

**UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNIČKI FAKULTET U BORU**

Tanja S. Kalinović

**MOGUĆNOSTI KORIŠĆENJA BORA,
LIPE I ZOVE U BIOMONITORINGU I
FITOREMEDIJACIJI**

doktorska disertacija

Bor, 2016.

**UNIVERSITY OF BELGRADE
TECHNICAL FACULTY IN BOR**

Tanja S. Kalinović

**POSSIBILITIES OF USING PINE,
LINDEN AND ELDER IN
BIOMONITORING AND
PHYTOREMEDIATION**

Doctoral Dissertation

Bor, 2016.

Komisija za pregled i odbranu

Mentor: *Dr Snežana Šerbula, vanredni profesor*
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet Bor

Članovi komisije: *Dr Mile Dimitrijević, vanredni profesor*
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Dr Branko Bugarski, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški
fakultet u Beogradu

Dr Jasmina Stevanović, naučni savetnik,
Institut za Hemiju, Tehnologiju i Metalurgiju, IHTM
Beograd

Dr Radmila Garić-Grulović, naučni savetnik,
Institut za Hemiju, Tehnologiju i Metalurgiju, IHTM
Beograd

Datum odbrane: _____

Zahvalnost

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru dr Snežani Šerbuli, vanrednom profesoru Tehničkog fakulteta u Boru, na svestranoj pomoći, korisnim savetima i sugestijama, ali i razumevanju i strpljenju koje je imala za mene tokom izrade disertacije.

Zahvalnost dugujem članovima komisije, dr Miletu Dimitrijeviću, dr Branku Bugarskom, dr Jasmini Stevanović i dr Radmili Garić-Grulović na saradnji, stručnoj pomoći, kao i na sadržajnim sugestijama pri konačnom formulisanju disertacije.

Zahvaljujem se i koleginicama Jeleni Kalinović i Ani Radojević, asistentima sa Tehničkog fakulteta u Boru, na nesebičnoj pomoći i bezrezervnoj podršci koje su mi pružile tokom celokupne izrade doktorske disertacije.

Mari Manzalović profesoru engleskog jezika na Tehničkom fakultetu u Boru se zahvaljujem na jezičkoj obradi teksta.

Jeleni Milosavljević asistentu sa Tehničkog fakulteta u Boru se zahvaljujem na stručnim savetima iz oblasti fiziologije biljaka.

Zahvaljujem se i ostalim kolegama sa Tehničkog fakulteta u Boru, koji su od samog početka osnovnih studija verovali u mene, podržavali i savetovali me.

Zahvaljujem direktoru Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, dr Miletu Bugarinu, koleginicama Mirjani Šteharnik i Jeleni Petrović sa Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, što su omogućili hemijsko rastvaranje i hemijsku analizu uzoraka za doktorsku disertaciju.

Bobanu Spaloviću sa Tehničkog fakulteta u Boru, zahvaljujem se na izvođenju dela eksperimentalnih analiza.

Ova doktorska disertacija je urađena u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, br. III46010, pod nazivom „Razvoj novih inkapsulacionih i enzimskih tehnologija za proizvodnju biokatalizatora i biološki aktivnih komponenata hrane u cilju povećanja njene konkurentnosti, kvaliteta i bezbednosti“. Na tome se zahvaljujem prof. dr Branku Bugarskom, kao i prof. dr Snežani Šerbuli.

Ogromnu zahvalnost dugujem svojoj porodici, a posebno roditeljima i sestri na bezrezervnoj podršci i ljubavi, koji su mi davali snage da sigurno koračam kroz život i ispunjavam svoje ciljeve od kojih je jedan i ova doktorska disertacija.

Zahvalnost dugujem i suprugu Mikanu, na podršci i razumevanju koje mi je pružio tokom izrade doktorske disertacije.

Autor

MOGUĆNOSTI KORIŠĆENJA BORA, LIPE I ZOVE U BIOMONITORINGU I FITOREMEDIJACIJI

IZVOD

Disertacija predstavlja rezultate ispitivanja mogućnosti upotrebe bora, lipe i zove u biomonitoringu i fitoremedijaciji. Istraživanje je sprovedeno u oblastima koje su pod uticajem zagađujućih supstanci iz topionice bakra, i sa odlagališta raskrivke i flotacijskih jalovišta.

Koncentracije Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd su određene u uzorcima opranog i neoprانog lišća, grana, korenja i rizosfernog zemljišta ispitivanih biljnih vrsta.

Lišće i grane bora, lipe i zove su u poređenju sa korenjem efikasniji u utvrđivanju kvaliteta životne sredine. Lišće bora, lipe i zove ukazuje na zagađenje životne sredine supstancama sa visokim sadržajem Fe, Cu, Pb, As, Cd i Zn (samo lišće lipe). Grane ispitivanih biljnih vrsta ukazuju na zagađenje sa visokim sadržajem Cu, Pb i As, pri čemu su grane bora i zove adekvatne i u slučaju Fe, a grane lipe u i slučaju Zn. Cu, Zn i As kao zagađujuće materije u zemljištu mogu se prepoznati putem korenja lipe i zove, a Fe samo preko korenja lipe. Zagađenje zemljišta ostalim elementima se ne može pratiti putem korenja ispitivanih biljnih vrsta. Korenje bora nije adekvatno za ispitivanje zagađenja zemljišta.

Lišće lipe i zove, a posebno zove je u odnosu na iglice bora pogodnije za utvrđivanje prisustva svih ispitivanih elemenata (osim Ni) u atmosferskoj depoziciji, kao i za utvrđivanje kvaliteta vazduha.

Utvrđeno je da bor, lipa i zova imaju mogućnosti adaptacije, koristeći različite mehanizme, u zavisnosti od uslova sredine svakog mesta uzorkovanja. Bor, lipa i zova nisu hiperakumulatori ni jednog od ispitivanih elemenata, tako da se ne mogu koristiti u fitoekstrakciji. Jedino lipa ima mogućnosti da se koristi u fitostabilizaciji, i to Cu, Zn i Cd, u specifičnim uslovima sredine, i u uslovima povećanih koncentracija ovih elemenata u zemljištu.

Potvrđeno je da su topionica bakra i flotacijska jalovišta u Boru, dominantni emiteri zagađujućih supstanci. Rezultati ispitivanja biljnog materijala i zemljišta ukazuju da su Cu, Pb, As i Cd glavne zagađujuće materije u ispitivanoj oblasti.

Ključne reči: biomonitoring, fitoremedijacija, bor, lipa, zova, bakar, arsen, olovo, kadmijum

Naučna oblast: Tehničke nauke

Uža naučna oblast: Tehnološko inženjerstvo

UDK broj: 502/504(043.3)

POSSIBILITIES OF USING PINE, LINDEN AND ELDER IN BIOMONITORING AND PHYTOREMEDIATION

ABSTRACT

The dissertation represents the results of examining the possibilities of using pine, linden and elder in biomonitoring and phytoremediation. The research was conducted in the areas that are affected by pollutants from the copper smelter, flotation tailings ponds and overburden dumps.

Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As and Cd concentrations were determined in the samples of unwashed and washed leaves, branches, roots and rhizospheric soil of the examined plant species.

Leaves and branches of pine, linden and elder in comparison with roots, are more efficient in determining the environmental quality. Pine, linden and elder leaves indicate the environmental pollution with substances which have a high content of Fe, Cu, Pb, As, Cd and Zn (only in linden leaves). Branches of the examined plant species indicate the pollution with high content of Cu, Pb and As, whereby pine and elder branches are also adequate in the case of Fe, and linden branches in the case of Zn. Cu, Zn and As, as the polluting substances in the soil, can be identified by linden and elder roots, and Fe just by linden roots. Soil pollution with other elements can not be monitored by roots of the examined plant species. Pine roots are not adequate for examination of soil pollution.

Leaves of linden and elder, and especially of elder, compared with pine needles, are more suitable for determining the presence of all the examined elements (except Ni) in the atmospheric deposition, as well as for determining the air quality.

It was found that pine, linden and elder have adaptation possibilities, using various mechanisms depending on the environmental conditions of each sampling site. Pine, linden and elder are not hyperaccumulators of the examined elements, so they can not be used in phytoextraction. Only linden has a possibility to be used in phytostabilisation, especially of copper, zinc and cadmium in the specific environmental conditions, and in conditions of the increased concentrations of these elements in soil.

It is confirmed that copper smelter and flotation tailings ponds in the town of Bor, are the dominant emitters of pollution. The results of examining plant material and soil show that Cu, Pb, As and Cd are the main polluting substances in the study area.

Keywords: biomonitoring, phytoremediation, pine, linden, elder, copper, arsenic, lead, cadmium

Scientific field: Technical sciences

Scientific subfield: Technological engineering

UDC number: 502/504(043.3)

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DEO	3
2.1. Biljke i zagađujuće supstance u vazduhu - Aspekti biomonitoringa	3
2.1.1. <i>Principi interakcija biljaka i zagađujućih supstanci u vidu čvrstih čestica iz vazduha</i>	3
2.1.2. <i>Biomonitoring</i>	5
2.2. Biljke i zagađujuće supstance u zemljištu - Aspekti fitoremedijacije.....	7
2.2.1. <i>Principi interakcija biljaka i zagađujućih supstanci u zemljištu</i>	7
2.2.2. <i>Fitoremedijacija</i>	9
3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	12
3.1. Bor	12
3.2. Lipa	16
3.3. Zova	18
4. OSNOVNE HIPOTEZE I CILJ RADA	22
5. MATERIJALI I METODE RADA	24
5.1. Opis ispitivanog područja	24
5.1.1. <i>Rudarske i metalurške aktivnosti u Boru i okolini</i>	24
5.1.2. <i>Zagađenje u Boru i okolini</i>	28
5.1.3. <i>Zone uzorkovanja biljnog materijala i zemljišta</i>	32
5.2. Uzorkovanje biljnog materijala i zemljišta.....	34
5.3. Priprema uzoraka biljnog materijala i zemljišta za fizičko-hemijske analize.....	35
5.4. Određivanje sadržaja organskih materija u zemljištu	36
5.5. Određivanje aktivne i potencijalne kiselosti zemljišta.....	36
5.6. Mikrotalasna digestija uzoraka zemljišta i biljnog materijala	37
5.7. Određivanje koncentracija metala i metaloida u biljnom materijalu i zemljištu.....	37
5.8. Metode obrade podataka.....	37
6. REZULTATI I DISKUSIJA	40
6.1. Zemljište bora, lipe i zove.....	40
6.1.1. <i>Kiselost zemljišta i sadržaj organskih materija u zemljištu</i>	40
6.1.2. <i>Koncentracije Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd u zemljištu bora, lipe i zove</i>	41
6.1.2.1. <i>Aluminijum</i>	42
6.1.2.2. <i>Gvožđe</i>	43
6.1.2.3. <i>Bakar</i>	44
6.1.2.4. <i>Cink</i>	45
6.1.2.5. <i>Olovo</i>	46
6.1.2.6. <i>Nikl</i>	47

6.1.2.7. Arsen.....	48
6.1.2.8. Kadmijum.....	50
6.1.3. Elementi u zemljištu sa najvećim vrednostima Faktora obogaćenja.....	51
6.1.4. Zavisnosti određenih parametara zemljišta bora, lipe i zove.....	53
6.2. Mogućnosti korišćenja bora, lipe i zove u biomonitoringu	55
6.2.1. Mogućnosti korišćenja lišća bora, lipe i zove u biomonitoringu Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd	55
6.2.1.1. Aluminijum.....	55
6.2.1.2. Gvožđe.....	57
6.2.1.3. Bakar.....	59
6.2.1.4. Cink.....	62
6.2.1.5. Olovo.....	64
6.2.1.6. Nikl.....	66
6.2.1.7. Arsen.....	68
6.2.1.8. Kadmijum.....	70
6.2.2. Elementi u lišću bora, lipe i zove sa najvećim vrednostima Faktora obogaćenja.....	72
6.2.3. Veza elemenata u neopranom i opranom lišću bora, lipe i zove.....	74
6.2.4. Mogućnosti korišćenja grana bora, lipe i zove u biomonitoringu Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd.....	76
6.2.4.1. Aluminijum.....	76
6.2.4.2. Gvožđe.....	76
6.2.4.3. Bakar.....	78
6.2.4.4. Cink.....	79
6.2.4.5. Olovo.....	80
6.2.4.6. Nikl.....	80
6.2.4.7. Arsen.....	81
6.2.4.8. Kadmijum.....	81
6.2.5. Elementi u granama bora, lipe i zove sa najvećim vrednostima Faktora obogaćenja.....	81
6.2.6. Veza elemenata u granama bora, lipe i zove.....	82
6.2.7. Mogućnosti korišćenja korenja bora, lipe i zove u biomonitoringu Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd.....	83
6.2.7.1. Aluminijum.....	83
6.2.7.2. Gvožđe.....	83
6.2.7.3. Bakar.....	85
6.2.7.4. Cink.....	86
6.2.7.5. Olovo.....	87
6.2.7.6. Nikl.....	87
6.2.7.7. Arsen.....	87
6.2.7.8. Kadmijum.....	88
6.2.8. Elementi u korenju bora, lipe i zove sa najvećim vrednostima Faktora obogaćenja.....	88
6.2.9. Veza elemenata u korenju bora, lipe i zove.....	89
6.3. Sadržaj ispitivanih elemenata u različitim delovima bora, lipe i zove, u zavisnosti od mesta uzorkovanja.....	90
6.3.1. Bor	90

6.3.2. <i>Lipa</i>	92
6.3.3. <i>Zova</i>	94
6.4. Mogućnosti korišćenja bora, lipe i zove u fitoremedijaciji.....	96
6.4.1. <i>Bor</i>	97
6.4.1.1. <i>Aluminijum</i>	97
6.4.1.2. <i>Gvožđe</i>	98
6.4.1.3. <i>Bakar</i>	99
6.4.1.4. <i>Cink</i>	100
6.4.1.5. <i>Olovo</i>	101
6.4.1.6. <i>Nikl</i>	101
6.4.1.7. <i>Arsen</i>	102
6.4.1.8. <i>Kadmijum</i>	103
6.4.2. <i>Lipa</i>	103
6.4.2.1. <i>Aluminijum</i>	103
6.4.2.2. <i>Gvožđe</i>	105
6.4.2.3. <i>Bakar</i>	105
6.4.2.4. <i>Cink</i>	106
6.4.2.5. <i>Olovo</i>	106
6.4.2.6. <i>Nikl</i>	107
6.4.2.7. <i>Arsen</i>	107
6.4.2.8. <i>Kadmijum</i>	107
6.4.3. <i>Zova</i>	108
6.4.3.1. <i>Aluminijum</i>	108
6.4.3.2. <i>Gvožđe</i>	108
6.4.3.3. <i>Bakar</i>	109
6.4.3.4. <i>Cink</i>	110
6.4.3.5. <i>Olovo</i>	110
6.4.3.6. <i>Nikl</i>	111
6.4.3.7. <i>Arsen</i>	111
6.4.3.8. <i>Kadmijum</i>	111
7. ZAKLJUČAK	113
8. LITERATURA	116
9. PRILOZI	
9.1. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u neopranih iglicama bora ($\mu\text{g/g}$).....	I
9.2. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u opranim iglicama bora ($\mu\text{g/g}$).....	VI
9.3. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u granama bora ($\mu\text{g/g}$).....	XIII
9.4. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u korenju bora ($\mu\text{g/g}$).....	XIV
9.5. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u neopranoj lišću lipe ($\mu\text{g/g}$).....	XV
9.6. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u opranoj lišću lipe ($\mu\text{g/g}$).....	XVI
9.7. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u opranoj lišću zove ($\mu\text{g/g}$).....	XVII
9.8. Izjava o autorstvu.....	XVIII
9.9. Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada	XIX
9.10. Izjava o korišćenju.....	XX

10. BIOGRAFIJA.....	XXII
11. PUBLIKOVANI I SAOPŠTENI RADOVI IZ OKVIRA DISERTACIJE.....	XXIII

1. UVOD

Prisustvo zagađujućih supstanci u životnoj sredini utiče na ekološku stabilnost, i narušava prirodnu ravnotežu u osnovnim životnim resursima. Kako se u Direktivi 2004/107/EC (EC, 2004) navodi, a prema naučnim dokazima, arsen, kadmijum, nikl kao i neki policiklični ugljovodonici spadaju u ljudske genotoksične kancerogene materije za koje ne postoji minimalna koncentracija ispod koje ove supstance ne uzrokuju negativne efekte na ljudsko zdravlje. Zato je poželjan konstantan monitoring, procena granica transmisije, razumevanje biogeochemijskog ciklusa zagađujućih materija, a pre svega sprečavanje njihovog nastanka i emisije u životnu sredinu (Marć i sar., 2015).

Pasivni monitoring zagađenja vazduha klasičnim instrumentalnim metodama se najčešće sprovodi u industrijskim, urbanim i saobraćajnim zonama. Na taj način se dobijaju informacije o koncentracijama određenih zagađujućih supstanci, uglavnom gasova i čvrstih čestica različitih prečnika. Monitoring zagađenja vazduha ali i celokupne životne sredine, može se izvoditi i uz pomoć biljaka, a ova metoda se u svetu koristi još od 1970. godine (Stankovic i sar., 2014). Takva vrsta ocene kvaliteta životne sredine, zasnovana na korišćenju bio-materijala i živih organizama, definiše se kao biomonitoring (Markert i sar., 2003). Biomonitoringom se mogu odrediti određene promene u zagađenoj u odnosu na nezagađenu životnu sredinu, određivanjem koncentracija specifičnih supstanci u biomonitoru, ili promena metaboličkih funkcija biomonitora (Wolterbeek, 2002; Serbula i sar. 2014a). Zato se u odnosu na konvencionalne metode monitoringa, biomonitoringom određuju i efekti koje zagađujuće materije imaju na živi svet (Markert i sar., 2003). Sposobnost biljaka da na/u svojim nadzemnim delovima, a pogotovo lišću, zadrže čvrste čestice iz vazduha, predstavlja osnovu za korišćenje u biomonitoringu zagađenja vazduha. Međutim, više biljke sa velikom biomasom na taj način i redukuju sadržaj štetnih materija u vazduhu, što ima veliki značaj u formiranju „zelenih tampon zona” u okolini velikih emitera. Na taj način se umanjuje efekat transporta zagađenja na velikim udaljenostima, a veća količina zagađujućih materija u zavisnosti od načina resuspenzije, ostaje u blizini samog izvora zagađenja. Zato neki naučnici više biljke poistovećuju sa biološkim filterima (Ramadan i Mandil, 2010; Przybysz i sar., 2014; Weber i sar., 2014).

Biljke su preko svojih nadzemnih delova u stalnoj interakciji sa zagađujućim supstancama u vazduhu, ali i preko korena sa zagađujućim supstancama u zemljištu. Sposobnost biljaka da usvajaju metale i metaloide iz zemljišta, osim što obezbeđuje funkcionisanje osnovnih metaboličkih funkcija, u posebnim uslovima omogućuje i njihovu upotrebu u fitoremedijaciji (Sinha i sar., 2007). Fitoremedijacija se može sagledavati sa više aspekata, a glavne tehnike fitoremedijacije su fitoekstrakcija i fitostabilizacija. Fitoekstrakcija se zasniva na smanjenju koncentracija ili potpunom uklanjanju određenih metala i metaloida iz zemljišta, apsorpcijom u biljkama. Fitostabilizacijom se uz pomoć biljaka specifične supstance u zemljištu imobilizuju, čime se onemogućuje njihova dalja distribucija u ostale komponente životne sredine. Glavnu ulogu u fitoekstrakciji imaju biljke hiperakumulatori, a u fitostabilizaciji biljke ekskluderi. Tokom ispitivanja fitoremedijacije neophodno je razumevanje mehanizama apsorpcije, translokacije i akumulacije metala i metaloida u

biljkama, a to se može postići jedino interdisciplinarnim pristupom problematici (Ali i sar., 2013).

Više biljke su u kontaktu sa zemljištem i vodom preko korena, a sa vazduhom preko lišća, grana i stabla, i u većini slučajeva je teško razlikovati količinu elemenata usvojenih iz zemljišta i iz vazduha. Ono što se sa sigurnošću može tvrditi je da višegodišnje biljke reflektuju kumulativne efekte zagađenja celokupne životne sredine (Tomašević i sar., 2011). Poznavanje osnovnih principa iz oblasti usvajanja supstanci iz zemljišta i vazduha od strane biljaka je poželjno za potpuno objašnjenje kruženja materije.

Solarna energija je pokretačka snaga za funkcionisanje i opstanak biljnog sveta, zbog čega se biomonitoring i fitoremedijacija mogu svrstati u „zelene tehnologije”, pri čemu biljni materijal predstavlja ekološki bezbedne i ekonomski isplative resurse.

2. TEORIJSKI DEO

2.1. Biljke i zagađujuće supstance u vazduhu - Aspekti biomonitoringa

2.1.1. Principi interakcija biljaka i zagađujućih supstanci u vidu čvrstih čestica iz vazduha

Nadzemni delovi biljaka predstavljaju fizičku barijeru za zagađujuće supstance prilikom njihovog transporta u vazduhu, obezbeđujući površinu za depoziciju i imobilizaciju čvrstih čestica i gasova. Zato se biljke poistovećuju sa biološkim filterima (Tong, 1991; Ramadan i Mandil, 2010; Przybysz i sar., 2014; Weber i sar., 2014). Zbog svoje velike biomase ali i fizioloških funkcija, drveće zauzima posebnu pažnju u istraživanjima koja se tiču njihovog pozitivnog efekta na kvalitet životne sredine (Singh i Verma, 2007; Terzaghi i sar., 2013; Przybysz i sar., 2014; Janhäll 2015; Kocić i sar., 2014; Sæbo i sar., 2012; Sánchez-López i sar., 2015).

Janhäll (2015) ukazuje da uticaj vegetacije na kvalitet vazduha zavisi od osobina i lokacije biljaka u odnosu na izvor zagađenja, kao i od nivoa zagađenosti vazduha određenog područja. Pri tom je bitno da vegetacioni pokrivač bude što bliže izvoru zagađenja, gde je najveća verovatnoća depozicije zagađujućih materija (Janhäll, 2015; Ugolini i sar., 2013; Mori i sar., 2015). Vegetacioni pokrivač mora imati odgovarajuću visinu i poroznost kako bi vazduh prolazio kroz njega. Međutim, uočeno je da se gustina vegetacije uvek menja pod uslovima jakih vetrova (Mori i sar., 2015).

Depozicija čvrstih čestica iz vazduha na površinu lišća se odvija putem četiri procesa: sedimentacijom koja je uslovljena silom gravitacije, difuzijom uslovljenom Braunovim kretanjem, impakcijom, i intercepcijom uzrokovanom turbulentnim kretanjem (Freer-Smith i sar., 2005). Veličina čestica je za razliku od sastava, bitnija za njihovo ponašanje u atmosferi (Grantz i sar., 2003). Sedimentacijom se deponuju velike čestice prečnika od 10-100 μm , impakcijom i intercepcijom se deponuju grube (2,5-10 μm) i fine (0,2-2,5 μm) čvrste čestice, dok Braunovo kretanje dovodi do depozicije ultra-finih čestica (<0,2 μm) (Freer-Smith i sar., 2005; Song i sar., 2015). Depozicija grubih čestica je efikasnija pri većim brzinama vetra, što nije slučaj i za ultra-fine čestice (Janhäll, 2015). Ultra-fine čestice imaju najveću sposobnost transfera u unutrašnje slojeve lišća biljaka putem difuzije. Čestice manje od 2 μm mogu ući u šupljine stoma (Song i sar., 2015). Ovo je zabrinjavajuća činjenica, zato što se najveći procenat toksičnih elemenata nalazi baš u česticama manjim od 2 μm . Najveći udeo metala i metaloida kao što su: Cu, Zn, As, Se, Cd i Pb, može se naći u česticama manjim od 1,1 μm (Pan i sar., 2015). U okolini postrojenja za topljenje i preradu rude bakra, As, Cd, Pb, Cu, Bi i Zn detektovani su u frakcijama čvrstih čestica manjim od 0,3 μm (Csavina i sar., 2011; González-Castanedo i sar., 2014). U okolini topionice bakra, As je činio 61-91% čestica manjih od 2,5 μm (Sánchez de la Campa i sar., 2008).

Količina čvrstih čestica iz vazduha koju vegetacija može da zadrži jeste udeo čestica koje se ne mogu resuspendovati (Schaubroeck i sar., 2014). Tri glavna mehanizma resuspenzije su: viskozni mehanizam koji se dešava kada se snagom vetra čestice odvajaju od lišća (najviše važi za grube čestice), turbulentni mehanizam koji se karakteriše rupturom graničnog sloja turbulentnim vazduhom što uzrokuje podizanje čestica sa površine lišća, i

mehanički mehanizam koji se odvija prilikom pomeranja lišća. Mehanički mehanizam ima najveći uticaj na čestice manje od 2 μm (Bertolotti i Gialanella, 2014).

Čestice zagađujućih materija se mogu ukloniti sa lišća dejstvom atmosferskih padavina. Spiranje čvrstih čestica sa lišća pod dejstvom kiše se može poistovetiti sa „čišćenjem filtera”, a površina lista se na taj način oslobađa za ponovno prihvatanje čestica. Čestice najvećeg prečnika se najlakše spiraju. Nakon padavina, najčešće kiše, frakcija čestica koja se spira sa lišća, deponuje se na tlo, i na taj način se imobilizuje. Ovaj proces može biti povoljan za planiranje fitoremedijacije zagađenog vazduha (Przybysz i sar., 2014; Wang i sar., 2015).

Zadržavanje čestica na lišću varira u zavisnosti od biljne vrste, ali i od roda unutar vrste (Dzierżanowski i Gawroński, 2011; Popek i sar., 2013; Sæbø i sar., 2012; Tomašević i Aničić, 2010). Međutim, ne postoji generalan stav o tome koja biljna vrsta ili koja struktura lista je najefikasnija za njihovo zadržavanje. Neki autori navode da su najuticajniji faktori gustina trihoma (dlakavost) (Mitchell i sar., 2010; Sæbø i sar., 2012; Sánchez-López i sar., 2015), hrpavost lista (Freer-Smith i sar., 2005) i/ili kutikularni vosak (Popek i sar., 2013; Sæbø i sar., 2012; Wang i sar., 2015). Ultrastrukture epikutikularnih voskova su usko povezane sa hidrofobnim osobinama lisne površine, a na taj način i sa kontaminacijom lista (Wang i sar., 2015). Voštana kutikula lišća viših biljaka predstavlja značajnu barijeru procesima jonske izmene. Površina voska smanjuje vreme zadržavanja kapljica vode na površini lista, a može biti i barijera između vodenih rastvora i hidrofilnih matriksa za razmenu jona unutar kutikula ili spoljašnjeg zida ćelija (Cape, 2009). Morfološke ultrastrukture, kao što su gusti slojevi trihoma na abaksijalnoj površini lista i kutikule sa malom propustljivošću na adaksijalnoj površini mogu imati ulogu „sita” pri ulasku jona metala u list (Sawidis i sar., 2012).

Količina čvrstih čestica i/ili njihovih konstituenata, deponovana na površini folijarnih delova, određuje se različitim metodama. Jedna od metoda je određivanje količine uklonjenih čestica, ispitivanjem vode/rastvora kojim je lišće oprano, ili biljnog materijala pre i posle pranja (Serbula i sar., 2012). U istraživanjima je korišćeno više tehnika uklanjanja čestica sa lišća, kao što su mehaničko čišćenje, pranje u različitim rastvaračima, pranje u destilovanoj vodi (Ataabadi i sar., 2012; Bertolotti i Gialanella, 2014). Pranje destilovanom vodom simulira uticaj kiše na uklanjanje adsorbovanih zagađujućih supstanci sa površine lišća. Pranjem lišća u destilovanoj vodi uklanja se i do 60% od ukupne koncentracije određenih elemenata (Sun i sar., 2010; Ugolini i sar., 2013; Przybysz i sar., 2014; Kocić i sar., 2014; Čeburnis i Steinnes, 2000; Marques i sar., 2001; Aboal i sar., 2004; Ataabadi i sar., 2012). Takođe se određuje i količina čestica u sloju voska na površini lišća (Mori i sar., 2015; Przybysz i sar., 2014). Fizičko-hemijske karakteristike čestica na abaksijalnoj i adaksijalnoj površini lišća, u većini slučajeva određuju se metodama skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM-Scanning Electron Microscopy i SEM-EDAX-Energy Dispersive Spectroscopy) (Kocić i sar., 2014; Sánchez-López i sar., 2015; Wang i sar., 2015; Song i sar., 2015). Sve navedene metode za određivanje količine čvrstih čestica deponovanih na/u lišću, omogućavaju i određivanje specifičnih toksičnih metala i metaloida u tim česticama. Koncentracije zagađujućih supstanci u/na lišću su u većini slučajeva u dobroj vezi sa koncentracijama u atmosferskoj depoziji (Aničić i sar., 2011; Samecka-Cymerman i sar.,

2006). Zato sposobnost biljaka da akumuliraju zagađujuće materije iz vazduha može biti iskorišćena i u svrhe biomonitoringa (Hu i sar., 2014; Przybysz i sar., 2014; Singh i Verma, 2007; Al-Alawi i Mandiwana, 2007).

2.1.2. *Biomonitoring*

Biomonitoring spada u metode za praćenje i utvrđivanje zagađenja životne sredine koristeći bio-materijale i žive organizme tj. biomonitore kao što su biljke, životinje, ljudi itd. U odnosu na konvencionalne metode monitoringa, biomonitoringom se određuju i uticaji zagađujućih supstanci na živi svet (Markert i sar., 2003). Tokom sprovođenja i analiza rezultata biomonitoringa bilo kog životnog resursa, neophodno je analizirati uticaje i interakcije zemljišta, vode, vazduha i biomonitora (Gałuszka, 2005). Biomonitoring je jeftina i pogodna alternativna metoda tradicionalnom monitoringu, iako je njegova glavna mana nedostatak standardnih procedura (Kaya i sar., 2010).

Biomonitori akumuliraju zagađujuće materije u svojim tkivima, zbog čega se poistovećuju sa koncentrorima analita ili uzorkivačima. Folijarni delovi kako zimzelenog tako i listopadnog drveća se uklapaju u opštu definiciju za pasivne uzorkivače u životnoj sredini koju su dali Górecki i Namieśnik, (2002) a sa kojom se slažu i Bertolotti i Gialanella, (2014). Prema ovim autorima pasivno uzorkovanje se zasniva na slobodnom protoku molekula analita od uzorkovanog medijuma (npr. vazduh) do medijuma uzorkivača (npr. biljka), što je posledica razlike u hemijskom potencijalu analita između dva medijuma. Zagađujuće materije se kreću ka lišću, pod dejstvom jedne ili kombinacijom više pogonskih sila (razlike u koncentracijama, pritisku, temperaturi itd.). Igllice četinara ili lišće listopadnog drveća mogu pružiti informacije o zagađenju životne sredine za neko određeno vreme izlaganja. Ipak, folijarni delovi su nepogodni za monitoring kratkoročnih varijacija (osim od nekoliko meseci) koncentracija zagađujućih materija. Igllice bora mogu dati informacije o zagađenju tokom vremenskog perioda ne dužeg od 5-6 godina (Bertolotti i Gialanella, 2014). Međutim, zimzeleno drveće ima nižu metaboličku aktivnost i manje brzine transpiracije u odnosu na listopadno drveće, što u velikoj meri utiče na intezitet akumulacije nutrijenata i toksičnih elemenata (St. Clair i Lynch, 2005).

Fizičko-hemijskim analizama biomonitora određuju se prisustvo i koncentracije zagađujućih supstanci, ali i eventualne promene u fiziološkim funkcijama kao odgovor na promene u životnoj sredini. Biomonitori trebaju biti reprezentativni za određeni ekosistem ili region, i moraju imati široku geografsku rasprostranjenost. Kako bi se postigla reprezentativnost uzorka, treba postojati mogućnost uzorkovanja velike količine materijala. Biomonitor mora imati visoku tolerantnost kako bi se izbeglo njegovo izumiranje čak i pri malim dozama zagađujućih materija. Biomonitor se mora odlikovati stabilnošću populacije kako bi se omogućilo ponavljanje uzorkovanja, što je neophodno za dugoročni monitoring. Najbitnije je ipak postojanje korelacija između koncentracija zagađujućih materija u biomonitoru i sredini čiji se kvalitet prati (Rucandio i sar., 2011; Serbula i sar., 2013a; Marć i sar., 2015). Tradicionalni monitoring je skup, a ponekad i neizvodljiv zato što su koncentracije zagađujućih materija u nekim slučajevima ispod granica detekcije uređaja.

Biomonitori akumuliraju zagađujuće materije tokom dužeg perioda tako da se problem niskih granica detekcije na taj način prevazilazi (Marć i sar., 2015).

Istraživanja iz oblasti biomonitoringa upotrebom biljaka trebaju se sprovoditi prema definisanim kriterijumima za izbor mesta uzorkovanja, i izbor biljnih vrsta. Ovi kriterijumi za definisanje izbora mesta uzorkovanja se odnose na udaljenost od izvora zagađenja, položaj u odnosu na pravac vetra koji nanosi zagađujuće materije iz pravca izvora zagađenja, prisustvo svih biljnih vrsta koje se žele koristiti u svrhe biomonitoringa itd.

Kriterijumi prema kojima se biraju biljne vrste, zavise od godišnjeg doba tokom kojeg se zagađenje prati (zimzeleno ili listopadno drveće), prisustva određene biljne vrste na svim mestima gde se zagađenje prati, količine biomase i ostalih fizičkih i fizioloških osobina jedinki. Preporučuje se uzorkovanje od tri do pet jedinki iste vrste sa istog mesta, dobrog izgleda, iste starosti, visine itd. Ukoliko neka biljka raste u uslovima zagađenog zemljišta i vazduha, potrebno je uzorkovanje kako nadzemnih tako i podzemnih delova, ali i zemljišta, da bi se stekao pravi uvid u distribuciju zagađujućih materija u životnoj sredini. Za ocenu zagađenosti vazduha najčešće se koriste lišće/iglice, kora i stablo biljaka. Koren je adekvatan za ispitivanje translokacije određenih elemenata iz zemljišta do nadzemnih delova biljaka, što je značajno u istraživanjima iz oblasti fitoremedijacije.

Simultano sprovođenje biomonitoringa i konvencionalnog monitoringa zagađenja vazduha je poželjno. Oslanjanje na rezultate konvencionalnih metoda monitoringa zagađenja je pravilan pristup, posebno ako se po prvi put ispituje sposobnost neke biljne vrste za pogodnost korišćenja u biomonitoringu.

Biomonitoring ima bitnu ulogu u oceni mogućnosti dospevanja zagađujućih supstanci u ljudski organizam, zato što zagađujuće supstance koje se deponuju na nadzemnim delovima biljaka i/ili direktno ulaze u stome lišća, uglavnom imaju sposobnost deponovanja u respiratorni trakt čoveka (Kaya i sar., 2010).

Drvenaste biljne vrste, posebno njihovi nadzemni delovi, predstavlja realne indikatore zagađenja životne sredine i najčešće se koriste u biomonitoringu, zato što akumuliraju veliki opseg dominantnih zagađujućih materija iz vazduha, imaju veliku rasprostranjenost, veliku biomasu i spadaju u višegodišnje biljke, što omogućava ponavljanje uzorkovanja biljnog materijala. U slučaju upoređivanja sposobnosti biljnih vrsta za korišćenje u biomonitoringu, vrlo je važno uzorkovanje folijarnih delova iste starosti. Ako se poredi listopadno sa zimzelenim drvećem, uzorkovane iglice trebaju biti iste starosti kao i lišće (Sawidis i sar., 2012). Verodostojni rezultati biomonitoringa, dobijaju se primenom brojnih kriterijuma vezanih za kvalitet, gde spadaju svi stupnjevi od planiranja do uzorkovanja i analiza, preko interpretacije rezultata.

2.2. Biljke i zagađujuće supstance u zemljištu - Aspekti fitoremedijacije

2.2.1. Principi interakcija biljaka i zagađujućih supstanci u zemljištu

Biljke imaju specifične i vrlo efikasne mehanizme kojima usvajaju nutrijente iz zemljišta. Međutim, istim mehanizmima se usvajaju, translociraju i akumuliraju i toksični elementi, čija hemijska svojstva odgovaraju hemijskim svojstvima esencijalnih elemenata (Tangahu i sar., 2011).

Usvajanje soli nutrijenata odvija se putem kompleksnih interakcija korena biljke i zemljišta. Nutrijenti prolaze kroz ćelijsku membranu u ćelije korena aktivnim i pasivnim transportom. Pasivni transport se zasniva na difuziji jona kroz ćelijsku membranu, iz oblasti viših (zemljišni rastvor) u oblast nižih koncentracija (ćelije korena). Svaka vrsta transporta koja se kroz ćelijsku membranu odvija iz oblasti nižih u oblast viših koncentracija uz trošenje metaboličke energije, spada u aktivni transport (Hopkins i Hüner, 2008). Kada su biološke i strukturne karakteristike ćelija korena izmenjene, pod uticajem koncentracija elemenata većih od potrebnih, svi elementi se usvajaju pasivno (Kabata-Pendias i Pendias, 2001).

Nakon apsorpcije u korenu ili listu, nutrijenti i zagađujuće supstance se transportuju do različitih organa biljke, istim fiziološkim procesima. Glavni procesi transporta su: 1) Transpiracioni tok: transport vode i rastvorenih materija iz korena do nadzemnih delova putem ksilema; 2) Asimilacioni tok: transport asimilata i rastvorenih materija od lista do delova biljke ispod (koren), ili iznad (plod) lista putem floema (Kvesitadze i sar., 2006).

Efikasnost usvajanja, distribucije i akumulacije metala iz zemljišta u biljkama zavisi od fizičko-hemijskih osobina zemljišta (pH, sadržaj organskih materija, kapacitet izmene katjona ...), osobina biljaka (dubina korena, vrsta biljke, starost biljke ...), oblika u kome se određeni metal nalazi, interakcija sa mikroorganizmima u zemljištu, klimatskih faktora i tako dalje (Kabata-Pendias i Pendias, 2001; Migeon i sar., 2009; Baltrėnaitė i sar., 2012).

Količina usvojenih metala u većoj meri zavisi od koncentracija njihovih biodostupnih oblika, nego od ukupnih koncentracija u zemljištu (Vamerali i sar., 2010). Biodostupna količina metala je količina u zemljištu koja može interagovati sa bilo kojim delom ćelije živog organizma (Kidd i sar., 2009). Najveću biodostupnost imaju joni metala koji se nalaze u zemljišnom rastvoru, bilo u obliku jona, helata ili kompleksa, a najmanju joni metala koji su precipitali (Kabata-Pendias i Pendias 2001; Bolan i sar., 2014).

Sa povećanjem vrednosti kapaciteta izmene katjona, sadržaja organskih materija, gline i pH vrednosti zemljišnog rastvora, biodostupnost metala opada (Konijnendijk i sar., 2005; Vamerali i sar., 2010; Meiman i sar., 2012). Biodostupnost divalentnih katjona za koren biljke raste u slabo kiselim zemljištima, a opada u alkalnim zemljištima usled precipitacije u obliku nerastvornih hidroksida (Ovečka i Takáč, 2014).

U pogledu biodostupnosti metala/metaloida u zemljištu, mogu se izdvojiti tri kategorije: lako biodostupni (Cd, Ni, Zn, As, Se, Cu); umereno biodostupni (Co, Mn, Fe) i najmanje biodostupni (Pb, Cr, U) (Ali i sar., 2013).

Biljke mogu povećati biodostupnost metala, otpuštanjem helirajućih jedinjenja (fitohelatori/fitosiderofore) u rizosferu pri čemu se metali heliraju i prevode u rastvoran oblik. Fitohelatori su najčešće organska jedinjenja male molekulske mase, a njihovi glavni predstavnici su: kiseline (jabučna, malonska, oksalna, sirćetna, ćilibarna, amino kiseline),

šećeri i fenoli. Formiranje helatnih kompleksa metala, sprečava precipitaciju i sorpciju, održavajući njihovu biodostupnost na potrebnom nivou. Biljke otpuštaju određene fitohelatore kao odgovor na deficit metala, povećavajući njihovu biodostupnost, što je primećeno u slučaju Fe, Al i Zn. Takođe, povećanje kiselosti rizosfere i eksudacija karboksilata su još jedna od strategija za povećavanje biodostupnosti metala od strane biljaka (Mackova i sar., 2006; Sheoran i sar., 2009; Seth, 2012). Povećanje kiselosti rizosfere biljka postiže tako što koren luči H⁺-jone koji zamenjuju katjone metala adsorbovane na česticama zemljišta, pri čemu se koncentracija jona metala u zemljišnom rastvoru povećava. Na ovaj način se povećava i mogućnost da biljka usvoji određeni metal preko korena. Izlučevine korena mogu smanjiti pH vrednost rizosfere za jednu ili dve jedinice, u odnosu na pH okolnog zemljišta (Ali i sar., 2013). Međutim, sa smanjenjem pH vrednosti zemljišnog rastvora može doći i do usvajanja elemenata u koncentracijama koje su fitotoksične (Bhargava i sar., 2012). Biljke takođe imaju sposobnost da utiču na smanjenje biodostupnosti metala, olakšavajući njihovu precipitaciju u obliku slabo rastvornih jedinjenja (u obliku sulfida ili karbonata) vezujući metale za kompleksna organska jedinjenja, sorpcijom metala na površini korena ili unutar korena (Mendez i Maier, 2008).

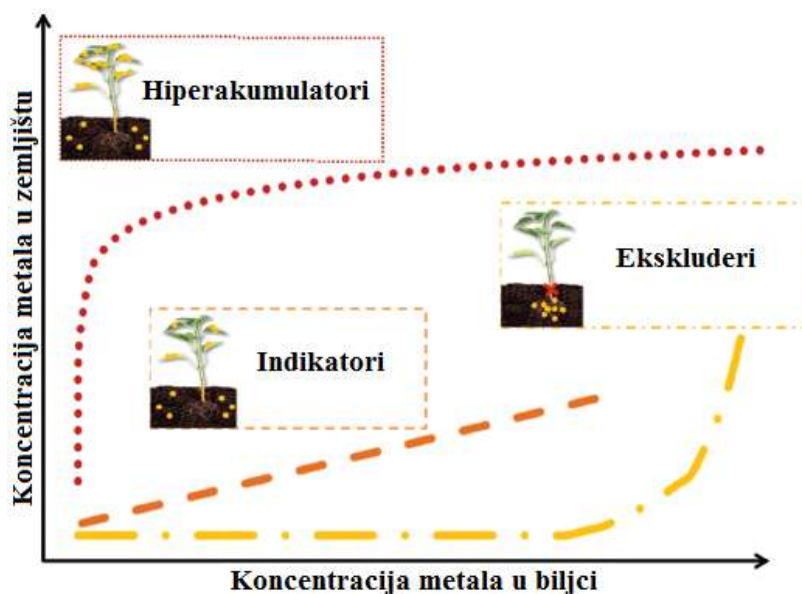
U rizosferi se nalaze mikroorganizmi (bakterije i gljive), od kojih neki mogu uspostaviti simbiotske veze sa biljkom, pa se prema tome dele u dve grupe: 1) mikrobi koji utiču na biodostupnost i pokretljivost a time i na količinu metala koje biljke usvajaju i 2) mikrobi koji poboljšavaju adaptivne vrednosti otpuštajući supstance koje pospešuju rast. Mikroorganizmi utiču na biodostupnost i kretanje metala u zemljištu menjajući pH vrednost zemljišnog rastvora, formirajući helatore metala, učestvujući u redoks reakcijama čime se direktno menja oksidaciono stanje metala, ili adsorbujući jone metala. Helatori formiraju komplekse sa metalima pri čemu nedostupne oblike metala/metaloida, čine dostupnim za usvajanje od strane mikroorganizama, i indirektno od strane biljaka. Adsorpcija jona metala na ćelijama mikroorganizama dovodi do smanjenja njihove biodostupnosti biljkama (Dal Corso i sar., 2013).

Simbiotske asocijacije gljiva mogu povećati površinu korena za absorpciju i stimulišu usvajanje nutrijenata uključujući i jone metala (Sheoran i sar., 2009).

Biljke koriste određene odbrambene strategije za toleranciju i detoksifikaciju, kada su suočene sa stresnim uslovima uzrokovanim visokim koncentracijama teških metala. Prvi stupanj reakcije na intoksikaciju metalima je izbegavanje stresa. To se postiže kontrolom količine metala koja se usvaja iz zemljišta, ili ekskluzijom čime se sprečava usvajanje metala u koren iz zemljišta. U sledećem stupnju, ako ove strategije ne uspeju i teški metali dospeju u biljku, aktiviraju se mehanizmi tolerancije za detoksifikaciju, gde spadaju: sekvencijacija i kompartmentalizacija metala u različitim unutarćelijskim prostorima (vakuole), prenošenje jona metala, vezivanje metala za ćelijski zid, unutarćelijska kompleksacija ili helacija jona metala otpuštanjem više supstanci kao što su organske kiseline, polisaharidi, fitohelatini i metalotionini. U slučaju da ovi procesi ne daju rezultate, i koncentracije teških metala u biljnim tkivima postanu prevelike, aktiviraju se antioksidativni odbrambeni mehanizmi (Emamverdian i sar., 2015; Ovečka i Takáč, 2014).

Na osnovu strategija reakcija biljaka na povećane koncentracije metala u zemljištu, biljke se mogu podeliti na ekskludere, akumulatore/hiperakumulatore i indikatore (slika 1). U

uslovima velikog opsega koncentracija metala u zemljištu, koncentracije metala u nadzemnim delovima biljaka ekskludera su konstantne i ne prelaze kritične vrednosti, sve dok se ne premaši određena koncentracija nakon čega se mehanizam ekskluzije narušava, i uspostavlja se nesmetan transport kroz biljku. Biljke akumulatori koncentrišu metale u nadzemnim delovima kako pri visokim tako i pri niskim koncentracijama u zemljištu. Koncentracije metala u nadzemnim delovima biljaka indikatora su u skladu sa koncentracijama metala u okolnoj sredini (Baker, 1981; Tamás i Martinoia, 2006; Bhargava i sar., 2012).



Slika 1. Koncentracije metala u nadzemnim delovima biljaka ekskludera, indikatora i hiperakumulatora (Hunt i sar., 2014)

Hiperakumulatori su podgrupa biljaka akumulatora, i obično su endemične vrste koje rastu na prirodno mineralizovanom zemljištu, i usvajaju velike koncentracije metala u svojim folijarnim delovima, bez toksičnih simptoma (Bhargava i sar., 2012). Tipične biljke hiperakumulatori imaju malu biomasu i rastu dosta sporije od većine drugih biljaka (Souza i sar., 2013).

Ispitivanjima u kontrolisanim uslovima, definisane su biljke hiperakumulatori samo za Ni, Zn, Cd, Mn, As i Se. Hiperakumulatori Pb, Cu, Co, Cr i Tl još uvek nisu prepoznate u takvim uslovima.

2.2.2. Fitoremedijacija

Ispitivanja fitoremedijacije su multidisciplinarna i trebaju se zasnivati na poznavanju hemizama koji se dešavaju u zemljištu, biologiji biljaka, ekologiji, mikrobiologiji zemljišta, kao i iz oblasti inženjerstva zaštite životne sredine (Ali i sar., 2013).

Fitoremedijacija se sve više svrstava u „zelene tehnologije” u kojima biljke kao ekonomski isplativa sredstva, služe za remedijaciju zagađenih zemljišta metalima i

metaloidima (Tangahu i sar., 2011; Bhargava i sar., 2012; Sinha i sar., 2007; Shah i Nongkynrih, 2007).

U tehnike fitoremedijacije se ubrajaju: fitoekstrakcija, fitofiltracija (rizofiltracija, blastofiltracija), fitostabilizacija, fitovolatizacija, fitodegradacija (fitotransformacija) (US EPA, 1999; Alkorta i sar., 2004; Favas i sar., 2014). Fitoremedijacija zemljišta zagađenog metalima i metaloidima zasniva se na dve najpoznatije tehnike a to su fitostabilizacija i fitoekstrakcija (Wong, 2003). Fitostabilizacijom se redukuje biodostupnost metala, dok se fitoekstrakcijom smanjuju koncentracije metala u zemljištu ili se oni potpuno uklanjaju (Barton i Abadia, 2006).

Fitostabilizacija se ostvaruje imobilizacijom zagađujućih materija u zemljištu, apsorpcijom i akumulacijom u korenu bez dalje translokacije u nadzemne delove, adsorpcije na površini korena, ili precipitacije u zoni korena biljke-rizosferi (US EPA, 1999; Wong, 2003; Padmavathiamma i Li, 2007; Tangahu i sar., 2011). Potrebno je istaći da u uslovima povišenih koncentracija elemenata u zemljištu, biljke ekskluderi usvajaju samo one količine elemenata koje su im neophodne za primarne metaboličke procese. Ovo se posebno odnosi na esencijalne metale (Ernst, 2005). Fitostabilizacijom se redukuje luženje metala u podzemne vode i intezitet erozije (Kvesitadze i sar., 2006; Roy i sar., 2015). Biljne vrste koje učestvuju u fitostabilizaciji imaju sposobnost da menjaju pH vrednost zemljišta i time redukuju rastvorljivost i mobilnost metala. U fitostabilizaciji se najčešće koriste biljke ekskluderi.

Fitoekstrakcija se ostvaruje sorpcijom metala unutar ćelija korena i translokacijom do nadzemnih delova biljke. Najpogodnije biljke za upotrebu u fitoekstrakciji su hiperakumulatori, koji utiču na povećanje biodostupnosti metala i metaloida u zemljištu (Kvesitadze i sar., 2006; Padmavathiamma i Li, 2007; Bhargava i sar., 2012). Biljne vrste trebaju da poseduju sledeće osobine, kako bi se efikasno koristile u fitoekstrakciji: 1) tolerantnost na velike koncentracije metala, 2) akumulacija velikih koncentracije metala, 3) velika brzina rasta, 4) velika biomasa, 5) dobro razvijen korenov sistem (Alkorta i sar., 2004). Poznato je oko 400 biljaka hiperakumulatora, što predstavlja manje od 0,2% svih skrivenosemenica (Koptsik i sar., 2014).

Drvenaste biljne vrste imaju velike mogućnosti za korišćenje u fitoremedijaciji zemljišta kontaminiranog metalima i metaloidima. Dokaz za to je i samoniklo drveće koje raste na zagađenom zemljištu. Njihov opstanak se najčešće zasniva na ekskluziji (Pulford i Watson, 2003; Domínguez i sar., 2008).

Jedan od načina za ispitivanje mogućnosti korišćenja određene biljne vrste u fitoremedijaciji, je izračunavanje odnosa koncentracija u biljci i zemljištu (Baker, 1981; Chamberlain, 1983; Mingorance i sar., 2007). Prema Baker, (1981), ukoliko je odnos koncentracija elemenata u lišću i zemljištu veći od jedan, onda je biljka akumulator, a ako je taj odnos manji od jedan onda je biljka ekskluder. Odnos koncentracija određenog elementa u biljci i zemljištu tumači se i sa aspekta usvajanja elemenata iz zemljišta, prema sledećim opsezima vrednosti odnosa koncentracija: 10-100 (intenzivna apsorpcija), 1-10 (jaka apsorpcija), 0,1-1 (srednja apsorpcija), 0,01-0,1 (slaba apsorpcija), 0,001-0,01 (veoma slaba apsorpcija) (Favas i sar., 2013). Međutim, neki naučnici ističu da izračunavanje navedenih odnosa koncentracija nije dovoljno kako bi se definisali način usvajanja i efikasnost translokacije metala u biljkama.

Na efikasnost translokacije elemenata u nadzemne delove biljke iz korena, ukazuje odnos koncentracija elemenata u nadzemnim delovima biljke i korena (Baker, 1981). Ukoliko je odnos koncentracija u lišću i korenu manji od jedan, onda je translokacija ograničena, i biljka ima osobine ekskludera i mogućnosti da se koristi u fitostabilizaciji. Ukoliko je taj odnos veći od jedan, translokacija iz korena u list je efikasna.

U naučnoj literaturi su definisane najniže koncentracije metala/metaloida koje biljka treba da sadrži u svojim nadzemnim delovima (najčešće lišću) da bi se smatrala hiperakumulatorom, kako bi se mogla koristiti u fitoekstrakciji. Prema tome, definisane su i koncentracije elemenata koje biljka treba da sadrži kako bi se smatrala ekskluderom i koristila u fitostabilizaciji. U tabeli 1 su dati neki od glavnih kriterijuma koje biljke trebaju da ispunjavaju da bi se koristile u fitoekstrakciji i fitostabilizaciji (Mendez i Maier, 2008). Mogućnost korišćenja biljaka u fitoekstrakciji postoji ukoliko je odnos koncentracija u nadzemnom delu biljke i zemljištu, kao i nadzemnom delu biljke i korenu >1 . Mogućnost korišćenja u fitostabilizaciji imaju biljne vrste za koje je ispunjen kriterijum da je odnos koncentracija elemenata u korenu i zemljištu >1 , a odnos koncentracija u nadzemnim delovima i korenu <1 (Padmavathiamma i Li, 2007; Bonanno, 2013).

Tabela 1. Karakteristike biljaka za fitoekstrakciju i fitostabilizaciju (Mendez i Maier, 2008)

	Fitoekstrakcija	Fitostabilizacija
Opšte karakteristike biljaka	Velika biomasa, velika brzina rasta	Velika krošnja, višegodišnje, dubok korenov sistem
$\frac{[\text{nadzemni deo biljke}]}{[\text{zemljište}]}$	>1	<1
$\frac{[\text{nadzemni deo biljke}]}{[\text{koren}]}$	>1	<1
Koncentracije metala u nadzemnim delovima biljaka (mg/kg)		
As	≥ 1000	≤ 30
Cd	≥ 100	≤ 10
Cu	$\geq 1000-5000$	≤ 40
Mn	$\geq 1000-10000$	≤ 2000
Pb	$\geq 1000-10000$	≤ 100
Zn	≥ 10000	≤ 500

3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

3.1. Bor

Bor (*Pinus* spp.) je zimzelena biljka prilagođena širokom opsegu ekoloških uslova. Raste u zajednici sa ostalim četinarima, ili širokolisnim drvećem. Uspeva u sušnim oblastima, na aluvijalnim i peskovitim zemljištima, kamenitim i močvarnim podlogama (Kole, 2007). Igllice određenih vrsta bora se koriste za ublažavanje tegoba koje prate artritis i reumu. Esencijalna ulja iz iglica primenjuju se u lečenju astme, bronhitisa i drugih respiratornih infekcija, kao i kod digestivnih problema. Smola sa grana i stabala bora ima antiseptična svojstva. Esencijalna ulja iz semena imaju diuretička svojstva i stimulišuće osobine na respiratorni sistem (Upadhyay, 2015).

Bor je u fokusu velikog broja istraživanja čiji su rezultati predstavljeni u naučnim radovima (slika 2). Pretraživanjem naučne baze Scopus po ključnoj reči *Pine*, utvrđeno je da polovina od ukupnog broja objavljenih naučnih radova pripada oblastima poljoprivrednih i bioloških nauka, a trećina je iz oblasti nauke o životnoj sredini. U većini istraživanja koja se bave zagađujućim supstancama u različitim vrstama bora, koriste se kora i iglice različite starosti, a znatno manje grane i korenje.

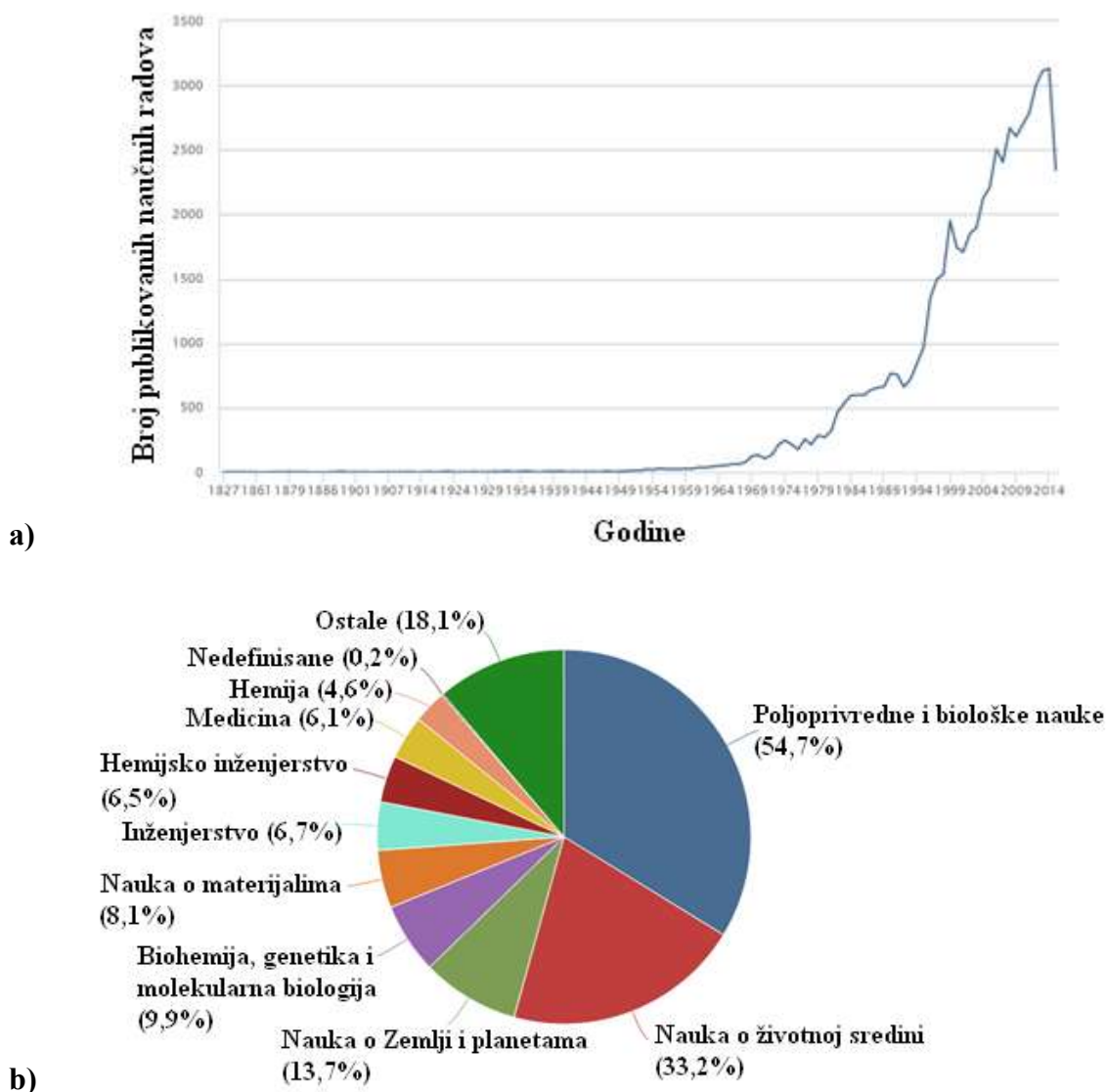
Neka od istraživanja u kojima je utvrđeno da su iglice bora pogodne za korišćenje u biomonitoringu, navedena su u tabeli 2. Autori su koristili više kriterijuma za procenu pogodnosti biomonitora, kao što su: smanjenje koncentracija određenog elementa u iglicama sa povećanjem udaljenosti od izvora zagađenja, povećane koncentracije elemenata u odnosu na normalne/fitotoksične za biljke, povećane koncentracije elemenata u iglicama bora uzorkovanim u potencijalno zagađenim oblastima u odnosu na nezagađene oblasti, velike koncentracije elemenata u biljnom materijalu koji je uzorkovan na pravcu vetrova kojima se transportuje zagađenje. Zagađujuće supstance koje se određuju u iglicama, najčešće su u vezi sa vrstom zagađenja koje se emituje iz dominantnih izvora zagađenja.

U priložima 9.1 i 9.2 su navedene koncentracije metala i metaloida u neopranim i opranim iglicama različitih vrsta bora, uzorkovanih u zagađenim i nezagađenim oblastima. Igllice uzorkovane u okolini topionica metala ili drugih industrija imaju najveći sadržaj ispitivanih elemenata.

Rautio i sar., (1998) su utvrdili da koncentracije Mn i Zn u iglicama bora (*Pinus sylvestris*) opadaju sa blazinom topionice nikla i bakra. Ovakav trend objašnjavaju uticajem velikih koncentracija Cu i Ni na sadržaj Mn i Zn u iglicama. Kabata-Pendias i Pendias, (2001) takođe ukazuju na antagonističke i sinergističke interakcije elemenata.

Razlike u koncentracijama metala/metaloida u neopranim i opranim iglicama, ukazuju na njihovo prisustvo u atmosferskoj depoziciji (Al-Alawi i Mandiwana, 2007). Sun i sar., (2010) su utvrdili da pranjem iglica bora (*Pinus massoniana* L.) nisu uklonjene statistički značajne količine elemenata Cu, Cd, Pb, Zn, Cr, Ni i Co. Pretpostavka ovih autora je da su ovi elementi imobilisani u sloju voska na iglicama, ili su se velikom brzinom translocirali u unutrašnjost iglica, što je specifično za Zn. Za razliku od toga, u radu Al-Alawi i Mandiwana, (2007), pranjem iglica bora (*P. halepensis* L.) uklonjene su statistički značajne količine Pb, Cd, Zn i Cu. U oba slučaja, iglice su prane destilovanom vodom. Čeburnis i Steinnes, (2000)

ukazuju da su [Wytenbach i sar.](#), našli da se sa iglica može sprati oko 60% As od ukupne koncentracije ovog elementa u iglicama.



Slika 2. Bor u naučnoj literaturi: a) broj publikovanih radova po godinama (raspon od 187 godina), b) publikovani radovi po oblastima istraživanja za navedeni period

Ključna reč: pine

Ukupan broj radova od 1827-23.10.2015.god. je 58149

Kao što i drugi autori navode, efikasnost uklanjanja određenih elemenata sa površine folijarnih delova biljaka zavisi od više faktora a ne samo količine voska na iglicama. Najočiglednija razlika između dva navedena reprezentativna istraživanja je prvenstveno razlika u vrsti bora koji se koristio u istraživanju, a time i različitim morfološkim i fiziološkim razlikama između vrsta. Veličina čestica u kojoj se određivani elementi nalaze takođe ima uticaja na efekat pranja, na šta indirektno utiče vrsta izvora zagađenja (tabela 2). Prema [Sæbo i sar., \(2012\)](#) gustina dlačica kao i debljina voska su bitni parametri za akumulaciju čvrstih čestica na površini iglica. Nisu uspostavljene bitne korelacije između

akumulacije čvrstih čestica, površinske hrapavosti i veličine iglica. Veličina čestica u kojima se određeni elementi nalaze, ima veliki uticaj na adsorpciju na iglicama.

Tabela 2. Vrste bora čije iglice se mogu koristiti u biomonitoringu metala/metaloida u zagađenom vazduhu

Vrsta bora	Starost iglica	Element	Mesto uzorkovanja	Literatura
<i>Pinus massoniana</i>	C i C+1	Fe, Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, Al	15 km od industrijskog centra (postrojenja za galvanizaciju, preradu aluminijuma i bakra, i za proizvodnju keramike)	Kuang i sar., (2007)
	C+1	Cu, Cd, Pb, Zn, Cr, Ni, Co	Okolina industrijskih pogona za topljenje gvožđa i čelika, petrohemijskih postrojenja i fabrika za proizvodnju keramike	Sun i sar., (2010)
<i>P. halepensis</i> L.	n.d.	Pb, Cd, Zn, Cu	Industrijska, saoraćajna, suburbana i kontrolna zona	Al-Alawi i Mandiwana, (2007)
	jednogodišnje i C	As, Al, Ti, Pb, Sb	Okolina termoelektrane i rafinerije nafte	Sardans i Peñuelas, (2005)
<i>Pinus pinea</i> L.	n.d.	platinska grupa elemenata (PGE)	Urbana oblast	Dongarrá i sar., (2003)
<i>Pinus nigra</i>	n.d.	Pb	Industrijska oblast, rudarske aktivnosti	Gedik i Akyildiz, (2013); Kaya i sar., (2010)
	n.d.	Cr, Cu, Fe, Pb	Urbana oblast	Sawidis i sar., (2011)
<i>Pinus pinea</i> L.	n.d.	Al, Ba, Cr, Cu, Fe, Pb	Industrijska oblast	Rossini Oliva i Mingorance, (2006)
	n.d.	As, Sb	Urbana oblast	Rucandio i sar., (2011)
<i>Pinus sylvestris</i>	različite starosti	Cu, Zn	Topionica metala, elektrana sa pogonom na mrki ugaj	Samecka-Cymerman i sar., (2006)
	jednogodišnje i dvogodišnje	Cu, Zn i Pb	Individualna ložišta i saobraćaj	Yilmaz i Zengin, (2004)
<i>Pinus spec.</i>	različite starosti	Al	Topionica aluminijuma	Wannaz i sar., (2012)
<i>Pinus eldarica</i> Medw.	n.d.	Ni, Cu, Pb	Urbana oblast	Kord i sar., (2010)

C-iglice mlađe od jedne godine (*current year needles*)

C+1-prošlogodišnje iglice (*previous year needles*)

n.d.-nije definisano

Prema eksperimentalnim rezultatima Przybysz i sar., (2014), utvrđeno je da se čestice prečnika 10-100 μm u najvećoj meri akumuliraju na iglicama bora (*Pinus sylvestris* L.). Pod uticajem kiše spiraju se samo najkrupnije čestice, dok najfinije ostaju na površini iglica. Urvat i sar., (2004) su korišćenjem SEM instrumentalne metode, zaključili da se na površini iglica bora (*Pinus nigra*) mogu akumulirati i čvrste čestice prečnika $<2,5 \mu\text{m}$, koje su sadrže polen ili spore, mineralnu prašinu i silicijum (silica-glassy) ili metalne sferoide. Mori i sar., (2015) su ispitivali akumulaciju čvrstih čestica na jednogodišnjim iglicama bora (*Pinus*

sylvestris L.). Ovi autori su utvrdili da akumulacija PM10 opada sa udaljenošću od saobraćajnice, dok se takva pravilnost nije primetila za manje čestice, što je posledica različitih brzina depozicije čestica. Kao što je poznato, čestice većih prečnika imaju veće brzine depozicije, a čestice manjih prečnika imaju manje brzine depozicije, zbog čega su se manje čestice transportovale na većim udaljenostima od izvora zagađenja. Przybysz i sar., (2014) ističu da ova istraživanja imaju značaja u planiranju bioremedijacije, sa aspekta redukcije aerozagađenja depozicijom zagađujućih materija na lišću vegetacije. Sæbo i sar., (2012), Song i sar., (2015) i Mori i sar., (2015) ukazuju da različite vrste bora trebaju da se uzgajaju u oblastima sa velikim aerozagađenjem, zbog njihove sposobnosti zadržavanja čvrstih čestica i tokom zime, kada su u nekim područjima koncentracije zagađujućih supstanci najveće.

Osim iglica bora, za biomonitoring zagađenja vazduha koristi se i kora. Kako bi se pratilo usvajanje i transport elemenata istraživači određuju sadržaje određenih elemenata u granama i korenju (prilozi 9.3 i 9.4), a ređe u stablu.

Dosta istraživača je ispitivalo koji deo bora sadrži najveće koncentracije nekog određenog elementa. Koren bora u odnosu na nadzemne delove u većini slučajeva sadrži veće koncentracije Cu, Ni i Zn (Fuentes i sar., 2007), Al (Wang i sar., 2012; Zhang i sar., 2014), As i Sb (Jana i sar., 2012). Fuentes i sar., (2007) su u eksperimentalnim uslovima utvrdili da sa povećanjem koncentracija metala u zemljištu, količina usvojenih metala u korenu opada zbog zasićenja tkiva korena. Ovakavo ponašanje je pogodno za biljke koje se koriste za fitoremedijaciju kontaminiranih oblasti, a tako se smanjuje mogućnost dospevanja teških metala u lanac ishrane.

Literaturni podaci ukazuju da stablo bora u odnosu na druge delove ima najniži sadržaj metala (Saarela i sar., 2005; Skonieczna i sar., 2014; Varnagirytė-Kabašinskienė i sar., 2014; Shcherbenko i sar., 2008; Rossini Oliva i Mingorance, 2004).

U poređenju sa korom bora, iglice sadrže manje koncentracije Cu, Pb, Cr i Zn. (Dogan i sar., 2010; Sawidis i sar., 2011; Chrzan i sar., 2015). Za razliku od toga, Rossini Oliva i Mingorance, (2004) su utvrdili da se koncentracije Cu u iglicama bora (*Pinus pinea* L.) ne razlikuju značajno od koncentracija u kori. Sadržaj Cu u iglicama je u dobroj korelaciji sa koncentracijama u kori bora, što ukazuje da visoke koncentracije u neopranih nadzemnim delovima najčešće potiču iz vazduha. Slične rezultate autori su dobili i za Zn.

Skonieczna i sar., (2014) su ispitivali koncentracije nekih makro i mikroelemenata u različitim delovima bora (*Pinus sylvestris*), uzorkovanim u jednoj od šumskih oblasti severozapadne Poljske. Najveće koncentracije: 1) C, N, P, K, Mg, S, Mn, Na i Fe detektovane su u iglicama, 2) Ca, Cd i Zn u kori; 3) Cu i Cr u granama i 4) Ni i Pb u šiškama. Najniže koncentracije: 1) C, N, P, S, Cu, Na, Ni, Pb, Zn i Fe ima stablo; 2) Ca, Mn i Cd sadrže šiškare; 3) K i Mg sadrže odumrle grane i 4) Cr ima kora. Shcherbenko i sar., (2008) su ispitivali koncentracije nekih elemenata u iglicama, granama, kori i stablu bora (*Pinus sylvestris*) uzorkovanim na razdaljini od 5-77 km od topionice bakra i nikla. Grane i korenje imaju veće koncentracije ispitivanih teških metala u odnosu na iglice i stablo. Koncentracije Zn su najveće u iglicama i granama, Cd u granama i kori, Ni, Cu, i Pb u kori. U radu Ots i Mandre, (2012) najveći sadržaj Cu, Cr i Fe detektovan je u iglicama i izdancima bora, dok su najveće koncentracije Pb u stabljikama. Na osnovu rezultata Gedik i Akyildiz, (2013) grane

bora (*Pinus nigra*) su indikatori cinka, dok su iglice indikatori olova. Samecka-Cymerman i sar., (2006) su utvrdili da se iglice bora (*Pinus sylvestris*) različite starosti mogu smatrati dobrim biomonitorima atmosferskog zagađenja bakrom i cinkom, dok je kora pogodna za biomonitoring jedino bakrom.

Jeyakumar i sar., (2014) su u eksperimentalnim uslovima ispitivali uticaj povećanih koncentracija Cu i Zn u zemljištu na rast i razvoj bora (*Pinus radiata*). Utvrdili su da sa povećanjem koncentracija Cu u zemljištu rastu i koncentracije u iglicama bora. Negativni efekti na količinu biomase korena i iglica nisu uočeni čak ni pri ukupnim koncentracijama Cu u supstratu od 232 mg/kg. Autori ukazuju da je ovakvo ponašanje posledica veoma male količine biodostupnog Cu. U ovom slučaju, veći udeo jona Cu bio je vezan za organske materije (oko 99%), a poznato je da se vezivanjem metala za organske materije oni imobilizuju u zemljištu (Padmavathiamma i Li, 2007). Fitotoksični efekti Zn, primećeni su pri koncentracijama u supstratu od 141 mg/kg (Jeyakumar i sar., 2014).

Jana i sar., (2012) su u sproveli istraživanje na jalovištu rudnika antimona, kako bi identifikovali biljnu vrstu koja je najpogodnija za fitostabilizaciju. U samoniklim biljkama i njihovom supstratu ispitivan je sadržaj As i Sb. Pri maksimalnim koncentracijama Sb i As u substratu od 5780 mg/kg i 852 mg/kg, respektivno, i u uslovima velike kiselosti substrata ($2,4 < \text{pH} < 3,9$) i malog sadržaja organskih materija (12 g/kg) na jalovištu je ipak postojao vegetacioni pokrivač. To je ukazivalo da su se prisutne biljke adaptirale na ekstremne uslove sredine, i da imaju razvijen neki od mehanizama za fitorektraciju i/ili fitostabilizaciju. Najzastupljenije biljne vrste bile su bor (*Pinus sylvestris*), breza (*Betula pendula*) i trska (*Juncus effusus*). Jana i sar., (2012) su utvrdili da se bor može koristiti za revegetaciju ispitivanih jalovišta, zato što je da koren akumulirao As i Sb bez dalje translokacije u nadzemne delove.

Favas i sar., (2013) su utvrdili da je bor (*P. pinaster*) sa jalovišta i kontaminiranog zemljišta sa niskom pH vrednošću (3,7-5,9) i niskim sadržajem organskih materija (0,3-4,65%), tolerantan na zagađenje metalima i deficit nutrijenata. Samim tim ispunjava uslove za stabilizaciju zagađenja i daje bolji vizuelni efekat takvim područjima. Nowak i Friend, (2005) su utvrdili da bor vrste *Pinus elliottii* Engelm. pokazuje rezistentnost prema povišenim koncentracijama Al u zemljištu, a glavni mehanizam rezistentnosti zasniva se u odupiranju korena da usvoji Al. Do sličnih rezultata došli su i Moyer-Henry i sar. (2005) za vrstu bora *Pinus taeda*.

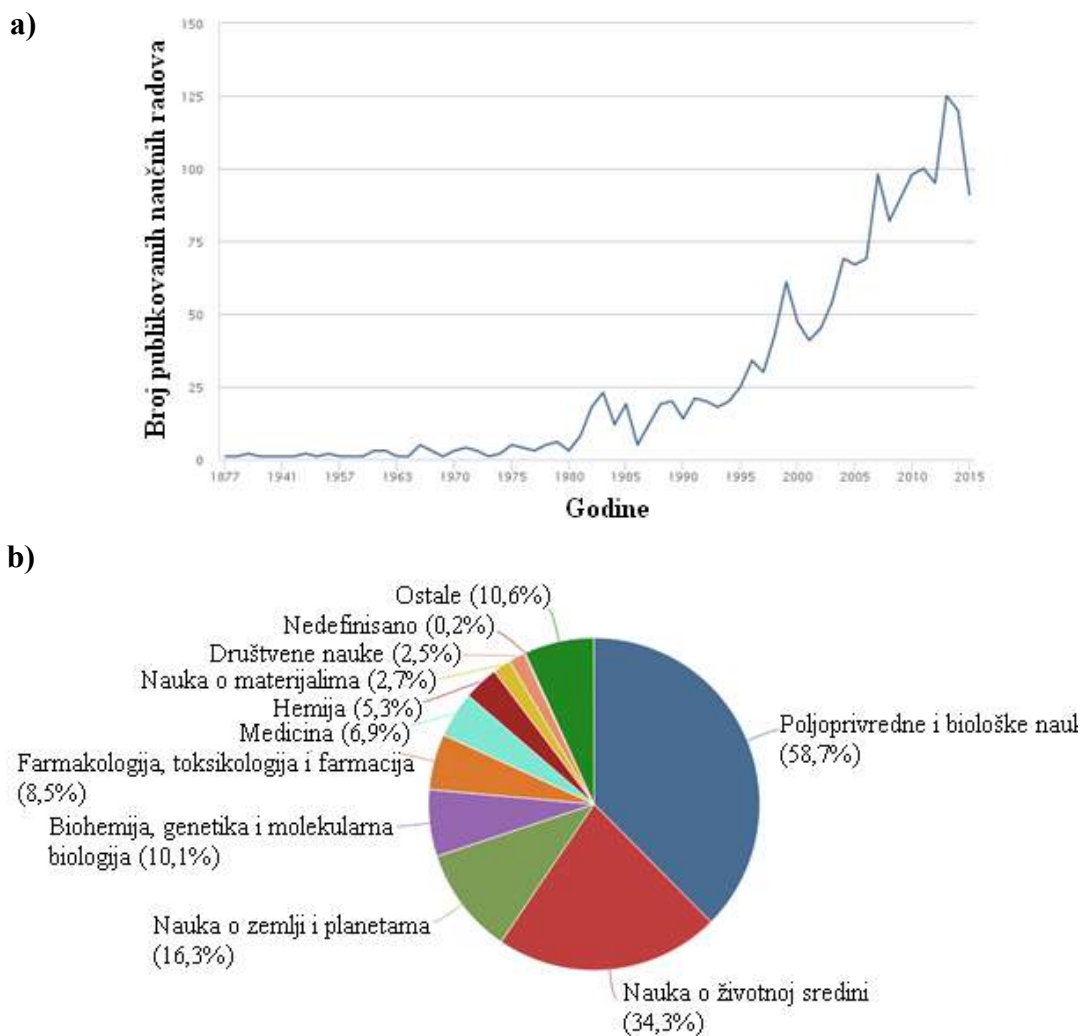
Kaya i sar., (2010) su jedni od retkih istraživača koji su zaključili da se bor (*Pinus nigra* L.) može smatrati hiperakumulatorom olova, zato što je u iglicama sadržao 3056 mg/kg Pb, pri koncentraciji u zemljištu od 602 mg/kg Pb.

3.2. Lipa

Autohtone vrste i varijeteti lipe (*Tilia* spp.) su najpoznatije urbano drveće. Korišćenje lipe kao ukrasnog urbanog drveća i lekovite biljke je dobro poznato u celoj Evropi (Söukand i sar., 2013; Ţenche-Constantinescu i sar., 2015). Čajevi na bazi lišća lipe imaju diuretičko i smirujuće dejstvo, smanjuju krvni pritisak, umiruju digestivni sistem, smanjuju respiratornu

sluz u slučaju pehlade i gripa i jačaju kardiovaskularni sistem (Pytlakowska i sar., 2012). Lipa je veoma rezistentna na abiotičke i biotičke stresove (Šoukand i sar., 2013; Ţenche-Constantinescu i sar., 2015).

Lipa se u naučnim radovima spominje od 1877.god., a broj objavljenih radova raste tokom godina (slika 3). Trećina od ukupnog broja radova objavljenih do 2015.god. spada u oblast nauke o životnoj sredini. Međutim, broj radova na godišnjem nivou koji se bavi lipom, je veoma mali u odnosu na broj radova koji se odnosi na četinarske vrste.



Slika 3. Lipa u naučnoj literaturi: a) broj publikovanih radova po godinama, b) publikovani radovi po oblastima istraživanja

Ključna reč: *Tilia*

Ukupan broj radova od 1877-23.10.2015.god. je 1785

U prilogima 9.5 i 9.6 date su koncentracije nekih metala/metaloida u neopranom i opranom lišću lipe, respektivno, uzorkovanom pretežno u urbanim oblastima i u blizini saobraćajnica. Tomašević i sar., (2011) ukazuju da kratkotrajno pranje lišća lipe (*Tilia cordata*) bidestilovanom vodom (3-5 s) ponovljeno dva puta pre hemijskih analiza, značajno

smanjuje koncentracije određenih metala u lišću. Najveći efekat pranja uočen je za Al, Fe i Pb, a pranje je imalo manji uticaj na koncentracije Cu, Cr, Co i Zn.

Piczak i sar., (2003) su utvrdili da se lišće lipe (*Tilia platyphyllos*) može koristiti u biomonitoringu zagađenja vazduha elementima kao što su Al, Cr, Cu, Fe, Ni i Pb. Prema Šućur i sar., (2010) lišće lipe je efikasno za korišćenje u biomonitoringu As i V u vazduhu.

Prema Kocić i sar., (2014) lipa (*Tilia* spp.) je bioakumulator Cr, Fe, Ni, Zn, Pb, As i V. SEM-EDAX analizom čestica deponovanih na licu i naličju lišća je utvrđeno da 50-60% čestica pripada klasi finih čestica sa prečnikom manjim od 2 μm . Koncentracije Pb u lišću su najveće u odnosu na koncentracije ostalih ispitivanih elemenata, što je posledica intenzivnog saobraćaja u ispitivanoj oblasti.

Sæbo i sar., (2012) su ispitivali efikasnost zadržavanja čvrstih čestica iz vazduha na lišću različitih biljnih vrsta i utvrdili da je lišće lipe (*Tilia cordata*) manje efikasno za zadržavanje čvrstih čestica u odnosu na bor (*Pinus mugo* i *Pinus sylvestris*). Prema Marakaev i sar., (2006) bor (*Pinus nigra*) je rezistentniji na zagađenje nego lipa (*Tilia cordata*).

Prema rezultatima Hagen-Thorn i Stjernquist, (2005), koncentracije mikronutrijenata u lišću lipe su značajno veće nego u stablu, što je potvrđeno i u slučaju različitih vrsta bora.

3.3. Zova

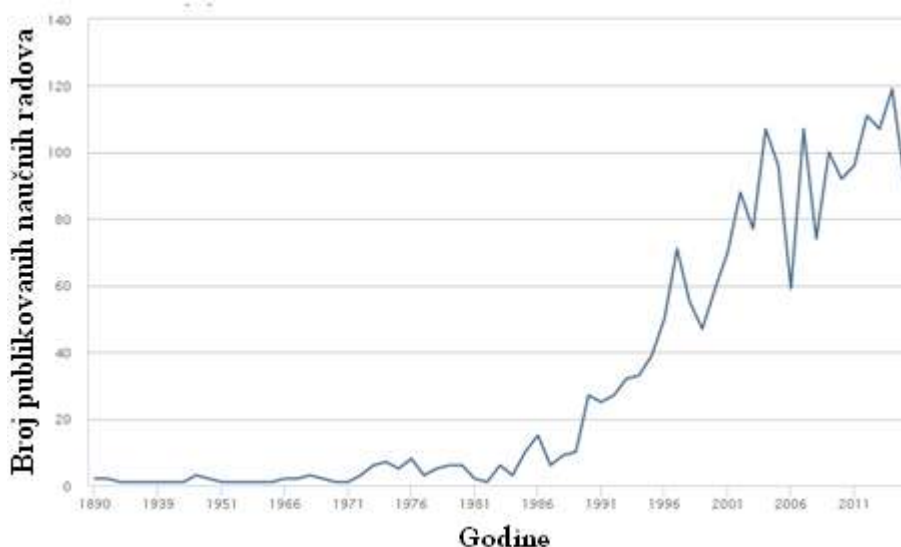
Zova (*Sambucus nigra*) je endemična i široko rasprostranjena na Britanskim ostrvima i kontinentalnoj Evropi. Prisutna je u obliku žbunja ili manjeg drveća, visine do 10 m. Raste na otvorenim površinama i na rubovima šuma. Često se može naći i na degradiranim zemljištima sa velikim sadržajem teških metala (Atkinson i Atkinson, 2002; Vandecasteele i sar., 2002). Poznato je da zova ima lekovita svojstva. Ekstrakt ploda zove i preparati na bazi ploda pokazuju antivirusna svojstva, smanjujući trajanje simptoma gripa od 3 do 4 dana. Stimuliše i štiti imuni sistem pacijenata koji boluju od kancera i side. Osim u lekovite svrhe, plod zove se koristi i za pravljenje slatka, vina, i za davanje ukusa i boja drugim proizvodima kao što su sladoledi, jogurti i razni napici (Kolodziej i sar., 2012). Osim kao lekovita i ukrasna biljka, zova se koristi za kontrolu erozije zemljišta (Reyes i sar., 2013).

Na slici 4 dati su rezultati pretraživanja naučne baze Scopus po ključnoj reči *Sambucus*, odakle se zapaža da broj objavljenih radova na godišnjem nivou raste. Iako je zova uglavnom samonikla u urbanim oblastima i na zemljištima veoma lošeg kvaliteta ili čak zagađenim zemljištima (Kabuce i Priede, 2006), uticaj stanja životne sredine na fiziološke funkcije i koncentracije određenih elemenata u biljnom materijalu zove nije dovoljno ispitan. To dokazuje i veoma mali procenat objavljenih radova iz naučne oblasti o životnoj sredini koji iznosi samo 9,4%.

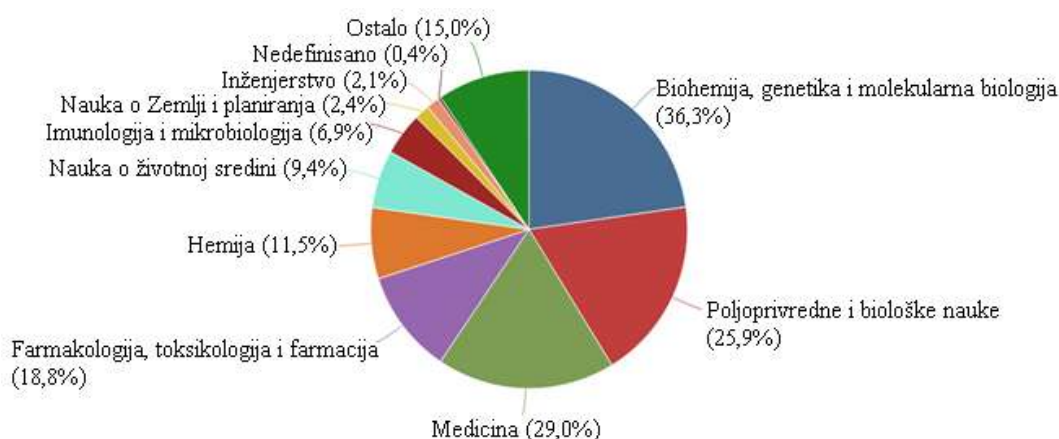
U prilogu 9.7 su date koncentracije nekih metala/metaloida u opranom lišću zove uzorkovanom u zagađenim oblastima.

Tong (1991) je u eksperimentalnim uslovima utvrdio da je efikasnost translokacije Pb i Cu iz zemljišta u koren zove (*Sambucus americana*) veoma mala, kada su koncentracije Pb i Cu u zemljištu manje od 300 mg/kg i 150 mg/kg, respektivno. Samo oko 12% količine ovih

metala translocirano je u lišće. Koncentracije ispitivanih metala u lišću jedinki zove koje su rasle u tretiranom i netretiranom substratu, nisu se statistički značajno razlikovale.



a)



b)

Slika 4. Zova u naučnoj literaturi: a) broj publikovanih radova po godinama, b) publikovani radovi po oblastima istraživanja

Ključna reč: *Sambucus*

Ukupan broj radova od 1890-23.10.2015.god. je 2001.

Madejón i Lepp, (2007) su preko odnosa koncentracija As u lišću i zemljištu ispitivali usvajanje As u različitim samoniklim biljkama iz zemljišta, među kojima je bila i zova (*Sambucus nigra* L.). Utvrđeno je da je transfer iz zemljišta u biljke veoma slab, pri koncentracijama As u zemljištu od 51,9-218,0 mg/kg (pH vrednosti zemljišta 5,55-7,37, OM u zemljištu 7,66-15,40%). Autori ovog istraživanja zaključuju da zova na ispitivanom području ima mogućnosti za korišćenje u fitostabilizaciji arsena u zemljištu. Pretpostavlja se da ispitivane biljke poseduju prirodne sposobnosti i mehanizme koje omogućavaju njihovo korišćenje u fitostabilizaciji, ili su se ovi mehanizmi razvijali tokom njihovog rasta.

Orsega i sar., (2003) su predstavili rezultate eksperimentalnih ispitivanja translokacije Cu, Mn i Fe iz zemljišta do lišća zove (*Sambucus nigra* L.), u uslovima povećanih

koncentracija Cu u zemljištu. Ispitivana je veza koncentracija Cu u lišću i procenta rasta. Nakon 56 dana jedinke su razdvojene od substrata, nakon čega su vršena hemijska ispitivanja. Izdvojile su se 3 zone: 1) zona deficitnih koncentracija; 2) zona optimalnih koncentracija; 3) zona toksičnih koncentracija. Uska prelazna zona između zone deficitnih i toksičnih koncentracija, je zona optimalnih koncentracija. Prema rezultatima Orsega i sar., (2003) opseg koncentracija Cu, pri kojima su fiziološke funkcije zove optimalne, je između 4 i 9 mg/kg po suvoj masi lišća. U deficitarnoj zoni, porast koncentracija Cu u lišću je povezan sa povećanjem rasta biljke, dok dalje povećanje koncentracija Cu dovodi do tačke kada rast biljke prestaje. Donja granica zone optimalnih koncentracija Cu u lišću od 4 mg/kg, odgovara kritičnoj koncentraciji koja se može definisati kao minimalna koncentracija bakra u lišću koja je povezana sa maksimalnim rastom biljke. Autori su utvrdili da su u uslovima prekomernih koncentracija Cu u substratu, Cu^{2+} -joni prisutni u biljci. Inače, toksičnost bakra u biljkama pripisuje se prisustvu Cu^{2+} -jona koji imaju uticaja na stvaranje slobodnih radikala, koji izazivaju oksidativni stres i negativno utiču na fiziologiju biljaka. Ovi istraživači su takođe utvrdili da je i Fe bilo prisutno kao Fe^{3+} -jon, dok je mangan prisutan u obliku Mn^{2+} -jona. Bakar ima sinergistički efekat na usvajanje mangana. Rezultati Orsega i sar., (2003) mogu biti značajna osnova za upoređivanje sposobnosti usvajanja bakra od strane samoniklih vrsta zove na kontaminiranim područjima.

U istraživanju Migeon i sar., (2009), odnosi koncentracija Cd, Zn i Pb u lišću i zemljištu zove (*Sambucus nigra*) su manji od 1, što ukazuje da lišće zove nije akumulator ispitivanih elemenata. Do sličnih rezultata došli su i Vandecasteele i sar., (2002) koji su utvrdili da zova (*Sambucus nigra*) koja je rasla u zagađenom substratu sa visokim koncentracijama Cd i Zn, nije sadržala povišene koncentracije ovih elemenata u svojim delovima. Yanqun i sar., (2004) su utvrdili da zova (*Sambucus chinensis*) sa zemljišta Pb-Zn rudnika, nije hiperakumulator Pb, Cd, Cu i Zn. Prema rezultatima Li-qiang i sar., (2004) lišće zove (*Sambucus williamsi*) ima sposobnost apsorpcije Hg.

Kolodziej i sar., (2012) su ispitivali efekat emisije zagađujućih materija poreklom iz saobraćaja na hemijski sastav cveta i ploda zove (*Sambucus nigra*). Ovi istraživači su dobili značajne korelacije između sadržaja Cr, Fe, Cd i Cu u plodu zove i Fe, Zn, Cu, Cr, Pb i Mg u cvetu zove. Blizina i intenzivniji saobraćaj značajno su doprineli povećanju sadržaja ovih elemenata u analiziranom biljnom materijalu.

Prema Mitchell i sar., (2010), zova (*Sambucus nigra*) na svom lišću zadržava daleko manje količine PM10 u odnosu na lišće lipe (*Tilia platyphyllos*). Ovi autori ukazuju da je površinska morfologija dominantan faktor koji utiče na depoziciju čestica na površini lišća, a neravna dlakava površina lista uzrokuje najveće brzine depozicije čvrstih čestica.

Talley i sar., (2006) su ispitivali uticaj prašine sa asfaltiranih i zemljanih puteva na fiziološke stresove zove (*Sambucus mexicana*). Zova uzorkovana blizu zemljanih puteva imala je tanje i kraće lišće, manji sadržaj vode i veći procenat mrtvih stabljika, nego biljni materijal uzorkovan blizu asfaltiranih puteva.

Rezultati istraživanja u naučnim radovima ukazuju na veliki istraživački potencijal pasivnog biomonitoringa i fitoremedijacije. Najveći broj radova iz oblasti nauke o životnoj sredini fokusiran je na ispitivanje bora, u odnosu na lipu i zovu. Iako je zova samonikla biljka na kontaminiranim područjima, ona nije dovoljno proučena sa aspekta biomonitoringa i

fitoremedijacije. Većina istraživanja se bazira na ispitivanjima samo nadzemnih delova biljaka što je moglo dovesti do pogrešnog tumačenja usvajanja metala/metaloida iz nekog medijuma, i distribucije zagađujućih materija u biljkama. Većina autora se bavi problematikom zagađenja poreklom iz saobraćaja, dok se znatno manje pažnje posvećuje zagađenju emitovanom iz rudarsko-metalurških procesa za proizvodnju bakra.

U Boru i okolini su do sada ispitivane mogućnosti više biljnih vrsta za korišćenje u biomonitoringu, što je dobro i zbog određivanja rizika od ulaska teških metala u lanac ishrane (Nujkić i sar., 2016; Dimitrijević i sar., 2016; Alagić i sar., 2015, 2016; Tošić i sar., 2016).

4. OSNOVNE HIPOTEZE I CILJ RADA

Istraživanjima u okviru ove doktorske disertacije utvrdiće se mogućnosti korišćenja lišća/iglica, grana i korenja bora, lipe i zove u određivanju prisustva zagađujućih supstanci u atmosferskoj depoziciji i ocene stanja životne sredine koja je pod uticajem emisije iz rudarskih i metalurških procesa za dobijanje bakra. Još jedan od ciljeva istraživanja zasnovan je na definisanju mehanizama kojima su se biljke adaptirale na povećane koncentracije metala/metaloida u vazduhu i zemljištu, a koji su zasnovani na indikaciji, bioakumulaciji i ekskluziji.

Osnovna hipoteza, kojom je definisan predmet istraživanja, je da se biljke mogu koristiti u biomonitoringu sveukupnog zagađenja životne sredine, zato što usvajaju zagađujuće materije iz vazduha i iz zemljišta. Nadzemni delovi biljaka predstavljaju fizičku barijeru pri transportu aerozagađenja, obezbeđujući površinu za depoziciju i imobilizaciju čvrstih čestica i gasova. Zbog svoje velike biomase ali i fizioloških funkcija, drvenaste biljne vrste zauzimaju posebnu pažnju u istraživanjima koja se bave biomonitoringom zagađenja vazduha, i ispitivanjem pozitivnog efekta na kvalitet vazduha.

Još jedna od polaznih hipoteza je da se biljke mogu koristiti u fitoremedijaciji zato što istim mehanizmima usvajaju, translociraju i akumuliraju kako povećane koncentracije esencijalnih mikronutrijenta tako i toksične elemente iz zemljišta, čija su hemijska svojstva slična hemijskim svojstvima esencijalnih elemenata. Živi sistemi kao što su biljke, ukazuju na kumulativno zagađenje, i na biodostupnost toksičnih materija.

Bor, lipa i zova rastu u oblastima sa velikim zagađenjem vazduha i zemljišta, poreklom iz pogona za obogaćenje rude i topljenja koncentrata bakra. Pretpostavlja se da su ove biljne vrste razvile određene strategije adaptacije u takvim uslovima. Zato se očekuje da bor, lipa i zova imaju razvijene mehanizme za akumulaciju ili ekskluziju toksičnih i kancerogenih supstanci iz okruženja u kome opstaju.

Očekivani značaj ove disertacije se sastoji u sledećem:

- ❖ Ispitivanjem biljnog materijala bora, lipe i zove uzorkovanog u oblastima sa velikim zagađenjem zemljišta i vazduha, utvrdiće se koja biljna vrsta (deo biljke) ima veću sposobnost akumulacije određenih metala i metaloida;
- ❖ Definisaće se koja biljna vrsta ima veću sposobnost zadržavanja metala i metaloida iz vazduha na svom lišću/iglicama;
- ❖ Ustanoviće se sposobnost bora, lipe i zove za upotrebu u biomonitoringu zagađenja vazduha;
- ❖ Nivoi metala i metaloida u biljnom materijalu uzorkovanom na različitim udaljenostima od dominantnog izvora zagađenja, doprineće saznanjima o granicama transmisije zagađenja poreklom iz topionice bakra i rudarskih jalovišta.
- ❖ Fizičko-hemijske karakteristike rizosfere ispitivanih biljaka, definisaće nivoe transporta materija iz okoline jalovišta i topionice bakra;
- ❖ Utvrdiće se poreklo (vazduh i/ili zemljište) povećanih nivoa metala/metaloida u biljnom materijalu;

- ❖ Prema kriterijumima za ispitivanje sposobnosti biljaka da usvajaju i translociraju metale i metaloide iz zemljišta, definiše se biljka koja može da se koristi u fitostabilizaciji ili fitoekstrakciji;
- ❖ Rezultati ove doktorske disertacije imaju značajan doprinos u nauci o životnoj sredini, zato što fitoremedijacija i biomonitoring spadaju u „zelene tehnologije” u kojima biljke predstavljaju ekonomski opravdane resurse.

5. MATERIJALI I METODE RADA

5.1. Opis ispitivanog područja

5.1.1. Rudarske i metalurške aktivnosti u Boru i okolini

Grad Bor se nalazi u planinskoj oblasti Istočne Srbije (Jugoistočna Evropa), blizu granice Republike Srbije sa Bugarskom i Rumunijom, na oko 200 km od Beograda. Klima na području Bora je umereno-kontinentalna. Vetrovi sa najvećom učestalošću su Z (zapadni), ZSZ (zapad-severo-zapadni) i SZ (severo-zapadni). Manje učestali vetrovi su I (istočni), ISI (istok-severo-istočni) i IJI (istok-jugo-istočni), dok su vetrovi sa najmanjom učestalošću J (južni) i JJZ (jug-jugo-zapadni). Iako su vetrovi u ovoj oblasti učestali, njihova jačina je slaba do umerena.

Bor i okolina su poznati po ležištima rude bakra, koja spadaju među najveće u Evropi (Serbula i sar., 2013b). Rudarsko-metalurška proizvodnja u Boru postoji više od 100 godina (EIA Study, 2010). U okviru Rudarsko-topioničarskog basena Bor, posluju dva rudnika sa površinskom eksploatacijom (Cerovo i Veliki Krivelj) i jedan sa podzemnom eksploatacijom („Jama” u Boru). U Velikom Krivelju i Boru se nalaze postrojenja za flotaciju (EIA Study, 2010). U Boru se nalazi i topionica bakra.

Rudnički kompleks **Cerovo** se nalazi oko 14 km severo-zapadno od Bora između Cerove reke na istoku i reke Valja Mare na jugo-zapadu, koje spajanjem formiraju Kriveljsku reku, približno 2 km jugo-istočno od rudnika, kod sela Mali Krivelj (ERM, 2006). Glavni nosioci bakarnog ležišta su minerali halkopirit i bornit (Jenić i sar., 2012). U ovom kompleksu eksploatacija je započeta 1991. godine. Rudnik je privremeno prestao sa radom krajem 2002. godine zbog pada cene bakra, pa eksploatacija sa tadašnjim uslovima na tržištu nije bila profitabilna (Milanović i sar., 2012). Kako je cena bakra porasla a uslovi na tržištu su se promenili, ostvarila se mogućnost ponovnog otvaranja rudnika, 2011. godine (Bogdanović i sar., 2011). U sastavu rudnika Cerovo nalaze se površinski kop i pogon za pripremu mineralnih sirovina u kome se ruda drobi, prosejava, melje, zgušnjava i hidrottransportuje (Lilić i sar., 2008). Tokom iskopavanja rude bakra, formirano je i odlagalište raskrivke. Na slikama 5 i 6 prikazani su površinski kop Cerovo i odlagalište raskrivke rudnika bakra Cerovo.

Rudnički kompleks **Veliki Krivelj** se nalazi 1 km jugoistočno od sela Veliki Krivelj, 8 km severno od Bora, i obuhvata površinu od oko 254 ha. Glavni nosioci bakarnog orudnjenja su pirit i halkopirit, a manje bornit. U ovom kompleksu se ruda bakra iskopava sa površinskog kopa, a takođe se vrši priprema mineralnih sirovina i flotacija minerala bakra (Jenić i sar., 2012). U okolini površinskog kopa Veliki Krivelj, formirana su dva odlagališta raskrivke, na lokalitetima Todorov potok i Saraka potok, koja se nalaze na suprotnim stranama površinskog kopa (Bogdanović i sar., 2011). Flotacijako jalovište je formirano u dolini Kriveljske reke, južno od rudarskog kompleksa, 12 km severno od sela Oštrej. Sastoji se od dva polja (Polje 1 i Polje 2) koja se nalaze između tri brane (1A, 2A i 3A). Jalovina iz flotacije Veliki Krivelj se kao 25–30% mulj transportuje kroz betonski kanal do jalovišta. Površinski kop i deo odlagališta raskrivke rudnika Veliki Krivelj prikazani su na slikama 7 i 8, respektivno. Na slici 9 se vidi izgled flotacijskog jalovišta rudnika Veliki Krivelj.



Slika 5. Površinski kop rudnika bakra Cerovo



Slika 6. Odlagalište raskrivke rudnika bakra Cerovo



Slika 7. Površinski kop rudnika bakra Veliki Krivelj



Slika 8. Deo odlagališta raskrivke rudnika bakra Veliki Krivelj



Slika 9. Deo flotacijskog jalovišta rudnika bakra Veliki Krivelj

Borski površinski kop se nalazi na severnom obodu grada, dubine je oko 300 m i širine preko 1 km na najširem mestu (slika 10) (EIA Study, 2010). Eksploatacija nalazišta bakra na Borskom površinskom kopu trajala je od 1924. do 1993. godine. Površinski kop se trenutno koristi za odlaganje raskrivke koja se transportnim trakama isporučuje iz rudnika Veliki Krivelj (ERM, 2006). Za vreme eksploatacije rude na površinskom kopu u Boru, odlagana je raskrivka i jalovina na lokalitetima „Visoki planir” (nazvan i Oštrejlski planir), „Severni planir” i u rudničkoj deponiji rudnog tela „H” (RTH). Najveća količina jalovine, oko 150 miliona tona, je odložena na Visokim planirima (Bogdanović i sar., 2011).



Slika 10. Borski površinski kop

Najstarija lokacija za odlaganje flotacijske jalovine Borskih rudnika je staro flotacijsko jalovište (slika 11a), koje se nalazi na samoj granici sa gradom. Staro borsko flotacijsko jalovište locirano je u koritu Borske reke, a ispod njega se nalazi kolektor gradskih otpadnih voda. Nastalo je odlaganjem jalovine iz borske flotacije u periodu od 1933-1987. Prostorno je podeljeno na tri polja međusobno odvojenih branama od peska ciklona. Dva polja predstavljaju flotacijska jalovišta, dok je jedno polje zasuto raskrivkom sa površinskog kopa i pepelom iz termoelektrane. U istoriji ovog jalovišta je zabeležena 1950. godina, kada je kolektor gradskih otpadnih voda oštećen nakon jakih kiša, što je dovelo do izlivanja jalovine i zagađenja poljoprivrednog zemljišta u dolinama Borske reke i Timoka. Nakon toga je flotacijska jalovina odlagana u otkopani prostor rudnog tela „H” (slika 11b), koje se nalazi u neposrednoj blizini starog flotacijskog jalovišta (Bogdanović i sar., 2011; Antonijević i sar., 2008).

Topionica bakra u kojoj se prerađuje koncentrat sulfidnih ruda bakra, se nalazi na severoistočnom obodu grada (slika 12). Pirometalurška prerada koncentrata obuhvata prženje u fluo–solid reaktoru, topljenje u plamenoj peći, konvertovanje bakrenca u Peirce-Smith konvertorima, anodnu rafinaciju blister bakra i livenje anoda. Tehnološki otpadni gasovi iz

procesa prženja i konvertovanja, služe za proizvodnju sumporne kiseline u fabrici sumporne kiseline. Gasovi iz ostalih procesa se emituju kroz dimnjak u atmosferu (EIA Study-New, 2010). Korišćenjem ovakve tehnologije, nije bilo moguće postići više od 60% iskorišćenja ulaznog sumpora (konverzija u H_2SO_4 u fabrici za proizvodnju sumporne kiseline). Početkom rada nove topionice (2015), na principu fleš-smelting tehnologije, obezbeđeno je veće iskorišćenje bakra i sumpora iz koncentrata, čime je zagarantovan čistiji vazduh u Boru i okolini.

a)



b)



Slika 11. Flotacijska jalovišta u Boru: a) staro flotacijsko jalovište; b) flotacijsko jalovište u upotrebi



Slika 12. Topionica bakra

Zagađujuće supstance sa odlagališta raskrivke, flotacijskih jalovišta, i iz topionice bakra, imaju dosta negativnih efekata na životne resurse u Boru i okolini. Sa površine odlagališta, a posebno flotacijskih jalovišta se u sušnim periodima godine, pod dejstvom vetra podiže prašina sa velikim sadržajem metala i metaloida. Krupnije čestice se uglavnom deponuju u samoj blizini jalovišta, dok se one finije mogu transportovati na velikim udaljenostima.

Glavne zagađujuće materije koje se emituju iz topionice bakra su SO_x gasovi i čvrste čestice sa određenim udelom metala i metaloida od kojih su pojedini i kancerogeni. Neefikasno otprašivanje otpadnih gasova tokom pirometalurške proizvodnje bakra, i kondenzacija metala i metaloida iz gasne faze, dovode do emitovanja čestica različitih prečnika, koje sadrže Fe, Pb, As, Cd, Cr, Ni, Zn, Mn i dr. (EIA Study-New, 2010).

Zagađujuće supstance se emituju i tokom miniranja, otkopavanja rude na površinskim kopovima, iz motornih vozila koja se koriste u rudarskim aktivnostima, i tako dalje (ERM, 2006).

Suvom i mokrom depozicijom zagađujuće supstance iz vazduha se talože na površinu zemljišta, koje stanovnici ruralnih naselja koriste za gajenje povrća, voća i poljoprivrednih useva. Tako toksični i kancerogeni elementi dospevaju u lanac ishrane što ima velike posledice na ljudsko zdravlje. Gasovi i fine čestice se u organizam direktno unose i disanjem.

5.1.2. Zagađenje u Boru i okolini

Kontinualni monitoring kvaliteta vazduha u Boru i okolini se sprovodi automatskim mernim stanicama i manuelnim metodama, što je u nadležnosti Opštine bor i Instituta za rudarstvo i metalurgiju u Boru. Imisija zagađujućih supstanci se meri na nekoliko mernih mesta, u zavisnosti od blizine izvora zagađenja, dominantnih pravaca vetrova, gustine naseljenosti i tako dalje. Podaci o koncentracijama zagađujućih supstanci u vazduhu, objavljuju se u Izveštajima o ispitivanju kvaliteta vazduha u Boru, koji su dostupni javnosti i objavljuju se na sajtu <http://www.opstinabor.rs/ekologija/>. Ukoliko se u vazduhu detektuju prekomerne koncentracije sumpor-dioksida i ostalih zagađujućih supstanci, proizvodnja u RTB-u se zaustavlja dok se ne steknu povoljni meteorološki uslovi za nastavak proizvodnje.

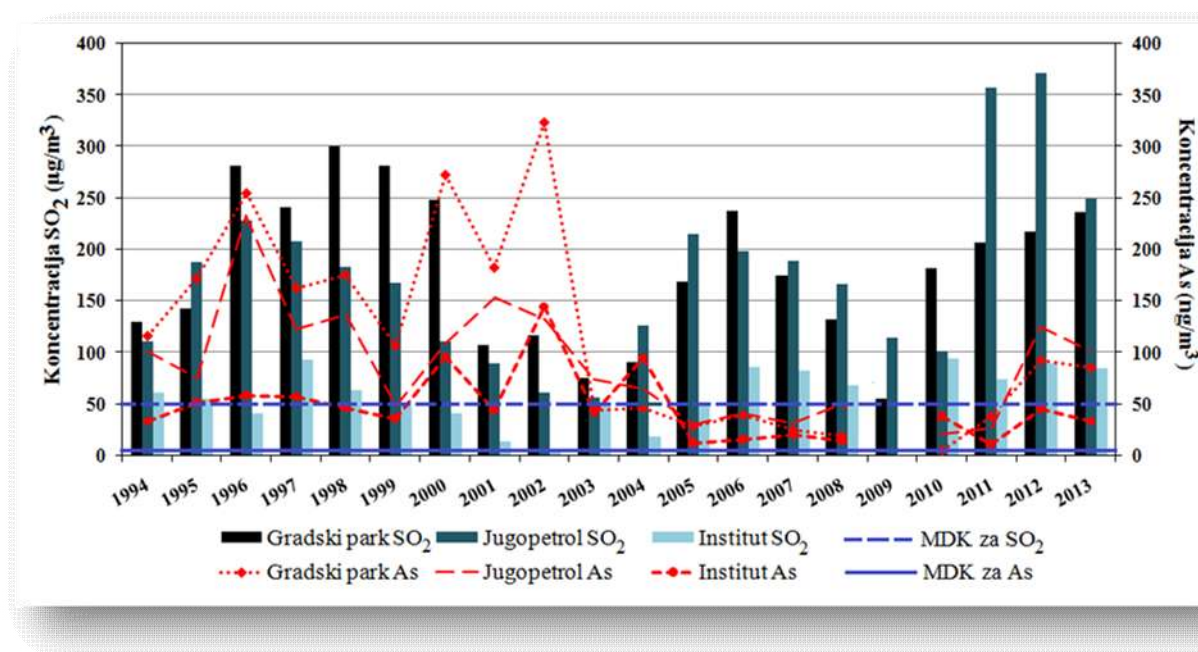
U ovom delu rada je predstavljeno dvadesetogodišnje aerozagađenje sumpor-dioksidom, arsenom i ukupnim taložnim materijama. Koncentracije ovih zagađujućih supstanci određivane su u oblastima pod uticajem emisije iz topioničkih dimnjaka i pirometalurških agregata, jalovišta i površinskih kopova rudnika Veliki Krivelji i Cerovo. Predstavljene su i prosečne godišnje koncentracije odabranih zagađujućih supstanci u vazduhu za 2013. godinu, jer su tada uzorkovani biljni materijal i zemljište.

Prosečne godišnje koncentracije As, u ukupnim suspendovanim česticama, i SO₂, izmerene na mernim mestima Gradski park, Jugopetrol i Institut, tokom perioda od 1994. do 2013. godine, prikazane su na slici 13 (IRM Bor). Praćenje koncentracija zagađujućih materija se tokom godina izvodilo na još nekoliko mesta, ali podaci za dugogodišnji period nisu dostupni. Merno mesto Gradski park je najbliže topionici bakra (0,5 km od topionice) i

na pravcu je dominantnih istočnih vetrova. Merno mesto Jugopetrol se nalazi 3,3 km od topionice bakra, gde vetrovi zapadnog pravca donose zagađenje.

Prosečne godišnje koncentracije As su tokom 20 godina u velikoj meri iznad maksimalno dozvoljenih koncentracija (MDK) od 6 ng/m^3 , na sva tri merna mesta („Službeni Glasnik Republike Srbije”, br. 63/13). Visok sadržaj As u vazduhu predstavlja veliki rizik za celokupnu životnu sredinu i zdravlje ljudi, zato što je As kancerogena materija (EC, 2004). Iznad maksimalno dozvoljenih koncentracija (MDK) od $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (US EPA, 2010; „Službeni Glasnik Republike Srbije”, br. 63/13) su i prosečne godišnje koncentracije SO_2 na mernim mestima Gradski park i Jugopetrol (slika 13). Izmerene koncentracije SO_2 na mernom mestu Institut, su znatno manje. Sa slike 13 se primećuje da koncentracije As ne prate koncentracije SO_2 , iako se emituju iz istog izvora, što je posledica različite prirode zagađujućih materija, kao i različitih načina njihovog transporta.

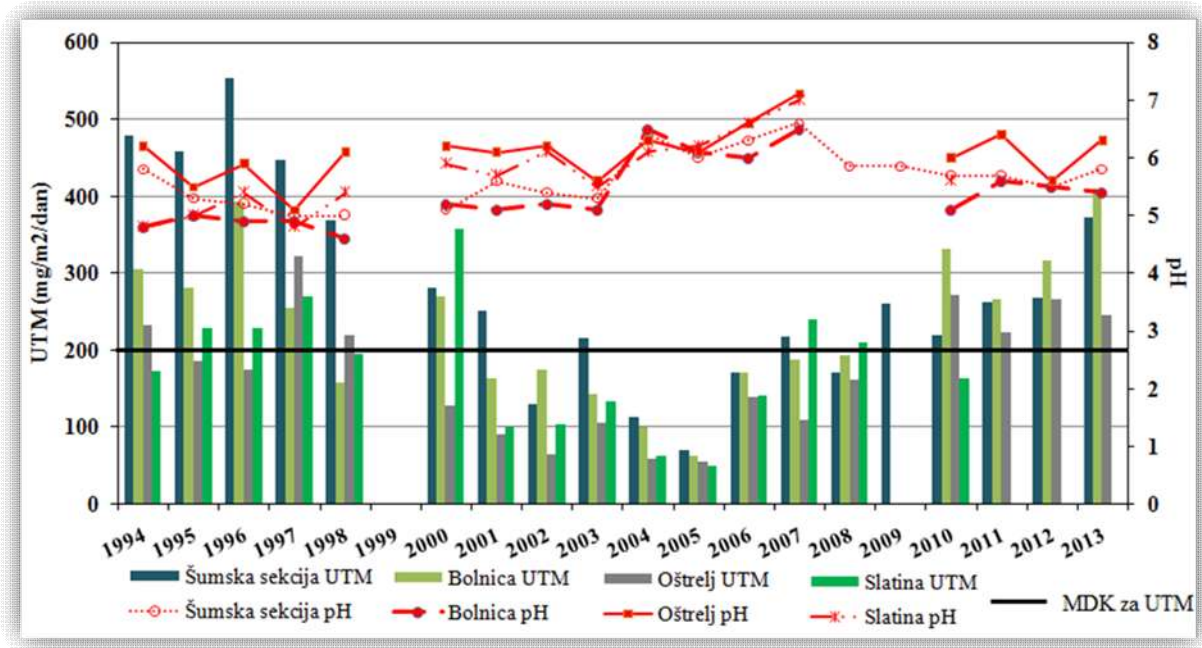
Koncentracije na slici 13, a i podaci o zagađenju koji su diskutovani u radovima Šerbula i sar., (2010), Šerbula i sar., (2013b), Šerbula i sar., (2014b) ukazuju da je urbano–industrijska zona Bora, među najzagađenijim regionima u Srbiji, a verovatno i u Evropi.



Slika 13. Prosečne godišnje koncentracije As u ukupnim suspendovanim česticama i SO_2 u Boru od 1994–2013. godine

Prosečne godišnje koncentracije ukupnih taložnih materija i pH vrednosti taložnih materija, na četiri merna mesta u Boru i okolini, za vremenski period od 1994–2013. godine, date su na slici 14 (IRM Bor). Maksimalno dozvoljena koncentracija (MDK) ukupnih taložnih materija na godišnjem nivou propisana zakonom Republike Srbije („Službeni Glasnik Republike Srbije”, br. 63/13) iznosi $200 \text{ mg/m}^2/\text{dan}$, a na slici je označena punom crnom linijom. Merno mesto Šumska sekcija gde su tokom više godina detektovane najveće prosečne godišnje koncentracije ukupnih taložnih materija i najveći broj prekoračenja MDK,

najbliže je mernom mestu Gradski park, i topionici bakra. Prekoračenja MDK, tokom određenog perioda, takođe se uočavaju i na ostalim mernim mestima, od kojih se dva (Oštrelj i Slatina) nalaze u ruralnoj zoni opštine Bor. Na mernom mestu Bolnica, pH vrednosti taložnih materija, bile su najniže, dok su namernom mestu Oštrelj bile najviše. Kiselost taložnih materija tokom 15 godina kretala se opsegu pH vrednosti od 4,8–7,1.



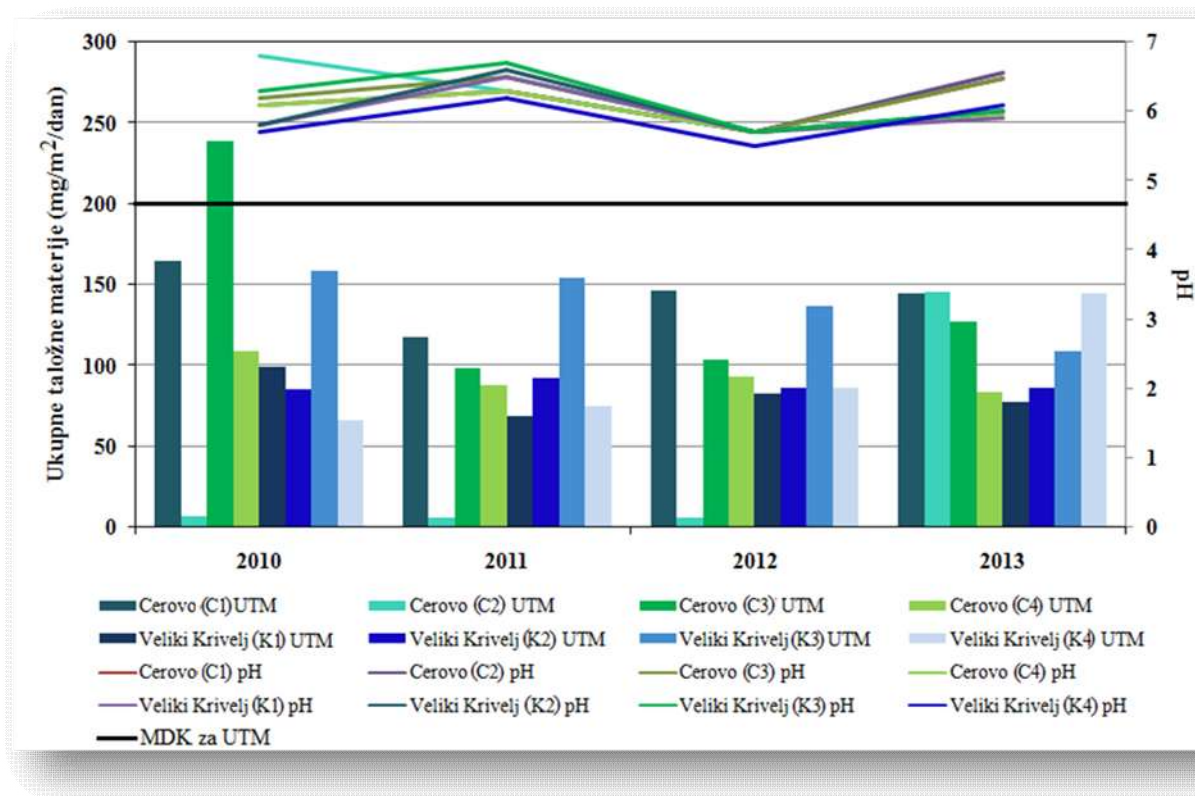
Slika 14. Prosečne godišnje koncentracije ukupnih taložnih materija i pH vrednosti taložnih materija u Boru i okolini od 1994–2013. godine

Prosečne godišnje koncentracije ukupnih taložnih materija i pH vrednost taložnih materija u okolini površinskih kopova i odlagališta rudnika Cerovo i Veliki Krivelj u periodu od 2010–2013.god., date su na slici 15. U zavisnosti od različitih kriterijuma, taložne materije se određuju na nekoliko mesta u okolini kopova i odlagališta i/ili jalovišta. Maksimalno dozvoljena koncentracija taložnih materija za jednu godinu („Službeni Glasnik Republike Srbije”, br. 63/13), bila je prekoračena samo na mernom mestu C3, koje je pod uticajem površinskog kopa i odlagališta rudnika Cerovo. Vrednosti pH taložnih materija tokom četiri godine (2010–2013) kretale su se u opsegu od 5,5–6,8.

Upoređivanjem koncentracija ukupnih taložnih materija na mernim mestima koja su pod uticajem zagađenja iz topionice bakra (slika 14) i pod uticajem zagađenja emitovanog sa površinskih kopova i odlagališta rudnika Cerovo i Veliki Krivelj (slika 15), može se zaključiti da je zagađenje u okolini topionice bakra veće u odnosu na zagađenje u okolini rudnika Veliki Krivelj i Cerovo.

Prosečne koncentracije ukupnih suspendovanih čestica (TSP-Total suspended particles), PM10 (čvrstih čestica čiji je prečnik $\leq 10 \mu\text{m}$), kao i Pb, Cd, Ni i As u suspendovanim česticama, za period usrednjavanja–kalendarska godina u toku 2013. godine, date su u tabeli 3 (IRM Bor). Ukupne suspendovane čestice nisu prelazile maksimalno

dozvoljene koncentracije ni na jednom mernom mestu. Najveće prekoračenje MDK za PM10 je na mernom mestu Jugopetrol, u odnosu na prekoračenja na mernim mestima Gradski park i Slatina, gde je sadržaj PM10 u vazduhu gotovo isti. Koncentracije Pb su bile iznad MDK na mernim mestima Gradski park i Jugopetrol. Maksimalno dozvoljena koncentracija za Cd nije prekoračena samo na mernom mestu Institut. Najveće prekoračenje MDK je uočeno za As i to na svim mernim mestima.



Slika 15. Prosečne godišnje koncentracije i pH vrednosti ukupnih taložnih materija od 2010–2013. godine u okolini površinskih kopova i odlagališta Cerovo i Veliki Krivelj

Tabela 3. Prosečne koncentracije TSP, PM10, Pb, Cd, Ni i As za period usrednjavanja–kalendarska godina u toku 2013. godine

Merno mesto	TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cd ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	As (ng/m^3)
Gradski park	58,4	42,3	0,966	0,012	0,007	85,9
Jugopetrol	63,0	62,7	0,838	0,008	0,110	101,0
Tehnički fakultet	54,0	30,8	0,463	0,006	0,019	101,0
Institut	53,6	28,1	0,314	0,004	0,008	33,8
Slatina	58,6	42,4	0,332	0,007	0,005	36,8
MDK^a	70	40	0,5	0,005	0,020	6

^aMDK–Maksimalno dozvoljena koncentracija („Službeni Glasnik Republike Srbije”, br. 63/13).

Srednje godišnje pH vrednosti taložnih materija, koncentracije ukupnih taložnih materija i koncentracije Pb, Cd, As i Ni u ukupnim taložnim materijama za 2013. godinu date su u tabeli 4. Najniže vrednosti pH, a najveće koncentracije UTM, Pb, Cd, As i Ni, detektovane su na mernim mestima Bolnica i Šumska sekcija. Maksimalno dozvoljena koncentracija („Službeni Glasnik Republike Srbije”, br. 63/13) za Pb, Cd, As i Ni u UTM nije definisana. Ova vrednost je za 2013. godinu prekoračena na mernim mestima Bolnica, Šumska sekcija i Oštrelj.

Tabela 4. Srednje godišnje vrednosti pH taložnih materija, koncentracija UTM, Pb, Cd, As i Ni u UTM za 2013. godinu

Merno mesto	pH	UTM (mg/m ² /dan)	Pb (µg/m ³)	Cd (µg/m ³)	As (µg/m ³)	Ni (µg/m ³)
Bolnica	5,4	410	216,0	11,1	157,0	0,5
Šumska sekcija	5,8	372	113,0	3,5	109,0	1,0
Institut	6,1	118	23,0	0,6	5,9	0,3
Oštrelj	6,3	246	23,5	0,5	29,3	<1
MDK ^a	/	200	/	/	/	/

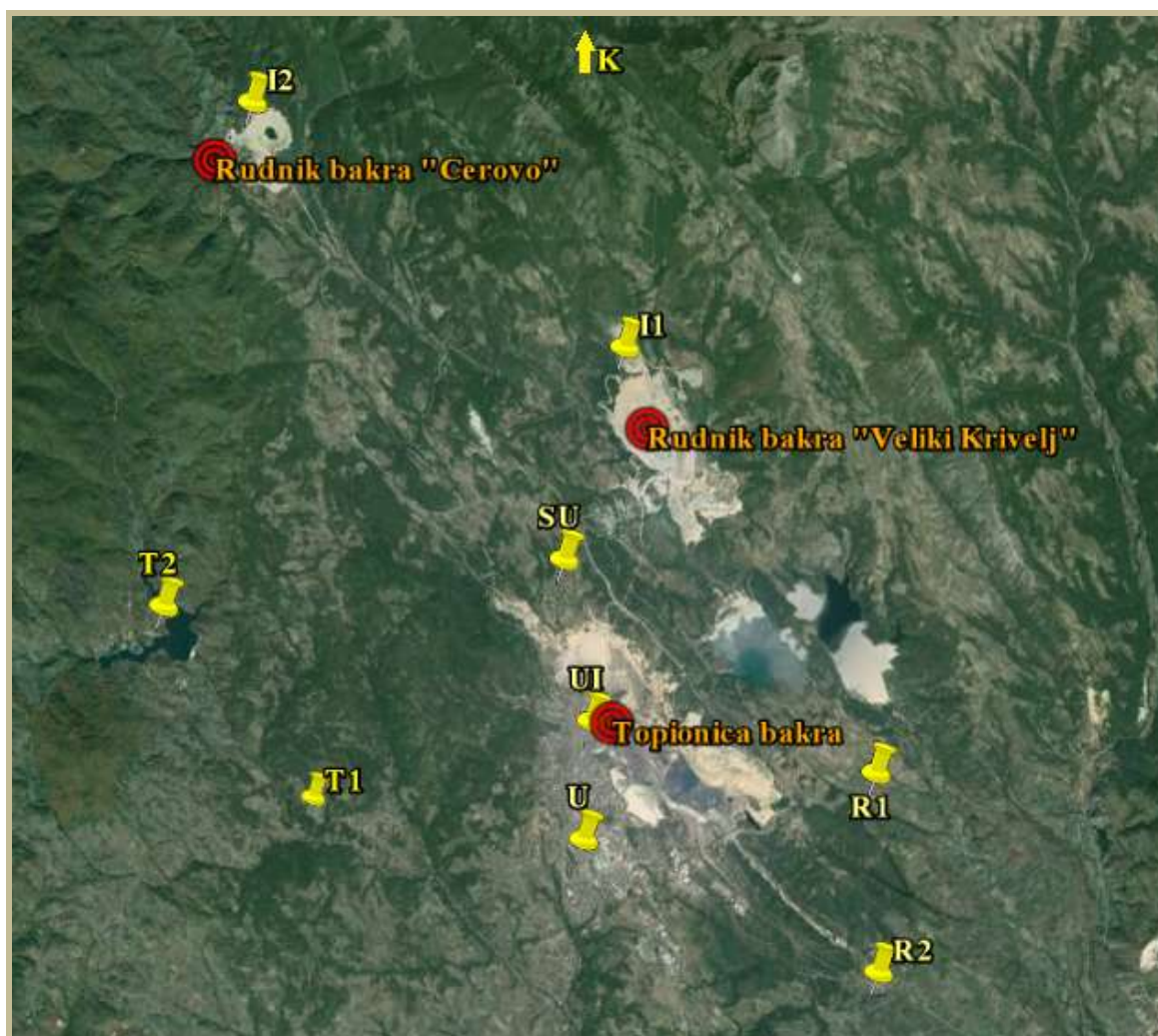
^aMDK–Maksimalno dozvoljena koncentracija („Službeni Glasnik Republike Srbije”, br. 63/13).

Koncentracije zagađujućih supstanci ukazuju da je tokom godina najveće zagađenje vazduha detektovano u blizini topionice bakra i flotacijskog jalovišta u Boru, kao i u oblastima koje su na pravcu dominantnih vetrova putem kojih se zagađenje transportuje. Dominantne zagađujuće materije su toksični i kancerogeni metali i metaloidi, mada se ne treba izostaviti ni gas prekursor kiselih kiša-SO₂, koji zakišeljava zemljište i direktno uzrokuje štetu na voću, povrću i poljoprivrednim usevima.

5.1.3. Zone uzorkovanja biljnog materijala i zemljišta

Biljni materijal i zemljište su uzorkovani iz 7 zona sa 10 mesta uzorkovanja (slika 16, tabela 5). Mesta uzorkovanja biljnog materijala i zemljišta definisana su u zavisnosti od blizine topionice bakra, odlagališta raskrivki i flotacijskih jalovišta, kao i u zavisnosti od pravca dominantnih vetrova kojima se zagađujuće supstance transportuju iz pravca emitera. Još jedan od kriterijuma za izbor lokacija je bio i prisustvo svih biljnih vrsta koje su odabrane za ispitivanje. Selo Gornjane u nezagađenoj oblasti izabrano je kao kontrolno mesto, što je omogućilo da se uporede rezultati istraživanja iz zagađene i nezagađene oblasti. Uzorkovanje je sprovedeno u zonama, u kojima se sprovodi i monitoring aerozagađenja (osim u kontrolnoj), pri čemu se u okolini rudnika Cerovo i Veliki Krivelj određuju samo koncentracije taložnih materija, dok se na teritoriji grada Bora i u drugim oblastima, mernim stanicama prati veći broj zagađujućih supstanci u vazduhu. U oblastima gde su to uslovi dozvoljavali, biljni materijal i zemljište su uzorkovani u blizini mesta gde se su postavljeni uzorkivači taložnih materija, i u blizini mernih stanica. Poznavanjem nivoa zagađenja u tim

oblastima, omogućeno je da se proveri i sposobnost uzorkovanih biljnih vrsta, da ukažu na oblasti sa manjim i većim zagađenjem vazduha.



Slika 16. Mapa mesta uzorkovanja

Tabela 5. Opis zona i mesta uzorkovanja biljnog materijala i zemljišta

Zona	Mesto uzorkovanja	Lokacija/Glavni izvori zagađenja
Urbano–industrijska	UI	Grad Bor, oblast od 0,5-2,5 km jugo-zapadno od topionice ✓ Na pravcu dominantnih vetrova (WNW) koji donose zagađenje iz topionice ✓ Prašina sa odlagališta raskrivke i flotacijskog jalovišta ✓ Emisija iz energane i toplane ✓ Saobraćaj
Urbana	U	Grad Bor, >2,5 km jugo-zapadno od topionice ✓ Periodično zagađenje iz topionice i sa flotacijskih jalovišta u Boru
Suburbana	SU	Naselje, oko 2,5 km severo-zapadno od topionice ✓ Zagađenje iz topionice ✓ Prašina sa odlagališta raskrivke
Industrijska	I1	Okolina Rudnika bakra Veliki Krivelj, 5,5 km severno od topionice, u blizini sela Veliki Krivelj ✓ Prašina sa odlagališta raskrivke i površinskog kopa ✓ Zagađenje iz topionice
	I2	Okolina Rudnika bakra Cerovo, 11 km severo-zapadno od topionice ✓ Prašina sa odlagališta raskrivke i površinskog kopa
Turistička	T1	Brestovačka banja, 5 km jugozapadno od topionice ✓ Periodično zagađenje iz topionice
	T2	Borsko jezero, 8 km WNW od topionice bakra ✓ Periodično zagađenje iz topionice
Ruralna	R1	Seosko naselje, 4,5 km istok-jugo-istočno od topionice ✓ Prašina sa flotacijskog jalovišta rudnika bakra Veliki Krivelj, koje se nalazi 1-2 km severno od sela Oštrej ✓ Zagađenje iz topionice
	R2	Seosko naselje, 6,5 km jugo-istočno od topionice ✓ Zagađenje iz topionice
Kontrolna	K	Okolina sela Gornjane, 17 km severno od topionice ✓ Bez uticaja zagađenja iz rudničkih i metalurških postrojenja

5.2. Uzorkovanje biljnog materijala i zemljišta

Biljne vrste koje su korišćene u ispitivanju biomonitoringa i fotoremedijacije, birane su prema više kriterijuma. Jedan od njih je da biljke budu višegodišnje, kako bi ukazale na dugogodišnje zagađenje u ispitivanom području. Na ovaj način je osigurano da su se biljke tokom godina adaptirale na uslove zagađene životne sredine. Kako bi se ispitalo zagađenje i vazduha i zemljišta, birane su biljke sa velikom biomasom nadzemnih delova i razvijenim

korenovim sistemom. Nadzemni delovi omogućuju zadržavanje čvrstih čestica iz vazduha, i veliki intezitet transpiracije. Preko korenovog sistema moguće je utvrđivanje zagađenja zemljišta, ali i ispitivanje usvajanja ili translokacije zagađujućih supstanci iz zemljišta. Za procenu bezbednosti korišćenja biljaka iz Bora i okoline u lekovite svrhe i u ishrani, birane su lekovite vrste. Prisutnost svih biljnih vrsta na određenom mestu uzorkovanja je takođe bitna. Ove uslove su u najvećoj meri ispunjavale drvenaste biljne vrste i zato su izabrani: **bor** (*Pinus* spp., pretežno *Pinus nigra*), **lipa** (*Tilia* spp., pretežno *Tilia grandifolia* i *Tilia tomentosa*) i **zova** (*Sambucus nigra*). U naučnoj literaturi je dokazano da se bor može koristiti u biomonitoringu, što je omogućilo da u istraživanju postoji biljna vrsta sa čijim mogućnostima će se porediti i mogućnosti ostalih biljnih vrsta. Mogućnost lipe i zove da se koriste u biomonitoringu su najmanje i ne dovoljno ispitane. Takođe, mehanizmi akumulacije i translokacije toksičnih i kancerogenih elemenata u boru, lipi i zovi nisu dovoljno proučeni.

Biljni materijal i zemljište uzorkovani su tokom septembra i prve polovine oktobra, što je osiguralo maksimalnu dužinu izloženosti posebno lišća, zagađujućim materijama iz vazduha. Uzorci su prikupljeni pod stabilnim vremenskim uslovima, nakon dužeg perioda bez kiše, i tokom dana bez vetra.

Sa svakog mesta uzorkovanja, uzorkovano je od tri do pet zdravih jedinki od svake vrste (u zavisnosti od dostupnosti). Uzorkovani su lišće/iglice, grane, korenje i rizosferno zemljište. Kako bi podaci za lišće lipe i zove mogli da se upoređuju sa podacima dobijenim za iglice bora, uzorkovane su mlade iglice bora koje su se razvile tekuće godine. Tako je period izloženosti folijarnih delova aerozagađenju isti. Sa svakog drveta uzorkovana je približna količina biljnog materijala uz minimalno dodirivanje površine uzoraka. Oko 500 g zemljišta iz rizosfere svake biljke, uzorkovano je na dubini od 10 do 20 cm, uz prethodno uklanjanje površinskog sloja humusa. Nakon toga, formirani su kompozitni uzorci (Piczak i sar., 2003; Yanqun i sar., 2004; Rossini Oliva i Mingorance, 2004), od iglica bora, lišća lipe i zove, grane bora, lipe i zove, korenja bora, lipe, i zove, zemljišta bora, lipe i zove sa svakog mesta uzorkovanja.

Lišće, iglice i grane (debljine oko 2 cm) su uzorkovani na visini od 1,5 do 2 m, sa spoljašnjih grana krošnje, na istočnoj, zapadnoj, severnoj i južnoj strani. Korenje (debljine do 4 cm) je uzorkovano na dubini od 10-20 cm, sa nekoliko strana krošnje u zavisnosti od dostupnosti. Uzorkovano je alatima za sečenje i iskopavanje od nerđajućeg čelika. Od mesta uzorkovanja do laboratorije, svaka vrsta uzoraka je transportovana u označenim papirnim kesama.

5.3. Priprema uzoraka biljnog materijala i zemljišta za fizičko-hemijske analize

Kompozitni uzorci lišća i iglica su u hemijskoj laboratoriji Tehničkog fakulteta u Boru, podeljeni na dva dela, od kojih je jedan deo pran u destilovanoj vodi na sobnoj temperaturi tokom 1 min, sa ciljem da se uklone deponovane čestice iz vazduha (Dmuchowski i sar., 2011; Sun i sar., 2010). Na ovaj način je simuliran uticaj kiše na uklanjanje deponovanih čestica iz vazduha sa površine lišća. Druga polovina je ostala neoprana. Kompozitni uzorci korena su više puta prani u destilovanoj vodi uz četkanje, kako

bi se uklonile čestice zemljišta i drugih nečistoća. Ostali uzorci biljnog materijala nisu prani. Uzorci biljnog materijala i zemljišta sušeni su na sobnoj temperaturi.

Uzorci biljnog materijala su samleveni u električnom mlinu za kafu i začine od nerđajućeg čelika. Nakon svakog uzorka, mlin je očišćen četkicama i obrisan vatom i alkoholom kako bi se izbegla kontaminacija. Samleveni uzorci čuvani su u označenim papirnim kesama.

Uzorci zemljišta su nakon sušenja prosejani u sitima (Impact test equipment ltd., Stevenson Industrial Estate) veličine otvora 2 mm, šahovskom metodom je napravljen reprezentativni uzorak od oko 300 g, koji je samleven u vibracionom mlinu sa prstenovima (SIEBTECHNIK) u fini prah (100 μm). Kako bi se izbegla kontaminacija mlina, posle mlevenja svakog pojedinačnog uzorka, mleven je kvarcni pesak, nakon čega je mlin očišćen četkicama i obrisan ubrusom, kako bi se uklonile čestice peska. Zemljište je nakon toga čuvano u označenim plastičnim kesama. Priprema uzorka sprovedena je na Tehničkom fakultetu u Boru.

5.4. Određivanje sadržaja organskih materija u zemljištu

Uzorci zemljišta su prvo sušeni u sušnici na 105°C do konstantne mase. Sadržaj organskih materija u zemljištu određen je metodom žarenja na 450°C, tokom 2 sata u kvarcnim lončićima u peći za žarenje (Maisto i sar., 2004). Sušenje i žarenje određenog broja uzorka vršeno je istog dana. Nakon žarenja svakog pojedinačnog uzorka, lončići su očišćeni četkicom i brisani suvom vatom, nakon čega su žareni na 550°C tokom 2 sata. Između operacija sušenja i žarenja, kao i pre svakog merenja na analitičkoj vagi, lončići sa uzorcima zemljišta su čuvani u eksikatoru. Sadržaj organskih materija u zemljištu je izračunat prema obrascu:

$$\text{SOM}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100$$

gde su: SOM—sadržaj organskih materija (%),

m_1 —masa osušenog zemljišta pre žarenja (g),

m_2 —masa zemljišta nakon žarenja (g).

5.5. Određivanje aktivne i potencijalne kiselosti zemljišta

Aktivna i potencijalna kiselost zemljišta određene su prema ISO standardu 10390:2005 (ISO, 2005). Aktivna kiselost je određivana u suspenziji zemljišta u vodi, u razmeri 1:5 (zapreminski udeo). Potencijalna kiselost je određivana u suspenziji zemljišta u KCl koncentracije 1 mol/dm³, u odnosu 1:5 (zapreminski udeo). Zemljište je mereno posebnom plastičnom kašičicom za merenje (oko 5 cm³), koja je napravljena po standardu. Suspenzija je mešana u staklenim čašama poklopljenim sahatnim staklom, na magnetnoj

mešalici na sobnoj temperaturi. Vrednost pH merena je prethodno kalibrisanim pH-metrom sa staklenom elektrodom (EUTECH), na sobnoj temperaturi. Očitavanja pH vrednosti su se smatrala stabilnim kada izmerene pH vrednosti u periodu od 5 s nisu varirale više od 0,02 pH jedinice. Određivanje aktivne i potencijalne kiselosti zemljišta sprovedeno je u hemijskoj laboratoriji Tehničkog fakulteta u Boru.

5.6. Mikrotalasna digestija uzoraka zemljišta i biljnog materijala

Mikrotalasna digestija uzoraka biljnog materijala i zemljišta je sprovedena prema metodama US EPA (US EPA, 1996). Digestija uzoraka zemljišta izvedena je u MARS5 (CEM) uređaju, a biljnog materijala u ETHOS One (Milestone, Italy) uređaju u kontrolisanim uslovima (temperatura 180°C, vreme postizanja zadate temperature 15 min, vreme održavanja zadate temperature 15 min). Za digestiju 0,25 g zemljišta korišćeno je 13 cm³ carske vode, tj. zapreminski odnos HNO₃ (65%, p.a., J. T. Baker) i HCl (36-38%, p.a., J. T. Baker) je 1:3. Za digestiju 0,5 g biljnog materijala korišćeno je 10 cm³ HNO₃ (65%, p.a., J. T. Baker) i 2 cm³ H₂O₂ (30%, p.a., Merc). Ohlađeni rastvori su razblaženi ultračistom vodom u normalnim sudovima od 50 cm³. Mikrotalasna digestija uzoraka izvedena je u akreditovanoj laboratoriji za hemijska ispitivanja (HTK), Instituta za rudarstvo i metalurgiju u Boru.

5.7. Određivanje koncentracija metala i metaloida u biljnom materijalu i zemljištu

Koncentracije Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd u lišću, iglicama, granama, korenju i zemljištu određivane su na atomskom emisionom spektrometru sa indukovano spregnutom plazmom-sa radijalnim i aksijalnim posmatranjem plazme, (*Atomic Emission Spectrometer with dual view simultaneous Inductively coupled plasma, ICP-AES*) proizvođača SPECTRO model Blue. Sva merenja su kontrolisana softverskim paketom Smart Analyser Vision. Značajno poboljšanje osetljivosti pri određivanju niskih koncentracija elemenata postignuto je aksijalnim posmatranjem, dok su makro elementi određivani radijalnim posmatranjem plazme. Reproductivnost dobijenih podataka proveravana je ponavljanjem analiza istih uzoraka. Sve određene koncentracije date su u µg/g suve mase. Koncentracije ispitivanih elemenata su određivane u akreditovanoj laboratoriji za hemijska ispitivanja (HTK) Instituta za rudarstvo i metalurgiju u Boru, kao i na Tehničkom fakultetu u Boru.

5.8. Metode obrade podataka

Dobijeni podaci su analizirani po modelima koji su korišćeni u naučnim radovima iz oblasti nauke o životnoj sredini, iz naučnih baza koje objedinjuje KOBSON.

Kako distribucija većine podataka nema normalnu raspodelu prema Shapiro-Wilk testu, korišćene su metode neparametarske statistike. Statistička značajnost razlike u

koncentracijama elemenata u neopranoj i opranoj lišću ispitivanih biljnih vrsta, određena je Wilcoxon Signed Rank testom. Značajnim razlikama su se smatrale one za koje je $p < 0,05$. Postojanje veza različitih varijabli, utvrđeno je preko Spirmanovog koeficijenta korelacije.

Vrednosti Faktora obogaćenja ukazuju da li su zemljište ili biljni materijal sa određenog mesta uzorkovanja obogaćeni nekim elementom, u odnosu na kontrolnu zonu, a izračunava prema obrascu:

$$FO = \frac{C}{C_k}$$

gde je: FO-Faktor obogaćenja;

C-koncentracija elementa u zemljištu ili određenom delu biljke sa određenog mesta uzorkovanja;

C_k -koncentracija elementa u zemljištu ili određenom delu biljke iz kontrolne zone.

Vrednost Faktora obogaćenja > 2 , ukazuje na veći sadržaj elementa antropogenog porekla u zemljištu ili biljci na određenom mestu, u odnosu na sadržaj elementa u zemljištu ili biljci iz nezagađene oblasti.

Vrednosti Bioakumulacionog faktora (BAF) računata su za oprano lišće i korenje prema obrascima:

$$BAF_{\text{koren}} = \frac{C_{\text{koren}}}{C_{\text{zemljište}}}$$

gde su: BAF_{koren} -Bioakumulacioni faktor za koren;

C_{koren} -koncentracija ispitivanog elementa u korenu;

$C_{\text{zemljište}}$ -koncentracija ispitivanog elementa u zemljištu.

$$BAF_{\text{list}} = \frac{C_{\text{list}}}{C_{\text{zemljište}}}$$

gde su: BAF_{list} -Bioakumulacioni faktor za lišće;

C_{list} -koncentracija ispitivanog elementa u lišću;

$C_{\text{zemljište}}$ -koncentracija ispitivanog elementa u zemljištu.

BAF_{koren} i BAF_{list} ukazuju na efikasnost apsorpcije ispitivanih elemenata iz zemljišta u korenje i lišće, kao i na mogućnost korišćenja biljnih vrsta u fitoremedijaciji. U zavisnosti od vrednosti Bioakumulacionih faktora, apsorpcija je klasifikovana i na sledeći način: 10-100 (intenzivna apsorpcija), 1-10 (jaka apsorpcija), 0,1-1 (srednja apsorpcija), 0,01-0,1 (slaba apsorpcija), 0,001-0,01 (veoma slaba apsorpcija). Ukoliko su vrednosti ova dva faktora > 1 , biljke imaju mogućnosti za upotrebu u fitoekstrakciji.

Translokacioni faktor (TF) je računat prema izrazu:

$$TF = \frac{C_{\text{list}}}{C_{\text{koren}}}$$

gde su: TF-Translokacioni faktor;

C_{list} -koncentracija ispitivanog elementa u opranom lišću;

C_{koren} -koncentracija ispitivanog elementa u korenju.

Vrednosti Translokacionog faktora <1 , ukazuju na ograničenu translokaciju elementa iz korenja u lišće, i karakteristične su za biljke ekskludere koje se mogu koristiti u fitostabilizaciji. Efikasnu translokaciju elementa iz korenja u lišće definišu vrednosti Translokacionog faktora veće od jedan.

6. REZULTATI I DISKUSIJA

6.1. Zemljište bora, lipe i zove

6.1.1. Kiselost zemljišta i sadržaj organskih materija u zemljištu

Vrednosti pH i sadržaj organskih materija (SOM) u rizosfernom zemljištu bora, lipe i zove, date su u tabeli 6. Klasifikacija u zavisnosti od pH vrednosti prema Sparks (2003) data je u tabeli 7.

Kiselost zemljišta ispitivanih biljnih vrsta razlikuje se u zavisnosti od mesta uzorkovanja. Zemljišta na mestima koja su najbliža topionici bakra (UI, SU, U) kao i na mestima na dominantnim pravcima vetra koji transportuju zagađujuće supstance iz topionice, su slabo kisela, neutralna i blago alkalna.

Razlike u vrednostima pH(H₂O) i pH(KCl) zemljišta bora, su u većini slučajeva veće od 1, što ne važi i za zemljište lipe i zove (tabela 6). To ukazuje da zemljište uzorkovano u zoni korena bora ima veću tendenciju acidifikacije (Zseni i sar., 2003; Álvarez i sar., 2005). Za zemljišta gde su vrednosti $\Delta\text{pH} < 1$, mogućnost acidifikacije je mala, što je dobro, jer većina štetnih metala i metaloida ima manju mobilnost i biodostupnost u zemljištima sa manjom kiselošću.

Prema klasifikaciji u tabeli 8, zemljište bora ima visok i veoma visok sadržaj humusa. Zemljište lipe takođe ima visok i veoma visok sadržaj humusa, a na dva mesta uzorkovanja (R1 i T2) sadržaj humusa je ekstremno visok. Zemljište zove na dva mesta (I1, K) ima visok sadržaj humusa, dok je na ostalim mestima sadržaj humusa veoma visok. Organske materije u zemljištu imaju sposobnost da adsorbuju i vežu metale formirajući komplekse sa organskim kiselinama, i na taj način smanjuju biodostupnost i fitotoksičnost metala (Konijnendijk i sar., 2005; Van-Camp i sar., 2004; Nikolić i Nikolić, 2012).

Tabela 6. Kiselost zemljišta i sadržaj organskih materija u zemljištu bora, lipe i zove

	pH (H ₂ O)			pH (KCl)			ΔpH^a			SOM ^b (%)		
	bor	lipa	zova	bor	lipa	zova	bor	lipa	zova	bor	lipa	zova
UI	7,8	7,4	7,3	7,3	6,7	6,8	0,5	0,7	0,6	7,2	9,8	13,2
SU	6,4	7,5	7,3	5,2	7,1	6,7	1,2	0,4	0,6	5,6	7,5	10,6
U	7,2	6,8	7,9	6,6	5,4	7,2	0,6	1,4	0,7	7,1	8,8	13,4
R1	7,5	5,8	7,2	6,9	5,1	6,8	0,5	0,8	0,4	6,6	15,6	12,7
T1	5,3	6,7	6,5	4,1	6,4	5,7	1,2	0,2	0,8	13,4	8,3	10,9
I1	6,0	7,6	8,0	4,4	7,2	7,9	1,6	0,4	0,1	5,4	9,0	6,8
R2	7,2	7,7	7,4	6,8	7,1	7,0	0,4	0,6	0,4	8,5	7,5	8,9
T2	5,0	6,8	4,9	4,0	5,9	3,9	1,0	0,9	1,0	13,0	16,3	9,2
I2	4,8	6,1	6,0	3,7	5,1	5,1	1,1	1,0	0,9	3,5	7,8	10,5
K	6,1	7,1	7,6	4,8	6,2	7,4	1,3	0,8	0,3	5,5	6,8	7,4

^a $\Delta\text{pH} = \text{pH}(\text{H}_2\text{O}) - \text{pH}(\text{KCl})$.

^bSOM – sadržaj organskih materija.

Tabela 7. Klasifikacija zemljišta u zavisnosti od pH vrednosti^a

Kiselost zemljišta	pH (H ₂ O)			pH (KCl)		
	bor	lipa	zova	bor	lipa	zova
Ekstremno kiselo (pH<4,5)	/	/	/	T1, I1, T2, I2	/	T2
Veoma jako kiselo (4,5<pH<5,0)	I2, T2	/	T2	K	/	/
Jako kiselo (5,1<pH<5,5)	T1	/	/	SU	U, R1, I2	I2
Umereno kiselo (5,6<pH<6,0)	I1	R1	I2	/	T2	T1
Slabo kiselo do neutralno (6,1-7,3)	SU, U, R2, K	U, T1, T2, I2, K	UI, SU, R1, T1	UI, U, R1, R2	UI, SU, T1, I1, K, R2	UI, SU, U, R1, R2
Blago alkalno (7,4<pH<7,8)	UI, R1	UI, SU, I1, R2	R2, K	/	/	K
Alkalno (pH>7,8)	/	/	I1, U	/	/	I1

^aKlasifikacija zemljišta preuzeta iz Sparks (2003).

Tabela 8. Klasifikacija zemljišta u zavisnosti od sadržaja organskih materija*

	bor	lipa	zova
≤2 ^a	/	/	/
>2-4 ^b	I2	/	/
>4-8 ^c	UI, SU, U, R1, I1, K	SU, R2, I2, K	I1, K
>8-15 ^d	T1, R2, T2	UI, U, T1, I1	UI, SU, U, R1, T1, R2, T2, I2
>15 ^e	/	R1, T2	/

*Klasifikacija preuzeta iz Van-Camp i sar., (2004).

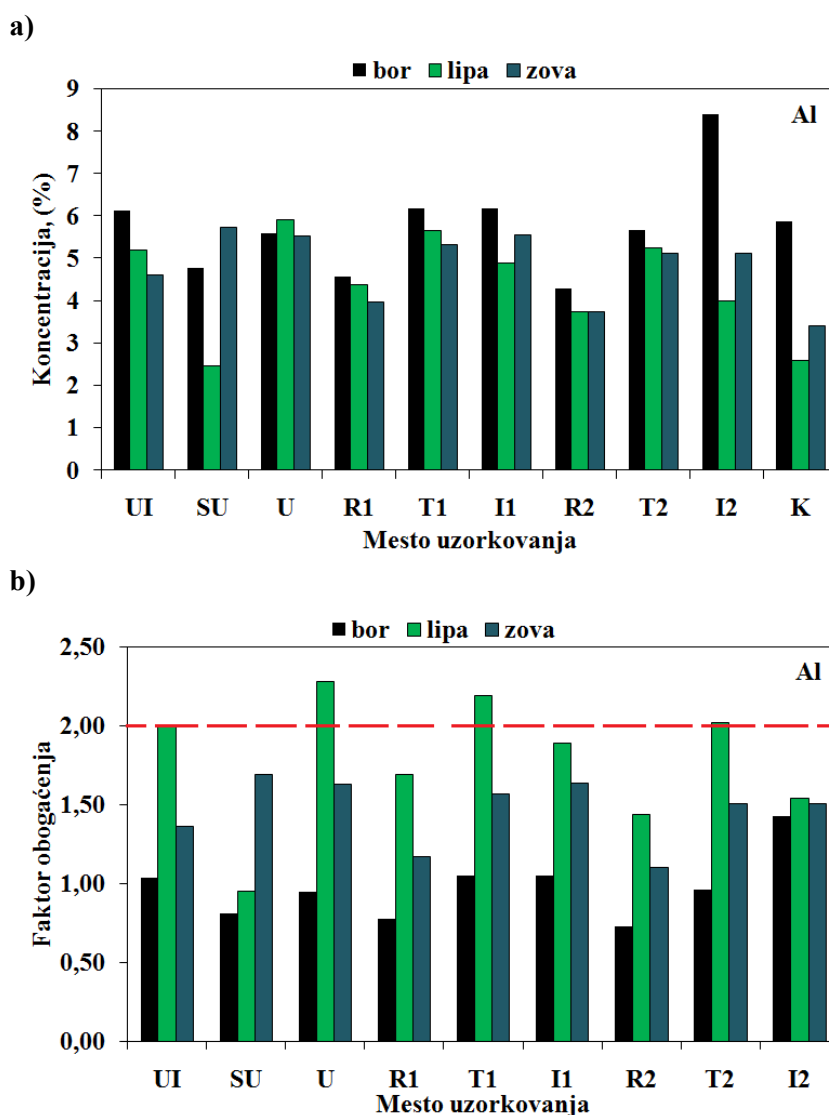
^anizak sadržaj humusa; ^bsrednji sadržaj humusa; ^cvisok sadržaj humusa; ^dveoma visok sadržaj humusa; ^eekstremno visok sadržaj humusa.

6.1.2. Koncentracije Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd u zemljištu bora, lipa i zove

Koncentracije ispitivanih elemenata u zemljištu bora, lipa i zove, kao i vrednosti Faktora obogaćenja (FO) dati su na slikama od 17-24. Mesta uzorkovanja na slikama su poređana od najbližeg do najudaljenijeg mesta od topionice bakra. Puna crvena linija označava Graničnu vrednost (GV) koncentracija za određene elemente u nepoljoprivrednom zemljištu, koja prema Uredbi Republike Srbije može ukazati na značajnu kontaminaciju („Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 88/10). Crvena isprekidana linija označava vrednosti Faktora obogaćenja koje su jednake 2, a služi da bi se uočile vrednosti koje su >2, i označavaju veći sadržaj ispitivanog elementa u zemljištu sa određenog mesta, u odnosu na sadržaj ispitivanog elementa u zemljištu iz kontrolne zone, ukazujući na antropogeni uticaj.

6.1.2.1. Aluminijum

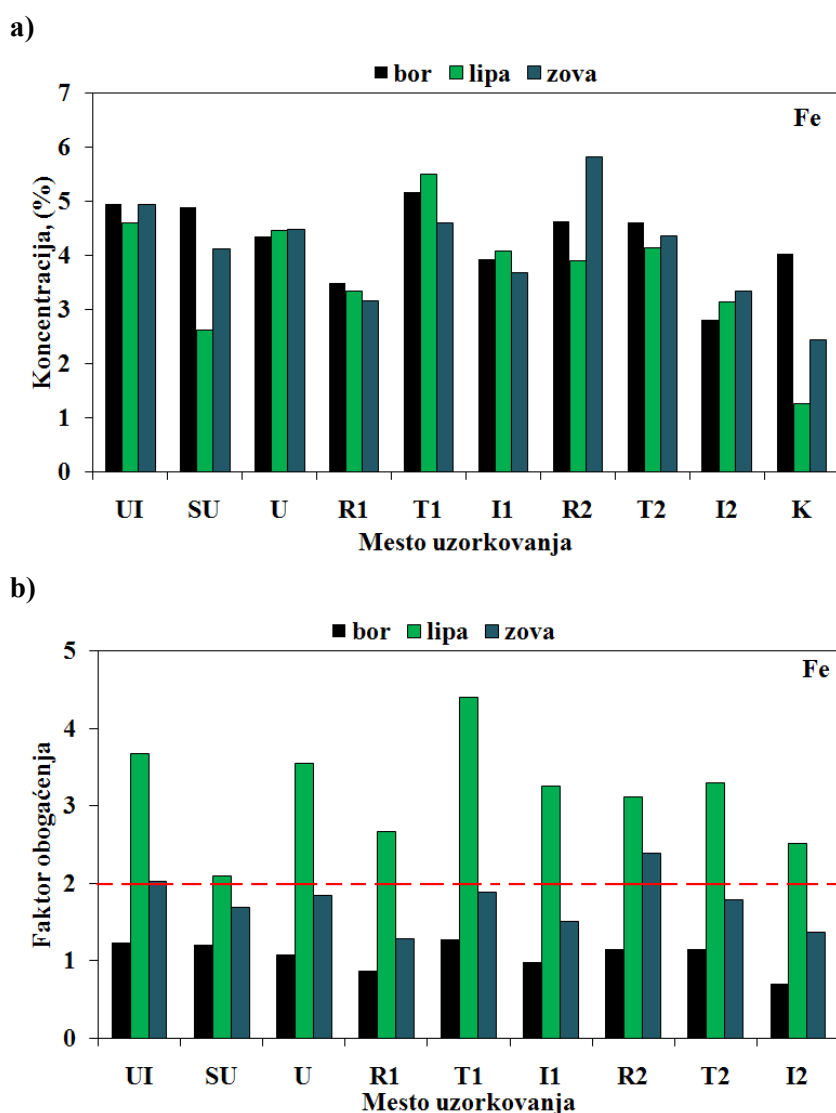
Koncentracije Al u zemljištu bora, lipa i zove iz ispitivane oblasti su u okviru tipičnog opsega koji se kreće od 1-30% (US EPA, 2003a) (slika 17a). Zemljište bora ima veći sadržaj Al, u odnosu na zemljište lipa i zove, u skoro svim zonama, osim u suburbanoj i urbanoj zoni. Ne primećuje se opadanje koncentracija Al u zemljištu ispitivanih biljnih vrsta, sa udaljenošću od topionice bakra. Vrednosti Faktora obogaćenja su blago povišene (≥ 2) samo za zemljište lipa, na mestima UI, U, T1 i T2 (slika 17b). Na osnovu toga se ne može tvrditi o mogućem antropogenom uticaju, na sadržaj Al u zemljištu bora, lipa i zove.



Slika 17. Aluminijum u zemljištu bora, lipa i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja: a) koncentracije; b) Faktori obogaćenja

6.1.2.2. Gvožđe

Koncentracije Fe u ispitivanom zemljištu su u tipičnom opsegu od 0,5-55% na svim mestima uzorkovanja (US EPA, 2003b), mada su u odnosu na prosečni sadržaj u zemljištu od 3,5% koje je dala Kabata-Pendias, (2011), blago povišene (slika 18a). Nije uočena pravilnost da zemljište jedne od tri biljne vrste na svim mestima uzorkovanja ima najveće koncentracije Fe. Vrednosti Faktora obogaćenja su >2 za Fe u zemljištu lipe sa celokupnog ispitivanog područja, kao i za zemljište zove sa mesta UI i R2 (slika 18b). Osim što vrednosti Faktora obogaćenja za lipu ukazuju na povišene koncentracije Fe u ispitivanom zemljištu u odnosu na nezagađenu oblast, moguće je da lipa ima specifičan uticaj na sadržaj Fe u rizosferi, koji bor i zova nemaju.



Slika 18. Gvožđe u zemljištu bora, lipe i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja: a) koncentracije; b) Faktori obogaćenja

6.1.2.3. Bakar

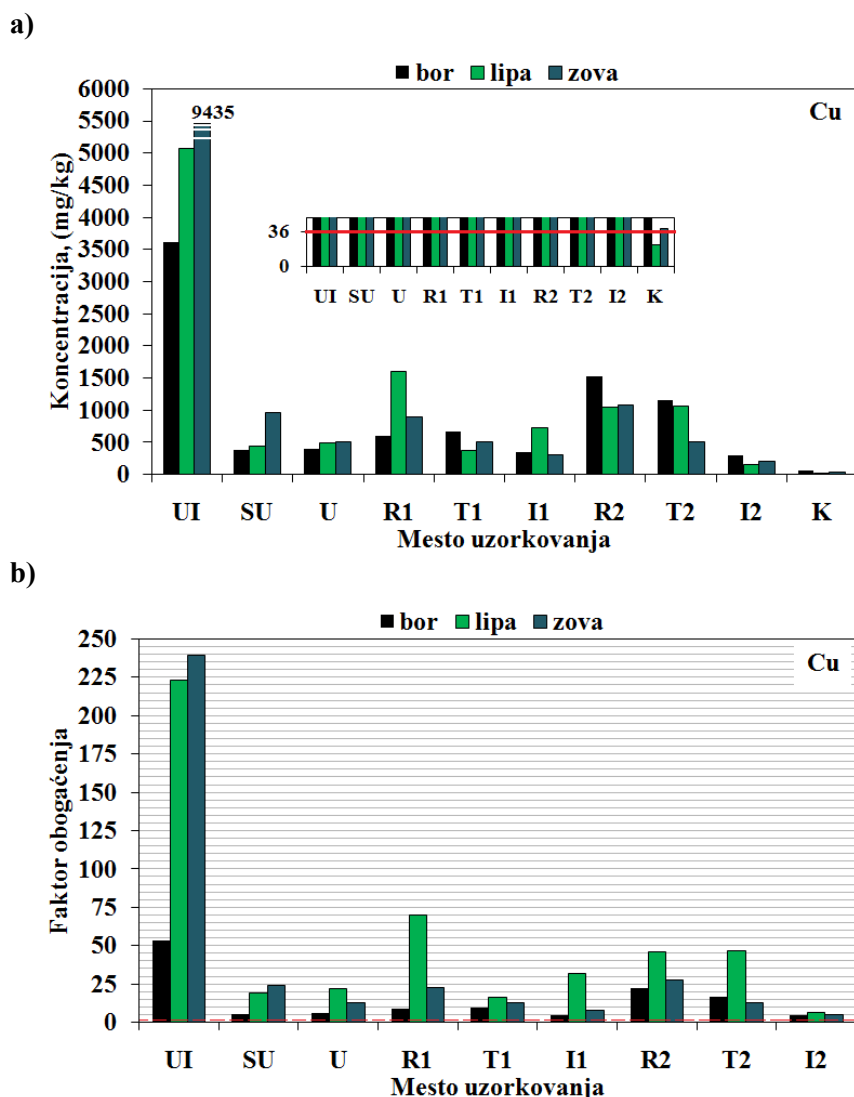
Prema Uredbi Republike Srbije, GV koncentracije Cu u nepoljoprivrednom zemljištu koja može ukazati na značajnu kontaminaciju, iznosi 36 mg/kg („Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 88/10). Sadržaj Cu u zemljištu bora, lipe i zove je značajno iznad GV u svim ispitivanim zonama (slika 19a). Zbog velikog opsega koncentracija Cu u zemljištu sa ispitivanog područja, sa slike se slabo primećuje da je GV premašena čak i u zemljištu uzorkovanom u kontrolnoj zoni, što je posledica prirodnog mineraloškog sastava. Najveće koncentracije Cu i najveća prekoračenja GV, uočavaju se u urbano-industrijskoj zoni u kojoj se nalazi topionica bakra, i koja je pod dodatnim uticajem prašine koja se putem vetra podiže sa flotacijskog jalovišta smeštenog na obodu grada (slika 19a). Koncentracije Cu u zemljištu bora, lipe i zove u urbano-industrijskoj zoni, su oko 100, 140 i 260 puta veće od GV. Sadržaj Cu u zemljištu industrijske zone, na mestima uzorkovanja u blizini Rudnika bakra Cerovo (I1) i Rudnika bakra Veliki Krivelj (I2) znatno je manji, u odnosu na sadržaj Cu u zemljištu u blizini topionice. Zato se pretpostavlja da su topionica bakra i flotacijska jalovišta u Boru, primarni emiteri čestica sa visokim sadržajem Cu, koje u vidu atmosferske depozicije dospevaju na površinu zemljišta, i transportuju se u rizosferu biljaka. Kako nije primećeno postepeno opadanje koncentracija Cu u zemljištu sa udaljenošću od urbano-industrijske zone, pretpostavlja se da Cu iz atmosferske depozicije nema dominantan uticaj na sadržaj Cu u rizosferi.

Ne postoji pravilnost da zemljište neke od tri ispitivane biljne vrste ima najveći ili najmanji sadržaj Cu, na svim mestima uzorkovanja. Ipak, bitno je istaći da je rastući niz koncentracija Cu, u zavisnosti od biljne vrste: bor<lipa<zova, na mestu sa najvećim koncentracijama Cu u zemljištu (UI). Ovakva pravilnost je uočena i u suburbanoj i urbanoj zoni, koje su posle urbano-industrijske zone najbliže topionici bakra i flotacijskom jalovištu.

Vrednosti Faktora obogaćenja za Cu u zemljištu sve tri ispitivane biljne vrste u svim ispitivanim zonama su >2, dok su najveće vrednosti dobijene za zemljište iz urbano-industrijske zone (slika 19b), što ukazuje na antropogeni uticaj. U urbano-industrijskoj i suburbanoj zoni, najveća vrednost Faktora obogaćenja je za zemljište zove, dok je u svim ostalim zonama najveći Faktor obogaćenja za zemljište lipe. Kao i u slučaju Fe, to ukazuje i na specifične uticaje koje biljka ima na sadržaj Cu u rizosferi.

Visoke koncentracije Cu u zemljištu Bora i okoline, su kako prirodnog, tako i antropogenog porekla. Antropogeni uticaj se ogleda u dugogodišnjoj depoziciji čestica bogatih bakrom, koje su emitovane iz topionice bakra i sa flotacijskih jalovišta, na površinu zemljišta. Pod uticajem atmosferskih padavina, nataloženi Cu se translocira u dublje slojeve zemljišta.

Ekstremno velika prekoračenja GV na mestima uzorkovanja u ruralnoj (R1 i R2) kao i u turističkoj zoni (T1 i T2) ukazuju na mogućnost dospevanja toksičnih koncentracija Cu u lanac ishrane, putem biljnih vrsta koje meštani koriste u ishrani, a koje se gaje na zagađenom poljoprivrednom zemljištu.



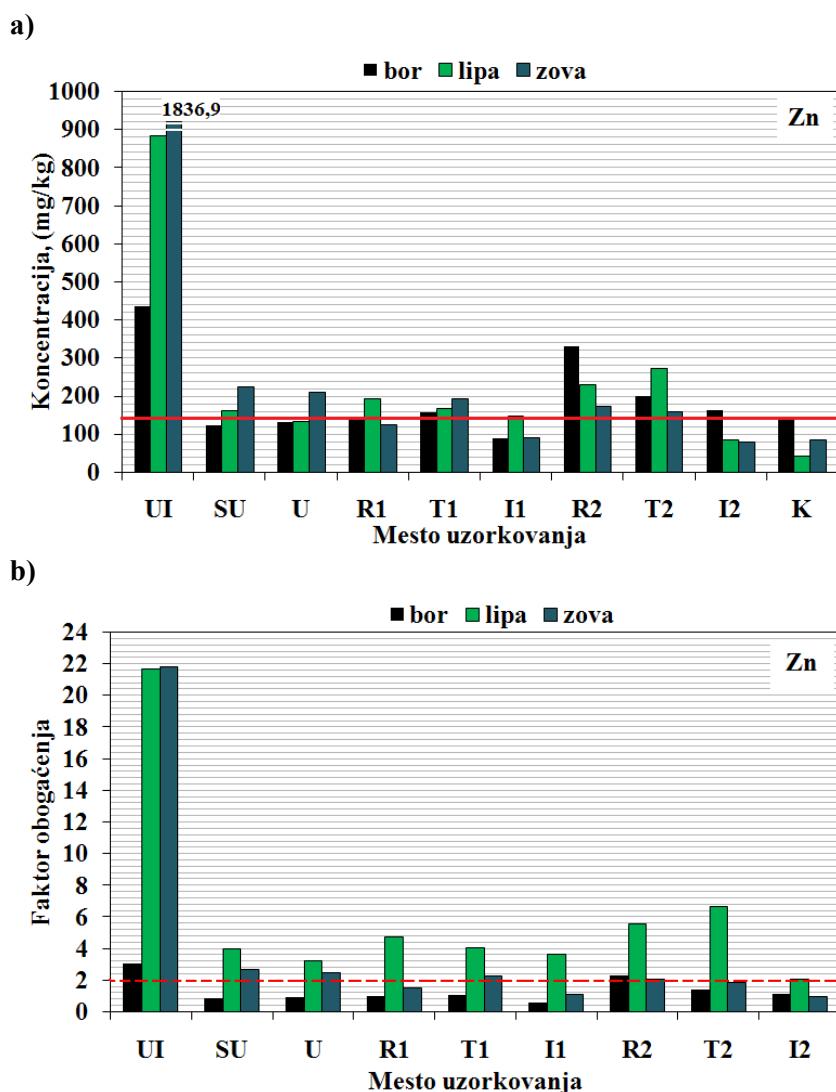
Slika 19. Bakar u zemljištu bora, lipe i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja: a) koncentracije; b) Faktori obogaćenja

6.1.2.4. Cink

Granična vrednost koncentracije Zn u zemljištu, od 140 mg/kg („Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 88/10), prekoračena je na svim mestima uzorkovanja u zemljištima barem jedne od tri ispitivane biljne vrste (slika 20a). Najveća prekoračenja i najveće koncentracije Zn određeni su u zemljištu uzorkovanom u urbano-industrijskoj zoni gde su koncentracije Zn najveće u zemljištu zove, a najmanje u zemljištu bora. Ovakav poredak se takođe uočava i na mestima SU, U i T1.

Najveće vrednosti Faktora obogaćenja koje su >2 , za Zn u zemljištu sve tri ispitivane biljne vrste, izračunate su za uzorke iz urbano-industrijske zone (slika 20b). Kao i u slučaju Fe i Cu, zemljište lipe je za razliku od zemljišta bora i zove, obogaćeno cinkom u svim ispitivanim zonama. Ovi rezultati ukazuju na moguć uticaj lipe na sadržaj Zn u rizosferi, ali

sigurno i na povećane koncentracije Zn u odnosu na nezagađeno područje (mesto uzorkovanja K).

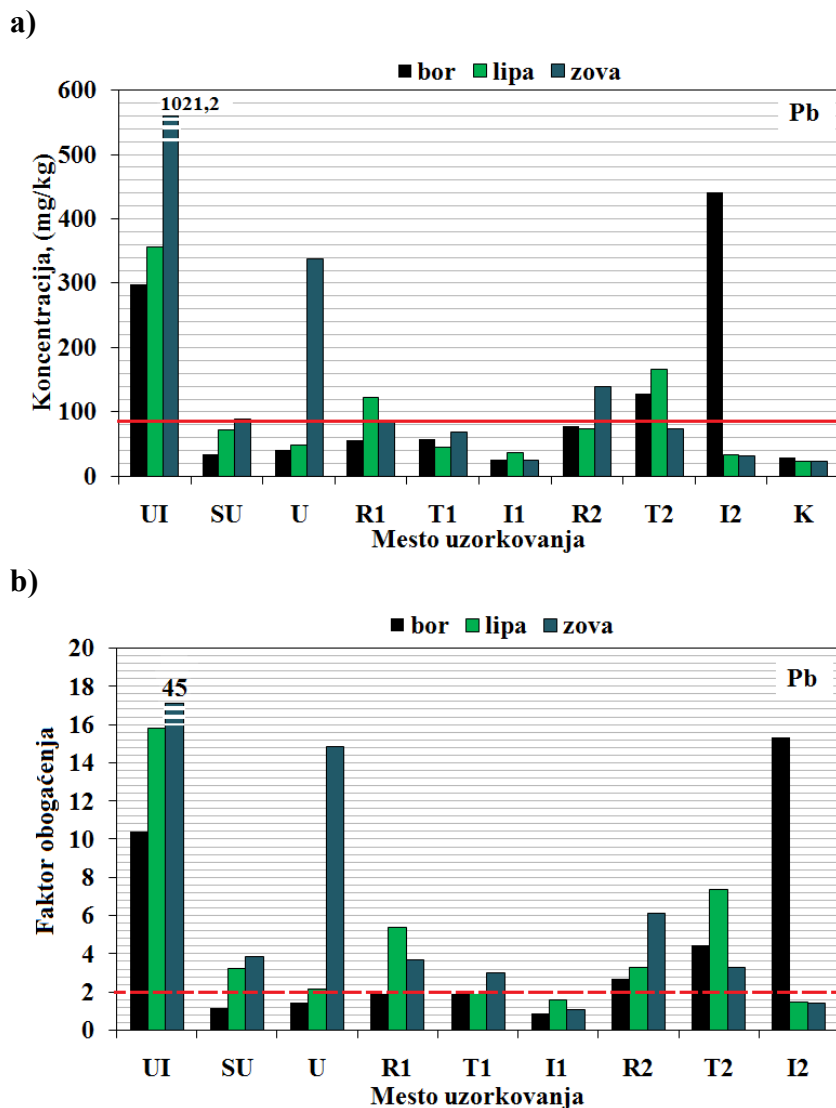


Slika 20. Cink u zemljištu bora, lipa i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja: a) koncentracije; b) Faktori obogaćenja

6.1.2.5. Olovo

Prekoračenja GV koncentracije Pb u zemljištu od 85 mg/kg („Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 88/10), nisu uočena na svim mestima uzorkovanja (slika 21a). Koncentracije Pb u zemljištu sve tri ispitivane biljne vrste, veće su od GV samo u urbano-industrijskoj zoni. Zemljište barem jedne od tri ispitivane biljke ima sadržaj Pb veći od GV u ruralnoj kao i u turističkoj zoni. Koncentracije Pb u zemljištu bora, lipa i zove uzorkovanom na mestima T1, I1 i K, su manje od GV. Ne primećuje se opadanje koncentracija Pb sa udaljenošću od topionice bakra, a sadržaj Pb u zemljištu iz urbano-industrijske zone je najveći. U ovoj zoni postoji više izvora zagađenja životne sredine olovom, kao što su

topionica bakra, flotacijsko jalovište, saobraćaj i gradska toplana. Vrednosti Faktora obogaćenja za Pb u zemljištu barem jedne biljne vrste su >2 , na skoro svim mestima uzorkovanja, osim u okolini rudnika Veliki Krivelj (I1) (slika 21b). Zaključuje se da osim u urbano-industrijskoj zoni, i na ostalim mestima postoji povećan sadržaj Pb u životnoj sredini u odnosu na nezagađenu oblast (mesto uzorkovanja K).

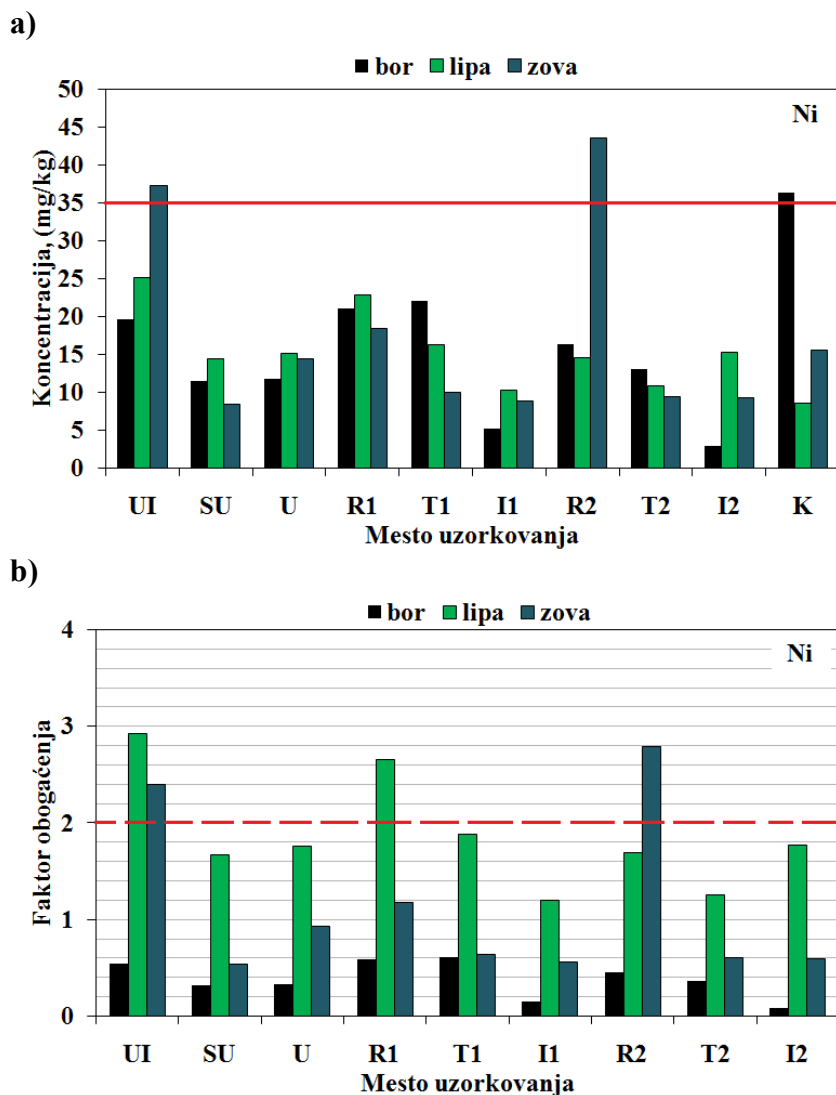


Slika 21. Olovo u zemljištu bora, lipa i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja: a) koncentracije; b) Faktori obogaćenja

6.1.2.6. Nikl

Prekoračenje GV koncentracije Ni od 35 mg/kg („Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 88/10) uočava se samo za zemljište zove, sa mesta uzorkovanja UI i R2, kao i za zemljište bora iz kontrolne zone (slika 22a). Topionica bakra se nalazi u urbano-industrijskoj zoni, a mesto R2 je na pravcu dominantnih vetrova kojima se transportuju zagađujuće supstance iz pravca topionice bakra i flotacijskih jalovišta u Boru, pa se može reći da su povećane

koncentracije Ni u ovim oblastima antropogenog porekla. Pretpostavlja se da je povećan sadržaj Ni u zemljištu bora iz nezagađene oblasti ili prirodnog porekla, ili je posledica specifičnih uticaja koje bor ima na sadržaj Ni u rizosferi. Vrednosti Faktora obogaćenja >2 u zemljištu sa mesta UI, R1 i R2, takođe ukazuju na mogućnost kontaminacije ispitivanih oblasti niklom (slika 22b).



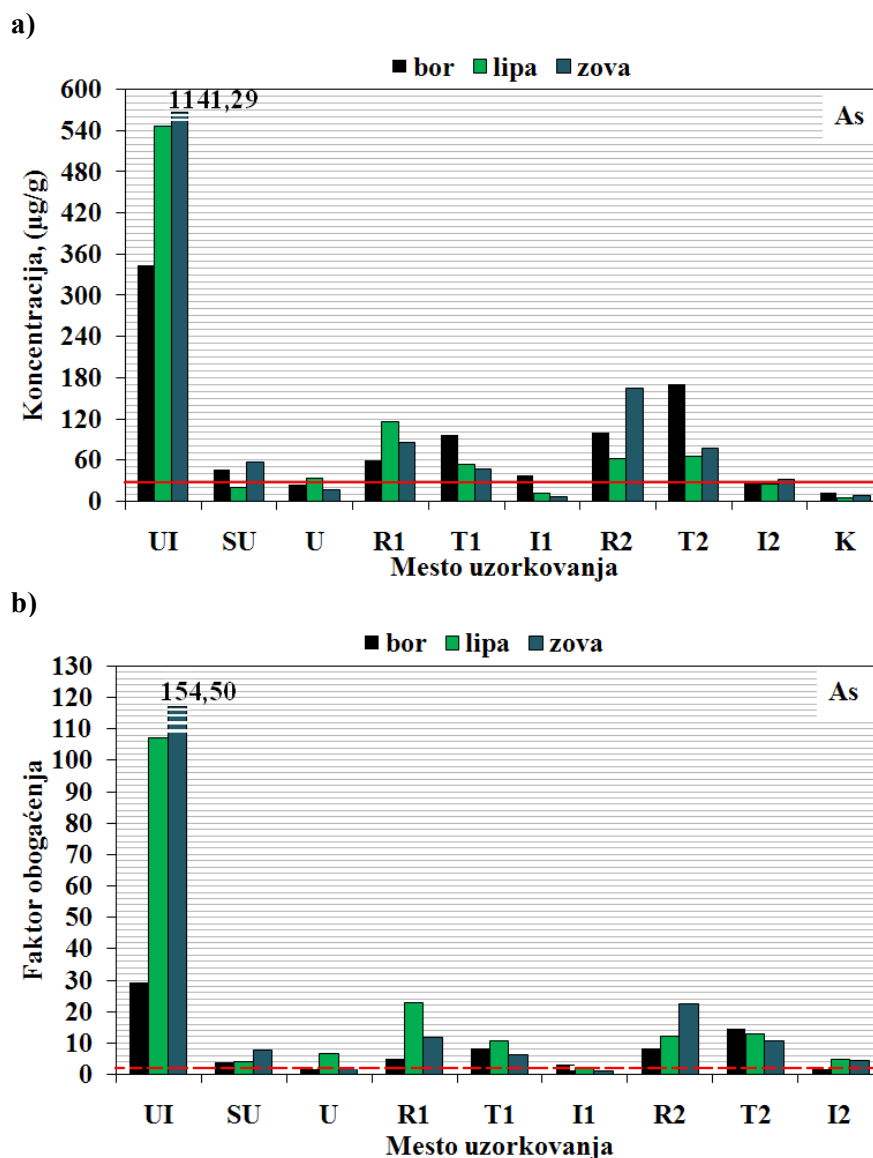
Slika 22. Nikl u zemljištu bora, lipa i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja: a) koncentracije; b) Faktori obogaćenja

6.1.2.7. Arsen

Prema Uredbi Republike Srbije, GV koncentracije As u nepoljoprivrednom zemljištu koja može ukazati na značajnu kontaminaciju, iznosi 29 mg/kg („Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 88/10). Definisana GV prekoračena je u zemljištima bora, lipa i zove iz urbano-industrijske, ruralne i turističke zone, dok prekoračenja GV za zemljišta barem jedne od tri biljne vrste postoje i u ostalim zonama, izuzev u kontrolnoj (slika 23a). Koncentracije As u

zemljištu bora, lipa i zove iz urbano-industrijske zone su oko 125, 175 i 325 puta, respektivno, veće u odnosu na GV, tako da dobijeni rezultati ukazuju na uticaj antropogenih izvora zagađenja arsenom. U opseg koncentracija As od 5–10 mg/kg za koje se smatra da su geogenog porekla (Kader i sar., 2016) mogu se uvrstiti samo koncentracije u zemljištu iz kontrolne zone.

Vrednosti Faktora obogaćenja su >2 za zemljište sve tri biljne vrste iz urbano-industrijske, ruralne i turističke zone, dok i u ostalim zonama postoji obogaćenje arsenom za zemljište barem jedne od tri ispitivane biljne vrste (slika 23b).



Slika 23. Arsen u zemljištu bora, lipa i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja: a) koncentracije; b) Faktori obogaćenja

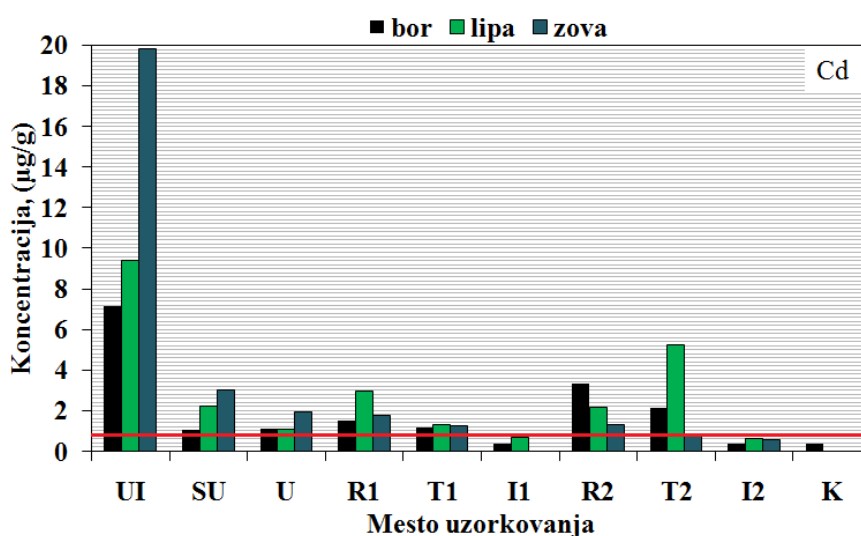
Vrednosti Faktora obogaćenja kao i koncentracije As, ukazuju da je zemljište bora, lipa i zove iz urbano-industrijske zone u najvećoj meri kontaminirano arsenom. Zabrinjavajuće je što lokalno stanovništvo koristi zemljište sa visokim sadržajem As, iz ruralne i turističke zone u poljoprivredne svrhe, zbog čega postoji opasnost od ulaska ove

kancerogene materije u lanac ishrane. Na osnovu velikih koncentracija As dobijenih ispitivanjem kvaliteta vazduha na području Bora i okoline (slika 13), kao i na osnovu njegovog sadržaja u zemljištu (slika 23a), zaključuje se da As predstavlja jednu od najopasnijih zagađujućih materija u ispitivanom području.

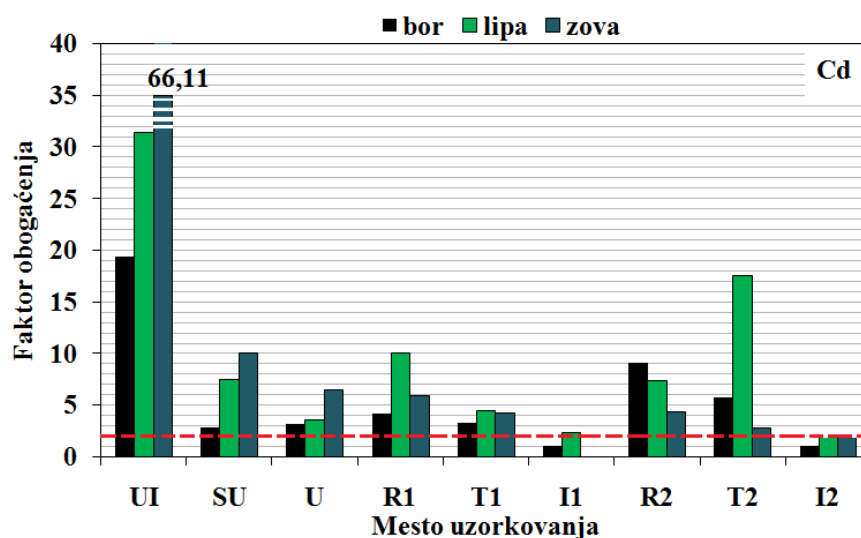
6.1.2.8. Kadmijum

Sadržaj Cd u zemljištu bora, lipa i zove je veći od GV (0,8 mg/kg) („Službeni glasnik Republike Srbije”, br. 88/10) u svim zonama, osim u industrijskoj i kontrolnoj (slika 24a).

a)



b)



Slika 24. Kadmijum u zemljištu bora, lipa i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja: a) koncentracije; b) Faktori obogaćenja. Stubići nedostaju u slučaju koncentracija koje su ispod donje granice određivanja (0,3 mg/kg za Cd)

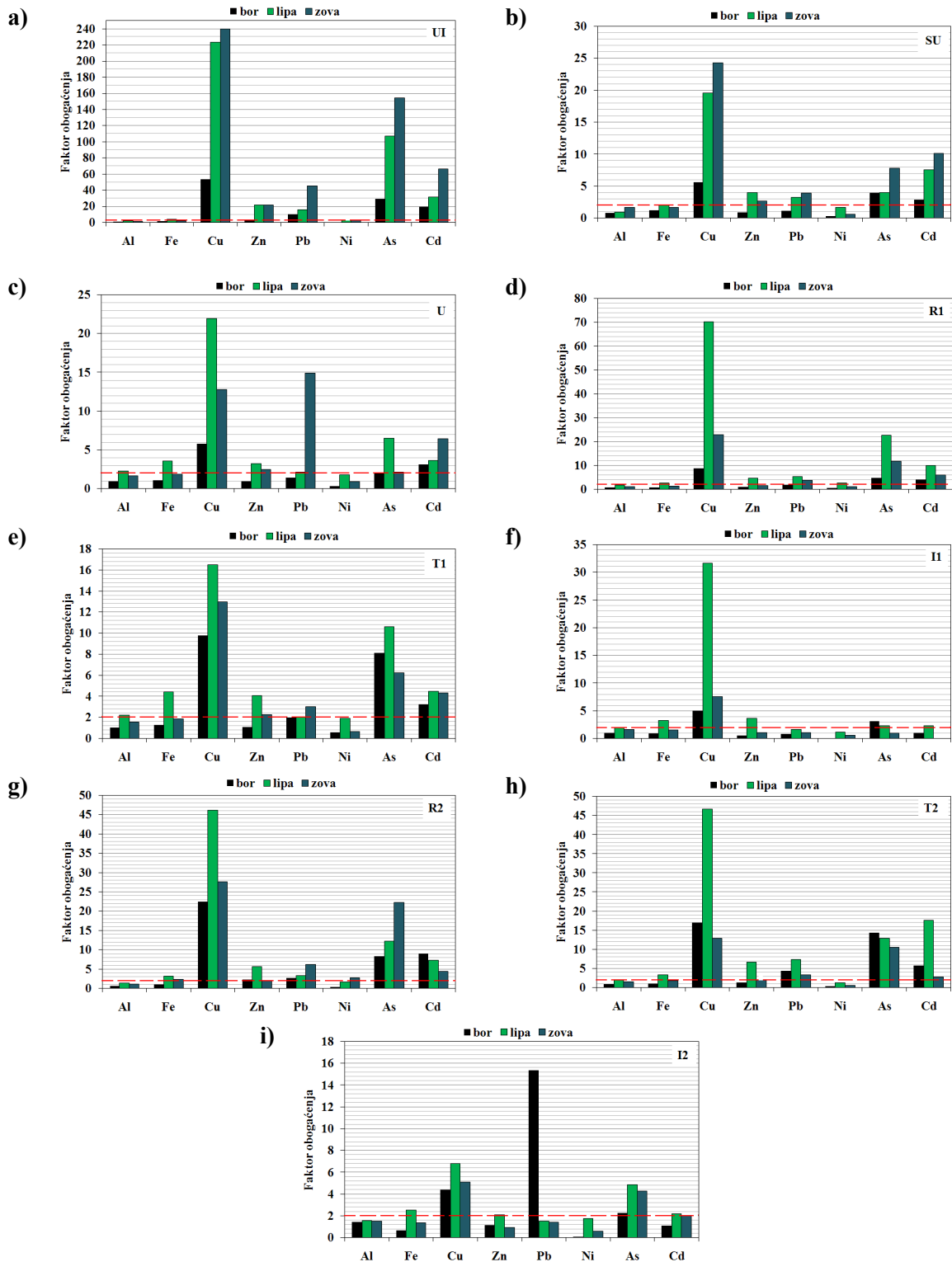
U urbano-industrijskoj, suburbanoj i urbanoj zoni, koje su najbliže topionici bakra i flotacijskom jalovištu u Boru, koncentracije Cd prate rastući niz bor<lipa<zova. Vrednosti Faktora obogaćenja su >2 za zemljište sve tri biljne vrste u svim zonama, osim u industrijskoj gde se te vrednosti kreću oko dva (slika 24b). Rezultati ukazuju da je zemljište u blizini topionice bakra i flotacijskog jalovišta u Boru, zagađenije kadmijumom u poređenju sa zemljištem u blizini odlagališta raskrivke u industrijskoj zoni. Cd osim As, takođe može dospeti u ljudski organizam preko lanca ishrane, što uzrokuje toksične i kancerogene efekte na ljudsko zdravlje.

6.1.3. Elementi u zemljištu sa najvećim vrednostima Faktora obogaćenja

Uporedni prikaz vrednosti Faktora obogaćenja za Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd u zemljištu bora, lipe i zove, za svako mesto uzorkovanja pojedinačno, dat je na slici 25 (a-i). Ovakvim načinom predstavljanja rezultata se jasnije uočavaju elementi koji imaju najveće vrednosti Faktora obogaćenja za zemljište sa određenog mesta uzorkovanja.

Vrednosti Faktora obogaćenja za Cu su u odnosu na vrednosti Faktora obogaćenja za ostale elemente u zemljištu bora, lipe i zove, najveće na pretežno svim mestima uzorkovanja. Jedini izuzeci su vrednosti za zemljište zove iz urbane zone (slika 25c), kao i za zemljište bora sa mesta uzorkovanja I2 (slika 25i). Zemljište ispitivanih biljnih vrsta je osim bakrom, najobogaćenije arsenom i kadmijumom, na skoro svim mestima uzorkovanja.

Zemljište bora ima najniže vrednosti Faktora obogaćenja na pretežno svim mestima uzorkovanja. Za zemljište lipe su izračunate najveće vrednosti Faktora obogaćenja, osim u urbano-industrijskoj i suburbanoj zoni gde su vrednosti Faktora obogaćenja najveće za zemljište zove. Nije moguće utvrditi koja biljna vrsta je na svim mestima uzorkovanja najobogaćenija arsenom i kadmijumom. U urbano-industrijskoj zoni, gde su detektovane najveće koncentracije Cu, As, Cd, Zn i Pb u zemljištu, rastući niz Faktora obogaćenja po biljkama je: bor<lipa<zova. Najniže vrednosti Faktora obogaćenja u svim zonama, izračunate su za Al, Ni i Fe.



Slika 25. Faktori obogaćenja ispitivanih elemenata na mestima uzorkovanja: a) UI; b) SU; c) U; d) R1; e) T1; f) I1; g) R2; h) T2; i) I2

6.1.4. Zavisnosti određenih parametara zemljišta bora, lipe i zove

Zavisnosti koncentracija analiziranih elemenata od pH (KCl), pH (H₂O) i sadržaja organskih materija, izražene preko Spirmanovog koeficijenta korelacije, date su u tabeli 9.

Tabela 9. Spirmanovi koeficijenti korelacije zasnovani na koncentracijama ispitivanih elemenata, pH (H₂O), pH (KCl), i SOM u zemljištu

Mesto uzorkovanja	pH (H ₂ O)			pH (KCl)			SOM (%)		
	bor	lipa	zova	bor	lipa	zova	bor	lipa	zova
Al	-0,612	-0,347	0,061	-0,612	-0,249	-0,122	-0,345	0,636*	0,158
As	0,273	-0,255	-0,418	0,273	-0,274	-0,430	0,709*	0,636*	0,394
Cd	0,886*	-0,800	/	0,886*	-0,872	/	0,886*	0,600	/
Cu	0,467	0,122	-0,127	0,467	0,049	-0,212	0,830**	0,733*	0,430
Fe	0,236	-0,073	0,018	0,236	0,085	-0,176	0,745*	0,539	0,309
Ni	0,486	-0,570	0,170	0,486	-0,451	0,255	0,261	0,626	0,255
Pb	-0,091	0,067	0,055	-0,091	0,000	-0,103	0,333	0,624	0,709*
Zn	0,152	0,152	0,079	0,152	0,182	-0,127	0,527	0,564	0,636*

** Nivo značajnosti $p < 0,01$ (dvostrano).

* Nivo značajnosti $p < 0,05$ (dvostrano).

n=10 osim za Cd u zemljištu bora gde je n=6, Cd u zemljištu lipe (n=5), „/” n<5.

Statistički značajne korelacije sa pH (KCl) i pH (H₂O) pokazale su jedino koncentracije Cd u zemljištu bora. Statistički značajne korelacije sadržaja organskih materija u zemljištu bora dobijene su sa As, Cd, Cu i Fe, u zemljištu lipe sa Al, As i Cu, a u zemljištu zove sa Pb i Zn. Prema ovim rezultatima je utvrđeno da sadržaj organskih materija ima veći uticaj na koncentracije ispitivanih elemenata u zemljištu, nego kiselost zemljišta.

Većina vrednosti koeficijenta korelacije u tabeli 9 ima malu statističku značajnost, što ukazuje da na sadržaj ispitivanih elemenata u zemljištu utiču i drugi faktori. Jedan od njih je povećanje koncentracije elemenata u zemljištu usled uticaja antropogenih izvora zagađenja. Međutim, ni sam uticaj koje biljke imaju na sadržaj i biodostupnost elemenata u rizosferi ne sme se zanemariti.

U tabeli 10 su dati koeficijenti korelacije zasnovani na koncentracijama elemenata u zemljištu bora, lipe i zove sa ispitivanog područja. Statistički značajne korelacije imaju pozitivan znak, što ukazuje da sa povećanjem koncentracije jednog, raste i koncentracija drugog elementa. Od posebnog značaja su korelacije: As-Cu, As-Cd, Cd-Pb, Cu-Zn, Pb-Zn. Koncentracije ovih elemenata u zemljištu su iznad GV, i uglavnom su veće nego u nezagađenoj oblasti (mesto uzorkovanja K). To potvrđuje isto poreklo navedenih metala/metaloida, koje može biti geogeno i/ili antropogeno. Korelacije za zemljište bora i lipe su sličnije, za razliku od korelacija u zemljištu zove. Ovakvo ponašanje indikuje različit stepen usvajanja elemenata iz zemljišta od strane biljaka.

Tabela 10. Korelacioni matiks zasnovan na Spirmanovim koeficijentima korelacije dobijenih na osnovu koncentracija ispitivanih elemenata u zemljištu bora, lipa i zove

	Al	As	Cd	Cu	Fe	Ni	Pb	Zn
bor								
Al	1,000							
As	-0,200	1,000						
Cd	-0,314	1,000**	1,000					
Cu	-0,370	0,915**	1,000**	1,000				
Fe	-0,164	0,588	0,486	0,636*	1,000			
Ni	-0,219	-0,043	-0,029	0,091	0,304	1,000		
Pb	0,139	0,564	0,943**	0,527	0,127	-0,261	1,000	
Zn	-0,055	0,709*	0,829*	0,709*	0,309	0,049	0,879**	1,000
lipa								
Al	1,000							
As	0,418	1,000						
Cd	0,300	0,900*	1,000					
Cu	0,297	0,818**	0,700	1,000				
Fe	0,891**	0,552	0,100	0,430	1,000			
Ni	0,505	0,869**	0,900*	0,553	0,578	1,000		
Pb	0,248	0,879**	0,900*	0,903**	0,418	0,620	1,000	
Zn	0,261	0,867**	0,700	0,855**	0,527	0,620	0,927**	1,000
zova								
Al	1,000							
As	-0,365	1,000						
Cu	-0,036	0,879**	0,400	1,000				
Fe	0,097	0,539	-0,200	0,685*	1,000			
Ni	-0,805**	0,547	-0,400	0,401	0,340	1,000		
Pb	0,055	0,697*	0,400	0,794**	0,697*	0,432	1,000	
Zn	0,322	0,515	0,800	0,770**	0,721*	0,152	0,830**	1,000

**Nivo značajnosti $p < 0,01$ (dvostrano).

*Nivo značajnosti $p < 0,05$ (dvostrano).

$n=10$ osim za Cd u zemljištu bora ($n=6$), Cd u zemljištu lipa ($n=5$), nisu date korelacije elemenata za koje je $n < 5$.

6.2. Mogućnosti korišćenja bora, lipe i zove u biomonitoringu

6.2.1. Mogućnosti korišćenja lišća bora, lipe i zove u biomonitoringu Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd

U ovom poglavlju su predstavljene koncentracije i vrednosti Faktora obogaćenja, ispitivanih elemenata u neopranom i opranom lišću bora, lipe i zove, sa mesta uzorkovanja koja su na slikama poređana od onih sa najmanjom, do onih sa najvećom udaljenošću od topionice bakra. Date su i razlike u koncentracijama elemenata u neopranom i opranom lišću u zavisnosti od mesta uzorkovanja. Ovaj način prikazivanja omogućuje uvid u to da li koncentracije određenog elementa opadaju sa udaljenošću od topionice bakra. Vrednosti Faktora obogaćenja >2 , ukazuju na povišen sadržaj ispitivanih elemenata u lišću sa određenog mesta uzorkovanja u odnosu na sadržaj u lišću iz nezagađene oblasti (mesto K). Razlike u koncentracijama određenog elementa u neopranom i opranom lišću, omogućuju utvrđivanje prisustva u atmosferskoj depoziciji. Rezultati će ukazati na mogućnost korišćenja lišća ispitivanih biljnih vrsta u nekom od aspekata biomonitoringa ispitivanih elemenata. Upoređivanjem koncentracija u opranom lišću bora, lipe i zove sa naučno definisanim kritičnim/toksičnim/prekomernim i td., definišaće se koja biljna vrsta ima potencijala da akumulira određeni element u lišću. Koncentracije ispitivanih elemenata u lišću bora, lipe i zove uzorkovanom u Boru i okolini, upoređivaće se sa koncentracijama istih elemenata u istim biljnim vrstama iz oblasti sa sličnim izvorima zagađenja.

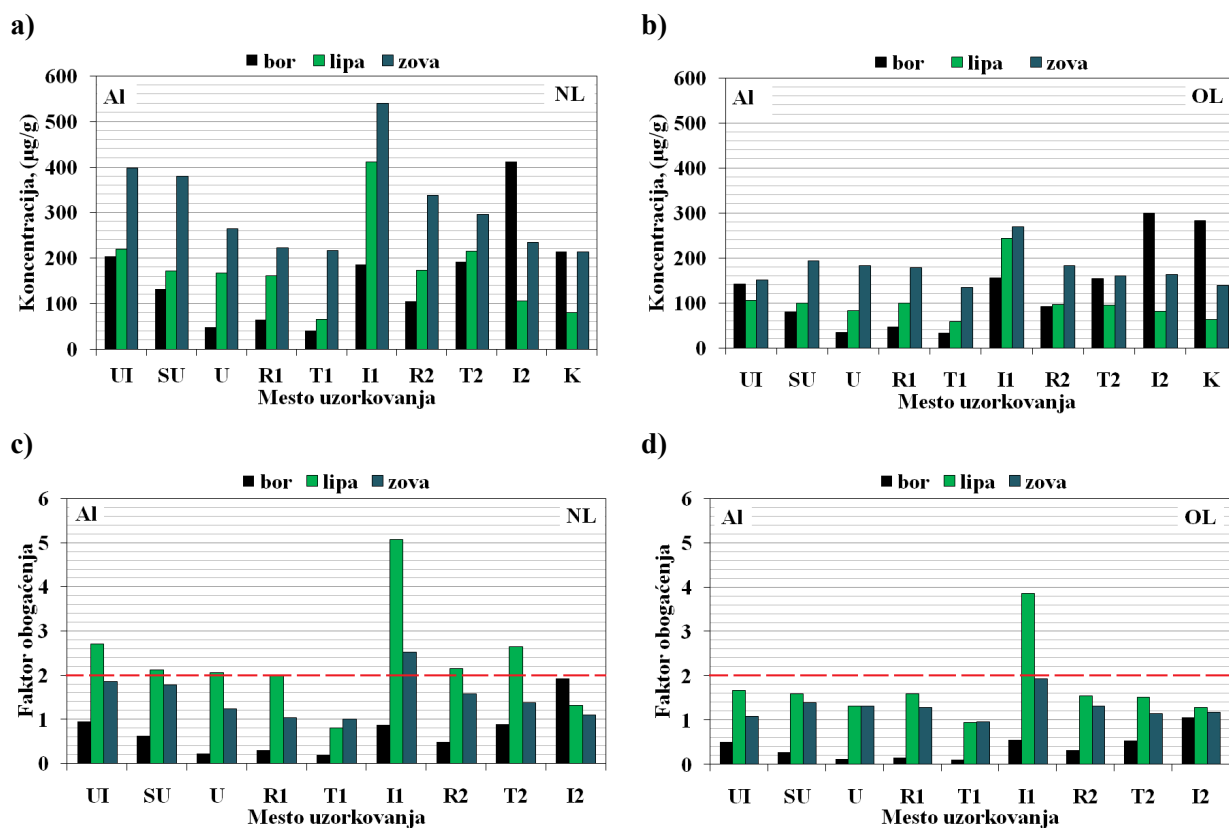
6.2.1.1. Aluminijum

Na slici 26 (a,b) su prikazane koncentracije Al, a na slici 26 (c,d) vrednosti Faktora obogaćenja za Al u neopranom (NL) i opranom lišću (OL) bora, lipe i zove, sa ispitivanog područja. U tabeli 11 su date razlike u koncentracijama Al u neopranom i opranom lišću ispitivanih biljnih vrsta.

Koncentracije Al u neopranom lišću prate rastući niz: bor<lipa<zova, na skoro svim mestima uzorkovanja, osim na mestima I2 i K. Ova pravilnost, ali na manje mesta, se uočava i u slučaju opranog lišća. Na osnovu toga se može zaključiti da lišće (NL, OL) zove ima najveće koncentracije Al.

Oprane i neoprane iglice bora ne ukazuju na obogaćenje aluminijumom ni u jednoj ispitivanoj zoni (slika 26c,d). Vrednosti Faktora obogaćenja >2 za zovu, dobijene su samo u slučaju neopranog lišća, uzorkovanog na mestu I1. Vrednosti Faktora obogaćenja za neoprano lišće lipe, su >2 za uzorke sa 7 mesta uzorkovanja (slika 26c,d), dok je u slučaju opranog lišća samo jedna vrednost Faktora obogaćenja >2 . Upoređivanjem Faktora obogaćenja za neoprano i oprano lišće, došlo se do zaključka da je obogaćenje Al za neoprano lišće lipe poreklom iz atmosfere. Zato, jedino neoprano lišće lipe ima mogućnosti za korišćenje u razlikovanju oblasti sa višim u odnosu na oblasti sa nižim koncentracijama Al u vazduhu. Piczak i sar., (2003) su takođe utvrdili da se lišće lipe može koristiti u biomonitoringu zagađenja vazduha aluminijumom.

Statistički značajan efekat pranja, na smanjenje koncentracija Al u lišću sve tri biljne vrste, ukazuje na prisustvo ovog elementa u atmosferkoj depoziciji (tabela 11).



Slika 26. Aluminijum u lišću bora, lipa i zove: a) koncentracije u neopranom lišću; b) koncentracije u opranom lišću; c) Faktori obogaćenja za neoprano lišće; d) Faktori obogaćenja za oprano lišće

Tabela 11. Razlika (Δc) u koncentracijama Al u neopranom i opranom lišću bora, lipa i zove ($\mu\text{g/g}$)

Mesto uzorkovanja	bor ^a	lipa ^a	zova ^a
UI	62,36	115,17	247,26
SU	52,39	71,63	186,47
U	12,31	84,65	82,51
R1	19,10	61,84	44,52
T1	7,85	7,01	82,61
I1	29,65	167,88	270,90
R2	13,65	77,39	155,30
T2	37,55	120,46	134,87
I2	111,50	25,38	71,03

^aNivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je $<0,05$

Najmanje razlike u koncentracijama Al, su za iglice bora (osim na mestima T1 i I2), a najveće za lišće zove (osim na mestima U, R1 i I2). Zato lišće zove u odnosu na lišće lipa i bora, ima bolje mogućnosti za korišćenje u određivanju prisustva Al u atmosferskoj depoziciji. Na osnovu sadržaja Al u lišću ispitivanih biljnih vrsta koji nije najveći u oblastima

najbližim topionici bakra, pretpostavlja se da Al na površini lišća potiče od resuspendovanih čestica zemljišta.

Sadržaj Al u neopranom lišću lipe iz urbane oblasti Beograda sa gustim saobraćajem (Tomašević i sar., 2011), je sličan koncentracijama Al u lišću lipe iz urbano-industrijske zone u Boru (prilog 9.5). Piczak i sar., (2003) su u opranom lišću lipe iz oblasti zagađene emisijom iz saobraćaja, detektovali nekoliko puta veće koncentracije Al, u odnosu na koncentracije u opranom lišću lipe iz Bora i okoline.

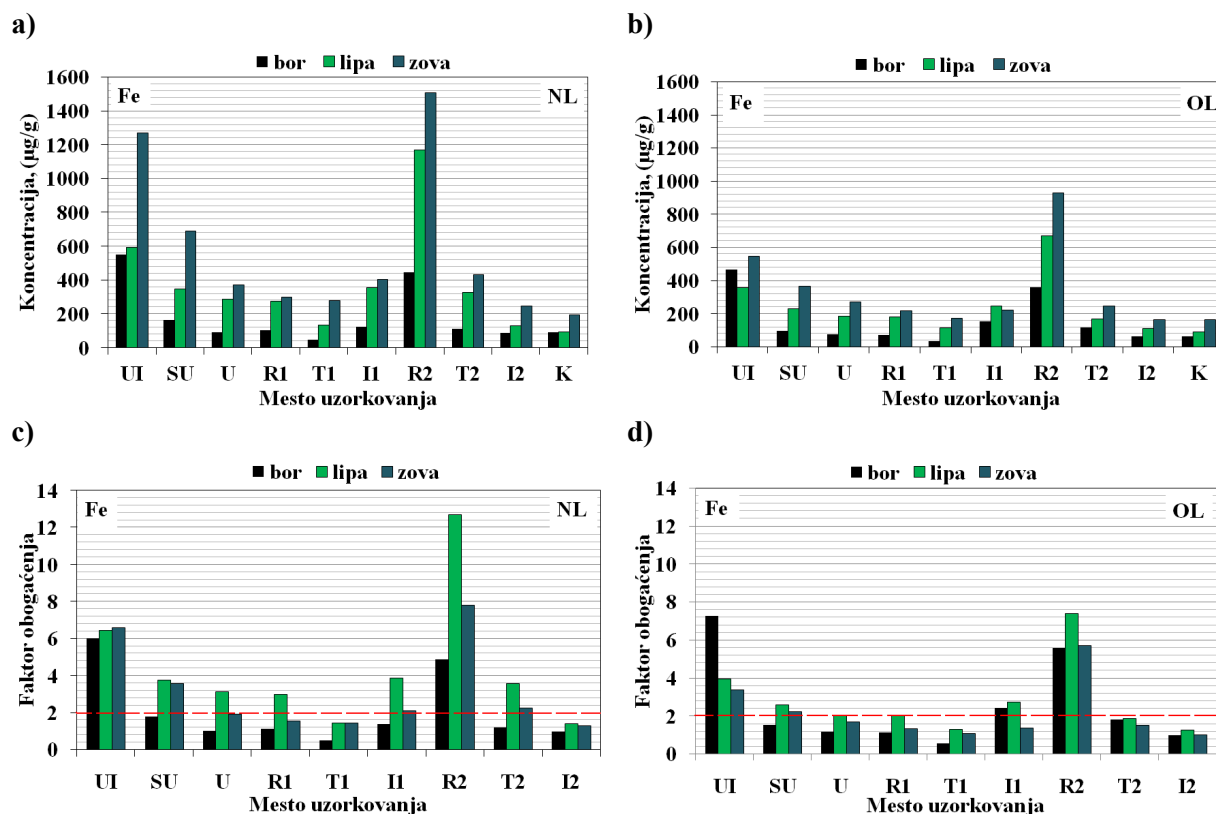
6.2.1.2. Gvožđe

Sadržaj Fe u neopranom lišću ispitivanih biljnih vrsta u svim zonama raste po redosledu bor<lipa<zova. Ista pravilnost je uočena i za koncentracije Fe u opranom lišću, osim na mestima uzorkovanja UI i II. Lišće zove (OL, NL) u odnosu na iglice bora i lišće lipe, sadrži veće koncentracije Fe (osim OL na mestu II). U nezagađenoj oblasti (K), lišće bora i lipe (NL, OL) ima približne koncentracije Fe, dok je u lišću zove sadržaj Fe veći (slika 27a,b). To ukazuje da lišće zove ima prirodno veći sadržaj Fe, u odnosu na lišće bora i lipe.

Na mestima uzorkovanja gde su vrednosti Faktora obogaćenja sve tri biljke >2, ne može se sa sigurnošću tvrditi koja biljna vrsta ima veću sposobnost da preko lišća ukaže na razliku između zagađenih i nezagađenih oblasti gvoždem (slika 27c,d). Vrednosti Faktora obogaćenja za Fe u neopranom lišću bora, lipe i zove sa većine mesta uzorkovanja su >2, u odnosu na vrednosti Faktora obogaćenja za Fe u opranom lišću. Ovi rezultati ukazuju da značajan doprinos u obogaćenju, ima Fe iz atmosferske depozicije. Najveći sadržaji Fe u lišću (OL, NL) sve tri ispitivane biljne vrste (slika 27a,b), kao i najveće vrednosti Faktora obogaćenja (slika 27c,d) uočeni su na mestima uzorkovanja UI i R2.

Razlike u koncentracijama Fe u neopranom i opranom lišću, ukazuju da iglice bora (osim na mestu I2) imaju najmanju, a lišće zove (osim na mestima U i R1) najveću sposobnost zadržavanja Fe iz vazduha (tabela 12). Statistički značajan efekat pranja na smanjenje sadržaja Fe uočeno je za lišće lipe i zove. Najveće razlike u koncentracijama u neopranom i opranom lišću ispitivanih biljnih vrsta, uočavaju se za uzorke iz urbano-industrijske i ruralne (R2) zone.

Prisustvo Fe u atmosferskoj depoziciji se do sada nije ispitivalo klasičnim instrumentalnim metodama, na području Bora i okoline. Lišće lipe i zove je ukazalo na prisustvo ovog elementa u atmosferskoj depoziciji ispitivanog područja. Kako je udeo Fe u zemljištu prirodno visok, može se pretpostaviti da je udeo sprane količine Fe sa lišća ispitivanih biljaka prirodnog porekla iz resuspendovanih čestica zemljišta. Ipak, rezultati za uzorke lišća iz urbano-industrijske zone i sa mesta uzorkovanja R2, ukazuju na antropogeno poreklo Fe. Zato se zaključuje da lišće ispitivanih biljaka, a posebno lipe i zove ima potencijala za korišćenje u utvrđivanju prisustva Fe u atmosferskoj depoziciji.



Slika 27. Gvožđe u lišću bora, lipa i zove: a) koncentracije u neopranom lišću; b) koncentracije u opranom lišću; c) Faktori obogaćenja za neopranu lišće; d) Faktori obogaćenja za oprano lišće

Tabela 12. Razlika (Δ) u koncentracijama Fe u neopranom i opranom lišću bora, lipa i zove ($\mu\text{g/g}$)

Mesto uzorkovanja	bor ^a	lipa ^b	zova ^b
UI	86,56	233,99	721,01
SU	67,51	113,96	325,72
U	19,10	103,05	98,59
R1	31,57	93,17	80,87
T1	13,68	15,56	103,10
I1	-28,55	110,50	179,82
R2	89,38	499,86	581,40
T2	-3,06	157,39	185,13
I2	25,90	17,19	80,88

^a Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je $>0,05$.

^b Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je $<0,05$.

Nijedna koncentracija Fe u opranom lišću bora, lipa i zove nije niža od preporučenih minimalnih od 20-70 $\mu\text{g/g}$ (Rademacher, 2003), što znači da ne postoji deficit Fe u ispitivanim biljnim vrstama. Sadržaj Fe u opranom lišću zove iz urbano-industrijske zone, kao i u opranom lišću lipa i zove sa mesta uzorkovanja R2, je veći od 500 $\mu\text{g/g}$, što predstavlja gornju granicu prekomernog sadržaja Fe za lišće i iglice drvenastih biljaka

(Rademacher, 2003). Zato se pretpostavlja da su se lipa i zova koje rastu u istim uslovima zagađenja vazduha i zemljišta na mestima UI i R2, adaptirale na velike koncentracije Fe u svojim tkivima.

Oprane iglice bora iz okoline topionice bakra u Boru imaju nekoliko puta veće koncentracije Fe, u odnosu na oprane iglice iste starosti, uzorkovane u okolini topionice Zn i Fe (Kandziora–Ciupa i sar., 2016). Sadržaj Fe u opranom i neoprano lišću lipe je u opsegu koncentracija koje su detektovane u lišću lipe iz saobraćajne (Tomašević i sar., 2004; Tomašević i sar., 2011; Piczak i sar., 2003) i urbane zone Beograda (Aničić i sar., 2011). Oprano lišće zove uzorkovano iz napuštene rudarske oblasti (Freitas i sar., 2004) sadrži gotovo istu koncentraciju Fe kao i lišće lipe iz urbano-industrijske zone, a znatno manju u odnosu na lišće lipe sa mesta uzorkovanja R2.

6.2.1.3. Bakar

Iglice bora (NL, OL) pretežno na svim mestima uzorkovanja imaju manji sadržaj Cu u odnosu na lišće lipe i zove, osim oprane iglice iz urbano-industrijske zone (slika 28a,b). Veće koncentracije Cu u lišću zove (NL, OL) u odnosu na lišće lipe određene su u uzorcima iz urbano-industrijske i suburbane zone (najbliža mesta topionici bakra), kao i u uzorcima sa mesta R2 (na pravcu dominantnih vetrova), dok su na ostalim mestima koncentracije Cu u lišću lipe i zove uglavnom približne. To znači, da u uslovima povećanog zagađenja zemljišta i vazduha, lišće zove apsorbuje veće količine Cu, u odnosu na lišće bora i lipe. Za razliku od toga, u uslovima manjeg zagađenja, na mestima koja nisu direktno ugrožena emisijom iz topionice bakra, lišće lipe i zove ima prirodno približne koncentracije Cu.

Koncentracije Cu u neoprano i oprano lišću lipe i zove opadaju sa udaljenjem od topionice bakra i flotacijskog jalovišta u Boru, koji se nalaze u urbano-industrijskoj zoni (slika 28a,b). Time je ispunjen jedan od uslova za definisanje biljaka biomonitora zagađenja vazduha. Od ove pravilnosti odstupaju koncentracije Cu u uzorcima sa mesta R2, koje su veće čak i od koncentracija u lišću iz suburbane zone, koja je druga po udaljenosti od topionice bakra. Ovakav efekat je posledica transporta čestica sa visokim sadržajem Cu kroz kotlinu, iz pravca topionice i borskih jalovišta, pod uticajem dominantnog vetra severozapadnog pravca do mesta R2. Najveći sadržaj Cu u lišću (NL, OL) bora, lipe i zove detektovan je u uzorcima sa mesta UI, SU i R2, što je posledica blizine dominantnog emitera zagađenja i dominantnih pravaca vetrova.

Vrednosti Faktora obogaćenja za Cu u neoprano i oprano lišću ispitivanih biljnih vrsta su na svim mestima uzorkovanja >2 , indikujući da je Cu u Boru i okolini prisutan u većim koncentracijama nego u uslovima nezagađene životne sredine (K zona) (slika 28c,d). Veoma velike vrednosti Faktora obogaćenja izračunate su za neoprano i oprano lišće bora, lipe i zove iz urbano-industrijske i ruralne (R2) zone, kao i u slučaju Fe. Prema dobijenim rezultatima, bor, lipa i zova imaju sposobnost da preko svog lišća ukažu na oblasti sa povećanim nivoima Cu u životnoj sredini, ali se ipak ne može se definisati koja biljna vrsta je u tome efikasnija.

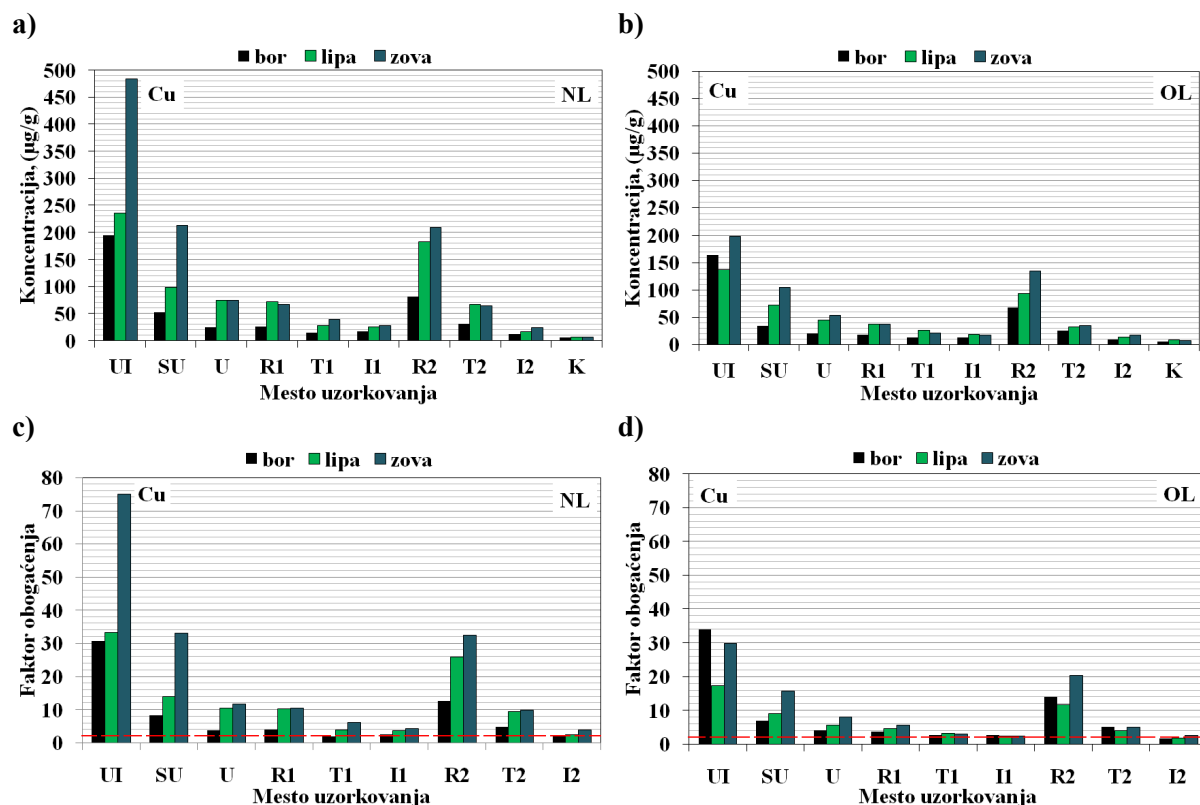
Rezultati ukazuju da su topionica bakra i flotacijsko jalovište u Boru, veći emiteri zagađujućih supstanci sa visokim sadržajem bakra, u odnosu na odlagališta i rudarske procese u rudnicima Veliki Krivelj i Cerovo (mesta I1 i I2).

Pranjem lišća ispitivanih biljnih vrsta, postignuto je statistički značajno smanjenje koncentracija Cu (tabela 13). Zato se lišće bora, lipe i zove može koristiti za određivanje prisustva Cu u atmosferskoj depoziciji. Najmanja razlika u koncentracijama, dobijena je za iglice bora, u odnosu na lišće lipe i zove. Najveće razlike u koncentracijama su za uzorke iz urbano-industrijske zone, gde lišće zove ima najveću sposobnost zadržavanja Cu na svojoj površini. Razlike u koncentracijama Cu u neopranim i opranim iglicama u radu [Al-Alawi i Mandiwana, \(2007\)](#) i [Sun i sar., \(2010\)](#) su nekoliko puta manje u odnosu na razlike dobijene za uzorke iz urbano-industrijske zone u Boru. Prisutan Cu koje se taloži na površini iglica bora, a pogotovo na lišću lipe i zove, može biti usvojen preko nadzemnih delova, što problem ispitivanja porekla povišenih koncentracija Cu u određenim delovima biljaka čini još kompleksnijim. Hemijske osobine i veličina čestica u čijem se sastavu nalazi Cu, kao i morfologija lišća bora, lipe i zove utiču na udeo usvajanja Cu preko lišća. Takođe, Cu deponovan na lišću biljaka se dejstvom kiše uklanja, dospevajući na površinu zemljišta. Na taj način, lišće se oslobađa za nove količine Cu. Koncentracije Cu, Faktori obogaćenja i razlike u koncentracijama u neopranoj i opranoj lišću ukazuju da bor i lipa, a posebno zova, imaju mogućnosti za korišćenje u biomonitoringu zagađenja bakrom.

Sadržaj Cu u opranoj lišću lipe i zove je veći od definisanih kritičnih za lišće i iglice viših biljaka (20 µg/g) ([Påhlsson, 1989](#); [Rademacher, 2003](#)), na svim mestima osim u industrijskoj i kontrolnoj zoni. Prema tome se zaključuje da osim što bor, lipa i zova preko folijarnih delova ukazuju na oblasti sa povećanim sadržajem Cu u atmosferi, ove biljke imaju razvijenu neku od strategija kojom su se adaptirale na visoke koncentracije Cu u životnoj sredini.

Sadržaj Cu u neopranoj iglicama bora iz kontrolne zone (6,37 µg/g) je približan koncentracijama Cu koje su [Samecka-Cymerman i sar., \(2006\)](#) (5,0-5,4 µg/g), kao i [Odabasi i sar., \(2016\)](#) (5,6 µg/g) detektovali u neopranoj iglicama bora iste starosti iz nezagađene oblasti. Neoprane iglice bora uzorkovane iz oblasti zagađenih emisijom iz topionice metala i elektrane ([Samecka-Cymerman i sar., 2006](#)), fabrike gvožđa i čelika sa pogonom na uglj ([Sun i sar., 2010](#)) i industrijske oblasti ([Odabasi i sar., 2016](#)), imaju znatno niže koncentracije Cu u odnosu na iglice uzorkovane u urbano-industrijskoj zoni Bora. Neoprane iglice bora uzorkovane u blizini Cu-Ni topionice imaju približne koncentracije Cu (183,3 µg/g) ([Nikonov i sar., 2001](#)), koncentracijama Cu u iglicama bora iz urbano-industrijske zone (195,72 µg/g).

Oprane iglice bora iz kontrolne zone (4,83 µg/g) sadrže koncentracije istog reda veličine kao i oprane iglice bora (različitih starosti) iz nezagađenih oblasti u radovima [Aboal i sar., \(2001\)](#), [Sardans i Peñuelas, \(2005\)](#), [Kord i sar., \(2010\)](#) i [Przybysz i sar., \(2014\)](#). Oprane iglice bora iz urbano-industrijske zone imaju veće koncentracije Cu, u odnosu na oprane iglice bora iz svih navedenih zagađenih oblasti u prilogu 9.2.



Slika 28. Bakar u lišću bora, lipa i zove: a) koncentracije u neopranom lišću; b) koncentracije u opranom lišću; c) Faktori obogaćenja za neoprano lišće; d) Faktori obogaćenja za oprano lišće

Tabela 13. Razlika (Δc) u koncentracijama Cu u neopranom i opranom lišću bora, lipa i zove ($\mu\text{g/g}$)

Mesto uzorkovanja	bor ^a	lipa ^a	zova ^a
UI	31,60	98,57	287,20
SU	19,32	26,75	109,31
U	5,03	29,76	22,29
R1	8,28	36,24	30,83
T1	2,61	1,57	19,65
I1	4,04	7,62	11,24
R2	13,69	90,22	74,84
T2	6,06	34,95	30,25
I2	4,41	3,83	7,97

^a Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je $<0,05$

Hagen-Thorn i Stjernquist, (2005) su u neopranom lišću lipa iz nezagađene oblasti detektovali koncentracije Cu koje su za nekoliko $\mu\text{g/g}$ veće u odnosu na sadržaj Cu u neopranom lišću lipa iz kontrolne zone. Neoprano lišće lipa, iz urbane oblasti Beograda gde se odvija intenzivni saobraćaj (Tomašević i sar., 2011), sadrži znatno niže koncentracije Cu nego neoprano lišće lipa sa mesta uzorkovanja UI, SU i R2, a približne koncentracije kao i

lišće lipe sa mesta uzorkovanja U, R1, i T2. Oprano lišće lipe iz urbane oblasti Beograda, ima približan sadržaj Cu kao i oprano lišće lipe iz urbane zone Bora.

Oprano lišće zove uzorkovano u blizini odlagališta i površinskih rudnika bakra u Cerovu i Velikom Krivelju, i oprano lišće zove uzorkovano u blizini Pb–Zn rudnika (Yanqun i sar., 2004), imju približne koncentracije Cu.

6.2.1.4. Cink

Neoprano i oprano lišće lipe u odnosu na lišće bora i zove, pretežno ima najniži sadržaj Zn, uz par izuzetaka (NL sa mesta R1 i R2) (slika 29a,b). Lišće zove (NL, OL) u odnosu na lišće bora i lipe, sadrži veće koncentracije Zn, na većini mesta uzorkovanja. U nezagađenoj oblasti (kontrolna zona), neoprano i oprano lišće zove takođe sadrži najviše Zn, zbog čega je utvrđeno da lišće zove u odnosu na lišće bora i lipe ima prirodno veći sadržaj Zn.

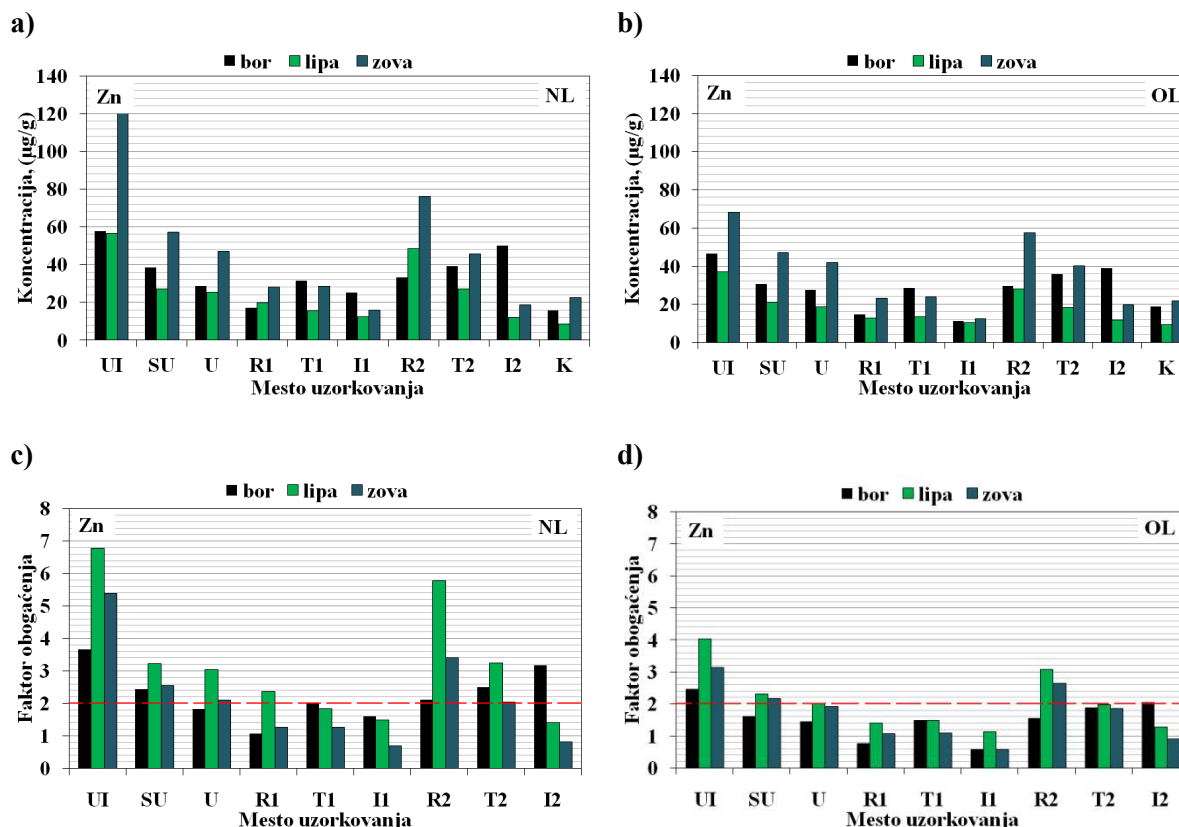
Vrednosti Faktora obogaćenja za Zn u neoprano lišću barem jedne od biljaka sa skoro svih mesta uzorkovanja (osim T i I1) ukazuju na povećan sadržaj Zn u odnosu na nezagađenu oblast (K zona) (slika 29c,d). Vrednosti Faktora obogaćenja za oprano lišće ukazuju na obogaćenje cinkom samo na mestima UI, SU i R2. Veći broj mesta uzorkovanja gde je Faktor obogaćenja za neoprano lišće >2 , u odnosu na broj mesta uzorkovanja gde je Faktor obogaćenja za oprano lišće >2 , ukazuje na uticaj Zn iz atmosferske depozicije na obogaćenje cinkom. Najveće vrednosti Faktora obogaćenja za lišće (NL, OL) bora, lipe i zove, su za uzorke iz urbano-industrijske zone, u kojoj se nalaze topionica bakra i flotacijsko jalovište. Vrednosti Faktora obogaćenja za Zn u lišću lipe su veće u odnosu na vrednosti Faktora obogaćenja za Zn u lišću bora i zove, tako da lipa ima više mogućnosti za upotrebu u definisanju zagađenih oblasti.

Smanjenje koncentracija Zn nakon pranja lišća je statistički značajno za sve tri ispitivane biljne vrste (tabela 14). Najveće količine Zn su sprane sa lišća lipe i zove uzorkovanog sa mesta UI i R2. Na mestima koja su najbliža topionici bakra u urbano-industrijskoj i suburbanjoj zoni, najveća razlika u koncentracijama Zn je za lišće zove. Ovi rezultati ukazuju da se lišće ispitivanih biljaka, a posebno zove, može koristiti za utvrđivanje prisustva Zn u atmosferskoj depoziciji. Razlika u koncentracijama Zn u neoprano i oprano iglicama bora iz industrijske oblasti (Al-Alawi i sar., 2007), je i do 10 puta veća u odnosu na razlike dobijene za iglice iz urbano-industrijske zone u Boru.

Koncentracije Zn u oprano lišću bora, lipe i zove uglavnom nisu veće od prekomernih (>50 – 100 $\mu\text{g/g}$) (Rademacher, 2003), osim u lišću zove (>50 $\mu\text{g/g}$) sa mesta UI i R2. Na osnovu toga se pretpostavlja da u uslovima životne sredine koji vladaju na tim mestima uzorkovanja, zova ima sposobnost da akumulira Zn u lišću, što ukazuje na adaptivne sposobnosti zove na povećane koncentracije Zn u lišću. Kritična koncentracija Zn (200 – 300 $\mu\text{g/g}$) koja utiče na rast viših biljaka (Pahlsson, 1989), nije premašena ni na jednom mestu uzorkovanja.

Neoprane iglice bora iz urbano-industrijske zone Bora, imaju veći sadržaj Zn u odnosu na oprane iglice uzorkovane u blizini topionice metala i industrijske oblasti, u

radovima Samecka-Cymerman i sar., (2006) i Sun i sar., (2010), respektivno. Odabasi i sar., (2016) su u opranim iglicama bora iz industrijske oblasti odredili veću koncentraciju Zn (66,7 $\mu\text{g/g}$), u odnosu na koncentracije Zn u opranim iglicama bora sa svih mesta uzorkovanja u Boru i okolini.



Slika 29. Cink u lišću bora, lipe i zove: a) koncentracije u neoprano lišću; b) koncentracije u oprano lišću; c) Faktori obogaćenja za neoprano lišće; d) Faktori obogaćenja za oprano lišće

Koncentracije Zn u opranim iglicama bora iz oblasti zagađenih emisijom iz topionice Fe (Kandziora-Ciupa i sar., 2016), elektrane sa pogonom na ugalj (Aboal i sar., 2001) i fabrike Fe i čelika (Sun i sar., 2010), su niže u odnosu na sadržaj Zn u opranim iglicama bora iz urbano-industrijske zone u Boru. Kandziora-Ciupa i sar., (2016) su u opranim iglicama bora uzorkovanim u blizini topionice Zn, detektovali 121,70 $\mu\text{g/g}$ Zn, što je preko dva puta više u odnosu na sadržaj Zn u opranim iglicama bora iz urbano-industrijske zone Bora.

Iglice bora (NL, OL) iz nezagađenih oblasti u radovima Odabasi i sar., (2016), Samecka-Cymerman i sar., (2006) i Sun i sar., (2010) sadrže veće koncentracije Zn, u odnosu na iglice iz kontrolne zone.

Neoprano lišće lipe iz kontrolne zone u radu Hagen-Thorn i Stjernquist, (2005) sadrži veće koncentracije Zn, u odnosu na neoprano lišće lipe iz nezagađenog područja Bora i okoline (K zona). Dmuchowski i Bytnerowicz, (2009) su u neoprano lišću lipe iz urbane oblasti detektovali približno 20 $\mu\text{g/g}$ Zn, što je manje u odnosu na sadržaj Zn u neoprano lišću lipe iz urbane zone Bora. Piczak i sar., (2003) su analizom opranog lišća lipe našli od 61,9 do 84,4 $\mu\text{g/g}$ Zn, što je više u odnosu na koncentracije Zn izmerene u oprano lišću lipe iz Bora i okoline.

Tabela 14. Razlika (Δc) u koncentracijama Zn u neoprano i oprano lišću bora, lipe i zove ($\mu\text{g/g}$)

Mesto uzorkovanja	bor ^a	lipa ^a	zova ^a
UI	11,02	19,52	52,24
SU	7,77	5,64	10,17
U	1,13	6,91	5,19
R1	2,24	6,80	5,00
T1	2,79	1,76	4,46
I1	13,96	1,94	3,28
R2	3,66	20,07	18,48
T2	3,41	8,86	5,27
I2	10,95	0,07	-1,24

^aNivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je <0,05.

Oprano lišće zove uzorkovano u okolini Pb–Zn rudnika (Yanqun i sar., 2004), sadrži znatno veće koncentracije Zn u odnosu na oprano lišće zove iz svih ispitivanih zona u Boru i okolini, na šta najveći uticaj ima mineraloški sastav eksploatisane rude.

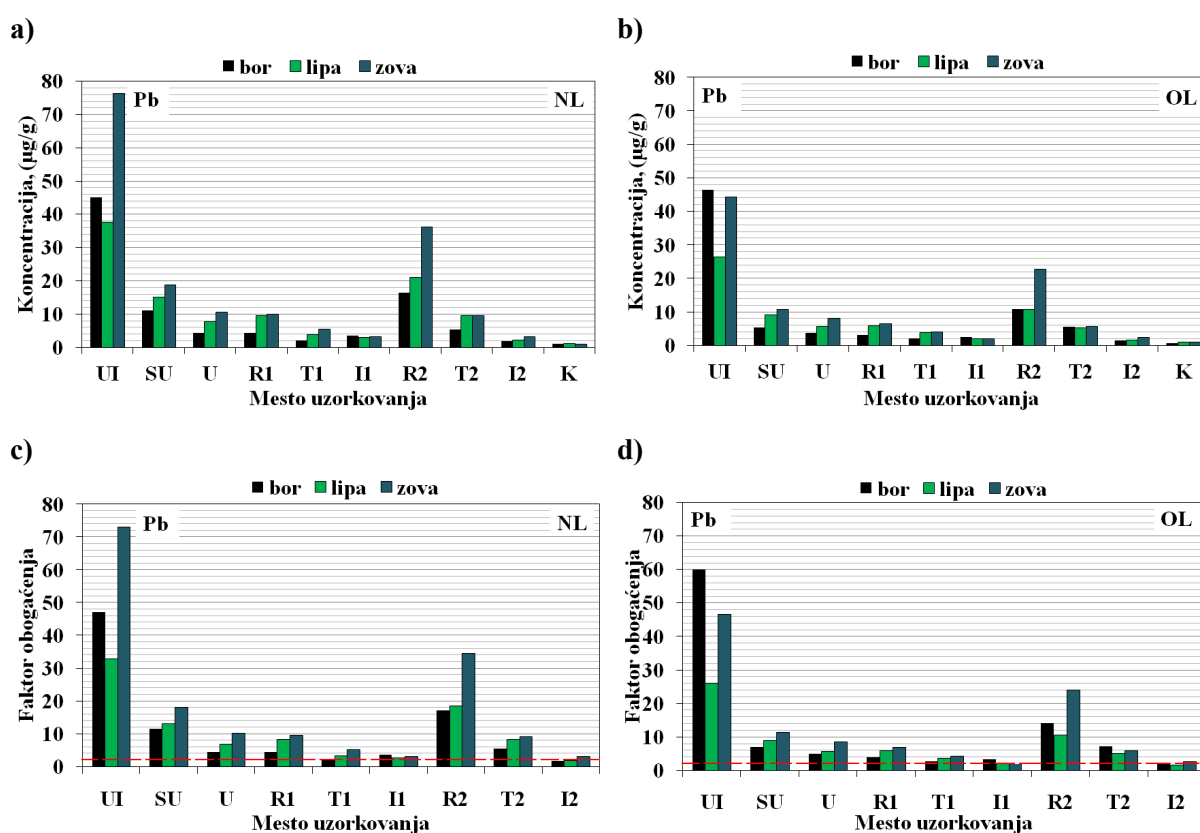
6.2.1.5. Olovo

Na mestima uzorkovanja najbližim topionici bakra (UI, SU, U) kao i na mestu R2 koje je na pravcu dominantnih vetrova, neoprano lišće zove sadrži veće koncentracije Pb u odnosu na lišće bora i lipe (slika 30a). Oprano lišće bora i zove iz urbano-industrijske zone, ima približne koncentracije Pb, dok se lišće zove iz suburbane i urbane zone ističe po najvećim koncentracijama Pb (slika 30b). U uslovima nezagađene životne sredine, lišće bora, lipe i zove (NL, OL) sadrži skoro iste koncentracije Pb.

Koncentracije Pb u neoprano i oprano lišću lipe i zove opadaju sa udaljenošću od topionice bakra, što je jedan od kriterijuma koje biljke biomonitori zagađenja vazduha trebaju da ispunjavaju. Od ovakve pravilnosti odstupaju koncentracije u uzorcima sa mesta R2 i T2 koja se nalaze na dva različita pravca od topionice (zapad-severo-zapad i istok). Ipak, oba pravca su na udaru najučestalijih vetrova u ispitivanom području. Mesta uzorkovanja UI i R2 se ističu po najvećim sadržajima Pb u oprano i neoprano lišću bora, lipe i zove.

Vrednosti Faktora obogaćenja za Pb u neoprano i oprano lišću ispitivanih biljnih vrsta su >2 u skoro svim ispitivanim zonama (slika 30c,d). Najveće vrednosti Faktora obogaćenja izračunate su za uzorke sa mesta UI i R2, kao i u slučaju Fe i Cu. Neoprano i oprano lišće zove ima veće vrednosti Faktora obogaćenja u odnosu lišće bora i lipe, na skoro svim mestima uzorkovanja, osim u urbano-industrijskoj zoni (OL). To ukazuje da se lišće (NL, OL) ispitivanih biljnih vrsta a posebno zove, može koristiti za definisanje zagađenih oblasti olovom.

Statistički značajne količine Pb sprane su sa lišća lipe i zove, pri čemu su veće razlike u koncentracijama za lišće zove, osim na mestima R1 i T2 (tabela 15). Razlike u koncentracijama za iglice bora nisu statistički značajne, a inače su manje nego u slučaju lipe i zove. Najbolji pokazatelj ovakvih rezultata su uzorci iz urbano-industrijske zone (slika 30a,b), gde je došlo do smanjenja koncentracija Pb u lišću lipe i zove nakon pranja, za razliku od koncentracija u iglicama bora, koje su ostale skoro iste. Rastući nizovi razlika u koncentracijama za lišće lipe i zove su skoro isti: lipa ($T1 < I2 < I1 < U < R1 < T2 < SU < R2 < UI$), zova ($I2 < I1 < T1 < U < R1 < T2 < SU < R2 < UI$). Ovi rezultati ukazuju da je lišće lipe i zove pogodno za korišćenje u biomonitoringu Pb u atmosferskoj depoziciji. U radu [Sun i sar., \(2010\)](#) razlike u koncentracijama Pb u neopranim i opranim iglicama bora, takođe nisu bile statistički značajne.



Slika 30. Olovo u lišću bora, lipe i zove: a) koncentracije u neopranom lišću; b) koncentracije u opranom lišću; c) Faktori obogaćenja za neoprano lišće; d) Faktori obogaćenja za oprano lišće

Zbog značajnih količina Pb na površini lišća lipe i zove, postoji mogućnost usvajanja ovog elementa putem lišća, što dalje komplikuje ispitivanja porekla (zemljište i/ili vazduh) ovog neesencijalnog elementa za biljke. Takođe, putem kiše sa lišća se spiraju čestice Pb, čime se površina lišća oslobađa za prihvatanje novih količina atmosferske depozicije sa visokim sadržajem Pb. Sprano Pb se deponuje na površinu zemljišta, odakle se translocira u rizosferu, čime se njegova koncentracija u zemljištu stalno povećava.

Tabela 15. Razlika (Δc) u koncentracijama Pb u neopranoj i opranoj lišću bora, lipe i zove ($\mu\text{g/g}$)

Mesto uzorkovanja	bor ^a	lipa ^b	zova ^b
UI	-1,29	11,33	32,02
SU	5,64	5,91	8,11
U	0,61	2,09	2,48
R1	1,28	3,61	3,49
T1	-0,01	0,03	1,44
I1	0,95	0,92	1,22
R2	5,54	10,37	13,47
T2	-0,32	4,45	3,92
I2	0,30	0,62	0,93

^a Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je $>0,05$.

^b Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je $<0,05$.

Jedino su koncentracije Pb u opranoj lišću bora i zove iz urbano-industrijske zone, iznad $30 \mu\text{g/g}$. Ova vrednost prema Rademacher (2003) predstavlja prekomerne koncentracije za lišće viših biljaka, što ukazuje da su bor i zova razvili neki od mehanizama tolerancije na visoke koncentracije Pb u životnoj sredini.

Neoprane iglice iz kontrolne oblasti u radovima Odabasi i sar., (2016) i Samecka-Cymerman i sar., (2006), imaju približne sadržaje Pb, kao i neoprane iglice bora iz nezagađene oblasti Bora i okoline. Neoprane i oprane iglice bora uzorkovane u blizini različitih industrijskih postrojenja u kojima se tope i prerađuju rude metala (Samecka-Cymerman i sar., 2006; Odabasi i sar., 2016; Sun i sar., 2010; Kandziora-Ciupa i sar., 2016), imaju niži sadržaj Pb u odnosu na neoprane iglice bora iz urbano-industrijske zone u Boru.

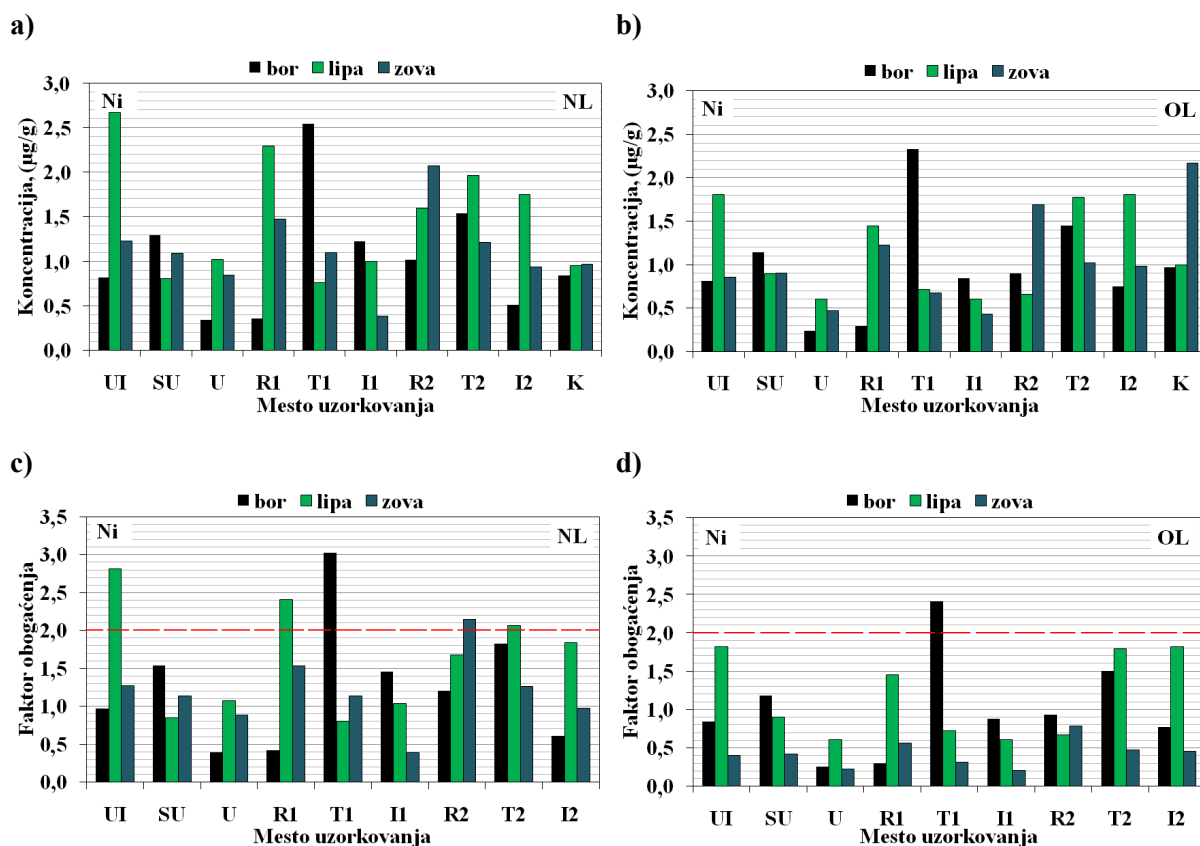
Lišće lipe (NL, OL) iz velikih urbanih oblasti sa intenzivnim saobraćajem u radovima Dmuchowski i Bytnerowicz, (2009); Tomašević i sar., (2011); Tomašević i sar., (2004), gde se Pb smatra jednim od dominantnih zagađujućih supstanci, i lišće lipe iz urbane zone Bora, sadrže približne koncentracije Pb.

Koncentracije Pb u opranoj i neopranoj lišću zove sa svih mesta uzorkovanja u Boru i okolini, su niže u odnosu na sadržaj Pb u lišću zove iz okoline Pb-Zn rudnika (Yanqun i sar., 2004) i iz šumske oblasti koja je pod uticajem saobraćaja (Tong, 1991).

6.2.1.6. Nikl

Rezultati (slika 31a,b), ne ukazuju koja biljna vrsta, na svim mestima uzorkovanja ima prirodno veće koncentracije Ni u lišću. Vrednosti Faktora obogaćenja za neoprano lišće su >2 za 5 mesta uzorkovanja, za po jednu, ne uvek istu biljnu vrstu (slika 31c,d). U slučaju opranog lišća, samo je jedna vrednost Faktora obogaćenja >2 . Statistički značajan efekat pranja pokazao se za lišće lipe i zove, mada razlike u koncentracijama nisu velike (tabela 16). Zato se ne može sa sigurnošću tvrditi da li se lišće ispitivanih biljaka može koristiti za

utvrđivanje prisustva Ni u atmosferskoj depoziciji. Koncentracije Ni u lišću bora, lipa i zove nisu premašile kritične koncentracije Ni za biljke od 25 µg/g (Cicek i Koparal, 2004).



Slika 31. Nikl u lišću bora, lipa i zove: a) koncentracije u neopranom lišću; b) koncentracije u opranom lišću; c) Faktori obogaćenja za neoprano lišće; d) Faktori obogaćenja za oprano lišće

Tabela 16. Razlika (Δc) u koncentracijama Ni u neopranom i opranom lišću bora, lipa i zove (µg/g)

Mesto uzorkovanja	bor ^a	lipa ^b	zova ^b
UI	0,00	0,87	0,37
SU	0,15	-0,09	0,19
U	0,10	0,42	0,38
R1	0,06	0,86	0,25
T1	0,21	0,05	0,43
I1	0,38	0,39	-0,05
R2	0,12	0,94	0,38
T2	0,09	0,20	0,19
I2	-0,24	-0,06	-0,04

^a Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je >0,05.

^b Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je <0,05.

Nikonov i sar., (2001) su u neopranim iglicama bora uzorkovanim u blizini Cu–Ni topionice detektovali čak 273 $\mu\text{g/g}$ Ni. To je daleko veći sadržaj u odnosu na onaj koji imaju neoprane iglice bora sa ispitivanog područja Bora i okoline.

6.2.1.7. Arsen

Neoprano lišće bora i zove iz urbano-industrijske zone ima skoro iste koncentracije As (slika 32a). Na ostalim mestima uzorkovanja, lišće zove u odnosu na lišće bora i lipe sadrži najviše As, ili su koncentracije u lišću lipe i zove približne, dok iglice bora imaju najmanji sadržaj As. Iste pravilnosti uočene su i za oprano lišće, osim u urbano-industrijskoj zoni, gde oprane iglice bora sadrže veće koncentracije As u odnosu na oprano lišće zove (slika 32b).

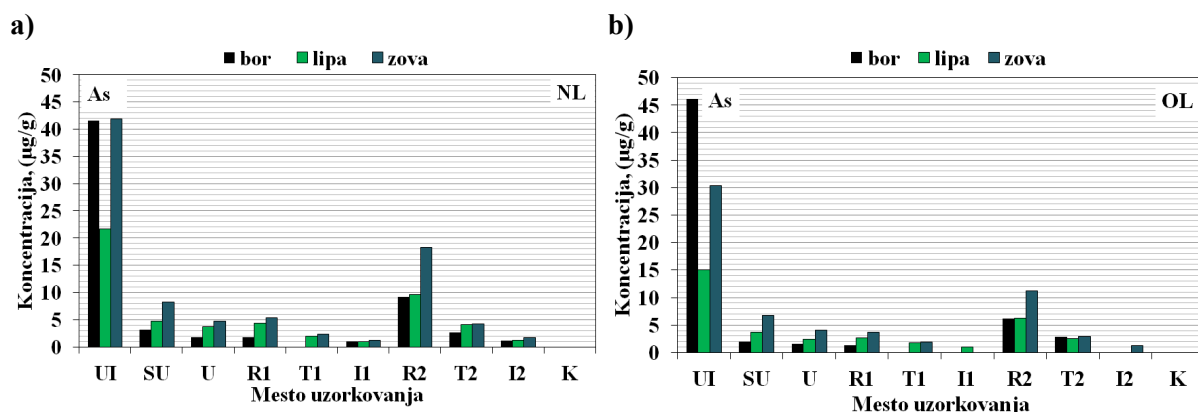
Koncentracije As u lišću (NL, OL) ispitivanih biljnih vrsta uzorkovanih u urbano-industrijskoj zoni, dosta su veće u odnosu na koncentracije As u lišću (NL, OL) sa ostalih mesta. Mesto uzorkovanja R2 u ruralnoj zoni je drugo po redu po najvećim koncentracijama As u uzorcima lišća ispitivanih biljnih vrsta. Kontrolna kao i oblasti u okolini odlagališta rudnika Veliki Krivelj (I1) i Cerovo (I2) ističu se po najnižim koncentracijama As u neopranoj i opranoj lišću bora, lipe i zove.

Vrednosti Faktora obogaćenja u tabeli 17, ukazuju da neoprano i oprano lišće ispitivanih biljnih vrsta ima mogućnosti za utvrđivanje zagađenja arsenom. Najveće vrednosti Faktora obogaćenja izračunate su za As u neopranoj i opranoj lišću bora, lipe i zove sa mesta uzorkovanja UI i R2, što ukazuje da su topionica bakra i flotacijsko jalovište u Boru najveći emiteri As u ispitivanoj oblasti. To ukazuje još i da se emitovane zagađujuće supstance sa određenim sadržajem As transportuju putem vetra do mesta R2. Vrednosti Faktora obogaćenja za neoprano lišće zove su veće u odnosu na Faktore obogaćenja za lišće bora i lipe, u svim zonama. Ista pravilnost postoji i u slučaju opranog lišća, osim za uzorke iz urbano-industrijske zone, gde Faktor obogaćenja za iglice bora ima veću vrednost u odnosu na vrednosti za lišće zove i lipe. To ukazuje da je lišće (OL, NL) zove pogodnije za definisanje zagađenih oblasti arsenom.

Sa iglica bora su uklonjene manje količine As, nego sa lišća lipe i zove, što je u skladu dobijenim rezultatima koji ukazuju da se pranjem iglica bora nisu uklonile statistički značajne količine As (tabela 17). Zato je sadržaj As u neopranoj lišću bora i zove skoro isti, dok oprane iglice bora imaju veće koncentracije As u odnosu na oprano lišće zove (slika 32a,b). Smanjenje koncentracija As nakon pranja lišća lipe i zove je statistički značajno (tabela 17), a najveće vrednosti Δc su za lišće sa mesta uzorkovanja UI i R2. Nije moguće definisati da li lišće lipe ili zove ima veću sposobnost zadržavanja As iz vazduha na svojoj površini, iako je to u urbano-industrijskoj zoni uočeno za lišće zove. Najveće razlike u koncentracijama As u neopranoj i opranoj lišću, nezavisno od biljne vrste, sa mesta uzorkovanja UI i R2 utvrđene su i za Fe, Cu (samo za UI), Zn i Pb, što ukazuje na oblasti sa velikim udelom navedenih elemenata u atmosferskoj depoziciji. Kako se As taloži na površini lišća biljaka, postoji mogućnost njegovog usvajanja preko nadzemnih delova, posebno lišća. Razlike u koncentracijama As u neopranoj i opranoj lišću lipe i zove

ukazuju da ove dve biljne vrste imaju mogućnosti za utvrđivanje prisustva As u aerozagađenju tj. atmosferskoj depoziciji.

Arsen ne spada u esencijalne elemente za biljke, tako da koncentracije As i vrednosti Faktora obogaćenja za lišće (NL, OL) bora, lipa i zove, ukazuju da je celokupna ispitivana oblast veoma zagađena ovim metaloidom. Najugroženije su zone najbliže topionici i flotacijskom jalovištu u Boru, i one koje su na pravcima dominantnih vetrova. U tim blastima radi i živi najveći broj ljudi iz Borskog okruga, gde se nalaze vrtići, škole, fakultet, ali i oblasti u kojima se ljudi bave poljoprivredom. Ova kancerogena materija putem vazduha, hrane i/ili vode konstantno dospeva u ljudski organizam i tu se akumulira, što ima negativne efekte na ljudsko zdravlje. Kako su rezultati u ovom radu u skladu sa rezultatima klasičnih metoda ispitivanja kvaliteta vazduha, zaključuje se da se iglice bora, a posebno lišće lipa i zove može koristiti u biomonitoringu As u životnoj sredini.



Slika 32. Arsen u lišću bora, lipa i zove: a) koncentracije As u neopranom lišću; b) koncentracije As u opranom lišću. Stubići nedostaju za koncentracije koje su niže od donje granice određivanja (1 µg/g)

Tabela 17. Vrednosti Faktora obogaćenja (FO) za As u neopranom (NL) i opranom lišću (OL) bora, lipa i zove, i razlike u koncentracijama (Δc) u neopranom i opranom lišću

Mesto uzorkovanja	FO (NL)			FO (OL)			Δc (µg/g)		
	bor	lipa	zova	bor	lipa	zova	bor ^a	lipa ^b	zova ^b
UI	>41,60	>21,63	>41,94	>46,16	>14,98	>30,38	-4,56	6,65	11,56
SU	>3,22	>4,75	>8,25	>1,91	>3,65	>6,67	1,3	1,1	1,58
U	>1,80	>3,73	>4,72	>1,48	>2,35	>4,06	0,31	1,38	0,66
R1	>1,75	>4,41	>5,35	>1,32	>2,66	>3,68	0,43	1,75	1,66
T1	/	>2,00	>2,30	/	>1,69	>1,90	/	0,3	0,41
I1	>1,04	>1,02	>1,19	/	>1,02	/	1,04	0,00	1,19
R2	>9,13	>9,65	>18,27	>6,09	>6,25	>11,20	3,04	3,4	7,07
T2	>2,69	>4,06	>4,22	>2,87	>2,52	>2,90	-0,18	1,53	1,32
I2	>1,17	>1,21	>1,68	/	/	>1,22	1,17	1,21	0,46

^a Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je >0,05.

^b Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je <0,05.

Koncentracije As su veće od granične koncentracije toksičnosti od 20 $\mu\text{g/g}$ (Vamerali i sar., 2010), samo u opranom lišću bora i zove iz urbano-industrijske zone. Na dosta mesta uzorkovanja, sadržaj As je iznad 2 $\mu\text{g/g}$, pretežno u opranom lišću zove, što prema Kabata-Pendias i Pendias (2001) predstavlja najveću koncentraciju koje biljke mogu da tolerišu u tkivima. To ukazuje da bor, lipa i zova imaju sposobnost da u uslovima velikog zagađenja zemljišta i vazduha arsenom, poseduju neki od mehanizama tolerancije, a najbolji model takvog ponašanja predstavljaju biljke iz urbano-industrijske zone u Boru.

Neoprane iglice bora uzorkovane u blizini topionice bakra u Boru, imaju veći sadržaj As u odnosu na neoprane iglice bora iz industrijom zagađenih oblasti koje su navedene u prilogu 9.1. Isto se pokazalo i u slučaju opranih iglica bora, izuzev koncentracije od 48 $\mu\text{g/g}$ u opranim iglicama iz okoline jalovišta zatvorenog rudnika antimona u radu Jana i sar., (2012), koja je za nekoliko $\mu\text{g/g}$ veća u odnosu na sadržaj u opranim iglicama iz urbano-industrijske zone u Boru.

Prema dobijenim podacima, neoprano i oprano lišće lipe iz sredine u kojoj Borani svakodnevno žive i rade (UI i U) sadrži veće koncentracije As, u odnosu na koncentracije As u lišću lipe iz urbanih oblasti u Beogradu (Tomašević i sar., 2011; Šućur i sar., 2010; Tomašević i sar., 2004).

Sadržaj As u opranom lišću zove koja je rasla na zemljištu zagađenom arsenom (Madejón i Lepp, 2007), nekoliko puta je manji od sadržaja As u opranom lišću zove koja raste u uslovima zagađenog zemljišta i vazduha u Boru i okolini.

6.2.1.8. Kadmijum

Sadržaj Cd u uzorcima lišća sa većine mesta uzorkovanja je ispod donje granice određivanja, pa se ne može odrediti koja biljna vrsta usvaja veće koncentracije Cd u lišću (slika 33a,b). Vrednosti Faktora obogaćenja za Cd u neoprano i oprano lišću bora, lipe i zove, ukazuju da se njihovo lišće može koristiti za indikaciju povišenih koncentracija Cd u životnoj sredini. Ipak, ne može se utvrditi koja biljna vrsta je pogodnija za te namene (tabela 18).

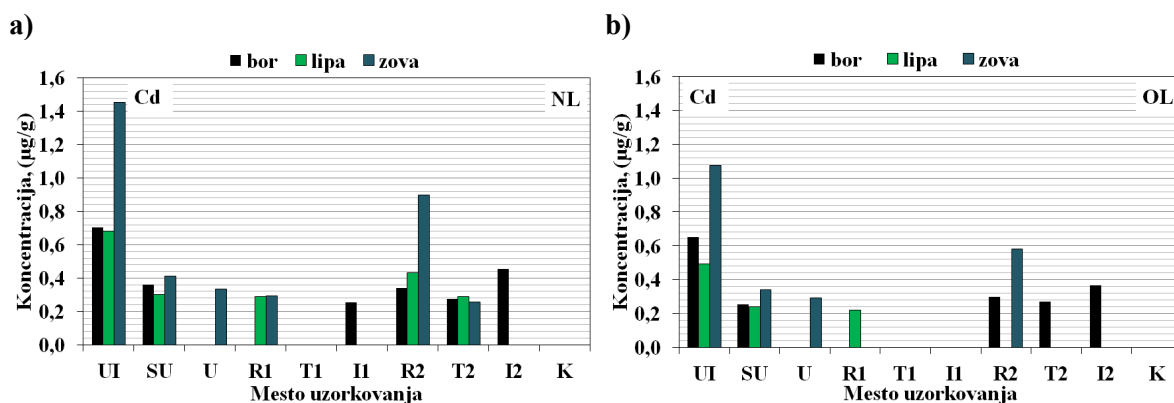
Neoprano i oprano lišće bora, lipe i zove iz urbano-industrijske zone, sadrži veće koncentracije Cd, u odnosu na sadržaj Cd u uzorcima sa ostalih mesta uzorkovanja. U toj zoni, lišće (NL, OL) zove ima veći sadržaj Cd u odnosu na lišće bora i lipe (slika 33a,b). Faktori obogaćenja koje je bilo moguće izračunati, takođe imaju najveće vrednosti za uzorke lišća iz urbano-industrijske zone, pri čemu su najveće vrednosti dobijene za lišće zove (tabela 18).

Statistički značajne koncentracije Cd sprane su samo sa lišća zove (tabela 18). Ipak, zbog mnogih koncentracija koje su ispod donje granice određivanja ne može sa sigurnošću reći u kojoj zoni ili za koju biljnu vrstu su vrednosti Δc najveće.

Koncentracije Cd u opranom lišću ispitivanih biljnih vrsta nisu veće od 1–3 $\mu\text{g/g}$ koje je Rademacher (2003) predložio kao prekomerne za lišće viših biljaka. Jedino oprano lišće zove iz urbano-industrijske zone ima sadržaj Cd malo veći od 1 $\mu\text{g/g}$.

Koncentracije Cd u lišću ispitivanih biljnih vrsta i vrednosti Faktora obogaćenja, ukazuju da zagađenje kadmijumom postoji u urbano-industrijskoj zoni koja je najbliža topionici bakra i u oblasti koja je na pravcu vetrova sa najvećim učestalostima (mesto R2). Lišće bora i lipa, a posebno zove, ima mogućnosti za utvrđivanje zagađenja kadmijumom pri većim koncentracijama ovog metala u životnoj sredini, kao što je to slučaj u urbano-industrijskoj zoni.

Koncentracije Cd u iglicama bora (NL, OL) iz kontrolne zone su u opsegu koncentracija Cd u iglicama bora iz nezagađenih područja u radovima [Odabasi i sar., \(2016\)](#), [Kandziora-Ciupa i sar., \(2016\)](#) i [Samecka-Cymerman i sar., \(2006\)](#). Neoprane iglice bora iz urbano-industrijske zone Bora imaju veći sadržaj Cd u odnosu na neoprane iglice bora iste starosti iz industrijskih oblasti u radovima [Samecka-Cymerman i sar., \(2006\)](#), [Odabasi i sar., \(2016\)](#) i [Sun i sar., \(2010\)](#). Oprane iglice bora iz okoline topionice Zn ([Kandziora-Ciupa i sar., 2016](#)) i jalovišta ([Pietrzykowski i sar., 2014](#)), imaju veći sadržaj Cd u odnosu na oprane iglice bora iz urbano-industrijske zone Bora.



Slika 33. Kadmijum u lišću bora, lipa i zove: a) koncentracije u neopranoj lišću; b) koncentracije u opranoj lišću. Stubići nedostaju za koncentracije koje su niže od donje granice određivanja (0,2 µg/g)

Tabela 18. Vrednosti Faktora obogaćenja (FO) za Cd u neopranoj i opranoj lišću bora, lipa i zove, i razlike u koncentracijama (Δc) Cd u neopranoj i opranoj lišću

Mesto uzorkovanja	FO (NL)			FO (OL)			Δc		
	bor	lipa	zova	bor	lipa	zova	bor ^a	lipa ^a	zova ^b
UI	>3,51	>3,40	>7,26	>3,27	>2,46	>5,38	0,05	0,19	0,38
SU	>1,80	>1,51	>2,07	>1,26	>1,20	>1,70	0,11	0,06	0,07
U	/	/	>1,67	/	/	>1,46	/	/	0,04
R1	/	/	>1,47	/	/	/	/	0,07	0,29
T1	/	/	/	/	/	/	/	/	/
II	>1,27	/	/	/	/	/	0,25	/	/
R2	>1,70	>2,17	>4,48	>1,50	/	>2,90	0,04	0,43	0,32
T2	>1,37	/	/	>1,36	/	/	0,00	0,29	0,26
I2	>2,26	/	/	>1,83	/	/	0,09	/	/

^a Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je >0,05.

^b Nivo statističke značajnosti razlike u koncentracijama u NL i OL je <0,05.

6.2.2. Elementi u lišću bora, lipa i zove sa najvećim vrednostima Faktora obogaćenja

Kako bi se uporedile vrednosti Faktora obogaćenja za ispitivane elemente u neopranoj i opranoj lišću bora, lipa i zove sa ispitivanog područja, brojne vrednosti Faktora obogaćenja date su u tabelama 19 i 20.

Tabela 19. Vrednosti Faktora obogaćenja za ispitivane elemente u neopranoj lišću bora, lipa i zove

Mesto uzorkovanja	Biljna vrsta	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
UI	bor	0,96	6,02	30,75	3,67	47,23	0,97	>41,60	>3,51
	lipa	2,71	6,42	33,33	6,78	32,84	2,81	>21,63	>3,40
	zova	1,86	6,56	75,01	5,39	72,90	1,27	>41,94	>7,26
SU	bor	0,62	1,81	8,34	2,45	11,55	1,54	>3,22	>1,80
	lipa	2,11	3,75	13,97	3,22	13,10	0,85	>4,75	>1,51
	zova	1,78	3,56	33,08	2,56	18,00	1,14	>8,25	>2,07
U	bor	0,22	1,03	4,00	1,83	4,58	0,4	>1,80	/
	lipa	2,06	3,12	10,58	3,05	6,78	1,07	>3,73	/
	zova	1,24	1,92	11,68	2,11	10,08	0,88	>4,72	>1,67
R1	bor	0,30	1,13	4,17	1,08	4,58	0,42	>1,75	/
	lipa	1,99	2,97	10,32	2,36	8,27	2,41	>4,41	/
	zova	1,04	1,54	10,50	1,26	9,50	1,53	>5,35	>1,47
T1	bor	0,19	0,53	2,45	1,99	2,17	3,02	/	/
	lipa	0,81	1,43	3,94	1,84	3,29	0,80	>2,00	/
	zova	1,01	1,43	6,20	1,27	5,16	1,14	>2,30	/
I1	bor	0,87	1,38	2,69	1,61	3,66	1,46	>1,04	>1,27
	lipa	5,06	3,86	3,72	1,48	2,61	1,04	>1,02	/
	zova	2,52	2,08	4,32	0,70	3,10	0,39	>1,19	/
R2	bor	0,49	4,88	12,82	2,11	17,26	1,21	>9,13	>1,70
	lipa	2,14	12,68	25,94	5,78	18,41	1,68	>9,65	>2,17
	zova	1,58	7,80	32,44	3,40	34,58	2,15	>18,27	>4,48
T2	bor	0,90	1,23	4,91	2,50	5,52	1,83	>2,69	>1,37
	lipa	2,65	3,55	9,52	3,24	8,37	2,07	>4,06	/
	zova	1,38	2,23	9,94	2,04	9,13	1,26	>4,22	/
I2	bor	1,93	0,98	2,05	3,17	1,86	0,61	>1,17	>2,26
	lipa	1,31	1,40	2,48	1,41	1,94	1,84	>1,21	/
	zova	1,10	1,27	3,85	0,82	3,14	0,97	>1,68	/

Vrednosti sa znakom < dobijene su deljenjem donje granice određivanja za određeni element u NL sa koncentracijom tog elementa u NL sa mesta K. Vrednosti sa znakom > dobijene su deljenjem koncentracije određenog elementa u NL sa određenog mesta uzorkovanja sa donjom granicom određivanja elementa u NL.

„/” koncentracije u NL uzorkovanom na određenom mestu i na mestu K su manje od donje granice određivanja.

Najveće vrednosti Faktora obogaćenja izračunate su za As, Cu i Pb u neopranom i opranom lišću bora, lipa i zove. Pb i As su neesencijalni elementi za biljke, tako da se njihovo obogaćenje u odnosu na nezagađenu oblast direktno povezuje sa antropogenim poreklom ovih elemenata. Velika obogaćenja u slučaju Cu ukazuju na prirodu rude koja se prerađuje u topionici bakra.

Tabela 20. Vrednosti Faktora obogaćenja za ispitivane elemente u opranom lišću bora, lipa i zove

Mesto uzorkovanja	Biljna vrsta	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
UI	bor	0,50	7,26	33,95	2,46	59,87	0,84	>46,16	>3,27
	lipa	1,67	3,96	17,37	4,03	25,93	1,82	>14,98	>2,46
	zova	1,08	3,38	29,89	3,14	46,58	0,40	>30,38	>5,38
SU	bor	0,28	1,53	6,99	1,62	6,94	1,18	>1,91	>1,26
	lipa	1,59	2,57	9,12	2,31	8,98	0,90	>3,65	>1,20
	zova	1,39	2,24	15,81	2,17	11,29	0,42	>6,67	>1,70
U	bor	0,12	1,18	4,22	1,45	4,85	0,25	>1,48	/
	lipa	1,31	2,04	5,70	2,01	5,60	0,60	>2,35	/
	zova	1,31	1,68	8,05	1,93	8,50	0,22	>4,06	>1,46
R1	bor	0,16	1,12	3,77	0,78	3,99	0,30	>1,32	/
	lipa	1,59	2,00	4,65	1,40	5,78	1,45	>2,66	/
	zova	1,28	1,34	5,60	1,07	6,78	0,56	>3,68	/
T1	bor	0,11	0,55	2,69	1,50	2,68	2,41	/	/
	lipa	0,94	1,29	3,33	1,48	3,69	0,72	>1,69	/
	zova	0,96	1,07	3,09	1,10	4,17	0,31	>1,90	/
I1	bor	0,55	2,42	2,71	0,59	3,28	0,88	/	/
	lipa	3,86	2,72	2,37	1,13	2,05	0,60	>1,02	/
	zova	1,93	1,38	2,53	0,57	2,13	0,20	/	/
R2	bor	0,32	5,59	14,05	1,55	14,11	0,93	>6,09	>1,50
	lipa	1,54	7,41	11,80	3,07	10,58	0,67	>6,25	/
	zova	1,31	5,71	20,40	2,65	23,91	0,78	>11,20	>2,90
T2	bor	0,54	1,81	5,22	1,89	7,21	1,50	>2,87	>1,36
	lipa	1,51	1,88	4,10	1,98	5,08	1,79	>2,52	/
	zova	1,15	1,51	5,14	1,85	5,93	0,47	>2,90	/
I2	bor	1,06	1,06	1,79	2,05	1,90	0,77	/	>1,83
	lipa	1,29	1,24	1,74	1,27	1,58	1,82	/	/
	zova	1,17	1,02	2,56	0,90	2,48	0,45	>1,22	/

Vrednosti sa znakom < dobijene su deljenjem donje granice određivanja za određeni element u OL sa koncentracijom tog elementa u OL sa mesta K. Vrednosti sa znakom > dobijene su deljenjem koncentracije određenog elementa u OL sa određenog mesta uzorkovanja sa donjom granicom određivanja elementa.

„/” koncentracije u OL uzorkovanom na određenom mestu i na mestu K su manje od donje granice određivanja.

6.2.3. Veza elemenata u neopranom i opranom lišću bora, lipe i zove

Prema dobijenim korelacionim matriksima zasnovanim na koncentracijama elemenata u neopranom (tabela 21) i opranom (tabela 22) lišću bora, lipe i zove, primećuje se da je najmanji broj statistički značajnih korelacija dobijen za iglice bora, dok je broj značajnih korelacija za lišće lipe i zove približan.

Tabela 21. Korelacioni matriks Spirmanovih koeficijenata korelacije zasnovan na koncentracijama elemenata u neopranom lišću bora, lipe i zove

	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
bor								
Al	1,000							
Fe	0,103	1,000						
Cu	-0,164	0,879**	1,000					
Zn	0,345	0,345	0,503	1,000				
Pb	-0,164	0,879**	1,000**	0,503	1,000			
Ni	-0,103	0,042	0,055	0,152	0,055	1,000		
As	0,000	0,738*	0,952**	0,500	0,952**	0,214	1,000	
Cd	0,486	0,314	0,371	0,829*	0,371	-0,657	0,600	1,000
lipa								
Al	1,000							
Fe	0,855**	1,000						
Cu	0,479	0,770**	1,000					
Zn	0,588	0,794**	0,927**	1,000				
Pb	0,552	0,794**	0,952**	0,976**	1,000			
Ni	0,418	0,273	0,358	0,455	0,430	1,000		
As	0,250	0,583	0,933**	0,900**	0,967**	0,450	1,000	
Cd	0,564	0,872	0,975**	0,821	0,975**	0,154	0,975**	1,000
zova								
Al	1,000							
Fe	0,806**	1,000						
Cu	0,552	0,830**	1,000					
Zn	0,345	0,758*	0,903**	1,000				
Pb	0,467	0,806**	0,976**	0,927**	1,000			
Ni	-0,042	0,467	0,515	0,588	0,600	1,000		
As	0,233	0,717*	0,950**	0,900**	0,983**	0,700*	1,000	
Cd	0,771	0,771	0,943**	0,943**	1,000**	0,257	0,943**	1,000

**Nivo značajnosti $p < 0,01$ (dvostrano). *Nivo značajnosti $p < 0,05$ (dvostrano). $5 \leq n < 10$ za sve korelacije As i Cd sa ostalim elementima. $n = 10$ za korelacije svih ostalih elemenata.

Tabela 22. Korelacioni matriks Spirmanovih koeficijenata korelacije zasnovan na koncentracijama elemenata u opranom lišću bora, lipa i zove

	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
bor								
Al	1,000							
Fe	0,115	1,000						
Cu	-0,309	0,818**	1,000					
Zn	0,188	0,212	0,455	1,000				
Pb	-0,273	0,830**	0,988**	0,467	1,000			
Ni	-0,030	-0,091	-0,030	0,152	-0,018	1,000		
As	0,771	1,000**	0,943**	0,829*	1,000**	0,429	1,000	
Cd	0,500	0,400	0,300	0,700	0,400	-0,800	1,000**	1,000
lipa								
Al	1,000							
Fe	0,758*	1,000						
Cu	0,491	0,806**	1,000					
Zn	0,285	0,697*	0,952**	1,000				
Pb	0,539	0,794**	0,988**	0,915**	1,000			
Ni	-0,067	-0,371	-0,079	0,000	-0,012	1,000		
As	0,238	0,548	0,929**	0,833*	0,976**	0,599	1,000	/
zova								
Al	1,000							
Fe	0,467	1,000						
Cu	0,212	0,891**	1,000					
Zn	-0,006	0,842**	0,927**	1,000				
Pb	0,212	0,891**	1,000**	0,927**	1,000			
Ni	-0,248	-0,152	-0,030	0,055	-0,030	1,000		
As	0,381	0,952**	1,000**	0,929**	1,000**	0,048	1,000	
Cd	-0,400	0,800	1,000**	1,000**	1,000**	0,400	1,000**	1,000

**Nivo značajnosti $p < 0,01$ (dvostrano). *Nivo značajnosti $p < 0,05$ (dvostrano). Korelacije za elemente gde je $n < 5$ nisu prikazane. $5 \leq n < 10$ za Cd sa ostalim elementima u opranom lišću bora i zove.

$5 \leq n < 10$ za sve korelacije As i Cd sa ostalim elementima u opranom lišću bora i zove. $n = 10$ za korelacije svih ostalih elemenata. „/”- $n < 5$.

Nikl u lišću (NL, OL) ispitivanih biljnih vrsta ne daje nijednu statistički značajnu korelaciju. To je u skladu sa tumačenjem koncentracija i vrednosti Faktora obogaćenja, na osnovu kojih je utvrđeno da Ni ne predstavlja rizik po životnu sredinu ispitivane oblasti. Aluminijum pokazuje statistički značajnu korelaciju sa Fe, što je posledica resuspenzije čestica zemljišta sa visokim sadržajem oba elementa. Statistički značajni Spirmanovi

koeficijenti korelacije za ostale elemente ukazuju na isto antropogeno poreklo, a to su procesi za pirometalurško dobijanje bakra.

6.2.4. Mogućnosti korišćenja grana bora, lipe i zove u biomonitoringu Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd

Koncentracije Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd u granama bora, lipe i zove, predstavljene su na slici 34 (a-h). Mesta uzorkovanja su poređana od najbližeg do najdaljeg od topionice bakra. Vrednosti Faktora obogaćenja izračunate na osnovu koncentracija ispitivanih elemenata u granama bora, lipe i zove, date su u tabeli 23.

Fitotoksične koncentracije Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, As i Cd u granama drveća još nisu definisane u naučnoj literaturi. Iz tog razloga je nemoguće zaključiti da li grane bora, lipe i zove sadrže prekomerne koncentracije ispitivanih elemenata.

6.2.4.1. Aluminijum

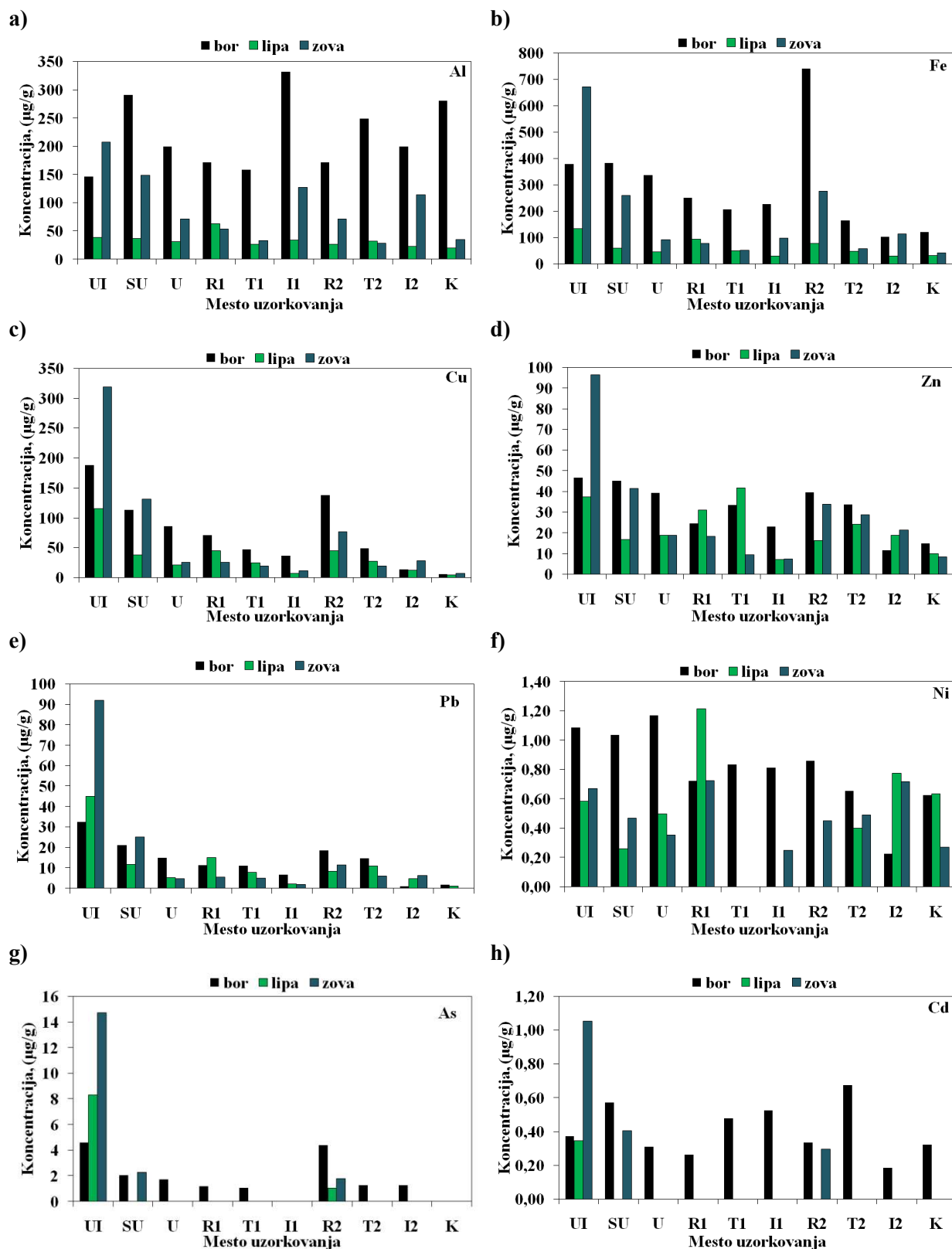
Grane bora imaju veći sadržaj Al u odnosu na grane lipe i zove u svim zonama, osim u urbano-industrijskoj zoni. Ista pravilnost se pokazala i u nezagađenoj oblasti (mesto uzorkovanja K), zbog čega se pretpostavlja da grane bora imaju veću sposobnost zadržavanja Al u odnosu na grane lipe i zove. Grane lipe sadrže najniže koncentracije Al na svim mestima uzorkovanja, osim na mestima uzorkovanja R1 i T2, gde je sadržaj Al u granama lipe i zove približan (slika 34a).

Grane bora ne ukazuju na obogaćenje aluminijumom ni u jednoj ispitivanoj oblasti (tabela 23). Faktor obogaćenja za grane lipe je >2 samo na mestu uzorkovanja R1. Prema vrednostima Faktora obogaćenja, grane zove su u odnosu na grane bora i lipe pogodnije za definisanje oblasti sa povećanim koncentracijama Al. Grane zove u odnosu na lišće zove ukazuju na veći broj mesta uzorkovanja koja su obogaćena aluminijumom, a uzrok tome je hrapavija površina grana u odnosu na lišće, što povećava kapacitet zadržavanja čestica na površini.

Koncentracije Al i vrednosti Faktora obogaćenja ukazuju da se na osnovu sadržaja Al u granama zove može napraviti razlika između oblasti sa niskim i visokim sadržajem Al. Ipak se ne može sa sigurnošću tvrditi da li je obogaćenje aluminijumom u granama zove prirodnog (resuspendovane čestice zemljišta) ili antropogenog porekla, zato što je udeo Al u zemljištu prirodno visok.

6.2.4.2. Gvožđe

Grane bora sadrže veće koncentracije Fe u odnosu na grane lipe i zove, pretežno na svim mestima uzorkovanja, osim na mestima UI i I2 (slika 34b). To ukazuje da grane bora imaju prirodno veći sadržaj Fe, u odnosu na grane lipe i zove.



Slika 34. Koncentracije a) Al, b) Fe, c) Cu, d) Zn, e) Pb, f) Ni, g) As i h) Cd u granama bora, lipa i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja

Grane lipa imaju niže koncentracije Fe, u odnosu na grane bora i zove, osim na mestu R1. Najmanje razlike u koncentracijama između mesta uzorkovanja zapažaju se za grane lipa.

Smanjenje koncentracija Fe sa udaljenošću od topionice, uz par izuzetaka, primećeno je za grane bora i zove, što ispunjava jedan od kriterijuma za definisanje biljaka biomonitora zagađenja vazduha gvožđem.

Kako uzorci grana nisu oprani pre analiza, a grane su nadzemni delovi biljaka, pretpostavlja se da na sadržaj Fe u granama ima uticaja i udeo Fe u atmosferskoj depoziciji.

Ne može se odrediti koja biljna vrsta je najpogodnija da preko grana indikuje obogaćenje gvožđem, što se pokazalo i u slučaju lišća, iako vrednosti Faktora obogaćenja ukazuju na moguće povećane koncentracije gvožđa u ispitivanoj oblasti u odnosu na kontrolnu zonu (tabela 23). Najveće vrednosti Faktora obogaćenja izračunate su za grane bora, lipe i zove, sa mesta UI i R2, što je uočeno i za lišće. Jedino u turističkoj zoni, grane ni jedne od ispitivanih biljnih vrsta ne ukazuju na obogaćenje gvožđem.

Rezultati daju vezu emisije iz topionice bakra i flotacijskog jalovišta koji se nalaze u okviru urbano-industrijske zone, i koncentracija Fe u granama ispitivanih biljnih vrsta. Na to ukazuju i rezultati dobijeni za Fe u lišću.

6.2.4.3. Bakar

Prirodni sadržaj Cu u granama bora, lipe i zove u uslovima nezagađene životne sredine je gotovo isti, što je utvrđeno na osnovu koncentracija Cu u granama iz kontrolne zone. Grane bora i zove, sa dva mesta uzorkovanja najbliža topionici bakra (UI i SU), kao i sa mesta na dominantnom pravcu vetra, imaju veće koncentracije Cu u odnosu na grane lipe (slika 34c).

Sadržaj Cu u granama bora i zove opada sa udaljenošću od topionice bakra, što ukazuje na mogućnost grana ove dve biljne vrste da ukažu na zagađenje vazduha gvožđem. Ovakav trend je manje izražen u slučaju grana lipe. Koncentracije Cu u granama bora, lipe i zove sa mesta uzorkovanja R2 su veće nego u nekim mestima bližim topionici, što se pokazalo i u slučaju lišća ispitivanih biljaka.

Vrednosti Faktora obogaćenja za grane (kao i za lišće) sve tri ispitivanje biljne vrste, su >2 na svim mestima uzorkovanja, osim na mestu I1 u slučaju grana lipe i zove (tabela 23). Najveće vrednosti su za uzorke iz urbano-industrijske zone, što ukazuje na dominantan uticaj pirometalurške proizvodnje bakra na sadržaj Cu u granama bora, lipe i zove. Ovi zaključci su u skladu sa zaključcima donešenim na osnovu vrednosti Faktora obogaćenja za lišće. Veće vrednosti Faktora obogaćenja, su za grane bora, u odnosu na grane lipe i zove, na svim mestima, osim u urbano-industrijskoj zoni i na mestu uzorkovanja I2. Na sadržaj Cu u neopranih uzorcima grana utiče i udeo Cu u atmosferskoj depoziciji, pa se zaključuje da su grane ispitivanih biljaka a posebno bora, pogodne za ispitivanja zagađenja životne sredine, a posebno vazduha bakrom.

Grane bora iz nezagađene oblasti u radu (Odabasi i sar., 2016) i grane bora u kontrolnoj zoni imaju približne koncentracije Cu. U granama bora iz oblasti zagađene emisijom iz fabrike gvožđa i čelika detektovano je $4,3 \mu\text{g/g}$ Cu (Odabasi i sar., 2016), što je daleko niža koncentracija u odnosu na sadržaj Cu koji imaju grane bora u ispitivanoj oblasti Bora i okoline.

Tabela 23. Vrednosti Faktora obogaćenja izračunate na osnovu koncentracija ispitivanih elemenata u granama bora, lipe i zove

Mesto uzorkovanja	Biljna vrsta	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
UI	bor	0,52	3,13	35,83	3,16	18,11	1,73	>4,62	1,15
	lipa	1,93	4,20	27,09	3,77	42,50	0,92	>8,29	>0,35
	zova	6,07	15,67	47,31	11,47	>92,00	2,49	>14,73	>1,05
SU	bor	1,04	3,15	21,52	3,06	11,79	1,66	>2,06	1,78
	lipa	1,83	1,87	8,88	1,68	11,06	0,41	/	/
	zova	4,34	6,06	19,47	4,93	>25,00	1,74	>2,27	>0,40
U	bor	0,71	2,78	16,30	2,66	8,27	1,87	>1,71	0,96
	lipa	1,57	1,46	4,86	1,90	4,78	0,79	/	/
	zova	2,09	2,15	3,79	2,24	>4,60	1,31	/	/
R1	bor	0,61	2,07	13,48	1,66	6,28	1,16	>1,19	0,82
	lipa	3,18	2,98	10,47	3,12	14,13	1,91	/	/
	zova	1,57	1,82	3,77	2,16	>5,40	2,68	/	/
T1	bor	0,57	1,71	8,85	2,27	6,16	1,34	>1,09	1,49
	lipa	1,32	1,56	5,85	4,22	7,31	<0,32	/	/
	zova	0,96	1,21	2,94	1,10	>4,90	<0,74	/	/
I1	bor	1,19	1,86	6,88	1,56	3,79	1,30	/	1,63
	lipa	1,68	0,95	1,65	0,71	1,86	<0,32	/	/
	zova	3,72	2,29	1,74	0,86	>1,82	0,92	/	/
R2	bor	0,61	6,11	26,29	2,69	10,26	1,38	>4,40	1,04
	lipa	1,33	2,48	10,47	1,65	7,73	<0,32	>1,01	/
	zova	2,08	6,44	11,33	4,03	>11,26	1,67	>1,78	>0,30
T2	bor	0,89	1,35	9,21	2,29	8,09	1,05	>1,29	2,09
	lipa	1,62	1,52	6,41	2,44	10,16	0,63	/	/
	zova	0,82	1,35	2,93	3,41	>5,82	1,81	/	/
I2	bor	0,71	0,84	2,61	0,79	0,56	0,36	>1,27	0,57
	lipa	1,13	0,93	2,94	1,90	4,30	1,22	/	/
	zova	3,33	2,66	4,23	2,53	>6,23	2,66	/	/

Vrednosti sa znakom < dobijene su deljenjem donje granice određivanja za određeni element u granama sa koncentracijom tog elementa u granama sa mesta K.

Vrednosti sa znakom > dobijene su deljenjem koncentracije određenog elementa u granama sa određenog mesta uzorkovanja sa donjom granicom određivanja elementa.

„/” koncentracije u granama uzorkovanim na određenom mestu i na mestu K su manje od donje granice određivanja.

6.2.4.4. Cink

Smanjenje koncentracija Zn u granama sa udaljenjem mesta uzorkovanja od topionice bakra, nije uočeno ni za jednu biljnu vrstu (slika 34d). Međutim, vrednosti Faktora obogaćenja za Zn u granama barem dve ispitivane biljne vrste, ukazuju da na skoro svim mestima uzorkovanja postoji obogaćenje cinkom (tabela 23). Obogaćenje grana cinkom se ne uočava ni za jednu biljnu vrstu, jedino na mestu uzorkovanja I1. Na osnovu vrednosti Faktora

obogaćenja za Zn, grane bora, lipe i zove ukazuju na postojanje povećanih sadržaja ovog elementa u životnoj sredini. Ipak, njihovim granama se ne mogu razlikovati mesta uzorkovanja sa većim ili manjim nivoima zagađenja. Jedan od razloga je možda mala senzitivnost ispitivanih biljnih vrsta prema postojećim sadržajima cinka u vazduhu, ili dominantan uticaj usvajanja Zn iz zemljišta. Rezultati ukazuju da grane ispitivanih biljnih vrsta nisu adekvatne za definisanje nivoa zagađenja vazduha cinkom, ali se mogu koristiti za praćenje povećanih koncentracija Zn u celokupnoj životnoj sredini.

Odabasi i sar., (2016) su u granama bora iz nezagađene oblasti odredili 8,5 µg/g Zn, što je manje od sadržaja Zn u granama bora iz kontrolne oblasti. Sadržaj Zn u granama bora uzorkovanim u blizini fabrike gvožđa i čelika (Odabasi i sar., 2016) neznatno je niži od koncentracije Zn u granama bora iz urbano-industrijske zone u boru.

6.2.4.5. Olovo

Grane bora, lipe i zove u uslovima nezagađene životne sredine (K zona) sadrže skoro iste koncentracije Pb, što se pokazalo i u slučaju lišća. Najveće koncentracije Pb u granama ispitivanih biljnih vrsta su u uzorcima iz urbano-industrijske zone, što je verovatno posledica uticaja više antropogenih izvora zagađenja, kao i povećanog sadržaja Pb u zemljištu (slika 34e). Vrednosti Faktora obogaćenja su >2 na svim mestima uzorkovanja za sve tri biljne vrste, osim na mestima uzorkovanja I1 (za lipu i zovu) i I2 (za bor) (tabela 23), isto kao i u slučaju lišća. Grane bora, lipe i zove se mogu koristiti za utvrđivanje zagađenja životne sredine olovom, mada se ne može definisati koja biljna vrsta je pogodnija. Isto kao i za Fe i Cu, pretpostavlja se da na sadržaj Pb u neopranim granama ispitivanih biljaka veliki uticaj ima i udeo Pb u atmosferskoj depoziciji.

Koncentracije Pb u granama bora iz kontrolne zone u okolini Bora su neznatno veće nego koncentracije Pb u granama bora iz nezagađene oblasti u radu Odabasi i sar., (2016). Grane bora iz urbano-industrijske zone u Boru sadrže znatno veće koncentracije Pb u odnosu na grane uzorkovane u okolini fabrike gvožđa i čelika (Odabasi i sar., 2016).

6.2.4.6. Nikl

Grane bora u odnosu na grane lipe i zove imaju veće koncentracije Ni na skoro svim mestima uzorkovanja, osim na mestima R1 i I2, dok su u kontrolnoj zoni koncentracije Ni u granama bora i lipe približne. Nije uočeno opadanje koncentracija Ni u granama bora, lipe i zove, sa udaljenošću od topionice bakra (slika 34f). Vrednosti Faktora obogaćenja za Ni su >2 na mestima uzorkovanja UI, R1 i I2 i to samo za grane zove (tabela 23). Prema tome, ne može se utvrditi mogućnost korišćenja grana ispitivanih biljnih vrsta u biomonitoringu zagađenja niklom, što se pokazalo i u slučaju lišća ispitivanih biljaka.

6.2.4.7. Arsen

Najveće koncentracije As u granama bora, lipe i zove, imaju uzorci sa mesta UI i R2, što se pokazalo i u slučaju lišća ispitivanih biljnih vrsta (slika 34g). Najveće vrednosti Faktora obogaćenja koje su ujedno i >2 (koje je bilo moguće izračunati) dobijene su za uzorke grana sve tri ispitivane biljne vrste iz urbano-industrijske zone (tabela 23).

Rezultati ukazuju da u uslovima ekstremnog zagađenja zemljišta (slika 23a) i vazduha (slika 13) arsenom u urbano-industrijskoj zoni, grane bora, lipe i zove ukazuju na zagađenje životne sredine arsenom.

Sadržaj As ($4,62 \mu\text{g/g}$) u granama bora iz urbano-industrijske zone Bora je veći u odnosu na sadržaj As ($0,103 \mu\text{g/g}$) u granama bora iz okoline fabrike gvožđa i čelika (Odabasi i sar., 2016).

6.2.4.8. Kadmijum

Grane lipe i zove iz urbano-industrijske zone, sadrže veće koncentracije Cd u odnosu na grane lipe i zove sa ostalih mesta uzorkovanja, što se pokazalo i za lišće ispitivanih biljnih vrsta (slika 34h). To ne važi i za grane bora. Ipak, grane bora imaju veći sadržaj Cd u odnosu na grane lipe i zove, na svim mestima uzorkovanja (uključujući i K zonu) osim u urbano-industrijskoj zoni, na osnovu čega se može pretpostaviti da bor ima veću sposobnost usvajanja Cd u granama. Kako većina vrednosti Faktora obogaćenja nije mogla da se izračuna (tabela 23), ne može se sa sigurnošću tvrditi o mogućnosti grana ispitivanih biljaka da ukažu na obogaćenje kadmijumom u ispitivanoj oblasti.

Koncentracije Cd u granama bora iz urbano-industrijske zone u Boru, i granama bora iz blizine fabrike gvožđa i čelika (Odabasi i sar., 2016) su približne. Isto važi i za koncentracije Cd u granama iz nezagađenih oblasti.

6.2.5. Elementi u granama bora, lipe i zove sa najvećim vrednostima Faktora obogaćenja

Vrednosti Faktora obogaćenja za Cu i Pb u granama bora, lipe i zove, su veće u odnosu na vrednosti Faktora obogaćenja za ostale ispitivane elemente u granama iz svih zona, osim na mestima uzorkovanja I1, T2 i I2 (tabela 23). Najveće vrednosti Faktora obogaćenja za grane bora iz svih ispitivanih zona izračunate su za Cu, dok se grane lipe i zove ističu po najvećim Faktorima obogaćenja za Pb, na većini mesta uzorkovanja. Ove pravilnosti su veoma važne, za ocenu mogućnosti korišćenja grana ispitivanih biljnih vrsta, u biomonitoringu zagađujućih supstanci u životnoj sredini.

6.2.6. Veza elemenata u granama bora, lipe i zove

Veza koncentracija ispitivanih elemenata u granama bora, lipe i zove ispitivana je preko Spirmanovih koeficijenata korelacije, datih u tabeli 24. Svi statistički značajni Spirmanovi koeficijenti korelacije elemenata u granama bora, lipe i zove imaju pozitivan predznak, što ukazuje na njihovo zajedničko poreklo, tj. da sa porastom koncentracije jednog metala, raste i koncentracija drugog, kao i da se usvajaju sličnim mehanizmima.

Veći broj statistički značajnih korelacija uočen je za elemente u granama bora, u odnosu na grane lipe i zove. Značajni koeficijenti korelacije dobijeni su uglavnom za elemente za koje je utvrđeno da potiču iz istog izvora zagađenja-topionice bakra, i za koje su vrednosti Faktora obogaćenja najveće.

Tabela 24. Korelacioni matris Spirmanovih koeficijenata korelacije, zasnovan na koncentracijama elemenata u granama bora, lipe i zove

	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
bor								
Al	1,000							
Fe	-0,285	1,000						
Cu	-0,503	0,903**	1,000					
Zn	-0,394	0,842**	0,939**	1,000				
Pb	-0,370	0,867**	0,964**	0,988**	1,000			
Ni	-0,358	0,830**	0,806**	0,842**	0,818**	1,000		
As	-0,095	0,738*	0,881**	0,881**	0,905**	0,619	1,000	
Cd	0,297	0,200	0,188	0,430	0,370	0,212	0,190	1,000
lipa								
Al	1,000							
Fe	0,636*	1,000						
Cu	0,624	0,927**	1,000					
Zn	0,285	0,527	0,503	1,000				
Pb	0,770**	0,891**	0,927**	0,624	1,000			
Ni	0,000	-0,143	-0,107	0,179	-0,107	1,000		
zova								
Al	1,000							
Fe	0,818**	1,000						
Cu	0,648*	0,855**	1,000					
Zn	0,406	0,721*	0,867**	1,000				
Pb	0,400	0,700*	0,850**	0,933**	1,000			
Ni	0,042	0,209	0,469b	0,452	0,407	1,000		

**Nivo značajnosti $p < 0,01$ (dvostrano). *Nivo značajnosti $p < 0,05$ (dvostrano). Korelacije za elemente gde je $n < 5$ nisu prikazane. $n=8$ za korelacije As sa ostalim elementima u granama bora. $n=7$ za korelacije Ni sa ostalim elementima u granama lipe. $n=9$ za korelacije Pb i Ni sa ostalim elementima u granama zove. $n=10$ za korelacije svih ostalih elemenata.

6.2.7. Mogućnosti korišćenja korenja bora, lipe i zove u biomonitoringu Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd

Koncentracije Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd u korenju bora, lipe i zove, predstavljene su na slici 35 (a-h). Mesta uzorkovanja na slikama su poređana od najbližeg do najudaljenijeg od topionice bakra. Vrednosti Faktora obogaćenja izračunate na osnovu koncentracija ispitivanih elemenata u korenju bora, lipe i zove, date su u tabeli 25.

Normalne i fitotoksične koncentracije Al, Fe, Cu, Zn, Ni, Pb, As i Cd u korenju drveća koje raste u prirodnom i nezagađenom okruženju, nisu strogo definisane u naučnoj literaturi. Iz tog razloga je nemoguće zaključiti da li korenje bora, lipe i zove sadrži prekomerne koncentracije ispitivanih elemenata.

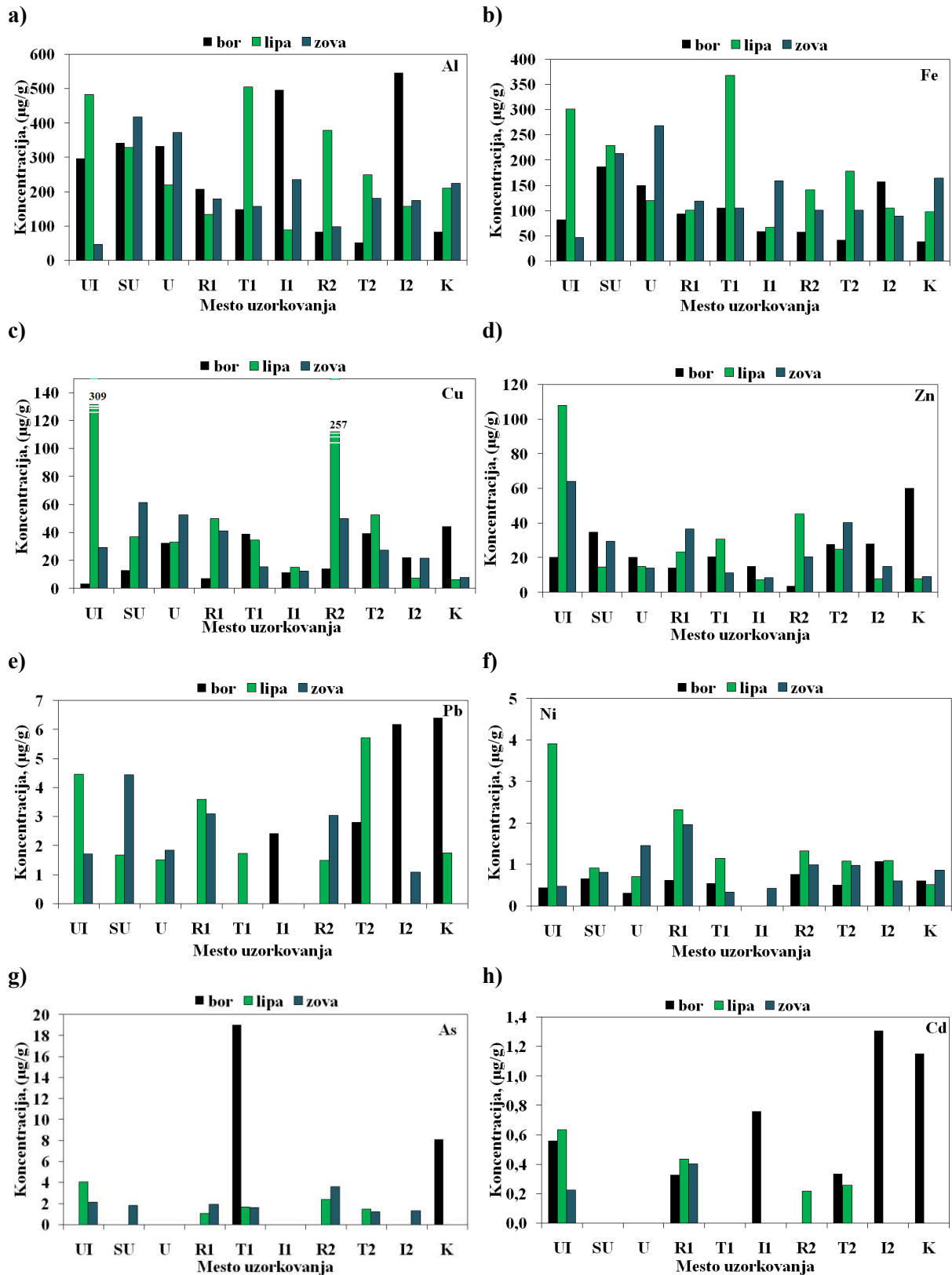
6.2.7.1. Aluminijum

Rezultati predstavljeni na slici 35a), ne ukazuju koja od ispitivanih biljnih vrsta ima prirodno veći sadržaj Al u korenju. Obogaćenje aluminijumom na većem broju mesta uzorkovanja pokazalo se za korenje bora, u odnosu na korenje lipe i zove, a najveće vrednosti Faktora obogaćenja su za uzorke iz industrijske zone (I1 i I2) (tabela 25). Vrednosti Faktora obogaćenja za Al u korenju lipe su >2 u urbano-industrijskoj zoni i na mestu uzorkovanja T1, dok korenje zove ni sa jednog mesta uzorkovanja ne ukazuje na obogaćenje aluminijumom. Kako vrednosti Faktora obogaćenja za Al u zemljištu bora ne ukazuju na obogaćenje aluminijumom, pretpostavlja se da obogaćenje u korenju bora ne ukazuje na kontaminaciju aluminijumom u ispitivanoj oblasti, već na specifično ponašanje bora da u različitim uslovima sredine usvaja različite koncentracije Al iz zemljišta putem korenja.

6.2.7.2. Gvožđe

Ne može se sa sigurnošću tvrditi koja od ispitivanih biljnih vrsta ima prirodno veći sadržaj Fe u korenju (slika 35b), kao i u slučaju Al. Takođe se ne ističe mesto uzorkovanja sa najvećim koncentracijama Fe u korenju ispitivanih biljnih vrsta. Vrednosti Faktora obogaćenja za Fe u korenju bora su >2 na skoro svim mestima uzorkovanja, dok korenje zove ne ukazuje na obogaćenje gvožđem ni u jednoj zoni. Kako vrednosti Faktora obogaćenja za Fe u zemljištu bora nisu >2 ni na jednom mestu uzorkovanja, isto kao i u slučaju Al, pretpostavlja se da obogaćenje u korenju bora ukazuje na specifično ponašanje bora da u različitim uslovima sredine usvaja i akumulira različite koncentracije Fe iz zemljišta putem korenja. Korenje lipe ukazuje na obogaćenje gvožđem na mestima uzorkovanja UI, SU i T1, gde je putem rizosfernog zemljišta lipe utvrđeno i obogaćenje zemljišta gvožđem.

Koncentracija Fe od oko 650 $\mu\text{g/g}$ koju su [Helmisaari i sar., \(1999\)](#) detektovali u korenju bora uzorkovanom u blizini Cu-Ni topionice, veća je od koncentracija Fe u korenju bora iz Bora i okoline.



Slika 35. Koncentracije a) Al, b) Fe, c) Cu, d) Zn, e) Pb, f) Ni, g) As, h) Cd u korenju bora, lipa i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja

Tabela 25. Vrednosti Faktora obogaćenja za ispitivane elemente u korenju bora, lipa i zove

Mesto uzorkovanja	Biljna vrsta	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
UI	bor	3,57	2,12	0,08	0,34	<0,16	0,72	<0,12	0,49
	lipa	2,3	3,09	50,74	14,05	2,56	7,53	>4,07	>0,64
	zova	0,21	0,28	3,72	7,12	>1,71	0,56	>2,12	>0,22
SU	bor	4,13	4,85	0,29	0,58	<0,16	1,08	<0,12	0,87
	lipa	1,56	2,36	6,07	1,88	0,96	1,76	/	/
	zova	1,86	1,3	7,79	3,28	>4,44	0,95	>1,82	
U	bor	4,01	3,89	0,73	0,34	<0,16	0,51	<0,12	0,87
	lipa	1,04	1,24	5,43	1,93	0,87	1,36	/	/
	zova	1,65	1,64	6,65	1,54	>1,85	1,7	/	/
R1	bor	2,5	2,42	0,17	0,23	<0,16	1,03	<0,12	0,28
	lipa	0,64	1,04	8,18	3,03	2,06	4,48	>1,09	>0,43
	zova	0,8	0,72	5,21	4,04	>3,10	2,29	>1,93	>0,40
T1	bor	1,78	2,74	0,88	0,34	<0,16	0,89	2,34	0,87
	lipa	2,41	3,78	5,66	3,97	1,00	2,22	>1,65	/
	zova	0,7	0,64	1,98	1,24	/	0,38	>1,61	/
I1	bor	5,99	1,5	0,26	0,25	0,38	<0,33	<0,12	0,66
	lipa	0,42	0,69	2,50	0,93	<0,57	<0,39	/	/
	zova	1,04	0,97	1,57	0,93	/	0,5	/	/
R2	bor	0,99	1,49	0,32	0,06	<0,16	1,25	<0,12	0,87
	lipa	1,8	1,45	42,18	5,86	0,86	2,56	>2,40	>0,22
	zova	0,44	0,61	6,31	2,28	>3,05	1,16	>3,61	
T2	bor	0,61	1,07	0,89	0,46	0,44	0,83	<0,12	0,29
	lipa	1,19	1,83	8,64	3,21	3,28	2,09	>1,46	>0,26
	zova	0,8	0,61	3,46	4,47	/	1,15	>1,23	
I2	bor	6,59	4,09	0,5	0,47	0,96	1,76	<0,12	1,13
	lipa	0,75	1,08	1,19	0,99	<0,57	2,12	/	/
	zova	0,78	0,54	2,72	1,66	>1,08	0,7	>1,32	/

Vrednosti sa znakom < dobijene su deljenjem donje granice određivanja za određeni element sa koncentracijom tog elementa u korenju sa mesta K. Vrednosti sa znakom > dobijene su deljenjem koncentracije određenog elementa u korenju sa određenog mesta uzorkovanja sa donjom granicom određivanja elementa.

„/” koncentracije u korenju uzorkovanom na određenom mestu i na mestu K bile su manje od donje granice određivanja.

6.2.7.3. Bakar

Najveće koncentracije Cu u **zemljištu** bora, lipa i zove, određene su u uzorcima iz urbano-industrijske zone, i prate redosled bor<lipa<zova (slika 19a). Kako biljke preko korenja usvajaju neophodne nutrijente iz zemljišta, očekivalo se da koncentracije Cu i u **korenju** ispitivanih biljnih vrsta budu veće u urbano-industrijskoj zoni, u odnosu na sadržaj Cu u korenju iz ostalih ispitivanih oblasti. Ipak, ovakva pretpostavka se nije pokazala tačnom. Jedino korenje lipa ima najveći sadržaj u urbano-industrijskoj zoni, dok ovakva pravilnost

nije uočena za korenje bora i zove (slika 35c). To ukazuje na različite mehanizme adaptacije, tolerancije i usvajanja Cu u uslovima ekstremnog zagađenja zemljišta ovim elementom.

Vrednosti Faktora obogaćenja, ukazuju da koncentracije Cu u korenju bora nisu povećane ni na jednom mestu uzorkovanja u odnosu na sadržaje u kontrolnoj zoni (tabela 25). Zato korenje bora nije pogodno za utvrđivanje zagađenja zemljišta bakrom, jer su vrednosti Faktora obogaćenja za Cu u zemljištu bora >2 na svim mestima uzorkovanja. Vrednosti Faktora obogaćenja za Cu u korenju lipe i zove su značajno ≥ 2 za uzorke sa skoro svih mesta, osim u slučaju industrijske zone. Takođe, i Faktor obogaćenja za Cu u zemljištu lipe i zove je >2 na svim mestima uzorkovanja. Zato se sa sigurnošću može reći da koren lipe i zove ima mogućnosti za korišćenje u utvrđivanju zagađenja zemljišta bakrom. Najveće vrednosti Faktora obogaćenja su izračunate za korenje lipe u urbano-industrijskoj i u ruralnoj zoni (R2), isto kao i u slučaju lišća i grana ispitivanih biljnih vrsta.

Koncentracije Cu u korenju bora, lipe i zove ne opadaju sa udaljenjem od dominantnog izvora zagađenja, čak ni na mestima uzorkovanja na istim pravcima dominantnih vetrova. To ukazuje da Cu iz atmosferske depozicije nema direktnog uticaja na sadržaj Cu u korenju ove dve biljne vrste, ili da je ovaj efekat neznatan u odnosu na efekat prirodno visokih koncentracija Cu u zemljištu koji ne zavisi od blizine topionice bakra.

Normalne koncentracije Cu u korenju biljaka koje rastu u prirodnom okruženju nisu definisane u naučnoj literaturi. Vrednosti na koje se pozivaju istraživači najčešće se odnose na koncentracije koje važe za suhu masu biljke, pri čemu nije naglašeno za koji organ određena vrednost važi. Fuentes i sar., (2007) su tokom eksperimentalnog istraživanja našli da je kritična koncentracija Cu za korenje sadnica bora $165 \mu\text{g/g}$. Ova vrednost nije premašena ni u jednom uzorku korenja odraslih jedinki bora sa ispitivanog područja.

Koncentracija Cu od $593 \mu\text{g/g}$ koju su Helmisaari i sar., (1999) odredili u korenju bora uzorkovanom u blizini Cu-Ni topionice, dosta je veća od koncentracija Cu u korenju bora iz Bora i okoline.

6.2.7.4. Cink

Rezultati na slici 35d) ne ukazuju koja od ispitivanih biljnih vrsta na svim mestima uzorkovanja ima prirodno veći sadržaj Zn u korenju. Najveće koncentracije Zn u korenju lipe i zove (zova<lipe) određene su u uzorcima iz urbano-industrijske zone, dok je najveća koncentracija Zn u korenju bora određena u uzorcima iz kontrolne zone.

Nijedna vrednost Faktora obogaćenja za korenje bora nije >2 , slično kao i u slučaju zemljišta bora (izuzev na mestu R2) (tabela 25). Vrednosti Faktora obogaćenja za korenje lipe i zove, na par mesta uzorkovanja ukazuju na obogaćenje cinkom. Značajno je istaći da su vrednosti Faktora obogaćenja za korenje lipe i zove >2 na mestima uzorkovanja UI i R2, gde je i zemljište ovih biljaka obogaćeno cinkom, i u čijem zemljištu su uočene i jedne od najvećih koncentracija Zn u odnosu na ostala mesta uzorkovanja. Ovi rezultati ukazuju da korenje lipe i zove ima mogućnosti za korišćenje u utvrđivanju zagađenja zemljišta cinkom, ali samo pri dovoljnom visokom sadržaju ovog elementa u zemljištu.

Koncentracija Zn u korenju bora iz urbano-industrijske zone je niža od koncentracije Zn u korenju bora uzorkovanom u blizini Cu-Ni topionice (Helmisaari i sar., 1999).

6.2.7.5. Olovo

Na osnovu koncentracija na slici 35e) ne može zaključiti koja od tri ispitivane biljne vrste na svim mestima uzorkovanja može usvojiti veće količine Pb u korenju. Koncentracije Pb u korenju ispitivanih biljnih vrsta nisu najveće na mestima gde su najveće i koncentracije Pb u zemljištu. To ukazuje da se korenje bora, lipe i zove ne može koristiti za praćenje zagađenja zemljišta olovom.

U urbano-industrijskoj, suburbanoj, ruralnoj (R1, R2) i turističkoj (T2) zoni, utvrđeno je obogaćenje olovom u korenju lipe i/ili zove (tabela 25). Moguće je da bi i vrednosti Faktora obogaćenja koje nisu prešle 2 a ispred kojih stoji znak > bile iznad ove vrednosti kada bi koncentracije Pb u uzorcima korenja iz kontrolne zone bile iznad donje granice određivanja. Zato se ne može sa sigurnošću govoriti o biljnoj vrsti koja ima najbolji potencijal da putem svog korenja ukaže na zagađeno u odnosu na nezagađeno zemljište.

Koncentracija Pb u korenju bora iz urbano-industrijske zone je niža od koncentracije Pb u korenju bora uzorkovanom u blizini Cu-Ni topionice (Helmisaari i sar., 1999).

6.2.7.6. Nikl

Koncentracija Ni u korenju lipe iz urbano-industrijske zone je veća u odnosu na koncentracije Ni u korenju lipe sa ostalih mesta uzorkovanja (Slika 35f). Sadržaj Ni u korenju lipe je na 6 od 10 mesta uzorkovanja veći od koncentracija Ni u korenju bora i zove. Slična pravilnost uočena i je u slučaju zemljišta lipe.

Vrednosti Faktora obogaćenja su >2 za Ni u korenju lipe sa 6 mesta uzorkovanja, u korenju zove sa jednog mesta uzorkovanja, dok korenje bora ne ukazuje na obogaćenje niklom (tabela 25). Kako je GV za Ni prekoračena samo u zemljištu zove (UI, R2) i bora (K), vrednosti Faktora obogaćenja >2 za Ni u korenju lipe verovatno ukazuju na specifične mehanizme interakcije korenja lipe sa Ni u zemljištu.

Koncentracija Ni u korenju bora iz UI zone je niža od koncentracije Ni u korenju bora uzorkovanom u blizini Cu-Ni topionice (Helmisaari i sar., 1999).

6.2.7.7. Arsen

Većina koncentracija As u korenju bora, lipe i zove je ispod donje granice određivanja (<1 µg/g). Koncentracije As u zemljištu sve tri biljne vrste iz urbano-industrijske zone, su dosta veće u odnosu na koncentracije u uzorcima zemljišta sa ostalih mesta uzorkovanja (slika 23). Jedino je sadržaj As u korenju lipe iz urbano-industrijske zone veći u odnosu na sadržaj As u korenju lipe sa ostalih mesta uzorkovanja (slika 35g). Zato se pretpostavlja da

As u zemljištu ima malu biodostupnost kao i da bor, lipa i zove imaju prirodno razvijene mehanizme da se odupru akumulaciji As iz zemljišta u korenje. Sadržaj As u korenju bora je jedino u uzorcima sa mesta uzorkovanja T1 i K veći od donje granice određivanja. Ove koncentracije su ujedno i veće u odnosu na sve ostale sadržaje As u korenju ispitivanih biljaka. Koncentracije As u zemljištu bora sa mesta uzorkovanja T1 i K nisu najveće, što ukazuje da korenje bora u odgovarajućim uslovima akumulira As iz zemljišta. Vrednosti Faktora obogaćenja za As u korenju lipa i zove za koje se sigurno može tvrditi da su >2 , su za uzorke sa mesta uzorkovanja UI i R2 koja su na pravcu dominantnih vetrova iz pravca topionice bakra. Vrednosti Faktora obogaćenja za As i u zemljištu lipa i zove su >2 , što ukazuje da korenje lipa i zove ima mogućnosti za korišćenje u biomonitoringu zagađenja zemljišta arsenom. Obogaćenje korenja bora arsenom u uočeno je samo u turističkoj (T1) zoni (tabela 25).

Korenje bora uzorkovano na jalovištima starog rudnika antimona, sadrži veće koncentracije As u odnosu na korenje bora uzorkovanog u blizini topionice bakra i jalovišta u Boru i okolini (Jana i sar., 2012).

6.2.7.8. Kadmijum

Dosta koncentracija Cd u korenju bora, lipa i zove je ispod donje granice određivanja ($<0,2 \mu\text{g/g}$), slično kao i za As. U korenju bora iz industrijske i kontrolne zone su detektovane najveće koncentracije Cd, što nije očekivano, zato što su najveće koncentracije u zemljištu bora detektovane u urbano-industrijskoj zoni. Zato se pretpostavlja da korenje bora u određenim uslovima ima potencijala da usvaja i akumulira Cd iz zemljišta. Ne može se sa sigurnošću tvrditi da vrednost Faktora obogaćenja za Cd u korenu sa nijednog mesta uzorkovanja ne ukazuje na veće koncentracije Cd u odnosu na koncentracije Cd u korenu iz kontrolne zone, zbog vrednosti sa predznakom $>$ (tabela 25). Obogaćenje zemljišta kadmijumom, pokazalo se na svim mestima uzorkovanja (slika 24). Rezultati ukazuju da korenje bora, lipa i zove nije pogodno za praćenje zagađenja zemljišta kadmijumom.

Korenje bora uzorkovano u blizini Cu-Ni topionice, ima veće koncentracije Cd u odnosu na korenje bora uzorkovano u blizini topionice bakra u Boru (Helmisaari i sar., 1999).

6.2.8. Elementi u korenju bora, lipa i zove sa najvećim vrednostima Faktora obogaćenja

Korenje bora sa većine mesta uzorkovanja je obogaćeno samo aluminijumom i gvožđem (tabela 25). To ukazuje da korenje bora ne može da se koristi za biomonitoring zagađenja zemljišta bakrom, olovom, arsenom i kadmijumom koji predstavljaju glavne zagađujuće supstance u zemljištu ispitivanog područja. Korenje lipa iz urbano-industrijske zone je obogaćeno bakrom, cinkom, niklom, arsenom, gvožđem, olovom i aluminijumom. Na ostalim mestima uzorkovanja, vrednosti Faktora obogaćenja za korenje lipa su >2 za manji broj elemenata, pri čemu su najveće vrednosti uvek za Cu. Korenje zove sa skoro svih mesta

uzorkovanja je takođe obogaćeno bakrom, pri čemu element za koji je dobijena najveća vrednost Faktora obogaćenja (Cu ili Zn) zavisi od mesta uzorkovanja. Vrednosti Faktora obogaćenja za ispitivane elemente u korenju lipe i zove, su u skladu sa zaključkom da se korenje ovih biljaka može koristiti u bimonitoringu zagađenja zemljišta bakrom.

6.2.9. Veza elemenata u korenju bora, lipe i zove

Većina Spirmanovih koeficijenata korelacije zasnovanih na koncentracijama elemenata u korenju ispitivanih biljaka nije statistički značajna (tabela 26).

Tabela 26. Zavisnosti koncentracija elemenata u korenju bora, lipe i zove, izražene preko Spirmanovih koeficijenata korelacije

	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
bor								
Al	1,000							
Fe	0,709*	1,000						
Cu	-0,455	-0,297	1,000					
Zn	0,103	0,152	0,600	1,000				
Ni	0,183	0,233	-0,167	0,117		1,000		
Cd	0,609	0,116	0,348	0,638	0,600	0,410		1,000
lipa								
Al	1,000							
Fe	0,927**	1,000						
Cu	0,564	0,600	1,000					
Zn	0,794**	0,733*	0,855**	1,000				
Pb	-0,072	0,180	0,311	0,204	1,000			
Ni	0,283	0,350	0,733*	0,700*	0,335	1,000		
As	0,700	0,500	0,700	1,000**	-0,200	0,400	1,000	
zova								
Al	1,000							
Fe	0,842**	1,000						
Cu	-0,006	0,127	1,000					
Zn	-0,358	-0,515	0,515	1,000				
Pb	0,600	0,600	0,429	0,257	1,000			
Ni	0,200	0,285	0,685*	0,321	0,543	1,000		
As	-0,571	0,071	0,750	0,179	0,100	0,250	1,000	

**Nivo značajnosti $p < 0,01$ (dvostrano). *Nivo značajnosti $p < 0,05$ (dvostrano).

Korelacije elemenata gde je $n < 5$ nisu prikazane. Korenje bora ($n=9$ za korelacije Ni sa ostalim elementima; $n=6$ za korelacije Cd sa ostalim elementima). Korenje lipe ($n=8$ za korelacije Pb sa ostalim elementima; $n=9$ za korelacije Ni sa ostalim elementima; $n=5$ za korelacije As sa ostalim elementima). Korenje zove ($n=6$ za korelacije Pb sa ostalim elementima; $n=7$ za korelacije As sa ostalim elementima). $n=10$ za korelacije ostalih elemenata.

Za razliku od toga, dosta statistički značajnih korelacija elemenata u zemljištu, ukazuje na zajedničko poreklo ispitivanih elemenata. Rezultati u tabeli 26 ukazuju na specifične mehanizme usvajanja i akumulacije ispitivanih elemenata u korenje, nezavisno od njihovog porekla. Statistički značajna korelacija u korenju bora dobijena je samo za par elemenata Al–Fe. Za korenje lipe postoji veći broj statistički značajnih korelacija u odnosu na korenje bora i zove. Statistički značajne korelacije elemenata u korenju, su samo za parove Al–Fe i Cu–Ni. Korelacije Al i Fe su statistički značajne za korenje sve tri ispitivane biljne vrste, dok se korelacija Cu i Ni ponavlja samo za korenje lipe i zove. Korelacije elemenata u korenju potvrđuju da ovaj deo biljke nije najpogodniji za praćenje zagađenja zemljišta. Uzrok tome je verovatno što je to prvi i glavni organ koji upravlja distribucijom elementima iz zemljišta.

6.3. Sadržaj ispitivanih elemenata u različitim delovima bora, lipe i zove, u zavisnosti od mesta uzorkovanja

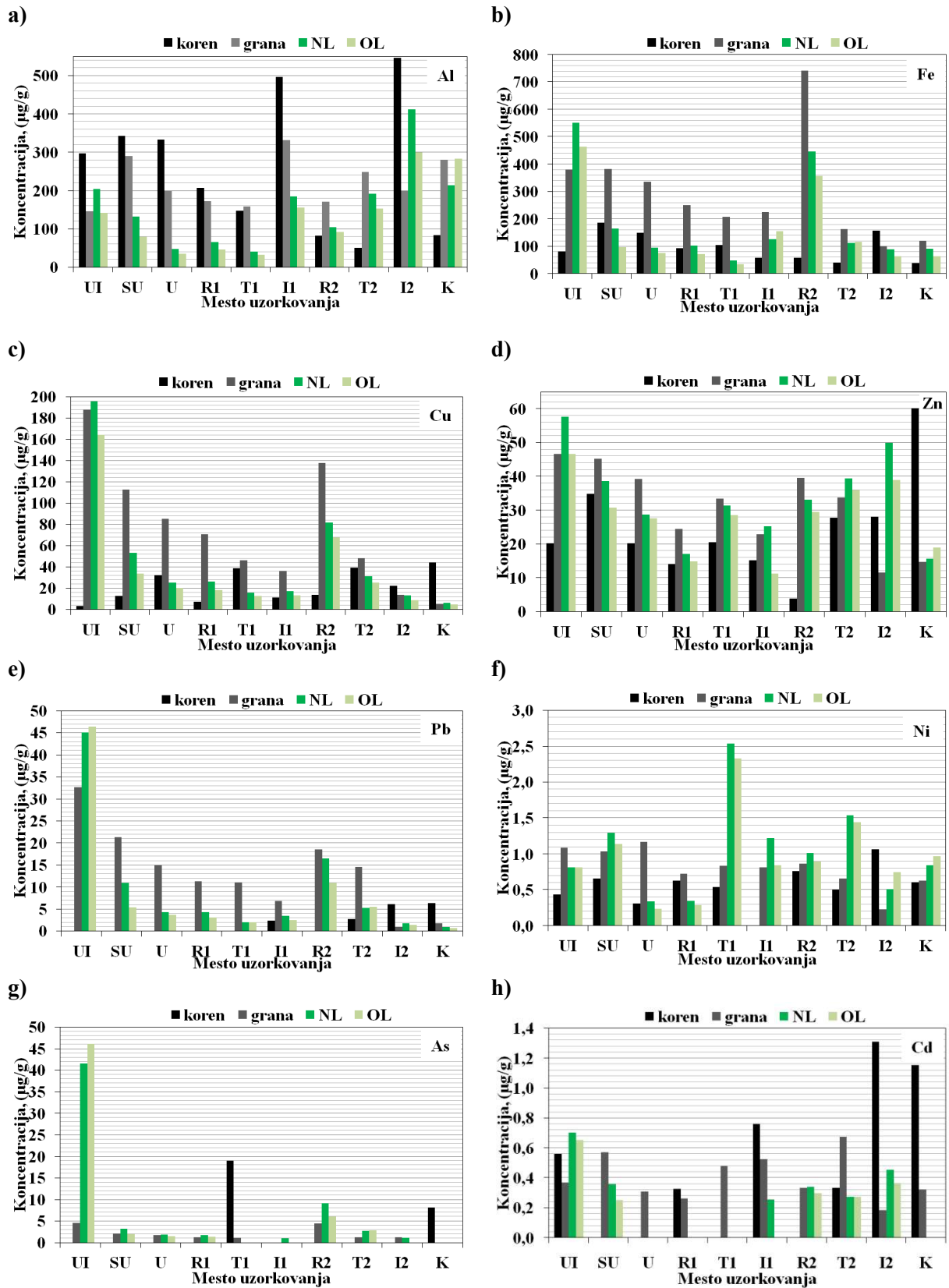
Koncentracije svakog ispitivanog elementa u korenju, granama, neopranoj i opranoj lišću bora, lipe i zove u zavisnosti od mesta uzorkovanja, date su na slikama 36, 37 i 38. Ovakav način prikazivanja ukazuje koji deo bora, lipe i zove u odnosu na ostale, sadrži najveće ili najmanje koncentracije određenog elementa. Ovi rezultati će se koristiti pri ispitivanju akumulacije i translokacije elemenata u ispitivanim biljnim vrstama.

6.3.1. Bor

Korenje bora sa 6 mesta uzorkovanja ima veće koncentracije Al, u odnosu na ostale ispitivane delove, što je u skladu sa rezultatima [Zhang i sar., \(2014\)](#) i [Wang i sar., \(2012\)](#) koji su utvrdili da se Al uglavnom akumulira u korenju bora. Oprane iglice bora na većini mesta uzorkovanja imaju najmanji sadržaj Al (slika 36a).

Veće koncentracije Fe detektovane su u granama bora u odnosu na druge delove, sa skoro svih mesta uzorkovanja, osim na mestima UI i I2 (slika 36b).

Grane bora imaju veći sadržaj Cu u odnosu na ostale ispitivane delove, osim na mestima UI, I2 i K (slika 36c). [Skonieczna i sar., \(2014\)](#) su najveće koncentracije Cu, takođe detektovali u granama bora. U urbano-industrijskoj zoni, neoprane iglice bora sadrže neznatno veće koncentracije Cu u odnosu na grane, na šta Cu u atmosferskoj depoziciji ima uticaja. Bor sa mesta I2 i K, najveće koncentracije Cu ima u korenju, dok grane, oprane i neoprane iglice imaju približne koncentracije Cu. Razlike u najvećim sadržajima Cu u zavisnosti od dela bora i mesta uzorkovanja, ukazuju na različite načine adaptacije, posebno na mestima UI i K, koje biljka poseduje da bi opstala na mestima sa velikim koncentracijama Cu.



Slika 36. Koncentracije a) Al, b) Fe, c) Cu, d) Zn, e) Pb, f) Ni, g) Pb, h) As, i) Cd u korenju, granama, opranim (OL) i neopranim (NL) iglicama bora

Koncentracije Zn su niže u korenju u odnosu na ostale delove bora, na 6 od 10 mesta uzorkovanja (slika 36d). Od ove pravilnosti odstupaju koncentracije Zn u biljnom materijalu iz suburbane, industrijske i kontrolne zone. Korenje bora iz nezagađene oblasti ima veći sadržaj Zn u odnosu na grane, neoprane i oprane iglice, što se nije pokazalo ni za jedno drugo mesto uzorkovanja, a to ukazuje na različito ponašanje bora u različitim uslovima sredine, isto kao i u slučaju Cu.

Najniži sadržaj Pb detektovan je pretežno u korenju bora, osim na mestima I2 i K, gde je sadržaj Pb u korenju u odnosu na sadržaj u ostalim delovima veći (slika 36e). Razlike u nivoima akumulacije Pb u različitim delovima bora iz urbano-industrijske i kontrolne zone, ukazuju na različite mehanizme kojima se Pb akumulira i translocira u boru, u različitim uslovima sredine. Slične pravilnosti uočene su i za Cu i Zn. Grane bora na skoro svim mestima uzorkovanja sadrže najveće koncentracije Pb, osim na mestima UI, I2 i K.

Najniže koncentracije Ni uočene su u korenju bora sa 7 od 10 mesta uzorkovanja, među kojima je i mesto K koje predstavlja nezagađnu oblast (slika 36f). Nadzemni delovi bora imaju najveće koncentracije Ni.

Nadzemni delovi bora imaju najveći sadržaj As, osim na mestima T1 i K gde su najveće koncentracije As određene u korenju (slika 36g). Rezultati ukazuju da bor koristi isti mehanizam akumulacije i translokacije ovog neesencijalnog elementa, u gotovo celokupnoj ispitivanoj oblasti.

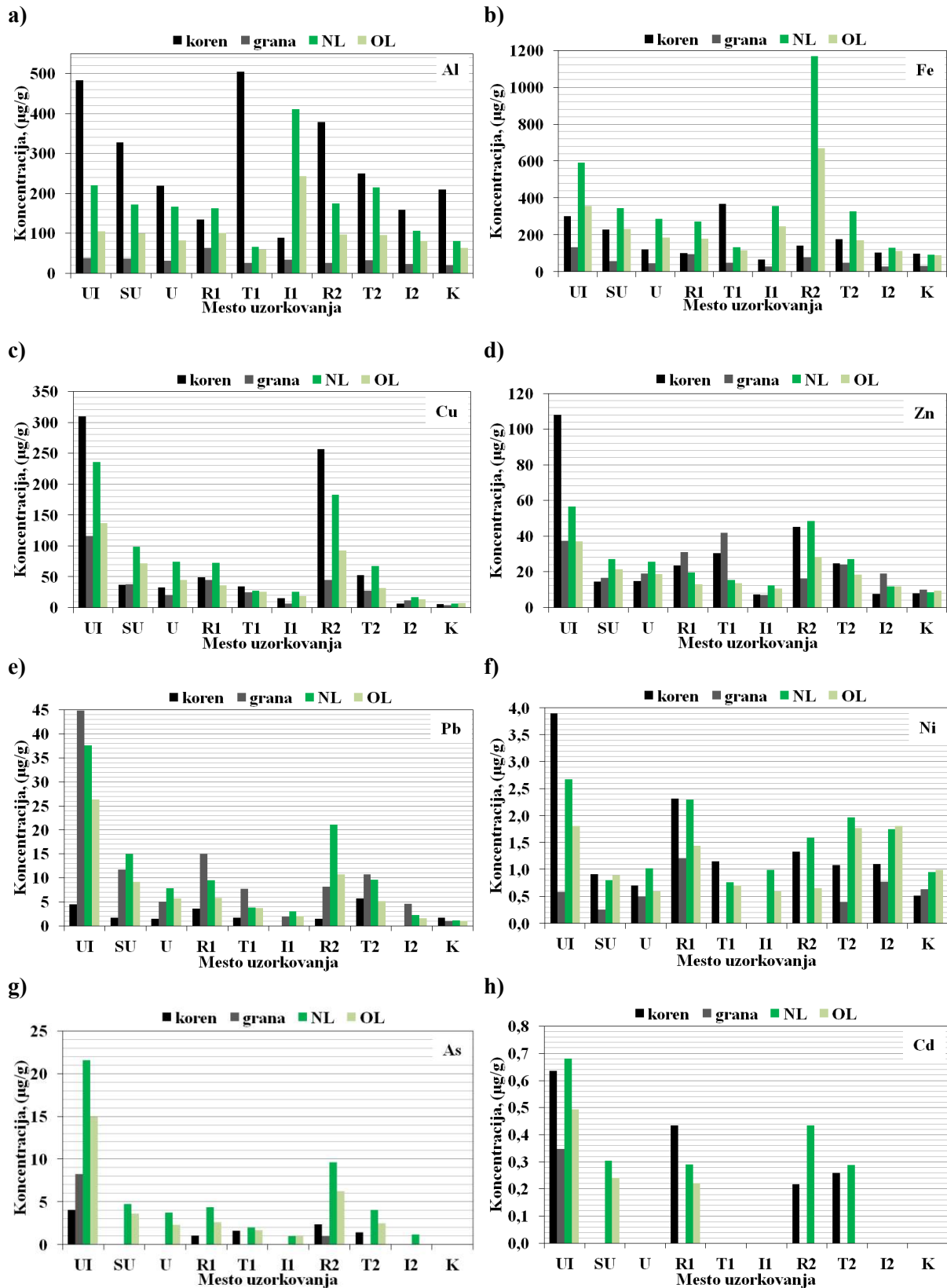
Ne može se utvrditi koji deo bora u odnosu na ostale pretežno sadrži najveće koncentracije Cd (slika 36h). Bitno je istaći da oprane i neoprane iglice iz urbano-industrijske zone imaju najveći sadržaj Cd, dok u kontrolnoj zoni, najveći sadržaj Cd ima korenje. Rezultati ukazuju na specifične mehanizme adaptacije bora u zavisnosti od stepena zagađenja životne sredine kadmijumom.

6.3.2. Lipa

Korenje lipe sadrži veće koncentracije Al u odnosu na ostale delove, osim na mestima R1 i I1 (slika 37a). Zato se pretpostavlja da korenje lipe ima prirodno veći sadržaj Al u odnosu na ostale delove. Najmanje koncentracije Al detektovane su u granama lipe u odnosu na ostale delove u celokupnoj ispitivanoj oblasti.

Najveće koncentracije Fe određene su u neopranoj i opranoj lišću lipe, osim na mestima T1 i K, gde su najveće koncentracije detektovane u korenju (slika 37b). Grane lipe sadrže manje koncentracije Fe u odnosu na ostale delove.

Neoprano lišće lipe ima veći sadržaj Cu u odnosu na korenje, granu i oprano lišće, osim u urbano-industrijskoj zoni i na mestima T1 i R2 gde korenje ima najveći sadržaj Cu (slika 37c). U kontrolnoj zoni, gde su koncentracije Cu u zemljištu najmanje, ovaj element je podjednako zastupljen u korenju, granama, neopranoj i opranoj lišću. Najniže koncentracije Cu sadrže grane lipe u odnosu na ostale delove, osim na mestima SU, R1 i I2.



Slika 37. Distribucija a) Al, b) Fe, c) Cu, d) Zn, e) Pb, f) Ni, g) Pb, h) As, i) Cd u korenju, granama, opranom (OL) i neopranom (NL) lišću lipe

Ne može se utvrditi koji deo lipe u odnosu na ostale, pretežno ima najveće ili najmanje koncentracije Zn (slika 37d). U urbano-industrijskoj zoni, najveće koncentracije Zn ima korenje lipe, dok grane i oprano lišće imaju gotovo isti sadržaj Zn. U kontrolnoj zoni, svi delovi lipe imaju približne koncentracije Zn. Nadzemni delovi lipe sa različitih mesta uzorkovanja, sadže najviše Pb (slika 37e). Korenje lipe u odnosu na ostale delove ima najmanji sadržaj Pb, osim na mestima T2 i K, što ukazuje na različite mehanizme akumulacije i translokacije ovog elementa u lipi.

Grane lipe sadrže najniže koncentracije Ni u odnosu na ostale delove, osim u kontrolnoj zoni (slika 37f). Rezultati ukazuju da se ne može definisati deo lipe koji pretežno ima najveće koncentracije Ni.

Neoprano i oprano lišće lipe u odnosu na korenje i grane, ima pretežno najveći sadržaj As (slika 37g).

Nije moguće utvrditi koji deo lipe ima najveće ili najmanje koncentracije Cd, zato što su koncentracije Cd na mnogim mestima uzorkovanja ispod donje granice određivanja (slika 37h). U urbano-industrijskoj zoni, korenje i neoprano lišće lipe ima približne koncentracije Cd, dok je sadržaj u granama najmanji.

6.3.3. Zova

Neoprano lišće zove ima najveći sadržaj Al na skoro svim mestima uzorkovanja, osim u suburbanjoj, urbanoj i kontrolnoj zoni, gde korenje ima najveće koncentracije Al (slika 38a). Ovi rezultati ukazuju na specifično ponašanje lipe u različitim uslovima sredine. Grane zove se ističu po najnižim koncentracijama Al u odnosu na ostale delove (osim na mestu UI).

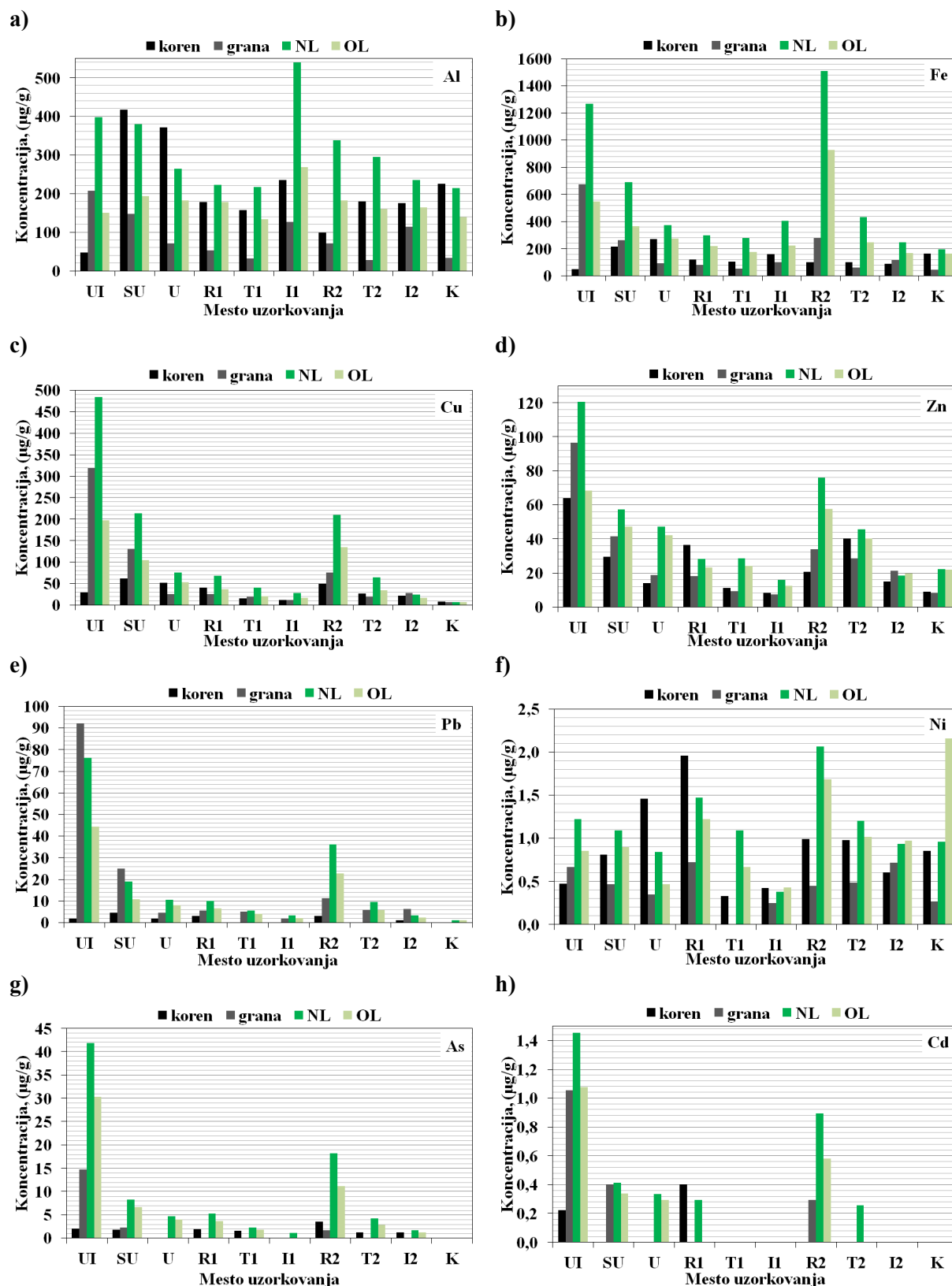
Zova ima najveće koncentracije Fe u neopranoj i opranoj lišću, u odnosu na ostale delove (slika 38b). Najmanje koncentracije Fe sadrže korenje i grane, u zavisnosti od mesta uzorkovanja.

Nadzemni delovi zove, pri čemu se posebno ističe neoprano lišće, sadrže veće koncentracije Cu u odnosu na korenje, osim na mestima I2 i K, gde svi delovi imaju približne koncentracije Cu (slika 38c). Prema tome, u uslovima nezagađene životne sredine, Cu je podjednako distribuiran u korenju, granama i lišću zove.

Oprano i neoprano lišće zove ima veće koncentracije Zn u odnosu na grane i korenje, na skoro svi mestima uzorkovanja, osim na mestu R1 i I2 (slika 38d). U uslovima nezagađene životne sredine, korenje i grane zove imaju približan sadržaj Zn, koji je niži u odnosu na sadržaj u lišću zove.

Korenje zove u odnosu na ostale ispitivane delove sadrži najmanje koncentracije Pb, dok grane i neoprano lišće (nadzemni delovi) imaju najveći sadržaj Pb (slika 38e).

Najmanje koncentracije Ni određene su u granama zove osim u urbano-industrijskoj zoni i na mestu I2, gde korenje ima najmanji sadržaj Ni (slika 38f). Ne može se definisati koji deo zove u odnosu na ostale, ima tendenciju da zadrži veće koncentracije Ni.



Slika 38. Distribucija a) Al, b) Fe, c) Cu, d) Zn, e) Pb, f) Ni, g) Pb, h) As, i) Cd u korenju, granama, opranom (OL) i neopranom (NL) lišću zove

Neoprano i oprano lišće zove sadrži veće koncentracije As, u odnosu na ostale delove (slika 38g).

Ne može se utvrditi koji deo zove ima mogućnosti da zadrži najveće ili najmanje koncentracije Cd (slika 38h). U urbano-inustrijskoj zoni, nadzemni delovi zove imaju veći sadržaj Cd u odnosu na korenje.

6.4. Mogućnosti korišćenja bora, lipe i zove u fitoremedijaciji

Mogućnosti korišćenja bora, lipe i zove u fitoremedijaciji, definisani su na osnovu Bioakumulacionog faktora za korenje i oprano lišće (BAF_{koren} , BAF_{list}), Translokacionog faktora (TF), kao i upoređivanjem koncentracija elemenata u opranom lišću sa koncentracijama koje bi lišće biljaka hiperakumulatora ili ekskludera trebalo da sadrži. Vrednosti navedenih faktora za bor, lipu i zovu su dati u tabelama 27, 28 i 29, respektivno, dok su koncentracije ispitivanih elemenata karakteristične za biljke ekskludere date u tabeli 1.

Ukoliko su istovremeno zadovoljeni kriterijumi da nadzemni deo biljke sadrži koncentracije određenog elementa koje inače sadrže biljke hiperakumulatori, kao i da je $BAF_{koren} > 1$, $BAF_{list} > 1$ i $TF > 1$, tada se biljka smatra hiperakumulatorom, tj. ima mogućnosti za upotrebu u fitoekstrakciji.

Ukoliko je $BAF_{koren} < 1$; $BAF_{list} < 1$ i $TF < 1$, tada biljka ima osobine ekskludera, pri čemu ne treba izostaviti da biljke ekskluderi ipak usvajaju određene količine esencijalnih elemenata, koje omogućavaju pravilno funkcionisanje primarnih metaboličkih funkcija (Ernst, 2005). Biljke ekskluderi mogu da u korenju akumuliraju najveće koncentracije određenog elementa, nego u ostalim delovima, ali je translokacija u nadzemne delove ograničena. Ova osobina je pogodna za upotrebu biljaka u fitostabilizaciji.

Ukoliko su vrednosti BAF_{koren} i $BAF_{list} < 1$ a $TF > 1$, razmatrana je samo efikasnost translokacije određenog elementa iz korenja u lišće. Kada se određeni element efikasno translocira iz korenja u lišće, tada korenje u odnosu na oprano lišće ima niži sadržaj ispitivanog elementa. Ukoliko su koncentracije u neoprano lišću veće nego u korenju, takvi slučajevi se neće uzimati u obzir, zbog udela atmosfere depozicije na površini lišća. Kako uzorci grana nisu oprani, pri upoređivanju dela biljaka sa najvećim ili najmanjim sadržajem ispitivanih elemenata, uzeće se u obzir i uticaj atmosfere depozicije.

Opseg koncentracija elemenata u zemljištu biljnih vrsta na mestima uzorkovanja gde su vrednosti $TF < 1$ i opseg koncentracija elemenata u zemljištu na mestima gde je $TF > 1$, su upoređeni. U zoni koncentracija preklapanja ova dva opsega, smatrano je da koncentracije elemenata u zemljištu nemaju dominantan efekat na efikasnost translokacije iz korenja u lišće. Ovaj način analize rezultata ukazuje i na efikasnost translokacije elemenata u opsegu nižih i u opsegu viših detektovanih koncentracija elemenata u zemljištu. Tako se definisala strategija kojom se bor, lipa i adaptiraju na povećane koncentracije ispitivanih elemenata u rizosferi.

Rezultati su tumačeni i u odnosu na podelu BAF vrednosti, koju su u svom istraživanju koristili Favas i sar., (2013). Na osnovu te podele, definisan je intezitet apsorpcije određenih elemenata iz zemljišta u lišće i korenje. U zavisnosti od vrednosti Bioakumulacionih faktora, apsorpcija je klasifikovana na sledeći način: 10-100 (intenzivna

apsorpcija), 1-10 (jaka apsorpcija), 0,1-1 (srednja apsorpcija), 0,01-0,1 (slaba apsorpcija), 0,001-0,01 (veoma slaba apsorpcija).

Rezultati iz okvira ove doktorske disertacije ukazuju da sadržaj ispitivanih elemenata u opranom lišću bora, lipe i zove nije približan i ne prelazi koncentracije koje biljke hiperakumulatori trebaju da sadrže (1000 $\mu\text{g/g}$ za Al, Cu, Pb, Ni, As; 10000 $\mu\text{g/g}$ za Zn, 100 za Cd) (slike 36, 37, 38) (Baker i Brooks, 1989; Kabata-Pendias, 2011; Mendez i Maier, 2008). Vrednosti $\text{BAF}_{\text{koren}}$ i BAF_{list} su na svim mestima uzorkovanja <1 , što takođe ukazuje da ispitivane biljne vrste ne mogu da se koriste u fitoekstrakciji (tabele 27, 28, 29). Zato su rezultati razmatrani sa aspekta efikasnosti/stepena usvajanja ispitivanih elemenata iz zemljišta u korenje i lišće, ali i efikasnosti njihove translokacije iz korenja u lišće. Za ovaj deo istraživanja korišćeni su sadržaji elemenata u opranim delovima biljaka tj. oprano korenje i oprano lišće, kako ne bi došlo do pogrešnog tumačenja rezultata, zbog udela ispitivanih elemenata u atmosferskoj depoziciji, adsorbovanoj na nadzemnim delovima ispitivanih biljaka, i čestica zemljišta na korenju.

6.4.1. Bor

6.4.1.1. Aluminijum

$\text{BAF}_{\text{koren}}$ i BAF_{list} su na svim mestima uzorkovanja $<0,01$ što označava veoma slabu apsorpciju Al iz zemljišta u korenje i iglice (tabela 27).

Vrednosti TF za Al u uzorcima sa mesta UI, SU, U, R1, T1, I1 i I2 su <1 . To ukazuje da bi korenje u odnosu na ostale delove trebalo da sadrži veće koncentracije Al, što se pokazalo tačnim, osim za Al u uzorcima mesta T1, R2 i T2. Na tim mestima, koncentracije u korenju su niže nego u granama, što je verovatno posledica ograničene translokacije Al iz korenja do grana a ne i iglica, ili uticaja Al iz atmosferske depozicije na sadržaj Al u/na granama. Vrednosti $\text{BAF}_{\text{koren}}$, BAF_{list} , $\text{TF}<1$, ukazuju da se bor sa mesta UI, SU, U, R1, I1 i I2 može svrstati u **ekskludere** Al, tj. ima mogućnosti za korišćenje u **fitostabilizaciji** prisutnih koncentracija Al u zemljištu. Biljne vrste koje se mogu koristiti u fitostabilizaciji, imaju sposobnost zadržavanja većih koncentracija elemenata u korenju nego u ostalim delovima, što se pokazalo u slučaju bora sa ovih mesta uzorkovanja. Do sličnih rezultata došli su i Nowak i Friend, (2005) kao i Moyer-Henry i sar., (2005).

Vrednosti TF za Al su samo na mestima R2, T2 i K veće od 1, ukazujući da se Al usvojen u korenju, u uslovima sredine navedenih mesta uzorkovanja efikasno translocira u lišće.

Opseg koncentracija Al u zemljištu bora na mestima gde je $\text{TF}<1$ je od 4,58 do 8,42%, a na mestima gde je $\text{TF}>1$, koncentracije Al u zemljištu se kreću od 4,28 do 5,89%. Rezultati ukazuju da se mehanizmi ograničene translokacije i efikasne translokacije Al iz korenja u lišće dešavaju u istom opsegu koncentracija Al u zemljištu.

6.4.1.2. Gvožđe

Prema vrednostima BAF_{koren} , apsorpcija Fe iz zemljišta u korenje bora u kontrolnoj zoni je srednjeg inteziteta, na mestima T2 i I2 slabog, dok je na ostalim mestima apsorpcija iz zemljišta u korenje veoma slaba (tabela 27).

Tabela 27. Bioakumulacioni i Translokacioni faktor za ispitivane elemente u boru, u zavisnosti od mesta uzorkovanja

Mesto uzorkovanja	Faktor	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
UI	BAF_{koren}	0,005	0,002	0,001	0,047	<0,003	0,022	<0,003	0,078
	BAF_{list}	0,002	0,009	0,045	0,107	0,155	0,041	0,134	0,091
	TF	0,478	5,703	48,833	2,310	>46,33	1,867	>46,16	1,168
SU	BAF_{koren}	0,007	0,004	0,034	0,281	<0,030	0,058	<0,021	<0,187
	BAF_{list}	0,002	0,002	0,089	0,249	0,158	0,100	0,041	0,234
	TF	0,233	0,525	2,601	0,884	>5,37	1,737	>1,920	>1,250
U	BAF_{koren}	0,006	0,003	0,082	0,153	<0,024	0,026	<0,043	<0,172
	BAF_{list}	0,001	0,002	0,052	0,208	0,092	0,020	0,063	<0,170
	TF	0,105	0,504	0,629	1,362	>3,76	0,781	>1,48	/
R1	BAF_{koren}	0,005	0,003	0,012	0,099	<0,018	0,030	<0,017	0,211
	BAF_{list}	0,001	0,002	0,030	0,104	0,055	0,014	0,022	<0,130
	TF	0,222	0,772	2,462	1,050	>3,09	0,463	>1,32	<0,606
T1	BAF_{koren}	0,002	0,002	0,059	0,132	<0,018	0,024	0,198	<0,165
	BAF_{list}	0,001	0,001	0,020	0,184	0,036	0,105	<0,010	<0,165
	TF	0,218	0,332	0,334	1,389	>2,08	4,306	<0,053	/
I1	BAF_{koren}	0,008	0,001	0,033	0,174	0,096	<0,040	<0,027	2,018
	BAF_{list}	0,003	0,004	0,038	0,129	0,100	0,165	<0,027	<0,520
	TF	0,313	2,675	1,139	0,744	1,046	>4,200	/	<0,263
R2	BAF_{koren}	0,002	0,001	0,009	0,011	<0,013	0,047	<0,010	<0,060
	BAF_{list}	0,002	0,008	0,045	0,089	0,141	0,055	0,061	0,089
	TF	1,112	6,236	4,835	7,782	>10,92	1,178	>6,09	>1,500
T2	BAF_{koren}	0,001	0,001	0,034	0,139	0,022	0,039	<0,006	0,155
	BAF_{list}	0,003	0,003	0,022	0,180	0,044	0,111	0,017	0,126
	TF	3,016	2,827	0,642	1,298	1,992	2,864	>2,870	0,816
I2	BAF_{koren}	0,006	0,006	0,075	0,173	0,014	0,374	<0,037	3,204
	BAF_{list}	0,004	0,002	0,029	0,239	0,003	0,262	<0,037	0,902
	TF	0,549	0,405	0,388	1,384	0,238	0,700	/	0,279
K	BAF_{koren}	0,001	0,001	0,654	0,425	0,223	0,017	0,686	3,115
	BAF_{list}	0,005	0,002	0,071	0,134	0,027	0,026	<0,084	<0,541
	TF	3,409	1,663	0,109	0,316	0,121	1,590	<0,123	<0,174

$$BAF_{koren} = C_{koren} / C_{zemljište}; \quad BAF_{list} = C_{list} / C_{zemljište}; \quad TF = C_{list} / C_{koren}$$

Vrednosti sa znakom < dobijene su deljenjem donje granice određivanja određenog elementa u opranom lišću ili korenju sa tačno poznatom koncentracijom tog elementa u zemljištu ili korenju.

Vrednosti sa znakom > dobijene su deljenjem koncentracije određenog elementa u opranom lišću ili korenju sa donjom granicom određivanja elementa u zemljištu ili korenju.

„/” koncentracije u opranom lišću, korenju i zemljištu su manje od donje granice određivanja.

Vrednosti $BAF_{list} < 0,01$ ukazuju na veoma slabu apsorpciju iz zemljišta u iglice na svim mestima uzorkovanja.

Vrednosti BAF_{koren} , BAF_{list} i TF su < 1 za Fe u boru sa 5 od 10 mesta uzorkovanja (SU, U, R1, T1 i I2). Prema izračunatim faktorima, bor na ovim mestima zadovoljava glavne kriterijume za definisanje biljaka ekskludera. Međutim, nije ispunjen uslov da je sadržaj Fe u korenju bora sa mesta SU, U, R1 i T1 veći, u odnosu na sadržaj Fe u ostalim ispitivanim delovima (slika 36b). Na tim mestima uzorkovanja, grane bora imaju veći sadržaj Fe u odnosu na korenje. Ova pravilnost može biti posledica više uzroka kao što su: translokacija Fe od korenja do grana a ne i do iglica, usvajanje Fe unutar grana iz vazduha, ili prisustvo Fe na površini neopranih grana iz atmosferske depozicije. Zbog toga se bor sa navedenih mesta uzorkovanja ne može svstati u ekskludere Fe. Jedino uslovi sredine na mestu I2, u kojima raste uzorkovani bor, i gde su BAF_{koren} , BAF_{list} i $TF < 1$, a koncentracije u korenju bora veće u odnosu na koncentracije u ostalim delovima, ukazuju na dobre mogućnosti korišćenja bora u **fitostabilizaciji** Fe. Bitno je istaći da je na mestu I2 određen najmanji sadržaj Fe u zemljištu bora (2,82%), najniža aktivna i potencijalna kiselost (4,8 i 3,7), kao i najniži SOM (3,5%). Efikasna translokacija Fe iz korenja u iglice bora ($TF > 1$) utvrđena je na mestima UI, I1, R2, T2 i K. Kako koncentracije Fe u opranim iglicama ni sa jednog mesta uzorkovanja nisu prelazile kritične, ne može se utvrditi da li je bor akumulator Fe.

Koncentracije Fe u zemljištu na mestima gde je $TF < 1$ kreću se u opsegu od 2,82 do 5,16%, a na mestima gde je $TF > 1$, od 3,93 do 4,95%. Mehanizmi ograničene translokacije i efikasne translokacije Fe iz korenja u lišće dešavaju se u istom opsegu koncentracija Al u zemljištu. Zato se pretpostavlja da i drugi faktori osim sadržaja Fe u zemljištu imaju dosta uticaja na apsorpciju i translokaciju Fe u boru.

6.4.1.3. Bakar

Apsorpcija Cu iz zemljišta u korenje bora je pretežno na svim mestima uzorkovanja okarakterisana kao slaba ($0,01 < BAF_{koren} < 0,1$), osim na mestima UI i R2 gde je apsorpcija veoma slaba. Koncentracije Cu u zemljištu bora sa ovih mesta uzorkovanja u odnosu na ostala su najveće. Apsorpcija Cu iz korenja u iglice je na svim mestima uzorkovanja slaba (tabela 27).

Na mestima uzorkovanja U, T1, T2, I2 i K, vrednosti TF su < 1 . Oprane iglice bora sa navedenih mesta uzorkovanja imaju sadržaj Cu manji od 40 $\mu\text{g/g}$, koji su [Mendez i Maier, \(2008\)](#) definisali kao jedan od uslova koje biljke ekskluderi trebaju da ispunjavaju. Međutim, za uzorke sa mesta U, T1 i T2, nije ispunjen uslov da korenje bora sadrži veće koncentracije Cu u odnosu na koncentracije u ostalim delovima. Veći sadržaj Cu u korenju nego u ostalim delovima, je jedino na mestima I2 i K, gde sadržaj Cu u iglicama ne prelazi kritičnu vrednost za lišće i iglice. Zbog toga bor uzorkovan na mestima I2 i K ima osobine **ekskludera** Cu. Na ovim mestima uzorkovanja su koncentracije Cu u zemljištu niže u odnosu na koncentracije Cu u zemljištu sa ostalih ispitivnih mesta (67,89 i 298,67 $\mu\text{g/g}$).

Koncentracije Cu u korenju bora iz urbane i turističke zone, gde je $TF < 1$, manje su u odnosu na sadržaj Cu u opranim i neopranim iglicama, ali nisu veće u odnosu na

koncentracije u granama (slika 36c). To je verovatno posledica translokacije Cu iz korenja u grane ali ne i u iglice (ne može se odrediti zato što uzorci grana nisu prani), dodatni uticaj Cu iz atmosfere depozicije koja je nataložena na granama bora (uzorci grana nisu oprani), ili dugogodišnje usvajanje Cu iz vazduha.

Vrednosti $TF > 1$, izračunate su za bor sa 5 (UI, SU, R1, II i R2) od 10 mesta uzorkovanja. To znači da se Cu iz zemljišta sa navedenih mesta, a pogotovo sa mesta UI i R2, gde su detektovane najveće koncentracije Cu u zemljištu, efikasno translocira iz korenja u iglice bora. Koncentracije Cu u opranim iglicama koje su veće od kritičnih, takođe ukazuju da bor ima sposobnost da efikasno translocira Cu u nadzemne delove, pri čemu se ne sme zanemariti mogućnost usvajanja Cu putem lišća iz atmosfere depozicije. Ovi rezultati ukazuju da jedinke koje rastu na mestima UI, SU, R1, II i R2 imaju određene mehanizme tolerancije na visoke koncentracije Cu u životnoj sredini, a posebno u zemljištu.

Opseg koncentracija Cu u zemljištu bora na mestima gde je $TF < 1$ je od 67 do 1156,33 mg/kg, dok je $TF > 1$ za Cu na mestima gde se koncentracije Cu u zemljištu kreću od 345,54–3620,19 mg/kg. Ova dva opsega koncentracija Cu u zemljištu na mestima uzorkovanja gde je $TF < 1$ i $TF > 1$, se u jednom delu preklapaju, i pretpostavlja se da tada koncentracije Cu u zemljištu nemaju dominantan uticaj na translokaciju Cu iz korenja u nadzemne delove. Sa sigurnošću se jedino može reći da se sa povećanjem koncentracija Cu u zemljištu bora preko oko 1200 mg/kg, povećavaju i koncentracije ovog elementa u iglicama. To znači da bor tada koristi mehanizam izbegavanja toksičnosti Cu tako što Cu translocira u iglice.

6.4.1.4. Cink

Apsorpcija Zn iz zemljišta u korenje je srednjeg inteziteta, osim na mestima UI, R1 i R2 gde je apsorpcija slaba. Apsorpcija Zn iz zemljišta u oprane iglice je takođe na svim mestima (osim na mestu R2-slaba apsorpcija) srednjeg inteziteta (tabela 27). Rezultati ukazuju da se Zn, u odnosu na Cu, efikasnije usvaja iz zemljišta.

Bor efikasno translocira Zn iz korenja u iglice ($TF > 1$) na pretežno svim mestima uzorkovanja. Vrednosti Translokacionog faktora za bor sa mesta uzorkovanja SU, II i K su manje od jedan, ali koncentracije Zn u korenju sa mesta SU i II nisu veće i u odnosu na sadržaj Zn u granama (slika 36d). Prisustvo Zn u atmosferskoj depoziciji na površini grana, dugogodišnje usvajanje Zn iz vazduha, ili translokacija Zn iz korenja samo do grana a ne i do iglica, može biti uzrok tome.

Sadržaj Zn u iglicama bora na svim mestima uzorkovanja je $< 500 \mu\text{g/g}$, što je prema Mendez i Maier, (2008) koncentracija koja u lišću biljaka ekskludera ne bi trebalo da bude premašena. Kao ekskluder Zn se ponaša bor uzorkovan jedino u kontrolnoj zoni, jer ispunjava kriterijume da su BAF_{koren} , BAF_{list} i $TF < 1$. Takođe, veći udeo Zn detektovan je u korenju nego u ostalim delovima bora, što je jedna od glavnih odlika biljaka koje se mogu koristiti u fitostabilizaciji.

Sadržaj Zn u zemljištu bora na mestima gde je $TF < 1$ kreće se od 87,23 do 141,71 mg/kg. Na mestima uzorkovanja gde je $TF > 1$, koncentracije Zn u zemljištu su u opsegu od

132,27 do 434,37 mg/kg. Zbog preklapanja ova dva opsega koncentracija Zn u zemljištu, pretpostavlja se da u odnosu na druge faktore, dominantan uticaj na translokaciju Zn iz korenja u iglice, imaju koncentracije Zn u zemljištu koje su veće od oko 140 mg/kg. Drugim rečima, u opsegu većih detektovanih koncentracija Zn u rizosfernom zemljištu, bor efikasno translocira Zn u iglice.

6.4.1.5. Olovo

Apsorpcija Pb iz zemljišta u korenje bora u kontrolnoj zoni je srednjeg inteziteta, dok je na ostalim mestima apsorpcija slaba ili veoma slaba (mesto UI). Apsorpcija Pb iz zemljišta u oprane iglice bora je srednjeg inteziteta na mestima UI, SU, I1 i R2; slaba na mestima U, R1, T1, T2 i K; a veoma slaba na mestu I2 (tabela 27).

Vrednosti BAF_{koren} , BAF_{list} , i TF su <1 za Pb u boru jedino sa mesta uzorkovanja I2 i K. Koncentracije Pb u korenju bora su veće u odnosu na koncentracije Pb u ostalim delovima, na ovim mestima uzorkovanja. Koncentracije Pb u iglicama sa svih mesta uzorkovanja su $<100 \mu\text{g/g}$, što je odlika biljaka ekskludera Pb. Rezultati ukazuju da je bor u uslovima sredine koji vladaju na mestima I2 i K potencijalni **ekskluder** Pb, tj. ima mogućnosti da se koristi u fitostabilizaciji. Bitno je istaći da se bor sa mesta uzorkovanja I2 i K svrstava i u ekskludere Cu.

Vrednosti TF za Pb u boru su >1 za uzorke sa većine mesta, gde su i koncentracije Pb u korenju manje u odnosu na sadržaj Pb u ostalim delovima (slika 36e). To ukazuje da bor ima sposobnost da veći deo usvojenog Pb iz korenja translocira u nadzemne delove, što predstavlja jedan od glavnih mehanizama adaptacije viših biljaka, u uslovima povećanih koncentracija elemenata u rizosferi. Koncentracije Pb u iglicama bora iz urbano-industrijske zone su veće od prekomernih, što u uslovima istovremenog zagađenja zemljišta i vazduha olovom, bor svrstava u **akumulatore** Pb.

Koncentracije Pb u zemljištu na mestima gde je $TF > 1$ kreću se u opsegu od 25,34 do 298,24 mg/kg. Na mestima I2 i K gde je $TF < 1$, koncentracije Pb u zemljištu iznose 440,51 mg/kg i 28,71 mg/kg, respektivno. Zbog velikog preklapanja ova dva opsega, pretpostavlja se da na efikasnost translokacije Pb iz korenja bora u iglice, veliki uticaj imaju i drugi faktori, a ne samo sadržaj Pb u zemljištu.

6.4.1.6. Nikl

Vrednosti BAF_{koren} ukazuju da je usvajanje Ni iz zemljišta u korenje slabo. Na osnovu BAF_{list} usvajanje Ni u iglicama iz zemljišta bora sa mesta uzorkovanja SU, T1, I1, T2 i I2 je srednje, dok je na ostalim mestima usvajanje slabo (tabela 27).

Vrednosti BAF_{koren} , BAF_{list} i TF su <1 za Ni u boru sa mesta uzorkovanja U, R1 i I2. Koncentracije Ni u korenju bora su veće nego u ostalim delovima samo na mestu I2 (slika 36f), gde se bor jedino i ponaša kao **ekskluder**. Na mestima U i R1 sadržaj Ni u granama je veći u odnosu na sadržaj Ni u korenju (slika 36f), što može ukazivati na uticaj prisutnosti Ni

u atmosferi, ili na ograničenu translokaciju iz korenja samo do grana. Važno je istaći da se bor sa mesta I2 ponaša kao ekskluder i Al, Fe, Cu i Pb.

Vrednosti $TF > 1$ izračunate su za Ni u boru sa većine mesta uzorkovanja, što ukazuje da bor efikasno translocira usvojeni Ni iz korenja u iglice. Sadržaj Ni u korenju bora je niži u odnosu na sadržaj u granama, opranim i neopranim iglicama.

Koncentracije Ni u zemljištu bora na mestima gde je $TF < 1$ kreću su se u opsegu od 2,86 do 21,06 mg/kg, a na mestima gde je $TF > 1$, koncentracije Ni u zemljištu su od 5,09–36,25 mg/kg. Zbog preklapanja ova dva opsega, jedino se može pretpostaviti da se u uslovima kada su koncentracije Ni u zemljištu > 21 mg/kg, koncentracije Ni u zemljištu imaju dominantan efekat na efikasnu translokaciju Ni iz korenja u iglice.

6.4.1.7. Arsen

Za dosta mesta uzorkovanja, date su okvirne vrednosti BAF_{koren} (kao npr. $< 0,003$), tako da se sa sigurnošću može reći jedino da je apsorpcija iz zemljišta u korenje bora sa mesta T1 i K srednjeg, a sa mesta UI i T2 slabog inteziteta. Ostale vrednosti klasifikuju apsorpciju ili u slabu, ili u veoma slabu. Isti problem je i za vrednosti BAF_{list} , gde se sigurno može reći da je apsorpcija iz zemljišta u iglice bora sa mesta UI i R2 srednjeg, a na mestima SU, U, R1, T2 apsorpcija je slabog inteziteta. Apсорpcija na preostalim mestima se može klasifikovati ili kao slaba ili veoma slaba (tabela 27).

Vrednosti BAF_{koren} , BAF_{list} i TF koje su za As u boru sa mesta T1 i K manje od jedan, ukazuju da se As ne translocira efikasno iz korenja u iglice. Koncentracije As u korenju bora su veće nego u na ostalim ispitivanim delovima, na ovim mestima uzorkovanja. Koncentracije As u opranim iglicama bora na mestima T1 i K su < 30 $\mu\text{g/g}$, što je karakteristično za biljke ekskludere As. Zato se pretpostavlja da uslovi sredine na mestima uzorkovanja T1 i K, pogoduju da se bor svrsta u **ekskludere** As. Koncentracije As u zemljištu bora sa mesta T1 su znatno veće u odnosu na koncentracije As u zemljištu sa mesta K, što ukazuje da sadržaj As u zemljištu nije glavni faktor koji utiče na usvajanje i distribuciju As u boru.

Vrednosti TF su > 1 na većini mesta uzorkovanja, što znači da bor ima sposobnost da efikasno translocira As iz korenja u nadzemne delove.

Vrednosti TF za As u boru su < 1 za uzorke sa mesta T1 i K gde su koncentracije As u zemljištu 93,31 mg/kg i 11,84 mg/kg, respektivno. Sadržaj As u zemljištu bora na mestima uzorkovanja gde je $TF > 1$, kreću se u opsegu od 23,49 do 344,11 mg/kg. Može se reći da u oblasti preklapanja ova dva opsega, i drugi faktori osim sadržaja As u zemljištu imaju veliki efekat na usvajanje i translokaciju As u boru. Koncentracije u As u zemljištu imaju dominantan efekat na translokaciju As iz korenja u iglice, kada su koncentracije As u zemljištu veće od oko 100 mg/kg. Drugim rečima, bor koji raste u zemljištu gde su koncentracije As veće od oko 100 mg/kg, ima sposobnost da se brani od akumulacije As u svojim organima tako što akumulira ovaj element u iglicama.

6.4.1.8. Kadmijum

Za razliku od ostalih elemenata gde su vrednosti $BAF_{koren} < 1$ za bor sa svih mesta uzorkovanja, u slučaju Cd, na mestima I1, I2 i K, vrednosti BAF_{koren} su > 1 , što se karakteriše kao jaka apsorpcija Cd iz zemljišta u korenje bora. Jedini parametar zemljišta koji se za ova mesta izdvaja u odnosu na druga, je najmanji sadržaj organskih materija. Sa sigurnošću se može reći da je na mestima R1 i T2 apsorpcija Cd iz zemljišta u korenje srednjeg inteziteta, a u urbano-industrijskoj zoni slabog inteziteta. Za mesta SU, U, T1 i R2 ne može se sa sigurnošću tvrditi da li je apsorpcija Cd iz zemljišta u korenje srednjeg ili slabog inteziteta (tabela 27). Vrednosti BAF_{list} ukazuju da je apsorpcija Cd iz zemljišta u iglice bora sa mesta SU, R2, T2 i I2 srednjeg inteziteta, a u urbano-industrijskoj zoni apsorpcija je slaba. Za bor sa ostalih mesta (U, R1, T1, I1 i K) se ne može sa sigurnošću tvrditi da li je u pitanju apsorpcija srednjeg inteziteta (tabela 27).

Vrednosti BAF_{koren} , BAF_{list} i TF za Cd u boru su < 1 , a koncentracije Cd u opranim iglicama su $< 10 \mu\text{g/g}$ na mestima R1, I1, T2, I2 i K. Time su ispunjeni osnovni kriterijumi koje biljke ekskluderi trebaju da zadovoljavaju. Kako je sadržaj Cd u korenju bora sa mesta T2 manji nego sadržaj Cd u granama, postoji mogućnost da se na tom mestu Cd translocira do grana, ili da veliki uticaj na sadržaj u granama ima Cd iz vazduha. Bor sa mesta R1, I1, I2 i K može se smatrati **ekskluderom**, koji ima sposobnost da akumulira Cd u korenju, bez dalje translokacije u nadzemne delove, što je jedan od kriterijuma za **fitostabilizaciju**.

Vrednosti TF su > 1 , za Cd u boru sa mesta uzorkovanja UI, SU i R2, što ukazuje na dobru efikasnost translokacije Cd iz korenja u lišće.

Koncentracije Cd u zemljištu bora na mestima gde je $TF < 1$, kreću se u opsegu od 0,37 do 2,15 mg/kg. Na mestima gde je $TF > 1$, koncentracije Cd u zemljištu su od 1,07 do 7,18 mg/kg. Ukoliko se koncentracije u zemljištu koje se nalaze u zoni preklapanja ova dva opsega zanemare, pretpostavlja se da pri koncentracijama Cd u zemljištu većim od oko 2 mg/kg, koncentracije Cd u rizosferi bora imaju dominantan efekat na translokaciju Cd iz korenja u nadzemne delove.

6.4.2. Lipa

6.4.2.1. Aluminijum

Korenje lipe slabo usvaja Al iz zemljišta na mestima SU i R2, a na ostalim mestima veoma slabo. Lišće takođe slabo usvaja Al iz zemljišta na svim mestima uzorkovanja (tabela 28).

Vrednosti BAF_{koren} i BAF_{list} za Al u lipi su < 1 na svim mestima uzorkovanja, što važi i za TF (osim na mestu I1). Najveće koncentracije Al detektovane su u korenju u odnosu na ostale ispitivane delove lipe, na tim mestima (slika 27a). Zato se lipa koja raste u uslovima sredine ispitivanog područja, može svrstati u **ekskludere** Al.

Tabela 28. Bioakumulacioni i Translokacioni faktor za ispitivane elemente u lipi, u zavisnosti od mesta uzorkovanja

Mesto uzorkovanja	Faktor	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
UI	BAF _{koren}	0,009	0,007	0,061	0,122	0,013	0,155	0,162	0,067
	BAF _{list}	0,002	0,008	0,027	0,042	0,074	0,072	0,027	0,052
	TF	0,217	1,189	0,443	0,343	5,894	0,463	3,678	0,775
SU	BAF _{koren}	0,013	0,009	0,083	0,090	0,023	0,063	<0,070	<0,088
	BAF _{list}	0,004	0,009	0,162	0,132	0,126	0,062	0,182	0,106
	TF	0,305	1,011	1,947	1,469	5,453	0,979	>3,650	>1,200
U	BAF _{koren}	0,004	0,003	0,066	0,113	0,031	0,047	<0,066	<0,148
	BAF _{list}	0,001	0,004	0,090	0,141	0,117	0,040	0,071	<0,180
	TF	0,377	1,531	1,359	1,246	3,763	0,849	>2,350	/
R1	BAF _{koren}	0,003	0,003	0,031	0,121	0,029	0,101	0,048	0,144
	BAF _{list}	0,002	0,005	0,023	0,067	0,048	0,063	0,023	0,073
	TF	0,748	1,783	0,737	0,552	1,638	0,621	2,436	0,507
T1	BAF _{koren}	0,009	0,007	0,092	0,184	0,039	0,071	0,102	<0,148
	BAF _{list}	0,001	0,002	0,070	0,082	0,083	0,044	0,031	<0,148
	TF	0,117	0,316	0,762	0,447	2,151	0,618	1,020	/
I1	BAF _{koren}	0,002	0,002	0,021	0,049	<0,027	<0,020	<0,100	<0,286
	BAF _{list}	0,005	0,006	0,026	0,070	0,057	0,058	0,088	<0,280
	TF	2,757	3,665	1,228	1,448	>2,080	>3,000	>1,020	/
R2	BAF _{koren}	0,010	0,004	0,244	0,198	0,020	0,091	0,164	0,099
	BAF _{list}	0,003	0,017	0,089	0,124	0,146	0,045	0,101	<0,090
	TF	0,256	4,741	0,362	0,626	7,153	0,497	2,608	<0,909
T2	BAF _{koren}	0,005	0,004	0,050	0,091	0,034	0,100	0,134	0,049
	BAF _{list}	0,002	0,004	0,030	0,067	0,031	0,163	0,038	<0,038
	TF	0,380	0,956	0,614	0,738	0,901	1,638	1,733	<0,769
I2	BAF _{koren}	0,004	0,003	0,047	0,091	<0,030	0,072	<0,070	<0,308
	BAF _{list}	0,002	0,004	0,088	0,139	0,047	0,119	<0,04	<0,300
	TF	0,513	1,070	1,892	1,530	>1,61	1,644	/	/
K	BAF _{koren}	0,008	0,008	0,268	0,189	0,077	0,060	<0,116	/
	BAF _{list}	0,002	0,007	0,347	0,225	0,045	0,115	<0,19	/
	TF	0,300	0,928	1,295	1,196	0,582	1,916	/	/

BAF_{koren}=C_{koren}/C_{zemljište}; BAF_{list}=C_{list}/C_{zemljište}; TF= C_{list}/C_{koren}

Vrednosti sa znakom < dobijene su deljenjem donje granice određivanja određenog elementa u opranom lišću ili korenju sa tačno poznatom koncentracijom tog elementa u zemljištu ili korenju.

Vrednosti sa znakom > dobijene su deljenjem koncentracije određenog elementa u opranom lišću ili korenju sa donjom granicom određivanja elementa u zemljištu ili korenju.

„/“ koncentracije u opranom lišću, korenju i zemljištu su manje od donje granice određivanja.

Na mestu I1, TF je >1, a koncentracija Al u zemljištu lipe iznosi 4,89%. Na ostalim mestima uzorkovanja vrednosti TF su <1, pri koncentracijama Al u zemljištu od 2,45 do 5,20%. Koncentracija Al u zemljištu od 4,89% ulazi u opseg od 2,45 do 5,20%, pa se pretpostavlja da osim koncentracija Al u zemljištu i drugi faktori utiču na ponašanje lipe u ispitivanom području. Do istog zaključka došlo se i u slučaju bora.

6.4.2.2. Gvožđe

Gvožđe je veoma slabo apsorbovano iz zemljišta u korenje i oprano lišće lipe (0,01–0,1) (tabela 28).

Vrednosti sva tri faktora (BAF_{koren} , BAF_{list} , TF) za Fe u lipi su <1 na mestima T1, T2 i K, gde korenje lipe u odnosu na ostale delove, sadrži veće koncentracije usvojenog Fe (slika 27b). Vrednosti faktora za Fe u lipi, ukazuju da se lipa na navedenim mestima uzorkovanja može svrstati u **ekskludere** Fe.

Translokacioni faktori za Fe u lipi na svim ostalim mestima uzorkovanja su >1 , ukazujući na sposobnost lipe da efikasno translocira Fe iz korenja u lišće.

Koncentracije Fe u zemljištu na mestima gde je $TF < 1$ (1,25–5,51%) i $TF > 1$ (2,61–4,59%) se prilično preklapaju zbog čega se može zaključiti da osim sadržaja Fe u zemljištu lipe, i drugi faktori imaju možda isti ili i veći efekat na efikasnost translokacije Fe iz korenja u lišće lipe.

6.4.2.3. Bakar

Usvajanje Cu iz zemljišta u korenje lipe je srednjeg inteziteta na mestima R2 i K, dok je na ostalim mestima usvajanje slabo. Usvajanje Cu iz zemljišta u oprano lišće je srednjeg inteziteta na mestima SU i K, dok je na ostalim mestima usvajanje slabo (tabela 28).

Vrednosti BAF_{koren} , BAF_{list} i TF za Cu u lipi su <1 za uzorke sa mesta UI, R1, T1, R2 i T2, što ukazuje da translokacija Cu iz korenja u lišće nije efikasna, zbog čega lipa koja raste u tim uslovima sredine ima osobine ekskludera Cu. Ipak, koncentracije Cu u opranom lišću lipe sa mesta UI i R2 su $>40 \mu\text{g/g}$, pa se lipa sa ovih mesta ne može svrstati u ekskludere. Jedan od uzroka može biti usvajanje Cu iz vazduha preko lišća. Takođe, koncentracije Cu u lišću lipe sa svih mesta uzorkovanja su veće od prekomernih za lišće viših biljaka. Zato se pretpostavlja da na sadržaj Cu u lišću lipe dodatno utiče i Cu koji je konstituent čestica u atmosferskoj depoziciji, a u zavisnosti od veličine i hemijskih karakteristika čestica, može ući u unutrašnjost lišća.

Efikasna translokacija Cu iz korenja u oprano lišće ($TF > 1$) utvrđena je na mestima SU, U, I1, I2 i K. Kako koncentracije Cu u lišću spadaju u prekomerne, lipa u uslovima životne sredine na navedenim mestima je **akumulator** Cu iz zemljišta, ali i iz vazduha.

Koncentracija Cu u zemljištu lipe sa mesta gde je $TF > 1$, kreću se u opsegu 22,74–720 mg/kg, dok je $TF < 1$ za lipu sa mesta gde su koncentracije Cu u zemljištu od 374 do 5073,88 mg/kg.

Pretpostavlja se da pri koncentracijama Cu u zemljištu većim od 720 mg/kg, na ograničenu translokacija Cu iz korenja u lišće, kada se lipa može koristiti u **fitostabilizaciji**, dominantan uticaj imaju koncentracije Cu u zemljištu. Drugim rečima, pri višim koncentracijama Cu u zemljištu u ispitivanom području, lipa ima sposobnost da najveći udeo Cu zadrži u korenju, što predstavlja njen mehanizam adaptacije na visoke koncentracije Cu u rizosferi. To ukazuje da bor i lipa imaju različite strategije adaptacije na visoke koncentracije Cu u supstratu.

6.4.2.4. Cink

Prema vrednostima BAF_{koren} i BAF_{list} , Zn se iz zemljišta u korenje i lišće lipa slabo ili veoma slabo apsorbira (tabela 28).

Vrednosti BAF_{koren} , BAF_{list} i TF za Zn u lipi su <1 na mestima UI, R1, T1, R2 i T2. Koncentracije Zn u korenju lipa su veće nego u ostalim delovima na mestima UI, R2 i T2 (slika 27d), a sadržaj Zn u opranom lišću lipa je $<500 \mu\text{g/g}$. Rezultati ukazuju da se lipa sa mesta uzorkovanja UI, R2 i T2 može smatrati **ekskluderom** Zn, i da lipa koja raste u uslovima sredine u tim oblastima, ima mogućnosti da se koristi u **fitostabilizaciji**. Sadržaj Zn u korenju sa mesta R1 i T1 je manji nego u granama (slika 27d). Kako uzorci grana nisu oprani, ne zna se tačan uzrok tome, ali se ne može isključiti translokacija iz korenja samo do grana, i/ili uticaj Zn iz vazduha na sadržaj Zn u granama.

Sadržaj Zn u zemljištu lipa, gde je $TF > 1$, kreće se u opsegu 40,80–161,31 $\mu\text{g/g}$. Na mestima gde je $TF < 1$, koncentracije Zn u zemljištu lipa su u opsegu od 227,80–885,47 $\mu\text{g/g}$, a sadržaj Zn u korenju je veći u odnosu na sadržaj Zn u svim ostalim delovima. Odatle se može zaključiti da lipa ne translocira Zn iz korenja u lišće kada su koncentracije Zn u zemljištu veće od oko 160 mg/kg. Ovi rezultati ukazuju da bor i lipa imaju različite strategije adaptacije na slične koncentracije Zn u zemljištu.

6.4.2.5. Olovo

Vrednosti BAF_{koren} , ukazuju da je usvajanje Pb iz zemljišta u korenje lipa slabo na svim mestima uzorkovanja. Usvajanje Pb iz zemljišta u oprano lišće lipa je srednjeg inteziteta na mestima SU, U i R2, dok je na ostalim mestima usvajanje Pb slabo (tabela 28).

Vrednosti TF za Pb su <1 , za lipu sa mesta uzorkovanja T2 i K. Jedino je u kontrolnoj zoni ispunjen uslov da je sadržaj Pb u korenju lipa veći (neznatno) nego u ostalim delovima (slika 27e), pa u tim uslovima sredine lipa ima osobine **ekskludera**. Sadržaj Pb u opranom lišću lipa iz kontrolne zone je $<500 \mu\text{g/g}$, što je još jedan od kriterijuma koje biljke ekskluderi Pb trebaju da zadovolje. Sadržaj Pb u korenju lipa sa mesta T2, je manji od sadržaja u granama, što može biti posledica translokacije Pb od korenja do grana a ne i lišća ($TF=0,901$), ili uticaj Pb iz vazduha (slika 27e).

Efikasna translokacija Pb iz korenja lipa u lišće ($TF > 1$) utvrđena je na svim ostalim mestima, gde je i sadržaj Pb u korenju najmanji.

Ukoliko se iz diskusije izostavi mesto T2 gde se ne može sa sigurnošću tvrditi šta je uzrok većih koncentracija Pb u granama nego u korenju, pretpostavlja se sadržaj Pb u zemljištu ima dominantan uticaj na efikasnu translokaciju Pb iz korenja lipa u nadzemne delove pri koncentracijama Pb u zemljištu većim od oko 23 $\mu\text{g/g}$ (K zona).

6.4.2.6. Nikl

Usvajanje Ni iz zemljišta u korenje lipe je srednjeg inteziteta na mestima uzorkovanja UI i R1, dok je usvajanje na ostalim mestima slabo. Usvajanje Ni iz zemljišta u lišće je srednjeg inteziteta na mestima T, I2 i K, dok je na ostalim mestima usvajanje slabo (tabela 28).

Ograničena translokacija Ni iz korenja u lišće lipe ($TF < 1$) utvrđena je na mestima UI, SU, U, R1, T1 i R2. Korenje u tom slučaju sadrži veće koncentracije Ni nego oprano lišće i grane (slika 27f). Kako su vrednosti BAF_{koren} , BAF_{list} i TF na tim mestima < 1 , lipa se u tim uslovima sredine ponaša kao **ekskluder**. Na nekim mestima gde je $TF < 1$, sadržaj Ni u neoprano lišću lipe veći je od sadržaja u korenju, što je posledica određenog udela Ni u atmosferskoj depoziciji deponovanoj na površini lišća lipe.

Lipa efikasno translocira Ni ($TF > 1$) iz korenja u oprano lišće na mestima I1, T2, I2 i K. Opseg koncentracija Ni u zemljištu lipe na mestima uzorkovanja gde je $TF > 1$, je od 8,62 do 15,25 mg/kg, dok je opseg koncentracija Ni u zemljištu gde je $TF < 1$, od 14,44 do 25,20 mg/kg. Na osnovu toga je utvrđeno da lipa efikasno translocira Ni iz korenja u lišće, u opsegu nižih koncentracija Ni u zemljištu ispitivane oblasti. Zbog preklapanja dva opsega ne može se tačno definisati koncentracija Ni u zemljištu kada je translokacija u nadzemne delove ograničena, ali se okvirno kreće od 14–15 mg/kg.

6.4.2.7. Arsen

Vrednosti BAF_{koren} čija je brojna vrednost za razliku od ostalih mogla tačno da se odredi, ukazuju da je apsorpcija As iz zemljišta u korenje srednjeg inteziteta na mestima UI, R2 i T2. Na mestima R1 i T1 apsorpcija je slaba, dok se na preostalim mestima intezitet apsorpcije može svrstati u jednu od ove dve grupe. Apсорpcija As iz zemljišta u lišće je srednjeg inteziteta na mestima SU i R2; na mestima UI, U, R1, T1, I1 i T2 apсорpcija je slaba, dok apсорpcija na mestima I2 i K spada u jednu od ove dve grupe (tabela 28).

Vrednost TF za As u lipi sa mesta uzorkovanja I2 i K, nije mogao da se izračuna zato što su koncentracije As u korenju i opranom lišću ispod donje granice određivanja. Na ostalim mestima uzorkovanja $TF > 1$, što označava efikasnu translokaciju As iz korenja u lišće lipe. Koncentracije As u zemljištu lipe na mestima na kojima je $TF > 1$, kreću se u opsegu 11,63–546,81 mg/kg. Ovi rezultati ukazuju da se adaptacija lipe na velike koncentracije As u zemljištu ogleda u translokaciji As do lišća (najveće koncentracije u neoprano i oprano lišću) koje u jesen opada. Istu strategiju koristi i bor.

6.4.2.8. Kadmijum

Apsorpcija Cd iz zemljišta u korenje lipe je srednjeg inteziteta na mestima R1, T1 i I1, dok korenje slabo apsorbuje Cd iz zemljišta na mestima UI, R2 i T2. Apсорpcija na ostalim mestima je ili srednjeg ili slabog inteziteta. Apсорpcija Cd iz zemljišta u lišće lipe u

suburbanoj zoni je srednjeg inteziteta, dok je na mestima UI i R1 apsorpcija slaba. Na ostalim mestima apsorpcija je ili srednjeg ili slabog inteziteta (tabela 28).

Koncentracije Cd u lišću lipa su u svim zonama $<10 \mu\text{g/g}$, što je jedan od uslova koji biljke ekskluderi trebaju da ispunjavaju. Vrednosti $\text{BAF}_{\text{koren}}$, BAF_{list} i TF za Cd su <1 za lipu sa mesta UI, R1, R2 i T2, što ukazuje da lipa u tim oblastima ima osobine **ekskludera** Cd.

Na efikasnu translokaciju Cd iz korenja u lišće lipa ukazuje vrednost TF koja je u suburbanoj zoni veća od 1, pri koncentracijama Cd u zemljištu lipa od $2,27 \text{ mg/kg}$. Opseg koncentracija Cd u zemljištu na mestima gde je $\text{TF} < 1$ je $2,20\text{--}9,45$. Odatle sledi da lipa u većem opsegu koncentracija, većim od oko $2,20 \text{ mg/kg}$, reaguje kao ekskluder Cd, i ima mogućnosti da se koristi u **fitostabilizaciji** zemljišta zagađenog kadmijumom. Za razliku od toga, u većem opsegu koncentracija Cd u zemljištu, bor efikasno translocira Cd iz korenja u iglice.

6.4.3. Zova

6.4.3.1. Aluminijum

Apsorpcija Al iz zemljišta u korenje i lišće zove u ispitivanoj oblasti je veoma slaba ($\text{BAF}_{\text{koren}}$, $\text{BAF}_{\text{list}} < 0,01$) (tabela 29). Na većini mesta uzorkovanja vrednosti $\text{BAF}_{\text{koren}}$, BAF_{list} i TF su <1 , što ukazuje da je zova u tim uslovima **ekskluder** Al. Translokacioni faktor >1 izračunat je za zovu sa mesta uzorkovanja UI, I1 i R2.

Koncentracije Al u zemljištu zove sa mesta uzorkovanja za koje je $\text{TF} < 1$, kreću se u opsegu $3,39\text{--}5,73\%$, a u zemljištu za koje je $\text{TF} > 1$, od $3,73$ do $5,55\%$. Ova dva opsega koncentracija se preklapaju, kao i u slučaju bora i lipa. Zato se može reći da koncentracije Al u zemljištu zove nemaju dominantan efekat na ekskluziju ili akumulaciju Al u zovi.

6.4.3.2. Gvožđe

Gvožđe se veoma slabo apsorbuje iz zemljišta u korenje zove u svim zonama. Isto se pokazalo i za apsorpciju u lišću, osim na mestima UI i R2, gde je apsorpcija slaba (tabela 29).

Zova ima osobine **ekskludera** Fe ($\text{BAF}_{\text{koren}}$, BAF_{list} , $\text{TF} < 1$) samo u nezagađenoj oblasti (mesto K), gde koncentracija Fe u zemljištu iznosi $2,44\%$. Na ostalim mestima uzorkovanja, translokacija Fe iz korenja u lišće je efikasna, tj. $\text{TF} > 1$, u opsegu koncentracija Fe u zemljištu $3,16\text{--}5,82\%$. To ukazuje da se pri nižim koncentracijama Fe u zemljištu ($< 2,44\%$), najveće količine Fe akumuliraju u korenje zove, dok se efikasna translokacija Fe iz korenja u lišće odvija sa povećanjem koncentracija Fe u zemljištu ($> 3,16\%$). Za razliku od toga, u slučaju bora i lipa nije se mogla definisati strategija reagovanja biljaka na određene koncentracije Fe u zemljištu.

Tabela 29. Bioakumulacioni i Translokacioni faktor za ispitivane elemente u zovi, u zavisnosti od mesta uzorkovanja

Mesto uzorkovanja	Faktor	Al	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	As	Cd
UI	BAF _{koren}	0,001	0,001	0,003	0,035	0,002	0,013	0,002	0,011
	BAF _{list}	0,003	0,011	0,021	0,037	0,043	0,023	0,027	0,054
	TF	3,206	11,782	6,729	1,067	25,867	1,796	14,342	4,800
SU	BAF _{koren}	0,007	0,005	0,064	0,131	0,050	0,096	0,032	<0,066
	BAF _{list}	0,003	0,009	0,109	0,209	0,122	0,107	0,116	0,113
	TF	0,463	1,705	1,700	1,600	2,413	1,111	3,662	>1,700
U	BAF _{koren}	0,007	0,006	0,104	0,066	0,005	0,101	<0,062	<0,104
	BAF _{list}	0,003	0,006	0,105	0,201	0,024	0,033	0,255	0,150
	TF	0,491	1,012	1,013	3,031	4,369	0,322	>4,060	>1,450
R1	BAF _{koren}	0,005	0,004	0,046	0,291	0,037	0,107	0,022	0,225
	BAF _{list}	0,005	0,007	0,041	0,186	0,077	0,066	0,043	<0,11
	TF	0,998	1,832	0,901	0,638	2,080	0,623	1,908	<0,500
T1	BAF _{koren}	0,003	0,002	0,030	0,058	<0,015	0,033	0,035	<0,155
	BAF _{list}	0,003	0,004	0,040	0,126	0,057	0,067	0,041	<0,155
	TF	0,850	1,657	1,309	2,154	>3,960	2,034	1,175	/
I1	BAF _{koren}	0,004	0,004	0,041	0,092	<0,040	0,048	<0,140	/
	BAF _{list}	0,005	0,006	0,056	0,138	0,082	0,049	<0,140	/
	TF	1,143	1,407	1,352	1,500	>2,020	1,010	/	/
R2	BAF _{koren}	0,003	0,002	0,046	0,118	0,022	0,023	0,022	<0,153
	BAF _{list}	0,005	0,016	0,124	0,331	0,163	0,039	0,068	0,443
	TF	1,851	9,240	2,707	2,807	7,449	1,695	3,103	>2,900
T2	BAF _{koren}	0,004	0,002	0,054	0,255	0,013	0,104	0,016	<0,235
	BAF _{list}	0,003	0,006	0,067	0,255	0,076	0,108	0,037	<0,235
	TF	0,892	2,447	1,243	1,003	>5,630	1,035	2,358	/
I2	BAF _{koren}	0,003	0,003	0,106	0,189	0,034	0,065	0,042	<0,323
	BAF _{list}	0,003	0,005	0,084	0,248	0,074	0,106	/	<0,32
	TF	0,937	1,859	0,789	1,315	2,185	1,617	0,924	/
K	BAF _{koren}	0,007	0,007	0,200	0,107	<0,044	0,055	<0,135	/
	BAF _{list}	0,004	0,007	0,167	0,258	0,042	0,139	<0,135	/
	TF	0,620	0,988	0,837	2,419	>0,950	2,523	/	/

BAF_{koren}=C_{koren}/C_{zemljište}; BAF_{list}=C_{list}/C_{zemljište}; TF=C_{list}/C_{koren}

Vrednosti sa znakom < dobijene su deljenjem donje granice određivanja određenog elementa u opranom lišću ili korenju sa tačno poznatom koncentracijom tog elementa u zemljištu ili korenju.

Vrednosti sa znakom > dobijene su deljenjem koncentracije određenog elementa u opranom lišću ili korenju sa donjom granicom određivanja elementa u zemljištu ili korenju.

„/” koncentracije u opranom lišću, korenju i zemljištu su manje od donje granice određivanja.

6.4.3.3. Bakar

Bakar se veoma slabo apsorbuje iz zemljišta u korenje zove, u urbano-industrijskoj zoni, gde je i koncentracija Cu u zemljištu najveća (9435,06 mg/kg). Apsorpcija Cu iz zemljišta u korenje zove je srednjeg inteziteta na mestima uzorkovanja U, I2 i K, dok je apsorpcija na ostalim mestima slaba. Apsorpcija Cu iz zemljišta u lišće zove na mestima SU, U, R2 i K je srednjeg, a na ostalim mestima slabog inteziteta (tabela 29).

Zova ima osobine **ekskludera** Cu (BAF_{koren} , BAF_{list} , $TF < 1$) na mestima R1, I2 i K, pri koncentracijama Cu u zemljištu od 39,42 do 899,31 $\mu\text{g/g}$. Koncentracije Cu u opranom lišću zove sa tih mesta uzorkovanja su $< 40 \mu\text{g/g}$, što je još jedan od kriterijuma koje biljke ekskluderi trebaju da ispunjavaju. Na svim ostalim mestima uzorkovanja, Cu se efikasno translocira iz korenja u lišće ($TF > 1$), pri koncentracijama u zemljištu od 298,15 do 9435,06 $\mu\text{g/g}$.

Na osnovu toga je utvrđeno da zova najveće količine usvojenog Cu zadržava u korenju kada su koncentracije Cu u zemljištu manje od oko 40 mg/kg. Kao strategiju adaptacije na visoke koncentracije u rizosferi, zova najveći deo usvojenog Cu translocira u lišće. Koncentracije Cu u zemljištu zove, imaju dominantan uticaj na efikasnu translokaciju Cu iz korenja u lišće, kada je sadržaj Cu u zemljištu veći od oko 900 mg/kg.

6.4.3.4. Cink

Slaba apsorpcija Zn iz zemljišta u korenje zove utvrđena je na mestima uzorkovanja UI, U, T1 i I1, dok je na ostalim mestima apsorpcija srednjeg inteziteta. Jedino je u urbano-industrijskoj zoni, apsorpcija Zn iz zemljišta u lišće zove slaba, dok je na ostalim mestima apsorpcija srednjeg inteziteta (tabela 29).

Zova ima osobine **ekskludera** (BAF_{koren} , BAF_{list} , $TF < 1$; koncentracija Zn u OL $< 500 \mu\text{g/g}$) samo na mestu uzorkovanja R1, gde su najveće koncentracije Zn detektovane u korenju zove i gde koncentracija Zn u zemljištu iznosi 124,73 mg/kg. Na ostalim mestima vrednost TF je veća od jedan, tako da je translokacija Zn iz korenja u lišće efikasna, u opsegu koncentracija Zn u zemljištu od 79,21–1836,89 mg/kg. U uslovima sredine kada je $TF < 1$, koncentracija Zn u zemljištu, ulazi u opseg koncentracija Zn u zemljištu kada je $TF > 1$.

Zato se pretpostavlja da sadržaj Zn u zemljištu ima dominantan uticaj na efikasnost translokacije iz korenja u lišće zove, kada su koncentracije Zn u rizosferi veće od oko 125 mg/kg. Adaptacija zove na povećane koncentracije Zn u zemljištu, zasniva se na translokaciji Zn u nadzemne delove, što se pokazalo i u slučaju bora, dok se u lipi pri većim koncentracijama Zn u zemljištu, najveće količine Zn zadržavaju u korenju biljke.

6.4.3.5. Olovo

Veoma slaba apsorpcija Pb iz zemljišta u korenje zove, utvrđena je u urbano-industrijskoj i urbanoj zoni, dok je na ostalim mestima apsorpcija slaba. Apsorpcija Zn iz korenja u lišće srednjeg inteziteta, utvrđena je na mestima uzorkovanja SU i R2, dok je na ostalim mestima apsorpcija slaba (tabela 29).

Vrednosti Translokacionih faktora su na svim mestima uzorkovanja (osim na mestu K) > 1 , što znači da se Pb efikasno translocira iz korenja u lišće, pri koncentracijama Pb u zemljištu od 24,69 do 1021,20 mg/kg. U nezagađenoj oblasti, $TF > 0,950$, zbog čega se ne može sa sigurnošću tvrditi da se najveće koncentracije Pb zadržavaju u korenju zove. Zato se

pretpostavlja da se usvojeno Pb u korenju zove efikasno translocira u nadzemne delovove, pri veoma niskim koncentracijama Pb u zemljištu (većim od oko 25 mg/kg, a možda i nižim).

6.4.3.6. Nikl

Srednji intezitet apsorpcije Ni iz zemljišta u korenje zove, utvrđen je na mestima uzorkovanja U, R1 i T2, dok je ostalim mestima apsorpcija slaba. Srednji intezitet apsorpcije Ni iz korenja u lišće zove je za jedinke sa mesta SU, T2 i K, dok je na ostalim mestima apsorpcija slaba (tabela 29).

Zova ima osobine **ekskludera** Ni (BAF_{koren} , BAF_{list} , $TF < 1$), jedino na mestima uzorkovanja U i R1, u opsegu koncentracija Ni u zemljištu od 14,46 do 18,38 mg/kg. Translokacioni faktor je na svim ostalim mestima uzorkovanja > 1 , u opsegu koncentracija Ni u zemljištu od 8,45 do 43,57 mg/kg. Opseg koncentracija Ni u zemljištu kada je $TF < 1$, ulazi u opseg koncentracija Ni u zemljištu kada je $TF > 1$. Na osnovu toga se može zaključiti da sadržaj Pb u rizosferi zove ima dominantan uticaj na efikasnu translokaciju Pb iz korenja u lišće, kada su koncentracije Pb u zemljištu zove veće od oko 19 mg/kg. Utvrđeno je da bor koji raste u opsegu većih koncentracija Ni u zemljištu takođe translocira Ni iz korenja u lišće, dok lipa sa povećanjem koncentracija Ni u zemljištu ograničava translokaciju.

6.4.3.7. Arsen

Apsorpcija As iz zemljišta u korenje zove je slaba u urbano-industrijskoj zoni dok je na ostalim mestima veoma slaba. Arsen se iz zemljišta u lišće zove apsorbuje srednjim intezitetom u suburbanoj i urbanoj zoni, dok je apsorpcija na ostalim mestima slaba (tabela 29).

Zova zadržava najveće koncentracije As u korenju, na mestu I2, gde su BAF_{koren} , BAF_{list} i $TF < 1$. Koncentracije As u lišću zove sa ovog mesta uzorkovanja su $< 30 \mu\text{g/g}$, što je jedna od osobina biljaka **ekskludera**. Na svim ostalim mestima uzorkovanja, vrednost TF je > 1 , što označava efikasnu translokaciju As iz korenja u lišće zove.

Sadržaj As na mestu uzorkovanja I2 gde je $TF < 1$, iznosi 31,39 mg/kg. Ova koncentracija ulazi u opseg sadržaja As u zemljištu gde je $TF > 1$ (15,92–1141,29 mg/kg). Zato se pretpostavlja da koncentracije As u zemljištu zove imaju veliki uticaj na translokaciju As iz korenja u lišće, kada su veće od oko 32 mg/kg. To predstavlja jedan od odbrambenih strategija biljaka. Na isti način se ponašaju bor i lipa.

6.4.3.8. Kadmijum

Zbog toga što su koncentracije Cd u korenju i/ili opranom lišću zove sa dosta mesta uzorkovanja ispod donje granice određivanja, nije bilo moguće izračunati faktore koji označavaju apsorpciju ili translokaciju. Sa sigurnošću se može reći da se apsorpcija Cd iz

zemljišta u korenje zove na mestu R1 odvija srednjim intezitetom, a u urbano-industrijskoj zoni apsorpcija je slaba. Apsorpcija srednjeg inteziteta iz korenja u lišće je utvrđena na mestima SU, U i R2, dok se slaba apsorpcija odvija u urbano-industrijskoj zoni (tabela 29).

Na mestima UI, SU, U i R2, gde je bilo moguće izračunati Translokacioni faktor, vrednosti su >1 , pri koncentracijama Cd u zemljištu od 1,31 do 19,83 mg/kg. To ukazuje da sa porastom koncentracija Cd u zemljištu zova efikasno translocira Cd u lišću, kao što se pokazalo i u slučaju bora, a što je u suprotnosti sa rezultatima dobijenim za lipu.

7. ZAKLJUČAK

Mogućnosti korišćenja bora, lipe i zove u biomonitoringu i fitoremedijaciji ispitivane su na području Bora i okoline, gde su se zagađujuće supstance iz rudarskih i metalurških procesa tokom više decenija distribuirale u sve komponente životne sredine.

Analizom sadržaja Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, As i Cd u lišću, granama i korenju bora, lipe i zove, utvrđeno je koji su delovi biljnih vrsta najpogodniji za određivanje prisustva i praćenje ispitivanih elemenata u životnoj sredini Bora i okoline. Ovo istraživanje i dobijeni rezultati mogu služiti kao model za sprovođenje biomonitoringa u oblastima sa sličnom vrstom zagađenja. Delovi bora, lipe i zove koji su najpogodniji za ispitivanje zagađenja životne sredine određenim elementom su: 1) neoprano i oprano lišće bora i zove a posebno lipe, grane bora i zove, korenje lipe za **Fe**; 2) neoprano i oprano lišće bora, lipe i zove, grane lipe i zove a posebno bora, korenje lipe i zove za **Cu**; 3) neoprano i oprano lišće lipe, grane lipe, korenje lipe i zove za **Zn**; 4) neoprano i oprano lišće bora i lipe a posebno zove, grane bora, lipe i zove za **Pb**; 5) neoprano i oprano lišće bora i lipe a posebno zove, grane bora, lipe i zove, korenje lipe i zove za **As**; 6) neoprano i oprano lišće bora, lipe i zove za **Cd**. Za utvrđivanje prisustva ispitivanih elemenata u atmosferskoj depoziciji, kao i za razlikovanje zona sa većim i nižim sadržajem elemenata u atmosferskoj depoziciji, najadekvatniji su lišće/iglice: 1) bora i lipe a posebno zove za **Al** i **Zn**; 2) najmanje efikasne iglice bora, najadekvatnije lišće lipe i zove za **Fe** i **Cu**; 3) lišće lipe i zove, a adekvatnije je lišće zove za **Pb**; 4) lišće lipe i zove za **As** i **Cd**. U odnosu na to, ne treba se zanemariti ni da biljna vrsta sa najvećom sposobnošću zadržavanja čestica na lišću, ima potencijala da se koristi u formiranju tampon zona u okolini glavnih izvora zagađenja vazduha.

Najveće obogaćenje u biljnom materijalu utvrđeno je pretežno za Cu, Pb i As. To potvrđuje da se ispitivane biljne vrste mogu koristiti u identifikaciji oblasti koje su pod uticajem zagađenja, ali i da ispitivani elementi imaju određen stepen biodostupnosti.

Rizosferno zemljište bora, lipe i zove sadrži koncentracije Cu, Zn, Pb, As i Cd koje su u većini ispitivanih zona iznad zakonom propisanih vrednosti. Najveća prekorčenja Graničnih vrednosti, kao i najveće obogaćenje u odnosu na kontrolnu zonu, utvrđeno je za Cu, As, i Cd. Zemljište iz urbano-industrijske i u ruralne zone u okolini sela Slatina (mesto uzorkovanja R2), ima najveći sadržaj skoro svih ispitivanih elemenata, osim Al, Fe i Ni. Zbog toga postoji velika opasnost od ulaska toksičnih i kancerogenih materija u ljudski organizam preko lanca ishrane, usled korišćenja zagađenog zemljišta u poljoprivredne svrhe.

U okviru ovog istraživanja definisani su mehanizmi kojima su se bor, lipa i zova adaptirali na određene koncentracije ispitivanih elemenata u rizosferi. Na osnovu tih mehanizama su ocenjene mogućnosti upotrebe ovih biljnih vrsta u **fitostabilizaciji** i **fitoekstrakciji**.

Bor, lipa i zova ne koriste iste mehanizme adaptacije na svim mestima uzorkovanja, što zavisi i od koncentracija ispitivanih elemenata u zemljištu i ostalih osobina zemljišta, kao i od osobina biljnih vrsta. Zato ispitivane biljne vrste na pojedinim mestima pokazuju osobine ekskludera zadržavajući najveće koncentracije usvojenog elementa u korenju, dok na drugim mestima efikasno translociraju elemente iz korenja u lišće. Prema tome je utvrđeno da bor, lipa i zova imaju velike mogućnosti da se adaptiraju na uslove sredine u kojoj rastu.

Utvrđeno je da bor, lipa i zova nisu hiperakumulatori ni jednog od ispitivanih elemenata, kao i da se ne mogu koristiti u fitoekstrakciji.

Bor, lipa i zova sa većine mesta uzorkovanja imaju osobine ekskludera **Al**, što je jedan od kriterijuma za izbor biljaka koje se mogu koristiti u fitostabilizaciji. Koncentracije Al u zemljištu nemaju dominantan efekat na ekskluziju ili akumulaciju Al u ispitivanim biljnim vrstama.

U zavisnosti od mesta uzorkovanja, bor i lipa imaju osobine ekskludera **Fe**, ili efikasno translociraju Fe iz korenja u lišće. Zato se pretpostavlja da i drugi faktori osim sadržaja Fe u zemljištu imaju dosta veliki efekat na apsorpciju i translokaciju Fe u boru i lipi. Zova ima osobine ekskludera Fe samo u kontrolnoj zoni, a na svim ostalim mestima uzorkovanja, translokacija Fe iz korenja u lišće je efikasna. Utvrđeno je da se pri nižim koncentracijama Fe u zemljištu zove (<2,44%), najveće količine Fe akumuliraju u korenju, dok se efikasna translokacija Fe iz korenja u lišće odvija sa povećanjem koncentracija Fe u zemljištu (>3,16%).

Bor, lipa i zova na pojedinim mestima pokazuju osobine ekskludera **Cu**, dok na drugim mestima efikasno translociraju Cu iz korenja u lišće. Mehanizam adaptacije bora i zove na povećane koncentracije Cu u zemljištu, zasniva se na efikasnoj translokaciji Cu iz korenja u lišće. Pri koncentracijama Cu u zemljištu bora većim od oko 1200 mg/kg, na efikasnu translokaciju Cu iz korenja u iglice bora utiču koncentracije Cu u zemljištu. Najveće količine usvojenog Cu zova zadržava u korenju, pri koncentracijama Cu u zemljištu manjim od oko 40 mg/kg. Koncentracije Cu u zemljištu zove, imaju dominantan uticaj na efikasnu translokaciju Cu iz korenja u lišće, kada je sadržaj Cu u zemljištu veći od oko 900 mg/kg. Utvrđeno je da pri višim koncentracijama Cu u zemljištu ispitivanog područja, lipa ima sposobnost da najveći udeo Cu zadržava u korenju, što znači da lipa ima drugačije strategije adaptacije na visoke koncentracije Cu u zemljištu, u odnosu na bor i zovu. Kada je sadržaj Cu u zemljištu lipe >720 mg/kg, dominantan uticaj na translokaciju Cu iz korenja u lišće lipe imaju koncentracije Cu u zemljištu, i u tim uslovima se lipa može koristiti u **fitostabilizaciji** Cu. Ipak, na mestima uzorkovanja UI i R2 gde se lipa ponašala kao ekskluder, koncentracije Cu u lišću su veće od prekomernih, a pretpostavlja se da je uzrok tome usvajanje Cu iz vazduha u lišće.

Bor i zova imaju osobine ekskludera **Zn** samo na po jednom mestu uzorkovanja. Translokacija Zn iz korenja u lišće bora i zove je efikasna na većini mesta uzorkovanja. Utvrđeno je da koncentracije Zn u zemljištu imaju dominantan uticaj na translokaciju Zn iz korenja u lišće bora i zove, pri koncentracijama Zn u zemljištu većim od oko 140 mg/kg i 125 mg/kg, respektivno. Adaptacija lipe na povećane koncentracije Zn u zemljištu, zasniva se na zadržavanju Zn u korenju, što je suprotno strategiji koju koriste bor i zova. Utvrđeno je da je translokacija Zn u lišće lipe ograničena kada su koncentracije Zn u zemljištu veće od oko 160 mg/kg (mesta UI, R2 i T2), što potvrđuje mogućnost lipe da se koristi u **fitostabilizaciji** zemljišta zagađenog cinkom.

Bor iz okoline rudnika bakra Cerovo (mesto I2) i kontrolne zone, kao i lipa iz kontrolne zone, imaju osobine ekskludera **Pb**. Na efikasnost translokacije Pb iz korenja bora u iglice, sadržaj Pb u zemljištu nema dominantan efekat. Lipa i zova, u većem opsegu određenih koncentracija Pb u zemljištu, efikasno translociraju Pb u lišće. Sadržaj Pb u

zemljištu lipa i zove ima dominantan uticaj na efikasnu translokaciju Pb iz korenja u nadzemne delove kada su koncentracije Pb u zemljištu lipa veće od oko 23 µg/g (K zona), a u zemljištu zove pri koncentracijama većim od oko 25 mg/kg.

Bor iz okoline rudnika bakra Cerovo (mesto I2), i zova iz urbane zone i okoline sela Oštrej (mesto R1) imaju osobine **ekskludera Ni**. U uslovima kada su koncentracije Ni u zemljištu bora >21 mg/kg, a u zemljištu zove >19 mg/kg, koncentracije Ni u zemljištu utiču na efikasnu translokaciju Ni iz korenja u lišće. Za razliku od bora i zove, lipa efikasno translocira Ni iz korenja u lišće u opsegu nižih koncentracija Ni u zemljištu manjim od oko 14–15 mg/kg, dok je translokacija pri višim koncentracijama ograničena.

Uslovi sredine u okolini Brestovačke banje (mesto T1) i kontrolne zone, pogoduju da se bor svrsta u **ekskludere As**. Zova iz okoline rudnika bakra Cerovo (mesto I2) takođe ima osobine ekskludera As, dok lipa ni na jednom mestu uzorkovanja nema osobine ekskludera As. Translokacija As iz korenja lipa je utvrđena u opsegu koncentracija As u zemljištu od 11,63 do 546,81 mg/kg. Na efikasnost translokacije As iz korenja zove i bora, najveći uticaj imaju koncentracije As u zemljištu veće od 32 mg/kg i 100 mg/kg, respektivno. Zato je utvrđeno da bor, lipa i zova imaju iste mehanizme adaptacije na povećane koncentracije As u rizosferi.

Bor sa mesta uzorkovanja R1, I1, I2 i K ima osobine **ekskludera Cd**, zadržavajući Cd u korenju, bez dalje translokacije u nadzemne delove, što je jedan od kriterijuma za **fitostabilizaciju**. Pri sadržaju Cd u zemljištu bora većem od oko 2 mg/kg, koncentracije Cd u rizosferi bora utiču na translokaciju Cd iz korenja u nadzemne delove. Zova takođe efikasno translocira Cd iz korenja u lišće, pri koncentracijama Cd u zemljištu od 1,31 do 19,83 mg/kg. Lipa se u većem opsegu detektovanih koncentracija Cd u zemljištu (većim od oko 2,20 mg/kg), na mestima UI, R1, R2 i T2, ponaša kao **ekskluder**, i ima mogućnosti da se koristi u **fitostabilizaciji** zemljišta zagađenog kadmijumom. Strategija adaptacije lipa na određene koncentracije Cd u zemljištu se razlikuje od strategija koje poseduju bor i zova.

U specifičnim uslovima sredine, i u uslovima povećanih koncentracija određenih elemenata u zemljištu, jedino lipa ima mogućnosti da se koristi u fitostabilizaciji i to bakra, cinka i kadmijuma.

Velika sposobnost usvajanja i translokacije toksičnih i kancerogenih materija u boru, lipi i zovi je zabrinjavajuće zbog korišćenja ispitivanih biljnih vrsta u lekovite svrhe.

Ovim istraživanjem je potvrđeno da se iz topionice bakra i sa flotacijskog jalovišta u Boru, emituju veće količine zagađujućih supstanci, nego iz procesa za iskopavanje i obogaćenje rude. Ispitivanjem biljnog materijala i zemljišta je utvrđeno da su Cu, As, Cd i Pb glavne zagađujuće materije u ispitivanoj oblasti.

Ova vrsta istraživanja je od velikog značaja za ocenu opasnosti od ulaska toksičnih materija preko osnovnih životnih resursa u lanac ishrane. Dalja istraživanja iz ove oblasti treba usmeriti na unapređivanje biomonitoringa i fitoremedijacije, kao i na definisanje mehanizama adaptacije i ostalih biljnih vrsta koje rastu na području Bora i okoline. Poželjno je sprovođenje biomonitoring zagađenja životne sredine nakon početka rada nove topionice, kojom je zagarantovan čist vazduh u Boru i okolini. Tako će se razumeti koliko se dugo ispoljavaju kumulativni efekti istorijskog zagađenja osnovnih životnih resursa.

8. LITERATURA

- Aboal J.R., Fernández J.A., Carballeira A., Oak leaves and pine needles as biomonitors of airborne trace elements pollution. *Environmental and Experimental Botany*, 51 (2004) 215–225.
- Aboal J.R., Fernández J.A., Carballeira A., Sampling optimization, at site scale, in contamination monitoring with moss, pine and oak. *Environmental Pollution*, 115 (2001) 313–316.
- Alagić S.Č., Stankov V.P., Jovanović, Mitić V.D., Cvetković J.S., Petrović G.M., Stojanović G. S., Bioaccumulation of HMW PAHs in the roots of wild blackberry from the Bor region (Serbia): Phytoremediation and biomonitoring aspects. *Science of The Total Environment*, 562 (15) (2016) 561–570.
- Alagić S.Č., Tošić S.B., Dimitrijević M.D., Antonijević M.M., Nujkić M.M., Assessment of the quality of polluted areas based on the content of heavy metals in different organs of the grapevine (*Vitis vinifera*) cv Tamjanika. *Environmental Science and Pollution Research*, 22 (9) (2015) 7155-7175.
- Alagić S.Č., Šerbula S.M., Tošić S.B., Pavlović A.N., Petrović J. V., Bioaccumulation of Arsenic and Cadmium in Birch and Lime from the Bor Region. *Arch Environ Contam Toxicol*, 65 (2013) 671–682.
- Al-Alawi M.M., Mandiwana K.L., The use of Aleppo pine needles as a bio-monitor of heavy metals in the atmosphere. *Journal of Hazardous Materials*, 148 (2007) 43–46.
- Ali H., Khan E., Sajad M.A., Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91 (2013) 869–881.
- Alkorta I., Hernández-Allica J., Becerril J. M., Amezaga I., Albizu I., Garbisu C., 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 Bio/Technology*, 3 (2004) 71–90.
- Álvarez E., Fernández-Marcos M.L., Monterroso C., Fernández-Sanjurjo M.J., Application of aluminium toxicity indices to soils under various forest species, *Forest Ecology and Management*. 211 (2005) 227–239.
- Aničić M., Spasić T., Tomašević M., Rajšić S., Tasić M., Trace elements accumulation and temporal trends in leaves of urban deciduous trees (*Aesculus hippocastanum* and *Tilia* spp.). *Ecological Indicators*, 11 (2011) 824–830.

- Antonijević M.M., Dimitrijević M.D., Stevanović Z.O., Šerbula S.M., Bogdanović G.D., Investigation of the possibility of copper recovery from the flotation tailings by acid leaching. *Journal of Hazardous Materials*, 158 (2008) 23-34.
- Ataabadi M., Hoodaji M., Najafi P., Assessment of washing procedure for determination some of airborne metal concentrations. *African Journal of Biotechnology*, 11(19) (2012) 4391–4395.
- Atkinson M. D., Atkinson E., *Sambucus nigra* L., *Journal of Ecology*, 90 (2002) 895–923.
- Baker A. J. M., Accumulators and Excluders-Strategies in Response of Plants to Heavy Metals. *Journal of plant nutrition*, 3(1-4) (1981) 643–654.
- Baker A.J.M., Brooks R.R., Terrestrial Higher Plants which Hyperaccumulate Metallic Elements-A Review of their Distribution, Ecology and Phytochemistry. *Biorecovery*, 1 (1989) 81-126.
- Baltrėnaitė E., Lietuvninkas A., Baltrėnas P., Use of Dynamic Factors to Assess Metal Uptake and Transfer in Plants—Example of Trees. *Water Air Soil Pollut*, 223 (2012) 4297–4306.
- Barton L.L., Abadía J., *Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms*. Springer, Netherlands, (2006).
- Bertolotti G., Gialanella S., Review: use of conifer needles as passive samplers of inorganic pollutants in air quality monitoring. *Anal. Methods*, 6 (2014) 6208–6222.
- Bhargava A., Carmona F.F., Bhargava M., Srivastava S., Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 105 (2012) 103–120.
- Bogdanović G., Trumić M., Trumić M., Antić D.V., Upravljanje otpadom iz rudarstva – nastanak i mogućnost prerade. *Reciklaža i održivi razvoj*, 4 (2011) 37-43.
- Bolan N., Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Kumpiene J., Park J., Makino T., Kirkham M. B., Scheckel K., Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils—to mobilize or immobilize. *J Hazard Mater.*, 266 (2014) 141–66.
- Bonanno G., Comparative performance of trace element bioaccumulation and biomonitoring in the plant species *Typha domingensis*, *Phragmites australis* and *Arundo donax*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 97 (2013) 124–130.
- Čeburnis D., Steinnes E., Conifer needles as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: comparison with mosses and precipitation, role of the canopy. *Atmospheric Environment*, 34 (2000) 4265–4271.

- Chrzan A., Necrotic bark of common pine (*Pinus sylvestris* L.) as a bioindicator of environmental quality. *Environ Sci Pollut Res*, 22 (2015) 1066–1071.
- Chudzińska E., J. Diatta B., Wojnicka-Półtorak A., Adaptation strategies and referencing trial of Scots and black pine populations subjected to heavy metal pollution. *Environ Sci Pollut Res*, 21 (2014) 2165–2177.
- Cicek, A., Koparal, A.S., Accumulation of sulfur and heavy metals in soil and tree leaves sampled from the surroundings of Tunçbilek Thermal Power Plant. *Chemosphere*, 57 (2004) 1031–1036.
- Csavina J., Landázuri A., Wonaschütz A., Rine K., Rheinheimer P., Barbaris B., Conant W., Sáez A. E., Betterton E. A., Metal and Metalloid Contaminants in Atmospheric Aerosols from Mining Operations. *Water Air Soil Pollut*, 221 (2011) 145–157.
- Dal Corso G., Manara A., Furini A., An overview of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots. *Metallomics*, 5(9) (2013) 1117–32.
- Dimitrijević M.D., Nujkić M.M., Alagić S.Č., Milić S.M., Tošić S.B., Heavy metal contamination of topsoil and parts of peach-tree growing at different distances from a smelting complex. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(2) (2016) 615-630.
- Dmuchowski W., Bytnerowicz A., Long-term (1992–2004) record of lead, cadmium, and zinc air contamination in Warsaw, Poland: Determination by chemical analysis of moss bags and leaves of Crimean linden. *Environmental Pollution*, 157 (2009) 3413–3421.
- Dmuchowski W., Gozdowski D., Baczewska A.H., Comparison of four bioindication methods for assessing the degree of environmental lead and cadmium pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 197 (2011) 109–118.
- Dogan Y., Ugulu I., Baslar S., Turkish Red Pine as a Biomonitor: A Comparative Study of the Accumulation of Trace Elements in the Needles and Bark. *Ekoloji*, 19(75) (2010) 88–96.
- Domínguez M.T., Teodoro Marañón, Murillo J.M., Schulin R., Robinson B.H., Trace element accumulation in woody plants of the Guadiamar Valley, SW Spain: A large-scale phytomanagement case study. *Environmental Pollution*, 152 (2008) 50–59.
- Dongarrá G., Varrica D., Sabatino G., Occurrence of platinum, palladium and gold in pine needles of *Pinus pinea* L. from the city of Palermo (Italy). *Applied Geochemistry*, 18 (2003) 109–116.
- Dzierżanowski K., Gawroński S.W., Use of trees for reducing particulate matter pollution in air. *Chall Mod Technol*, 1(2) (2011) 69–73.

- EC, 2004. Council Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Off. J. Eur. Communities L 23, 3–16.
- EIA Study-New Smelter and Sulphuric Acid Plant Project, 2010. University of Belgrade, Faculty of Metallurgy, SNC Lavalin.
- Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdorani F., Xie Y., Heavy Metal Stress and Some Mechanisms of Plant Defense Response. The Scientific World Journal, Volume 2015, Article ID 756120, 18 pages.
- ERM, Environmental Resources Management, First Consultation Report: Bor and Majdanpek. The Privatization Agency - Republic of Serbia. February, 2006 – contained Environmental Assessment of RTB Bor Operations – Final Report August 2006.
- Ernst W.H.O., Phytoextraction of mine wastes – Options and impossibilities, *Chemie der Erde*, 65 (2005) S1, 29–42.
- Favas P.J.C., Pratas J., Prasad M.N.V., Temporal variation in the arsenic and metal accumulation in the maritime pine tree grown on contaminated soils. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 10 (2013) 809–826.
- Favas P.J.C., Pratas J., Varun M., D’Souza R., Paul M.S., Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora, in: Hernandez-Soriano M. C. (Eds.), *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, In Tech, (2014).
- Freer-Smith P.H., Beckett K.P., Taylor G., Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* ‘Beaupré’, *Pinus nigra* and *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*, 133 (2005) 157–167.
- Freitas, H., Prasad, M.N.V., Pratas, J., Analysis of serpentinophytes from north-east of Portugal for trace metal accumulation—relevance to the management of mine environment. *Chemosphere*, 54 (2004) 1625–1642.
- Fuentes D., Disante K. B., Valdecantos A., Cortina J., Vallejo V. R., Sensitivity of Mediterranean woody seedlings to copper, nickel and zinc. *Chemosphere*, 66 (2007) 412–420.
- Gałuszka A., The Chemistry of Soils, Rocks and Plant Bioindicators in Three Ecosystems of the Holy Cross Mountains, Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 110 (2005) 55–70.

- Gedik T., Akyildiz M., Environmental Impact Assessment of Mining Activities in the Vicinity of Madenköy (Nigde) Using Biogeochemical Modeling. *Asian Journal of Chemistry*, 25(16) (2013) 9351–9355.
- González-Castanedo Y., Moreno T., Fernández-Camacho R., Sánchez de la Campa A.M., Alastuey A., Querol X., de la Rosa J., Size distribution and chemical composition of particulate matter stack emissions in and around a copper smelter. *Atmospheric Environment*, 98 (2014) 271–282.
- Górecki T., Namieśnik J., Passive sampling. *Trends in analytical chemistry*, 21(4) (2002) 276–291.
- Grantz D.A., Garner J.H.B., Johnson D.W., Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29 (2003) 213–239.
- Hagen-Thorn A., Stjernquist I., Micronutrient levels in some temperate European tree species: a comparative field study. *Trees*, 19 (2005) 572–579.
- Helmisaari H.-S., Makkonen K., Olsson M., Viksna A., Mälkönen E., Fine-root growth, mortality and heavy metal concentrations in limed and fertilized *Pinus silvestris* (L.) stands in the vicinity of a Cu-Ni smelter in SW Finland. *Plant and Soil* 209 (1999) 193–200.
- Hopkins W., Hüner N. *Introduction to plant physiology*. Wiley (2008).
- Hu Y., Wang D., Wei L., Zhang X., Song B., Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan'an city of the Loess Plateau, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 110 (2014) 82–88.
- Hunt A. J., Anderson C. W.N., Bruce N., Garcia A. M., Graedel T. E., Hodson M., Meech J. A., Nassar N. T., Parker H. L., Rylott E. L., Sotiriou K., Zhang Q., Clark J. H., Phytoextraction as a tool for green chemistry. *Green Process Synth*, 3 (2014) 3–22.
- IRM Bor, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Izveštaji o kvalitetu vazduha u Boru od 1994-2013, Laboratorija za hemijska ispitivanja HTK.
- ISO, 2005. International Organisation for Standardisation. *Soil Quality: Determination of pH*, ISO 10390. ISO, Geneva.
- Jana U., Chassany V., Bertrand G., Castrec-Rouelle M., Aubry E., Boudsocq S., Laffray D., Repellin A., Analysis of arsenic and antimony distribution within plants growing at an old mine site in Ouche (Cantal, France) and identification of species suitable for site revegetation. *Journal of Environmental Management*, 110 (2012) 188–193.
- Janhäll S., Review on urban vegetation and particle air pollution e Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105 (2015) 130–137.

- Jenić D., Golubović P., Milićević D., Razvoj rudarskog kompleksa Veliki Krivelj–Cerovo u RTB–BOR. III Simpozijum sa međunarodnim učešćem „RUDARSTVO 2012” Zlatibor, 07.-10. maj 2012., Zbornik radova, str. 9-16.
- Jeyakumar P., Loganathan P., Anderson C. W. N., Sivakumaran S., Mc Laren R. G., Comparative tolerance of *Pinus radiata* and microbial activity to copper and zinc in a soil treated with metal-amended biosolids. *Environ Sci Pollut Res*, 21 (2014) 3254–3263.
- Kabata-Pendias A., Trace Elements in Soils and Plants. fourth ed. Boca Raton, Florida, (2011).
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H., Trace Elements in Soils and Plants. third ed. Boca Raton, Florida, (2001).
- Kabuce N., Priede N., (2006) Invasive Alien Species Fact Sheet-*Sambucus nigra*. Online Database of the North European and Baltic Network on Invasive Alien Species–NOBANIS, www.nobanis.org.
- Kader M., Lamb D. T., Megharaj M., Naidu R., Sorption parameters as a predictor of arsenic phytotoxicity in Australian soils. *Geoderma*, 265 (2016) 103–110.
- Kandziora-Ciupa M., Ciepał R., Nadgórska-Socha A., Barczyk G., Accumulation of heavy metals and antioxidant responses in *Pinus sylvestris* L. needles in polluted and non-polluted sites. (2016) DOI 10.1007/s10646-016-1654-6.
- Kaya G., Ozcan C., Yaman M., Flame Atomic Absorption Spectrometric Determination of Pb, Cd, and Cu in *Pinus nigra* L. and *Eriobotrya japonica* Leaves Used as Biomonitors in Environmental Pollution. *Bull Environ Contam Toxicol*, 84 (2010) 191–196.
- Kidd P., Barcelo J., Bernal M. P., Navari-Izzo F., Poschenrieder C., Shilev S., Clemente R., Monterroso C., Trace element behaviour at the root–soil interface: Implications in phytoremediation. *Environmental and Experimental Botany*, 67 (2009) 243–259.
- Kocić K., Spasić T., Aničić Urošević M., Tomašević M., Trees as natural barriers against heavy metal pollution and their role in the protection of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 15 (2014) 227–233.
- Kole C., Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants. Springer, Berlin, (2007).
- Kolodziej B., Maksymiec N., Drozdal K., Antonkiewicz J., Effect of traffic pollution on chemical composition of raw elderberry (*Sambucus nigra* L.). *J. Elem. s.*, 17(1) (2012) 67–78.
- Konijnendijk C.C., Nilsson K., Randrup T.B., Schipperijn J., Urban Forests and Trees, A Reference Book. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2005).

- Koptsik G.N., Problems and Prospects Concerning the Phytoremediation of Heavy Metal Polluted Soils: A Review. *Eurasian Soil Science*, 47(9) (2014) 923–939.
- Kord B., Mataji A., Babaie S., Pine (*Pinus eldarica* Medw.) needles as indicator for heavy metals pollution. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 7(1) (2010) 79–84.
- Kuang Y.W., Wen D.Z., Zhou G.Y., Liu S.Z., Distribution of elements in needles of *Pinus massoniana* (Lamb.) was uneven and affected by needle age. *Environmental Pollution*, 145 (2007) 730–737.
- Kvesitadze G., Khatishvili G., Sadunishvili T., Ramsden J.J., Biochemical Mechanisms of Detoxification in Higher Plants. Springer, Verlag, (2006).
- Lilić J., Filipović V., Žikić M., Stojadinović S., The recultivation of the RBB-Bor Cerovocementacija 1 open pit waste dump. *Journal of Agricultural Sciences*, 53(1) (2008) 53-61.
- Li-qiang M., Hai-yan S., Ning Z., Absorption capacity of major urban afforestation species in northeastern China to heavy metal pollutants in the atmosphere. *Journal of Forestry Research*, 15(I) (2004) 73–76.
- Mackova M., Dowling D., Macek T., Phytoremediation and Rhizoremediation. Springer, Netherlands, (2006).
- Madejón P., Lepp N. W., Arsenic in soils and plants of woodland regenerated on an arsenic-contaminated substrate: A sustainable natural remediation? *Science of the Total Environment*, 379 (2007) 256–262.
- Maisto G., Alfani A., Baldantoni D., De Marco A., De Santo A.V., Trace metals in the soil and in *Quercus ilex* L. leaves at anthropic and remote sites of the Campania Region of Italy. *Geoderma*, 22 (2004) 269–279.
- Marakaev O. A., Smirnova N. S., Zagoskina N. V., Technogenic Stress and Its Effect on Deciduous Trees (an Example from Parks in Yaroslavl). *Russian Journal of Ecology*, 37(6) (2006) 373–377.
- Marć M., Tobiszewski M., Zabiegała B., de la Guardia M., Jacek N., Current air quality analytics and monitoring: A review. *Analytica Chimica Acta*, 853 (2015) 116–126.
- Markert B. A., Breure A.M., Zechmeister H.G., Definitions, strategies and principles for bioindication/biomonitoring of the environment, in: Markert B. A., Breure A.M., Zechmeister H.G. (Eds.), *Trace Metals and other Contaminants in the Environment*. Elsevier, (2003) 3–21.
- Marques M.C., Gravenhorst G., Ibrom A., Input of Atmospheric Particles into Forest Stands by Dry Deposition. *Water, Air, and Soil Pollution*, 130 (2001) 571-576.

- Meiman P.J., Davis N.R., Brummer J.E., Ippolito J.A., Riparian Shrub Metal Concentrations and Growth in Amended Fluvial Mine Tailings. *Water Air Soil Pollut*, 223 (2012) 1815–1828.
- Mendez M.O., Maier R.M., Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments-An Emerging Remediation Technology. *Environmental Health Perspectives*, 116(3) (2008) 278–283.
- Migeon A., Richaud P., Guinet F., Chalot M., Blaudez D., Metal Accumulation by Woody Species on Contaminated Sites in the North of France. *Water Air Soil Pollut*, 204 (2009) 89–101.
- Milanović D., Stojanović Z., Rajković R., Ignjatović M., Mikić M., Milanović Z., Stanje rudarstva i PMS-a i stvaranje uslova za povećanje kapaciteta proizvodnje bakra u kompaniji RTB Bor. III Simpozijum sa međunarodnim učešćem „RUDARSTVO 2012” Zlatibor, 07.-10. maj 2012., Zbornik radova, str. 46-68.
- Mingorance M. D., Valdés B., Rossini Oliva S., Strategies of Heavy Metal Uptake by Plants Growing under Industrial Emissions. *Environ. Int.*, 33 (2007) 514–520.
- Mitchell R., Maher B.A., Kinnersley R., Rates of particulate pollution deposition onto leaf surfaces: Temporal and inter-species magnetic analyses. *Environmental Pollution*, 158 (2010) 1472–1478.
- Mori J., Hanslin H.M., Burchi G., Sæbø A., Particulate matter and element accumulation on coniferous trees at different distances from a highway. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(1) (2015) 170–177.
- Moyer-Henry K., Silva I., Macfall J., Johannes E., Allen N., Goldfarb B., Rufty T., Accumulation and localization of aluminium in root tips of loblolly pine seedlings and the associated ectomycorrhiza *Pisolithus tinctorius*. *Plant, Cell and Environment*, 28 (2005) 111–120.
- Nikolić N., Nikolić M., Gradient analysis reveals a copper paradox on floodplain soils under long-term pollution by mining waste. *Science of the Total Environment* 425 (2012) 146–154.
- Nikonov V., Goryainova V., Lukina N., Ni and Cu migration and accumulation in forest ecosystems Kola Peninsula. *Chemosphere*, 42 (2001) 93–100.
- Nowak J., Friend A. L., Aluminum fractions in root tips of slash pine and loblolly pine families differing in Al resistance. *Tree Physiology*, 25 (2005) 245–250.
- Nujkić M.M., Dimitrijević M.M., Alagić S.Č., Tošić S.B. and Petrović J.V., Impact of metallurgical activities on the content of trace elements in the spatial soil and plant parts of *Rubus fruticosus* L. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 18 (2016) 350-360.

- Odabasi M., Tolunay D., Kara M., Falay E.O., Tuna G., Altioğ H., Dumanoglu Y., Bayram A., Elbir T., Investigation of spatial and historical variations of air pollution around an industrial region using trace and macro elements in tree components. *Science of the Total Environment*, 550 (2016) 1010–1021.
- Orsega E.F., Agnoli F., Cacco G., Delaney E., Argese E., Effects of copper on *Sambucus nigra* L. seedlings studied by electron paramagnetic resonance and atomic absorption spectroscopies. *Chemosphere*, 53 (2003) 263–268.
- Ots K., Mandre M., Monitoring of heavy metals uptake and allocation in *Pinus sylvestris* organs in alkalised soil. *Environ Monit Assess*, 184 (2012) 4105–4117.
- Ovečka M., Takáč T., Managing heavy metal toxicity stress in plants: Biological and biotechnological tools. *Biotechnology Advances*, 32 (2014) 73–86.
- Padmavathiamma P.K., Li L.Y., Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants. *Water Air Soil Pollut*, 184 (2007) 105–126.
- Påhlsson, A.-M.B., Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants. *Water Air Soil Pollut.*, 47 (1989) 287–319.
- Pan Y., Tian S., Li X., Sun Y., Li Y., Wentworth G. R., Wang Y., Trace elements in particulate matter from metropolitan regions of Northern China: Sources, concentrations and size distributions. *Science of the Total Environment*, 537 (2015) 9–22.
- Parraga-Aguado I., Querejeta J.-I., González-Alcaraz M.-N., Jiménez-Cárceles F. J., Conesa H. M., Usefulness of pioneer vegetation for the phytomanagement of metal(loid)s enriched tailings: Grasses vs. shrubs vs. trees. *Journal of Environmental Management*, 133 (2014) 51–58.
- Parzych A., Jonczak J., Pine needles (*Pinus Sylvestris* L.) as bioindicators in the assessment of urban environmental contamination with heavy metals. *Journal of Ecological Engineering*, 15(3) (2014) 29–38.
- Piczak K., Leśniewicz A., Żyrnicki W., Metal concentrations in deciduous tree leaves from urban areas in Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 86 (2003) 273–287.
- Pietrzykowski M., Socha J., van Doorn N. S., Linking heavy metal bioavailability (Cd, Cu, Zn and Pb) in Scots pine needles to soil properties in reclaimed mine areas. *Science of the Total Environment*, 470–471 (2014) 501–510.
- Popek R., Gawrońska H., Wrochna M., Gawroński S. W., Saebø A., Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes—a 3-year study. *Int J Phytoremediation*, 15(3) (2013) 245–56.

- Przybysz A., Sæbø A., Hanslin H.M., Gawroński S.W., Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Science of the Total Environment*, 481 (2014) 360–369.
- Pulford I.D., Watson C., Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review. *Environment International*, 29 (2003) 529–540.
- Pytlakowska K., Kita A., Janoska P., Połowniak M., Kozik V., Multi-element analysis of mineral and trace elements in medicinal herbs and their infusions. *Food Chemistry*, 135 (2012) 494–501.
- Radmacher P., Atmospheric Heavy Metals and Forest Ecosystems. Work report of the Institute for World Forestry 2003/12, Institute for World Forestry, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products. Hamburg, September (2003).
- Ramadan A.A., Mandil H., Determination of Arsenic and Some Heavy Metals Levels in Roadside Soils and Leaves of Aleppo City, Syria. *Asian J. Chem.*, 22(3) (2010) 2195–2206.
- Rautio P., Huttunen S., Lamppu J., Seasonal foliar chemistry of northern Scots Pines under sulphur and heavy metal pollution. *Chemosphere*, 37(2) (1998) 271–281.
- Reyes B.A., Mejía V., Goguitchaichvili A., Escobar J., Bayona G., Bautista F., Morales J. C., Ihl T. J., Reconnaissance environmental magnetic study of urban soils, dust and leaves from Bogotá, Colombia. *Stud. Geophys. Geod.*, 57 (2013) 741–754.
- Rodriguez J.H., Wannaz E.D., Salazar M.J., Pignata M.L., Fangmeier A., Franzaring J., Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the tree foliage of *Eucalyptus rostrata*, *Pinus radiata* and *Populus hybridus* in the vicinity of a large aluminium smelter in Argentina. *Atmospheric Environment*, 55 (2012) 35–42.
- Rossini Oliva S., Mingorance M.D., Assessment of airborne heavy metal pollution by aboveground plant parts. *Chemosphere*, 65 (2006) 177–182.
- Rossini Oliva S., Mingorance M.D., Study of the Impact of Industrial Emission on the Vegetation Grown Around Huelva (South of Spain) City. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 49 (2004) 291–302.
- Roy M., Giri A.K., Dutta S., Mukherjee P., Integrated phytobial remediation for sustainable management of arsenic in soil and water. *Environment International*, 75 (2015) 180–198.
- Rucandio M.I., Petit-Domínguez M.D., Fidalgo-Hijano C., García-Giménez R., Biomonitoring of chemical elements in an urban environment using arboreal and bush plant species. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 18 (2011) 51–63.

- Saarela K.-E., Harju L., Rajander J., Lill J.-O., Heselius S.-J., Lindroos A., Mattsson K., Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study. *Science of the Total Environment*, 343 (2005) 231–241.
- Sæbø A., Popek R., Nawrot B., Hanslin H. M., Gawronska H., Gawronski S. W., Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 427–428 (2012) 347–354.
- Samecka-Cymerman A., Kosior G., Kempers A.J., Comparison of the moss *Pleurozium schreberi* with needles and bark of *Pinus sylvestris* as biomonitors of pollution by industry in Stalowa Wola (southeast Poland). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 65 (2006) 108–117.
- Sánchez de la Campa A.M., de la Rosa J.D., Sánchez-Rodas D., Oliveira V., Alastuey A., Querol X., Gómez Ariza J. L., Arsenic speciation study of PM_{2.5} in an urban area near a copper smelter. *Atmospheric Environment*, 42 (2008) 6487–6495.
- Sánchez-López A.S., Carrillo-González R., González-Chávez M. del C.A., Rosas-Saito G.H., Vangronsveld J., Phytobarriers: Plants capture particles containing potentially toxic elements originating from mine tailings in semiarid regions. *Environmental Pollution*, 205 (2015) 33–42.
- Sardans J., Peñuelas J., Trace element accumulation in the moss *Hypnum cupressiforme* Hedw. and the trees *Quercus ilex* L. and *Pinus halepensis* Mill. in Catalonia. *Chemosphere*, 60 (2005) 1293–1307.
- Sawidis T., Breuste J., Mitrovic M., Pavlovic P., Tsigaridas K., Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environmental Pollution*, 159 (2011) 3560–3570.
- Sawidis T., Krystallidis P., Veros D., Chettri M., A Study of Air Pollution with Heavy Metals in Athens City and Attica Basin Using Evergreen Trees as Biological Indicators. *Biol Trace Elem Res*, 148 (2012) 396–408.
- Schaubroeck T., Deckmyn G., Neiryneck J., Staelens J., Adriaenssens S., Dewulf J., Muys B., Verheyen K., Multilayered Modeling of Particulate Matter Removal by a Growing Forest over Time, From Plant Surface Deposition to Washoff via Rainfall. *Environ. Sci. Technol.*, 48 (2014) 10785–10794.
- Serbula S.M., Miljkovic D.Dj., Kovacevic R.M., Ilic A.A., Assessment of airborne heavy metal pollution using plant parts and topsoil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 76 (2012) 209–214.

- Šerbula S.M., Antonijević M.M., Milosević N.M., Milić S.M., Ilić A.A., Concentrations of particulate matter and arsenic in Bor (Serbia). *Journal of Hazardous Materials*, 181 (2010) 43–51.
- Serbula S.M., Ilic A.A., Kalinovic J.V., Kalinovic T.S., Petrovic N.B., Assessment of air pollution originating from copper smelter in Bor (Serbia). *Environ. Earth Sci.*, 71 (2014b) 1651–1661.
- Serbula S.M., Kalinovic T.S., Ilic A.A., Kalinovic J.V., Steharnik M.M., Assessment of airborne heavy metal pollution using *Pinus* spp. and *Tilia* spp. *Aerosol Air Qual. Res.*, 13(2) (2013a) 563–573.
- Serbula S.M., Kalinovic T.S., Kalinovic J.V., Ilic A.A., Exceedance of air quality standards resulting from pyro-metallurgical production of copper: a case study, Bor (Eastern Serbia). *Environ. Earth Sci.*, 68(7) (2013b) 1989–1998.
- Serbula S.M., Radojevic A.A., Kalinovic J.V., Kalinovic T.S., Indication of airborne pollution by birch and spruce in the vicinity of copper smelter. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 21(19) (2014a) 11510–11520.
- Seth C.S., A Review on Mechanisms of Plant Tolerance and Role of Transgenic Plants in Environmental Clean-up. *Bot. Rev.*, 78 (2012) 32–62.
- Shah K., Nongkynrih J.M., Metal hyperaccumulation and bioremediation. *Biologia Plantarum*, 51(4) (2007) 618–634.
- Sheoran V., Sheoran A.S., Poonia P., Phytomining: A review. *Minerals Engineering*, 22 (2009) 1007–1019.
- Singh S.N., Verma A., Phytoremediation of Air Pollutants: A Review, in: Singh S.N., Tripathi R.D. (Eds.), *Environmental Bioremediation Technologies*. Springer-Verlag, Berlin, (2007) 293–314.
- Sinha R.K., Herat S., Tandon P.K., Phytoremediation: Role of Plants in Contaminated Site Management, in: Singh S. N., Tripathi R.D. (Eds.), *Environmental Bioremediation Technologies*. Springer-Verlag, Berlin, (2007) 315–329.
- Skonieczna J., Małek S., Polowy K., Węgiel A., Element content of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) stands of different densities. *Drewno*, 57(192) (2014) 77–87.
- Službeni glasnik Republike Srbije, 2010. Uredba o programu sistemskog praćenja kvaliteta zemljišta, indikatorima za ocenu rizika od degradacije zemljišta i metodologiji za izradu remedijacionih programa, br. 88/2010.
- Službeni glasnik Republike Srbije, 2013. Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha, br. 63/2013.

- Song Y., Maher B. A., Li F., Wang X., Sun X., Zhang H., Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution. *Atmospheric Environment*, 105 (2015) 53–60.
- Sõukand R., Quave C. L., Pieroni A., Pardo-de-Santayana M., Tardío J., Kalle R., Łuczaj L., Svanberg I., Kolosova V., Aceituno-Mata L., Menendez-Baceta G., Kołodziejska-Degórska I., Pirożnikow E., Petkevičius R., Hajdfari A., Mustafa B., Plants used for making recreational tea in Europe: a review based on specific research sites. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 9(1) (2013) 58.
- Souza L. A., Piotto F. A., Nogueiro R. C., R Azevedo. A., Use of non-hyperaccumulator plant species for the phytoextraction of heavy metals using chelating agents. *Sci. Agric.*, 70(4) (2013) 290–295.
- Sparks, D.L., *Environmental Soil Chemistry*. second ed. Academic Press, Amsterdam. (2003)
- Zseni, A., Goldie, H., Bárányi-Kevei, I., 2003. Limestone pavements in Great Britain and their role of soil cover in their evolution. *Acta Carsologica*, 32/1 (5), 57–67.
- St. Clair S. B., Lynch J. P., Element accumulation patterns of deciduous and evergreen tree seedlings on acid soils: implications for sensitivity to manganese toxicity. *Tree Physiology*, 25 (2005) 85–92.
- Stankovic S., Kalaba P., Stankovic A. R., Biota as toxic metal indicators, *Environ Chem Lett*, 12 (2014) 63–84.
- Šućur K.M., Aničić M.P., Tomašević M.N., Antanasijević D.Z., Perić-Grujić A.A., Ristić M.Đ., Urban deciduous tree leaves as biomonitors of trace element (As, V and Cd) atmospheric pollution in Belgrade, Serbia. *J. Serb. Chem. Soc.*, 75(10) (2010) 1453–1461.
- Sun F.F., Wen D.Z., Kuang Y.W., Li J., Guang Zhang J., Concentrations of sulphur and heavy metals in needles and rooting soils of Masson pine (*Pinus massoniana* L.) trees growing along an urban–rural gradient in Guangzhou, China. *Environ Monit Assess*, 154 (2009) 263–274.
- Sun F., Wen D., Kuang Y., Li J., Li J., Zuo W., Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in needles of masson pine (*Pinus massoniana* L.) growing nearby different industrial sources. *J. Environ. Sci.*, 22 (2010) 1006–1013.
- Talley T.S., Holyoak M., The Effects of Dust on the Federally Threatened Valley Elderberry Longhorn Beetle. *Environmental Management*, 37(5) (2006) 647–658.
- Tamás M.J., Martinoia E., Topics in Current Genetics, in: Tamás M. J., Martinoia E. (Eds.), *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification From Microbes to Man.*, Springer-Verlag, (2006).

- Tangahu B.V., Abdullah S.R.S., Basri H., Idris M., Anuar N., Mukhlisin M., A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, (2011), doi:10.1155/2011/939161.
- Țenche-Constantinescu A.M., Madoșa E., Chira D., Hernea C., Țenche-Constantinescu R.V., Lalescu D., Borlea G. F., *Tilia* spp.-Urban Trees for Future. *Not Bot Horti Agrobo*, 43(1) (2015) 259–264.
- Terzaghi E., Wild E., Zacchello G., Cerabolini B.E.L., Jones K.C., Di Guardo A., Forest Filter Effect: Role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs. *Atmospheric Environment*, 74 (2013) 378–384.
- Tomašević M., Aničić M., Jovanović Lj, Perić-Grujić A., Ristić M., Deciduous tree leaves in trace elements biomonitoring: a contribution to methodology. *Ecol. Indic.*, 11 (2011) 1689–1695.
- Tomašević M., Rajšić S., Đorđević D., Tasić M., Krstić J., Novaković V., Heavy metals accumulation in tree leaves from urban areas. *Environ Chem Lett*, 2 (2004) 151–154.
- Tomašević M., Aničić M., Trace element content in urban tree leaves and SEM-EDAX characterisation of deposited particles. *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Physics, Chemistry and Technology*, 8(1) (2010) 1-13.
- Tong S.T.Y., The retention of copper and lead particulate matter in plant foliage and forest soil. *Environment International*, 17 (1991) 31–37.
- Tošić S., Alagić S., Dimitrijević M., Pavlović A., Nujkić M., Plant parts of the apple tree (*Malus* spp.) as possible indicators of heavy metal pollution. *Ambio*, 45 (2016) 501–512.
- Ugolini F., Tognetti R., Raschi A., Bacci L., *Quercus ilex* L. as bioaccumulator for heavy metals in urban areas: Effectiveness of leaf washing with distilled water and considerations on the trees distance from traffic. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12 (2013) 576–584.
- Ugulu I., Dogan Y., Baslar S., Varol O., Biomonitoring of trace element accumulation in plants growing at Murat Mountain, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 9 (2012) 527–534.
- Upadhyay R., *Medicinal Plants and Herbs*. Rohit Upadhyay, (2015).
- Urbat M., Lehndorff E., Schwark L., Biomonitoring of air quality in the Cologne conurbation using pine needles as a passive sampler—Part I: magnetic properties. *Atmospheric Environment*, 38 (2004) 3781–3792.
- US EPA (1996), (US Environmental Protection Agency), 1996. Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Solids (3050B), Washington, DC.

- US EPA (1999), United States Environmental Protection Agency. Phytoremediation Resource Guide. EPA 542-B-99-003.
- US EPA (2003a), US Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response 1200 Pennsylvania Avenue, N.W. Washington, DC 20460. Ecological Soil Screening Level for Aluminum Interim Final OSWER Directive 9285.7-60.
- US EPA (2003b), US Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response. Ecological Soil Screening Level for Iron Interim Final OSWER Directive 9285.7-69.
- US EPA (2010), US Environmental Protection Agency: national ambient air quality standards (NAAQS).
- Vamerali T., Bandiera M., Mosca G., Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environ Chem Lett*, 8 (2010) 1–17.
- Van-Camp L., Bujarrabal, B., Gentile, A-R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C. and Selvaradjou, S-K. (2004). Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/3, 872 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Vandecasteele B., De Vos B., Tack F. M. G., Cadmium and Zinc uptake by volunteer willow species and elder rooting in polluted dredged sediment disposal sites. *The Science of the Total Environment*, 299 (2002) 191–205.
- Varnagirytė-Kabašinskienė I., Armolaitis K., Stupak I., Kukkola M., Wójcik J., Mikšys V., Some metals in aboveground biomass of Scots pine in Lithuania. *Biomass and bioenergy*, 66 (2014) 434–441.
- Wang L., Gong H., Liao W., Wang Z., Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. *Science of the Total Environment*, 532 (2015) 420–434.
- Wang S., Wang P., Fan C. Q., Xu H., Phytoavailability and speciation of aluminum carried by total suspended particulates (TSP) to Masson pine (*Pinus massoniana* L.). *Atmospheric Environment*, 47 (2012) 358–364.
- Wannaz E. D., Rodriguez J. H., Wolfsberger T., Carreras H. A., Pignata M. L., Fangmeier A., Franzaring J., Accumulation of Aluminium and Physiological Status of Tree Foliage in the Vicinity of a Large Aluminium Smelter. *The ScientificWorld Journal*, Volume 2012, Article ID 865927, 7 pages.
- Weber F., Kowarik I., Säumel I., Herbaceous plants as filters: Immobilization of particulates along urban street corridors. *Environmental Pollution*, 186 (2014) 234–240.

- Wolterbeek B., Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives. *Environmental Pollution*, 120 (2002) 11–21.
- Wong M.H., Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50 (2003) 775–780.
- Yanqun Z., Yuan L., Schwartz C., Langlade L., Fan L., Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead–zinc mine area, China. *Environment International*, 30 (2004) 567–576.
- Yilmaz S., Zengin M., Monitoring environmental pollution in Erzurum by chemical analysis of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. *Environment International*, 29 (2004) 1041–1047.
- Zhang H., Jiang Z., Qin R., Zhang H., Zou J., Jiang W., Liu D., Accumulation and cellular toxicity of aluminum in seedling of *Pinus massoniana*. *BMC Plant Biology*, 14 (2014) 264.
- Zseni A., Goldie H., Bárányi-Kevei I., Limestone pavements in Great Britain and the role of soil cover in their evolution. *Acta Carsologica*, 32/1(5) (2003) 57-67.

9. PRILOZI

9.1. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u neopranim iglicama bora ($\mu\text{g/g}$)

Izvor zagadenja/Oblast uzorkovanja, Vrsta bora, Starost iglica	Element								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Industrija, <i>Pinus halepensis</i> L., n.d.					29,5	262	3,50	90	Al-Alawi i Mandiwana, (2007)
Topionica aluminijuma, <i>Pinus radiata</i> , jednogodišnje iglice			863 (516-1659)	2,25 (1,05-3,77)	5,28 (3,15-28,1)	20,2 (10,6-29,9)	0,73 (0,45-0,99)		Rodriguez i sar., (2012)
Topionica metala i elektrana sa pogonom na mrki ugalj, <i>Pinus silvestris</i> , C	185-524		86-167	1,7-3,3	5,1-8,1	31-61	0,13-0,29	1,5-11,5	Samecka- Cymerman i sar., (2006)
Topionica metala i elektrana sa pogonom na mrki ugalj, <i>Pinus silvestris</i> , C+1	198-511		90-270	1,5-2,6	4,90-7,70	54-69	0,17-0,21	4,2-12,1	Samecka- Cymerman i sar., (2006)
Topionica cinka, <i>Pinus sylvestris</i> , jednogodišnje iglice					4,0	193,6	1,75	196,7	Chudzińska i sar., (2014)
Topionica cinka, <i>Pinus nigra</i> , jednogodišnje iglice					4,2	174,7	1,41	168,3	Chudzińska i sar., (2014)
Cu-Ni topionica, <i>Pinus sylvestris</i> , C				273	183,3				Nikonov i sar., (2001)

nastavak ...

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, Vrsta bora, Starost iglica	Element							Literatura	
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd		Pb
Cu-Ni topionica, <i>Pinus sylvestris</i> , jednogodišnje iglice				395,6	207,3				Nikonov i sar., (2001)
Cu-Ni topionica, <i>Pinus sylvestris</i> , dvogodišnje iglice				340	155				Nikonov i sar., (2001)
Industrija, <i>Pinus brutia</i> i <i>Pinus pineae</i> , iglice stare 6 meseci (C)		0,58			7,5	66,7	0,17	8,7	Odabasi i sar., (2016)
Industrija, <i>Pinus brutia</i> i <i>Pinus pineae</i> , iglice stare 1,5 godinu		1,92			8,6	123	0,31	22,2	Odabasi i sar., (2016)
Industrija, <i>Pinus brutia</i> , trogodišnje iglice			595,50	5,90	10,10		0,37	8,30	Dogan i sar., (2010)
Hemijska i petrohemijska industrija, <i>Pinus pinea</i> L., n.d.	160,8- 983,20		101-513		8,80- 172,10			0,05- 23,40	Rossini Oliva i Mingoran ce, (2006)
Fabrika gvožđa i čelika sa pogonom na ugalj, <i>Pinus massoniana</i> L., C				2,46	5,88	34,58	0,51	13,74	Sun i sar., (2010)

nastavak ...

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, Vrsta bora, Starost iglica	Element								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Fabrika gvožđa i čelika sa pogonom na ugalj, <i>Pinus massoniana</i> L., C+I				1,02	7,49	64,78	0,99	41,10	Sun i sar., (2010)
Saobraćaj, <i>Pinus brutia</i> , trogodišnje iglice			500,90	4,10	5,30		0,45	12,10	Dogan i sar., (2010)
Saobraćaj, <i>Pinus pinea</i> , n.d.	410	0,77	393	0,71	6,91	19,8	0,58	2,45	Rucandio i sar., (2011)
Saobraćaj, urbana oblast, <i>Pinus nigra</i> Arn., n.d.			163,52-319,41		4,87-16,48			4,46- 14,44	Sawidis i sar., (2011)
Saobraćaj, <i>Pinus brutia</i> , n.d.				22,80	83		0,81	27	Sawidis i sar., 2012
Saobraćaj, <i>Pinus halepensis</i> L., n.d.					37	95	2,10	196	Al-Alawi i Mandiwana, (2007)
Suburbana oblast, <i>Pinus halepensis</i> L., n.d.					16.5	55	0.55	10	Al-Alawi i Mandiwana, (2007)
Suburbalna oblast, <i>Pinus brutia</i> , trogodišnje iglice			236,40	10,40	3,10		0,54	3,60	Dogan i sar., (2010)

nastavak ...

Izvor zagadenja/Oblast uzorkovanja, Vrsta bora, Starost iglica	Element							Literatura	
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd		Pb
Ruralna oblast, <i>Pinus brutia</i> , trogodišnje iglice			93,13	6,99	3,91		0,42	2,80	Dogan i sar., (2010)
Planinska oblast, <i>Pinus nigra</i> Arn. subsp. <i>pallasiana</i> (Lamb) Holmboe, n.d.			2,38	0,48		0,50		0,570	Ugulu i sar., (2012)
Kontrolna oblast, <i>Pinus brutia</i> i <i>Pinus</i> <i>pineae</i> , iglice stare 6 meseci		0,18			5,6	21,9	0,25	0,73	Odabasi i sar., (2016)
Kontrolna oblast, <i>Pinus brutia</i> i <i>Pinus</i> <i>pineae</i> , iglice stare 1,5 godinu		0,31			3,7	33,3	0,33	0,89	Odabasi i sar., (2016)
Kontrolna nezagadena oblast, <i>Pinus pinea</i> L, n.d.	808,86-875- 95		1,80-228,94		3,59-3,74			4,28- 5,82	Rossini Oliva i Mingorance, (2006)
Kontrolna nezagadena oblast, <i>Pinus nigra</i> Arn., n.d.			135,77-185,41		2,43-3,26			2,22- 2,81	Sawidis i sar., (2011)

nastavak ...

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, Vrsta bora, Starost iglica	Element								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Kontrolna nezagađena oblast, <i>Pinus halepensis</i> L., n.d.					10	25	0,25	19	Al-Alawi i Mandiwana, (2007)
Kontrolna nezagađena oblast, <i>Pinus brutia</i> , trogodišnje iglice			57,28	0,88	1,10		0,43	1,40	Dogan i sar., (2010)
Kontrolna nezagađena oblast, <i>Pinus pinea</i> L., dvogodišnje iglice	842,4		204,7		3,67	22,98		5,05	Mingorance i sar., (2007)
Kontrolna nezagađena oblast, <i>Pinus silvestris</i> , C	105-107		64-76	1,5-2,0	5,0-5,4	39-41	0,08-0,10	0,9-1,4	Samecka- Cymerman i sar., (2006)

C-iglice mlađe od jedne godine (current year needles)

C+1-prošlogodišnje iglice (previous year needles)

n.d.-starost iglica nije definisana

9.2. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u opranim iglicama bora ($\mu\text{g/g}$)

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, vrsta bora, starost opranih iglica	Elementi								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Topionica cinka, <i>Pinus silvestris</i> L., C			49,39			121,70	1,89	31,23	Kandziora-Ciupa i sar., (2016)
Topionica cinka, <i>Pinus silvestris</i> L., jednogodišnje iglice			86,90			290,50	4,39	212,99	Kandziora-Ciupa i sar., (2016)
Topionica cinka, <i>Pinus silvestris</i> L., dvogodišnje iglice			143,25			393,50	6,15	256,49	Kandziora-Ciupa i sar., (2016)
Topionica gvožđa, <i>Pinus silvestris</i> L., C			51,29			35,13	0,02	5,98	Kandziora-Ciupa i sar., (2016)
Topionica gvožđa, <i>Pinus silvestris</i> L., jednogodišnje iglice			197,82			79,47	0,17	10,38	Kandziora-Ciupa i sar., (2016)
Topionica gvožđa, <i>Pinus silvestris</i> L., dvogodišnje iglice			206,82			142,87	0,17	15,76	Kandziora-Ciupa i sar., (2016)
Rudarsko metalurški kompleks <i>Pinus silvestris</i> L., n.d.							0,28-5,78	4,0-255	Dmuchowski i sar., (2011)

nastavak ...

Izvor zagadenja/Oblast uzorkovanja, vrsta bora, starost opranih iglica	Elementi								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Industrija, <i>Pinus halepensis</i> L., n.d.					15,5	118	1,5	45	Al-Alawi i Mandiwana, (2007)
Industrija <i>Pinus eldarica</i> Medw., n.d.				13,2	10,6	24,16		42,6	Kord i sar., (2010)
Pošumljena zona u blizini industrijske oblasti, <i>Pinus massoniana</i> L., C				4,60 (1,49- 9,25)	4,58 (3,37-5,85)	≈ 40,67 (16,52- 76,46)	0,18 (0-0,50)	3,48 (0,41- 10,47)	Sun i sar., (2009)
Pošumljena zona u blizini industrijske oblasti, <i>Pinus massoniana</i> L., C+1				2,85 (1,24- 5,51)	5,38 (3,42- 10,11)	54,46 (18,40- 81,09)	0,18 (0-0,37)	6,56 (1,52- 12,61)	Sun i sar., (2009)
Elektrana na ugalj, <i>Pinus pinaster</i> , 6 meseci stare iglice			35,3 (16,6-58,5)	0,71 (0,03- 2,07)	2,88 (0,36-5,66)	15,22 (3,05- 32,76)			Aboal i sar., (2001)
Rudnička jalovišta, <i>Pinus halepensis</i> , n.d.		1,44			2,28	127	0,38	12	Parraga-Aguado i sar., (2014)
Jalovišta <i>Pinus sylvestris</i> L. C					3,0-27,9	32,9 - 76,6	0,1-1,0	0,8-3,2	Pietrzykowski i sar., (2014)

nastavak ...

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, vrsta bora, starost opranih iglica	Elementi								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Jalovišta <i>Pinus sylvestris</i> L., C+1					2,2 -5,5	36,7-113,5	0,2 - 1,1	2,6-10,9	Pietrzykowski i sar., (2014)
Jalovišta zatvorenog rudnika antimona, <i>Pinus sylvestris</i> L., n.d.		48							Jana i sar., (2012)
Disperzija čestica sa jalovišta, <i>Pinus pinaster</i> , jednogodišnje		10,1 (5,96- 15,1)	140 (110-152)	1,44 (0,93- 2,60)	10,7 (6,4-14,1)	35,3 (26,9-44,3)		9,74 (4,12- 13,0)	Favas i sar., (2013)
Disperzija čestica sa jalovišta, <i>Pinus pinaster</i> , dvogodišnje		13,2 (4,60- 17,6)	278 (186-340)	1,05 (0,91- 1,19)	8,71 (5,25-10,7)	246 (186-298)		21,2 (17,6- 25,8)	Favas i sar., (2013)
Fabrika gvožđa i čelika sa pogonom na ugalj, <i>Pinus massoniana</i> L., C				2,96	6,35	34,27	0,54	14,44	Sun i sar., (2010)
Fabrika gvožđa i čelika sa pogonom na ugalj, <i>Pinus massoniana</i> L., C+1				1,07	6,07	57,75	0,92	37,96	Sun i sar., (2010)

nastavak ...

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, vrsta bora, starost opranih iglica	Elementi								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Proizvodnja olovnih akumulatora, <i>Pinus nigra</i> L., n.d.					6,2		57 ng/g	3056	Kaya i sar., (2010)
Saobraćaj, industrija, urbana oblast <i>Pinus sylvestris</i> , jednogodišnje i dvogodišnje						59,4 (45,8-85,2)		12,2 (6,7-22,1)	Parzych i Jonczak, (2014)
Saobraćaj, <i>Pinus silvestris</i> L., n.d.					16,75	55	0,5	75,5	Al-Alawi i Mandiwana, (2007)
Saobraćaj <i>Pinus eldarica</i> Medw., n.d.				16,7	15,43	18,49		62,3	Kord i sar., (2010)
Saobraćaj, <i>Pinus sylvestris</i> L., jednogodišnje					18,68	91,68		37,52	Yilmaz i Zengin, (2004)
Saobraćaj, <i>Pinus sylvestris</i> L., dvogodišnje					23,44	105,42		32,81	Yilmaz i Zengin, (2004)
Urbana oblast <i>Pinus eldarica</i> Medw., n.d.				10,16	7,93	14,46		39,8	Kord i sar., (2010)

nastavak ...

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, vrsta bora, starost opranih iglica	Elementi								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
2 km od urbane oblasti Barselone, šuma bora i hrasta, <i>Pinus halepensis</i> , jednogodišnje	838- 1150	0,105- 0,183		1,172- 2,588	9,812- 14,463	20,204- 27,211	0,136- 0,186	2,234- 3,318	Sardans i Peñuelas, (2005)
Četinarska šuma u blizini urbane oblasti, <i>Pinus sylvestris</i> , jednogodišnje			91,5		6,0	53,9			Parzych i Jonczak, (2014)
Četinarska šuma u blizini urbane oblasti, <i>Pinus sylvestris</i> , dvogodišnje			132,1		5,9	68,2			Parzych i Jonczak, (2014)
Suburbana oblast, <i>Pinus silvestris</i> L., n.d.					5,32	36	0,2	15	Al-Alawi i Mandiwana, (2007)
Ruralna nezagađena oblast, <i>Pinus sylvestris</i> L., C+1		0,05	115	0,58	2,7	51,5	0,05	0,22	Przybysz i sar., (2014)
Planinska nezagađena oblast , <i>Pinus sylvestris</i> L., jednogodišnje	182		60	10	8	48			Galuszka, (2005)

nastavak ...

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, vrsta bora, starost opranih iglica	Elementi								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Šumska nezagađena oblast, <i>Pinus silvestris</i> L., C			19,54			12,11	0,18	2,35	Kandziora-Ciupa i sar., (2016)
Šumska nezagađena oblast, <i>Pinus silvestris</i> L., jednogodišnje iglice			47,42			17,30	0,21	4,25	Kandziora-Ciupa i sar., (2016)
Šumska nezagađena oblast, <i>Pinus silvestris</i> L., dvogodišnje iglice			63,92			19,18	0,37	5,17	Kandziora-Ciupa i sar., (2016)
Šumska nezagađena oblast, <i>Pinus halepensis</i> jednogodišnje iglice	376	0,023			4,686	29,162	0,026	0,574	Sardans i Peñuelas, (2005)
Kontrolna nezagađena oblast <i>Pinus eldarica</i> Medw., n.d.				1,86	2,5	1,53		14,1	Kord i sar., (2010)
Kontrolna nezagađena oblast, <i>Pinus silvestris</i> L., n.d.						10	0,12	11	Al-Alawi i Mandiwana, (2007)

nastavak ...

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, vrsta bora, starost opranih iglica	Elementi								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Kontrolna nezagađena oblast, <i>Pinus nigra</i> L., n.d.					1,6		36 ng/g	0,7	Kaya i sar., (2010)
Ruralna nezagađena oblast, <i>Pinus pinaster</i> , n.d.	53	0,08	21	2,52	3,03	15	0,05	0,05	Aboal i sar., (2004)

C-iglice mlađe od jedne godine (current year needles);
 C+1-prošlogodišnje iglice (previous year needles);
 n.d.-starost iglica nije definisana

9.3. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u granama bora ($\mu\text{g/g}$)

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, vrsta bora	Elementi								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Jalovišta straog rudnika antimona, <i>Pinus sylvestris</i> L,		29,9							Jana i sar., (2012)
10 km od Cu-Ni topionice, <i>Pinus sylvestris</i>				404	503				Nikonov i sar., (2001)
Industrijska oblast, <i>Pinus brutia</i> i <i>Pinus pineae</i>		0,103			4,3	35,9	0,27	7,5	Odabasi i sar., (2016)
Zemljišta lošeg kvaliteta, Scots pine			23,3	0,46	1,48	34,7	0,47	2,59	Skonieczna i sar., (2014)
Šumska oblast, <i>Pinus sylvestris</i> L,	205,97		59,33			26,47			Varnagirytė- Kabašinskienė i sar., (2014)
Zemljište bogato olovom i cinkom, <i>Pinus nigra</i>	3096- 20791 (11299)		1867- 19115 (10739)		82-201 (127)	540- 2070 (993)		44-862 (269)	Gedik i Akyildiz, (2013)
Kontrolna oblast, <i>Pinus brutia</i> i <i>Pinus pineae</i>		0,066			2,2	8,5	0,49	0,74	Odabasi i sar., (2016)

9.4. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u korenju bora ($\mu\text{g/g}$)

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja		Elementi						Literatura	
		As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd		Pb
Topionica bakra i nikla, (udaljenost od topionice)	0,5 km		649	106	593	69	2,09	5,58	Helmisaari i sar., (1999)
	4 km		878	11,2	33,6	129	0,59	4,27	
<i>Pinus sylvestris</i> L.	8 km		1296	14,8	21,6	88	0,55	4,61	
Jalovišta starog rudnika antimona, <i>Pinus sylvestris</i> L.		63							Jana i sar., (2012)

9.5. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u neopranoj lišću lipe ($\mu\text{g/g}$)

Izvor zagađenje/Oblast uzorkovanja, vrsta lipe	Element								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Topionica bakra, urbana zona, <i>Tilia cordata</i>		0,75		31			0,16		
Ruralna zagađena zona, <i>Tilia cordata</i>		1,12					0,52		Alagić i sar., (2013)
Ruralna zagađena zona, <i>Tilia cordata</i>		2,76					0,16		
Urbana oblast, <i>Tilia euchlora</i>						≈20,00	≈0,2	≈2,00	Dmuchowski i Bytnerowicz, (2009)
Urbana oblast sa gustim saobraćajem u Beogradu (studentski park), <i>Tilia cordata</i>	235-323	0,33-0,63	371-567	1,20-3,35	11-64	19-32,6	0,02-0,07	3,85-6,06	Tomašević i sar., (2011)
Šumska oblast, nezagađeno područje, <i>Tilia cordata</i> Mill.			86,3		9,3	22,1			Hagen-Thorn i Stjernquist, (2005)
Kontrolna nezagađena oblast, <i>Tilia cordata</i>		0,736					0,11		Alagić i sar., (2013)

9.6. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u opranom lišću lipe ($\mu\text{g/g}$)

Izvor zagađenje/Oblast uzorkovanja, vrsta lipe	Element								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Topionica bakra (urbana zona) <i>Tilia cordata</i>		1,00					0,18		
Ruralna zagađena zona, <i>Tilia cordata</i>		0,83					0,40		Alagić i sar., (2013)
Ruralna zagađena zona, <i>Tilia cordata</i>		2,53					0,16		
Urbana oblast (2002- 2006.god.) <i>Tilia spp.</i>			103-651	0,70-2,06	10,2-52,2	15,4-34,9		1,9-11,9	Aničić i sar., (2011)
Saobraćaj, <i>Tilia spp.</i> (studentski park)		0,36-1,14					0,02-2,77		Šućur i sar., (2010)
Saobraćaj, <i>Tilia platyphyllos</i>	412-498		157-772	5,87-7,63	10,4-18,3	61,9-84,4	2,76-3,55	6,5-12,4	Piczak i sar., (2003)
Saobraćaj, <i>Tilia cordata</i>	100-149	0,17-0,62	160-304	1,19-1,87	9,93-21	15-25		2,40- 4,25	Tomašević i sar., (2004)
Kontrolna nezagađena oblast, <i>Tilia cordata</i>		0,53					0,220		Alagić i sar., (2013)

9.7. Literaturni podaci o koncentracijama elemenata u opranom lišću zove ($\mu\text{g/g}$)

Izvor zagađenja/Oblast uzorkovanja, vrsta zove	Elementi								Literatura
	Al	As	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
Saobraćaj, <i>Sambucus williamsii</i>							0,07	5,6	Li-qiang,i sar., (2004)
Napuštena rudarska oblast, <i>Sambucus nigra</i> L.			524	7,2	6,0	15		3,5	Freitas i sar., (2004)
Pb-Zn rudnik <i>Sambucus chinensis</i>					15,37	273,18	1,69	89,84	Yanqun i sar., (2004)
Zemljište zagađeno arsenom, <i>Sambucus nigra</i> L.		0,55-1,13							Madejon i Lepp, (2007)
Naslage šlajke, <i>Sambucus nigra</i> L.						≈ 150	≈ 2	≈ 20	Migeon i sar., (2009)
Šumska oblast blizu urbane oblasti, <i>Sambucus americana</i> neopran list					29,9			95,5	Tong, (1991)

„ \approx ” vrednosti očitane sa slika

9.8. Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Tanja Kalinović
Broj indeksa 4/2010

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Mogućnosti korišćenja bora, lipe i zove u biomonitoringu i fitoremedijaciji

- ✓ rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- ✓ da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- ✓ da su rezultati korektno navedeni i
- ✓ da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Boru, _____

Potpis doktoranda

9.9. Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Tanja Kalinović

Broj indeksa 4/2010

Studijski program Tehnološko inženjerstvo

Naslov rada Mogućnosti korišćenja bora, lipe i zove u biomonitoringu i fitoremedijaciji

Mentor prof. dr Snežana Šerbula

Izjavljujem

da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Boru, _____

Potpis doktoranda

9.10. Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Mogućnosti korišćenja bora, lipe i zove u biomonitoringu i fitoremedijaciji

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

U Boru, _____

Potpis doktoranda

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

10. BIOGRAFIJA

Ime i prezime: **Tanja Kalinović**

E-mejl: tkalinovic@tf.bor.ac.rs

Obrazovanje i stručno usavršavanje:

Tanja Kalinović je rođena 21.10.1984. godine u Boru gde je završila osnovnu i srednju školu. Studije hemijske tehnologije na Tehničkom fakultetu u Boru je upisala 2003. godine, a završila 2008. godine na smeru Inženjerstvo za zaštitu životne sredine sa prosečnom ocenom 8,48 i ocenom 10 na diplomskom radu. Iste godine upisala je i diplomske akademske studije na studijskom programu–Tehnološko inženjerstvo na matičnom fakultetu. Diplomске akademske studije završila je 08.10.2010. godine sa ocenom 10 na diplomskom i prosečnom ocenom 9,83 u toku studija, čime je stekla akademski naziv diplomirani inženjer tehnološkog inženjerstva–master. Doktorske akademske studije, osek Tehnološko inženjerstvo je upisala 2010. godine na Tehničkom fakultetu u Boru.

Od oktobra 2008. godine Tanja Kalinović radi na Tehničkom fakultetu u Boru kao saradnik u nastavi, a od 2010. godine kao asistent na predmetima: Analitička hemija, Teorijske osnove hemijske tehnologije, Prečišćavanje otpadnih gasova i Ekologija.

Član Saveta za ekologiju u Rudarsko-topioničarskom basenu Bor, bila je od 24.05.2011. godine do 27.11.2012. godine.

Istraživačka interesovanja:

Trenutno je angažovana na dva projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije pod nazivom:

- 1) **„Razvoj novih inkapsulacionih i enzimskih tehnologija za proizvodnju biokatalizatora i biološki aktivnih komponenata hrane u cilju povećanja njene konkurentnosti, kvaliteta i bezbednosti”**, (broj projekta III46010, realizator: Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu, rukovodilac: prof. dr Branko Bugarski)
- 2) **„Usavršavanje tehnologija eksploatacije i prerade rude bakra sa monitoringom životne i radne sredine u RTB Bor grupa”** (broj projekta 33038) (2011-2014.god.).

U organizaciji Društva Mladih istraživača Bor i Osnovne škole „Dušan Radović“ u Boru, kao jedan od predstavnika Tehničkog fakulteta u Boru, učestvovala je na Sajmu Nauke „Naučni tornado”, održanom u Boru, 2012., 2013., i 2014. godine. Cilj manifestacije je obeležavanje Svetskog dana nauke i promocija nauke među mladima.

Autor je ili koautor 7 rada publikovanih u časopisima međunarodog značaja (od toga 3 rada su kategorije M21, 2 rada kategorije M22 i 2 rada kategorije M23), 5 radova publikovanih u nacionalnim časopisima, 16 saopštenja sa konferencija međunarodnog značaja, 5 saopštenja nacionalnog značaja, kao i 2 poglavlja u stranim knjigama (monografije).

11. PUBLIKOVANI I SAOPŠTENI RADOVI IZ OKVIRA DISERTACIJE

Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21)

1. **Kalinovic T. S.**, Serbula S. M., Radojevic A. A.; Kalinovic J. V., Steharnik M. M., Petrovic J. V., Elder, linden and pine biomonitoring ability of pollution emitted from the copper smelter and the tailings ponds, *Geoderma*, 262 (2016) 266-275.
(IF (2014)=3,524 (Soil science 3/34))
(ISSN: 0016-7061)
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706115300562>
2. Serbula S. M., **Kalinovic T. S.**, Ilic A. A., Kalinovic J. V., Steharnik M. M.; Assessment of airborne heavy metal pollution using *Pinus* spp. and *Tilia* spp., *Aerosol and Air Quality Research*, 13(2) (2013) 563-573.
(IF(2011)=2,827 (Environmental Sciences 43/205))
(ISSN: 1680-8584 (print); **ISSN: 2071-1409 (electronic)**)
http://aaqr.org/VOL13_No2_April2013/13_AAQR-12-06-OA-0153_563-573.pdf
3. Serbula S. M., Radojevic A. A., Kalinovic J. V., **Kalinovic T. S.**, Indication of airborne pollution by birch and spruce in the vicinity of copper smelter, *Environmental Science and Pollution Research*, 21(19) (2014) 11510-11520.
(IF(2013)=2,951 (Environmental Sciences 57/216))
(ISSN: 0944-1344 (print); **ISSN: 1614-7499 (electronic)**)
<http://link.springer.com/article/10.1007/s11356-014-3120-4#page-2>

Rad u istaknutom međunarodnom časopisu (M22)

1. Serbula S. M., **Kalinovic T. S.**, Kalinovic J. V., Ilic A. A., Exceedance of air quality standards resulting from pyro-metallurgical production of copper: a case study, Bor (Eastern Serbia), *Environmental earth sciences*, 68(7) (2013) 1989-1998.
(IF(2013)=1,750 (Geosciences, Multidisciplinary 83/174))
(ISSN: 1866-6280(print); ISSN: 1866-6299(electronic))
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-012-1886-6#page-1>
2. Snezana M. Serbula, Ana A. Ilic, Jelena V. Kalinovic, **Tanja S. Kalinovic**, Nevenka B. Petrovic, Assessment of air pollution originating from copper smelter in Bor (Serbia), *Environmental Earth Sciences*, 71 (2014) 1651-1661, DOI: 10.1007/s12665-013-2569-7
(IF(2014)=1,765 (Geosciences, Multidisciplinary 74/175))
ISSN:1866-6280(print),ISSN:1866-6299(electronic)
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-013-2569-7#page-1>

Rad u međunarodnom časopisu (M23)

1. S. Šerbula, V. Stanković, D. Živković, Ž. Kamberović, M. Gorgievski, **T. Kalinović**, Characteristics of Wastewater Streams within the Bor Copper Mine and their Influence on Pollution of the Timok River, Serbia, Mine Water and the Environment, 32(104) (2016) 1-6.
(IF(2014)=1,206 (Water Resources 48/83))
ISSN 1025-9112
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10230-016-0392-6>
2. Snežana M. Šerbula, Dragana T. Živković, Ana A. Radojević, **Tanja S. Kalinović**, Jelena V. Kalinović, Emission of SO₂ And SO₄²⁻ from Copper Smelter and its Influence on the Level of Total S in Soil and Moss in Bor and the Surroundings, Hemijska industrija, 69, (1) (2015), 51–58. DOI:10.2298/HEMIND131003018S
(IF(2013)=0,562 (Engineering, Chemical 103/133))
ISSN 0367-598X (Print) ISSN 2217-7426 (Online)
<http://www.ache.org.rs/HI/index2.htm>

Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja (M51)

1. Kalinovic J. V., Šerbula S. M., Ilic A. A., **Kalinovic T. S.**, Petrovic J. V., Content of metals and metalloids in soil sampled in Bor and its surroundings (Eastern Serbia), Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, 17(1) (2013) 121-124.
(ISSN 2303-4009 (online))
Edited by: S. Ekinović; J. Vivancos; S. Yalcin.
Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H
<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2013Journal/028-TMT13-033.pdf>
2. **Kalinovic T. S.**, Šerbula S. M., Kalinovic J. V., Ilic A. A., Influence of airborne sulphur dioxide on total S concentrations in linden and pine. Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, 17(1) (2013) 117-120.
(ISSN 2303-4009 (online))
Edited by: S. Ekinović; J. Vivancos; S. Yalcin.
Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H
<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2013Journal/027-TMT13-032.pdf>
3. Ilic A., Šerbula S. M., Kalinovic J. V., **Kalinovic T. S.**, Ilic M. J., The level of sulphur dioxide in the atmosphere of Bor (Eastern Serbia), Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, 17(1) (2013) 113-116.
(ISSN 2303-4009 (online))
Edited by: S. Ekinović; J. Vivancos; S. Yalcin.
Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H

<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2013Journal/026-TMT13-031.pdf>

4. Serbula Snezana M., **Kalinovic Tanja S.**, Ilic Ana A., Kalinovic Jelena V. Assessment of air pollution using plant material, *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, 16 (1) (2012) 151-154.

<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2013Journal/026-TMT13-031.pdf>

Monografije (M13)

1. Serbula S. M., **Kalinovic T. S.**, Ilic A. A., Kalinovic J. V., Bugarski B. M., The Impact of Air Pollution from the Mining-Metallurgical Complex on the Content of Total Sulfur in Plant Material and Soil, **chapter** in *Air Quality: Environmental Indicators, Monitoring and Health Implications*, Editors: Arthur Hermans; Nova Science Publishers, US, New York. (2013), pp. 73-98

(ISBN: 978-1-62808-259-3).

https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=38905

2. Šerbula S. M., Alagić S. Č., Ilić A., **Kalinović T. S.**, Strojčić J. V. (2012). Particulate Matter Originated From Mining-Metallurgical Processes in *Particulate Matter: Sources, Emission Rates and Health Effects*. Editors: Henrik Knudsen and Rasmussen, New York, Nova Science Publishers US, Chapter 4. pp. 91-116

(ISBN: 978-1-61470-948-0)

https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=22070

Radovi saopšteni na međunarodnim skupovima štampani u celini (M33)

1. Šerbula S., Dolić N., Manasijević S., **Kalinović T.**, Ljubomirović M.: Atmospheric deposition in the surroundings of open pits and flotation tailings, International conference of materials International conference of materials, tribology, recycling MATRIB 2014; Proceedings of conference, Editors: S. Šolić; M. M. Štajduhar, Vela Lula, Hrvatska, 26-28.06.2014, pp. 526-541; (ISSN: 1848-5340).

<http://bib.irb.hr/prikazi-rad?rad=702835>

2. Snezana M. Serbula, N.N. Mijatovic, A.A. Radojevic, **T.S. Kalinovic**, J.V. Kalinovic, R. Kovacevic, Dandelion as an environmental bioindicator in the Bor region, XXII International Conference "Ecological Truth" Eco-Ist'14, Proceedings, Edited by: Radoje V. Pantovic, Zoran S. Markovic, Bor, Serbia, 10-13 June 2014, Publisher: University of Belgrade-Technical Faculty in Bor, Bor, 161-167 (ISBN: 978-86-6305-021-1).

3. Kalinovic J. V., Serbula S. M., Radojevic A. A., **Kalinovic T. S.**, Manasijevic S., Dolic N., Heavy metals and total sulphur content in vegetables collected in the Bor region (Serbia), XXII International Conference "Ecological Truth" Eco-Ist'14, Proceedings, Edited by: R. V. Pantovic, Z. S. Markovic, Bor, Serbia, 10-13 June 2014, Publisher:

- University of Belgrade-Technical Faculty in Bor, Bor, pp. 154-159 (ISBN: 978-86-6305-021-1).
http://www.eco-ist.rs/Proceedings_EcoIst14_0.pdf
4. Kalinovic J. V., Serbula S. M., Ilic A. A., **Kalinovic T. S.**, Petrovic J., Content of Metals and Metalloids in Soil Sampled in Bor and its Surroundings (Eastern Serbia), 17th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2013 Proceedings, Editors: S. Ekinović, J. Vivancos, S. Yalcin, Istanbul, Turkey, 10-11 September 2013, Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H, pp. 273-276 (ISSN: 1840-4944).
<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2013/069-TMT13-033.pdf>
 5. **Tanja S. Kalinovic**, Snezana M. Serbula, Jelena V. Kalinovic, Ana A. Ilic, Influence of Airborne Sulphur Dioxide on Total S Concentrations in Linden and Pine, 17th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2013 Proceedings, Editors: S. Ekinović, J. Vivancos, S. Yalcin, Istanbul, Turkey, 10-11 September 2013, Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H, pp. 269-272 (ISSN: 1840-4944).
 6. Ilic A., Serbula S., **Kalinovic T.**, Kalinovic J., Ilic M., Correlation of sulphur dioxide and particulate matter with meteorological factors, 45th International October Conference on Mining and Metallurgy, IOC 2013 Proceedings, Editors: N. Štrbac, D. Živković, S. Nestorović, Bor, Serbia, 16-19 October 2013, Publisher: University of Belgrade, Technical Faculty in Bor and Mining and Metallurgy Institute Bor, pp. 69-72 (ISBN: 978-86-6305-012-9).
<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2012/085-TMT12-047.pdf>
 7. S. Šerbula, D. Živković, A. Ilić, **T. Kalinović**, J. Kalinović, The Impact of Air Pollution From the Mining-Metallurgical Complex on the Content of Total Sulphur in Soil and Moss, 13th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE-IFC 2013, May 16-17, 2013, Opatija, Croatia, PROCEEDINGS BOOK 386-394 (ISBN: 978-953-7082-15-4)
<http://www.simet.hr/~foundry/>
 8. Ilic A. A., Serbula S. M., Kalinovic J. V., **Kalinovic T. S.**, Ilic M. J., The Level of Sulphur Dioxide in the Atmosphere of Bor (Eastern Serbia), 17th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2013 Proceedings, Editors: S. Ekinović, J. Vivancos, S. Yalcin, Istanbul, Turkey, 10-11 September 2013, Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H, pp. 265-268 (ISSN: 1840-4944).
<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2013/067-TMT13-031.pdf>

9. Snezana M. Serbula, **Tanja S. Kalinovic**, Ana A. Ilic, Jelena V. Kalinovic, Assessment of air pollution using plant material, International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2012 Proceedings, Editors: S. Ekinović, S. Yalcin, J. Vivancos, Dubai, UAE, 10-12 September 2012, Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H, pp. 371-374 (ISBN: 1840-4944).
10. Ilic A. A., Serbula S. M., Kalinovic J. V., **Kalinovic T. S.**, Biomonitoring of heavy metal pollution near copper smelter in Bor (Serbia) using acacia, 16th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2012 Proceedings, Editors: S. Ekinović, S. Yalcin, J. Vivancos, Dubai, UAE, 10-12 September 2012, Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H, pp. 363-366 (ISBN: 1840-4944).
<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2012/085-TMT12-047.pdf>
11. **Kalinovic T. S.**, Petrovic N., Serbula S. M., Kalinovic J. V., Ilic A. A., Effects of air pollution on heavy metal content in linden and pine, 44th International October Conference on Mining and Metallurgy, IOC 2012 Proceedings, Editors: Ana Kostov, Milenko Ljubojev, Bor, Serbia, 1st to 3rd October 2012, Publisher: University of Belgrade, Technical Faculty in Bor and Mining and Metallurgy Institute Bor, pp. 705-708 (ISBN: 978-86-7827-042-0).
12. Ilic A. A., Steharnik M. M., Serbula S. M., Kalinovic J. V., **Kalinovic T. S.**, The content of total sulphur in plant material and soil of birch and spruce in Bor and surroundings, 44th International October Conference on Mining and Metallurgy, IOC 2012 Proceedings, Editors: Ana Kostov, Milenko Ljubojev, Bor, Serbia, 1st to 3rd October 2012, Publisher: University of Belgrade, Technical Faculty in Bor and Mining and Metallurgy Institute Bor, pp. 709-712 (ISBN: 978-86-7827-042-0).
13. Snežana M. Šerbula, **Tanja S. Kalinović**, Jasmina Stevanović, Jelena V. Strojčić, Ana A. Ilić, Hazardous materials in a mining-metallurgical production process, 15th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2011 Proceedings, Editors: Dr. Sabahudin Ekinović, Dr. Joan Vivancos Calvet, Dr. Emin Tacer, Prague, Czech Republic, 12-18 September 2011, Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H, pp. 841-844 (ISSN: 1840-4944).
14. Kalinovic J. V., Serbula S. M., **Kalinovic T. S.**, Ilic A. A., Content of heavy metals and sulphur in fruits sampled in vicinity of mining-metallurgical complex, 16th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2012 Proceedings, Editors: S. Ekinović, S. Yalcin, J. Vivancos, Dubai, UAE, 10-12 September 2012, Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H, pp. 367-370 (ISBN: 1840-4944).

<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2012/086-TMT12-048.pdf>

15. Alagić S., Šerbula S., Ilić A., **Kalinović T.**, Strojčić J., Heavy metal content in particulate matter originated from mining-metallurgical processes in Bor, (2011), The 43rd International October Conference on Mining and Metallurgy, IOC 2011 Proceedings, Editors: D. Marković, D. Živković, S. Nestorović, Kladovo, Serbia, 12-15 October 2011, Publisher: University of Belgrade - Technical Faculty in Bor and Mining and Metallurgy Institute Bor, pp. 711-721 (ISBN: 978-86-80987-87-3).
16. Ilić A. A., Šerbula S. M., Manžalović M. Ž., Strojčić J. V., **Kalinović T. S.**, Zone distribution of atmospheric arsenic, 15th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2011 Proceedings, Editors: S. Ekinović, J. V. Calvet, E. Tacer, Prague, Czech Republic, 12-18 September 2011, Publisher: Faculty of Mechanical Engineering in Zenica, Fakultetska 1, Zenica, B&H, pp. 837-840 (ISSN: 1840-4944).
<http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2011/201-TMT11-026.pdf>

Radovi saopšteni na međunarodnim skupovima štampani u izvodu (M34)

1. S. Šerbula, D. Živković, A. Ilić, **T. Kalinović**, J. Kalinović, The Impact of Air Pollution From the Mining-Metallurgical Complex on the Content of Total Sulphur in Soil and Moss, 13th INTERNATIONAL FOUNDRYMEN CONFERENCE – Innovative Foundry Processes and Materials 2013, May 16-17, 2013, Opatija, Croatia, ABSTRACTS BOOK, 43 (ISBN: 978-953-7082-16-1)
<http://www.simet.hr/~foundry/>