

MEDITERANSKA TRSKA U FITOSTABILIZACIJI TEHNOSOLA: PRELIMINARNI REZULTATI ISTRAŽIVANJA

GIANT REED (ARUNDO DONAX L.) IN TECHNOSOL PHYTOSTABILIZATION: PRELIMINARY RESULTS

**Nikola Milanović^{*1}, Snežana Brajević¹, Željko Dželetović¹, Gordana Andrejić¹,
Aleksandar Simić², Uroš Aleksić¹**

¹Univerzitet u Beogradu, Institut za primenu nuklearne energije, Beograd,

²Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet Beograd

Mediteranska trska (Arundo donax L.) je brzorastuća, rizomatozna višegodišnja C3 trava. Smatra se vodećim usevom za proizvodnju biomase na marginalnim i degradiranim zemljištima pod različitim nepovoljnim uslovima gajenja kao što su zaslanjenost, suša, dugotrajno zadržavanje vode, visoke i niske temperature i povišene koncentracije potencijalno toksičnih elemenata (PTE). Flotaciona jalovina koja nastaje u procesu obrade ruda metala predstavlja tip tehnosola koji se odlikuje brojnim nepovoljnim fizičkim i hemijskim odlikama, koje ograničavaju i često potpuno onemogućavaju rast i razvoj biljaka. Jalovina predstavlja i potencijalnu opasnost za životnu sredinu, budući da je izuzetno podložna eolskoj i fluvijalnoj eroziji, zbog čega velika količina PTE može lako dospeti u životnu sredinu. Cilj ovog istraživanja je bio da se ispita mogućnost zasnivanja i održivosti useva mediteranske trske na odlagalištu flotacione jalovine rudnika Pb, Zn i Cu radi fitostabilizacije nje-gove površine. Ogled je postavljen 2019. godine. Nakon sadnje je izvršena fertilizacija sa dozom od 650 kg/ha NPK đubriva (15:15:15) i usev je gajen bez navodnjavanja. Nakon 3 godine od zasnivanja usev se održao, a u biljnom materijalu i u supstratu ispitane su koncentracije sledećih elemenata: N, K, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn. Najveći sadržaj makrohraniva izmeren je u listovima. Biljke su najveći deo PTE zadržale unutar korena, osim Mn i Zn i na taj način delimično sprečile njihov transport u nadzemne delove, a time i potencijalno negativni uticaj na različite fiziološke procese. Rezultati pokazuju da je moguće zasnovati samoodrživ usev mediteranske trske na podlozi poput flotacione jalovine i predstavljaju osnov za buduća detaljnija istraživanja. Na osnovu ovih preliminarnih rezultata smatramo da A. donax, kao biljna vrsta zaslužuje pažnju u smislu daljih detaljnih istraživanja fitostabilizacije tehnosola nastalih radom u procesnoj industriji.

Ključne reči: Arundo donax; flotaciona jalovina; fitostabilizacija; potencijalno toksični elementi

Giant reed (Arundo donax L.) is a fast-growing, rhizomatous, perennial C3 grass. It is considered a leading crop for biomass production on marginal and degraded soils with numerous unfavorable conditions such as high salinity, drought, water retention, high and low temperatures and high

* Corresponding author: nikola.milanovic@inep.co.rs
<https://orcid.org/0000-0001-8566-4102>

Snežana Brajević: <https://orcid.org/0009-0008-7964-8235>
Željko Dželetović: <https://orcid.org/0000-0001-9166-7094>
Gordana Andrejić: <https://orcid.org/0000-0002-5515-9321>
Aleksandar Simić: <https://orcid.org/0000-0002-7605-3796>
Uroš Aleksić: <https://orcid.org/0000-0002-7313-497X>

concentrations of potentially toxic elements (PTE). Tailings are a type of technosols consisting of the left-over materials from the processing of mined ores. They are characterized by a variety of unfavorable physical and chemical properties that limit or prevent the growth and development of plants. Tailings pose a potential threat to the environment as they are highly susceptible to wind and water erosion which can release significant amounts of PTEs into the environment. The aim of this study is to investigate the possibility of establishing and maintaining the giant reed on the Pb, Zn and Cu mine tailings to facilitate phytostabilization of its surface. The experimental plot was established in 2019. After planting, the plants were fertilized with NPK (15:15:15) at a dosage of 650 kg/ha. The crop was not irrigated. After three years the concentrations of the following elements: N, K, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn were determined in the substrate and in the plant material. The highest content of macronutrients was found in the leaves. The majority of PTE, except Mn and Zn were contained within roots, preventing transport to the aerial parts and potentially negative effects on various physiological processes. The preliminary results showed that it is possible to establish a self-sustaining crop of giant reed in a substrate such as mine tailings and provided a basis for future detailed research.

Key words: *Arundo donax; mine tailings; phytostabilization; potentially toxic element*

1. Uvod

Rudarstvo obuhvata iskopavanje i ekstrakciju mineralnih sirovina, koje se koriste u metalurgiji i drugim granama privrede (hemijska industrija, poljoprivreda itd.). Nusproizvodi rudarstva su ogromne količine otpada, koji je u različitom stepenu uglavnom kontaminiran metalima i predstavlja lokalni izvor zagađenja. Odlagališta flotacione jalovine predstavljaju specifičan supstrat antropogenog porekla, klasifikovan kao tehnosol [1]. To je otpadni materijal koji nastaje u procesu fizičke i hemijske obrade stene u rudarstvu (proces pripreme i koncentrisanja mineralnih sirovina). Flotaciona jalovina je izuzetno podložna eolskoj i fluvijalnoj eroziji kojima lako može dospeti u okolne prirodne ekosisteme u kojima predstavlja dugotrajan izvor zagađenja potencijalno toksičnim elementima (PTE).

Zagađenje PTE postalo je jedan od najtežih ekoloških problema današnjice, zbog sve većeg zagađenja životne sredine ljudskim aktivnostima, kao što su rudarstvo i topljenje metala, galvanizacija, izduvni gasovi, proizvodnja goriva, đubriva, primena pesticida, itd. [2,3]. Zagađenje zemljišta PTE je globalni problem koji uzrokuje da ogromne površine poljoprivrednog zemljišta utiču na širok spektar biljnih ćelijskih aktivnosti, uključujući fotosintezu, disanje, mineralnu ishranu, strukturu i funkciju membrane i ekspresiju gena [4,5]. Prekomerna koncentracija PTE u životnoj sredini predstavlja značajnu opasnost ne samo za biljke, već i za zdravlje životinja i ljudi zbog svog citotoksičnog, mutagenog i kancerogenog dejstva [6]. Zbog potencijalne toksičnosti i visoke postojanosti, zemljište zagađeno PTE predstavlja ozbiljan ekološki problem koji zahteva efikasno i razumno rešenje [7].

Mnogi istraživači su proučavali potencijal fitoremedijacije mediteranskom trskom na zemljišnim površinama zagađenim PTE. Mnogobrojne industrijske aktivnosti, osim koristi za ljudsku populaciju, imale su za posledicu povećanje sadržaja PTE i promene diverziteta živih organizama u životnoj sredini. Jedan deo PTE čine oni elementi (npr. Zn, Cu, Fe) koji imaju biološku ulogu i organizmima su neophodni u malim količinama, a pri značajnijem povećanju koncentracije u organizmu ispoljavaju toksične efekte. Ovi metali (Cu, Zn, Fe, Mn, Mo, Ni, Co) se označavaju kao esencijalni i veoma su značajni za odvijanje fizioloških procesa budući da su sastavna komponenta mnogih biomolekula, kao što su metalo-proteini i hlorofil [8]. Drugu grupu PTE čine i oni elementi koji, koliko je do sada poznato, nemaju nikakvu ulogu u organizmu (npr. Cd, Hg, Pb) i već pri veoma niskim koncentracijama ispoljavaju negativna i toksična dejstva [9].

Poslednjih godina raste interesovanje istraživača za korišćenje višegodišnjih energetskih useva za fitostabilizaciju zemljišnih i tehnogenih površina zagađenih PTE (10). Višegodišnji energetski usevi ne pripadaju grupi biljaka za proizvodnju hrane, te kao takvi imaju potencijal za održivu proizvodnju bioenergije [11]. Pored većih energetskih dobitaka, njihovim gajenjem značajno je smanjeno emitovanje gasova sa efektom staklene bašte u odnosu na biogoriva prve generacije. Osim toga, poboljšava se struktura, plodnost i biodiverzitet zemljišta. Specifično za ove useve je da se uz minimalno uložena sredstva na marginalnim i degradiranim zemljištima mogu ostvariti relativno visoki prinosi [12]. Fitoremedijacija traži biljne vrste sposobne da smanje nivo kontaminanata u kratkom vremenskom periodu. Mediteranska trska može biti odličan izbor za ovu svrhu jer ispunjava sve zahtevane karakteristike [13].

Mediteranska trska (*Arundo donax* L., familija Poaceae), se javlja kao samonikla biljka na zabarenim zemljištima na području od Mediterana do Indije. Mediteranska trska se danas gaji na svim kontinentima u subtropskim i toplim područjima kontinentalne klime [14]. Pretpostavlja se da se mediteranska trska proširila iz Azije, svog matičnog centra, u Ameriku, prolazeći kroz područje Mediterana [15, 16]. Sugerise se da je ova biljka nastala od autohtonih vrsta prisutnih i sada u region Mediterana: *A. plinii* L., *A. collina* Ten., *A. mediterranea* i *A. micrantha* Lam. [16,17].

Biljka je pokazala dobre sposobnosti fitostabilizacije i takođe može biti pogodna za fitoekstrakciju pri dužoj izloženosti PTE [18]. Važna upotreba mediteranske trske je i proizvodnja biomase pogodne za proizvodnju energije, bilo da se radi o proizvodnju čvrstih goriva u termičke svrhe ili za proizvodnju biogoriva druge generacije [19]. U optimalnim uslovima, *A. donax* može rasti 10 cm na dan, što ga svrstava među najbrže rastuće biljke, a takođe može proizvesti više od 20 tona suve materije (SM) po hektaru [20].

Fitostabilizacija zemljišta se može izvesti gajenjem mediteranske trske i drugih višegodišnjih trava na zemljištima zagađenim PTE usled eksploatacije ruda (Cd, Cu, Zn, As, itd.) [21]. Veća efikasnost u uklanjanju bakra (preko 75%) postignuta je pomoću zasada mediteranske trske u kombinaciji sa drugim vrstama [22]. Osim Cu, ustanovljen je i visok stepen bioakumulacije nekoliko metala u mediteranskoj trsci, posebno Cd, Hg i As [18]. Pored sanacije zemljišta, *A. donax* se može koristiti i za tretman industrijskih otpadnih voda, kao što su crveni mulj iz proizvodnje aluminijuma [22]. Analizirajući fitoremedijaciju zagađenih zemljišta PTE putem različitih tehnika između ostalog, utvrđeno je da mediteranska trska poboljšava biološku plodnost zemljišta uz istovremenu fitoremedijaciju industrijski zagađenog zemljišta [23]. Mediteranska trska je savršen kandidat za poboljšanje kvaliteta zagađenih voda, zbog sposobnosti da ukloni različite jone i određene vrste radionuklida, među ostalim neorganskim jedinjenjima [24].

Cilj ovog istraživanja je bio da se ispita mogućnost zasnivanja i održivosti useva mediteranske trske na odlagalištu flotacione jalovine rudnika Pb, Zn i Cu radi fitostabilizacije njegove površine.

2. Materijal i metode

Ogled je postavljen 2019. godine na odlagalištu flotacione jalovine rudnika Cu, Zn i Pb u centralnoj Srbiji (44° 10' N; 20° 49' E, 500 mnv). Gustina sadnje je bila 1 biljka/m² u tri ponavljanja. Rizomi *A. donax* koji su korišćeni za potrebe ovog trogodišnjeg ogleada predstavljaju klonalni materijal dobijen deljenjem rizoma gajenih na eksperimentalnom polju INEP-a. Nakon sadnje je izvršena fertilizacija dozom od 650 kg/ha NPK đubriva (15:15:15) i usev je gajen bez navodnjavanja (Slika 1). Nakon 3 godine od zasnivanja ogleada u biljnom materijalu i u supstratu ispitivane su koncentracije sledećih elemenata: N, K, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn. Prikupljanje uzoraka supstrata je izvršeno na početku eksperimentalnog perioda, u aprilu 2019. godine. Uzorci jalovine su uzeti sa 3 dubine: 0-20

cm, 30-50 cm i 60-80 cm; osušene na vazduhu, a potom i usitnje u avanu pomoću tučka i prosejane kroz sito sa prečnikom pora 0,5 mm.

Aktivna (pH vrednost izmerena u H₂O) i supstituciona kiselost (pH vrednost izmerena u 1M KCl) jalovine su određene potenciometrijskom metodom prema ISO 10390:1994. Sadržaj organskog C i organske materije je određen metodom po Tjurinu [25]. Količina ukupnog azota u flotacionoj jalovini i biljnom materijalu je određena semimikro-Kjeldalovom metodom [26]. Za određivanje biljkama pristupačnog kalijuma u jalovini, izvršena je ekstrakcija u Al rastvoru, a potom je sadržaj izmeren pomoću tehnike atomske emisije spektrofotometrije (AAS, Shimadzu AA-7000). Sadržaj pristupačnih metala izmeren je prema standardu NF X 31-120/1992 Koncentracija elemenata (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb i Zn) je određena korišćenjem AAS (Shimadzu AA-7000).

Prikupljanje uzoraka biljnog materijala izvršeno je u avgustu 2022. godine, odnosno pri kraju treće vegetacione sezone. Sa svake parcele vađena je cela biljka, koja je potom podeljena na: koren, rizom, donje stablo, gornje stablo, donji listovi i gornji listovi. Svaki uzorak je detaljno ispran vodom iz gradskog vodovoda, a zatim i destilovanom vodom. Nakon pranja uzorci su usitnjeni i osušeni na vazduhu, a potom i dodatno usitnjeni u avanu i osušeni u sušnici na 60°C do konstantne mase. Sadržaj kalijuma i PTE je izmeren je na AAS (Shimadzu AA-7000) nakon mineralizacije u cHNO₃ uz datak 30% H₂O₂.

Za sve izmerene vrednosti urađena je osnovna statistička analiza kojom su dobijene srednje vrednosti (SV) i standardna devijacija (SD) za tri ponavljanja po delu biljke i svi rezultati su prikazani kao SV ± SD.



Slika 1. Deo ogleda na odlagalištu flotacione jalovine (A); Lokacija ogleda (satelitski snimak) (B); Podzemni delovi A. donax (C)

3. Rezultati i diskusija

3.1. Hemijske karakteristike flotacione jalovine

Osnovne hemijske karakteristike jalovine prikazane su u tabeli 1. Prema Thurn-ovoj karakterizaciji [27] supstitucione (pH_{kcl}) kiselosti flotaciona jalovina je neutralna na dubinama od 0-20cm i

30-50cm, dok je na dubini od 60-80cm blago kisela. Neutralna pH jalovine posledica je načina obrade rude, koji podrazumeva upotrebu baznih agenasa tokom hemijske obrade. U većini uzoraka flotacione jalovine vrednosti aktivne i supstitucione kiselosti su veoma slične, što ukazuje na odsustvo mineralnih i organskih kiselina, kao i hidrolitičkih soli.

Sadržaj organskog ugljenika (C org), a time i procenat organske materije u flotacionoj jalovini blago su se smanjivali po dubini, ali je u svim profilima izmeren visok sadržaj. Ovako visok procenat organske materije izmerene u flotacionoj jalovini potiče od organskog aditiva ksantata koji se koristi kao kolektor metala u procesu flotiranja sulfidnih minerala u hidrometalurškom procesu, kao i produkata njihove degradacije [28,29]

Odsustvo humusnih jedinjenja koja predstavljaju osnovnu komponentu organske materije u zemljištu potvrđuje i izuzetno nizak sadržaj N i K koji je u flotacionoj jalovini daleko ispod optimalnog nivoa neophodnog za ishranu biljaka [30]. Jalovina, koja je poreklom od stene, po svojoj prirodi ne sadrži azot. Azot u podlogu dospeva aktivnošću specifičnih grupa zemljišnih bakterija, kao i razlaganjem izumrle organske materije [31].

Pored izrazitog deficita azota, flotaciona jalovina se odlikuje i nedostatkom lakopristupačnog kalijuma koji u podlozi može biti izuzetno koristan zbog svoje uloge u otpornosti biljaka na oboljenja i tolerisanje temperaturnih ekstrema, i važnosti za razvoj biljke u nepovoljnim uslovima sredine koji vladaju na odlagalištima flotacione jalovine [31].

Neutralna pH vrednost flotacione jalovine je dosta smanjila biodostupnost metala iz podloge. Najveći broj metala ima veću rastvorljivost i mobilnost u kiseloj sredini, koja značajno opada u neutralnoj sredini [32]. U flotacionoj jalovini su detektovane vrlo visoke koncentracije metala poreklom iz matične stene, prvenstveno Pb i Zn koji predstavljaju glavne metale koji se ekstrahuju iz rude (tabela 1). Koncentracije biodostupnih formi nekih ispitivanih metala su višestruko veće od onih koje se prema Kabata Pendias [32] smatraju toksičnim za većinu biljaka (>30 mg/kg Pb), a takođe i od koncentracija detektovanih u antropogeno nezagađenim zemljištima sveta (5-90 mg/kg Pb; 60-89 mg/kg Zn). Sa druge strane, koncentracije biodostupnih oblika ostalih ispitivanih elemenata u flotacionoj jalovini su niže od onih koje se smatraju toksičnim za većinu biljnih vrsta (5-20 mg/kg Cd; 25-40 mg/kg Cu; <500 mg/kg Fe; <200 Mn mg/kg; 10-50 mg/kg Ni) [32, 33].

3.2. Sadržaj ispitivanih elemenata u mediteranskoj trsci

Najniža koncentracija azota izmerena je u korenu i donjem stablu, dok je najviša koncentracija izmerena u gornjim listovima (tabela 2). Ovo potvrđuje istraživanje u kojem autori, Beale et al. [34] navode da se koncentracija azota u nadzemnom materijalu smanjuje sa povećanjem suve mase. Za razliku od azota, relativno najveći sadržaj kalijuma smo izmerili u listovima, dok je najniža koncentracija izmerena u korenu. Niske koncentracije kalijuma <1% posledica su njegovog izrazitog deficita u podlozi. Sadržaj kalijuma je u skladu sa istraživanjima u kojem se navodi da kalijum pokazuje jasnu dinamiku tokom godine, tj. da se koncentracija K u nadzemnim delovima povećava tokom perioda intenzivnog rasta biljke, a smanjuje tokom jesenjeg i zimskog perioda kada se odvija njena redistribucija u podzemne delove [30].

Tokom trogodišnjeg rasta na odlagalištu flotacione jalovine *A. donax* akumulira većinu ispitivanih metala u korenovima u daleko višim koncentracijama u poređenju sa nadzemnim delovima, izuzev Mn i Zn (tabela 3). Istraživanja mediteranske trske pokazuju da se najveći deo akumuliranih elemenata zadržava na nivou podzemnih delova biljke [18,34,35]. Ipak, stepen akumulacije metala kod trske, kao i kod svih biljaka, zavisi od različitih faktora, uključujući koncentracije metala i njihovu dostupnost u podlozi, fizičke i hemijske karakteristike vode i sedimenta, vremena prikupljanja uzoraka i procesa translokacije elemenata unutar biljke [35].

Tabela 1. Osnovne hemijske osobine ispitivane flotacione jalovine i koncentracija pristupačnih formi metala (SV ± SD)

	0-20 cm	30-50 cm	60-80 cm
pH u H ₂ O	6,80	6,83	6,14
pH u KCl	6,57	6,53	6,11
C org (%)	2,96 ± 0,02	2,71 ± 0,08	2,54 ± 0,06
Organska masa (%)	5,11 ± 0,03	4,68 ± 0,10	4,37 ± 0,13
Ukupni N (%)	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,00	IND
Dostupni K (mg K ₂ O/100 g jalovine)	0,25 ± 0,06	0,50 ± 0,07	IND
Cd (µg/g)	1,24 ± 0,04	1,26 ± 0,04	0,92 ± 0,11
Cu (µg/g)	9,51 ± 0,29	8,91 ± 0,09	10,2 ± 0,87
Fe (µg/g)	63,7 ± 4,33	65,6 ± 5,33	73,4 ± 5,85
Mn (µg/g)	93,5 ± 6,38	102 ± 16,4	54,5 ± 8,33
Ni (µg/g)	4,46 ± 0,18	4,25 ± 0,00	4,25 ± 0,46
Pb (µg/g)	324 ± 7,42	375 ± 9,36	293 ± 7,91
Zn (µg/g)	68,5 ± 9,86	57,3 ± 4,79	50,8 ± 6,43

Koncentracije metala koje smo detektovali u korenovima biljaka su u velikoj meri određene njihovim sadržajem u flotacionoj jalovini i one mogu biti toksične za najveći broj biljaka [32]. Međutim, naše istraživanje pokazuje da ovako visoke koncentracije metala u korenu nisu eliminatorni faktor za preživljavanje i rast *A. donax* na flotacionoj jalovini.

Tabela 2. Sadržaji ukupnog azota i kalijuma u *Arundo donax* (SV ± SD, %)

Parametar	Koren	Rizom	Donje stablo	Gornje stablo	Donji listovi	Gornji listovi
Ukupni N	0,40 ± 0,05	0,89 ± 0,17	0,40 ± 0,08	0,63 ± 0,13	0,86 ± 0,09	1,60 ± 0,34
Ukupni K	0,38 ± 0,04	0,33 ± 0,01	0,32 ± 0,03	0,47 ± 0,04	0,49 ± 0,04	0,73 ± 0,07

Tabela 3. Sadržaj PTE u *Arundo donax* (SV ± SD, µg/g)

Parametar	Koren	Rizom	Donje stablo	Gornje stablo	Donji listovi	Gornji listovi
Fe	1661 ± 121	118 ± 13,1	81,0 ± 9,67	111 ± 28,7	495 ± 66,2	215 ± 48,4
Mn	115 ± 20,0	136 ± 8,90	118 ± 9,52	368 ± 24,7	290 ± 13,1	340 ± 32,1
Zn	91,7 ± 9,61	60,7 ± 4,62	79,7 ± 8,34	134 ± 15,7	184 ± 9,56	182 ± 10,4
Cu	27,4 ± 4,45	5,44 ± 0,51	6,44 ± 0,52	8,84 ± 1,42	19,6 ± 2,50	15,7 ± 1,92
Pb	58,3 ± 7,27	5,12 ± 1,38	10,5 ± 1,98	10,0 ± 1,92	24,3 ± 2,99	16,6 ± 1,90
Ni	18,3 ± 2,70	4,70 ± 0,48	4,40 ± 0,80	7,32 ± 1,50	9,57 ± 1,70	14,3 ± 0,90
Cd	2,35 ± 0,28	1,42 ± 0,26	1,97 ± 0,16	1,73 ± 0,28	1,94 ± 0,28	1,49 ± 0,20

Metali koji svojom koncentracijom najzasupljeniji u svim delovima biljaka *A. donax* gajenih na jalovini su Fe i Mn, što je rezultat njihovih visokih koncentracija u podlozi. Fe i Mn u korenu po

zastupljenosti prate Zn>Pb>Cu>Ni>Cd, u rizomu Zn>Cu>Pb>Ni>Cd, a u nadzemnim delovima Zn>Pb>Cu>Ni>Cd. Ove promene u redosledu metala po sadržaju su rezultat procesa imobilizacije koji se dešava ne samo na nivou korena, već tokom čitavog puta metala kroz biljku, dakle i na nivou ostalih biljnih delova. S obzirom da su Fe, Mn, Zn i Cu esencijalni elementi za biljke, mehanizmi za njihovo usvajanje i translokaciju se razlikuju između biljnih vrsta, pa pri veoma povećanim koncentracijama u podlozi one nisu u mogućnosti da u potpunosti spreče njihovo veće usvajanje.

Osim efikasne imobilizacije PTE u korenu, neki od ispitivanih metala su u nadzemnim delovima biljke detektovani u koncentracijama koje mogu izazvati štetne efekte kod biljaka osetljivih na metale. Cink se u nadzemnim delovima *A. donax* javlja u visokim koncentracijama (tabela 3), što je u skladu sa literaturnim podacima [13]. Ovako visoke koncentracije Zn u nadzemnim delovima takođe su posledica kako visokog sadržaja pristupačnog Zn u jalovini, tako i dobre mobilnosti ovog elementa unutar biljke [36]. Visoke koncentracije Zn u listovima i stablu su vezane za činjenicu da je Zn jedan od esencijalnih mikroelemenata, koji ulazi u sastav različitih metaloenzima poput proteinaza, peptidaza, fosfohidrilaza [32]. Zbog ovakve uloge cinka biljke poseduju čitav niz transportera i organskih molekula koji predstavljaju ligande Zn i učestvuju u njegovom transportu kroz biljku, sekvestraciji u ćeliji i homeostazi [37,38].

Biljke veoma lako usvajaju i translociraju Mn, a proces usvajanja najviše zavisi od količine rastvorenog mangana u podlozi [39]. Mangan je mikronutrijent i kao takav ima važnu ulogu u mnogim fiziološkim procesima, učestvuje u procesu fotosinteze, gde vrši transport elektrona, učestvuje u redoks reakcijama i smanjuje negativni efekat produkcije reaktivnih vrsta kiseonika [32]. Iako je *A. donax* pokazao visok nivo usvajanja i translokaciju ovog elementa, koncentracije su uvek bile ispod gornje granične vrednosti iznad koje Mn najčešće ispoljava fitotoksične efekte (>500 mg/kg) [32].

Metal koji je takođe akumuliran u visokim koncentracijama u korenu biljaka je Cu, što je uslovljeno visokim koncentracijama dostupnih formi ovog elementa u podlozi (tabela 1). Poznato je da se Cu apsorbuje ne samo aktivnim već i pasivnim putem, posebno u uslovima izuzetno visokih koncentracija njegove dostupne forme [32]. Zahvaljujući slaboj translokaciji u nadzemne delove, koncentracije Cu u stablima i listovima su ispod vrednosti koje kod osetljivih biljaka ispoljavaju neke od negativnih efekata (20-100 mg/kg) [32].

Sadržaj Ni u biljkama najviše zavisi od pH vrednosti podloge, ali i sposobnosti biljke da usvaja Ni [40]. Najviše koncentracije Ni izmerene su u korenu i listovima, one su na donjoj granici vrednosti širokog intervala koncentracija Ni koje kod senzitivnih biljaka izazivaju fitotoksične efekte (10-100 mg/kg) [32].

Olovo je jedini od ispitivanih metala čije su koncentracije u korenu bile niže u odnosu na koncentraciju pristupačnih formi elementa u flotacionoj jalovini. Ovako nizak nivo akumulacije korenom i pored visokih koncentracija pristupačnog Pb u flotacionoj jalovini (293-375 mg/kg) se može objasniti njegovom slabom mobilnošću u podlozi i činjenicom da predstavlja jedan od elemenata koji nema poznatu ulogu u biljnom organizmu [41]. Najniže koncentracije Pb su detektovane u rizomima u kojima ga ima oko 11 puta manje u odnosu na korenove, nešto više ga ima u stablu, a još više listovima, što je u skladu sa ranijim istraživanjima biljaka sa flotacione jalovine i zemljišta jako zagađenih olovom [42].

S obzirom da apsorpcija i akumulacija Cd u korenu zavisi ne samo od koncentracije, već i od mobilnosti ovog elementa u podlozi, može se smatrati da je pri neutralnoj pH vrednosti flotacione jalovine dostupnost Cd relativno niska [43]. Na visok nivo zadržavanja Cd u korenu ukazuju njegove

značajno niže koncentracije u rizomu i nadzemnom delu. Koncentracije u stablu i listovima odgovaraju onima koje su detektovane kod biljaka poreklom sa podloga zagađenih Cd, ali se još uvek nalaze ispod vrednosti (10 mg Cd/kg) koje kod većine biljaka izazivaju toksične efekte [32].

4. Zaključak

Vrsta *Arundo donax* je pokazala izuzetnu sposobnost da raste na ekstremno nepovoljnim uslovima koji vladaju na odlagalištu flotacione jalovine rudnika Pb, Zn i Cu. Takođe može da obrazuje održivi biljni pokrivač bez posebnih meliorativnih mera, uz relativno nizak transfer metala u nadzemne delove. Biljke gajene na odlagalištu flotacione jalovine su zadržale najveći deo akumuliranih metala unutar korena i sprečile njihov dalji transport u nadzemne delove, a time i njihov negativni uticaj na biohemijske i fiziološke procese u listovima. Ograničen transport metala u nadzemne delove je od velikog značaja zbog relativno male verovatnoće njihovog ulaska u mrežu ishrane. Rezultati pokazuju da je moguće zasnovati samoodrživ usev mediteranske trske na podlozi poput flotacione jalovine i predstavljaju osnov za buduća detaljnija istraživanja.

5. Zahvalnica

Ovaj rad je finansiran od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, Ugovori br. 451-03-66/2024-01/200019 и 451-03-65/2024-01/200116.

6. Literatura

- [1] **FAO, ITPS**, Status of the World's Soil Resources (SWSR) – main report. *Food and agriculture organization of the united nations and intergovernmental technical panel on soils*, Rome, Italy, 2015.
- [2] **Uygun, V., M. A. Karaduman, M. Kececi, E. Sukusu, M. Mujdeci**, Competitive adsorption of heavy metals in different soils. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26 (2017), 10, pp. 6205-6211.
- [3] **Glišić, R.M., Z.B. Simić, F.J. Grbović, V.R. Rajčić, S.R. Branković**, Phytoaccumulation of metals in three plants species of the Asteraceae family sampled along a highway. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49 (2021), 2, pp. 12180.
- [4] **Prasad, K.V.S.K., Saradhi, P.P., P. Sharmila**, Concerted action of antioxidant enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in Brassica juncea. *Environmental and experimental Botany*, 42 (1999), 1, pp. 1-10.
- [5] **Peixoto, P.H.P., J. Cambraia, R. Sant'Anna, P.R. Mosquim, M.A. Moreira**, Aluminum effects on fatty acid composition and lipid peroxidation of a purified plasma membrane fraction of root apices of two sorghum cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 24(2001), 7, pp. 1061-1070.
- [6] **Gutiérrez Ginés, M., J. Pastor Piñeiro, A.J. Hernández**, Effect of heavy metals from mine soils on Avena sativa L. and education strategies. *Fresenius Environmental Bulletin*, 19 (2010), 9b, pp. 2083-2086.
- [7] **Shevyakova, N.I., E.N. Il'ina, V.V. Kuznetsov**, Polyamines increase plant potential for phytoremediation of soils polluted with heavy metals. *Doklady Biological Sciences*, 423 (2008), 5, pp. 457-460.
- [8] **Reeves, R.D, A. J. M. Baker**, *Metal-accumulating plants. Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*, Wiley, New York, USA, 2000.
- [9] **Gaur, A., A. Adholeya**, Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Science*, 86 (2004), 8, pp. 528–534. 9

- [10] **Andrejić, G.**, *Ispitivanje fitoremedijacionog i adaptivnog potencijala Miscanthus × giganteus (Poaceae) gajenog na odlagalištu flotacione jalovine na planini Rudnik*, doktorska disertacija, Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija, 2020.
- [11] **Karp, A., I. Shield**, Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist*, 179 (2008), 1, pp. 15-32.
- [12] **Barney, J. N., J. M. DiTomaso**, Global climate niche estimates for bioenergy crops and invasive species of agronomic origin: potential problems and opportunities. *PLoS One*, 6 (2011), 3, e17222.
- [13] **Danelli, T., A. Sepulcri, G. Masetti, F. Colombo, S. Sangiorgio, E. Cassani, R. Pilu**, *Arundo donax L. biomass production in a polluted area: Effects of two harvest timings on heavy metals uptake*, Applied Sciences, 11 (2021), 3, pp. 1147.
- [14] **Janković, S., Đ. Glamočlija, S. Prodanović**, *Energetski usevi*, Institut za primenu nauke u poljoprivredi, Beograd, Srbija, 2017.
- [15] **Lewandowski, I., J.M. O Scurlock, E. Lindvall, M. Christou**, The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe, *Biomass and Bioenergy*, 25 (2003), 4, pp. 335–361.
- [16] **Hardion, L., R. Verlaque, A. Baumel, M. Juin, B. Vila**, Revised systematics of Mediterranean *Arundo* (Poaceae) based on AFLP fingerprints and morphology. *Taxon*, 61 (2012), 6, pp. 1217–1226.
- [17] **Danin, A.**, *Arundo* (Poaceae) in the Mediterranean reconsidered. *Willdenowia*, 34 (2004), 2, pp. 361-369.
- [18] **Cristaldi, A., G.O. Conti, S.L. Cosentino, G. Mauromicale, C. Copat, A. Grasso, M. Ferrante**, Phytoremediation potential of *Arundo donax* (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals. *Environmental research*, 185 (2020), 109427.
- [19] **Curt, M.D., P.V. Mauri, M. Sanz, J. Cano-Ruiz, J.P. Del Monte, P.L. Aguado, J. Sánchez**, The ability of the *Arundo donax* crop to compete with weeds in central Spain over two growing cycles. *Industrial Crops and Products*, 108 (2017), pp. 86-94.
- [20] **Bell, G.**, Ecology and management of *Arundo donax*, and approaches to riparian habitat restoration in Southern California. *Blackhuys Publishers*, (1997), pp. 103–113.
- [21] **Bernal, M.P., D. Grippi, R. Clemente**, Potential of the biomass of plants grown in trace element-contaminated soils under Mediterranean climatic conditions for bioenergy production. *Agronomy*, 11 (2021), 9, 1750.
- [22] **Zhang, D., Q. Jiang, D. Liang, S. Huang, J. Liao**, The potential application of giant reed (*Arundo donax*) in ecological remediation. *Frontiers in Environmental Science*, 9 (2021), 652367.
- [23] **Cristaldi, A., G.O. Conti, E. H. Jho, P. Zuccarello, A. Grasso, C. Copat, M. Ferrante**, Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*, 8 (2017), pp. 309-326.
- [24] **Fernando, A.L., B. Barbosa, J. Costa, E.G. Papazoglou**, Giant reed (*Arundo donax*), A multipurpose crop bridging phytoremediation with sustainable bioeconomy. *Bioremediation and bioeconomy*. (2016), pp. 77-95
- [25] **Tjurin, I. V.**, *Agrochemical methods of soil analysis*, Moskva: Nauka, 1965.
- [26] **Pansu, M., J. Gautheyrou**, *pH measurement. Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*, Springer Science & Business Media, Berlin, Germany, 2006.

- [27] **Džamić, R., D. Stevanović, M. Jakovljević**, *Praktikum iz agrohemije*. Poljoprivredni fakultet Beograd Univerziteta u Beogradu, Srbija, 1996.
- [28] **Lam, K.S.**, *Biodegradation of xanthate by microbes isolated from a tailings lagoon and a potential role for biofilm and plant/microbe associations*, Ph.D. Thesis, Western Sydney University, Penrith, Australia, 1999.
- [29] **Ozturk, Y., O. Bicak, Z. Ekmekci**, Effects of residual xanthate on flotation efficiency of a Cu-Zn sulfide ore. *Minerals*, 12(2022), 3, pp. 279.
- [30] **Marschner H.**, *Mineral nutrition of higher plants 2nd edition*, Academic Press, London, England, 1995.
- [31] **Randelović, D.**, *Geobotanička i biogeoheмиjska karakterizacija rudničke otkrivke u Boru i mogućnost primene rezultata u remedijaciji*, doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet Univerzitet u Beogradu, Srbija, 2015.
- [32] **Kabata-Pendias, A.**, *Trace elements in soils and plants 4th edition*, CRC Press, Boca Raton, USA, 2011.
- [33] **Marschner, H.**, *Marschner's mineral nutrition of higher plants 3rd edition*, Academic Press, London, England, 2012.
- [34] **Beale, C.V., S.P. Long**, *Seasonal dynamics of nutrient accumulation and partitioning in the perennial C4-grasses Miscanthus × giganteus and Spartina cynosuroides*. *Biomass and Bioenergy*, 12 (1997), 6, pp. 419-428.
- [35] **Teuchies, J., S. Jacobs, L. Oosterlee, L. Bervoets, P. Meire**, Role of plants in metal cycling in a tidal wetland: Implications for phytoremediation. *Science of the Total Environment*, 445 (2013), pp. 146–154.
- [36] **Van Goor, B., J. D. Wiersma**, *Chemical forms of manganese and zinc in phloem exudates*, *Physiologia Plantarum*, 36 (1976), 2, pp. 213-216.
- [37] **Haydon, M.J., C.S. Cobbett**, Transporters of ligands for essential metal ions in plants. *New Phytologist*, 174 (2007), 3, pp. 499-506.
- [38] **Milner, M.J., J. Seamon, E. Craft, L.V. Kochian**, Transport properties of members of the ZIP family in plants and their role in Zn and Mn homeostasis. *Journal of experimental botany*, 64 (2013), 1, pp. 369-381.
- [39] **Godo, G. H., H. M. Reisenauer**, Plant effects on soil manganese availability. *Soil Science Society of America Journal*, 44 (1980), 5, pp. 993-995.
- [40] **Bogdanović, D., M. Ubavić, V. Hadžić**, *Teški metali u životnoj sredini*, Naučni institute za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, Srbija, 1997.
- [41] **Kabata-Pendias, A., W. Sadurski**, *Trace elements and compounds in soil*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2004.
- [42] **Cano-Ruiz, J., M. R. Galea, M. C. Amorós, J. Alonso, P. V. Mauri, M. C. Lobo**, Assessing *Arundo donax* L. in vitro-tolerance for phytoremediation purposes, *Chemosphere*, 252 (2020), 126576.
- [43] **Kabata-Pendias, A., K. Wiacek**, Excessive uptake of heavy metals by plants from contaminated. *Soil Science Society of America Journal*, 36 (1985), pp. 4-33.