-TEQ [15]. Metalurški procesi, kao što su proizvodnja čelika pod visokom temperaturom, operacije livenja i prevlačenja metala predstavljaju tipične izvore dioksina. U Velikoj Britaniji se iz industrije prerade gvožđa i čelika emituje oko 38 g I-TEQ godišnje [16]. Insineratori otpada i navedeni industrijski procesi čine oko 85% od ukupne emisije; preostala količina dioksina oslobađa se u nekontrolisanim procesima sagorevanja.

Tabela 2 - Međunarodne konvencije za kontrolu emisije POP<sub>S</sub>

Stokholmska konvencija o POPs (2001) (Aneks C)	UNECE konvencija o LRTAR (1979) - POPs protokol (1998) (Aneks I)	EU POPs Uredba 850/04 (2004) (Aneks I)
Polihlorovani dibenzo-para-dioksini (PCDD <sub>S</sub> )	Polihlorovani dibenzo-para-Dioksini (PCDD <sub>S</sub> )	Polihlorovani dibenzo-para-dioksini (PCDD <sub>S</sub> )
Polihlorovani dibenzo furani (PCDF <sub>S</sub> )	Polihlorovani dibenzo furani (PCDF <sub>S</sub> )	Polihlorovani dibenzo furani (PCDF <sub>S</sub> )
Heksahlorobenzen (HCB)	Heksahlorobenzen (HCB)	Heksahlorobenzen (HCB)
Polihlorovani bifenili (PCB <sub>S</sub> )	Polihlorovani bifenili (PCB <sub>S</sub> )	Polihlorovani bifenili (PCB <sub>S</sub> )
	Policiklični aromatični ugljovodonici (PAH <sub>S</sub> )	Policiklični aromatični ugljovodonici (PAH <sub>S</sub> )

## 2. DIOKSINI U ZEMLJIŠTU

Problemi koji se javljaju u životnoj sredini uzrokovani šumskim požarima, vulkanskim akcidentima, ispuštanjem nafte, curenjem hemikalija iz propustljivih kontejnera, industrijskim udesima i neadekvatnim odlaganjem otpada, postaju sve češći razlog za zabrinutost. Ovi, u literaturi zabeleženi, 'rezervoar' (eng. *reservoir*) procesi [5], uglavnom doprinose kontaminaciji zemljišta i postaju sekundarni izvori emisije dioksina [17].

U zemljištu, dioksini podležu procesima adsorpcije, difuzije i isparavanja. Zbog svoje lipofilnosti većina dioksina u tlu je adsorbovana za organsku materiju i na taj način ostaju imobilisani na površini tla. Moguća je i njihova difuzija u dublje slojeve tla, a isto tako i isparavanje sa površine [18]. Što je veći sadržaj organske materije, dioksini sporije difunduju, odnosno ostaju na površini i njihova koncentracija se smanjuje sa dubinom tla [19]. Snižavanjem temperature, smanjuje se isparavanje dioksina sa površine. Dioksini su hemijski vrlo stabilni (naročito tetra i više hlorovani kongeneri), ali podležu fotohemijskoj razgradnji pri čemu nastaju

niže hlorovani kongeneri. Dejstvom sunčeve svetlosti, na prelazu iz čvrste u gasovitu fazu, dolazi do otpuštanja atoma hlora na pozicijama 1, 4, 6, 9 i stvaranja toksičnijih kongenera [20]. U manjoj meri dioksini u tlu podležu i mikrobiološkoj razgradnji. Brzina razgradnje je sporija kod više hlorovanih kongenera, ali na brzinu utiču i položaj supstituisanih hlorovih atoma, kao i agregatno stanje [18]. Tlo i sediment, zbog prirodno visokog sadržaja organskih materija, lako mogu akumulirati dioksine i na taj način postati sekundarni izvori njihove emisije.

### 3. RASPODELA U ŽIVOTNOJ SREDINI

Mobilnost pojedinačnih kongenera u životnoj sredini zavisi od njihovih fizičko-hemijskih svojstava što su isparljivost, rastvorljivost u vodi i lipofilnost. U čistoj formi, dioksini su bezbojne čvrste supstance ili kristali, sa visokim temperaturama ključanja i niskim naponima para (lako isparljivi). Manje hlorovani kongeneri se bolje rastvaraju u vodi nego više hlorovani kongeneri koji su lipofilniji. Te razlike utiču na raspodelu dioksina u različitim delovima okoline [18].

Dioksini dobijeni procesom sagorevanja najpre dospevaju u vazduh, gde su vezani za suspendovane čestice, poput čestica čađi. Male čestice mogu biti transportovane na velike udaljenosti od izvora emisije. Dioksini iz vazduha se uklanjaju suvom ili mokrom depozicijom ili se razgrađuju putem fotodegradacije. PCDD/DF<sub>S</sub> prisutni u zemljištu, prenose se kroz medijume na 3 načina: difunduju dublje u zemljište, resuspenduju nazad u vazduh ili putem erozije dospevaju u vodene tokove [20]. Kako se ne rastvaraju u vodi, većina njih se u vodenoj sredini vezuje za neki materijal sa većim organskim sadržajem, poput planktona koji predstavlja hranu većim životinjama. Ovo je način na koji ulaze u lanac ishrane. Na svakom koraku u lancu ishrane se akumuliraju i ovaj proces se naziva *biomagnifikacija* [21]. Zabeležene koncentracije PCDD/DF<sub>S</sub> u ribi često su veće od onih u akvatičnom sistemu, što sugeriše na sposobnost bioakumulacije [22]. Manji deo dioksina, koji se ne vezuje za organsku materiju, trajno se taloži u vodenom sedimentu.

Pregled novijih radova iz područja analize dioksina u uzorcima tla i sedimenta ukazuje da se kompletna karakterizacija TEQ vrednosti može postići jedino ukoliko merenje obuhvata ne samo PCDD/DF<sub>S</sub>, već i dioksin slične PCB<sub>S</sub> [13]. Generalno, siguran nivo PCDD/DF<sub>S</sub> u sedimentu kreće se oko 20 pg TEQ/g (suve materije), dok je u neposrednom okruženju (*'background area'*) ta *'pozadinska'* vrednost <0.1 pg TEQ/g [23]. Procentualno, udeo PCB<sub>S</sub> u određivanju ukupne toksičnosti može biti značajan, ali je uvek manji od PCDD/DF<sub>S</sub>.

### 4. PREVENCIJA I REMEDIJACIJA

Zhu i koautori [24] su istakli da unapređenje tehnologije direktno utiče na sadržaj dioksina u ekosistemu. Novija tehnološka rešenja, prvenstveno korišćenje filtera, uticali su na smanjenje ukupne emisije dioksina [25]. Keramički filteri podnose visoke temperature i omogućavaju kontinualno uklanjanje čestica iz vazduha i drugih gasova. Primenom katalitičkih filtera, dioksini prolaze kroz membranu i reaguju trenutno sa katalizatorom, dajući za produkte CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and HCl [5]. Piroliza, proces sagorevanja koji se odvija bez prisustva kiseonika, na temperaturi višoj 700°C uzrokuje 99% uništenja svih polihlorovanih bifenila, PCB<sub>S</sub> i dioksina. Ipak, ovo je skupa tehnologija i u praksi se retko koristi.

### ZAKLJUČAK

Dioksini ispoljavaju značajan rizik po ceo ekosistem. Poslednjih godina sve više pažnje je usmereno usavršavanju postupaka remedijacije u različitim ekološkim medijumima. Tone zemljišta i sedimenta u svetu izložene su dioksinima i zato je neophodan odgovarajući metod remedijacije. Najčešće korišćeni postupci su: radiolitička destrukcija - gama zračenjem, dehalogenacija - alkalnim metalima ili njihovim karbonatima, bikarbonatima i hidrosidima, termalna desorpcija, hemijsko-mehanička destrukcija (korišćenjem CaO) i dr. Rad i sredstva koja se ulažu u kontrolu perzistentnih supstanci imaju dodatnu ulogu jer se, zahvaljuju ovome, ubrzano razvija globalni sistem za kontrolu i upravljanje opasnim supstancama i otpadom.

### Zahvalnica

*Ovaj rad je finansiran od strane Ministarstva obrazovanja, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, projekat III 43009.*

### LITERATURA

- [1] Wagrowski DM, Hites RA, Environ. Sci. Technol. 34 (2000) 2952–2958.
- [2] Fiedler H, Chemosphere 32 (1996) 55–64.
- [3] USEPA, 2003a. Framework for Application of the Toxicity Equivalence Methodology for Polychlorinated Dioxins, Furans and Biphenyls in Ecological Risk Assessment. US EPA, Washington, DC, 630/P-03/002A.
- [4] Van den Berg M, Birnbaum LS, Denison M, De Vito M, Farland W, Feeley M, Fiedler H, Hakansson H, Hanberg A, Haws L, Rose M, Safe S, Schrenk D, Tohyama C, Tritscher A, Tuomisto J, Tysklind M, Walker N, Peterson RE, Toxicol. Sci. 93 (2006) 223–241.
- [5] Kulkarni P, Crespo J, Afonso C, Environ. Int. 34 (2008) 139-153.
- [6] Mininni G, Sbrilli A, Braguglia C.M, Guerriero E, Marani D, Rotatori M, Atmos. Environ. 41 (2007) 8527-8536.

- [7] Choi KI, Lee SH, Lee DH, Atmos. Environ. 42 (2008) 940–948.
- [8] McKay G, Chem. Eng. J. 86 (2002) 343-368.
- [9] Fiedler H, Chemosphere 67 (2007), 96-108
- [10] Shibamoto T, Yasuhara A, Katami T, Rev. Environ. Contam. Toxicol. 190 (2007) 1-41.
- [11] EU Pops Regulation Guidance, www.environment.agency.gov.uk
- [12] Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste.
- [13] Eljarrat E, Barcelo D, Trends. 22 (2003) 655-665.
- [14] Lavric ED, Konnov AA, De Ruyck J, Biomass and Bioenergy 26 (2004) 115-145.
- [15] Zheng MH, Bao ZC, Zhang B, Xu XB, Chemosphere 44 (2001) 1335–37.
- [16] Anderson DR, Fisher R, Chemosphere 46 (2002) 371–81.
- [17] Hoekstra EJ, De Weerd H, De Lee EWB, Brinkman UAT, Environ. Sci. Technol. 33 (1999) 2543–2549.
- [18] Kožul D, Herceg Romanić S, Arh. Hig. Rada. Toksikol. 60 (2009) 243-257.
- [19] Mai TA, Doan TV, Tarradellas J, de Alencastro LF, Grandjean D, Chemosphere 67 (2007) 1802-07.
- [20] Tysklind M, Fangmark I, Marklund S, Lindskog A, Thaning L, Rappe C, Environ. Sci. Technol. 127 (1993) 2190–97.
- [21] Beek, B. (2000) "Bioaccumulation: New Aspects and Developments." In Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 2: Reactions and Processes, Part J, edited by Otto Hutzinger. New York: Springer-Verlag.
- [22] Jimenez B, Hernandez LM, Gonzalez MJ, Eljarrat E, Rivera J and Fossi MC, Environ. Sci. Technol. 32 (1998) 3853-3861.
- [23] Evers EHG, Laane RWPM, Groeneveld GJJ, Olie K, Organohalogen. Compd. 28 (1996) 117.
- [24] Zhu J, Hirai Y, Saka S, Zheng M, Chemosphere 73 (2008) 72-77.
- [25] Inoue K, Yasuda K, Kawamoto K, Waste Manag. Res. 27 (2009) 617-622.

## IZVOD

### DIOKSINI U ZEMLJIŠTU - IZVORI ZAGAĐENJA I RASPODELA

*Pod terminom dioksini obično se podrazumeva grupa polihlorovanih organskih jedinjenja, koja sadrži 75 kongenera dibenzo-p-dioksina (PCDD<sub>s</sub>) i 135 kongenera dibenzo-furana (PCDF<sub>s</sub>). Svrstavaju se među najopasnije ekološke polutante današnjice, uzrokovane antropogenom aktivnošću. Nastaju u različitim industrijskim procesima, a glavni izvori emisije dioksina su: insineratori otpada, energetska postrojenja i sistemi za grejanje, proizvodnja papira, čelika i drugih metala. Nakon emisije PCDD/DF<sub>s</sub> se ne zadržavaju se u jednom medijumu, već se prenose i transformišu. Mobilnost ovih toksičnih jedinjenja direktno predstavlja rizik po životnu sredinu i zdravlje ljudi.*

*Cilj ovog rada je da se analiziraju potencijalni izvori zagađenja i prikaže raspodela dioksina u različitim medijumima okoline, sa posebnim osvrtom na zemljište. U zemljištu, dioksini su izloženi procesima adsorpcije, difuzije i isparavanja. Zbog svoje lipofilnosti, dioksini su adsorbovani za organsku materiju i na taj način imobilisani na površini tla. Što je veći sadržaj organske materije u tlu - difuzija je sporija, a koncentracija dioksina najveća na površini. Dioksini su hemijski vrlo stabilni i podležu pretežno fotohemijskoj i, u manjoj meri, mikrobiološkoj razgradnji. Zbog niske biodegradabilnosti, ubrajaju se u zagađujuće organske supstance koje nazivamo postojanim (eng. persistent organic pollutants, POPs).*

**ključne reči:** dioksini, zemljište

## ABSTRACT

### DIOXINS IN SOIL – SOURCES OF POLLUTION AND DISTRIBUTION

*The term dioxins is commonly use to refer to group of polychlorinated organic compounds, that includes 75 congeners of dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and 135 congeners of dibenzo-furans (PCDFs). They are classified as the most dangerous environmental pollutants of today, caused by anthropogenic activity. They occur in various industrial processes, and the main sources of dioxins are waste incinerators, power plants and heating systems, production of paper, steel and other metals. Once emitted PCDD/DF<sub>s</sub> do not stay in one medium, but are transferred and transformed. The mobility of these toxic compounds directly represents a risk to the environment and human health.*

*The aim of this paper is to analyze the potential sources of pollution and to display the distribution of dioxins in different environmental media, with special emphasis on soil. In soil, dioxins are exposed to the processes of adsorption, diffusion and evaporation. Because of their lipophilicity, dioxins are adsorbed to organic matter and thus immobilized on the surface of the soil. The higher content of organic matter in soil – the diffusion is slower, and the highest concentration of dioxins at the surface. Dioxins are chemically very stable and are subject mainly to photochemical and, to a lesser extent, microbiological degradation. Due to the low biodegradability, they are included in polluting organic substances called persistent (persistent organic pollutants, POPs).*

**Key words:** dioxins, soil

## Fitoremedijacija kao ekološki prihvatljiva metoda za uklanjanje POPs iz kontaminiranih zemljišta

Sladana Č. Alagić, Biljana S. Maluckov,  
Dejan T. Riznić

Originalni naučni rad  
UDC:504.53.052

### FITOREMEDIJACIJA KAO BIOLOŠKA METODA REMEDIJACIJE

Podaci koji svedoče o alarmantnim koncentracijama POPs (Persistent Organic Pollutants) u okruženju, prouzrokovali su ubrzan rad u cilju smanjenja njihovih sadržaja na prihvatljive nivoe, ili čak potpunog uklanjanja iz zemljišta koje se smatra glavnim kolektorom ovih zagađivača. Posebna pažnja stručne javnosti posvećena je poboljšanju postojećih, kao i iznaženju potpuno novih tehnika remedijacije. Biološki procesi, poznati i kao procesi bioremedijacije, dobijaju sve više na značaju, jer spadaju u takozvane "environmental friendly" tehnike koje su ekonomski isplative, a kojima se zagađujuće supstance biološkim putem transformišu u manje toksična jedinjenja, ili se čak potpuno mineralizuju, ukoliko su u pitanju organski zagađivači. Tehnike *in situ* primene su naročito pogodne za ove svrhe, pri čemu se bioremedijacija različitim sojevima mikroorganizama pokazala kao najefikasnija [1-5]. Međutim, često je veoma teško stvoriti dovoljno mikrobne populacije u prirodnom zemljištu koje bi imale značajan POPs-degradirajući kapacitet.

Upotreba viših biljaka u procesima bioremedijacije mogla bi značajno da pomogne, jer akcija biljaka može da uključi adsorpciju, akumulaciju, degradaciju i ekskreciju jedinjenja zagađivača, ili unapređenje aktivnosti mikroorganizama u oblasti rizične sfere. Koja će se biljna aktivnost odvijati zavisice ne samo od medija i tipa biljke koji se koriste za remedijaciju, već i od fizičkih i hemijskih osobina kontaminanta. Dva različita jedinjenja u istom mediju mogu da interaguju sa biljkom na različite načine [6]. U slučaju zemljišta, kretanje organskog kontaminanta zavisi od rastvorljivosti u vodi, pritiska pare, veličine molekula i naelektrisanja, kao i prisustva drugih organskih supstanci u zemljištu. Opšte je prihvaćena činjenica da je najvažnija zemljišna komponenta za vezivanje hidrofobnih organskih jedinjenja upravo organski matriks zemljišta (Soil Organic Matter, SOM). Sorpcija hidrofobnih organskih jedinjenja karakteriše se brzom adsorpcijom na spoljašnju površinu zemljišne čes

tice i kasnije, polaganom difuzijom u njenu unutrašnjost, koja je inače manje pristupačna [7]. Sa dužim odstajavanjem u podlozi, tj. sa povećanjem vremena kontakta između kontaminanta i čestica zemljišta, olakšavaju se procesi sekvestracije molekula organskog zagađivača, posebno hidrofobnih supstanci kao što su PAHs, u mikropore zemljišta i povećava rekalcitracija, što je poznato kao proces "starenja". Krajnji rezultat procesa starenja je translociranje jedinjenja iz dostupnih delova zemljišta u manje, ili potpuno nedostupne delove, što prouzrokuje njegovu smanjenu ekstraktabilnost, tj. biodostupnost [8].

### FITOEKSTRAKCIJA/FITOAKUMULACIJA

Termin fitoekstrakcije/fitoakumulacije odnosi se na upotrebu biljaka koje mogu da akumuliraju kontaminante radi njihovog uklanjanja iz zemljišta koncentrujućih ih u svojim nadzemnim delovima koji kasnije mogu da se žanju. Posle žetve, nadzemni delovi se obično odlažu na bezbedne lokacije, ili spaljuju, u postupku inicijacije. Nakon inicijacije, takođe je neophodno pažljivo odlaganje ostataka radi dekontaminacije, ili iskorišćenja kontaminanata [9].

Direktno usvajanje organskih supstanci od strane biljaka iznenađujuće je efikasan mehanizam za uklanjanje organskih hemikalija u plitko kontaminiranim mestima. Glavno mesto usvajanja organskih hemikalija, paralelno sa vodom i nutritijentima iz zemljišta, je korenov sistem. Međutim, usvajanje zagađivača može se odvijati ne samo kroz korenov sistem već i kroz lisno tkivo. Da bi prodro u list, organski zagađivač treba da prođe kroz otvore stoma, ili prolaze u epidermisu, koji je prekriven filmom voska kutikule [10].

Za razliku od teških metala koji se aktivno usvajaju biljnom ćelijom pomoću molekula transportera (kao rezultat sličnosti sa molekulima nutrijentata), za organske molekule ne postoje takvi specifični transporteri, te se zato ovi molekuli usvajaju pasivno.

Sposobnost biljaka za usvajanje, akumulaciju i translokaciju određenog kontaminanta, kao odgovor na njegov visok sadržaj u zemljištu je različita i određuje njihovu pogodnost za upotrebu u postupku fitoremedijacije [11, 12]. U uslovima visoke zagađenosti zemljišta, neke biljne vrste mogu biti oz-

Adresa autora: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet, Bor, VJ 19