

The phytoremediation potential of heavy metals from soil using *Poaceae* energy crops: A review

Potencijal fitoremedijacije teških metala iz tla pomoću *Poaceae* kultura za proizvodnju energije: Pregledni rad

Melissa PRELAC¹, Nikola BILANDŽIJA² and Željka ZGORELEC^{3*}

¹ Former student of Graduate study in Agroecology, Faculty of Agriculture University of Zagreb, Svetosimunska cesta 25, 10 000 Zagreb, Croatia

² Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture University of Zagreb, Svetosimunska cesta 25, 10 000 Zagreb, Croatia, phone:+ 385 01 239 3715

³ Department of General Agronomy, Faculty of Agriculture University of Zagreb, Svetosimunska cesta 25, 10 000 Zagreb, Croatia, phone: +385 1 239 4091, *correspondence: zzgorelec@agr.hr

Abstract

Phytoremediation is a method that use plants which can remove or stabilize pollutants in the environment. The aim of the polluted area remediation is to return ecosystems into original condition. Phytoremediation is a green technology used for a wide range of pollutants as well as on various lands, low costs and reduced environment impacts. Energy crops are relatively new in this field of researches and insufficiently explored. However, the results so far show their potential in heavy metal removal. The aim of this research was to examine the available literature and determine the phytoremediation potential of cadmium, chromium, copper, lead, mercury, nickel and zinc from the soil using *Arundo donax*, *Miscanthus x giganteus*, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*, *Sida hermaphrodita* and *Sorghum x drummondii*. According to the researches conditions, studied energy crops are recommended in heavy metals phytoextraction, rhizofiltration, stabilization and accumulation. Still, those plants accumulate higher concentrations of heavy metals in the rhizosphere which makes them heavy metals excluders since heavy metals are not translocated into the plants' shoot system and favorable in the implementation of rhizofiltration as well.

Keywords: *Arundo donax*, excluder, *Miscanthus x giganteus*, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*, phytoextraction, remediation, *Sida hermaphrodita*, *Sorghum x drummondii*

Sažetak

Fitoremedijacija je metoda koja koristi biljke u uklanjanju ili stabiliziranju onečišćujuće tvari u okolišu. Cilj sanacije onečišćenih područja uslijed ljudske aktivnosti je vraćanje takvih ekosustava u prvobitno stanje. Zbog primjene na veliki broj onečišćujućih tvari, kao i mogućnosti provedbe na raznim površinama te zbog manjeg utjecaja na okoliš i nižih troškova, fitoremedijacija se smatra zelenom tehnologijom. Kulture za proizvodnju energije su relativno nove u tom području te nedovoljno istražene. Ipak, dosadašnji rezultati ukazuju na njihovu sposobnost uklanjanja ili stabiliziranja metala u tlu. Cilj ovoga istraživanja bio je proučiti dostupnu literaturu na temu i utvrditi potencijal fitoremedijacije kadmija, kroma, bakra, žive, olova, nikla i cinka iz tla koristeći *Arundo donax*, *Miscanthus x giganteus*, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*, *Sida hermaphrodita* i *Sorghum x drummondii*. Ovisno o uvjetima istraživanja istraživane kulture svrstane su u potencijalne fitoekstraktore, rizofiltratore, stabilizatore i akumulatore teških metala. Ipak, većina ovih biljnih vrsta akumulira veće koncentracije teških metala u korijenu, što ih čini ekskluderima budući da se metali ne translociraju u nadzemne dijelove, te povoljnima u provođenju rizofiltracije.

Ključne riječi: *Arundo donax*, ekskluder, fitoekstrakcija, *Miscanthus x giganteus*, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*, remedijacija, *Sida hermaphrodita*, *Sorghum x drummondii*

Detailed abstract

Environment contamination is one of humanity's most important and very actual issue. Heavy metals are not biodegradable and they require centuries for degradation. There are many different methods of removal and stabilization of heavy metals in the soil but only the phytoremediation is an ecologically, economically and socially acceptable method. Energy crops can be grown on marginal soil and this fact has attracted the attention of many sciences all over the world to research and study this group of crops in phytoremediation. Using many database and science papers, *Arundo donax* (Giant Reed), *Miscanthus x giganteus* (Miscanthus), *Panicum virgatum* (Switchgrass), *Pennisetum purpureum* (Elephant grass), *Sida hermaphrodita* (Virginia Mallow) and *Sorghum x drummondii* (Sudan grass) were investigated in the field of phytoremediation. *A. donax* removes cadmium from the soil efficiently using the process of phytoextraction. If it is grown in a hydroponic system, it will accumulate more cadmium in the root and will show rhizofiltration skills. *A. donax* is an accumulator of chromium and copper but a mercury and nickel excluder. It is not suitable for lead removal. It would show phytoextraction skills if grown in a hydroponic system. *M. giganteus* showed low tolerance of high heavy metals concentration in the soil resulting in yield and growth decrease. Basically, it is an excluder for heavy metals due to its accumulation of heavy metals in the rhizosphere. However, *M. giganteus* were classified as a zinc accumulator and it is

highly recommended in phytoremediation of contaminated lands. *P. virgatum* has rhizofiltration skills in cadmium removal and the phytoextraction one for chromium. However, it is an excluder for copper, nickel, lead and zinc. *P. purpureum* has similar characteristics as *P. virgatum*. To be specific, it is efficient in chromium rhizofiltration as well but it is considered an excluder for cadmium, copper, nickel, lead and zinc. *S. hermaphrodita* has been insufficiently researched in this field but it has shown many excellent skills in remediation of contaminated soil. *S. hermaphrodita* is an extraordinary accumulator of cadmium, nickel, lead and zinc using the phytoextraction process but it is a chromium and copper excluder. The typical characteristic of *S. drummondii* is the inoculum application and mycorrhizal relationships to enhance the uptake of heavy metals from the soil. However, it has been classified as an excluder for all heavy metals which have been studied (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn).

Uvod

Porast broja stanovništva na Zemlji ima za posljedicu povećanje želja i potreba pojednica, što dovodi do intenzivnog razvoja industrije, a samim time i poljoprivrede. Okoliš se narušava raznim antropogenim aktivnostima. Prvotna asocijacija na onečišćenje okoliša odnosi se na onečišćenja iz industrije i prometa. Međutim, onečišćenje okoliša uvjetovano je i urbanizacijom, boljim standardom života, intenzivnom poljoprivrednom proizvodnjom i drugim izvorima. To su izvori koji sudjeluju u povećanju koncentracije raznih kemijskih elemenata i spojeva u atmosferi, tlu, vodi i biljkama. Problematičnu skupinu elemenata koji u definiranim koncentracijama onečišćuju okoliš čine teški metali. Tablica 1 prikazuje maksimalne dozvoljene količine teških metala u tlima određenih zemalja, dok su u Tablici 2 prikazane maksimalne dozvoljene količine teških metala u poljoprivrednim tlima Republike Hrvatske te prirodne srednje vrijednosti metala u tlima Republike Hrvatske. Pojam teški metali odnosi se na skupinu elemenata čija je gustoća veća od $5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, s atomskim brojem većim od 20 (Kisić, 2012). To su potencijalno opasni anorganski elementi, a onečišćenje uzrokuju arsen, bakar, cink, kadmij, krom, nikal, olovo i živa (Wuana i Okieimen, 2011). Teški metali se zapravo nalaze u svim tlima (McLean i Bledsoe, 1992) te u krutoj, tekućoj i plinovitoj fazi tla. Nalaze se u sastavu matične stijene, ali su njihove koncentracije vrlo niske stoga ne predstavljaju opasnost za okoliš. Teški metali se tijekom dužeg vremenskog razdoblja akumuliraju u profilima tla zato što nisu biorazgradivi te uzrokuju dugoročne posljedice u pogledu plodnosti i kvalitete tla, a neki mogu izazvati toksičnost kod biljaka te ljudi i životinja ukoliko se takve biljke uzgajaju za proizvodnju hrane (Dellantonio i sur., 2007, 2008; Mulligan i sur., 2001; Nicholson i sur., 2003). Zabilježen je slučaj gdje se ispitivala fitoakumulacija As i Ni u ječmu i soji uzgajanim u različitim omjerima tla i otpadnog pepela iz termoelektrane u Tuzli (Zgorelec i sur., 2008). Autori ukazuju na više akumulirane koncentracije nikla u soji od prirodnih, a koja se koristi za prehranu ljudi i/ili životinja. Ipak, određeni teški metali (Cu, Ni i Zn) su esencijalni za biljke, životinje i ljude, ali i potencijalno toksični (Adriano, 2001). U istraživanju Prevendar-Crnić i sur. (2016) praćene su koncentracije žive u glistama (*Eisenia fetida*) i poljoprivrednom tlu (Bašić i sur., 2009) na četiri lokacije u blizini postrojenja za proizvodnju i obradu prirodnog plina u sjevernom dijelu Republike Hrvatske, u razdoblju od 1990. do 2012. Autori utvrđuju veće koncentracije žive u glistama u odnosu na tlo, ali zaključuju da

takve koncentracije žive ne predstavljaju rizik za ljudsko zdravlje u promatranom području. Biodostupnost metala u tlu od velike je važnosti za kvalitetu tla i korištenje u poljoprivredne svrhe (Loska i sur., 2004). Tip i svojstva tla, kao i oblik metala u tlu, imaju značajnu ulogu u dostupnosti metala u tlu. Skupine autora (Zgorelec i sur., 2009; Žužul i sur., 2011) utvrđuju veće koncentracije arsena u amfiklejnoj-vertičnom tipu tla te u glejnoj-hipoglejnoj mineralnoj tipu tla, u odnosu na ostala ispitana tipa tla u blizini postrojenja za proizvodnju i obradu prirodnog plina u Republici Hrvatskoj. Reakcija tla je vrlo važan čimbenik koji može povećati ili smanjiti dostupnost metala. Primjer, Cu i Pb postaju dostupniji pri pH od 7,5 do 7,8 kao rezultat formiranja kompleksa sa ligandima čija je topljivost povezana sa topljivošću organske tvari. Važni čimbenici su i sama matična stijena koja predstavlja prirodni izvor metala u tlu te sadržaj organske tvari koja ograničava dostupnost metala zbog stvaranja kompleksa koji su netopljivi ili djelomično topljivi u vodi. Dostupnost metala u tlu uvjetovana je i kationskim izmjenjivačkim kompleksom o kojemu ovisi način i vrsta vezanja na adsorpcijski kompleks, redoks potencijalom budući da su oksidni oblici metala odmah usvojivi od strane biljke te sadržajem gline i karbonata u tlu (Bosiacki i sur., 2014; McLean i Bledsoe, 1992). Smatra se da su biljke dobar indikator onečišćenja tla teškim metalima (Bosiacki i sur., 2014). U svrhu saniranja područja onečišćena teškim metalima, razvila se metoda koja se koristi biljkama sa sposobnošću akumuliranja, uklanjanja, pretvorbe i stabilizacije teških metala u tlu, sedimentima, podzemnim vodama i atmosferi. Ova se metoda saniranja naziva fitoremedijacija, a pojam dolazi od grčke riječi "phyto" što znači biljka i od latinskog sufiksa "remedium" što znači sposoban za liječiti ili obnoviti. Prednosti fitoremedijacije očituju se u mogućnosti primjene ove metode na veliki broj onečišćujućih tvari, ne zahtjeva jako skupu opremu i visoko specijalizirane stručnjake za provedbu, iako svakako zahtjeva znanje, a najčešće se primjenjuje *in situ* što smanjuje vjerojatnost širenja onečišćujućih tvari i omogućuje zadržavanje biološke aktivnosti i strukture tla, jednostavnija je za primjenu i održavanje te je ekološki, ekonomski i socijalno prihvaćena metoda. Najveći nedostatak ove metode je zapravo duže vremensko razdoblje (30-40 godina) koje je potrebno za obnovu određenog područja, ovisno o stupnju onečišćenja i drugim faktorima. Isto tako, autori (Alkorta i sur., 2004; Newman i Reynolds, 2004) navode problematiku uvođenja potencijalno invazivnih vrsta koje se koriste u fitoremedijaciji, a ne pripadaju izvornim vrstama. U posljednjim godinama pojavio se trend uzgoja biljaka za proizvodnju energije na tlima onečišćenim teškim metalima. Kulture za proizvodnju energije (energetske kulture) su one koje su uzgojene isključivo za svrhu proizvodnje biomase. Cilj uzgoja energetske kulture je proizvodnja, što je moguće veće količine biomase po jedinici površine s ciljem njene pretvorbe u energiju. Energetske kulture su od velike ekološke važnosti jer osim proizvodnje "zelene energije", mogu se koristiti u borbi smanjenja emisija stakleničkih plinova. Bilandžija i sur. (2014) navode potencijal *Miscanthus x giganteus* u redukciji emisije stakleničkih plinova i to smanjenjem emisije CO₂ u okoliš tijekom uzgoja te sekvencijom ugljika u tlo i biljku. Energetske kulture mogu biti jednogodišnje ili višegodišnje biljke. Za razliku od jednogodišnjih, višegodišnje energetske kulture nemaju veće zahtjeve tijekom uzgoja i to prvenstveno u smislu agrotehnike i kvalitete poljoprivrednog tla. Mogućnost uzgoja na tlima lošije kvalitete je izuzetno bitno svojstvo, jer se time izbjegava kolizija proizvodnje energije i hrane (Bilandžija, 2014). U ovome radu proučavane su jednogodišnja (*Sorghum x drummondii*) i višegodišnje (*Arundo donax*, *Miscanthus x*

giganteus, *Panicum virgatum*, *Pennisetum purpureum*, *Sida hermaphrodita*) kulture koje se koriste za proizvodnju energije, u polju fitoremedijacije. Naime, navedene kulture pokazale su iznimne sposobnosti fitoremedijacije tala onečišćenih teškim metalima. Ipak, tema istraživanja je jako kompleksna zbog raznih uvjeta koji utječu na fitoremedijaciju onečišćenih područja kao što su klima, svojstva tla i biljke, uvjeti u tlu, uvjeti uzgoja, selekcija kultivara, što se uzelo u obzir prilikom pregleda literature.

Table 1. Maximum allowable concentrations of heavy metals in soils of specific countries (in mg*kg⁻¹) (Fagbote i Olanipekun, 2010; Parizanganeh i sur., 2010)

Tablica 1. Maksimalne dozvoljene količine teških metala u tlima (mg*kg⁻¹) određenih zemalja (Fagbote i Olanipekun, 2010; Parizanganeh i sur., 2010)

Heavy metal ^a	Austria ^b	Canada ^c	Germany ^d	Great Britain ^e	Japan ^f	Poland ^g
Cd	5	8	2	3	-	3
Cr	100	75	200	50	-	100
Cu	100	100	50	100	125	100
Ni	100	100	100	50	100	100
Pb	100	200	500	100	400	100
Zn	300	400	300	300	250	300

^a Teški metal

^b Austrija

^c Kanada

^d Njemačka

^e Velika Britanija

^f Japan

^g Poljska

Table 2. Maximum allowable concentrations of heavy metals in arable soils of Croatia (»Narodne novine« 09/14) and their natural mean values according to the Croatian Geochemical Atlas (in mg*kg⁻¹)

Tablica 2. Maksimalne dozvoljene količine teških metala u poljoprivrednim tlima Republike Hrvatske (»Narodne novine« 09/14) i prirodne srednje vrijednosti tih metala u tlima Republike Hrvatske prema Geokemijskom Atlasu Republike Hrvatske (mg*kg⁻¹)

Metal ^a	Ordinance on Agricultural Land Protection against Pollution (»Narodne novine« 09/14) ^b			Croatian Geochemical Atlas (mean) ^f
	Sandy soils ^c	Silt loam soils ^d	Clay soils ^e	
Cd	0.5	1.0	2.0	0.7
Cr	40	80	120	97
Cu	60	90	120	30
Hg	0.5	1.0	1.5	0.09
Ni	30	50	75	55
Pb	50	100	150	38
Zn	60	150	200	99

^a Metal

^b Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja NN (09/14)

^c Pjeskovita tla

^d Praškasto-ilovasta tla

^e Glinasta tla

^f Geokemijski atlas Republike Hrvatske (srednja vrijednost)

Potencijal fitoremedijacije teških metala iz tla pomoću kultura za proizvodnju energije

***Arundo donax* L. (eng. Giant Reed)**

A. donax L. je višegodišnja, visoka i uspravna trava sa C₃ načinom fotosinteze. Pripada porodici *Poaceae* (trave). Porijeklo *A. donax* nije još uvijek točno definiran, ali vjeruje se da potječe iz Azije i područja Mediterana. Danas se ova biljna vrsta uzgaja u umjerenim i suptropskim zonama. Dobro podnosi nepogodne uvjete uzgoja, ali preferira i najbolje uspijeva na područjima dobro opskrbljena vodom (Angelini i sur., 2005).

Puno je istraživanja provedeno kako bi se utvrdio potencijal *A. donax* u fitoremedijaciji onečišćenih tala. *A. donax* se pokazala kao iznimno potencijalna biljna

vrsta u tom polju. Utvrđena je sposobnost uzgoja ove biljne vrste na tlima onečišćenim kadmijem i niklom bez pojave simptoma toksičnosti ili smanjenja prinosa (Papazoglou i sur., 2005, 2007). U fitoremedijaciji tala onečišćenim kadmijem, *A. donax* pokazao se uspješnim u rizofiltraciji iz hidropona (Dürešová i sur., 2014; Sagehashi i sur., 2011) te u fitoekstrakciji tog elementa iz medija (Chierchia, 2011; Sabeen i sur., 2013). Elhawat i sur. (2014) su proučavali sposobnost dva ekotipa *A. donax*, BL i 20 SZ u akumulaciji bakra iz tla. Najveće koncentracije Cu zabilježene su u korijenu ekotipa BL, ali oba ekotipa pokazala su se kao dobri remedijatori onečišćenog tla. *A. donax* pokazao se dobrim akumulatorom žive iz tla sukladno istraživanju Bonanna (2012). Ipak, isti autor navodi da ova biljna vrsta nije efikasna u uklanjanju nikla iz tla. Prema istraživanju Sidelle (2013) u kojemu je *A. donax* navodnjavan vodom onečišćenom teškim metalima, ova se biljna vrsta svrstava u skupinu ekskludera u remedijaciji tala onečišćenog olovom. Dürešová i sur. (2014) provela je istraživanje u hidroponima koji su bili onečišćeni sa $0,28 \mu\text{M Zn} \cdot \text{L}^{-1}$. U ovom istraživanju *A. donax* uklonio je sav cink iz otopine. Dakle, *A. donax* pokazao se vrlo učinkovitim u remedijaciji tala onečišćenim Cd, Cr, Cu, Hg, Pb i Zn.

***Miscanthus x giganteus* (eng. Miscanthus)**

M. giganteus priroda porodici *Poaceae* (trave). Trave roda *Miscanthus sp.* spadaju pod kulture s C_4 putem fotosinteze, njegove prirodne preferencije su blage temperature i visoka opskrbljenost vodom. Pojavljuju se unutar visokih travnjaka istočne Azije, od tropa i subtropa do pacifičkih otoka, toplih temperaturnih regija i subarktičkog područja. Međutim, naturalizacija trave *Miscanthus sp.* u umjerenijim klimatskim uvjetima upućuju na njegovu relativnu toleranciju prema temperaturi i dostupnosti vode. Izvanredna je prilagodljivost trave *Miscanthus x giganteus* različitim okolišnim čimbenicima, što pri tome čini ovu kulturu pogodnom za osnivanje usjeva u različitim europskim i sjevernoameričkim klimatskim uvjetima (Greef i Deuter, 1993.). Glavne karakteristike trave *Miscanthus x giganteus* su: izuzetna prilagodljivost uzgoju u različitim klimatsko-pedološkim uvjetima (od razine mora do 3000 m nadmorske visine), mogućnost uzgoja na tlima lošije kvalitete, prirodan je sterilni hibrid (ne postoji mogućnost nekontroliranog širenja), visoki prinosi suhe tvari po jedinici površine, izuzetna otpornost na bolesti i štetočinje (tretiranje pesticidima nije potrebno), mali zahtjevi prema gojidbenim tretmanima te visoka energetska vrijednost (Bilandžija, 2014.).

Višegodišnja trava *Miscanthus* ima sposobnost rasta na područjima koja su onečišćena nižom koncentracijom onečišćujućih tvari. Budući da ova vrsta usvaja male količine teških metala u nadzemnom dijelu, dobiva se biomasa dobrih svojstava za proizvodnju energije (Pidlisnyuk i sur., 2014). Isti autori navode i visoki potencijal *Miscanthus* u stabilizaciji i uklanjanju teških metala iz onečišćenih područja. Autori također kao prednost navode da bi veća potreba proizvodnje svih višegodišnjih trava, a posebno *Miscanthus* kao biogoriva mogla dovesti i do veće upotrebe istog u fitoremedijaciji tala. Nadalje, u istraživanju Fernanda i Oliveire (2004) analiziran je utjecaj teških metala (Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb i Zn) na rast i prinos *M. giganteus*. Autori su došli do zaključka da visoke koncentracije navedenih metala uzrokuju smanjenje rasta te prinosa biomase i suhe tvari kod *M. giganteus*. Ipak, autori

preporučuju primjenu ove biljne vrste u fitoremedijaciji ukoliko je cilj uzgoja sanacija onečišćenih područja. Isto tako, navedeni autori svrstavaju *M. giganteus* u skupinu ekskludera. Do istog su zaključka došli Pavel i sur. (2014) koji su dokazali pripadnost ove biljne vrste u ekskludere, naročito za Pb. Nadalje, Arduini i sur. (2006) proveli su istraživanje u kojemu su zabilježene veće koncentracije kadmija i kroma u korijenu *M. giganteus*. Ipak, Pogrzeba i sur. (2013) navode sposobnost ove biljke u iznošenju znatnih količina cinka iz onečišćenih područja te primjećuju značajne koncentracije cinka u nadzemnim dijelovima *M. giganteus*, stoga ga svrstavaju u skupinu akumulatora.

***Panicum virgatum* L. (eng. Switchgrass)**

P. virgatum L. je uspravna, gruba, višegodišnja C₄ biljka. Pripada porodici *Poaceae* (trave). Smatra se da je porijeklom iz Sjeverne Amerike i Kanade. Uzgaja se u raznim geografskim zonama, a najbolje uspijeva u umjerenj zoni. Najčešće se uzgaja u monokulturi što je dovelo do osjetljivosti na bolesti i štetnike. Dobro uspijeva na marginalnim tlima, a najbolje rezultate daje na fino i grubo teksturiranim tlima (Rinehart, 2006). Danas se najviše uzgajaju hibridi boljih svojstava.

Prema Chenovom i sur. (2012) istraživanju, *P. virgatum* se svrstava u skupinu akumulatora kadmija. Ipak, Abe i sur. (2008) utvrđuju značajne količine kadmija akumuliranog u korijenu. Isto tako, veće količine kroma zabilježene su u korijenu *P. virgatum* kod tretiranja većom koncentracijom Cr (600 mg Cr*kg⁻¹) (Li i sur., 2011). Do istog zaključka došli su i Shahandeh i Hosser (2000) u čijem se istraživanju Cr (IV) oblik kroma znatno više akumulirao u korijenu *P. virgatum* u odnosu na Cr (III). Gerst (2014) zaključuje da *P. virgatum* nema značajnu sposobnost u uklanjanju žive iz onečišćenog medija. Johnson (2014) dolazi do zaključka da je *P. virgatum* potencijalan kandidat u uklanjanju olova iz medija, naročito primjenom EDTA (Etilendiamintetraoctena kiselina), dok Žurek i sur. (2013) ukazuju na neefikasnost *P. virgatum* u akumulaciji olova iz medija pri većim koncentracijama tog metala u mediju. *P. virgatum* ima karakteristike akumulatora za cink sukladno rezultatima Chena i sur. (2012) i Žureka i sur. (2013). Potonji napominju da *P. virgatum* nije efikasan u akumulaciji cinka ukoliko je stupanj onečišćenja visok. Iz navedenih istraživanja *P. virgatum* se klasificira u akumulatore i ekskludere, ovisno o uvjetima istraživanja.

***Pennisetum purpureum* (Schum.) (eng. Elephant grass)**

P. purpureum je stojeća, čvrsta, višegodišnja C₄ trava koja se često križa sa *P. americanum* za dobivanje hibrida boljih svojstava. Pripada porodici *Poaceae* (trave). Porijeklom je iz Afrike, sa područja Zimbabwea. Danas je rasprostranjen u tropskim i suptropskim zonama. Preferira područja sa visokom količinom oborina, ali dobro podnosi sušna razdoblja zbog dobro razvijenog korijenovog sustava. Najbolje uspijeva na dubokim i plodnim ilovačama. *P. purpureum* ima sposobnost usvajanja viška dušika i fosfora iz tla te se preporučuje njegova primjena na područjima koja se navodnjavaju otpadnom vodom zato što djeluje kao biofilter (Cassel i sur., 2005).

U uklanjanju kadmija iz tla pokazao se vrlo učinkovitim te ga nekoliko autora preporučuju u fitoremedijaciji područja onečišćenim ovim metalom (Abdel-Salam,

2012; Zhang i sur., 2010). Prema rezultatima istraživanja Lotfy i Mostafe (2014) u kojemu je ispitivana sposobnost *P. purpureum* i drugih biljnih vrsta u uklanjanju kroma iz tla, *P. purpureum* je akumulirao visoke koncentracije kroma u korijenu te se klasificira ekskluderom. Isto tako, veće količina bakra, olova i cinka akumulirane su u podzemnom dijelu biljke te se svrstava u skupinu ekskludera za navedene metale (Lotfy i sur., 2012; Yang i sur., 2010; Zhang i sur., 2010).

***Sida hermaphrodita* (Rusby) (eng. Virginia Mallow)**

S. hermaphrodita je travnata, medonosna, C₄ biljna vrsta. Pripada porodici *Malvaceae* (sljezovi). Porijeklom je iz Sjeverne Amerike te se 1930-ih godina proširila na području bivšeg SSSR-a odakle se širi u svim dijelovima Europe. *S. hermaphrodita* dobro uspijeva na kamenitim ili pjeskovitim tlima i pritom stvara visoke prinose. Ipak, najbolje uspijeva u umjereno vlažnim područjima. Danas se uzgajaju hibridi i kultivari koji stvaraju veće prinose svježih mase po hektaru godišnje u odnosu na izvorne vrste.

Ova biljna vrsta nije još dovoljno istražena u polju fitoremedijacije. Ipak, pokazala je odlične sposobnosti akumulacije kadmija i uklanjanja tog elementa fitoekstrakcijom (Ociepa, 2011). Akumulira umjerene količine kroma i bakra iz tla te se svrstava u skupinu akumulatora (Borkowska i sur., 2001), ali Antonkiewicz i Jasiewicz (2002) utvrdili su veće koncentracije bakra u korijenu *S. hermaphrodita*. Sukladno rezultatima njihovog istraživanja, *S. hermaphrodita* je ekskluder za bakar, ali i za nikal. Borkowska i sur. (2001) primjećuju znatno smanjenje početnih koncentracija olova i cinka u tlu nakon fitoremedijacije tog područja *S. hermaphrodita*.

***Sorghum x drummondii* (Steud.) (eng. Sudan grass)**

S. drummondii je jednogodišnja, jara, brzorastuća kultura koja posjeduje C₄ način fotosinteze. Pripada porodici *Poaceae* (trave). Ova vrsta je hibrid *S. bicolor* i *S. arundinaceum*. Nastao je na području od južnog Egipta do Sudana, a 1909. godine uvezen je u SAD gdje se ubrzo počeo uzgajati kao krmna vrsta. Rasprostranjen je u Južnoj Americi, Australiji, južnoj Africi te srednjoj i sjevernoj Europi. Najbolje uspijeva na područjima čija se ukupna količina oborina godišnje kreće između 600 i 900 mm. Dobro podnosi sušna razdoblja te se može uzgajati na svim tipovima tla (FAO, 2012).

Posljednjih godina *S. drummondii* je postao zanimljiv istraživačima zbog njegove sposobnosti uklanjanja teških metala iz medija. Pivetz (2001) navodi sposobnost ove biljne vrste za usvajanje i akumuliranje kobalta, dok Da-lin i sur. (2011) njegovu visoku otpornost i korijensku aktivnost kod visokih koncentracija Cd²⁺ u mediju. Za *S. drummondii* karakteristična je primjena inokulacije mikroorganizama za uspješniju remedijaciju onečišćenog područja (Shim i sur., 2014). Isto tako, primjena određenih gljiva, koje sa ovom biljnom vrstom formiraju mikoriznu simbiozu, doprinose boljoj akumulaciji teških metala iz tla (Gaur i Adholeya, 2004). Ipak, sukladno rezultatima proučavanih istraživanja (Angelova i sur., 2011; López-Chuken i Young, 2005), *S. drummondii* pripada skupini ekskludera za kadmij, bakar, olovo i cink.

Zaključak

Onečišćenje okoliša postao je ozbiljan problem čovječanstva. Najveći potencijal u sanaciji i obnovi onečišćenih područja imaju zelene tehnologije, metode i tehnike koje su ekološki i ekonomski prihvatljive. Fitoremedijacija kulturama za proizvodnju energije je još uvijek u fazi istraživanja. *A. donax* je biljna vrsta koja je izrazito otporna na visoke koncentracije teških metala u tlu, odnosno te koncentracije ne utječu na kvalitetu i kvantitetu biomase. U hidroponima onečišćenim kadmijem ima svojstva rizofiltratora, a ako se uzgaja na tlima djeluje kao fitoekstraktor. *A. donax* je akumulator za krom i bakar. Akumulira ove metale u nadzemnim dijelovima. Usvaja iznimne količine žive i nikla te ih akumulira u korijenu. Nije učinkovit u usvajanju i akumuliranju olova. Ima sposobnost uklanjanja cinka iz hidropona i to fitoekstracijom. Dakle, *A. donax* ima karakteristike ekskludera, akumulatora i fitoekstraktora, ovisno o metalu i uvjetima uzgoja. *M. giganteus* je u gotovo svim proučenim istraživanjima pokazao slabu otpornost na visoke koncentracije teških metala u tlu što je za posljedicu imalo smanjenje rasta te prinosa biomase i suhe tvari. Unatoč tome, preporučuje se njegova primjena u fitoremedijaciji ukoliko glavni cilj uzgoja nije dobivanje visokog prinosa, već isključivo sanacija onečišćenih područja. Mnogi autori svstavaju ga u skupinu ekskludera, budući da akumulira teške metale upravo u rizosfernom dijelu. Ipak, ova biljna vrsta akumulira značajne količine cinka u nadzemnim dijelovima te se smatra akumulatorom ovog metala. *P. virgatum* je vrlo tolerantan na teške metale u mediju, iako je u određenim istraživanjima zabilježen pad prinosa suhe tvari. Ima sposobnost usvajanja teških metala iz kiselih tala. Povoljan je za rizofiltraciju na tlima onečišćenim kadmijem. Za krom djeluje kao fitoekstraktor, dok se za ostale metale klasificira kao ekskluder, iako za Zn ima karakteristike akumulatora. *P. purpureum* može biti fitoekstraktor ili rizofiltrator kadmija. Za ostale metale (Cr, Cu, Ni, Pb i Zn) klasificira se kao ekskluder. *S. hermaphrodita* nije još dovoljno istražena u ovom području. Ipak, učinkovito uklanja krom i bakar iz tla, najčešće korijenom. Izniman je fitoekstraktor za kadmij, nikal, olovo i cink. Naime, u većini istraživanja zabilježene su visoke koncentracije navedenih metala u nadzemnim dijelovima biljke koje su često bile veće od onih u tlu. Smatra se da će ova biljka u budućnosti imati značajnu ulogu u fitoremedijaciji. *S. drummondii* pokazao je tolerantnost na visoke koncentracije Co u tlu te veću korijensku aktivnost pri većim koncentracijama Cd u mediju. Za *S. drummondii* je karakteristična primjena inokulacije radi povećanja sposobnosti akumulacije teških metala. Isto tako, stvaranje mikoriznih odnosa sa gljivama i mikrobiološka fiksacija pozitivno djeluju na usvajanje metala iz tla. Ova biljna vrsta svrstava se u skupinu ekskludera za sve proučavane metale (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb i Zn).

Dakle, svrstavanje određenih biljnih vrsta u pripadajuću skupinu (hiperakumulator, akumulator, ekskluder, fitoekstraktor i sl.) jako je kompleksno zbog različitih uvjeta istraživanja (tip tla, pH, klima, lokacija, medij, svojstva biljke, odabir kultivara i sl.). Ipak, zaključuje se da su *A. donax*, *M. giganteus*, *P. virgatum*, *P. purpureum*, *S. hermaphrodita* i *S. drummondii* učinkoviti u sanaciji tala onečišćenih teškim metalima (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb i Zn). Budući da se navedene biljne vrste koriste za proizvodnju energije, a iz navedenih istraživanja zaključujemo da imaju značajan potencijal remedijacije tla, njihova odlika svakako je mogućnost obnove onečišćenih područja te istovremena proizvodnja biomase povoljnih karakteristika za dobivanje energije. Stoga primjena istraživanih *Poaceae* i *Malvaceae* kultura za proizvodnju

energije, kao jedna od zelenih tehnologija, u fitoremedijaciji tala daje ekološka, ekonomska, ali i društvena rješenja za onečišćena područja, a ujedno se mogu zadovoljiti i potrebe za energijom.

Literatura

- Abdel-Salam, M. A. (2012) Chemical and Phyto-Remediation of Clayey and Sandy Textured Soils Polluted with Cadmium. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 12 (6), 689-693. DOI: [10.5829/idosi.aejaes.2012.12.06.1801](https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2012.12.06.1801)
- Abe, T., Fukami, M., Ogasawara, M. (2008) Cadmium accumulation in the shoots and roots of 93 weed species. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54 (4), 566-573. DOI: [10.1111/j.1747-0765.2008.00288.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2008.00288.x)
- Adriano, D. C. (2001) *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals*. 2nd edition. New York, USA: Springer-Verlag Inc.
- Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J., Amezaga, I., Albizu, I., Garbisu, C. (2004) Recent Findings on the Phytoremediation of Soils Contaminated with Environmentally Toxic Heavy Metals and Metalloids Such as Zinc, Cadmium, Lead, and Arsenic. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 3 (1), 71-90.
- Angelini, L., Ceccarini, L., Bonari, E. (2005) Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. *European Journal of Agronomy*, 22 (4), 375-389. DOI: [10.1016/j.eja.2004.05.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.05.004)
- Angelova, V. R., Ivanova, R. V., Delibaltova, V. A., Ivanov, K. I. (2011) Use of Sorghum Crops for *in situ* Phytoremediation of Polluted Soils. *Journal of Agricultural Science and Technology A* 1, 2011 (9), 693-702.
- Antonkiewicz, J., Jasiewicz, C. (2002) The use of plants accumulating heavy metals for detoxication of chemically polluted soils. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 5 (1), 1-10.
- Arduini, I., Ercoli, L., Mariotti, M., Masoni, A. (2006) Response of *Miscanthus* to toxic cadmium applications during the period of maximum growth. *Environmental and Experimental Botany*, 55, 29-40. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2004.09.009](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.09.009)
- Bašić, F., Zgorelec, Ž., Kisić, I., Mesić, M., Sajko, K., Vuković, I., Jurišić, A. (2009) Dinamika sadržaja žive u poljoprivrednim tlima Podravine u višegodišnjem razdoblju (1991 – 2008). In: Vasić-Rački, Đ., ed. (2009) *Tehnologije zaštite tla i odlaganja otpada*. Zadar, Hrvatska, 18-21 October 2009, Kutina: Petrokemija d.d.
- Bilandžija, N. (2014) Perspektiva i potencijal korištenja kulture *Miscanthus x giganteus* u Republici Hrvatskoj. *Inženjerstvo okoliša*, 1 (2), 81-87.

- Bilandžija, N., Zgorelec, Ž., Bilandžija, D., Mesić, M. (2014) Utjecaj uzgoja i energetskog iskorištenja lignoceluloznih usjeva na mogućnost smanjenja emisija CO₂ –primjer: kultura *Miscanthus x giganteus*. In: Košutić, S., ed. (2014) Actual Tasks on Agricultural Engineering. Opatija, Hrvatska, 25-28 February 2014, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet.
- Bonanno, G. (2012) *Arundo donax* as a potential biomonitor of trace element contamination in water and sediment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 80, 20-27. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2012.02.005](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.02.005)
- Borkowska, H., Jackowska, I., Piotrowski, J., Styk, B. (2001) Suitability of Cultivation of Some Perennial Plant Species on Sewage Sludge. *Polish Journal of Environmental Studies*, 10 (5), 379-381.
- Bosiacki, M., Kleiber, T., Markiewicz, B. (2014) Continuous and Induced Phytoextraction — Plant-Based Methods to Remove Heavy Metals from Contaminated Soil. In: Hernandez-Soriano, M. C., ed. (2014) Environmental Risk Assessment of Soil Contamination. Rijeka: InTech. 575-612. DOI: [10.5772/57257](https://doi.org/10.5772/57257)
- Cassel, F. S., Goorahoo, D., Adhikari, D. D., Rothberg, M. (2005) Use of the Elephant Grass as a Bio-Filter. In: Science & Policy in California Agriculture, Plant and Soil Conference. Modesto, California. 1-2 February 2005, 152-153.
- Chen, B., Lai, H., Juang, K. (2012) Model evaluation of plant metal content and biomass yield for the phytoextraction of heavy metals by switchgrass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 80, 393-400. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2012.04.011](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.04.011)
- Chierchia, A. (2011) L'*Arundo donax* per la bonifica dei suoli contaminati da metalli pesanti. Master thesis. University of Napoli "Federico II".
- Da-lin, L., Kai-qi, H., Jing-jing, M., Wei-wei, Q., Xiu-ping, W., Shu-pan, Z. (2011) Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sorghum plants. *African Journal of Biotechnology*, 10 (70), 15770-15776. DOI: [10.5897/AJB11.848](https://doi.org/10.5897/AJB11.848)
- Dellantonio, A., Fitz, W. J., Čustović, H., Grünwald, H., Repmann, F., Schneider, B. U., Edwards, D., Zgorelec, Ž., Marković, M., Wenzel, W. W. (2007) Trace element uptake in agricultural and wild plants grown on alkaline coal ash disposal sites in Tuzla (Bosnia and Herzegovina). In: Zhu, Y., Lepp, N., Naidu, R., Proceedings of the 9th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements (ICOBTE). Beijing, China, 15-19 July 2007.
- Dellantonio, A., Fitz, W. J., Čustović, H., Repmann, F., Schneider, B. U., Grünwald, H., Gruber, V., Zgorelec, Ž., Zerem, N., Carter, C., Marković, M., Puschenreiter, M., Wenzel, W. W. (2008) Environmental risks of farmed and barren alkaline coal ash landfills in Tuzla, Bosnia and Herzegovina. *Environmental pollution*, 153 (3), 677-686.

- Düřešová, Z., Šušnovská, A., Horník, M., Pipíška, M., Gubišová, M., Gubiš, J., Hostin, S. (2014) Rhizofiltration potential of *Arundo donax* for cadmium and zinc removal from contaminated wastewater. *Chemical Papers*, 68 (11), 1452-1462. DOI: [10.2478/s11696-014-0610-2](https://doi.org/10.2478/s11696-014-0610-2)
- Elhawat, N., Alshaal, T., Domokos-Szabolcsy, É., El-Ramady, H., Márton, L., Czakó, M., Kátai, J., Balogh, P., Sztrik, A., Molnár, M., Popp, J., Fári, M. (2014) Phytoaccumulation potentials of two biotechnologically propagated ecotypes of *Arundo donax* in copper-contaminated synthetic wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (12), 7773-7780. DOI: [10.1007/s11356-014-2736-8](https://doi.org/10.1007/s11356-014-2736-8)
- Fagbote, E. O., Olanipekun, E. O. (2010) Evaluation of the Status of Heavy Metal Pollution of Soil and Plant (*Chromolaena odorata*) of Agbabu Bitumen Deposit Area, Nigeria. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 5 (4), 241-248.
- Fernando, A., Oliveira, J. S. (2004) Effects on growth, productivity and biomass quality of *Miscanthus x giganteus* of soils contaminated with heavy metals. In: 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Rome, Italy. 10-14 May 2004, 387-390.
- Food and Agriculture Organization, FAO (2012) The Grassland Index. [online] Rome, Italy: FAO. Available at: <http://www.fao.org/ag/agp/AGPC/doc/gbase/data/Pf000494.HTM> [Accessed 15 April 2015]
- Gaur, A., Adholeya, A. (2004) Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Science*, 86 (4), 528-534.
- Gerst, E. A. (2014) A Novel Approach to use Second Generation Biofuel Crop Plants (*Camelina sativa*, *Miscanthus giganteus*, and *Panicum virgatum*) to Remediate Abandoned Mine Lands in Pennsylvania. Master thesis. The Pennsylvania State University.
- Greef, J. M., Deuter, M. (1993) Syntaxonomy of *Miscanthus x giganteus*. *Angewandte Botanik, Journal of Applied Botany*, 67, 87-90.
- Halamić, J., Peh, Z., Miko S., Galović, L., Šorša, A. (2009) Geokemijski atlas Republike Hrvatske. Zagreb: Hrvatski geološki institut.
- Johnson, D. M. (2014) Induced Phytoextraction of Lead from Contaminated Urban Soil Through Manipulation of Rhizosphere and Plant Biogeochemical Functions in Switchgrass (*Panicum virgatum*). Master thesis. Kennesaw State University.
- Kisić, I. (2012) Sanacija onečišćenoga tla. Zagreb: Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

- Li, C., Wang, Q. H., Xiao, B., Li, Y. F. (2011) Phytoremediation Potential of Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) for Cr-polluted Soil. In: 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), Vol. 3. Xi'an, 20-22 May 2011. DOI: [10.1109/ISWREP.2011.5893582](https://doi.org/10.1109/ISWREP.2011.5893582)
- López-Chuken, U. J., Young, S. D. (2005) Plant Screening of Halophyte Species for Cadmium Phytoremediation. *Zeitschrift für Naturforschung* 2005, 60 (3-4), 236-43.
- Loska, K., Wiechuła, D., Korus, I. (2004) Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 30 (2), 159-165. DOI: [10.1016/S0160-4120\(03\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00157-0)
- Lotfy, S. M., Mostafa, A. Z., Abdel-Sabour, M. F. (2012) Phytoextraction of Cadmium From and Zinc Contaminated Soils. In: 3rd International Conference on Radiation Sciences and Applications. Hurghada, Egypt, 12-16 November 2012.
- Lotfy, S., Mostafa, A. (2014) Phytoremediation of contaminated soil with cobalt and chromium. *Journal of Geochemical Exploration*, 144, 367-373. DOI: [10.1016/j.gexplo.2013.07.003](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.07.003)
- McLean, J. E., Bledsoe, B. E. (1992) Behavior of Metals in Soils. Washington: United States Environmental Protection Agency. EPA/540/S-92/018
- Mulligan, C. N., Yong, R. N., Gibbs, B. F. (2001) Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology* 60, 193-207. DOI: [10.1016/S0013-7952\(00\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00101-0)
- Narodne novine 9/14 (2014) Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja. Zagreb: Narodne novine d.d.
- Newman, L., Reynolds, C. (2004) Phytodegradation of organic compounds. *Current Opinion in Biotechnology*, 15 (3), 225-230. DOI: [10.1016/j.copbio.2004.04.006](https://doi.org/10.1016/j.copbio.2004.04.006)
- Nicholson, F., Smith, S., Alloway, B., Carlton-Smith, C., Chambers, B. (2003) An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Science of The Total Environment*, 311 (1-3), 205-219. DOI: [10.1016/S0048-9697\(03\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00139-6)
- Ociepa, E. (2011) The Effect of Fertilization on Yielding and Heavy Metals Uptake by Maize And Virginia Fanpetals (*Sida hermaphrodita*). *Archives of Environmental Protection*, 37 (2), 123-129.
- Papazoglou, E., Karantounias, G., Vemmos, S., Bouranis, D. (2005) Photosynthesis and growth responses of giant reed (*Arundo donax* L.) to the heavy metals Cd and Ni. *Environment International*, 31 (2), 243-249. DOI: [10.1016/j.envint.2004.09.022](https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.09.022)
- Papazoglou, E., Serelis, K., Bouranis, D. (2007) Impact of high cadmium and nickel soil concentration on selected physiological parameters of *Arundo donax* L. *European Journal of Soil Biology*, 43 (4), 207-215. DOI: [10.1016/j.ejsobi.2007.02.003](https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.02.003)

- Parizanganeh, A., Hajisoltani, P., Zamani, A. (2010) Concentration, Distribution and Comparison of Total and Bioavailable Metals in Top Soils and Plants Accumulation in Zanzan Zinc Industrial Town-Iran. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 167-174. DOI: [10.1016/j.proenv.2010.10.020](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.020)
- Pavel, P. B., Puschenreiter, M., Wenzel, W. W., Diacu, E., Barbu, C.H. (2014) Aided phytostabilization using *Miscanthus sinensis* x *giganteus* on heavy metal-contaminated soils. *Science of The Total Environment*, 479-480, 125-131. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2014.01.097](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.097)
- Pidlisnyuk, V., Stefanovska, T., Lewis, E., Erickson, L., Davis, L. (2014) *Miscanthus* as a Productive Biofuel Crop for Phytoremediation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33 (1), 1-19. DOI: [10.1080/07352689.2014.847616](https://doi.org/10.1080/07352689.2014.847616)
- Pivetz, B. E. (2001) *Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at Hazardous Waste Sites*. Washington: United States Environmental Protection Agency. EPA/540/S-01/500.
- Pogrzeba, M., Krzyżak, J., Sas-Nowosielska, A. (2013) Environmental hazards related to *Miscanthus x giganteus* cultivation on heavy metal contaminated soil. *E3S Web of Conferences* 1, 29006. EDP Sciences 2013, 1-4. DOI: [10.1051/e3sconf/20130129006](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20130129006)
- Prevedar-Crnić, A., Zgorelec, Ž., Šuran, J., Jurasović, J., Špirić, Z., Levak, S., Bašić, F., Kisić, I., Srebočan, E. (2016) Mercury in *Eisenia fetida* and soil in the vicinity of a natural gas treatment plant in northern Croatia. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 51 (2), 114-120.
- Rinehart, L. (2006) *Switchgrass as a Bioenergy Crop*. ATTRA – National Sustainable Agriculture Information Service. NCAT Agriculture Specialist, 2006, 1-12.
- Sabeen, M., Mahmood, Q., Irshad, M., Fareed, I., Khan, A., Ullah, F., Hussain, J., Hayat, Y., Tabassum, S. (2013) Cadmium Phytoremediation by *Arundo donax* L. from Contaminated Soil and Water. *BioMed Research International*, 2013, 1-9. DOI: [10.1155/2013/324830](https://doi.org/10.1155/2013/324830)
- Sagehashi, M., Liu, C., Fujii, T., Fujita, H., Sakai, Y., Hu, H., Sakoda, A. (2011) Cadmium Removal by the Hydroponic Culture of Giant Reed (*Arundo donax*) and Its Concentration in the Plant. *Journal of Water and Environment Technology*, 9 (2), 121-127. DOI: [10.2965/jwet.2011.121](https://doi.org/10.2965/jwet.2011.121)
- Shahandeh, H., Hossner, L. (2000) Plant Screening for Chromium Phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 2 (1), 31-51. DOI: [10.1080/15226510008500029](https://doi.org/10.1080/15226510008500029)
- Shim, J., Babu, A., Velmurugan, P., Shea, P., Oh, B. (2014) *Pseudomonas fluorescens* JH 70-4 promotes Pb stabilization and early seedling growth of Sudan grass in contaminated mining site soil. *Environmental Technology*, 35 (20), 2589-2596. DOI: [10.1080/09593330.2014.913691](https://doi.org/10.1080/09593330.2014.913691)
- Sidella, S. (2013) *Adaptability, Biomass Yield, and Phytoremediation of Arundo donax* L. on marginal lands: salt, dry and lead-contaminated soils. Doctoral dissertation. University of Catania.

- Wuana, R. A., Okieimen, F. E. (2011) Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. International Scholarly Research Network, ISRN Ecology, 2011. DOI: [10.5402/2011/402647](https://doi.org/10.5402/2011/402647)
- Yang, S., Liao, B., Li, J., Guo, T., Shu, W. (2010) Acidification, heavy metal mobility and nutrient accumulation in the soil–plant system of a revegetated acid mine wasteland. *Chemosphere*, 80 (8), 852-859. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2010.05.055](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.055)
- Zgorelec, Ž., Bašić, F., Kisić, I., Mesić, M., Sajko, K., Vuković, I., Jurišić, A. (2009) Arsenic and mercury in agricultural and natural gas rich environment in Croatia. In: Alarcon-Herrera, M. T., Lombi, E., Pierzynski, G., Proceedings of the 10th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements (ICOBTE). Chihuahua, Mexico, 13-16 July 2009.
- Zgorelec, Ž., Bašić, F., Kisić, I., Wenzel, W. W., Čustović, H. (2008) Arsenic and Nickel Enrichment Coefficients for Crops Growing on Coal Ash. *Cereal Research Communications*, 36, Part 2, Suppl. 5, 1219-1222.
- Zhang, X., Xia, H., Li, Z., Zhuang, P., Gao, B. (2010) Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. *Bioresource Technology*, 101 (6), 2063-2066. DOI: [10.1016/j.biortech.2009.11.065](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.065)
- Žurek, G., Pogrzeba, M., Rybka, K., Prokopiuk, K. (2013) Suitability of Grass Species for Phytoremediation of Soils Polluted with Heavy-metals. In: Barth, S., Milbourne, D. eds. (2013) *Breeding Strategies for Sustainable Forage and Turf Grass Improvement*. Dordrecht: Springer Netherlands, 245-248.
- Žužul, S., Zgorelec, Ž., Bašić, F., Kisić, I., Mesić, M., Vađić, V., Orct, T. (2011) Arsenic in Air and Soil in the Vicinity of the Central Gas Station Molve, Croatia. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 86 (5), 501-505. DOI: [10.1007/s00128-011-0260-9](https://doi.org/10.1007/s00128-011-0260-9)