Baština Akademije nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine

Zemljište kao faktor razvoja poljoprivrede i zaštite životne sredine u Bosni i Hercegovini: Zemljište

Čustović, Hamid; Ljuša, Melisa; Beus, Vladimir

2026

https://bastina.anubih.ba/handle/123456789/866

Preuzeto s Baštine Akademije nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine

https://bastina.anubih.ba/

DOI: 10.5644/PI2026.223.10

ZAGAĐENOST TLA I MOGUĆNOSTI BIOREMEDIJACIJE

Anesa Ahatović-Hajro[1], Mujo Hasanović[1], Kasim Bajrović[1], Adaleta Durmić-Pašić[1]
[1]*Univerzitet u Sarajevu - Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju*
kasim.bajrovic@ingeb.ba

APSTRAKT

Industrijalizacija, urbanizacija i porast stanovništva u svijetu uzrokuju velik pritisak na životnu sredinu i okoliš. Načešći zagađivači okoliša su policiklični aromatski ugljikovodici, pesticidi, herbicidi, teški metali i metaloidi, te mikro/nano plastika koja je rastući problem. Zagađenje zemljišta je poseban problem jer nastale hemijske, fizičke i biološke promjene u tlu nepovoljno utiču na ekosistem, a posredno i na ljudsko zdravlje. Također, zemljište je često krajnji „filter“ za mnoge zagađujuće materije, koje se putem tla akumuliraju i mogu dospjeti u podzemne vode i prehrambeni lanac. Djelovanje polutanata u tlu može dovesti do smanjenja biodiverziteta, degradacije tla i gubitka plodnosti, što su dugoročni ekološki i ekonomski izazovi. Konvencionalne metode dekontaminacije, koje se najčešće koriste za uklanjanje polutanata iz zemljišta zahtijevaju visok stepen tehnološke opremljenosti, veliku potrošnju energije ali i primjenu hemijskih tvari koje uvode nove varijable u kompleksnom ekosistemu tla. Kao djelotvornije, ekonomski i ekološki održivo rješenje ističe se bioremedijacija, biotehnološki pristup dekontaminaciji zemljišta primjenom organizama koji stabiliziraju, akumuliraju ili transformišu polutante u manje toksične spojeve. Na podlogama kontaminiranim antropogenim djelovanjem ili čak prirodno opterećenim polutantima, mogu se pronaći organizmi koji su djelovanjem prirodne selekcije oblikovani za razgradnju ili akumulaciju pojedinih spojeva. Ovakvi organizmi imaju najveći potencijal za primjenu u bioremedijaciji. Molekularnobiološka istraživanja omogućavaju dešifriranje genetičke osnove metaboličkih procesa relevantnih za bioremedijacionu funkciju. U narednom koraku je moguće primijeniti metode genetičkog inženjerstva kako bi se bioremedicioni potencijal unaprijedio ili usmjerio u pravcu ciljanog polutanta. Budući da uspješnost bioremedijacije ovisi o brojnim faktorima poput temperature, pH, strukture i hemijskog sastava zemljišta, međusobnog odnosa bioloških aktera, istraživanja genetičke, biohemijske i fiziološke osnove metabolizma polutanata, biti će od ključne važnosti za realizaciju potencijala bioremedijacije kao procesa. Metodama bioremedijacije nastoji se održati prirodna ravnoteža ekosistema uz minimalan negativan utjecaj na životu sredinu. Ipak, u nastojanju da se unaprijedi efikasnost, prije svega je nužno voditi računa o sigurnosti.

Ključne riječi: zagađenje zemljišta, hemijske, fizičke i biološke promjene u tlu, ekosistem, prehrambeni lanac, biodiverziteta, degradacije tla

UVOD

Tlo je jedan od najvažnijih prirodnih resursa jer osigurava hranljive materije i fizičku potporu neophodnu za rast i razvoj biljaka. Međutim, tokom posljednjeg stoljeća njegov kvalitet je značajno narušen usljed intenzivnih ljudskih aktivnosti, kao što su industrijalizacija, intenzivna poljoprivreda, urbanizacija i krčenje šuma. Danas onečišćenje tla predstavlja jedan od najozbiljnijih ekoloških problema, budući da ugrožava poljoprivrednu proizvodnju, remeti prirodne procese u ekosistemu i negativno utječe na zdravlje ljudi (Sharma i Reddy, 2020). Najučestaliji zagađivači okoliša su policiklični aromatski ugljikovodici, pesticidi, herbicidi, teški metali i metaloidi te mikro- i nanoplastika, koja predstavlja rastući problem. Ovi polutanti predstavljaju ozbiljnu prijetnju okolišu jer se akumuliraju u tlu što dovodi do degradacije njegove strukture, smanjenja plodnosti i gubitka mikrobnog biodiverziteta (Raffa i Chiampo, 2021; Verma, 2022; Koushal i sar., 2025). Osim što ovi polutanti uzrokuju dugotrajne negativne posljedice po zdravlje ekosistema posredno djeluju i na zdravlje ljudi. Polutanti iz tla mogu biti adsorbirani na čestice tla, otjecanjem prodrijeti u dublje slojeve, dospjeti u podzemne vode te na taj način postati izvor sekundarnog onečišćenja vode i zraka (Da Silva i sar., 2020). Glavne posljedice onečišćenja tla ogledaju se u nekoliko ključnih područja.

- U poljoprivredi, zagađenje dovodi do smanjenja plodnosti tla i sposobnosti fiksacije azota, povećava eroziju tla i iscrpljuje hranjive materije te dovodi do smanjenja poljoprivredne proizvodnje.
- U okolišu, posljedice se očituju kroz smanjenu dostupnost ili nisku produktivnost zemljišta za usjeve namijenjene hrani i stočnoj hrani, kao i kroz promjene u sastavu tla i mikrobioti.
- U urbanom okruženju, onečišćenje tla izaziva probleme u gospodarenju otpadom i izaziva zabrinutost u pogledu javnog zdravstva, npr. kroz zagađenje pitke vode (Van Liedekerke, 2018; Da Silva i sar., 2020).

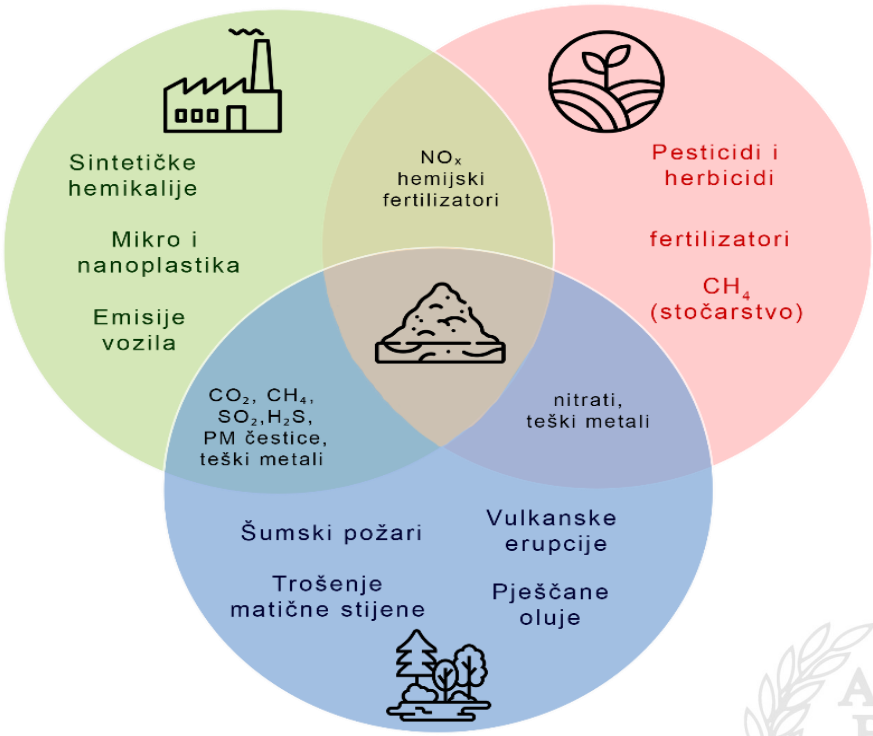
NAJČEŠĆI ZAGAĐIVAČI TLA

Najčešći zagađivači tla (Slika 1) mogu se podijeliti na organske i neorganske pri čemu svaka grupa ima specifična svojstva i načine djelovanja u životnoj sredini. Organski zagađivači odlikuju se visokom toksičnošću, postojanošću i sposobnošću bioakumulacije, dok neorganski zagađivači uključuju teške metale, nutrijente i soli koji mogu imati toksične efekte ili, u nižim koncentracijama, biti esencijalni za život. Među najčešćim organskim zagađivačima nalaze se organohlorni pesticidi, polihlorirani bifenili, ftalatni esteri, policiklični aromatski ugljikovodici, naftni ugljikovodici te perfluoroalkilne supstance. Organohlorni pesticidi su sintetički spojevi koji se široko koriste u poljoprivredi i hemijskoj industriji. Njihova visoka postojanost i topivost u lipidima omogućava dugotrajno zadržavanje u životnoj sredini. Mogu egzistirati u okolišu decenijama izazivajući hroničnu izloženost ljudi i životinja putem kontaminiranog tla (Wang i sar., 2009; Jayaraj i sar., 2016).

Polihlorirani bifenili su ranije korišteni u električnim uređajima, plastifikatorima i mazivima. Danas se prepoznaju kao izrazito toksične supstance, a u okolišu se zadržavaju dug vremenski period, prolazeći kroz procese isparavanja, razgradnje i bioakumulacije. Njihova sposobnost vezivanja za čestice tla doprinosi dugotrajnoj kontaminaciji i povećava rizik od akumulacije u prehrambenom lancu (Kumar i sar., 2014; Jing i sar., 2018). Ftalatni esteri koriste se u proizvodnji plastike, PVC materijala, boja, lakova i kozmetike. Tokom proizvodnje ili odlaganja proizvoda, ftalati se oslobađaju u okoliš i smatraju se prioritetnim zagađivačima zbog endokrinih i kancerogenih svojstava (Li i sar., 2018). Policiklični aromatski ugljikovodici nastaju nepotpunim sagorijevanjem organske materije, poput uglja, nafte i drveta, a njihovi izvori mogu biti prirodni ili antropogeni. Ovi spojevi su postojani, toksični i bioakumulativni (Abdel-Shafy i Mansour, 2016; Roy i sar., 2021). Naftni ugljikovodici kontaminiraju tlo, vodu i zrak usljed curenja iz rezervoara, nesreća tokom transporta ili prerade nafte. Njihovo prisustvo mijenja fizička i biohemijska svojstva tla, remeti ravnotežu hranjivih materija i može negativno utjecati na rast biljaka. Zbog niskog stepena razgradnje i mutagenih svojstava, remedijacija kontaminiranih područja zahtijeva poseban oprez (Besalatpour i sar., 2011). Perfluoroalkilne supstance (PFAS) koriste se zbog otpornosti na toplotu, vodu i ulja u protupožarnim pjenama, neljepljivom posuđu, ambalaži za brzu hranu i vodootpornim tkaninama. Poznati su po visokoj postojanosti, bioakumulativnosti i potencijalnoj toksičnosti (Navarro i sar., 2023; Santos i sar., 2025).

Neorganski zagađivači uključuju teške metale i soli koji se u tlu nalaze kao rastvoreni joni. Njihovo porijeklo može biti prirodno, npr., tla nastala na ultramafitnim (peridotitskim) stijenama, bogatim feromagnezijskim silikatima i podložnim hidrotermalnim transformacijama, odlikuju se visokim sadržajem Mg i Fe, niskim udjelom Ca i esencijalnih nutrijenata te visokim koncentracijama teških metala poput Ni, Cr i Co (Kazakou i sar., 2008).

Osim prirodnih izvora, savremeni procesi urbanizacije i industrijskog razvoja povećavaju njihove koncentracije u okolišu. Glavni antropogeni izvori uključuju rudarstvo, industrijske emisije, sagorijevanje fosilnih goriva, komunalni otpad i upotrebu mineralnih đubriva (Małachowska Jutsz i Gnida, 2015). Posebno su problematični teški metali poput Cd, Pb i Hg, koji nemaju biološku funkciju i izazivaju citotoksične i mutagene efekte. S druge strane, esencijalni elementi kao što su Fe, Zn i Cu važni su za metabolizam biljaka, ali u višim koncentracijama postaju fitotoksični. Bioraspoloživost teških metala u tlu u velikoj mjeri zavisi od njegovih fizičkih, hemijskih i mineraloških svojstava, koja određuju stepen dostupnosti ovih elemenata biljkama. Time se direktno utječe na njihovu apsorpciju i akumulaciju u biljnom tkivu. Dakle, bioraspoloživost teških metala uslovljena je tipom tla, njegovom reakcijom (pH), kao i vremenom berbe usjeva, što u konačnici određuje intenzitet njihovog prijenosa iz tla u biljni organizam (Lal, 2010).



Slika 1. Vizuelni prikaz izvora najčešćih polutanata u tlu

TEHNIKE REMEDIJACIJE ZAGAĐENOG TLA

Remedijacija tla predstavlja proces obnove zagađenih zemljišta u stanje sigurno za ljudsko zdravlje i okoliš. Izbor odgovarajuće metode zavisi od vrste i stepena kontaminacije, karakteristika lokacije, ciljeva remedijacije, efikasnosti tretmana i ekonomske isplativosti. U prošlosti su se uglavnom koristile klasične metode, poput spaljivanja, inertizacije, iskopavanja i odlaganja na deponije. Međutim, takvi pristupi često su skupi, zahtijevaju velike resurse i mogu dodatno degradirati okoliš. Tokom posljednjih decenija znanje o tehnikama remedijacije značajno je napredovalo, pa se savremeni pristupi temelje na procjeni rizika i primjeni različitih tretmana u stvarnim terenskim uslovima. U praksi se sve češće koriste kombinovane strategije, jer omogućavaju visoku efikasnost uklanjanja zagađivača, kraće trajanje procesa, umjerene troškove i minimalan negativan utjecaj na okoliš. Posebnu pažnju privlači bioremedijacija, koja koristi prirodne biološke procese za razgradnju ili transformaciju polutanata u manje štetne supstance i time predstavlja održivu i ekološki prihvatljivu alternativu (Song i sar., 2022; Santos i sar., 2025; Koushal i sar., 2025).

MEHANIČKE, FIZIČKE I HEMIJSKE METODE

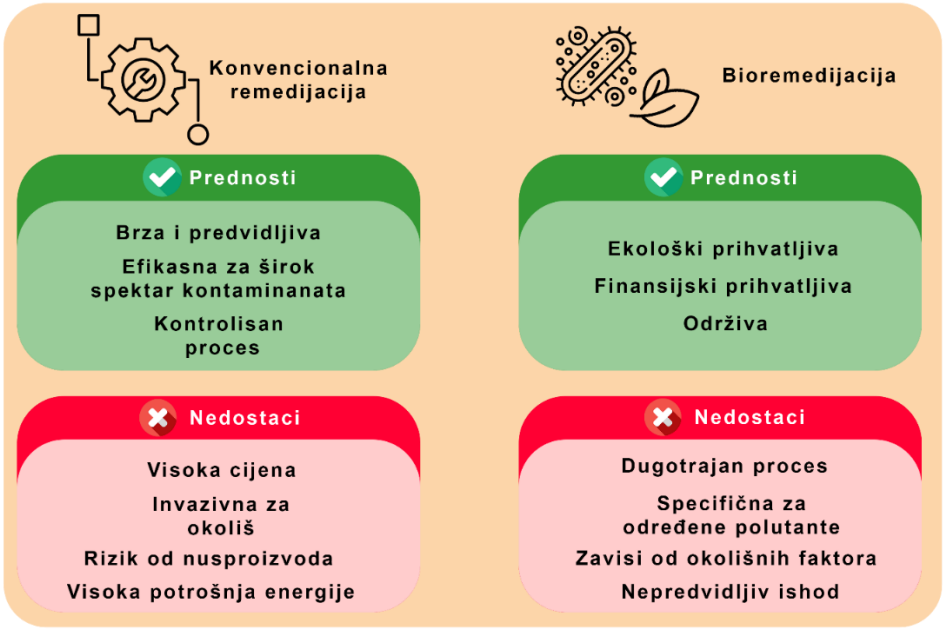
Mehaničke metode remedijacije obuhvataju fizičko uklanjanje, preraspodjelu ili modifikaciju zagađenog tla uz njegov transport na odlagalište ili u postrojenje za *ex situ* zbrinjavanje. Najčešće se primjenjuje na plitkim i lako dostupnim lokacijama. Iako su brze i pouzdane prisutnost infrastrukture ili stijena može ograničiti potpunu sanaciju. Budući da ne razgrađuju onečišćivače, mehanički postupci postižu najbolje rezultate u kombinaciji sa hemijskim, fizičkim ili biološkim metodama (Senevirathna i sar., 2021).

Fizičke metode sanacije karakteriše jednostavna oprema, laka primjena i ekonomičnost. One obuhvataju hidrodinamičke, toplotne, električne i elektromagnetne postupke. Ispiranje i filtracija tla provode se vodom ili rastvorima surfaktanata dok se toplinska obrada zasniva na zagrijavanju radi isparavanja ili uništenja kontaminanata. Elektrokinetička sanacija primjenjuje istosmjernu struju niskog intenziteta za uklanjanje teških metala i radionuklida, dok vitrifikacija zagrijava tlo do 1700°C, stvarajući staklasti materijal koji stabilizira zagađivače (Singh i sar., 2009). Ekstrakcija tla parom uklanja isparljive i poluisparljive organske kontaminante pomoću vakuma, a izdvojeni gasovi pročišćavaju se aktivnim ugljenom, termički ili biofiltracijom. Ova metoda zahtijeva mnogo energije te je učinkovita samo u propusnim, nezasićenim tlima (npr. pjeskovita ili šljunkovita tla) (Aparicio i sar., 2022).

Hemijske metode koriste reagense za neutralizaciju ili razgradnju onečišćivača *in situ* ili *ex situ*. Primjenjuju se organski rastvarači, kiseline i helirajući spojevi koji izdvajaju polutante iz tla. Posebno se ističe nanoremedijacija, koja primjenjuje nanomaterijale (metalni oksidi, ugljične i silikatne čestice) za imobilizaciju i razgradnju zagađivača. Iako vrlo efikasna, zahtijeva procjenu ekotoksičnosti zbog mogućih rizika za biljke (usvajanje i ulazak u lanac ishrane) okoliš (perzistencija u tlu) (Qian i sar., 2020; Santos i sar., 2025). Hemijske metode remedijacije mogu predstavljati rizik jer nepravilna primjena hemikalija može uzrokovati sekundarnu kontaminaciju tla i podzemnih voda te narušiti ekološku ravnotežu.

BIOREMEDIJACIJA

Bioremedijacija predstavlja ekološki prihvatljiv pristup koji koristi žive organizme – prvenstveno mikroorganizme i biljke – za razgradnju i detoksikaciju štetnih tvari iz okoliša. Ovi biološki sistemi omogućuju degradaciju, eliminaciju ili transformaciju polutanata u netoksične ili manje toksične oblike. Tokom procesa, polutanti se pretvaraju u bezopasne produkte poput ugljen-dioksida (CO_2), vode, mikrobne biomase i različitih metabolita. U okviru bioremedijacije posebno se ističe fitoremedijacija, koja zajedno s mikrobiološkim procesima nudi niz prednosti u odnosu na mehaničke i fizičko-hemijske metode remedijacije (Slika 2). Ovi prirodni pristupi sigurni su za okoliš, minimiziraju rizik po zdravlje ljudi, te se odlikuju niskim troškovima i jednostavnom primjenom (Santos i sar., 2025).



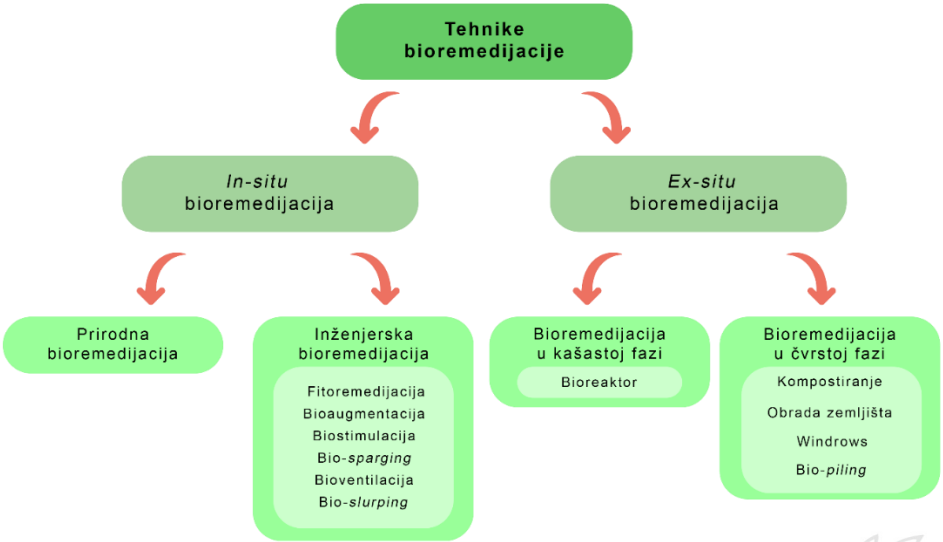
Slika 2. Komparativni prikaz konvencionalnih metoda remedijacije i bioremedijacije

Mikroorganizmi uključeni u procese bioremedijacije koriste polutante kao izvore ugljika i energije, razgrađujući ih kroz vlastite metaboličke aktivnosti. Na taj način ne samo da uklanjaju toksine iz okoliša, već i doprinose obnovi ekosistema te sprječavaju daljnju kontaminaciju (Sardrood i sar., 2013; Kuppan i sar., 2024). Učinkovitost ove metode dokazana je u ublažavanju posljedica antropogenih zagađenja koja potiču iz industrijskih i poljoprivrednih aktivnosti (Raajasubramanian i sur., 2015).

U poređenju sa konvencionalnim mehaničkim, fizičkim i hemijskim metodama, bioremedijacija se ističe većom ekološkom prihvatljivošću, jednostavnošću provedbe i manjom invazivnošću. Omogućava uklanjanje, detoksikaciju i smanjenje toksičnosti širokog spektra onečišćivača, uključujući industrijske otpadne vode, teške metale, ksenobiotske spojeve, organske halogene, pesticide i hlorirane spojeve (Sharma, 2020).

Bioremedijacija se može provoditi *in-situ* i *ex-situ* (Slika 3), u zavisnosti od uslova okoliša i vrste kontaminacije. *In-situ* bioremedijacija podrazumijeva tretiranje zagađenog područja na samom mjestu bez uklanjanja tla ili vode, čime se smanjuju troškovi i rizici povezani s transportom kontaminiranog materijala. S druge strane, *ex-situ* bioremedijacija uključuje fizičko izdvajanje kontaminiranog materijala i njegovo tretiranje u kontrolisanim uslovima, što omogućava preciznije upravljanje procesom i bržu degradaciju polutanata.

Iako zahtijeva više resursa, *ex-situ* pristup se često koristi kada su koncentracije polutanata visoke ili kada uslovi na lokaciji nisu pogodni za biološku aktivnost.



Slika 3. Pregled tehnika bioremedijacije

IN-SITU TEHNIKE BIOREMEDIJACIJE

Prednosti *in-situ* bioremedijacije uključuju manju fizičku intervenciju, niže troškove transporta te korištenje prirodnih procesa. Ipak, efikasnost ove metode može biti ograničena okolišnim faktorima kao što su niske temperature, nedostatak kisika i hranljivih materija, slaba bioraspoloživost organskih spojeva, tip zemljišta i pH vrijednost (Kuppan i sar., 2024). Prirodna *in-situ* bioremedijacija oslanja se na urođene sposobnosti autohtonih mikroorganizama i biljaka da metaboliziraju i razgrađuju toksične tvari bez dodatnih vanjskih intervencija zbog čega proces može biti dugotrajan. Proces se odvija putem stimulacije prirodnih mikrobnih populacija prisutnih na kontaminiranom području, pri čemu se polutanti transformiraju u bezopasne oblike pomoću njihovih metaboličkih aktivnosti. S obzirom da ova metoda ne zahtijeva primjenu vanjskih sila ni tehničkih zahvata, ekonomski je znatno povoljnija u odnosu na inženjerski izvedene pristupe (Alori i sar., 2022).

Inženjerski vođena *in-situ* bioremedijacija podrazumijeva uvođenje mikroorganizama koji nisu prirodno prisutni na kontaminiranoj lokaciji. Njihova primjena poboljšava hemijska i fizička svojstva tla, podstiče rast i aktivnost autohtonih mikroorganizama te pospješuje ukupnu razgradnju polutanata. Uspješnost oba pristupa u velikoj mjeri ovisi o dostupnosti hranljivih tvari, prisutnosti aktivnih mikroorganizama te geohemijskim i fizikalnim karakteristikama tla.

Stoga su izolacija lokalnih bakterijskih sojeva i detaljna analiza svojstava tla ključni koraci u procjeni potencijala i predviđanju učinkovitosti remedijacije određenog područja (Donlon i Bauder, 2006). Značajan doprinos u remedijaciji okoliša daju i biljke. Njihova sposobnost da apsorbiraju, akumuliraju, transformiraju ili stabiliziraju kontaminante u tlu i vodi čini osnovu procesa poznatog kao fitoremedijacija.

Fitoremedijacija

Fitoremedijacija koristi biljke za uklanjanje polutanata iz tla, vode i zraka. Ova strategija temelji se na prirodnim sposobnostima biljaka da apsorbuju, akumuliraju, transformiraju ili stabiliziraju različite kontaminante, posebno teške metale i organske spojeve. Zahvaljujući kombinaciji bioloških i hemijskih procesa u rizosferi, fitoremedijacija omogućava učinkovito smanjenje zagađenja uz minimalne troškove i bez značajnih poremećaja u okolišu.

Postoji više mehanizama putem kojih biljke učestvuju u remedijaciji okoliša, a najčešće korišteni su fitostabilizacija, fitoekstrakcija, fitodegradacija, fitovolatilizacija, fitostimulacija, fitotransformacija i rizofiltracija (Hassan i sar., 2024). Ovi procesi često djeluju sinergijski i mogu biti dodatno potpomognuti aktivnošću mikroorganizama u tlu, što povećava ukupnu učinkovitost remedijacije. Biljke u rizosferu izlučuju organske spojeve poput šećera, aminokiselina i organskih kiselina koji podstiču rast i aktivnost mikroorganizama, čime se ubrzava razgradnja polutanata, posebno ugljikovodika (Ratajczak i sar., 2023).

Kod fitostabilizacije biljke otporne na teške metale zadržavaju i imobiliziraju metale u zoni korijena. Ova metoda podstiče rast vegetacije i doprinosi obnovi zdravlja tla, čak i u visoko kontaminiranim područjima, uz minimalnu potrebu za odlaganjem biomase. Prisustvo mikroorganizama, posebno mikoriznih gljiva i bakterija u korijenju, dodatno povećava učinkovitost fitostabilizacije (Borbon-Palomares i sar., 2024).

Za razliku od fitostabilizacije koja polutante zadržava u tlu, fitoekstrakcija omogućava njihovo aktivno uklanjanje iz tla putem akumulacije u biljnim tkivima. Fitoekstrakcija je jedna od najznačajnijih tehnika fitoremedijacije, omogućava mobilizaciju metala u rizosferi, njihovo preuzimanje korijenjem, translokaciju prema nadzemnim dijelovima te pohranu u listovima i stabljici. Uspješnost fitoekstrakcije ovisi o vrsti biljke, dostupnosti metala u tlu te fiziološkom stanju biljaka, a krajnji rezultat je učinkovito uklanjanje zagađivača i poboljšanje kvalitete tla (Medina-Díaz i sar., 2024).

Fitodegradacija koristi sposobnosti biljaka za razgradnju organskih zagađivača u manje toksične oblike putem enzimskih reakcija koje se odvijaju u korijenu i nadzemnim dijelovima biljke. Organski spojevi se transformiraju i apsorbuju unutar biljke, čime se poboljšava plodnost tla i podstiče njegova obnova, proces poznat kao fitotransformacija (Pandey i sar., 2024).

Fitovolatilizacija uključuje transformaciju zagađivača u isparljive spojeve koji se potom otpuštaju u atmosferu. Tokom transpiracije, biljke apsorbuju teške metale i druge toksine korijenjem, transformiraju ih u manje toksične ionske oblike te ih izlučuju u obliku gasova, čime se smanjuje koncentracija kontaminanata u tlu i njihov potencijalni ekološki učinak (Sharma i sar., 2024).

Fitostimulacija podrazumijeva podsticanje mikrobiološke aktivnosti u tlu putem tvari koje biljke izlučuju u rizosferu, čime se ubrzava razgradnja onečišćivača. Ovaj proces učinkovito poboljšava sposobnost mikroorganizama za razgradnju organskih zagađivača, osobito ugljikovodika te predstavlja važnu metodu bioremedijacije tla (Ratajczak i sar., 2023).

Rizofiltracija je metoda fitoremedijacije koja koristi korijen biljaka za uklanjanje polutanata iz vode putem apsorpcije i adsorpcije. Ova tehnika je posebno učinkovita u uklanjanju teških metala i drugih polutanata iz podzemnih voda, pri čemu se biljke nakon nakupljanja kontaminanata sigurno uklanjaju (Singh i sar., 2024).

Osim što je ekonomski isplativa i održiva, fitoremedijacija nudi i dodatne ekološke koristi. Doprinosi fitorudarenju (*phytomining*), omogućujući recikliranje vrijednih metala te očuvanje prirodnih resursa, a ujedno poboljšava plodnost i strukturu tla, povećava sadržaj fitohemikalija i smanjuje ispiranje hranjivih tvari i eroziju, čime se čuva integritet ekosistema.

Unatoč brojnim prednostima, fitoremedijacija ima i određena ograničenja. Najveći izazov predstavlja činjenica da je njena učinkovitost najveća u površinskim slojevima tla, dok se kod kontaminacija koje prodiru u dublje slojeve tla pokazuje manje djelotvornom. Dodatno, prisustvo visokih koncentracija toksičnih tvari može negativno utjecati na rast biljaka, što može predstavljati rizik za kvalitetu biljnih proizvoda. Iako fitoremedijacija predstavlja obećavajuću tehnologiju u obnovi okoliša, njena potpuna učinkovitost zahtijeva dalja istraživanja i razvoj integriranih pristupa koji će kombinovati biološke, hemijske i tehnološke metode za postizanje dugoročnog ekološkog oporavka (Madhav i sar., 2024).

Biostimulacija

Biostimulacija označava proces dodavanja hranljivih tvari, akceptora ili donora elektrona kako bi se potaknula biološka razgradnja zagađivača pomoću prirodnih mikroorganizama u tlu. Dodani nutrijenti podstiču rast bakterija i povećavaju njihovu sposobnost razgradnje složenih organskih spojeva u osnovne mikroelemente i elemente u tragovima.

Biostimulacija se provodi dodavanjem visokih koncentracija hranljivih tvari poput azota, fosfora, kisika i donora elektrona na jako onečišćena područja, čime se ubrzava razgradnja štetnih i toksičnih tvari (Goswami i sar., 2018). Biostimulacija ima brojne prednosti u bioremedijaciji, jer koristi postojeće, prirodne mikroorganizme koji su već prilagođeni okolišu, što omogućuje učinkovitu, ekonomičnu i ekološki prihvatljivu remedijaciju. Međutim, metoda ima i određena ograničenja, prije svega vezana uz ravnomjernu raspodjelu hranljivih materija i donora elektrona.

Učinkovitost ovisi o geološkoj građi terena – gusta ili nepropusna tla otežavaju ravnomjernu distribuciju. Osim toga, teško je precizno odrediti potrebnu količinu hranljivih materija, a pukotine i šupljine u tlu mogu stvarati preferencijalne puteve protoka, čime se smanjuje učinkovitost i ravnomjernost biostimulacije (Adams i sar., 2015).

Bioaugmentacija

Bioaugmentacija podrazumijeva uvođenje alohtonih ili autohtonih mikroorganizama u kontaminirani okoliš kako bi se podstakla eliminacija polutanata. Odabrani sojevi se uzgajaju i dodaju za olakšavanje remedijacije. Introducirani mirkroorganizmi trebali bi ubrzati otklanjanje različitih toksina iz okoliša (Alori i sar., 2022). Za razliku od biostimulacije, koja podstiče prirodne bakterije dodavanjem hranljivih tvari, bioaugmentacija koristi dodatne mikroorganizme za bržu razgradnju polutanata. Miješane bakterijske kulture često su efikasnije od čistih sojeva zbog bolje sposobnosti razgradnje. Uspjeh bioaugmentacije zavisi od prilagodbe mikrobiološkog konzorcija specifičnim uslovima zemljišta. Korištenje ograničene količine mikroorganizama koji razgrađuju polutante, zajedno s višenamjenskim hemikalijama, pokazalo se vrlo efikasnim (Adams i sar., 2015).

Bioventilacija

Bioventilacija ubrzava aerobnu razgradnju polutanata tako što opskrbljuje autohtone mikroorganizme kisikom, čime podstiče razgrađuju organskih zagađivača u uslovima s malo kisika (Donlon i Bauder, 2006). Proces se provodi ubrizgavanjem zraka u zagađeno područje putem okomitih i vodoravnih bušotina, uz cilj da se koristi minimalna količina zraka dovoljna za razgradnju, ali bez isparavanja i širenja zagađivača u okoliš. Kisik se dovodi u tlo iznad razine podzemne vode, a po potrebi se dodaju i azot i fosfor kako bi se podstaknuo rast mikroorganizama i ubrzala razgradnja toksina u manje štetne spojeve. Bioventilacija je veoma uspješna u remedijaciji naftnih spojeva zahvaljujući svojoj sposobnosti da osigura nisku koncentraciju kisika potrebnu za biološku razgradnju. Međutim, ovaj proces zahtijeva smanjene nivoe protoka zraka, a brzine bioventilacije potrebno je pažljivo izračunati na različitim nivoima ekstrakcije para kako bi se osigurala učinkovita biodegradacija isparljivih tvari unutar strukture tla (Gupta i sar., 2021a). Bioventilacija obično zahtijeva duži period sanacije, koji može trajati nekoliko godina do više desetljeća, posebno u homogenim pjeskovitim tlima (Alori i sar., 2022; Kuppan i sar., 2024).

Bio-sparging

Ova metoda je slična bioventilaciji, jer također uključuje ubacivanje zraka u tlo radi podsticanja aktivnosti mikroorganizama i uklanjanja polutanata ali se primjenjuje u zasićenoj zoni tla (ispod razine podzemne vode). Ubrizgani zrak omogućava da se pare ugljikovodika pomaknu prema nezasićenoj zoni, gdje se dodatno razgrađuju biološkim putem. Uspješnost ovog procesa zavisi od poroznosti tla, koja utječe na dostupnost i razgradivost polutanata. Dovodom kisika podstiče se prirodna biološka razgradnja aerobnih spojeva, pri čemu se onečišćivači pretvaraju u netoksične tvari, bez potrebe za dodatnim sistemima za izvlačenje zraka (Azubuike i sur., 2016).

Učinkovita je u remedijaciji organskih onečišćivača razgradivih aerobno, poput ostataka goriva u zasićenim tlima. Učinkovitost raste s propusnošću tla, ali se smanjuje u slojevitim ili manje propusnim tlima, gdje zagađivači mogu ostati zarobljeni (Da Silva i sar., 2020).

Bio-slurping

Ova metoda kombinuje vakuumsko ispumpavanje, ekstrakciju para iz tla i bioventilaciju kako bi se indirektno tretiralo tlo i podzemne vode putem dovoda kisika koji podstiče biološku razgradnju zagađivača. Ciljano uklanja slobodne faze polutanata poput LNAPL-a (laganih nevodotopivih tekućina) u kapilarnoj, nezasićenoj i zasićenoj zoni tla, a učinkovita je i za tla kontaminirana isparljivim i poluisparljivim organskim spojevima. Proces koristi tzv. „*slurp*“ mehanizam, sličan usisavanju tekućine slamkom, kojim se usisavaju i odvajaju tekućine, zrak i voda.

Metoda nije prikladna za tla niske propusnosti zbog ograničene reinfiltracije, ali nudi značajne uštede troškova jer smanjuje potrebu za skladištenjem, obradom i odlaganjem podzemnih voda (Saravanan i sar., 2024; Kuppan i sar., 2024).

EX-SITU TEHNIKE BIOREMEDIJACIJE

Ex-situ bioremedijacija uključuje iskopavanje i uklanjanje onečišćenog tla ili materijala radi obrade na drugom lokalitetu. Izbor metode zavisi od troškova, dubine i vrste zagađenja, količine polutanata, lokacije i topografije područja, a važni su i efikasnost i performanse metode (Atlas i Philp, 2005). *Ex-situ* metode su učinkovite za razgradnju širokog spektra ugljikovodika, uključujući alifatske lance, ulja za podmazivanje, ketone, fenole, krezole, poliaromatske ugljikovodike i poluvolatilne organske spojeve (Kuppan i sar., 2024).

Bioremedijacija u čvrstoj fazi podrazumijeva iskopavanje kontaminiranog tla i njegovo formiranje u hrpe (naslage) radi naknadnog tretmana. Hrpe tla se obogaćuju različitim vrstama organskog otpada, poput lišća, stajskog đubriva, poljoprivrednog otpada te kućnog, industrijskog i komunalnog otpada. U njih se ugrađuju cijevi koje omogućavaju cirkulaciju zraka, što je od suštinskog značaja za provjetravanje, respiraciju mikroorganizama i njihov rast. U poređenju s bioreaktorima koji rade u kašastoj fazi, sistemi bioremedijacije u čvrstoj fazi zahtijevaju više prostora i duže vrijeme za postizanje potpune remedijacije. Međutim, oni su jednostavniji za primjenu i često ekonomičniji. Među najčešće korištenim metodama ove tehnologije ubrajaju se kompostiranje, obrada zemljišta (*land farming*), windrows (aerobno prevrtanje hrpa) i *bio-piling* (Kulshreshtha i sar., 2014).

Kompostiranje

Kompostiranje se može primijeniti i u *in-situ* i *ex-situ* tehnikama bioremedijacije. Predstavlja učinkovitu metodu bioremedijacije u kojoj mikroorganizmi razgrađuju organske tvari i polutante u tlu pretvarajući ih u manje štetne spojeve. Povišene temperature tokom kompostiranja ubrzavaju biološku razgradnju i transformaciju toksičnih spojeva.

Ova tehnologija se koristi na dva glavna načina: za kompostiranje onečišćenog tla ili sedimenta radi razgradnje polutanata te za povećanje poroznosti kompostne smjese. Tlo se miješa s materijalima poput drveta, stajskog đubriva, biljnog otpada i drugih organskih materija, pri čemu se održava termofilna temperatura iznad 50°C kako bi se potaknula razgradnja (Noor i sar., 2024).

Prednosti kompostiranja uključuju održivo korištenje biorazgradivog otpada, poboljšanje strukture tla, mineralnog sastava i mikrobne aktivnosti. Međutim, metoda ima ograničenja u detoksifikaciji teških metala, što je važno kod biljaka korištenih za remedijaciju. Biljke reaguju na toksičnost metala putem mehanizama izbjegavanja i tolerancije, a jednom kad ih apsorbuju, detoksifikacija se odvija u citosolu pomoću organskih i anorganskih spojeva, što omogućuje biljkama da prežive i pridonose remedijaciji tla (Ottani i sar., 2024).

Obrada zemljišta (*Land farming*)

Obrada zemljišta predstavlja jednostavnu i široko primjenjivanu metodu bioremedijacije, posebno u poljoprivrednom kontekstu. Najčešće se izvodi kao *ex-situ* bioremedijacija, iako se u određenim slučajevima može primijeniti i *in-situ* pristup. Kod ex-situ obrade zemljišta, autohtoni mikroorganizmi aerobno razgrađuju toksične kontaminante na površini tla (Silva-Castro i sar., 2012). Ova metoda se najčešće koristi za remedijaciju tla kontaminiranog ugljikovodicima, naročito policikličkim aromatskim ugljikovodicima. Ključni procesi koji doprinose uklanjanju zagađivača su biodegradacija i volatilizacija (Da Silva i sar., 2012; Cerqueira i sar., 2014). Prednosti ove metode uključuju jednostavnost primjene i minimalne zahtjeve za prethodnom pripremom tla, što rezultira nižim troškovima i manjim radnim opterećenjem. Međutim, postoje i određeni nedostaci: metoda zahtijeva velike površine, može doći do smanjene aktivnosti mikroorganizama zbog nepovoljnih klimatskih i fizičkih uslova te su prisutni povećani troškovi iskopavanja i ograničena učinkovitost u uklanjanju neorganskih polutanata (Maila i Cloete, 2004; Cerqueira i sar., 2014).

Windrows

Windrows predstavljaju metodu bioremedijacije koja se zasniva na periodičnom okretanju nagomilanog kontaminiranog tla s ciljem poboljšanja mikrobne razgradnje ugljikovodika. Ovim postupkom povećava se aeracija, podstiče rast mikroorganizama i ubrzava proces razgradnje zagađivača. Brzina bioremedijacije može se dodatno unaprijediti kontrolisanim dodavanjem zraka, vode i hranljivih materija, kao i redovnim rotiranjem materijala radi optimizacije uslova za adaptaciju i mineralizaciju organskih polutanata. Ipak, učinkovitost ove metode smanjena je kod volatilnih spojeva, jer periodično okretanje može dovesti do formiranja anaerobnih zona unutar hrpe. Takvi uslovi pogoduju emisiji stakleničkih plinova, poput metana, te smanjuju efikasnost provjetravanja i ukupnu degradaciju zagađivača (Hobson i sar., 2005).

Bio-piling

Biopiling podrazumijeva akumuliranje iskopanog kontaminiranog tla, uz dodavanje nutrijenata i u nekim slučajevima aeraciju kako bi se potaknula mikrobna aktivnost i bioremedijacija (Whelan i sar., 2015). Ova tehnologija uspješno je primijenjena na različitim tipovima tla kao što su glinena i pjeskovita (Chemlal i sar., 2013; Akbari i Ghoshal, 2014). Poboljšanjem sastava povećava se mikrobna aktivnost i ubrzava biodegradacija polutanata. Prije tretmana tlo se prosijava i provjetrava, a često se dodaju pomoćni materijali poput drvnih čestica, sijena, kore i dr. (Rodríguez i sar., 2010). Prednosti ove tehnologije uključuju ekonomičnost, efikasnost i mogućnost obrade velikih količina tla na ograničenom prostoru. Međutim, ova metoda uključuje i određene izazove: složen inženjering, troškovi održavanja i rada te problemi s pregrijavanjem zraka koji može osušiti tlo, smanjiti mikrobnu aktivnost i favorizirati isparavanje umjesto biološke razgradnje (Sanscartier i sar., 2009). Također, kod udaljenih lokacija može biti problem nedovoljna opskrba energijom za ravnomjernu distribuciju zraka kroz pumpe.

Bioreaktori

Bioremedijacija u kašastoj fazi (*slurry phase*) predstavlja jednu od najbržih i najučinkovitijih *ex-situ* metoda obrade kontaminiranog tla. Bioreaktori ključna su tehnologija u ovom procesu jer omogućavaju razgradnju otpornijih zagađivača pod strogo kontrolisanim uslovima (Mueller i sar., 1991; Mohan i sar., 2006). Proces započinje analizom vrste i koncentracije zagađivača te fizičkih svojstava tla. Tlo se zatim miješa s vodom kako bi se formirala kaša (*slurry*), koja obično sadrži 5–40 % čvrstih tvari. Prije toga, tlo se ispire radi uklanjanja finih kontaminanata, a ispirana voda se naknadno obrađuje u bioreaktoru. Bioreaktor se dopunjuje nutrijentima, kisikom i mikroorganizmima, dok se istovremeno postavljaju optimalni uslovi za biološku razgradnju. Nakon završetka procesa, kaša se odvaja od vode, koja se zatim filtrira i pročišćava.

Bioreaktori su spremnici u kojima se organske materije biološki razgrađuju, pri čemu nastaju specifični nusprodukti (Akshaya i sar., 2023). Kontrolisana sredina unutar bioreaktora omogućava optimalne uslove za bioremedijaciju. U obradi kontaminiranog tla, bioreaktori nude brojne prednosti: preciznu kontrolu pH vrijednosti, regulaciju temperature, smanjenu turbulenciju, poboljšanu aeraciju te tačno doziranje supstrata i inokuluma. Zahvaljujući prilagodljivom dizajnu, omogućuju učinkovitu biološku razgradnju složenih i teško razgradivih zagađivača (Venkata Mohan i sar., 2004).

Prednost *ex-situ* bioremedijacije, poput one koja se provodi u bioreaktorima, ogleda se u mogućnosti potpune kontrole uslova procesa – temperature, pH vrijednosti, koncentracije nutrijenata i dostupnosti kisika, što omogućava bržu i efikasniju razgradnju zagađivača. Također, ova metoda omogućava tretman visoko kontaminiranih materijala i precizno praćenje učinka biološke razgradnje.

Međutim, glavni nedostatak *ex-situ* bioremedijacije je potreba za iskopavanjem i transportom kontaminiranog tla, što povećava troškove i može dovesti do dodatnog rizika od širenja zagađenja. Osim toga, potrebna je složenija infrastruktura i veća potrošnja energije u poređenju sa *in-situ* metodama.

BUDUĆI TRENDOVI I INOVACIJE U BIOREMEDIJACIJI

Savremena istraživanja se sve više oslanjaju na napredne multidisciplinarne strategije koje uključuju *omics* tehnologije, sintetičku biologiju, nanotehnologiju i vještačku inteligenciju (AI) sa ciljem efikasnijeg i održivijeg uklanjanja zagađivača iz okoliša.

Tradicionalne mikrobiološke metode često ne otkrivaju većinu mikroba koji su sastavni dio mikrobiote tla jer ne mogu biti kultivisani u laboratorijskim uslovima. Međutim, metagenomika omogućava detalju analizu prisutnih mikrobnih zajednica u tlu kao i njihovih funkcija i gena potrebnih za razgradnju zagađivača. Na osnovu ovih podataka moguće je preciznije dizajnirati strategije biostimulacije i bioaugmentacije. Kako meta-analize bakterijskih genoma budu pristupačnije, metagenomika će u budućnosti predstavljati jedan od glavnih alata za razvoj precizno usmjerenih bioremedijacijskih strategija (Yadav i Dharne, 2024).

Sintetička biologija (*Synbio*) trenutno koristi tehnike za modifikaciju ili vještačku sintezu prokariotskih sistema dok je njena primjena kod nekih biljnih organizama još u začetku (Ermakova i sar., 2019). Kad je u pitanju bioremedijacija, sintetička biologija se trenutno zasniva na modifikacijama jednog ili više gena, većinom kod prokariotskih organizama, koji mogu poboljšati degradaciju zagađivača iz tla. Međutim, stvarni potencijal sintetičke biologije se nalazi u kombinaciji biljaka sa genetički unaprjeđenim rizosfernim ili endofitnim mikrobnim populacijama koristeći napredne tehnike poput CRISPR-Cas za precizno usmjeravanje i sinergistički efekat u degradaciji zagađivača tla (Rylott i Bruce, 2019; Rylott i Bruce, 2020). Dugoročni cilj je razviti autonomne i održive biohibridne sisteme sposobne za monitoring zagađivača i njihovo kontinuirano uklanjanje.

Obećavajuće rezultate daje i nanotehnologija gdje bi kombinacija nanočestica u formi nanokatalizatora sa biološkim organizmima omogućila veću efikasnost u uklanjanju zagađivača tla. Tu se naročito ističe njihova primjena kao adsorbanata teških metala. Međutim, potrebna su istraživanja koja bi omogućila njihovu reciklažu i uklanjanje iz ekosistema te na taj način reducirala stepen potencijalne toksičnosti (Thangavelu i Veeraragavan, 2022).

AI je posebno zadobio pažnju u ekološkim istraživanjima zbog mogućnosti obrade kompliciranih setova podataka, pronalaska obrazaca u ekosistetima i upravljanja biomonitoringom i remedijacijom (Steffi i sar., 2022). Metode poput mašinskog učenja ili neuralnih mreža mogu prepoznati prostorne i vremenske obrasce u koncentracijama zagađivača, što omogućava preventivno djelovanje (Sun i Scanlon, 2019).

Pored preventivnog upravljanja, bioremedijacijski procesi vođeni AI algoritmima mogu djelovati u optimizaciji krucijalnih parametara kao što su izbor konzorcijuma mikroorganizama i suplementacije nutrijenata što poboljšava stopu degradacije zagađivača, smanjujući utrošak resursa (Gupta i sar., 2021b).

U praksi, implementacija različitih tretmana je obično ograničena kompleksnošću okoliša. Shodno tome, ne postoji tretman ili tehnologija, bez obzira da li se radi o fizičko-hemijskoj remedijaciji ili bioremediaciji, koju je moguće univerzalno primijeniti.

ZAKLJUČCI

Zagađenje tla predstavlja složen ekološki problem koji proizlazi iz intenzivnih industrijskih, poljoprivrednih i urbanih aktivnosti. Akumulacija organskih i neorganskih polutanata dovodi do degradacije strukture i plodnosti tla, smanjenja biodiverziteta te povećanog rizika za zdravlje ljudi usljed prijenosa kontaminanata u vodne resurse i prehrambeni lanac. Konvencionalne mehaničke, fizičke i hemijske metode remedijacije, iako efikasne u određenim uslovima, često su skupe, energetski zahtjevne i potencijalno invazivne za ekosistem. Njihova primjena nerijetko podrazumijeva dodatne rizike od sekundarne kontaminacije i dugoročnog narušavanja prirodne ravnoteže tla.

Savremeni pristupi remedijaciji tla sve se više usmjeravaju ka održivim i ekološki prihvatljivim rješenjima zasnovanim na prirodnim procesima. Bioremedijacija predstavlja održivu alternativu konvencionalnim metodama, jer koristi metaboličke kapacitete mikroorganizama i biljaka za razgradnju, transformaciju, stabilizaciju ili uklanjanje polutanata. Međutim, njena uspješnost u velikoj mjeri zavisi od abiotičkih i biotičkih faktora, uključujući pH vrijednost, temperaturu, dostupnost kisika i nutrijenata, bioraspoloživost polutanata te interakcije unutar mikrobnih zajednica. Stoga je detaljna karakterizacija kontaminiranog lokaliteta, uključujući geohemijske i molekularno-biološke analize, ključna za odabir optimalne strategije remedijacije.

Napredak u *omics* tehnologijama, sintetičkoj biologiji, nanotehnologiji i primjeni vještačke inteligencije otvara nove mogućnosti za razvoj precizno usmjerenih i efikasnijih bioremedijacijskih sistema. Integracija ovih pristupa omogućava bolje razumijevanje strukture i funkcije mikrobnih zajednica, optimizaciju uslova degradacije te razvoj genetički unaprijeđenih organizama sa specifičnim metaboličkim kapacitetima. Primjena ovakvih inovacija mora biti praćena detaljnom procjenom ekološke sigurnosti i dugoročnih utjecaja na okoliš.

S obzirom na kompleksnost ekosistema tla, ne postoji univerzalna metoda remedijacije primjenjiva na sve tipove zagađenja. Najveći potencijal leži u integriranim, interdisciplinarnim pristupima koji kombinuju biološke, hemijske i tehnološke metode, uz detaljnu procjenu rizika i primjenu principa održivog razvoja.

LITERATURA

Abdel-Shafy, H. I., Mansour, M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum, 25*, 107–123. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011

Adams, G. O., Fufeyin, P. T., Okoro, S. E., Ehinomen, I. (2015). Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: A review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation, 3*(1), 28–39. https://doi.org/10.12691/ijebb-3-1-5

Akbari, A., Ghoshal, S. (2014). Pilot-scale bioremediation of a petroleum hydrocarbon contaminated clayey soil from a sub-Arctic side. *Journal of Hazardous Materials, 280,* 595–602. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.08.016

Akshaya, V., Akila, I., Murali, R., Raajasubramanian, D., Kuppan, N., Srinivasan, S. (2023). Rice straw biomass and agricultural residues as strategic bioenergy: Effects on the environment and economy path with new directions. In Bioenergy: Impacts on Environment and Economy (pp. 139–164). Springer Nature, Singapore.

Alori, E. T., Gabasawa, A. I., Elenwo, C. E., Agbeyegbe, O. O. (2022). Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment. *Frontiers in Soil Science, 2*, 937186. https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.937186

Aparicio, J. D., Raimondo, E. E., Saez, J. M., Costa-Gutierrez, S. B., Álvarez, A., Benimeli, C. S., Polti, M. A. (2022). The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies, and the potential of their strategic combination. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 10*, 107141. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107141

Atlas, R. M., Philp, J. (2005). *Bioremediation: Applied microbial solutions for real-world environmental cleanup.* ASM Press. ISBN 1555812392.

Azubuike, C. C., Chikere, C. B., Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques—Classification based on site of application: Principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 32*(11), 180. https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x

Besalatpour, A. A., Hajabbasi, A. H., Khoshgoftarmanesh, A. (2011). Landfarming process effects on biochemical properties of petroleum-contaminated soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 20*(2), 234–248. https://doi.org/10.1080/15320383.2011.546447

Borbon-Palomares, D. B., González-Méndez, B., Loredo-Portales, R., Tinoco-Ojanguren, C., Molina-Freaner, F. (2024). Phytostabilization alternatives for an abandoned mine tailing deposit in northwestern Mexico. *Plant and Soil, 497*(1), 199–218. https://doi.org/10.1007/s11104-024-06524-8

Cerqueira, V. S., Maria do Carmo, R. P., Camargo, F. A., Bento, F. M. (2014). Comparison of bioremediation strategies for soil impacted with petrochemical oily sludge. *International Biodeterioration & Biodegradation, 95*, 338–345. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.08.015

Chemlal, R., Abdi, N., Lounici, H., Drouiche, N., Pauss, A., Mameri, N. (2013). Modeling and qualitative study of diesel biodegradation using biopile process in sandy soil. *International Biodeterioration & Biodegradation, 78*, 43–48. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.12.014

Da Silva, L. J., Alves, F. C., De França, F. P. (2012). A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries. *Waste Management & Research, 30*(10), 1016–1030. https://doi.org/10.1177/0734242X12448517

Da Silva, S., Gonçalves, I., Gomes de Almeida, F. C., Padilha da Rocha e Silva, N. M., Casazza, A. A., Converti, A., Asfora Sarubbo, L. (2020). Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies, 13*(18), 4664. https://doi.org/10.3390/en13184664

Donlon, D. L., Bauder, J. W. (2006). A general essay on bioremediation of contaminated soil. Department of Land Resources and Environmental Science, Water Quality and Irrigation Management, Montana State University.

Goswami, M., Chakraborty, P., Mukherjee, K., Mitra, G., Bhattacharyya, P., Dey, S., Tribedi, P. (2018). Bioaugmentation and biostimulation: A potential strategy for environmental remediation. *Journal of Microbiology Experiment, 6*(5), 223–231. https://doi.org/10.15406/jmen.2018.06.00219

Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Krishnan, S., Kumar, S., Nejad, Z. D., Khan, M. M., Alam, J. (2021a). Evaluating heavy metals contamination in soil and vegetables in the region of North India: Levels, transfer and potential human health risk analysis. *Environmental Toxicology and Pharmacology, 82*, 103563. https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103563

Gupta, P. K., Yadav, B., Kumar, A., Himanshu, S. K. (2021b). Machine learning and artificial intelligence application in constructed wetlands for industrial effluent treatment: Advances and challenges in assessment and bioremediation modelling. In *Bioremediation and Environmental Sustainability* (pp. 403–414). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820524-2.00016-X

Ermakova, M., Danila, F. R., Furbank, R. T., von Caemmerer, S. (2019). On the road to C_4 rice: Advances and perspectives. *The Plant Journal, 99*(4), 856–869. https://doi.org/10.1111/tpj.14562

Hassan, S., Bhadwal, S. S., Khan, M., Nissa, K. U., Shah, R. A., Bhat, H. M., Bhat, S. A., Lone, I. M., Ganai, B. A. (2024). Revitalizing contaminated lands: A state-of-the-art review on the remediation of mine-tailings using phytoremediation and genomic approaches. *Chemosphere, 141889.* https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141889

Hobson, A. M., Frederickson, J., Dise, N. B. (2005). CH_4 and N_2O from mechanically turned windrow and vermicomposting systems following in-vessel pre-treatment. Waste Management 25 (4), 345–352. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.02.015

Jayaraj, R., Megha, P., Sreedev, P. (2016). Organochlorine pesticides, their toxic effects on living organisms and their fate in the environment. *Interdisciplinary Toxicology, 9*, 90–100. PMID: 28652852

Jing, R., Fusi, S., Kjellerup, B. V. (2018). Remediation of polychlorinated biphenyls (PCBs) in contaminated soils and sediment: State of knowledge and perspectives. *Frontiers in Environmental Science, 6*, 79. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00079

Kazakou, E., Dimitrakopoulos, P. G., Baker, A. J. M., Reeves, R. D., Troumbis, A. J. (2008). Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: From species to ecosystem level. *Biological Reviews, 83*(4), 495–508. https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2008.00051.x

Koushal, S., Arun, C., Kumar, D., Arya, J., Nehul, C., Panigrahi, D., Haloi, N., Gangadaran, M., Kumar, A. (2025). Bioremediation of soil pollution: An effective approach for sustainable agriculture. *International Journal of Plant & Soil Science, 37*, 400–410. https://doi.org/10.9734/ijpss/2025/v37i15282

Kulshreshtha, A., Agrawal, R., Barar, M., Saxena, S. (2014). A review on bioremediation of heavy metals in contaminated water. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology, 8*(7), 44–50.

Kumar, B., Verma, V. K., Singh, K., Kumar, S., Sharma, C. S., Akolkar, A. B. (2014). Polychlorinated biphenyls in residential soils and their health risk and hazard in an industrial city in India. *Journal of Public Health Research, 3*, 252. https://doi.org/10.4081/jphr.2014.252

Kuppan, N., Padman, M., Mahadeva, M., Srinivasan, S., Devarajan, R. (2024). A comprehensive review of sustainable bioremediation techniques: Eco-friendly solutions for waste and pollution management. *Waste Management Bulletin, 2*, 154–171. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.005

Lal, N. (2010). Molecular mechanisms and genetic basis of heavy metal toxicity and tolerance in plants. In M. Ashraf, M. Ozturk, M. S. A. Ahmad (Eds.), *Plant adaptation and phytoremediation*. Netherlands: Springer Science and Business Media.

Li, Y., Huang, G., Gu, H., Huang, Q., Lou, C., Zhang, L., Liu, H. (2018). Assessing the risk of phthalate ester (PAE) contamination in soils and crops irrigated with treated sewage effluent. *Water, 10*, 999. https://doi.org/10.3390/w10080999

Madhav, S., Mishra, R., Kumari, A., Srivastav, A. L., Ahamad, A., Singh, P., Ahmed, S., Mishra, P. K., Sillanpää, M. (2024). A review on sources identification of heavy metals in soil and remediation measures by phytoremediation-induced methods. *International Journal of Environmental Science and Technology, 21*(1), 1099–1120. https://doi.org/10.1007/s13762-023-04950-5

Maila, M. P., Cloete, T. E. (2004). Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming: Are simplicity and cost-effectiveness the only advantages? *Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 3*(4), 349–360. https://doi.org/10.1007/s11157-004-6653-z

Małachowska Jutsz, A., Gnida, A. (2015). Mechanisms of stress avoidance and tolerance by plants used in phytoremediation of heavy metals. *Archives of Environmental Protection, 41*(4), 104–114. https://doi.org/10.1515/aep-2015-0045

Medina-Díaz, H. L., Lopez-Bellido, F. J., Alonso-Azcárate, J., Fernandez-Morales, F. J., Rodríguez, L. (2024). A new hyperaccumulator plant (*Spergularia rubra*) for the decontamination of mine tailings through electrokinetic-assisted phytoextraction. *Science of the Total Environment, 912*, 169543. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169543

Mohan, S. V., Shailaja, S., Krishna, M. R., Reddy, K. B., Sarma, P. N. (2006). Bioslurry phase degradation of di-ethyl phthalate (DEP) contaminated soil in periodic discontinuous mode operation: Influence of bioaugmentation and substrate partition. *Process Biochemistry, 41*(3), 644–652.

Mueller, J. G., Lantz, S. E., Blattmann, B. O., Chapman, P. J. (1991). Bench-scale evaluation of alternative biological treatment processes for the remediation of pentachlorophenol- and creosote-contaminated materials. In *Solid-Phase Bioremediation* (pp. 1045–1055). *Environmental Science & Technology, 25*(6). https://doi.org/10.1021/es00018a006

Navarro, D. A., Kabiri, S., Ho, J., Bowles, K. C., Davis, G., McLaughlin, M. J., Kookana, R. S. (2023). Stabilisation of PFAS in soils: Long-term effectiveness of carbon-based soil amendments. *Environmental Pollution, 323*, 121249. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121249

Noor, R. S., Shah, A. N., Tahir, M. B., Umair, M., Nawaz, M., Ali, A., Ercisli, S., Abdelsalam, N. R., Ali, H. M., Yang, S. H., Ullah, S. (2024). Recent trends and advances in additive-mediated composting technology for agricultural waste resources: A comprehensive review. *ACS Omega.* https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06516

Ottani, F., Pedrazzi, S., Morselli, N., Puglia, M., Allesina, G. (2024). Seeking the synergistic potential of biochar integration in municipal composting plants for techno-economic and environmental leverage. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 64*, 103717. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103717

Pandey, V. C., Malik, G., Roy, M., Srivastava, A. K., Upadhyay, S. K. (2024). Biodiversity prospecting for phytoremediation programs intended for utilizing polluted lands and obtaining bioeconomy. *Land Degradation & Development.* https://doi.org/10.1002/ldr.5142

Qian, Y., Qin, C., Chen, M., Lin, S. (2020). Nanotechnology in soil remediation – Applications vs. implications. *Ecotoxicolology and Environmental Safety, 201*, 110815. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110815

Raajasubramanian, D., Krishna Ram, H., Narendra, K. (2015). The study of change in physico-chemical properties of soil due to cement dust pollution—A hazardous terrorization to ecosystem. *Canadian Journal of Pure and Applied Sciences, 9*, 3193–3200.

Raffa, C. M., Chiampo, F. (2021). Bioremediation of agricultural soils polluted with pesticides: A review. *Bioengineering, 8*(7), 92. https://doi.org/10.3390/bioengineering8070092

Ratajczak, K., Sulewska, H., Panasiewicz, K., Faligowska, A., Szymanska, G. (2023). Phytostimulator application after cold stress for better maize (*Zea mays* L.) plant recovery. *Agriculture, 13*(3), 569. https://doi.org/10.3390/agriculture13030569

Rodríguez-Rodríguez, C. E., Marco-Urrea, E., Caminal, G., 2010. Degradation of naproxen and carbamazepine in spiked sludge by slurry and solid-phase Trametes versicolor systems. *Bioresource Technology, 101*(7), 2259–2266. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.089

Roy, D., Jung, W., Kim, J., Lee, M., Park, J. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and human health risk levels for various land-use areas in Ulsan, South Korea. *Frontiers in Environmental Science, 9*, 744387. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.744387

Rylott, E. L., Bruce, N. C. (2019). Right on target: Using plants and microbes to remediate explosives. *International Journal of Phytoremediation, 21*(1), 1–14. https://doi.org/10.1080/15226514.2019.XXXXX

Rylott, E. L., Bruce, N. C. (2020). How synthetic biology can help bioremediation. *Current Opinion in Chemical Biology, 58*, 86–95. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.07.004

Sanscartier, D., Zeeb, B., Koch, I., Reimer, K. (2009). Bioremediation of diesel-contaminated soil by heated and humidified biopile system in cold climates. *Cold Regions Science and Technology, 55*(1), 167–173. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.07.004

Santos, M., Rebola, S., Evtuguin, D. V. (2025). Soil remediation: Current approaches and emerging bio-based trends. *Soil Systems, 9*, 35. https://doi.org/10.3390/soilsystems9020035

Saravanan, A., Yaashikaa, P. R., Ramesh, B., Shaji, A., Deivayanai, V. C. (2024). Microorganism-mediated bioremediation of dyes from contaminated soil: Mechanisms, recent advances, and future perspectives. *Food and Chemical Toxicology, 114491.* https://doi.org/10.1016/j.fct.2024.114491

Sardrood, B. P., Goltapeh, E. M., Varma, A. (2013). An introduction to bioremediation Goltapeh. In E. Mohammadi, Y. R. Danesh, & A. Varma (Eds.), *Fungi as Bioremediators Soil Biology* (pp. 3–27). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33811-3_1

Senevirathna, S. T. M. L. D., Mahinroosta, R., Li, M., KrishnaPillai, K. (2021). In situ soil flushing to remediate confined soil contaminated with PFOS – An innovative solution for emerging environmental issue. *Chemosphere, 262*, 127606. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127606

Sharma, I. (2020). Bioremediation techniques for polluted environment: Concept, advantages, limitations, and prospects. In *Trace Metals in the Environment—New Approaches and Recent Advances*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.90453

Sharma, P., Reddy, P. M. (2020). Application of bioremediation techniques for the restoration of polluted soils. *Environmental Pollution, 261*, 113546.

Sharma, K., Devi, P., Dey, S. R., Kumar, P. (2024). Mercury phytovolatilization: An overview of the mechanism and mitigation. In *Role of Green Chemistry in Ecosystem Restoration to Achieve Environmental Sustainability* (pp. 325–331). https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15291-7.00031-6

Silva-Castro, G. A., Uad, I., Gónzalez-López, J., Fandino, C. G., Toledo, F. L., Calvo, C. (2012). Application of selected microbial consortia combined with inorganic and oleophilic fertilizers to recuperate oil-polluted soil using land farming technology. *Clean Technologies and Environmental Policy, 14*(4), 719–726. https://doi.org/10.1007/s10098-011-0439-0

Singh, A., Kuhad, R. C., Ward, O. P. (2009). Advances in applied bioremediation. *In Soil Biology* (Vol. 17, pp. 1–19). Springer, Berlin, Germany.

Singh, S., Kaushik, A., Bendi, A., Chetal, A., Ramakrishna, D. S., Praveen, P. L. (2024). Constructed wetlands as bioeconomic solutions: Rhizofiltration with macrophytes for heavy metal removal. *Emergent Materials*, 1–9. https://doi.org/10.1007/s42247-024-00675-4

Song, P., Xu, D., Yue, J., Ma, Y., Dong, S., Feng, J. (2022). Recent advances in soil remediation technology for heavy metal contaminated sites: A critical review. *The Science of the Total Environment, 838*, 156417.

Steffi, P., Thirumalaiyammal, B., Anburaj, R., Mishel, P. (2022). Artificial intelligence in bioremediation modelling and clean-up of contaminated sites: Recent advances, challenges and opportunities. In *Omics Insights in Environmental Bioremediation* (pp. 683–702). https://doi.org/10.1007/978-981-19-4320-1_29

Sun, A. Y., Scanlon, B. R. (2019). How can big data and machine learning benefit environment and water management: A survey of methods, applications, and future directions. *Environmental Research Letters, 14*, 073001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1b7d

Thangavelu, L., Veeraragavan, G. R. (2022). A survey on nanotechnology-based bioremediation of wastewater. *Bioinorganic Chemistry and Applications, 2022*, 5063177. https://doi.org/10.1155/2022/5063177

Van Liedekerke, M. (2018). Proceedings of the Global Symposium on Soil Pollution 2018. In *Regional Status of Soil Pollution: Europe* (p. 976). Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.

Venkata Mohan, S., Sirisha, K., Chandrasekhara Rao, N., Sarma, P. N., Jayarama Reddy, S. (2004). Degradation of chlorpyrifos contaminated soil by bioslurry reactor operated in sequencing batch mode: bioprocess monitoring. *Journal of Hazardous Materials, 116* (1–2), 39–48. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.05.037

Verma, A. (2022). Bioremediation techniques for soil pollution: An introduction. In *Biodegradation Technology of Organic and Inorganic Pollutants* (p. 289). https://doi.org/10.5772/intechopen.99028

Wang, G., Lu, Y., Wang, T., Zhang, X., Han, J., Luo, W., Shi, Y., & Li, Y., Jiao, W. (2009). Factors influencing the spatial distribution of organochlorine pesticides in soils surrounding chemical industrial parks. *Journal of Environmental Quality, 38*, 180–187. https://doi.org/10.2134/jeq2008.0004

Whelan, M. J., Coulon, F., Hince, G., Rayner, J., McWatters, R., Spedding, T., Snape, I. (2015). Fate and transport of petroleum hydrocarbons in engineered biopiles in polar regions. Chemosphere 131, 232–240. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.088

Yadav, R., Dharne, M. (2024). Utility of metagenomics for bioremediation: A comprehensive review on bioremediation mechanisms and microbial dynamics of river ecosystem. *Environmental Science and Pollution Research International, 31*(12), 18422–18434. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32373-3

SOIL POLLUTION AND POSSIBILITIES OF BIOREMEDIATION

Anesa Ahatović-Hajro[1], Mujo Hasanović[1], Kasim Bajrović[1], Adaleta Durmić-Pašić[1]
[1]*University of Sarajevo - Institute for Genetic Engineering and Biotechnology*
kasim.bajrovic@ingeb.ba

ABSTRACT

Industrialization, urbanization and population growth in the world cause great pressure on the environment. The most common environmental pollutants are polycyclic aromatic hydrocarbons, pesticides, herbicides, heavy metals and metalloids, and micro/nano plastics, which are a growing problem. Soil pollution is a special problem because the resulting chemical, physical and biological changes in the soil adversely affect the ecosystem, and indirectly also human health. Also, the soil is often the final "filter" for many pollutants, which accumulate through the soil and can reach the groundwater and the food chain. The action of pollutants in the soil can lead to a decrease in biodiversity, soil degradation and loss of fertility, which are long-term ecological and economic challenges.

Conventional decontamination methods, which are most often used to remove pollutants from land, require a high level of technological equipment, high energy consumption, but also the use of chemical substances that introduce new variables in the complex soil ecosystem. Bioremediation, a biotechnological approach to land decontamination using organisms that stabilize, accumulate or transform pollutants into less toxic compounds, stands out as a more effective, economically and ecologically sustainable solution. On substrates contaminated by anthropogenic activity or even naturally loaded with pollutants, organisms can be found that have been shaped by natural selection to break down or accumulate certain compounds.

Such organisms have the greatest potential for application in bioremediation. Molecular biological research enables the deciphering of the genetic basis of metabolic processes relevant for the bioremediation function. In the next step, it is possible to apply genetic engineering methods in order to improve or direct the bioremediation potential in the direction of the target pollutant. Since the success of bioremediation depends on numerous factors such as temperature, pH, structure and chemical composition of the soil, the mutual relationship of biological actors, research into the genetic, biochemical and physiological basis of pollutant metabolism, will be of key importance for the realization of the potential of bioremediation as a process. Bioremediation methods try to maintain the natural balance of the ecosystem with a minimal negative impact on the living environment. However, in an effort to improve efficiency, it is first of all necessary to take care of safety.

Keywords: soil pollution, chemical, physical and biological changes in soil, ecosystem, food chain, biodiversity, soil degradation