

UNIVERZITET U BEOGRADU

BIOLOŠKI FAKULTET

Una N. Matko Stamenković

**POTENCIJAL VRSTA *ALYSSUM MURALE*
WALDST.&KIT., *THLASPI KOVATSII* HEUFFEL I
LEPIDIUM CAMPESTRE (L.) R. BR. (BRASSICACEAE)
SA SERPENTINITSKIH STANIŠTA U BOSNI I
HERCEGOVINI ZA BIOAKUMULACIJU METALA**

doktorska disertacija

Beograd, 2020

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF BIOLOGY

Una N. Matko Stamenković

**POTENTIAL OF *ALYSSUM MURALE* WALDST. & KIT.,
THLASPI KOVATSII HEUFFEL AND *LEPIDIUM*
CAMPESTRE (L.) R. BR. (BRASSICACEAE) FROM
SERPENTINITE HABITATS IN BOSNIA AND
HERZEGOVINA FOR METAL BIOACCUMULATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020

Podaci o mentoru i članovima komisije:

Mentori:

dr Jasmina Šinžar-Sekulić

vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Biološki fakultet

dr Maja Lazarević

docent Univerzitet u Beogradu – Biološki fakultet

Komisija za ocenu i odbranu teze:

dr Jasmina Šinžar-Sekulić

vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Biološki fakultet

dr Maja Lazarević

docent Univerzitet u Beogradu – Biološki fakultet

dr Ana Čučulović

naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane: _____

Potencijal vrsta *Alyssum murale* Waldst. & Kit., *Thlaspi kovatsii* Heuffel i *Lepidium campestre* (L.) R. Br. (Brassicaceae) sa serpentinitских staništa u Bosni i Hercegovini za bioakumulaciju metala

Sažetak

U ovom radu istraživana je bioakumulacioni potencijal vrsta *Alyssum murale* Waldst. & Kit., *Lepidium campestre* (L.) R. Br. i *Thlaspi kovatsii* Heuff. (*syn. Noccaea kovatsii* (Heuff.) F. K. Mey.) iz porodice Brassicaceae sa serpentinitских staništa u Bosni i Hercegovini. S obzirom na značaj koji bi ove vrste mogle da imaju u fitoremedijaciji i fitominiranju, osnovni ciljevi ovog rada bili su: a) istraživanje fizičkih i hemijskih osobina zemljišta sa izabраних serpentinitских lokacija u Bosni i Hercegovini na kojima je zabeleženo prisustvo ovih vrsta; b) ispitivanje nivoa akumulacije i translokacije metala u biljkama; c) procenjivanje potencijalne primene lokalnih populacija za fitoremedijaciju i fitomajning.

Uzorci istraživanih biljaka sakupljeni su u periodu od 2013. do 2014. godine sa 10 serpentinitских lokaliteta u Bosni i Hercegovini. Analize zemljišta obuhvatile su određivanje mehaničkog sastava, pH vrednosti, organskog ugljenika, humusa, P₂O₅ i K₂O, pristupačnog Ca i Mg, kao i utvrđivanje koncentracija ukupnih i dostupnih metala karakterističnih za serpentinitску podlogu. Analize biljnog materijala obuhvatile su određivanje koncentracije navedenih elemenata u podzemnim i nadzemnim delovima istraživanih vrsta.

Po svojim fizičkim i hemijskim karakteristikama, zemljišta sa svih ispitivanih lokaliteta spadaju u tipična serpentinitска zemljišta. Na osnovu rezultata hemijskih analiza biljnog materijala, može se zaključiti da analizirane populacije svih istraživanih vrsta imaju potencijal za fitostabilizaciju zemljišta opterećenih toksičnim metalima koji su tipično prisutni u visokim koncentracijama na ultramafitskoj podlozi. Kao potvrđeni hiperakumulatori nikla, istraživane vrste se mogu koristiti za fitoekstrakciju i komercijalno dobijanje ovog metala koristeći tehnologiju agromajninga, pogotovo vrsta *A. murale* koja se odlikuje najizraženijim potencijalom za akumulaciju ovog elementa i najvećom biomasom.

Ključne reči: ultramafiti, serpentiniti, zemljište, potencijalno toksični elementi, elementi u tragovima, Brassicaceae, Bosna i Hercegovina, hiperakumulatori.

Naučna oblast: Biologija

Uža naučna oblast: Ekologija, biogeografija i zaštita životne sredine

UDK broj: 582.683.2:[549.623.7:551.43](497.6)(043.3)

Potential of *Alyssum murale* Waldst. & Kit., *Thlaspi kovatsii* Heuffel and *Lepidium campestre* (L.) R. Br. (Brassicaceae) from serpentinite habitats in Bosnia and Herzegovina for metal bioaccumulation

Abstract

Within this study, the bioaccumulation potential of three species from the family Brassicaceae, *Alyssum murale* Waldst. & Kit., *Lepidium campestre* (L.) R. Br. and *Thlaspi kovatsii* Heuff. (*syn. Noccaea kovatsii* (Heuff.) F. K. Mey.), from the serpentines in Bosnia and Herzegovina was investigated. Given the importance that these species might have in phytoremediation and phytomining, the main objectives of this study were: a) research of physical and chemical properties of soil from selected serpentinite locations in Bosnia and Herzegovina where the presence of these species has been recorded; b) examination of the levels of accumulation and translocation of metals in plants; c) assessing the potential use of local populations for phytoremediation and phytomining.

Samples of investigated plant species were collected in the period from 2013 to 2014 from 10 serpentinite localities in Bosnia and Herzegovina. Soil analyzes included: determination of mechanical composition, pH values, organic carbon, humus, P₂O₅, K₂O, available Ca and Mg, as well as total and available concentrations of metals that are characteristic for the serpentinite substrate. Analyses of plant material included determining the concentration of these elements in roots and shoots of the investigated species.

According to their physical and chemical characteristics, soils from all examined localities belong to typical ultramafic substrates. Based on the results of chemical analyses of plant material, it can be concluded that the analysed populations of all investigated species have the potential for phytostabilization of soils loaded with toxic metals that are typically present in high concentrations on ultramafic substrate. As confirmed nickel hyperaccumulators, the investigated species can be used for phytoextraction and commercial fabrication of this metal using agromining technology, especially the species *A. murale*, which is characterized by the most pronounced potential for accumulation of this element and the highest biomass.

Keywords: ultramafits, serpentinites, soil, potentially toxic elements, trace elements, Brassicaceae, Bosnia and Herzegovina, hyperaccumulators.

Scientific field: Biology

Field of scientific specialization: Ecology, biogeography and environmental protection.

UDC number: 582.683.2:[549.623.7:551.43](497.6)(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Ultramafiti – opšte karakteristike.....	1
1.2. Fizičke karakteristike ultramafitne podloge.....	4
1.3. Hemijske karakteristike ultramafitne podloge.....	4
1.4. Odnos biljaka prema ultramafitnoj podlozi.....	5
1.4.1. Osnovne odlike biljaka na serpentinitima i njihova podela.....	5
1.4.2. Ograničavajući edafski faktori za preživljavanje biljaka na serpentinitima.....	7
1.4.3. Hiperakumulacija.....	12
1.5. Opšte karakteristike istraživanog područja.....	15
1.5.1. Geomorfološke karakteristike istraživanog područja.....	15
1.5.2. Klimatske karakteristike na izučavanim lokacijama.....	19
1.5.3 Opšte karakteristike ispitivanih vrsta.....	26
2. CILJEVI RADA.....	29
3. MATERIJAL I METODE.....	30
3. 1. Materijal.....	30
3.2. Reagensi.....	33
3.3. Oprema.....	33
3. 4. Analize zemljišta.....	34
3.5. Analize biljnog materijala.....	36
3. 6. Statistička obrada podataka.....	37
4. REZULTATI.....	39
4.1 Fizičke i hemijske karakteristike zemljišta.....	39
4.2 Sadržaj elemenata u istraživanim biljnim vrstama.....	47
4.2.1. <i>Alyssum murale</i>	47
4.2.2. <i>Thlaspi kovatsii</i> i <i>Lepidium campestre</i>	61
4.3 Odnosi koncentracija ispitivanih elemenata u zemljištu i biljkama.....	73
4.3.1 Odnosi između koncentracija elemenata u zemljištu.....	73
4.3.2. Odnosi između koncentracija elemenata u zemljištu i biljkama.....	76
4.3.3 Odnosi između koncentracija elemenata u biljkama.....	77
4.4 Procena akumulacionih potencijala istraživanih biljnih vrsta.....	83

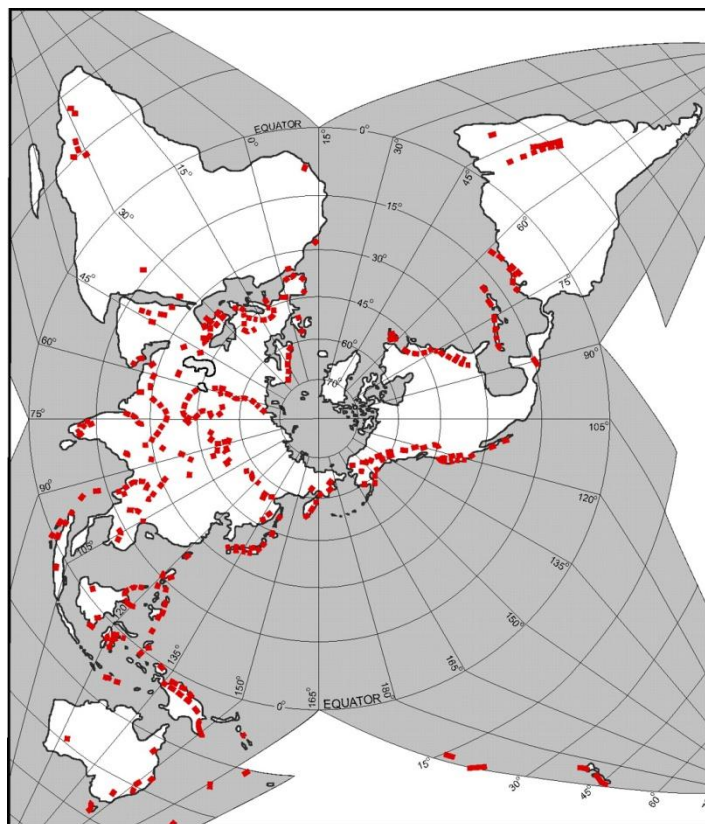
5. DISKUSIJA	87
5.1 Fizičke i hemijske karakteristike zemljišta i njihovi međusobni odnosi.....	87
5.2 Sadržaj elemenata i njihovi međusobni odnosi u istraživanim biljnim vrstama	93
5.3 Procena akumulacionog potencijala istraživanih biljnih vrsta.....	103
6. ZAKLJUČCI.....	106
7. LITERATURA	110
PRILOZI	126

1. UVOD

1.1. Ultramafiti – opšte karakteristike

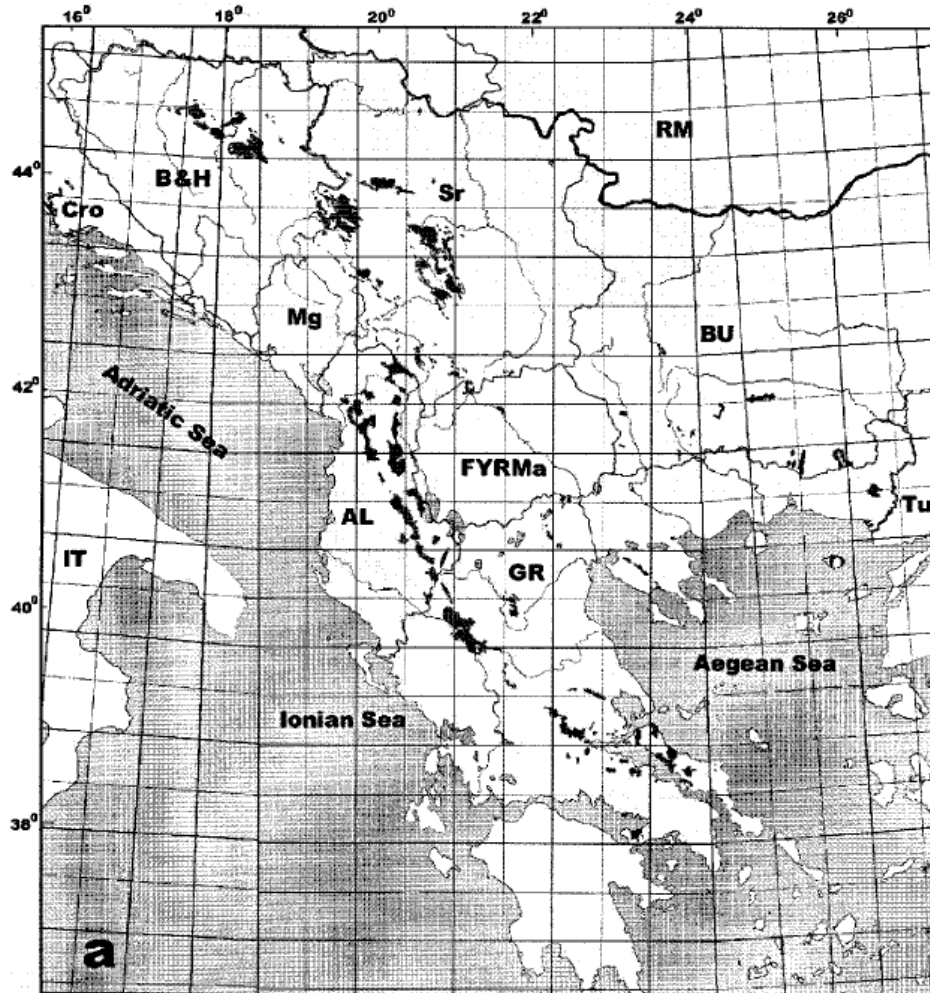
Grupa metamorfnih ili magmatskih stena koje u svom sastavu imaju manje od 45% silikata (SiO_2) i imaju visoke koncentracije magnezijuma (Mg), gvožđa (Fe), hroma (Cr), kobalta (Co) i nikla (Ni) nazivaju se ultramafiti. Pored visokih koncentracija navedenih elemenata, ultramafitna tla, obično sadrže i niske koncentracije fosfora (P), kalijuma (K) i kalcijuma (Ca) (Alexander, Coleman, Keeler-Wolf, & Harrison, 2007). Serpentinizacija ultramafitnih stena podrazumeva metamorfozu peridotita u serpentin uglavnom hidratacijom primarnih minerala, pri čemu dolazi do menjanja sastava stena na temperaturama između 100 i 300°C. Tokom ovog procesa dolazi do uvođenja vode i parcijalne oksidacije gvožđa u magnezijum. Iz navedenog, zaključuje se da metamorfizam (metasomatizam), predstavlja zamenu jednog minerala drugim, i da je glavni proces tokom formiranja serpentinita (Alexander et al., 2007).

Ultramafiti su zastupljeni na svim kontinentima. Po najnovijim procenama, oni čine i do 25% površine okeanske kore (Cannat, Fontaine, & Escartín, 2010) i više od 3% površine Zemlje (Guillot & Hattori, 2013). Značajne površine ultramafita nalaze se uz pacifičku i atlantsku obalu Severne Amerike (Kanada, Sjedinjene Američke Države), na Velikim Antilima (Portoriko, Kuba), a raštrkano i u manjom meri i u severnim i istočnim delovima Južne Amerike (Slika 1). Na prostoru Starog sveta, ultramafiti zauzimaju znatne površine u pojedinim delovima Evrope i Azije (Mediteran, Ural, Indonezija, Japan), a znatno manje u Africi (Zimbabve). Prisutni su i u pojedinim delovima Australije (naročito istočnim), na Novom Zelandu i pojedinim pacifičkim ostrvima (Nova Kaledonija) (Whittaker, 1954). U Evropi ih ima na teritoriji Francuske, Portugalije, Španije, Italije, Bugarske, Grčke, Albanije, Severne Makedonije, Srbije, Bosne i Heregovine, Švajcarske, Češke, Austrije, Velike Britanije, Finske, Norveške i Švedske.



Slika 1. Severna polarna projekcija koja prikazuje distribuciju serpentinita (preuzeto iz Oze, Bird, & Fendorf, 2007).

Najveće serpentinitne površine u Evropi zastupljene su na Balkanskom poluostrvu, gde se u velikim blokovima ili kao male površine, odvojene od drugih geoloških podloga javljaju u centralnim delovima Bosne i Hercegovine, zapadnoj i centralnoj Srbiji, severnoj, centralnoj i jugoistočnoj Albaniji, Epiru i Tesaliji u Grčkoj (Slika 2). Osim toga, manje serpentinitne površine zastupljene su i u jugozapadnoj i centralnoj Bugarskoj (centralni i istočni Rodopi), a izolovani serpentiniti u vidu tzv. ostrva, prisutni su i u centralnoj Grčkoj (Sterea Hellas), južnim i severoistočnim delovima Srbije i u severnom delu Severne Makedonije (Stevanović, Tan, & Iatrou, 2003).



Slika 2. Distribucija serpentinskog zemljišta na Balkanskom poluostrvu (preuzeto iz Stevanović et al., 2003).

Termin „serpentinit“ se odnosi na serpentinitnu grupu minerala (obuhvatajući krizolit, lizardit i antigonit) čija je opšta formula $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ koji predstavljaju važan sastojak u ultramafitnim stenama. Stene koje u sebi imaju veliku količinu serpentinitnih minerala, a koji su dobijeni menjanjem piroksena i olivine, nazivaju se „serpentiniti“. U okviru preciznije definicije serpentinita pojavljuje se izraz „ultrabazni“ ili „ultramafitni“. „Ultramafitni“ podrazumeva da je u steni prisutno više od 70% Fe-Mg minerala, ali ne obavezno i minerala iz serpentinitne grupe, dok se „ultrabazni“ odnosi na stene koje sadrže manje od 45% SiO_2 . Veliki broj naučnika već decenijama teži da sve ultramafitne stene klasifikuju pod zajedničkim nazivom serpentiniti. U botaničkoj literaturi ustaljeno je označavanje ultramafitne flore terminom „serpentinitna flora“, nezavisno od toga da li konkretno zemljište vodi poreklo od serpentinizovanih stena ili ne. Izraz „ultramafitna flora“ se primenjuje, uglavnom, od strane specijalista, a tradicionalni izraz „serpentinitna flora“ je opšte prihvaćen i primenjuje se u okviru botaničkih naučnih publikacija (Brooks, 1987).

1.2. Fizičke karakteristike ultramafitne podloge

Stena serpentinita može sadržati jedan ili mešavinu četiri serpentinska minerala, koji imaju isti sastav, ali se razlikuju u strukturi atoma. Po strukturi i boji izvršena je podela na: **antigorit** (laminirana struktura i tamno zelena boja), **serpentin** (delimično vlaknaste strukture i svetliji od antigorita), **krizotil** (vlaknast i još svetliji u boji) i **seropfilit** (amorfni i tamno zeleni). Boja stene varira zavisno od kombinacije minerala. Roditeljska stena je metamorfna. Istraživanja su pokazala da se vulkanski, osnovni peridotit tokom nekoliko faza postepeno pretvara u serpentinit, i da tokom faza izmenjivanja nastaju hlorit, azbest i glina, kao i da pod atmosferskim uticajima, tokom više desetina godina, dolazi do promena u strukturi i pretvaranja zelenog kamena u crvenu, tamno smeđu, sivo-smeđu ili sivobelu masu (Knežević – Đorđević & Đorđević, 1976).

Mešanjem površinskog organskog sloja i raspadnute matične stene nastaju serpentinitna zemljišta koja mogu biti crvene, zelene, plave ili gotovo crne boje u zavisnosti od sastava (Kazakou, Dimitrakopoulos, Baker, Reeves, & Troumbis, 2008) i mogu biti raznih dubina (u zavisnosti od nagiba terena, debljine površinskog sloja i uticaja erozije). Serpentinitna zemljišta se često formiraju u brdsko-planinskim predelima, na mestima koja se odlikuju manjim ili većim nagibom, i u kombinaciji sa oskudnom vegetacijom su osetljiva na svaku vrstu erozije što dovodi do posledica je da su najčešće plitka i skeletogena (Walker, 1954). Istraživanja su pokazala da je sadržaj gline u serpentinitnim zemljištima uglavnom minimalan, i da značajan udeo krupnih frakcija u njemu, doprinosi brzom poniranju vode i nastanku sredine sa malo vlage (Kruckeberg, 2002). Iz svega navedenog sledi da biljke koje naseljavaju ove lokacije moraju biti prilagođene na sušne uslove staništa. Tamna boja zemljišta, mali sadržaj vode u njemu i oskudna vegetacija doprinose i znatnom zagrevanju serpentinitne podloge, tako da se često javljaju velike dnevne temperaturne amplitude (Proctor & Woodell, 1975).

1.3. Hemijske karakteristike ultramafitne podloge

Serpentinitna zemljišta odlikuju se veoma nepovoljnim hemijskim sastavom. Njegove osnovne hemijske osobine nastaju prevashodno kao posledica specifičnog hemijskog sastava matične podloge na kojoj i od koje se formira i mogu se svesti na:

- visoke koncentracije magnezijuma (Mg), a male koncentracije kalcijuma (Ca), usled čega je odnos ova dva elementa u zemljištu nepovoljan za biljke koje tu rastu ($Ca/Mg < 1$);
- prisutne su male koncentracije za biljke esencijalnih nutrijenata, kao što su, pored pomenutog kalcijuma, azota, fosfora, kalijuma i molibdena; ovakav sastav nastaje usled interakcije abiotičkih i biotičkih faktora; naime, na serpentinitima je prisutna oskudna

vegetacija, tako da je mala organska produkcija, dok je nizak sadržaj fosfora i kalijuma posledica i njihove niske koncentracije u matičnoj podlozi (Burt et al., 2001);

- udeo potencijalno toksičnih metala, kao što su Ni, Cr, Co, Mn i Zn, je visok (Brooks, 1998), tako da su serpentinitiska zemljišta neantropogeni (prirodni) izvor ovih potencijalno štetnih elemenata u životnoj sredini. Kakva će biti njihova dostupnost za biljke, pa samim tim u kolikoj meri će oni ući u lance ishrane, zavisi od čitavog niza faktora, kao što su: temperatura i vodni režim staništa, poreklo metala i njihova distribucija u zemljištu, pH zemljišta, redoks potencijal, prisustvo karbonata i organske materije, količina prisutnih oksida, aktivnost mikroorganizama u zoni korena, hemijski sastav jedinjenja koje koren izlučuje u spoljašnju sredinu, itd. (Vithanage et al., 2019).

1.4. Odnos biljaka prema ultramafitnoj podlozi

1.4.1. Osnovne odlike biljaka na serpentinitima i njihova podela

Nepovoljni abiotički faktori koji vladaju na serpentinitiskim staništama, kao što su nepovoljan hemijski sastav zemljišta, česta izloženost eroziji, veliki temperaturni ekstremi i mala količina vode u podlozi, odražavaju se na oskudni razvoj vegetacije, naročito u poređenju sa okolnim neseserpentinskim površinama. Navedena kombinacija fizičkih, hemijskih i biotičkih komponenti dovode do onoga što je opisano kao “serpentinitiski sindrom” (Jenny, 1980). Termin “serpentinitiski sindrom” obuhvata sve strukturne i funkcionalne adaptacije koje su nastale pod dejstvom pomenutih faktora, a koje biljkama omogućavaju da prežive visoke koncentracije potencijalno toksičnih metala u zemljištu, koje je ujedno neplodno i nepovoljnog odnosa Ca/Mg, kao i sušne uslove staništa. Posledica svega navedenog je da je produkcija biomase niska u odnosu na biljke koje rastu u okolnom neseserpentinitiskom području.

Biljne vrste prilagođene serpentinitiskim zemljištima često se odlikuju morfološkim osobinama donekle različitim od bliskih vrsta koje nisu prilagođene ovakvim staništima. Prema Clarkson & Hanson-u (1980), neke od odlika biljaka sa siromašne podloge su: 1) spor rast; 2) velika ulaganja u zaštitu biljke; 3) niske stope zasićenja pri uzimanju hranljivih materija; 4) selektivnost; 5) plastičnost razvoja korenovog sistema; 6) skladištenje i efikasna upotreba hranljivih materija; 7) velika ulaganja u razvoj mikorize; 8) efikasni mehanizmi unutrašnje reciklaže hranljivih materija kako bi se obezbedili minimalni gubici tokom opadanja listova.

Mnoge serpentinitiske vrste su kseromorfne, kao posledica odgovora na nedostatak vode na ovim staništima (Proctor & Woodell, 1975). Listovi su im obično sitni, sa izraženim perifernim zaštitama, kao što su debela kutikula, voštane prevlake ili dlake, koje smanjuju moguć štetan uticaj prekomerne insolacije, visoke temperature u toku dana i sušnih uslova staništa. Freitas & Mooney (1996) su upoređivali toleranciju na nedostatak vode kod dva različita ekotipa

vrste *Bromus hordeaceus* iz peščara i sa serpentinitne podloge. Oni su otkrili da je serpentinitni ekotip pokazao veći stepen fizioloških adaptacija na nedostatak vode i uočili su da je smanjena stomatna provodljivost koja je rezultirala manjim intenzitetom transpiracije i većim vodnim potencijalom u listovima. Brooks (1987) je komentarisao da serpentinitne biljke imaju veoma razvijen korenov sistem koji pomaže u usvajanju vode i mineralnih elemenata, i da se to može posmatrati kao adaptacija na siromašna i suva serpentinitna tla. Neke serpentinitne vrste formiraju bočne korenove koji im omogućavaju efikasno usvajanje vode, ali i pomažu u regulaciji visoke koncentracije Mg zadržavajući ga u noviu korena (O'Dell, James & Richards, 2006).

Na osnovu svega navedenog zaključuje se da serpentinitna staništa naseljavaju specifične biljne vrste koje su razvile odgovarajuće morfo-anatomske, fiziološke i fenološke karakteristike koje im omogućavaju da prežive nepovoljne uslove koji na ovim staništima vladaju. Mnoge od njih su terciarne starosti i ograničenog, endemičnog rasprostranjenja (Proctor & Woodell, 1975). Procenjuje se da samo na Balkanskom poluostrvu živi oko 335 endemičnih biljnih taksona na serpentinitnim staništima od kojih je 123 vezano isključivo za ovaj tip podloge (Stevanović et al., 2003).

Biljke koje žive na serpentinitima nazivaju se serpentinitofite i mogu se podeliti u dve glavne grupe:

1. obligatne serpentinitofite, (rastu isključivo na serpentinitima);
2. fakultativne serpentinitofite, (rastu i na drugim tipovima podloge) i mogu se podeliti na:
 - a. fakultativne serpentinitofite, (najčešće se javljaju na serpentinitu, ali mogu uspešno rasti i na drugim tipovima podloge) i
 - b. slučajne fakultativne serpentinitofite (češće se nalaze na neserpentinitnim staništima) (Reeves, Baker, Borhidi, & Berazain, 1999; Stevanović & Janković, 2001).

Prema Brooks-u (1987) fakultativni su oni taksoni koji će se dobro razvijati na serpentinitnim zemljištima bez specifičnog zahteva za bilo koju od osobina zemljišta, dok obligatni rastu na serpentinitu zbog specifičnih nutritivnih ili drugih zahteva koje samo takva zemljišta mogu da obezbede.

Prema Brooks-u (1987) obligatni serpentinitofiti rastu na serpentinitu zbog specifičnih nutritivnih ili drugih zahteva koje samo takva zemljišta mogu da obezbede, a fakultativni serpentinitofiti su oni taksoni koji će se dobro razvijati na serpentinitnim zemljištima bez specifičnog zahteva za bilo koju od osobina zemljišta.

Baker (1981) je primetio da će svi serpentinitni endemiti dobro rasti i na neserpentinitnim zemljištima sve dok ne podlegnu ili gljivičnim napadima ili usled konkurencije od strane jakih korovskih vrsta. Ovaj autor je smatrao da su ovi taksoni obligatni za serpentinitne jedino ukoliko im takva staništa nude utočište od biotičkih faktora koji postoje na neserpentinitnim podlogama.

1.4.2. Ograničavajući edafski faktori za preživljavanje biljaka na serpentinitima

Biljke predstavljaju važne komponente ekosistema pošto učestvuju u ciklusima kruženja mineralnih elemenata i predstavljaju sponu između abiotičkih i biotičkih komponenti životne sredine. Ponašanje pojedinačnih elemenata u biljkama zavisi od njihovih osobina, ali i međusobnih odnosa između esencijalnih elemenata i onih koji su prisutni u tragovima. Nepovoljan mineralni sastav serpentinitnog zemljišta ima važan uticaj na usvajanje mineralnih materija od strane biljaka i njihovu sposobnost da tolerišu stresne uslove zemljišta. Analize pokazuju da sadržaj minerala važnih za razvoj biljaka (N, P, K, S, Ca i Mg) u serpentinskim zemljištima ima veći uticaj na produktivnost biljnih zajednica od visokog sadržaja potencijano toksičnih elemenata, kao što su Ni, Cr i Co (Chiarucci, 2004). Tkiva biljaka koje rastu na serpentinitnim zemljištima često sadrže niske koncentracije N, P, K i Ca, a visoke koncentracije teških metala kao što su Ni, Cr i Co (Brooks, 1998). Istraživanja su pokazala da neke biljne vrste mogu da selektivno usvajaju Ca i isključuju Mg, kako bi održale adekvatne količine ovih elemenata, dok neke vrste bakterija u zoni korena biljaka mogu da isključe ili izoluju teške metale, kao što je Ni, čime se smanjuje njihova koncentracija ispod nivoa toksičnosti (O'Dell et al., 2006).

Brooks (1987) je predložio da sledećih pet faktora mogu da imaju vezu sa serpentinitnim sindromom: problemi koji proističu iz nepovoljnog odnosa Ca/Mg u podlozi; neplodnost koja nastaje usled male količine mineralnih materija u zemljištu; neplodnost usled niskog sadržaja kalcijuma u serpentinskim zemljištima; toksičnost usled viška magnezijuma; toksični efekti Co, Cr i Ni. Ovi faktori se mogu grupisati u tri najvažnije hipoteze koje objašnjavaju uticaj edafskih faktora na serpentinitnu floru:

1. sadržaj i odnos kalcijuma i magnezijuma;
2. nedostatak makronutrijenata;
3. visoki nivoi potencijalno toksičnih metala (Kazakou et al., 2010).

Sadržaj i odnos kalcijuma i magnezijuma

Kalcijum i/ili magnezijum u serpentinitnim zemljištima mogu da utiču na biljke na sledeće načine: a) toksičnost magnezijuma; b) nedostatak kalcijuma; c) nepovoljan odnos Ca/Mg u tlu (Brooks, 1987).

- Toksičnost magnezijuma – visok nivo magnezijuma smatra se jednom od negativnih karakteristika serpentinitne podloge. Deo ove toksičnosti potiče od veoma visoke koncentracije ovog elementa u zemljištima, zajedno sa njegovom relativno visokom raspoloživošću. Ulogu magnezijuma u kontroli rasta biljaka na ultramafitnim staništima proučavali su Brooks & Yang (1984) na nekoliko endemičnih biljnih vrsta sa serpentinita Zimbabvea. Otkrili su da je u biljnim tkivima postojala značajna negativna korelacija

između koncentracija magnezijuma i nekih mineralnih elemenata, kao što su gvožđe, mangan, fosfor, bor i natrijum.

- Nedostatak kalcijuma – koncentracija kalcijuma u serpentinitnim zemljištima je izuzetno niska i u nekim slučajevima je $< 100 \text{ mg kg}^{-1}$. Niski nivo kalcijuma nije presudan za serpentinitni sindrom, već niska vrednost odnosa Ca/Mg. Ako je kalcijum prisutan u dovoljno velikim koncentracijama, onda on ima sposobnost da neutrališe štetne efekte jona kao što su Mg^{2+} , Na^+ i H^+ . Nedostatak kalcijuma dovodi do smanjene tolerancije prema povišenim koncentracijama drugih elemenata u serpentinitnim zemljištima (Brooks, 1987). Eksperimenti koje je uradio Proctor (1971), su pokazali da dodavanje kalcijuma u velikoj količini dovodi do smanjenja pojave simptoma toksičnosti nikla. Walker je (1954), pokazao da se nedostatak kalcijuma može se smatrati jednim od glavnih uzroka serpentinitnog problema. Brooks-ovi rezultati eksperimenata se nisu poklopili sa rezultatima Walker-a i pokazali su da su fiziološki efekti niskog sadržaja kalcijuma povezani sa sposobnošću ovog elementa da spreči oštećenja koja mogu nastati od teških metala, a ne sa samim nedostatkom kalcijuma (Brooks, 1987).
- Nepovoljan odnos Ca/Mg – Loew & May (1901) su prvi pokazali da je loša produktivnost serpentinitnih staništa posledica niskog odnosa Ca/Mg. Iz svojih eksperimenata su zaključili da Ca/Mg mora biti najmanje jedan za optimalan rast biljaka. Prema Vlamis & Jenny (1948) nizak sadržaja kalcijuma u serpentinitnim zemljištima je glavna komponenta serpentinitnog sindroma, dok visoke koncentracije magnezijuma dodatno povećavaju problem dostupnosti kalcijuma. Ovu hipotezu podržavaju brojne studije (Kruckeberg, 1954; Walker, Walker, & Ashworth, 1955) u kojima se rast ne-serpentinitnih biljaka na serpentinitnom zemljištu značajno poboljšava dodavanjem kalcijuma u zemljište. Takav je slučaj sa vrstom *Phacelia californica* koja može preživeti na serpentinitnom tlu ako se doda kalcijumom (Kruckeberg, 1954). Međutim, dodatak N, P i K nije imao takav uticaj na biljke. Walker (1954) je, takođe, zaključio da je loša produktivnost serpentinitne podloge posledica niske koncentracije Ca i koegzistirajuće visoke koncentracije Mg, tako da samo vrste koje su tolerantne na niski odnos Ca/Mg mogu preživeti na ovakvom zemljištu. Nizak odnos Ca i Mg u zemljištu u molarnom obliku je u antagonističkom odnosu sa apsorpcijom Ca od strane biljke, zahtevajući specijalizovani fiziološki mehanizam da bi se održala adekvatna unutrašnja koncentracija Ca (Marschner, 2002). Mehanizam se sastoji od selektivne akumulacije kalcijuma, izbacivanjem magnezijuma i sekvestriranja magnezijuma i identifikovan je kod više vrsta na globalnom nivou (O'Dell et al., 2006).

Nedostatak makronutrijenata

Jedan od važnih faktora koji bi mogao biti povezan sa serpentinitnim problemom je nedostatak mineralnih elemenata važnih za rast i razvoj biljaka (Nagy & Proctor, 1997). Koncentracije fosfora, kalijuma i azota su posebno niske u ovim zemljištima, iako je ovo delimično nadoknađeno njihovom optimalnom raspoloživošću pri pH 6,8 koji je tipičan za

serpentinitsko tlo. Condit sa saradnicima (2013) smatra da su višestruki nedostaci makronutrijenata u tlu, a ne nedostatak bilo kog pojedinačnog elementa, odgovorni za generalno lošu produkciju biljaka, ali i čitavih biljnih zajednica (Condit, Engelbrecht, Pino, Pérez, & Turner, 2013).

Visok nivo potencijalno toksičnih elemenata

Robinson, Edgington, & Byers (1935) i Brooks (1987) su sugerisali da su visoki sadržaji potencijalno fitotoksičnih elemenata poput Co, Ni i Cr u serpentinском zemljištu odgovorni za njihovu neplodnost. Na osnovu usvajanja fitotoksičnih elemenata (Co, Ni i Cr), biljke se najgrublje mogu podeliti na: one koje pokazuju samo neznatno povišene koncentracije metala i one koje ih usvajaju u znatnoj meri. Većina biljaka pripada prvom tipu. Na primer, kada je u pitanju Ni, one sadrže oko 5-100 mg/kg Ni u suvoj materiji u poređenju sa biljkama sa drugih tipova podloge koje sadrže 0,5-10 mg/kg ovog elementa (Reeves, 1992).

Uticao potencijalno toksičnih elemenata na biljke može biti različit. Visoke koncentracije ovih elemenata u biljkama mogu izazvati razne anatomske, morfološke i fiziološke promene, mogu uticati na njihov rast, intenzitet fotosinteze, vodni režim, itd. Postoji tri osnovna načina uticaja toksičnih metala na biljke:

- putem direktne toksičnosti usled koje dolazi do zaostajanja u razvoju i pojave hloroze,
- preko antagonizma sa drugim nutrijentima pri čemu može doći do nedostatka gvožđa,
- inhibicijom rasta i prodiranja korena.

Prvi simptomi nepovoljnog uticaja toksičnih metala su najčešće smanjenje rasta biljke i pojave hloroza i nekroza na listovima, i to obično prvo na najstarijim, a kasnije i na mlađim listovima (Brooks, 1987).

Na osnovu svega navedenog zaključuje se da bi biljke preživjele na ovakvim staništima, morale su na različite načine da se prilagode na uslove koji nam njima vladaju. U zavisnosti od strategije preživljavanja visokih koncentracija potencijalno toksičnih elemenata razlikuju se četiri grupe biljaka (Baker, 1981):

1. ekskludere metala – ograničavaju transport metala iz podzemnih u nadzemne delove, što je i najčešća strategija);

2. biljke indikatori – usvajaju i transportuju potencijalno toksične elemente u nadzemne delove, tako da im je koeficijent koncentracije u odnosu na spoljašnju sredinu približno 1;

3. biljke akumulatori – usvajaju toksične elemente u znatnoj meri nezavisno od njihove zastupljenosti u podlozi, tako da je odnos koncentracije metala koren/listovi > 1 ;

4. biljke hiperakumulatori – koncentracija potencijalno toksičnih metala u nadzemnim delovima je preko 100 puta veća u odnosu na druge vrste; granične vrednosti da bi se neka biljka smatrala hiperakumulatorom su različite za različite elemente i iznose (Baker & Brooks, 1989; Van der Ent, Baker, Reeves, Pollard, & Schat, 2013):

- > 100 mg kg⁻¹ – kadmijum (Cd),
- > 300 mg kg⁻¹ – kobalt (Co), hrom (Cr), bakar (Cu),
- > 1000 mg kg⁻¹ –nikl (Ni), olovo (Pb),
- > 3000 mg kg⁻¹ – cink (Zn),
- > 10000 mg kg⁻¹ – mangan (Mn).

U daljem tekstu biće opisani uticaju nekoliko za serpentinite najčešćih potencijalno toksičnih metala na biljke.

- *Nikl* (Ni) – Prosečna zastupljenost nikla u Zemljinoj kori iznosi oko 20 mg kg⁻¹ stene. Njegova koncentracija u podlozi zavisi od tipa matične stene i pH zemljišta (veća je u kiselim zemljištima). Sedimentne stene sadrže od 5 do 90 mg kg⁻¹ nikla, dok je u ultramafitnim stenama njegova koncentracija od 1400 do 2000 mg/kg (Kabata-Pendias, 2011). Iako se o ulozi nikala u metabolizmu biljaka, kako navodi Kabata-Pendias (2011), još uvek raspravlja, utvrđeno je da je ovaj element značajan za proces metabolizma ureaze kod mahunarki (Eskew, Welch, & Cary, 1983). Uobičajeni simptomi toksičnog dejstva nikla su: pojava hloroza, oslabljena apsorpcija nutrijenata i razvoj korena, kao i poremećaj metabolizma. Nikl utiče na fotosintezu i transpiraciju, što može dovesti do smanjenja sadržaja vode u biljkama (Nagayoti, Lee, & Sreekanth, 2010). Toksičnost nikla zavisi i od njegovog odnosa sa drugim elementima, posebno sa gvožđem, pri čemu se smatra da je odnos Ni/Fe značajniji pokazatelj veze gvožđa sa toksičnim efektima nikla, nego koncentracija oba elementa (Khalid & Tinsley 1980). Istraživanja su pokazala da postoji oko 400 vrsta biljaka iz 40 familija koje imaju sposobnost akumulacije nikla u koncentracijama preko 1000 mg Ni kg⁻¹ (Jaffré, Pillon, Thomine, & Merlot, 2013).

- *Hrom* (Cr) se ne smatra bitnim za rast i razvoj biljaka, iako su neke studije pokazale da pri niskim koncentracijama (1 mM) ovaj element stimuliše njihov rast (Bonet, Poschenrieder, & Barcelo, 1991). U okviru gornje kore Zemlje prisutan je u koncentraciji od prosečno 100 mg kg⁻¹. U ultramafitnim stenama, ima ga mnogo više, pa njegov sadržaj može biti veći i od 3000 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias, 2011). Koncentracije hroma u zemljištima nastalim na takvim matičnim podlogama povećavaju se tokom vremena. Hrom koji se tako oslobađa lako se raspada na minerale gline i taloži kao homogeni čvrsti sor sa Al/Fe-hidroksidima (Basu, Bhattacharya, & Paul, 1997). Ovaj element postoji pretežno u III i VI oksidacionim stanjima u zemljištu. Sastojci heksavalentnog hroma Cr (VI) su relativno toksičniji od Cr (III) zbog njihove visoke rastvorljivosti u vodi (James, 1996), brze permeabilnosti kroz biološke membrane i naknadne interakcije sa intracelularnim proteinima i nukleinskim kiselinama (Basu et al., 1997).

Hrom je toksičan za poljoprivredne kulture pri koncentraciji od 0,5 do 5,0 mg L⁻¹ u hranljivom rastvoru i 5 do 100 mg kg⁻¹ dostupnog Cr u tlu. Vrste za koje je utvrđeno da akumuliraju Cr su uglavnom egzotične, tako da su istraživanja mehanizama hiperakumulacije ovog elementa oskudna (Hossner, Loeppert, Newton, Szaniszló, & Moses Attrep, 1998). Hrom je u maloj količini dostupan biljkama i ne prenosi se lako kroz biljku, tako da je koncentrisan uglavnom u korenovima. Za biljke najlakši za apsorpciju je Cr⁶⁺, koji je vrlo nestabilna forma pod normalnim uslovima zemljišta, a njegova raspoloživost zavisi od svojstava zemljišta, a

naročito od njegove strukture i pH vrednosti. Mehanizam apsorpcije i translokacije Cr u biljkama je sličan onima za gvožđe i stoga je sposobnost korena za pretvaranje Cr^{3+} u CrO_4^{2-} ključni proces u apsorpciji Cr. Postoji velika razlika u akumulaciji Cr u izdancima i korenovima različitih biljnih vrsta. Najveća koncentracija pronađena je u korenovima biljaka porodice Brassicaceae (Kabata-Pendias, 2011).

- *Kobalt* (Co) je u Zemljinoj kori visoko koncentrovan u mafitskim stenama, do 200 mg kg^{-1} , u poređenju sa njegovim sadržajem u kiselim magmatskim stenama ($1\text{-}15 \text{ mg kg}^{-1}$) ili gornjoj kontinentalnoj kori ($10\text{-}12 \text{ mg kg}^{-1}$). Geohemijski ciklus Co veoma liči na ciklus Fe i Mn i verovatno je povezan sa nekoliko minerala ovih metala. U zemljištu, izgleda da je ponašanje Co snažno uticalo uglavnom na formiranje faze oksida mangana. Relativno lake interakcije Co sa svim metalima koji su geohemijski ili biohemijski povezani sa gvožđem, imaju značajan uticaj na njegovo ponašanje u zemljištu (Kabata-Pendias, 2011). Srednja vrednost Co u površinskim zemljištima u svetu iznosi oko 10 mg kg^{-1} . Obično su viši nivoi Co prisutni u teškim glinenim zemljištima (kambizolima), a ponekad i u organskom tlu (histosoli). Sadržaj i raspodela Co u profilima tla zavise od procesa koji su učestvovali u njegovom formiranju i stoga se razlikuju za zemljišta različitih klimatskih zona. Viši sadržaj Co u površinskim zemljištima zabeležen je u sušnim i semiaridnim regionima, u zemljištima oko rudnih naslaga (do 85 mg kg^{-1}) i iznad serpentinskih stena (do 520 mg kg^{-1}). Aktivnost kobalta u zemljištu zavisi od nekoliko faktora, među kojima pH potencijal igra značajnu ulogu.

Sadržaj Co u biljkama zavisi od karakteristika zemljišta i sposobnosti biljaka da apsorbuju ovaj metal. Apsorpcija Co^{2+} od strane korena vrši se aktivnim transportom, dok dalji transport kroz biljku zavisi od transpiracije. Mešanje sa organskim jedinjenjima kontroliše njegovu bioraspoloživost. Mala mobilnost Co^{2+} u biljkama ograničava njegov transport iz stabla u listove (Kabata-Pendias, 2011). Sposobnost biljnih vrsta da apsorbuju Co značajno varira. Tako je sadržaj Co u detelini iz različitih zemalja od 100 do 570 mg kg^{-1} , dok su ove vrednosti za trave između 60 i 270 mg kg^{-1} . Poznato je da biljke mogu da akumuliraju velike količine Co i da pritom razviju mehanizam tolerancije na ovaj metal koji je u osnovi sličan onome što se javlja u bilo kojoj metalifernoj biljnoj vrsti. Nekoliko biljnih vrsta, uglavnom iz porodica Brassicaceae, Caryophyllaceae, Violaceae, Leguminosae, Boraginaceae i Nyssaceae, poznate su po visokoj akumulaciji Co i preporučuju se i kao biogeohemijski pokazatelji prisustva ovog elementa u većoj količini (Kabata-Pendias, 2011).

1.4.3. Hiperakumulacija

Veliki broj biljaka koji raste na serpentinitnom zemljištu pripadaju vrstama koje se nazivaju “hiperakumulatori” (Van der Ent et al., 2013). Ove biljke mogu usvajati metalne i metaloidne elemente i čuvati ih u svojim stablima, listovima i cvetovima u izuzetno visokim koncentracijama (Rascio & Navari-Izzo, 2011). Do danas je identifikovano više od 500 vrsta “hiperakumulatora”, uključujući značajan broj predstavnika porodice Brassicaceae (Pollard, Reeves, & Baker, 2014). Samo u okviru te porodice, rod *Alyssum* sadrži oko 50 taksona hiperakumulatora Ni, što je najveći broj utvrđenih hiperakumulatora ovog elementa (Broadhurst & Chaney, 2016).

Jedan od najinteresantnijih aspekata adaptacija biljaka na serpentinitnim zemljištima je način na koji reaguju na povišenu koncentraciju nikla u tlu. Prosečna koncentracija ovog elementa u zemljištu po Kabata-Pendias (2011) je 13-37 mg kg⁻¹. Biljke na ovim zemljištima obično sadrže oko 0,05-5 mg kg⁻¹ Ni u tkivu suvog lista (Brooks & Radford, 1978). Serpentinitna zemljišta mogu imati i 100 puta više Ni, tj. od oko 700 do preko 5000 mg kg⁻¹, a većina biljaka koje preživljavaju na ovim staništima sadrži Ni u koncentracijama oko 10 puta većim nego na drugim mestima, tj. od oko 10 do 100 mg kg⁻¹ (Ghaderian, Movahedi, & Ghasemi, 2009). Mali procenat biljnih vrsta na serpentinitu (oko 1-2% vrsta na serpentinitu širom sveta) može da usvaja izuzetno veliku količinu Ni iz podloge - preko 1000 mg/kg, a ponekad čak i preko 10.000 mg kg⁻¹ (Reeves & Adigüzel, 2008).

Ekstremnu akumulaciju nikla od strane serpentinitnih biljaka prvi su zapazili Minguzzi & Vergnano (1948) u Italiji kod vrste *Alyssum bertolonii* Desv. Tokom narednih 20 godina slični rezultati dobijeni su kod vrsta *A. murale* u Jermeniji (Doksopulo, 1961) i *A. serpyllifolium* Desf. u severoistočnoj Portugaliji (Menezes de Sequeira, 1969), da bi nešto kasnije bilo utvrđeno da je hiperakumulacija Ni prisutna kod čak 48 taksona iz ovog roda (Brooks & Radford, 1978; Brooks, Morrison, Reeves, Dudley, & Akman, 1979). U ranim sedamdesetim godinama otkrivene su i druge biljke koje akumuliraju Ni u Rodeziji (sada Zimbabve) (Wild, 1970), zapadnoj Australiji (Severne & Brooks, 1972) i Novoj Kaledoniji (Jaffré & Schmid, 1974). Kod jedne od drvenastih serpentinitnih vrsta Nove Kaledonije, *Sebertia acuminata*, otkriveno je da proizvodi lateks sa oko 25% Ni u suvoj materiji (Jaffré, Brooks, Lee, & Reeves, 1976); ova ekstremna akumulacija Ni tada je prvi put i opisana kao “hiperakumulacija”. Termin je kasnije objašnjen definisanjem hiperakumulatora kao onih biljnih vrsta kod kojih se može naći više od 1000 mg/kg Ni u nadzemnim tkivima (obično listovima) na njihovom prirodnom staništu (Brooks, Lee, Reeves, & Jaffré, 1977).

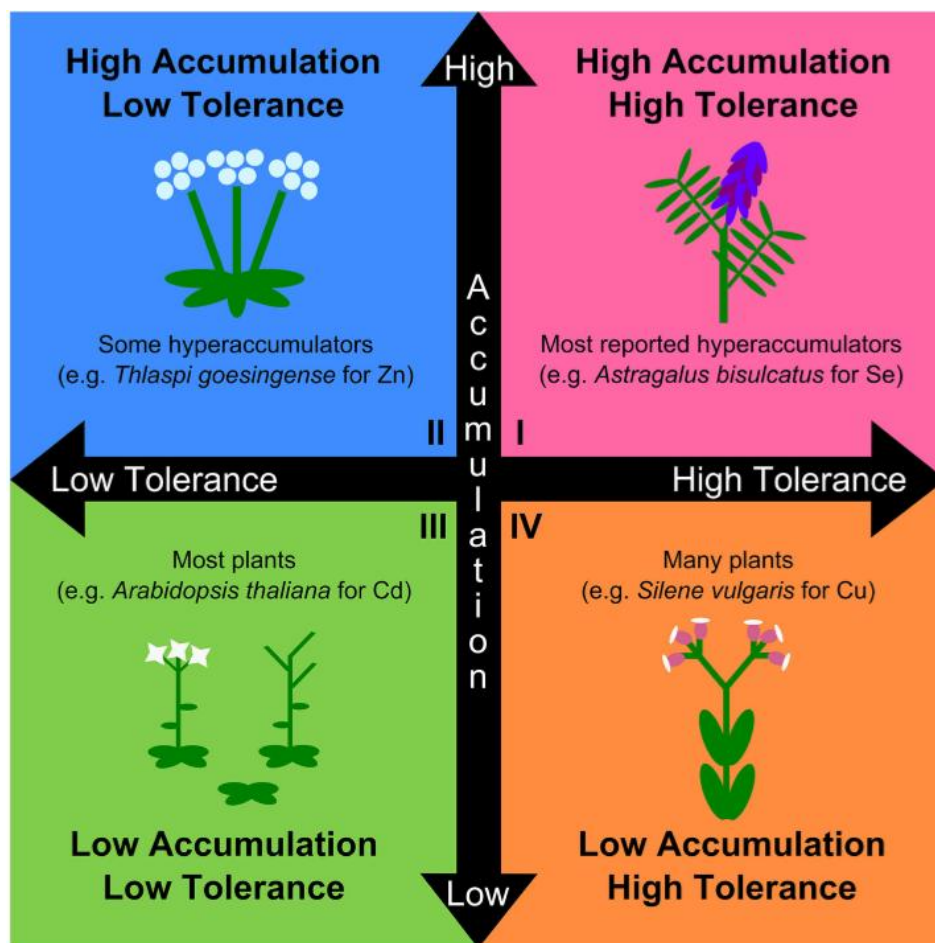
Od kraja sedamdesetih godina, rad na serpentinitnim biljkama širom sveta doveo je do identifikacije oko 390 vrsta (iz više od 90 rodova i 40 porodica) koje vrše hiperakumulaciju nikla; oko 85% ovih otkrića proizašlo je iz laboratorije Massey Univerziteta na Novom Zelandu, koju je vodio profesor Robert Brooks, autor velikog broja radova i knjiga vezanih za ovu problematiku. Liste ovih vrsta date su u radovima Brooks-a (1987), Reeves (1992) i Reeves & Baker (2000). U brojnim slučajevima analize su rađene na delovima listova herbarijskih

primeraka koje su slali kustosi kolekcija širom sveta, ali su često i sakupljani uzorci na serpentinitnim terenima.

Smatra se da je većina vrsta koje su hiperakumulatori nikla (verovatno oko 70-95%) endemična za serpentinitno zemljište (Reeves, Laidlaw, Doronila, Baker, & Batianoff, 2015). Pokazano je i da se neke vrste javljaju i na drugim tipovima podloga sa veoma različitim koncentracijama Ni. Kao posledica toga, kod ovih vrsta utvrđen je i široki spektar koncentracija Ni u njihovim tkivima (Reeves et al., 2015). Iz literature sledi da izraz "hiperakumulator" treba ograničiti na biljne vrste koje usvajaju velike količine određenog elementa na njihovim prirodnim staništima, odnosno, da ga ne treba primenjivati na biljke koje samo akumuliraju Ni iz rastvora za gajenje ili iz zemljišta u koja je Ni namerno dodat (Van der Ent et al., 2013; Pollard et al., 2014).

Aktuelne definicije hiperakumulacije se svode na toleranciju i na akumulaciju. Istraživanja ukazuju na to da su tolerancija i akumulacija različite osobine posredovane genetički i fiziološki različitim mehanizmima (Verbruggen, Hermans, & Schat, 2009), a takođe mogu imati i posebne evolutivne puteve. Postoji tvrdnja da odvojeni mehanizmi hiperakumulacije i tolerancije formiraju dve kontinuirane ose koje proizvode četiri opšte kategorije biljaka: tolerantne akumulatore, netolerantne akumulatore, netolerantne ne-akumulatore i tolerantne ne-akumulatore (Slika 3; Goolsby & Mason, 2015).

Osobine akumulacije metala i tolerancije su kontinuirane, a biljni fenotipovi obuhvataju širok spektar kombinacija obe osobine. Tradicionalni hiperakumulatori su oni sa visokom akumulacijom i visokom tolerancijom (Sl. 3, kvadrant I). Postoje i vrste sa visokom akumulacijom specifičnih metala, ali malom tolerancijom na te metale, no one su isključene iz naturalističke definicije hiperakumulacije (Sl. 3, kvadrant II). Većina biljaka nije tolerantna, niti akumulira metale (Sl. 3, kvadrant III), iako je poznato da su mnoge vrste tolerantne na izlaganje metalima dok ne akumuliraju, tj. dok im se unos ne poveća do maksimalne granice tolerancije (Sl. 3, kvadrant IV). Poslednje dve grupe (III i IV) se obično svrstavaju zajedno u ne-hiperakumulatore. Kako bi se proučavala fiziologija hiperakumulatora i njihova evolucija, veoma je značajno da se tolerancija i hiperakumulacija posmatraju u vidu odvojenih osobina (Goolsby & Mason, 2015).



Slika 3. Akumulacija i tolerancija metala (preuzeto iz Goolsby & Mason, 2015).

Rod *Alyssum* sadrži najveći broj prijavljenih hiperakumulatora nikla (50), od kojih mnogi mogu postići 30 g kg^{-1} Ni u biomasi suvog lista (Baker & Brooks, 1989; van der Ent et al., 2015). Lokalizacijom Ni u biljnim tkivima utvrđeno je da se ovaj element kod vrste *Alyssum murale*, hiperakumulatora Ni, uglavnom skladišti u listovima (Tappero et al., 2007). Iako je hiperakumulacija Ni zajednička osobina velikog broja vrsta roda *Alyssum*, još uvek se ne zna da li ove biljke luče organske i/ili aminokiseline u rizosferu kako bi rastvorile Ni, ili kiseline luče u tlo da bi tako olakšale apsorpciju Ni. Osim rizobiomskih interakcija, do sada nisu pronađeni dokazi o neuobičajenim vrstama liganda ili visoko povišenim koncentracijama liganda povezanih sa usvajanjem Ni kod vrsta roda *Alyssum* (Centofanti et al., 2013). Postoje dokazi da neke bakterije rizosfere endemične za serpentinska zemljišta mogu stimulisati usvajanje Ni kod biljaka (Cabello-Conejo et al., 2014; Visioli, D'Egidio, & Sanangelantoni, 2015). Osim toga, ustanovljeno je da dve vrste bakterija, *Microbacterium arabinogalactanolyticum* i *M. oxydans*, mogu značajno da povećaju akumulaciju Ni kod vrste *A. murale* (Abou-Shanab, Van Berkum, & Angle, 2007). Slično tome, neki sojevi roda *Arthrobacter* sp. povećavaju usvajanje Ni kod vrsta *A. pintodasilvae* i *A. serpyllifolium* (Cabello-Conejo et al., 2014).

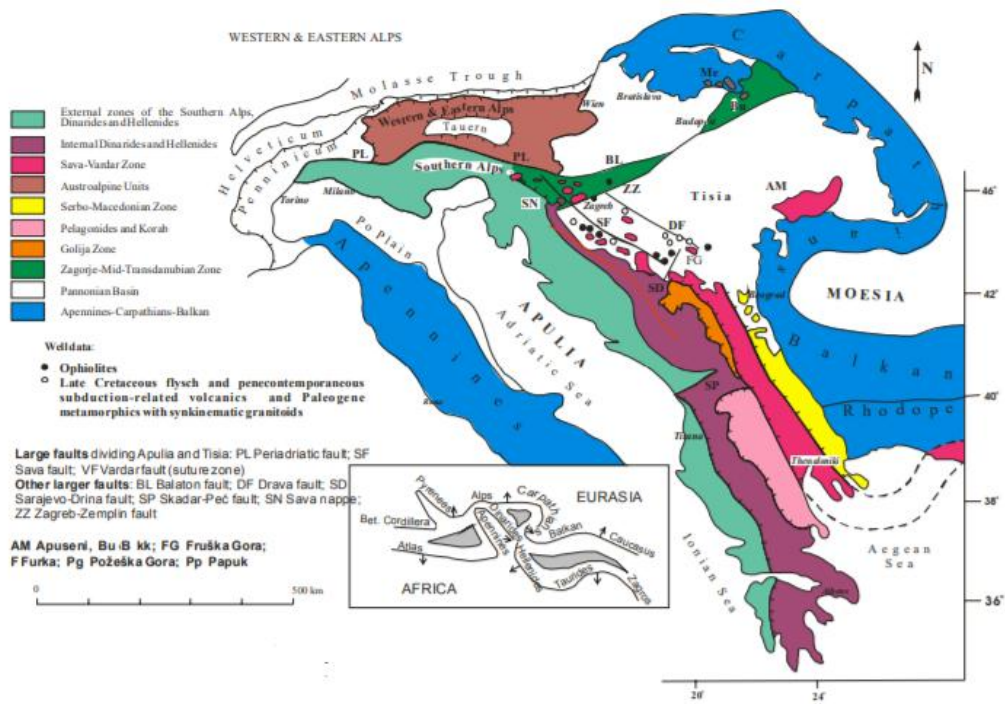
1.5. Opšte karakteristike istraživanog područja

1.5.1. Geomorfloške karakteristike istraživanog područja

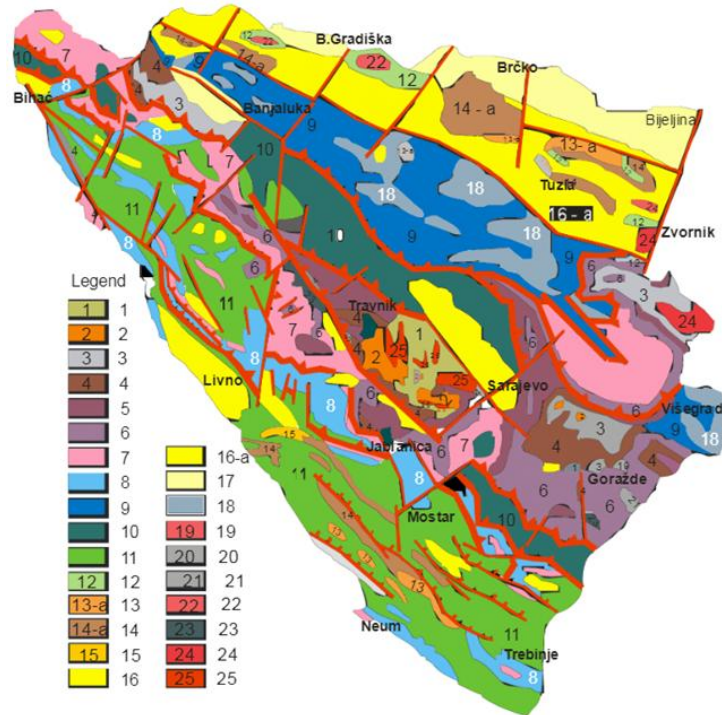
Područje Bosne i Hercegovine nalazi se u srednjem delu Dinaridskog planinskog sistema, između Apulije (Jadranske mikroploče) na jugu i Panonske i Južne Tisije na severu.

Na osnovu savremenih ideja, Dinaridi se mogu podeliti u nekoliko velikih strukturno-paleogeografskih jedinica (Slika 4):

1. dinarska karbonatna platforma (spoljni Dinaridi),
1. bosanski fliš (pasivna kontinentalna margina),
2. dinarska zona ofiolita,
3. vardarska zona (aktivna kontinentalna margina) (Hrvatović, 2005).



Slika 4. Tektonska šema Alpa, Dinarida, Helenida i Panonskog bazena (preuzeto iz Hrvatović, 2005).



Slika 5. Geološka mapa Bosne i Hercegovine - Dinarska zona ofiolita u legendi je predstavljena brojevima 9 i 18 (preuzeto iz Hrvatović, 2005)

Sve istraživane lokacije u ovoj doktorskoj disertaciji pripadaju Dinarskoj zoni ofiolita koja je najvažnija geotektonska jedinica unutrašnjih Dinarida (Slika 5). Ova zona može se pratiti od kontakta sa područjem južno od Zagreba na severozapadu kroz Borje, Ozren, Konjuh do područja Višegrada na jugoistoku, a nastavlja se dalje preko jugozapadne Srbije i Kosova i dalje prema jugu do zone Mirdita u Albaniji (Hrvatović, 2005). U Dinarskoj zoni ofiolita, većina ofiolita se javlja u mešavini sastavljenoj od šljunkovitog matriksa koji izgrađuju fragmenti ultramafita, gabra, dijabaze, bazalta, tufa, amfibolita, škriljaca i egzotičnih blokova krečnjaka različite starosti poreklom iz različitih sredina (Hrvatović, 2005). Ofioliti sa genetički povezanim sedimentnim formacijama predstavljaju najrasprostranjenije stene unutrašnjih Dinarida u okviru zone Dinarskih ofiolita (Herak, 1986; 1991), a među značajnijim treba istaći ultramafite (peridotit, dunit, serpentinit) sa podređenim gabrom, dijabazama, bazalima i spilitima (Hrvatović, 2005). Geološki i petrološki podaci iz bosanskog dela Dinarske zone ofiolita uključeni su, između ostalog, u više obimnih regionalnih analiza Dinarida (Pamić, 1971; Dimitrijević & Dimitrijević, 1975; Pamić, Sunarić-Pamić, Olujić, & Antić, 1977; Lugović, Altherr, Raczek, Hofmann, & Majer, 1991; Trubelja, Marching, Burgath, & Vujović, 1995; Pamić, Tomljenović, & Balen, 2002).

Ofioliti unutrašnjih Dinarida mogu se podeliti u sledeće četiri osnovne formacije: 1) tektonski peridotiti, 2) kumulirani gabro i peridotiti, 3) dijabaze-doleriti, i 4) bazalti.

1. Tektonski peridotiti zone Dinarskih ofiolita u Bosni imaju tipične metamorfne materijale. Ovo je najčešće prikazano u procesu razdvajanja na tanke pločice i rasporedu linija; piroksen-profiliblasti su paralelno ugrađeni u matricu sastavljenu od neravnomerno serpentinizovanog olivina. Ovaj metamorfni materijal omogućava strukturalni ultramafitni masiv.

Primarni kameni minerali tektonskih peridotita su olivin, ortopiroksen i klinopiroksen, svi sa visokim sadržajem MgO, prisutnim spinelom i uglavnom anitičko-parazitskim amfibolom. Iz tog razloga tektonski peridotiti u velikoj meri predstavljaju lerzolite. Primarni kameni minerali se transformišu u različite metamorfisane oblike: olivin u minerale serpentinske grupe (lizardit, klinohrizotil i antigorit), enstatit u bastit i talk, klinopiroksen u uralit i hlorit i spinel u magnetit. Ovi sekundarni minerali su na nekim mestima praćeni kvarcom, opalom, magnezitom i drugim karbonatima, koji stvaraju kvarckarbonatne stene (listvenite) koji se javljaju uz marginalne delove planina Ozrenovog masiva i na području Teslića (Pamić, 1984).

Postoje različita mišljenja o poreklu i postavljanju tektonskih peridotita zone Dinarskih ofiolita. Pamić, Gušić & Jelaska (1998) smatrali su da je dinarska okeanska kora postojala tokom Trijasa i Jure i da je njena obdukcija, u pratnji subdukcije na severu trajala krajem perioda Jure. Ovo je dovelo do skraćanja dinaridskog Tetisa. Nakon toga, drugi stadijum Krede – stadijum ranih paleogenih ofiolita bio je vezan za konačne sudare koji su se odvijali tokom Eocena (Pamić et al., 2002). Ovi rani paleogeni ofioliti iz drugog stepena Krede uključeni su u Vardarsku zonu (istočni pojas ofiolita na Centralnom Balkanu), u sadašnjoj strukturi koja se gradi u epidermalnim delovima u potiskivanju, čime se povećava stepen razdvajanja, a horizontalni transport može se proceniti na 100 km (Hrvatović, 2005).

2. Kumulirani gabori i peridotiti se najčešće pojavljuju kao fragmenti, koji su debeli nekoliko kilometara u ofiolitskoj mešavini. U nekim oblastima (na primer, južna margina ultramafitnog masiva Krivaja-Konjuh) tela gabra upadaju u tektonske peridotite. U reci Rzav u jugoistočnoj Bosni kumulativni gabro i peridotiti uključeni su kao normalni članovi očuvanog fragmenta kompletnog okeanskog fragmenta debljine oko 3-4 km (Pamić & Desmons, 1989). U ultramafitnom masivu Krivaja - Konjuh, debljina ovih formacija se kreće između 1200 i 2000 m. U očuvanom okeanskom fragmentu Rzav, njegova debljina je manja i iznosi oko 500-600 m.

Najvažniji minerali koji nastaju su olivin, ortopiroksen, klinopiroksen i podređeni amfibol kao u susednim tektonskim peridotitima. Isti minerali uz plagioklasu su glavni minerali kumulativnih gabro stena.

Kako se razlikuju od tektonskog peridotita, kumulativne peridotite i gabro karakteriše izraženija tekstura i slojevitost. Petrologija kumulativnih gabro stena i peridotita detaljno je proučavana u masivu Krivaja-Konjuh i u okeanskom fragmentu Rzav (Pamić & Desmons, 1989).

U kompleksu kumulativa Krivaja - Konjuh, u donjim delovima preovlađuju plagioklazni vehrlit i plagioklazni dunit, dok su dunit - harzburgit, dunit - lerzolit i dunit - berlit dominantni u telu Rzav. Gornji delovi gabro-peridotita sastoje se od različitih gabro podvrsta sa retkim međuslojevima kumulativnih peridotita (Hrvatović, 2005).

3. Formiranje dijabaz-dolerita veoma dobro je izučeno na severnim delovima masiva Krivaja-Konjuh i u dolini Rzava gde su debeli oko 500 m (Šipak). Međutim, dijabaz-doleriti najčešće se javljaju kao manji razdvojeni fragmenti uključeni u ofiolitne mešovine. U nekim oblastima su homogeni, dok su u drugim sastavljeni od dijabaza-dolerita u svojim donjim delovima koji su ograničeni bazaltnim jastucima lave. Većina tela dijabaz-dolerita su masivna, kao što su ona ispitivana u južnom delu ultramafitnog masiva Ozrena (Rakovica) i severne margine Krivaja-Konjuh (dolina reke Ribnice). Neki dijabaz-doleriti su ukopani što je najbolje izraženo u dolini Rzava (Pamić & Desmons, 1989; Pamić, 2000).

Mineralni sklop dijabaz-dolerita uključuje plagioklase, obično labradorit, augit amfibola (aktinolit hornblende i uralit) i prilično suboridni olivin. Svi ovi primarni minerali su izmenjeni u različitom meri u procesu metamorfizma.

Najčešći tip kamena je amfibolit-augitni dijabaz ili dolerit ili opitski gabro. Dijabazni-doleriti su obično sveži, ali u nekim telima su metamorfizovani u metadijabazu, metadolerit i opitsku metagabro. Tela dijabaz-dolerita, naročito ona koja su pogođena višim stepenom metamorfizma, prekrivena su venama od zeolita, albite, hlorita, kalcita, tremolita i kvarca (Pamić & Jurković, 1995).

4. Bazaltska formacija – bazalti se javljaju kao jastuci lave i kao masivni tokovi, koji su na nekim mestima međusobno interstratifikovani piropastikama i sedimentima, kao na primer u ofiolitskom kompleksu Manjača, između Žepča i Teslića. Osim toga, veći bazaltni tokovi javljaju se, takođe, na vrhu tektonski nenarušenih ofiolitskih profila (npr. dolina Rzava i Ribnice - na lokalitetu Željava).

Mineralni sklop bazaltnih formacija se u suštini karakteriše mineralnim parom feldspar i augit koji je u različitoj meri izmenjen u hlorit i epidot; olivin je proređen, obično gotovo potpuno serpentinizovan. Feldspar je plagioklas koji se u potpunosti pretvara u albite i razne sekundarne minerale. Shodno tome, bazalti predstavljaju metabazalte, tj. spilite (Pamić, 1979).

5. Stene metamornih podloga tektonskih peridotnih tela predstavljene su: a) amfibolitima poreklom iz kumulativnog gabroa, b) amfibolitima povezanim sa dijabaz-doleritima i c) metasedimentnim stenama (Pamić, 2000).

Lokacija Zvornik se jedina nalazi u okviru istočne Bosne, i obuhvata bogate rudne površine Srebrenice i Vlasenice. Ovo je zona Drine koja se sastoji od paleozoičnih formacija koje su neusaglašeno pokriveno mezozoičnim formacijama. Zona se proteže od planine Javornik na severu do oblasti južno od reke Spreče i do Kosova na jugoistoku. Istočno-bosanske paleozojske formacije predstavljaju najsevernije zapadne delove velikog paleozojskog kompleksa Drina – Ivanjica, koji se, takođe, zove Golijaska zona (Aubouin et al., 1970; Aubouin, 1973) i naslanja se na zonu Dinarskih ofiolita. Paleozojske formacije praćene su trijaskim formacijama među kojima se ističe Romanija, koja se proteže na jugoistoku do Sokolca i Višegrada.

1.5.2. Klimatske karakteristike na izučavanim lokacijama

Klimatske karakteristike istraživanih područja definisane su na osnovu podataka koji su preuzeti iz WorldClim verzija 2.1 baze vremenskih i klimatskih podataka visoke prostorne rezolucije (~1 km²) za od period 1970. go 2000. godine (Fick & Hijmans, 2017) (Tabela 1).

Svi istraživani lokaliteti imaju sličnu klimu, a to je umereno kontinentalna klima sa umereno toplim letima i umereno hladnim zimama. Na svim lokalitetima tokom cele godine prisutna je značajna količina padavina.

Tabela 1. Klimatske karakteristike proučavanih ultramafitnih područja u Bosni i Hercegovini.

Lokalitet	Uži lokalitet	Nadmorska visina (m)	Prosečna godišnja temperatura (°C)	Prosečna godišnja količina padavina (mm)
Bakotić	Brijesnica	459	10,0	888
Bosansko Petrovo	Perleško brdo	275	10,5	854
Čauševica	Mal luka	578	9,9	899
Klokotnica	Klokotnica	222	10,9	838
Liplje	Kamenolom	380	9,8	924
Maglaj	Sipar velikački	211	10,9	867
Stanari	Dragalovci	283	10,5	876
Šeher	Malo mesto	392	10,4	896
Teslić	Sofići	294	10,6	874
Zvornik	Kolonija	189	11,0	887

Bakotić se odlikuje blagom, umerenom klimom kao i sve ostale istraživane lokacije. Znatna količina padavina prisutna je, čak, i u najsušnijom mesecu (Tabela 2). Leta su topla i vlažna. Prosečna godišnja temperatura u Bakotiću je 10,0°C. Oko 888 mm padavina pada godišnje. Sa prosečnom temperaturom od 19,7°C jul je najtopliji mesec u godini. Najniže prosečne temperature u godini se javljaju u januaru, kada je prosečna temperatura oko -0,2°C. Između najsušnijeg i najvlažnijeg meseca, razlika u padavinama je 50 mm. Godišnja temperaturna amplitude je 19,9°C.

Tabela 2. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Bakotić.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	-0,2	1,4	5,9	9,6	14,7	17,7	19,7	19,2	15,6	10,7	4,6	0,5
Min. temp. (°C)	-3,9	-3	0,6	3,9	8,6	11,5	13,2	12,5	9,4	5,1	0,1	-3
Max temp. (°C)	3,5	5,9	11,2	15,3	20,8	23,9	26,2	26	21,8	16,3	9,1	4,1
Količina padavina (mm)	56	55	58	69	82	105	85	74	69	74	87	74

Bosansko Petrovo se, takođe, odlikuje blagom, umerenom klimom, a znatna količina padavina javlja se i u najsušnijem mesecu (Tabela 3). Na ovom lokalitetu je zima posebno blaga, s obzirom da svi zimski meseci imaju prosečnu temperaturu iznad nule. Prosečna godišnja temperatura na ovoj lokaciji je 10,5°C, a godišnje padne oko 854 mm vodenog taloga. Sa prosečnom temperaturom od 20,3°C jul je najtopliji, a sa 0,2 januar najhladniji mesec u godini. Između najsušnijeg i najvlažnijeg meseca, razlika u padavinama je 51 mm. Godišnja temperaturna amplitude je 20,1°C.

Tabela 3. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Bosansko Petrovo.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	0,2	1,9	6,4	10,3	15,4	18,4	20,3	19,9	16,2	11,2	5,1	1
Min. temp. (°C)	-3,4	-2,5	1,2	4,8	9,5	12,5	14	13,4	10,1	5,8	0,9	-2,4
Max temp. (°C)	3,7	6,2	11,6	15,9	21,3	24,4	26,6	26,5	22,3	16,7	9,3	4,4
Količina padavina (mm)	54	52	55	66	80	103	84	72	66	72	81	69

Klima u Čauševici je umerena. Prisutna je znatna količina padavina tokom cele godine. Zato je klima ovog mesta klasifikovana kao umerena, vlažna klima sa toplim letom. Prosečna godišnja temperatura je 9,9°C, dok je godišnja suma padavina 899 mm (Tabela 4). Najsušniji mesec je februar, sa 54 mm kiše, dok je najveća količina padavina u junu (103 mm). Juli je najtopliji, a januar najhladniji mesec u godini. Razlika u količini padavina između najsušnijeg i najvlažnijeg meseca iznosi 47 mm, dok godišnja temperaturna amplituda iznosi 20,0°C.

Tabela 4. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Čauševicu.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	-0,3	1,3	5,8	9,5	14,6	17,6	19,7	19,2	15,5	10,6	4,5	0,4
Min. temp. (°C)	-4,1	-3,2	0,4	3,7	8,4	11,3	13	12,3	9,2	5	-0,1	-3,2
Max temp. (°C)	3,4	5,9	11,2	15,2	20,7	23,9	26,3	26,1	21,9	16,3	9,1	4
Količina padavina (mm)	57	56	58	70	83	103	85	76	71	76	88	76

Klima Klokočnice je umerena, vlažna klima sa toplim letom. Sa prosečnom temperaturom od 20,8°C, jul je najtopliji mesec u godini (Tabela 5). Sa srednjom temperaturom od 0,2°C, januar je najhladniji mesec u godini. Padavine su najmanje u februaru i martu, a najveće u junu. Godišnja temperaturna amplituda je oko 20,6°C, a razlika u količini padavina 48 mm.

Tabela 5. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Klokočnicu.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	0,2	2	6,8	10,7	15,8	18,9	20,8	20,3	16,6	11,5	5,4	1,2
Min. temp. (°C)	-3,5	-2,6	1,3	4,9	9,5	12,6	14,1	13,5	10,1	5,8	0,9	-2,3
Max temp. (°C)	3,9	6,5	12,3	16,6	22,1	25,2	27,4	27,2	23,1	17,2	9,8	4,7
Količina padavina (mm)	54	53	53	65	76	101	79	69	63	73	83	69

Klima Liplja je blaga, umerena, vlažna klima, sa toplim letima. Mesto se odlikuje značajnom količinom padavina tokom cele godine (Tabela 6). Prosečna godišnja temperatura iznosi 9,8°C, dok je prosečna godišnja količina padavina 924 mm što je najviša vrednost među svim istraživanim lokalitetima. Najmanja količina padavina je tokom januara i februara, sa mesečnim prosekom od 55 mm, dok je najveća količina padavina tokom juna sa mesečnim prosekom od 102 mm. Jul je najtopliji mesec, sa prosečnom temperaturom od 19,5°C, dok je januar najhladniji mesec sa prosečnom temperaturom od -0,4°C. Razlika u količini padavina između najsušnijeg i najkišovitijeg meseca je 47 mm. Godišnja temperaturna amplituda je 19,9°C.

Tabela 6. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Liplje.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	-0,4	1,2	5,6	9,4	14,3	17,4	19,5	18,9	15,4	10,7	4,5	0,5
Min. temp. (°C)	-4,5	-3,3	0,3	3,4	8	11	12,8	11,9	9,1	5,1	-0,2	-3,4
Max temp. (°C)	3,7	5,8	10,9	15,4	20,6	23,8	26,1	25,9	21,8	16,3	9,3	4,5
Količina padavina (mm)	55	55	63	78	87	102	92	80	73	76	87	76

Klima u Maglaju je umerena, vlažna klima sa toplim letom. Prisutna je značajna količina padavina tokom cele godine. Prosečna godišnja temperatura je 10,9°C. Količina padavina iznosi oko 867 mm godišnje. Najsušniji mesec je februar, sa 55 mm kiše (Tabela 7). Najveća količina padavina pada u junu, u proseku 99 mm. Jul je najtopliji mesec u godini, sa prosečnom mesečnom temperaturom od 20,9°C. Januar je najhladniji mjesec, sa temperaturama u proseku oko 0,4°C. Postoji razlika od 44 mm padavina između najsušnijeg i najvlažnijeg meseca. Godišnja temperaturna amplituda iznosi 20,5°C.

Tabela 7. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Maglaj.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	0,4	2,3	7	10,7	15,8	18,8	20,9	20,4	16,6	11,7	5,5	1,3
Min. temp. (°C)	-3,5	-2,4	1,4	4,7	9,4	12,4	14,1	13,3	10,1	5,8	0,8	-2,4
Max temp. (°C)	4,3	7	12,5	16,7	22,1	25,2	27,7	27,4	23,2	17,5	10,1	5,1
Količina padavina (mm)	56	55	58	68	81	99	80	71	66	75	85	73

Klima u Stanarima je umerena, vlažna klima sa toplim letom. Prisutna je značajna količina padavina tokom cele godine. Prosečna godišnja temperatura u Stanarima je 10,5°C. Količina padavina iznosi oko 876 mm godišnje. Jul je najtopliji mesec u godini, sa temperaturom od 20,5°C (Tabela 8). Januar je najhladniji mjesec, sa temperaturama u proseku oko -0,2°C. Postoji razlika od 46 mm padavina između najsušnijeg i najvlažnijeg meseca, dok je godišnja temperaturna amplituda 20,7°C.

Tabela 8. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Stanare.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	-0,2	1,7	6,5	10,3	15,3	18,4	20,5	19,9	16,3	11,2	5,1	0,9
Min. temp. (°C)	-4,2	-2,9	0,9	4,2	8,9	12	13,7	12,8	9,6	5,4	0,4	-2,9
Max temp. (°C)	3,8	6,4	12,2	16,4	21,7	24,9	27,3	27	22,9	17,1	9,8	4,7
Količina padavina (mm)	55	55	58	70	80	101	83	73	66	75	86	74

Klima u Šeheru je umerena, vlažna klima sa toplim letom i značajnom količinom padavina. Prosečna godišnja temperatura u Novom Šeheru je 10,4°C, dok je prosečna godišnja količina padavina 896 mm. Najtopliji mesec u godini je jul, sa prosečnom temperaturom od 20,3°C (Tabela 9). Januar je najhladniji mjesec, sa temperaturama u proseku oko 0,1°C. Najsušniji meseci su februar i mart, sa 57 mm padavina. Najveća količina vodenog taloga pada u junu, u proseku 101 mm. Razlika u padavinama između najsušnijeg i najkišovitijeg meseca iznosi 44 mm. Godišnja temperaturna amplituda iznosi 20,2°C.

Tabela 9. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Šeher.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	0,1	1,9	6,4	10	15,2	18,2	20,3	19,8	16,1	11,2	4,9	0,9
Min. temp. (°C)	-3,8	-2,8	0,9	4,1	8,8	11,8	13,5	12,7	9,5	5,3	0,2	-2,9
Max temp. (°C)	4	6,6	11,8	15,9	21,6	24,7	27,1	26,9	22,6	17	9,6	4,6
Količina padavina (mm)	57	57	59	70	82	101	84	73	71	77	89	76

Klima u Tesliću je umerena, vlažna klima sa toplim letom i značajnom količinom padavina. Prosečna godišnja temperatura u Tesliću 10,6°C. Sa prosečnom temperaturom od 20,7°C, jul je najtopliji mesec u godini (Tabela 10). Januar je najhladniji mesec, sa temperaturama u proseku oko -0,1°C. Prosečna godišnja količina padavina je 874 mm. Padavine su najmanje u januaru i februaru, u proseku 55 mm. Većina padavina pada u junu, u proseku 99 mm. Između najsušnijeg i najkišovitijeg meseca, razlika u padavinama je 44 mm. Godišnja temperaturna amplituda iznosi 20,8°C.

Tabela 10. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Teslić.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	-0,1	1,9	6,7	10,4	15,5	18,6	20,7	20,1	16,4	11,4	5,1	0,9
Min. temp. (°C)	-4,3	-2,9	0,9	4,1	8,8	11,9	13,6	12,8	9,6	5,3	0,2	-3
Max temp. (°C)	4,0	6,7	12,4	16,7	22,1	25,3	27,8	27,4	23,3	17,5	9,9	4,8
Količina padavina (mm)	55	55	57	70	81	99	82	72	67	75	87	74

Klima Zvornika je umerena, vlažna klima sa toplim letom i značajnom količinom padavina, posebno u letnjim mesecima. Prosečna godišnja temperatura je 11,0°C, tako da je Zvornik najtoplije mesto među istraživanim lokalitetima. Prosečna godišnja količina padavina iznosi 887 mm. Mesec sa najmanjom količinom padavina je februar sa 52 mm vodenog taloga, dok padavine u junu dostižu vrhunac, sa prosekom od čak 111 mm, što je i najveća mesečna vrednost među istraživanim lokacijama (Tabela 11). Godišnja temperaturna amplituda iznosi oko 20,1°C, a razlika između najvlažnijeg i najsuvljeg meseca iznosi 59 mm.

Tabela 11. Prosečne, minimalne i maksimalne temperature i količina padavina po mesecima za Zvornik.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Prosečna temp. (°C)	0,6	2,5	6,6	10,9	15,9	19,0	20,7	20,5	16,6	11,5	5,8	2,0
Min. temp. (°C)	-2,8	-1,8	1,4	5,5	10,1	13,4	14,6	14,2	10,6	6,1	1,6	-1,5
Max temp. (°C)	4,1	6,8	11,9	16,2	21,6	24,6	26,8	26,8	22,5	16,9	9,9	5,5
Količina padavina (mm)	57	52	59	72	83	111	89	76	69	73	79	67

1.5.3 Opšte karakteristike ispitivanih vrsta

Doktorska disertacija obuhvatila je istraživanja tri vrste iz porodice Brassicaceae Burnett - *Alyssum murale* Waldst. & Kit., *Lepidium campestre* (L.) R. Br. i *Thlaspi kovatsii* Heuff.

Biljke iz porodice Brassicaceae (Criciferae) mogu biti jednogodišnje, dvogodišnje ili višegodišnje zeljaste biljke ili polužbunovi. Poznate su još i pod imenom krstašice zbog unakrst raspoređena četiri krunicna listića (Jovanović-Dunjić, Diklić, & Nikolić, 1972).

Brassicaceae je velika porodica koja sadrži oko 338 rodova i preko 3700 vrsta (Al-Shehbaz, Beilstein, & Kellogg, 2006). Predstavnici krstašica se mogu naći u svim krajevima, pri čemu neke vrste imaju gotovo kosmopolitsko rasprostranjenje, dok su druge ograničene na veoma mala područja. Mogu se naći na veoma različitim tipovima staništa, a u planinskim predelima dosežu do gornje granice prostiranja vegetacije (Jovanović-Dunjić et al., 1972).

U ovu porodicu spadaju i različite poljoprivredne kulture, kao što su *Brassica oleracea* L., *Brassica napus* L., *Armoracia rusticana* G. Gaertn., B. Mey. & Scherb., zatim mnoge biljke koje se koriste u hortikulturi (*Aubrieta* Adans., *Iberis* L., *Lunaria* L., *Arabis* L., *Draba* L.), ali i svetski poznata vrsta *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh., jedna od najčešće korišćenih biljaka u eksperimentalnim uslovima (Koch & Kiefer 2006).

Porodica je interesantna i zato što je značajan broj vrsta (oko 2% od ukupnog broja vrsta u porodici) identifikovano kao bioakumulatori. Od toga, najveći broj hiperakumulatora detektovan je u rodovima *Alyssum*, *Thlaspi* i *Bornmuellera* (Cecchi et al., 2010).

1.5.3.1 *Alyssum murale* Waldst. et Kit.

Alyssum L. je rod u okviru porodice Brassicaceae koji obuhvata oko 195 vrsta, uključujući jednogodišnje i višegodišnje zeljaste i busenaste biljke, ređe polužbunove (Li, Feng, Lv, Liu, & Qi, 2015). Vrste roda *Alyssum* uglavnom potiču iz Evrope, Azije i severne Afrike, tj. oblasti oko Sredozemnog mora, a većina vrsta se javlja na suvim, kamenitim ili peščanim mestima ili na liticama (Ball & Dudley, 1964).

Vrsta *A. murale* je višegodišnja biljka koja se odlikuje dobro razvijenim, drvenastim korenom. Uspravne stabljike se razvijaju u velikom broju i visoke su 25-70 cm. Donji listovi formiraju rozetu, dok su duž stabljika prosti i raspoređeni sve do cvasti. Cvasti su obično guste, široke 5-15 cm, dok su sami cvetovi veoma sitni, dugački svega oko 3 mm i žute boje. Čašični listići su lancetasti dužine oko 2 mm, pokriveni zvezdastim dlakama. Krunični listići su izduženi, obrnuto jajasti ili široko eliptični, dužine oko 3 mm. Seme je spljošteno, sa širokim krilatom ispustima. Biljka cveta od juna do avgusta (Jovanović-Dunjić et al., 1972).

Alyssum murale je rasprostranjen na Balkanskom poluostrvu, u Rumuniji, južnim delovima Rusije i u jugozapadnoj Aziji.

Vrsta dobija najviše pažnje zbog svoje izuzetne sposobnosti da izdvoji i akumulira nikel u velikoj količini (Doksopulo, 1961; Reeves, Brooks, & Dudley, 1983; Baker & Brooks, 1989; Broadhurst et al., 2004; Tappero et al., 2007; Bani et al., 2010; Broadhurst & Chaney, 2016; Pardo et al., 2018; Xhaferri et al., 2018). Sam rod *Alyssum* sadrži najveći broj prijavljenih hiperakumulatora, od kojih mnogi mogu da ostvare 30 g kg⁻¹ Ni u suvim listovima (Brooks & Radford, 1978; Baker & Brooks, 1989; Van Der Ent et al., 2015).

1.5.3.2 *Lepidium campestre* (L.) R. Br.

Rod *Lepidium* L. obuhvata oko 125 vrsta jednogodišnjih ili dvogodišnjih zeljastih biljaka ili višegodišnjih žbunova rasprostranjenih u umerenim i suprotroskim oblastima Amerike, Afrike, Evrope, Azije i Australije (Jovanović-Dunjić et al., 1972).

Lepidium campestre je jednogodišnja ili dvogodišnja biljka visine 20-80 cm, vretenastog i blede obojenog korena. Stablo je obično pojedinačno, pokriveno vrlo gustim tankim dlačicama. Prizemni listovi su usečeni, skupljeni u rozetu i često ljubičasti, dok su oni u srednjem i gornjem delu stabla dugi 1-2(3) cm, razmaknuto nazubljeni i pokriveni dlakama. Cvasti su grozdaste, u početku cvetanja zbijene, a kasnije izdužene i prореđenije, sa oko 60-80 neuglednih cvetova. Semena su eliptična, grbičasto papilozna, mrka. Cveta od maja do juna (Jovanović-Dunjić et al., 1972).

Vrsta *L. campestre* je zastupljena na svim kontinentima (Al-Shehbaz, 1986), ali je autohtona za prostor Evrope i jugozapadne Azije. Često raste i na staništima sa manje konkurencije za

resurse i prostor, tj. na mestima koje druge biljke retko zauzimaju, tako da je pogodan i za ultramafitnu podlogu. Novija istraživanja su pokazala da bi *L. campestre* mogao da se koristi kao potencijalno biogorivo (Gustafsson, Willforss, Lopes-Pinto, Ortiz, & Geleta, 2018), dok podataka o potencijalu akumulacije toksičnih metala po dosadašnjim saznanjima još uvek nema.

1.5.3.3 *Thlaspi kovatsii* Heuff. (= *Noccaea kovatsii* (Heuff.) F. K. Mey.)

Rod *Thlaspi* L. je jedan od većih članova familije Brassicaceae sa oko 75 vrsta jednogodišnjih ili višegodišnjih biljaka (Al-Shehbaz, 1986; Appel & Al-Shehbaz, 2003) zastupljenih u umerenim oblastima i na planinama severne hemisphere i Južne Amerike (Jovanović-Dunjić et al., 1972).

Thlaspi kovatsii je dvogodišnja ili višegodišnja busenasta biljka vretenastog korena. Stabljike su uspravne visine 8-25 (60) cm. Prizemni listovi su široko jajasti, eliptični ili okruglasti, dok su listovi u gornjem delu stabla lancetasti i sedeći. Odlikuje se grozdastim cvastima koji su najčešće razgranate. Čašični listovi su izduženo jajasti, dugi 2-2,5 mm, bele boje, dok su krunični obrnuto jajasti i postepeno se sužavaju u klinasti nokatac, dugački oko 5 mm. Semena su sitna, jajasta, duga svega oko 2 mm, svetlomrke boje. Biljka cveta od aprila do maja (Jovanović-Dunjić et al., 1972).

Vrsta je zastupljena na Balkanskom poluostrvu i na Karpatima. Fakultativna je serpentinofita interesantna s aspekta potencijalnog korišćenja u fitoremedijaciji (Mišljenović et al., 2020).

2. CILJEVI RADA

Predmet ove doktorske disertacije je analiza bioakumulacionih potencijala odabranih biljnih vrsta iz familije Brassicaceae (*Alyssum murale* Waldst. & Kit., *Thlaspi kovatsii* Heuffel i *Lepidium campestre* (L.) R. Br.) sa serpentinskih staništa Bosne i Hercegovine. Stoga su formulisani sledeći naučni ciljevi:

- Određivanje osnovnih karakteristika staništa odabranih taksona iz porodice Brassicaceae.
- Utvrđivanje osnovnih fizičkih (mehanički sastav) i hemijskih (pH u H₂O, pH u 1N KCl, procenat organske materije, koncentracija dostupnog fosfora i kalijuma) karakteristika serpentinskog zemljišta na istraživanim lokalitetima.
- Određivanje koncentracije makro (Fe, Ca, Mg) i mikroelemenata (Ni, Mn, Zn, Cu, Cr, Pb, Co, Cd) u zemljištima koja su razvijena na serpentinitskim stenama na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini.
- Ispitivanje koncentracije makro- i mikroelemenata (uključujući i potencijalno toksične metale) u podzemnim i nadzemnim delovima (stabla i listovi) izabranih vrsta sa serpentinitskih staništa u Bosni i Hercegovini.
- Procena kapaciteta tolerancije / bioakumulacije određenih mikroelemenata, naročito potencijalno toksičnih metala, analiziranih biljnih vrsta na osnovu dobijenih podataka.
- Utvrđivanje i otkrivanje novih potencijalnih akumulatorskih i/ili hiperakumulatorskih vrsta sa mogućom primenom za uklanjanje zagađujućih materija neorganskog porekla (fitoremedijacija) i ekstrakciju vrednih metala (fitomajning).

3. MATERIJAL I METODE

3. 1. Materijal

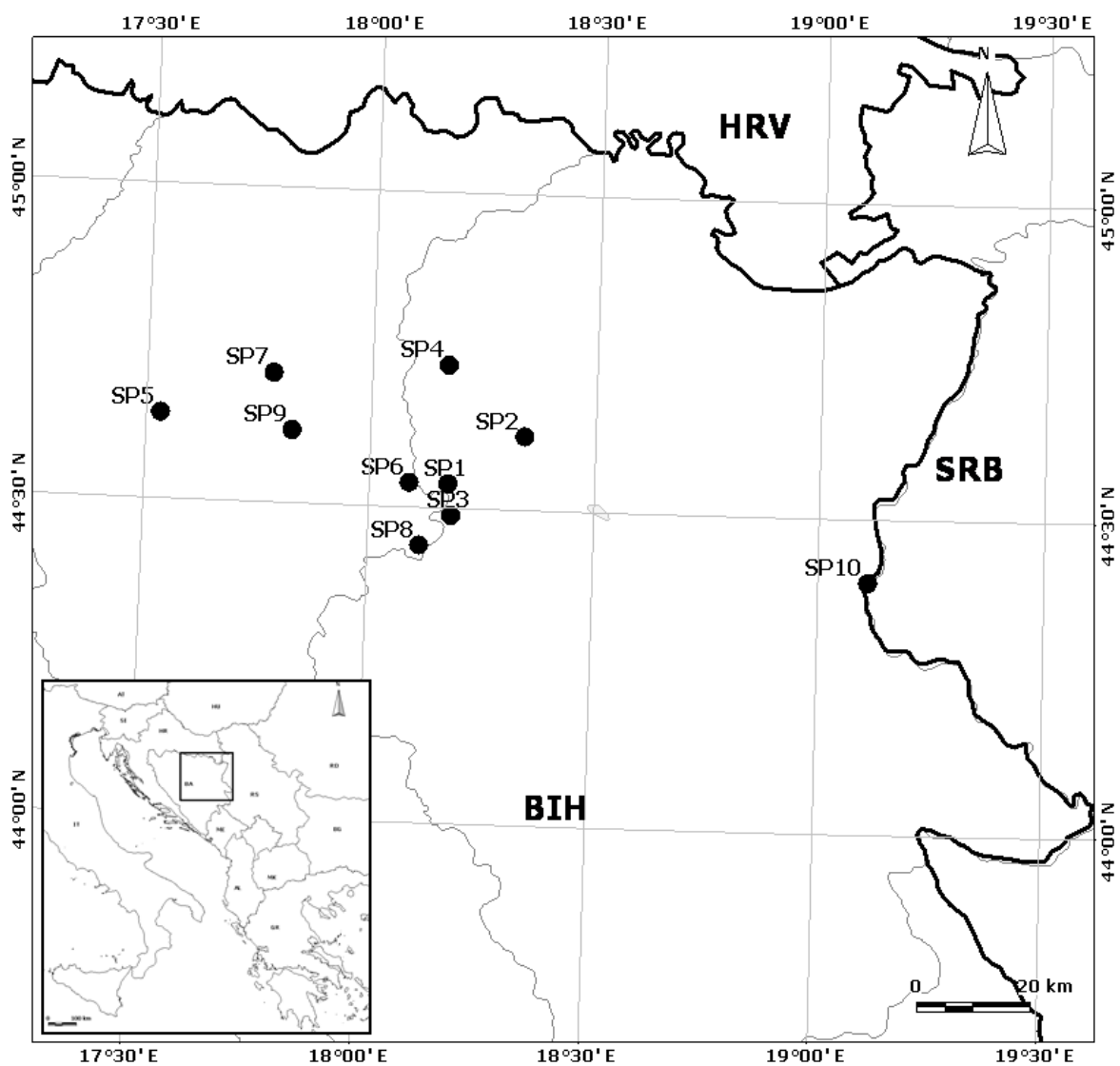
Ispitivano područje nalazi se u centralnom delu Bosne i Hercegovine, pokrivajući površinu od oko 200 km² na podlozi koja je ultramafitska, odnosno serpentinitiska. Uzorci su uzeti sa 10 različitih lokaliteta (SP1-SP10), izabranih na osnovu dovoljne veličine populacija istraživanih vrsta (Tabela 12, Slika 6). Sakupljen je materijal tri biljne vrste: *Alyssum murale* na svih deset lokaliteta (SP1-SP10), *Thlaspi kovatsii* na pet lokaliteta (SP1-SP5) i *Lepidium campestre* na tri lokaliteta (SP6, SP7, SP8) (Tabela 13). Lokaliteti su uglavnom nenaseljeni. Serpentinitiska zemljišta na svim lokalitetima su kamenita i vrlo plitka, osetljiva na eroziju. Odlikuju se uglavnom retkom zeljastom vegetacijom, dok se u blizini nalaze borove i hrastove šuma.

Svi uzorci su prikupljeni u periodu od maja 2013. do maja 2014. godine.

Herbarijumski primerci istraživanih vrsta deponovani su u Herbarijumu Prirodnjačkog muzeja u Beogradu (BEO) i Herbarijumu Instituta za botaniku i Botaničke bašte "Jevremovac", Biološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu (BEOU).

Tabela 12. Geografski položaj istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini.

Lokalitet	Šifra lokaliteta	Geografska širina (LAT)	Geografska dužina (LONG)	Nadmorska visina (m)
Bakotić	SP1	44°32'22.3"	18°10'27.9"	459
Bosansko Petrovo selo	SP2	44°37'47.0"	18°20'31.2"	275
Čauševica	SP3	44°29'19.8"	18°10'57.8"	578
Klokotnica	SP4	44°43'17.8"	18°09'51.7"	222
Liplje	SP5	44°38'11.9"	17°31'52.5"	380
Maglaj	SP6	44°32'21.6"	18°05'19.6"	211
Stanari	SP7	44°42'19.3"	17°46'47.7"	283
Šeher	SP8	44°26'25.8"	18°06'51.9"	392
Teslić	SP9	44°36'58.1"	17°49'29.1"	294
Zvornik	SP10	44°24'00.1"	19°06'38.1"	189



Slika 6. Karta istraživanog područja u Bosni i Hercegovini (SP 1 - Bakotić, SP 2 – Bosansko Petrovo selo, SP 3 - Čauševica, SP 4 – Klokotnica, SP 5 – Lipje, SP 6 – Maglaj, SP 7- Stanari, SP 8 - Šeher, SP 9 - Teslić, SP 10 – Zvornik).

Tabela 13. Vaučer primerci analiziranih vrsta na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini.

Lokalitet	Šifra lokaliteta	Naziv vrste	Broj vaučera
Bakotić	SP1	<i>Alyssum murale</i>	BEOU- 17222
Bakotić	SP1	<i>Thlaspi kovatsii</i>	BEOU-17282
Bosansko Petrovo selo	SP2	<i>Alyssum murale</i>	BEOU-17231
Bosansko Petrovo selo	SP2	<i>Thlaspi kovatsii</i>	BEOU-17283
Čauševica	SP3	<i>Alyssum murale</i>	BEOU-17227
Čauševica	SP3	<i>Thlaspi kovatsii</i>	BEOU-17284
Klokotnica	SP4	<i>Alyssum murale</i>	BEOU-17230
Klokotnica	SP4	<i>Thlaspi kovatsii</i>	BEOU-17285
Liplje	SP5	<i>Alyssum murale</i>	BEOU-17229
Liplje	SP5	<i>Thlaspi kovatsii</i>	BEOU-17286
Maglaj	SP6	<i>Alyssum murale</i>	BEOU-17223
Maglaj	SP6	<i>Lepidium campestre</i>	BEOU- 17287
Stanari	SP7	<i>Alyssum murale</i>	BEOU-17226
Stanari	SP7	<i>Lepidium campestre</i>	BEOU- 17288
Šeher	SP8	<i>Alyssum murale</i>	BEOU-17224
Šeher	SP8	<i>Lepidium campestre</i>	BEOU-17289
Teslić	SP9	<i>Alyssum murale</i>	BEOU-17228
Zvornik	SP10	<i>Alyssum murale</i>	BEOU-17225

3.2. Reagensi

- 1) Dejonizovana voda
- 2) Kalijum hlorid (KCl), Zorka Pharma, Srbija
- 3) Natrijum heksametafosfat (NaPO_3)₆, Merck Millipore, Indija
- 4) Azotna kiselina (HNO_3) 68%, Zorka Pharma, Srbija
- 5) Mlečna kiselina ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$), Kemika, Hrvatska
- 6) Sirćetna kiselina (CH_3COOH), Zorka Pharma, Srbija
- 7) Amonijum acetat ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$), Zorka Pharma, Srbija
- 8) Kalijum di-hidrogenfosfat (KH_2PO_4), Carlo Erba, Italija
- 9) Amonijum-molibdat tetrahidrat (NH_4)₆Mo₇O₂₄ × 4 H₂O, Merck, Nemačka
- 10) Sumporna kiselina (H_2SO_4) 96%, Fisher Chemicals, UK
- 11) Askorbinska kiselina ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), Sinek, Srbija
- 12) Kalaj(II) hlorid di-hidrat ($\text{SnCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$), Merck, Nemačka
- 13) Hlorovodonična kiselina (HCl) 37%, Zorka Pharma, Srbija
- 14) Stroncijum hlorid heksahidrat ($\text{SrCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$), Merck, Nemačka
- 15) Litijum hlorid (LiCl), Sigma Chemicals, SAD
- 16) Kalijum dihromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), Merck, Nemačka
- 17) Srebro-sulfat (Ag_2SO_4), Merck, Nemačka
- 18) Fenilantranilna kiselina ($\text{C}_{13}\text{H}_{11}\text{NO}_2$), Merck, Nemačka
- 19) Amonijum gvožđe (II) sulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$), Zorka Pharma, Srbija
- 20) Standardni rastvori za rad na atomskom apsorpcionom spektrofotometru, Merck, Nemačka
- 21) Standardni puferni rastvor pH 4, Carlo Erba, Italija
- 22) Standardni puferni rastvor pH 7, Carlo Erba, Italija

3.3. Oprema

- 1) Rotirajući šejker
- 2) pH metar Iskra MA 5730, Slovenija
- 3) Spektrofotometar Ultrospec 2000 UV/Vis, UK
- 4) Atomski apsorpcioni spektrofotometar Shimadzu AA-7000, Japan
- 5) Analitička vaga Adventurer Pro 260/0,0001, Ohaus, Nemačka
- 6) Kvantitativni filter papir Sartorius Stedim, Nemačka

3. 4. Analize zemljišta

Uzorci zemljišta (oko 1500 g po svakom uzorku) uzeti su na svakom ispitivanom lokalitetu u zoni korenovog sistema biljaka. Oni su prvo osušeni na vazduhu na sobnoj temperaturi, a nakon toga su prosejani kroz sito sa okcima veličine 50 μm i osušeni u sušnici na 105°C preko noći, odnosno do postizanja konstantne mase.

1. Mehanički (granulometrijski) sastav zemljišta

Mehanički sastav zemljišta je određen metodom prosejavanja i sedimentacije nakon što su uzorci natopljeni natrijum heksametafosfatom u suspenzijama od 1:2 i ostavljeni da stoje 16 sati. Frakcionisanje zemljišta izvršeno je kombinovanom pipet metodom i metodom elutacije. Frakcionisanje peska ($> 50 \mu\text{m}$) urađeno je suvim prosejavanjem. Pipet metoda je korišćena za određivanje frakcija gline ($< 2 \text{ mm}$) i mulja ($< 50 \mu\text{m}$) (Van Reeuwijk, 1995). Utvrđen je procentualni sadržaj pojedinih frakcija. Za klasifikaciju zemljišta na osnovu precentualne zastupljenosti različitih frakcija čestica korišćene su USCS (ASTM, 2011) i USDA klasifikacija (Rowell, 1997; USDA, 2006)

2. Određivanje stvarnih i izmenljivih pH vrednosti u zemljištu

Aktivna i supstituciona pH vrednost zemljišta određena je standardnom metodom (ISO 10390/1994 Soil quality – Determination of pH). Za ovu analizu korišćeno je po 10 g vazdušno osušenih i prosejanih (veličina zemljišnih čestica $< 2 \text{ mm}$) uzoraka zemljišta, koji su prebačeni u staklene čase zapremine 50 mL. Posle toga, dodato je 25 mL dejonizirane vode za određivanje aktivne, odnosno 25 mL 1M rastvora KCl za određivanje supstitucione pH vrednosti. Uzorci su mešani staklenim štapićima. Nakon 60 min, pH vrednost je određena pomoću pH-metra (Iskra MA 5730, Slovenija) u suspenziji i očitavanjem nakon 30 sekundi.

3. Određivanje dostupnog P_2O_5 i K_2O u zemljištu

Dostupni P_2O_5 i K_2O su određeni AL metodom Egnera i saradnika (Egner, Riehm, & Domingo, 1960). 5 g osušenog, usitnjenog i prosejanog ($< 2 \text{ mm}$) zemljišta preneto je u plastične bočice zapremine 200 mL. Ekstrakcija je izvedena u 100 mL 10 puta razblaženog aluminijumovog (AL) rastvora neophodnog za 2 h rotacije. Prvobitni AL rastvor (pH 3,2) sadržao je 12 M mlečne kiseline, 28,5 M sirćetne kiseline i 10 M NH_4 -acetata. Ekstrakti su filtrirani kroz usporeni kvantitativni filtracioni papir (Sartorius Stedim, Nemačka).

Serijski standardni rastvori napravljena je korišćenjem standardnog rastvora koji sadrži 1 g/L P_2O_5 i 1 g/L K_2O . Osnovni standard se izvodi rastvaranjem 1,917 g KH_2PO_4 i 0,534 g KCl koji su prethodno sušeni 2 h na 105°C u normalnom sudu od 1000 mL sa dejonizovanom vodom.

Serijski uključuje standarde koji odgovaraju masama od 0 do 40 mg P₂O₅ i K₂O na 100 g zemljišta.

Za određivanje fosfora, 5 mL od svakog ekstrakta uzorka i iz svakog standarda preneto je u epruvetu. U svaku epruvetu je dodato 7,5 ml molibdat reagensa. Molibdatski reagens sadrži 0,3% amonijum-molibdata rastvorenog u 0,8 N H₂SO₄. Na kraju, u svaku epruvetu je dodato 0,5 mL sveže napravljenog 1% rastvora askorbinske kiseline u 1% SnCl₂ rastvorenog u 5% HCl. Plavoj boji je dozvoljeno da se razvija 30 minuta. Apsorbancija je određena na 750 nm korišćenjem Ultrospec 2000 UV/Vis spektrofotometra. Koncentracije fosfora u uzorcima su izračunate pomoću programa Origin 7.0.

Koncentracija kalijuma je određena u istom ekstraktu kao fosfor, korišćenjem iste standardne serije. Metoda koja je primenjivana bila je FES (plamenoemisiona spektrofotometrija) pomoću atomskog apsorpcionog spektrofotometra Shimadzu AA-7000. Koncentracije kalijuma u uzorcima izračunate su pomoću programa Origin 7.0.

4. Određivanje pristupačnog Ca i Mg u zemljištu

Količina pristupačnog Ca i Mg određena je prema Van Reeuwijk-u (2002). Za ekstrakciju, 2 g vazdušno osušenih, usitnjenih i prosejanih (veličina čestica < 1 mm) uzoraka zemljišta preneto je u plastične bočice zapremine 200 mL. Ekstrakcija je izvedena sa 100 mL 1N amonijum acetata u trajanju od 30 min na rotirajućem šejkeru. Ekstrakti su filtrirani kroz kvantitativni filter papir. Iz svakog ekstrakta, 2 mL je prenešeno u normalne posude od 50 mL, a potom je dodato 1 mL Sr ili La (50 mg Sr/La po 1 mL) i dejonizovana voda do finalne zapremine.

Apsorbancija je određena atomskom apsorpcionom spektrofotometrijom (Shimadzu AA-7000). Raspon koncentracija standardnih serija za Ca je bio 0-4 mg Ca/L, a za Mg 0-1 mg Mg/L. Koncentracije u uzorcima su izračunate pomoću programa Origin 7.0.

5. Određivanje organskog ugljenika i humusa

Količina organske materije određena je metodom dihromatne digestije na osnovu FAO (1974) procedure. Između 0,05 i 0,5 g osušenog, usitnjenog i prosejanog (< 0,2 mm) zemljišta je prebačeno u erlenmajer bočicu od 100 mL. U svaku bočicu dodato je 10 mL 0,4N rastvora K₂Cr₂O₇ (kalijum dihromat) i 0,1 g AgSO₄. Bočica je prekrivena malim levkom i postepeno je zagrevana do tačke ključanja. Ključanje je trajalo 5 minuta. Nakon hlađenja dodato je 30 mL dejonizovane vode i nekoliko kapi indikatora fenilntranilne kiseline. Sadržaj je titriran amonijum ferosulfatom (0,1N (NH₄)₂Fe(SO₄)₂ × 6H₂O) dok se ljubičasta boja nije pretvorila u svetlo zelenu.

Procentualni sadržaj humusa izračunava se prema formuli:

$$[(a-b) \times F \times 0,0003 \times 100] / P \times 1,724 = \% \text{ humusa,}$$

gde su:

- a – količina (mL) 0,1N amonijum ferosulfata koji se koristi za blanko titraciju,
- b – količina (mL) 0,1N amonijum ferosulfata koji se koristi za titraciju ekstrakta uzorka,
- F - faktor normaliteta rastvora amonijum ferosulfata utvrđenog standardnim rastvorom kalijum dihidromatata,
- P - masa zemljišta (g).

6. Određivanje dostupnih metala u zemljištu

Ekstrakcija dostupnih metala u zemljištu obavljena je u skladu sa postupkom koji je preporučen od strane Garcije i saradnika (Garcia, Blessin, Sandford, & Inglett, 1979). Pet grama prosejanog (< 0,2 mm) zemljišta preneseno je u plastične flaše i ekstrahovano sa 50 mL 0,1N rastvora HCl preko noći. Ekstrakti su filtrirani kroz sporo filtrirajući kvantitativni papir. Sadržaji Fe, Zn, Mn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd i Co su određeni merenjem apsorpcije na atomskom apsorpcionom spektrofotometru Pie Unicam SP 192. Serije standardnih rastvora za ove metale napravljene su od 0-1 g/L rastvora nabavljenog od Carlo Erba iz Italije. Koncentracije su izračunate pomoću programa Origin 7.0.

7. Određivanje ukupnih koncentracija metala u zemljištu

Mineralizacija je obavljena malo modifikovanom procedurom opisanom u ISO 11466 (1995) (Soil quality – Extraction of trace elements soluble in aqua regia). Približno 3 g vazdušno osušenog, usitnjenog i prosejanog (< 0,2 mm) zemljišta je prebačeno u staklene kivete. Svaki uzorak je navlažen sa 0,5 do 1,0 mL dejonizovane vode. Dodata je hlorovodonična kiselina (21 ml), a zatim 7 mL azotne kiseline, kap po kap. Sadržaj je ostavljen preko noći radi spore oksidacije. Sledećeg dana, reakciona mešavina je zagrevana u mineralizatoru sve dok nije počelo ključanje. Uzorci su kuvani 2 sata, osiguravajući da ne ispari 2/3 zapremine dodatih kiselina. Smeša je ostavljena da se ohladi, pa je dodato još 25 mL azotne kiseline. Sadržaj je filtriran kroz filter papir u normalni sud od 100 mL. Dodata je voda do finalne zapremine. Koncentracije metala određivane su po ISO standardu 11047 (1998). Apsorpcije su određene atomskim apsorpcionom spektrofotometrom (Shimadzu AA-7000). Serije standardnih rastvora za ove metale napravljene su od 0-1 g/L rastvora nabavljenog od Carlo Erba iz Italije. Koncentracije su izračunate pomoću programa Origin 7.0.

3.5. Analize biljnog materijala

Sakupljeni uzorci biljaka (oko 500 g po uzorku) razdvojeni su na podzemni i nadzemni deo i pripremljeni su za dalju proceduru prema metodi koju je opisao Markert (1995).

8. Određivanje sadržaja P₂O₅ u biljkama

Izmereno je po 0,5 g osušenog biljnog materijala i premešteno je u kivete za mineralizaciju. Uzorci su mineralizovani vlažnim postupkom, u mešavini azotne i sumporne kiseline (1:1, v/v). Koncentracija fosfora u mineralizovanim uzorcima određena je modifikovanom metodom molibden plavo (Chen, Toribara, & Warner, 1956) pomoću spektrofotometrije.

9. Određivanje K u biljkama

Izmereno je po 0,5 g osušenog biljnog materijala i premešteno je u kivete za mineralizaciju. Uzorci su mineralizovani vlažnim postupkom, u mešavini azotne i sumporne kiseline (1:1, v/v). Koncentracija kalijuma određena je FES metodom (plameno-emisiona spektrofotometrija) na atomskom apsorpcionom spektrofotometru Shimadzu AA-7000. Raspon koncentracije standardne serije za K bio je između 0-100 mg K/L. Koncentracije kalijuma u uzorcima izračunate su pomoću programa Origin 7.0.

10. Određivanje ukupnih metala, makro- i mikroelemenata u biljkama

Analiza je urađena odvojeno za podzemni i nadzemni deo biljaka. Po 1 g samlevenog i osušenog biljnog materijala je stavljeno u kivete za mineralizaciju. Mineralizacija je obavljena malo modifikovanom vlažnom procedurom opisanom u ISO standardu 6636/2 (1981) pomoću smeše koncentrovanih HNO₃ i H₂SO₄ (2:1, v/v). Smeša je prvo prenoćila, a zatim je zagrevana do temperature od 130°C, na kojoj se dalje odvijala mineralizacija narednih 5 sati. Rastvor je potom ohlađen, profiltriran u normalne sudove i dopunjen dejonizovanom vodom do finalne zapremine od 50 mL. Apsorbancije su određene na atomskom apsorpcionom spektrofotometru, koristeći iste standarde kao i za određivanje metala u uzorcima zemljišta. Koncentracije su izračunate pomoću programa Origin 7.0.

3. 6. Statistička obrada podataka

Rezultati analiza zemljišta, podzemnih i nadzemnih delova biljaka su izraženi kao srednja vrednost ± standardna devijacija (SD). Nakon provere normalnost svih izmerenih parametara pomoću Shapiro-Wilk testa ($\alpha = 0,05$), postojanje razlika između istraživanih lokaliteta za sve merene parameter testirano je pomoću Kruskal–Wallis *H* testa, tj. neparametrijske jednofaktorske analize varijanse.

Međusobni odnosi elemenata u zemljištu na istraživanim lokalitetima ispitani su pomoću analize glavnih komponenti (PCA) koja se bazirala na korelacionoj matrici njihovih ukupnih koncentracija. Broj glavnih komponenti (PC) koje su zadržane nakon analize određen ja na

osnovu Kaiserovog kriterijuma, tj. zadržane su samo glavne komponente sa sopstvenim vrednostima većim od 1 (Kaiser & Rice, 1974).

S obzirom da količina dostupnih, odnosno potencijalno razmenljivih metala u zemljištu pored samog hemijskog sastava podloge zavisi i od njenih drugih osobina, poput teksture, pH i sadržaja organske materije, a takođe zavisi i od klimatskih karakteristika, kao što su temperatura i vodni režim staništa (Alves, Ascensão Trancoso, Simões Gonçalves, & Correia dos Santos, 2011; Pędziwiatr et al., 2018), u ovom radu analizirani su i njihovi međusobni odnosi na osnovu izračunatih koeficijenata Spirmanove korelacije rangova (ρ).

Međusobni odnosi koncentracija dostupnih elemenata u zemljištu i koncentracija u biljnim organima, kao i međusobni odnosi između koncentracija elemenata u istraživanim biljnim vrstama analizirani su, takođe, na osnovu izračunatih koeficijenata Spirmanove korelacije rangova (ρ).

Za analizu podataka i kreiranje grafikona u ovom radu su korišćeni STATS v.3.6.0; PMCMRPLUS v.1.4.1; PSYCH v.1.9.12.31; FACTOMINER v.2.3 i FACTOEXTRA v.1.0.7 R paketi (R Core Team, 2019).

4. REZULTATI

4.1 Fizičke i hemijske karakteristike zemljišta

Rezultati granulometrijske analize zemljišta sa istraživanih serpentinitičkih lokaliteta u Bosni i Hercegovini su prikazani u Tabeli 14. Prema Jedinstvenoj klasifikaciji zemljišta (Unified Soil Classification System (USCS) - ASTM D2487-11), svi analizirani uzorci mogu se svrstati u krupno-zrnasti tip zemljišta, odnosno peskovite ilovače prema Američkoj klasifikaciji osnovnih klasa prema teksturi (tj. USDA klasifikaciji), s obzirom da je u svim uzorcima procentualno učešće čestica čiji je prečnik manji od 0,075 mm bilo manje od 50%.

Tabela 14. Granulometrijski sastav zemljišta na istraživanim lokalitetima.

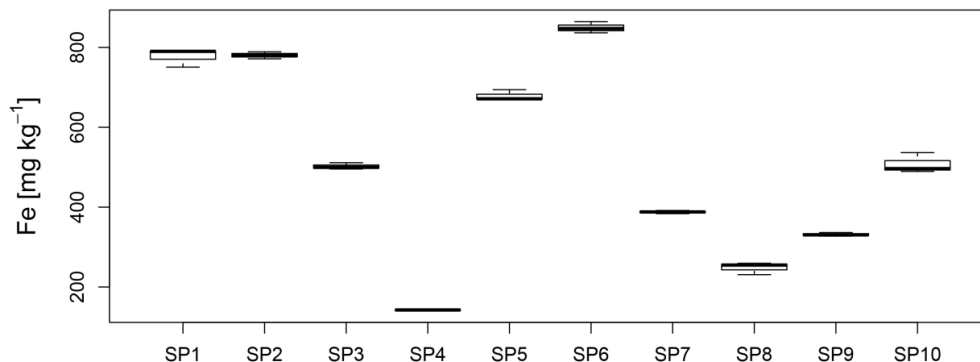
	Šljunak 40 - 4,75 mm	Krupan pesak 4,75 - 2 mm	Medijalni pesak 2 - 0,425 mm	Sitan pesak 0,425 - 0,075 mm	Glina <0,075 mm
SP1	24,13	25,74	23,34	17,49	9,30
SP2	24,51	25,37	26,74	13,34	10,04
SP3	23,50	19,19	26,21	14,76	16,34
SP4	38,09	14,11	23,26	13,82	10,72
SP5	24,84	28,20	23,90	12,73	10,33
SP6	26,85	26,28	22,52	14,29	10,06
SP7	9,12	20,03	34,89	24,48	11,48
SP8	20,86	25,57	16,88	26,14	10,55
SP9	21,48	33,03	32,23	2,88	10,38
SP10	23,87	30,96	35,57	8,95	0,65

Hemijske karakteristike deset analiziranih uzoraka zemljišta (pH u destilovanoj vodi, pH u 1 N KCl, procenat organske materije, koncentracija P₂O₅ i K₂O) sa serpentinitičkih lokaliteta u Bosni i Hercegovini prikazani su u Tabeli 15. Izmerene vrednosti pH u vodi u analiziranim uzorcima zemljišta (aktivna kiselost) varirale su od neutralnih – 6,57 (SP3), do alkalnih – 8,60 (SP6), dok je pH u 1 N KCl (supstituciona kiselost) imao vrednosti od 5,56 (SP3) do 7,49 (SP6). Procenat organske materije u uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta bio je u opsegu od 0,50% (SP8) do 4,85% (SP3), procenat humusa od 0,86% (SP8) do 8,35% (SP3), sadržaj P₂O₅ je varirao od 1,37 mg kg⁻¹ (SP5) do 30,8 mg kg⁻¹ (SP2), a K₂O od 5,20 mg kg⁻¹ (SP9) do 50,3 mg kg⁻¹ (SP3).

Rezultati Kruskal–Wallis H testa pokazali su da se procenat organske materije, kao i sadržaji P_2O_5 i K_2O u analiziranim uzorcima zemljišta sa istraživanih ultramafitskih lokaliteta u Bosni i Hercegovini međusobno statistički značajno razlikuju (procenat organske materije: $\chi^2 = 23,326$, $df = 9$, $p = 0,0055$; P_2O_5 : $\chi^2 = 26,209$, $df = 9$, $p = 0,0019$; K_2O : $\chi^2 = 28,312$, $df = 9$, $p = 0,0008$).

Tabela 15. Aktivna (pH_{H_2O}) i supstitucionna (pH_{KCl}) kiselost, procenat organske materije i humusa, koncentracija P_2O_5 i K_2O ($mg\ kg^{-1}$) i odnos kalcijuma i magnezijuma (Ca/Mg) u zemljištu na istraživanim lokalitetima.

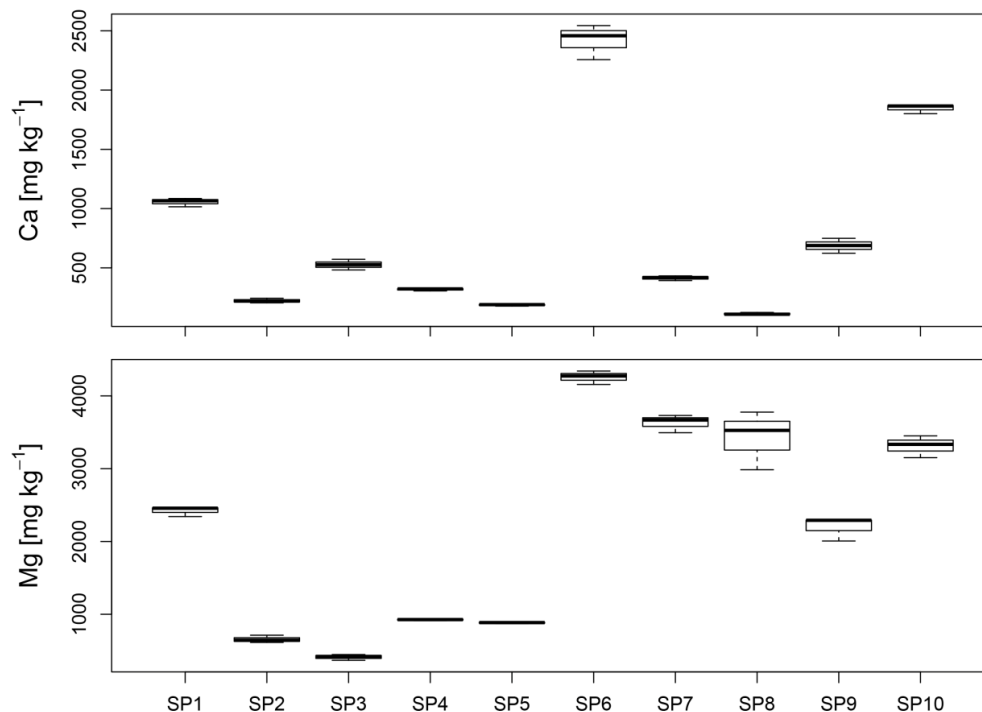
Lokalitet	pH (H_2O)	pH (1 N KCL)	% organske materije	% humusa	P_2O_5 (dostupni)	K_2O (dostupni)	Ca/Mg
SP1	8,20	7,37	0,82±0,09	1,43±0,21	1,72±0,2	9,42±0,8	0,44
SP2	8,10	7,33	1,99±0,15	3,43±0,33	30,8±0,3	4,18±0,3	0,34
SP3	6,57	5,56	4,85±1,0	8,35±1,42	3,85±0,6	50,3±1,9	1,28
SP4	7,91	6,92	1,89±0,1	3,26±0,23	2,47±0,5	9,90±0,06	0,34
SP5	7,56	6,16	1,98±0,1	3,41±0,37	1,37±0,2	9,17±0,1	0,21
SP6	8,60	7,49	2,20±0,06	3,74±0,13	10,5±0,5	20,4±1,1	0,57
SP7	6,91	6,91	1,05±0,1	1,81±0,23	5,06±0,7	35,4±1,3	0,11
SP8	8,29	6,96	0,50±0,1	0,86±0,38	1,66±0,5	5,20±0,03	0,03
SP9	8,37	7,21	1,24±0,07	2,15±0,16	2,87±0,4	13,4±0,6	0,31
SP10	8,05	6,90	1,3±0,1	2,30±0,39	2,58±0,4	11,8±0,6	0,56



Grafik1. Koncentracija Fe ($mg\ kg^{-1}$) u uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta.

U odnosu na koncentraciju makroelemenata (Fe, Ca, Mg) u analiziranim uzorcima, zemljišta na istraživanim lokalitetima imaju više ili manje tipičnu serpentinitisku kompoziciju. Naime, koncentracija raspoloživog Fe je varirala od 142 mg kg⁻¹ (SP4) do 850 mg kg⁻¹ (SP6) (Grafik 1), a dobijene razlike u sadržaju Fe između lokaliteta bile su statistički značajne ($\chi^2 = 23,326$, df = 9, p = 0,0055).

Sadržaj raspoloživog Ca je bio u opsegu od 112 mg kg⁻¹ (SP8) do 2420 mg kg⁻¹ (SP6), dok je sadržaj dostupnog Mg bio od umerenog (411 mg kg⁻¹) (SP3) do visokog (4257 mg kg⁻¹) (SP6) (Grafik 2). Odnosi raspoloživih koncentracija kalcijuma i magnezijuma (Ca/Mg) su bili niski (0,03-0,57) u devet analiziranih uzorka tla, dok je samo u jednom uzorku zemljišta (SP3) konstatovana vrednost bila veća od 1,00 (1,28) (Tabela 15). Konstatovane razlike u koncentracijama Ca i Mg u analiziranim uzorcima zemljišta su prema rezultatima Kruskal–Wallis *H* testa, takođe, bile statistički značajne (Ca: $\chi^2 = 28,742$, df = 9, p = 0,0007; Mg: $\chi^2 = 28,312$, df = 9, p = 0,0009).



Grafik 2. Koncentracija Ca i Mg (mg kg⁻¹) u uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta.

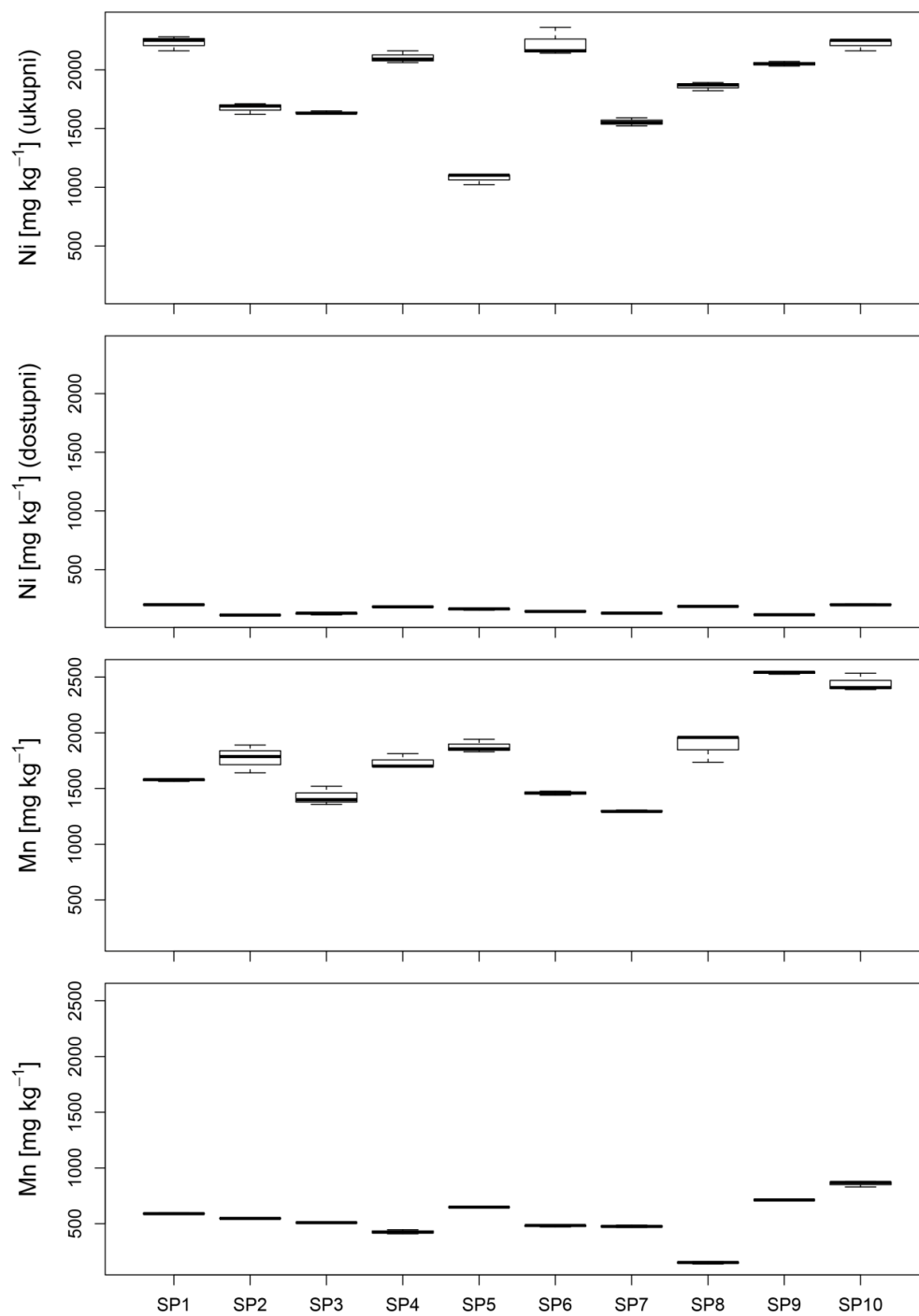
U analiziranim uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini, osim visokih koncentracija magnezijuma, konstatovane su i visoke koncentracije ukupnih i dostupnih metala u tragovima koji su tipični za zemljišta na serpentinitima, kao što su Ni, Mn, Cr i Co.

Ukupne koncentracije nikla (mg kg^{-1}) varirale su od 1077 (SP5) do 2232 (SP1), dok su dostupne bile u rasponu od 113 mg kg^{-1} (SP2) do 204 mg kg^{-1} (SP10), a dobijene vrednosti su se međusobno statistički značajno razlikovale (ukupni Ni: $\chi^2 = 27,593$, $df = 9$, $p = 0,0011$; dostupni Ni: $\chi^2 = 28,028$, $df = 9$, $p = 0,0009$). Ukupne i dostupne koncentracije mangana (mg kg^{-1}) varirale su od 1299 (SP7) do 2540 (SP9) – ukupne, i od 151 (SP8) do 860 (SP10) – dostupne (Grafik 3). Koncentracije ukupnog i dostupnog Mn u analiziranim uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta su, takođe, bili statistički značajno različiti (ukupni Mn: $\chi^2 = 27,552$, $df = 9$, $p = 0,0011$; dostupni Mn: $\chi^2 = 28,570$, $df = 9$, $p = 0,0008$).

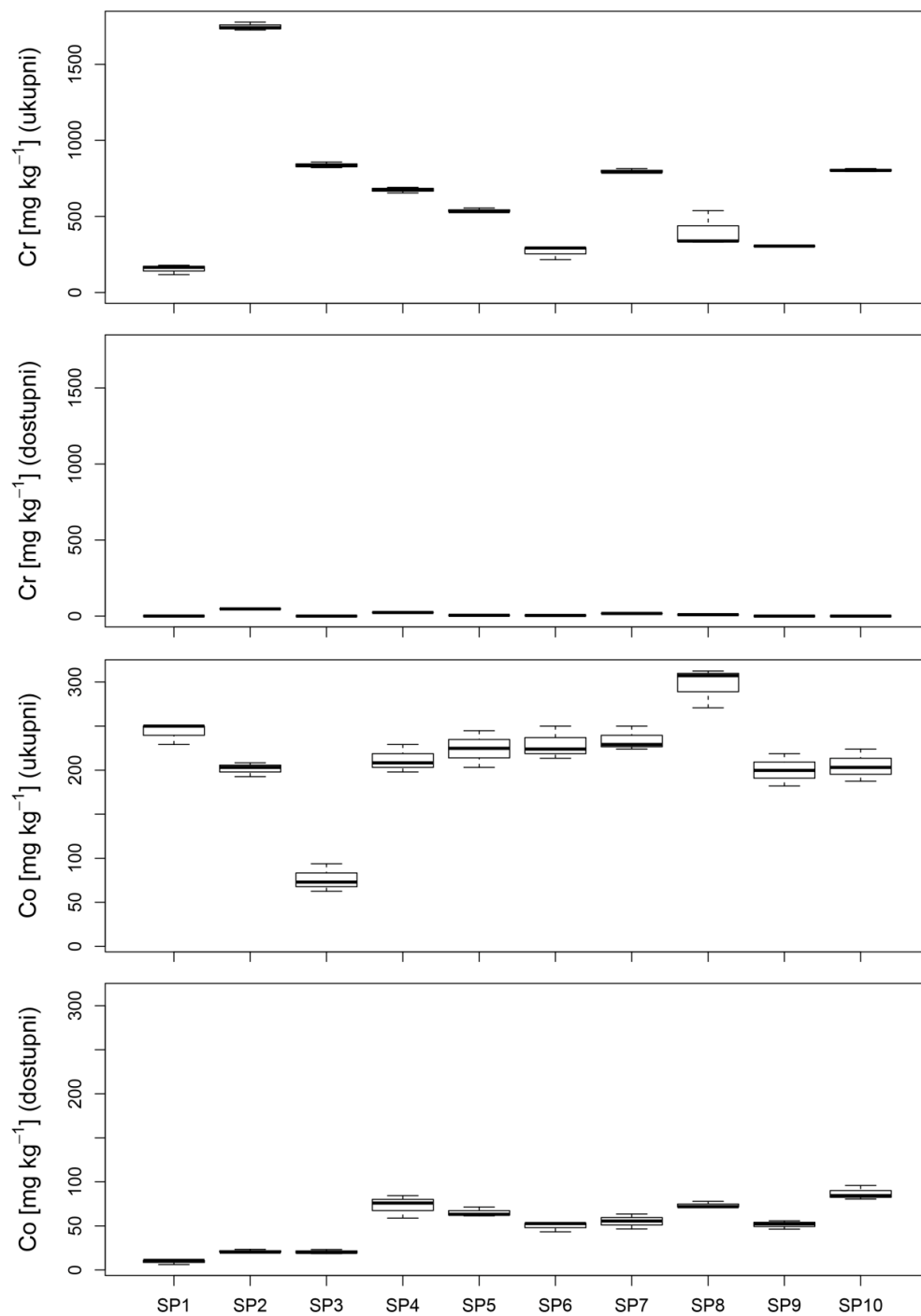
Najveća, kako ukupna (1748 mg kg^{-1}), tako i dostupna koncentracija hroma ($47,3 \text{ mg kg}^{-1}$) zabeležena je u uzorcima zemljišta sa lokaliteta SP2. Najmanja ukupna koncentracija Cr bila je u uzorku zemljišta sa lokaliteta SP1 (154 mg kg^{-1}). U uzorcima zemljišta sa lokaliteta SP3, SP9 i SP10 dostupni Cr je bio ispod granice detekcije. Dobijene razlike bile su statistički značajne (ukupni Cr: $\chi^2 = 28,488$, $df = 9$, $p = 0,0008$; dostupni Cr: $\chi^2 = 28,814$, $df = 9$, $p = 0,0007$). Koncentracija ukupnog Co bio je od $76,4 \text{ mg kg}^{-1}$ (SP3) do 297 mg kg^{-1} (SP8). Koncentracija dostupnog Co (mg kg^{-1}) je varirao od 9,31 (SP1) do 86,9 (SP10) (Grafik 4). Razlike u koncentracijama Co u analiziranim uzorcima zemljišta bile su statistički značajne (ukupni Co: $\chi^2 = 22,915$, $df = 9$, $p = 0,0064$; dostupni Co: $\chi^2 = 26,845$, $df = 9$, $p = 0,0015$).

Najveća ukupna koncentracija cinka u analiziranim uzorcima zemljišta zabeležena je na lokalitetu SP9 (121 mg kg^{-1}), dok je najveća koncentracija dostupnog cinka zabeležana na lokalitetu SP8 ($36,4 \text{ mg kg}^{-1}$). Najmanje koncentracije ukupnog i dostupnog cinka ($36,8 \text{ mg kg}^{-1}$, odnosno $1,53 \text{ mg kg}^{-1}$) konstatovane su za uzorke sa lokaliteta SP6. Za koncentracije Zn u zemljištu su, takođe, notirane statistički značajne razlike između istraživanih lokaliteta (ukupni Zn: $\chi^2 = 28,488$, $df = 9$, $p = 0,0008$; dostupni Zn: $\chi^2 = 28,814$, $df = 9$, $p = 0,0007$). Ukupna koncentracija Cu bila je u opsegu od $0,81 \text{ mg kg}^{-1}$ (SP1) do $28,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (SP7). Dostupan sadržaj Cu bio je ispod nivoa detekcije u 6 uzoraka tla (SP3, SP4, SP5, SP6, SP8, SP9), dok je najveći bio u uzorku sa lokaliteta SP10 ($3,33 \text{ mg kg}^{-1}$) (Grafik 6). Razlike koje su uočene bile su statistički značajne (ukupni Cu: $\chi^2 = 28,507$, $df = 9$, $p = 0,0008$; dostupni Cu: $\chi^2 = 28,868$, $df = 9$, $p = 0,0007$).

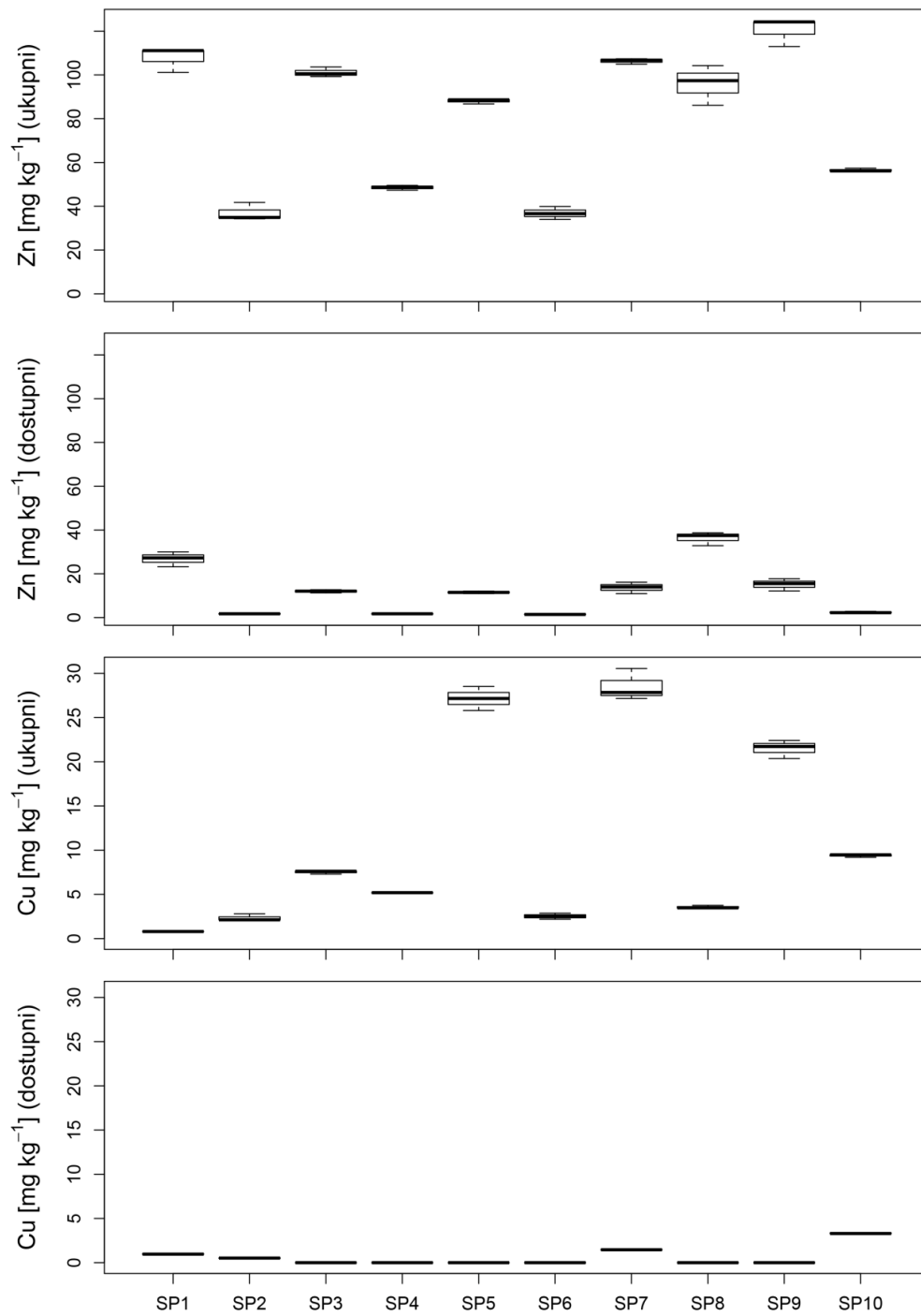
Koncentracija ukupnog Cd je bila ispod granice detekcije u tri uzorka tla (SP4, SP6, SP8), dok je u ostalim uzorcima varirala od $1,34 \text{ mg kg}^{-1}$ (SP1) do $3,83 \text{ mg kg}^{-1}$ (SP3). Koncentracija raspoloživog Cd je bio ispod granice detekcije u pet uzoraka (SP3, SP4, SP5, SP6, SP8), a u ostalim uzorcima je varirala od $0,26 \text{ mg kg}^{-1}$ (SP9) do $1,48 \text{ mg kg}^{-1}$ (SP2). Zabeležene razlike bile su statistički značajne (ukupni Cd: $\chi^2 = 28,704$, $df = 9$, $p = 0,0007$; dostupni Cd: $\chi^2 = 28,263$, $df = 9$, $p = 0,0009$). Ukupne i dostupne koncentracije Pb (mg kg^{-1}) varirale su od 11,4 (SP5) do 129 (SP10) i od 0,68 (SP4) do 37,2 (SP10). Kod pet uzoraka (SP1, SP2, SP5, SP6, SP8) koncentracija Pb bila je ispod granice detekcije (Grafik 6). Konačno, rezultati Kruskal–Wallis H testa potvrdili su da se istraživana zemljišta na serpentinitima Bosne i Hercegovine statistički značajno razlikuju i po pitanju sadržaja Pb (ukupni Pb: $\chi^2 = 28,774$, $df = 9$, $p = 0,0007$; dostupni Pb: $\chi^2 = 28,853$, $df = 9$, $p = 0,0007$).



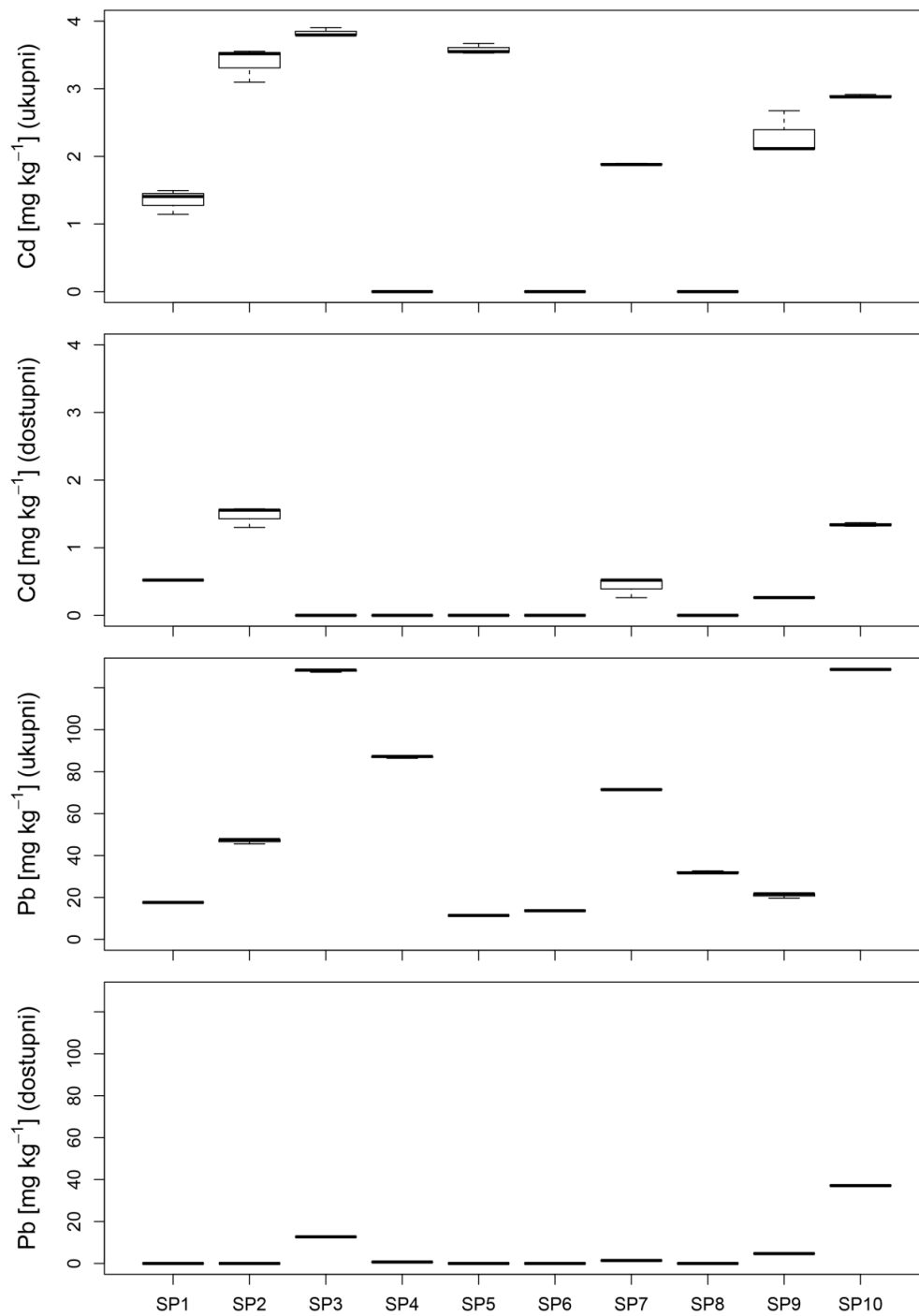
Grafik 3. Ukupne i dostupne koncentracija Ni i Mn (mg kg^{-1}) u uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta.



Grafik 4. Ukupne i dostupne koncentracija Cr i Co (mg kg⁻¹) u uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta.



Grafik 5. Ukupne i dostupne koncentracija Zn i Cu (mg kg^{-1}) u uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta.

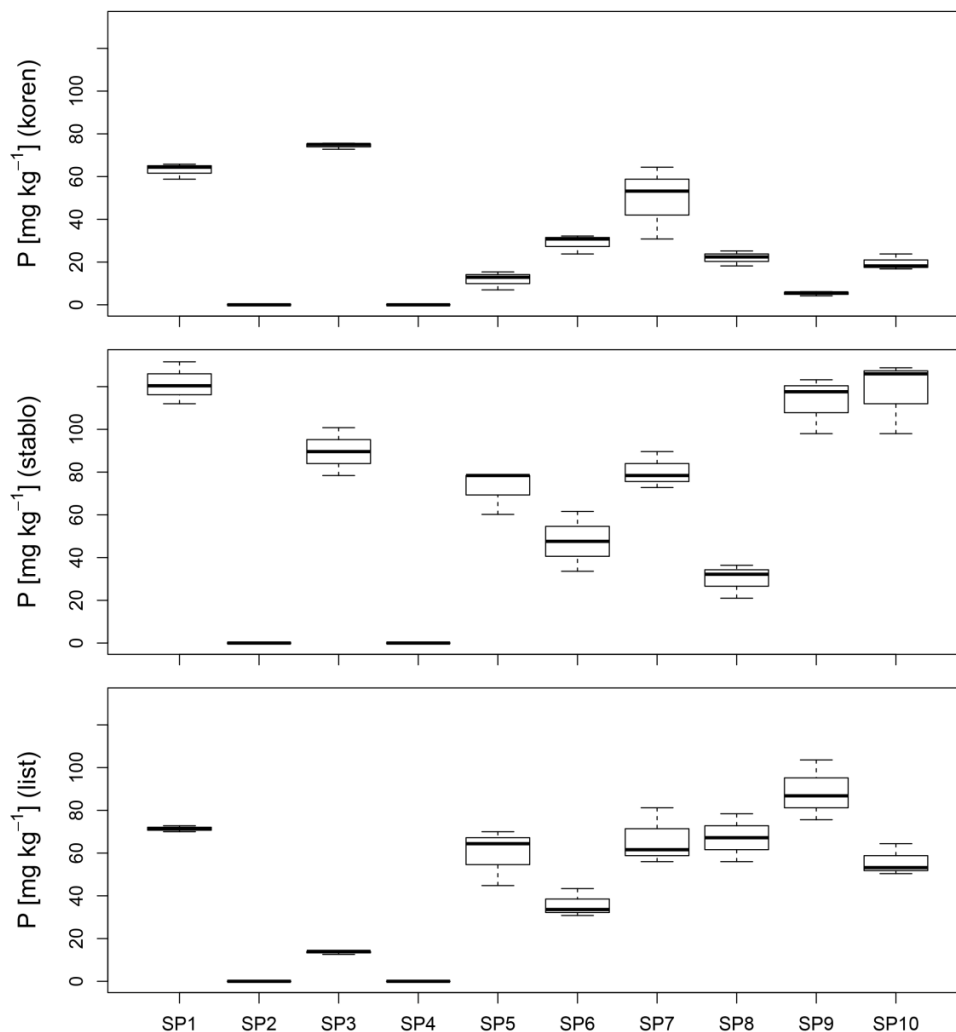


Grafik 6. Ukupne i dostupne koncentracija Cd i Pb (mg kg^{-1}) u uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta.

4.2 Sadržaj elemenata u istraživanim biljnim vrstama

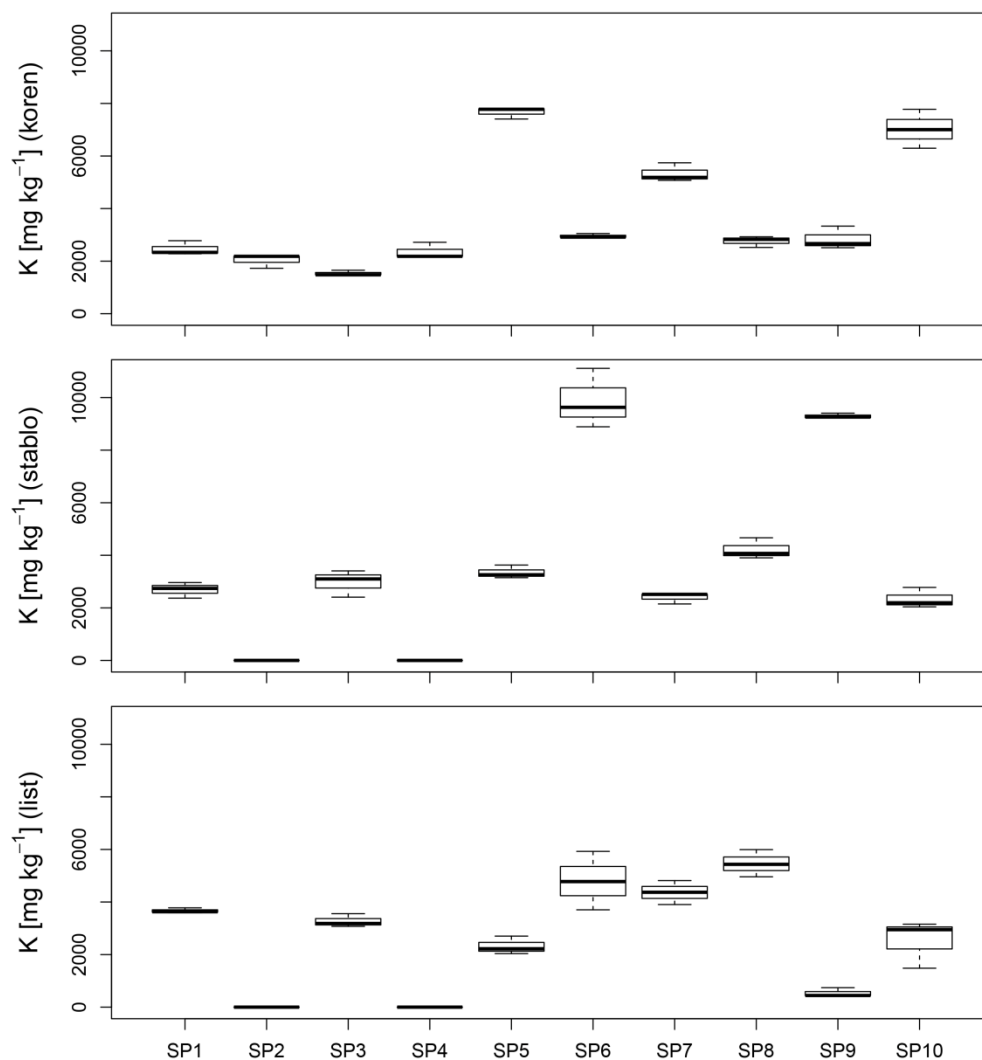
4.2.1. *Alyssum murale*

Koncentracije P_2O_5 i K_2O u korenima, stablima i listovima *A. murale* sa serpentinitских staništa Bosne i Hercegovine prikazane su na Grafcima 7 i 8. Najniža izmerena koncentracija P_2O_5 ($mg\ kg^{-1}$) u korenima, stablima i listovima je bila 5,39 (SP9), 29,9 (SP8), 13,5 (SP3) respektivno. Najniža izmerena koncentracija K_2O ($mg\ kg^{-1}$) u korenima, stablima i listovima je bila 1539 (SP3), 2336 (SP10) i 543 (SP9). Najviša koncentracija P_2O_5 ($mg\ kg^{-1}$) u korenima zabeležena je na lokalitetu SP3 (74,5), u stablima na lokalitetu SP1 (121) i u listovima na lokalitetu SP9 (88,7). Maksimalna koncentracija K_2O ($mg\ kg^{-1}$) bila je 7667 (SP5) u korenima, 9876 (SP6) u stablima i 5462 (SP8) u listovima.



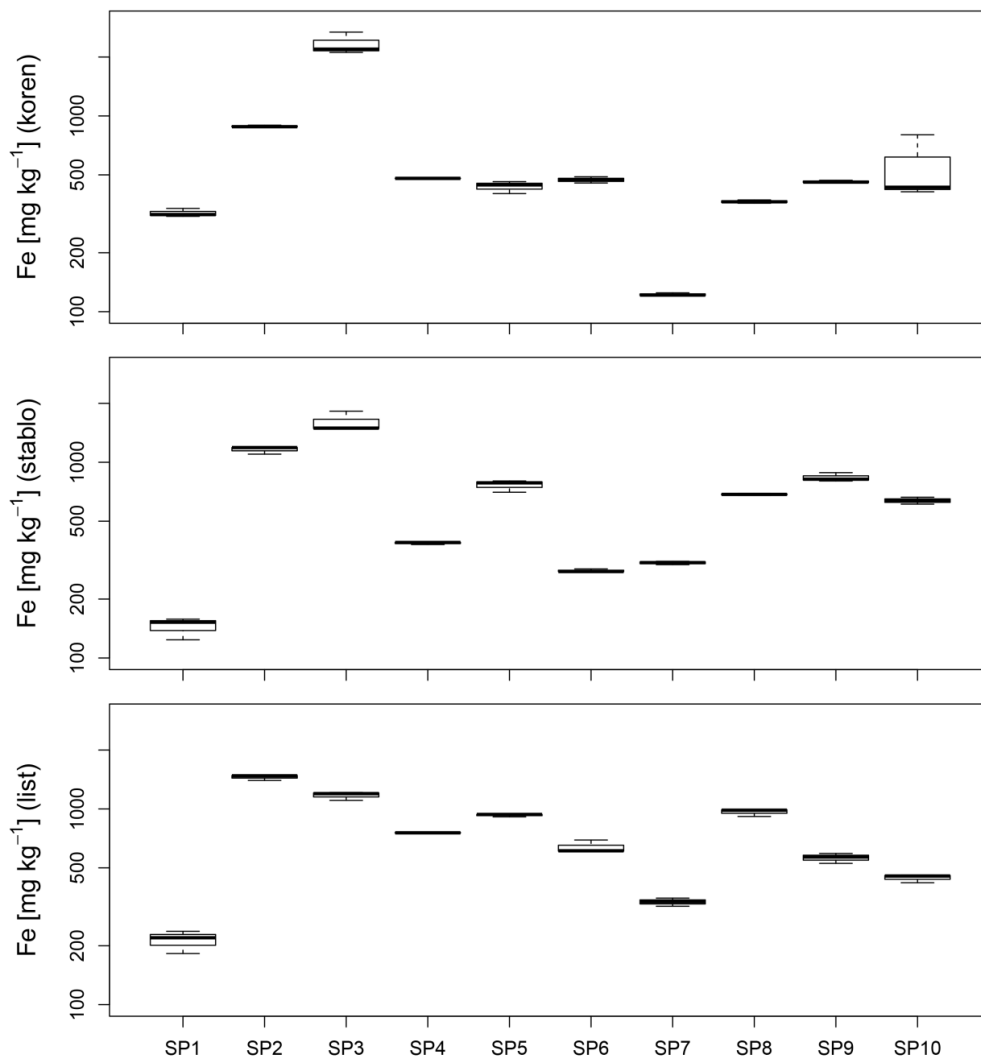
Grafik 7. Koncentracija P_2O_5 ($mg\ kg^{-1}$) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Rezultati Kruskal–Wallis H testa pokazali su da postoje statistički značajne razlike u sadržaju P_2O_5 i K_2O u korenu (P_2O_5 : $\chi^2 = 28,291$, $df = 9$, $p = 0,0009$; K_2O : $\chi^2 = 26,807$, $df = 9$, $p = 0,0015$), stablu (P_2O_5 : $\chi^2 = 27,307$, $df = 9$, $p = 0,0012$; K_2O : $\chi^2 = 27,290$, $df = 9$, $p = 0,0013$) i listovima (P_2O_5 : $\chi^2 = 26,223$, $df = 9$, $p = 0,0019$; K_2O : $\chi^2 = 28,053$, $df = 9$, $p = 0,0009$) vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini.



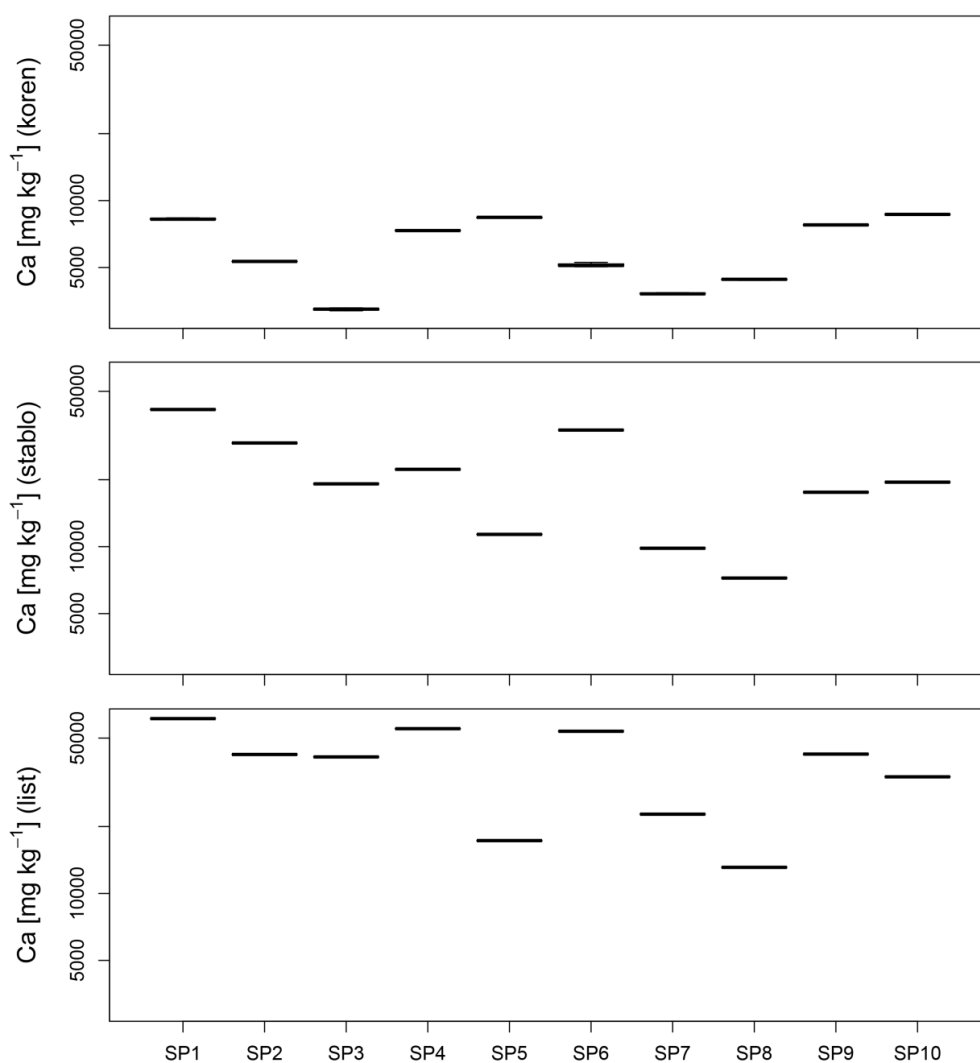
Grafik 8. Koncentracija K_2O ($mg\ kg^{-1}$) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Koncentracije gvožđa bile su najniže u korenima *A. murale* i varirale su od 122 mg kg⁻¹ (SP7) do 885 mg kg⁻¹ (SP2), u stablima od 145 mg kg⁻¹ (SP1) do 1601 mg kg⁻¹ (SP3), dok su u listovima bile najviše i varirale su od 213 mg kg⁻¹ (SP1) do 1454 mg kg⁻¹ (SP2) (Grafik 9). Dobiene koncentracije Fe u biljnim organima *A. murale* na istraživanim lokalitetima bile su međusobno značajno statistički različite, što su potvrdili i rezultati Kruskal–Wallis *H* testa (koren: $\chi^2 = 26,591$, *df* = 9, *p* = 0,0016; stablo: $\chi^2 = 28,712$, *df* = 9, *p* = 0,0007; listovi: $\chi^2 = 28,628$, *df* = 9, *p* = 0,0007).



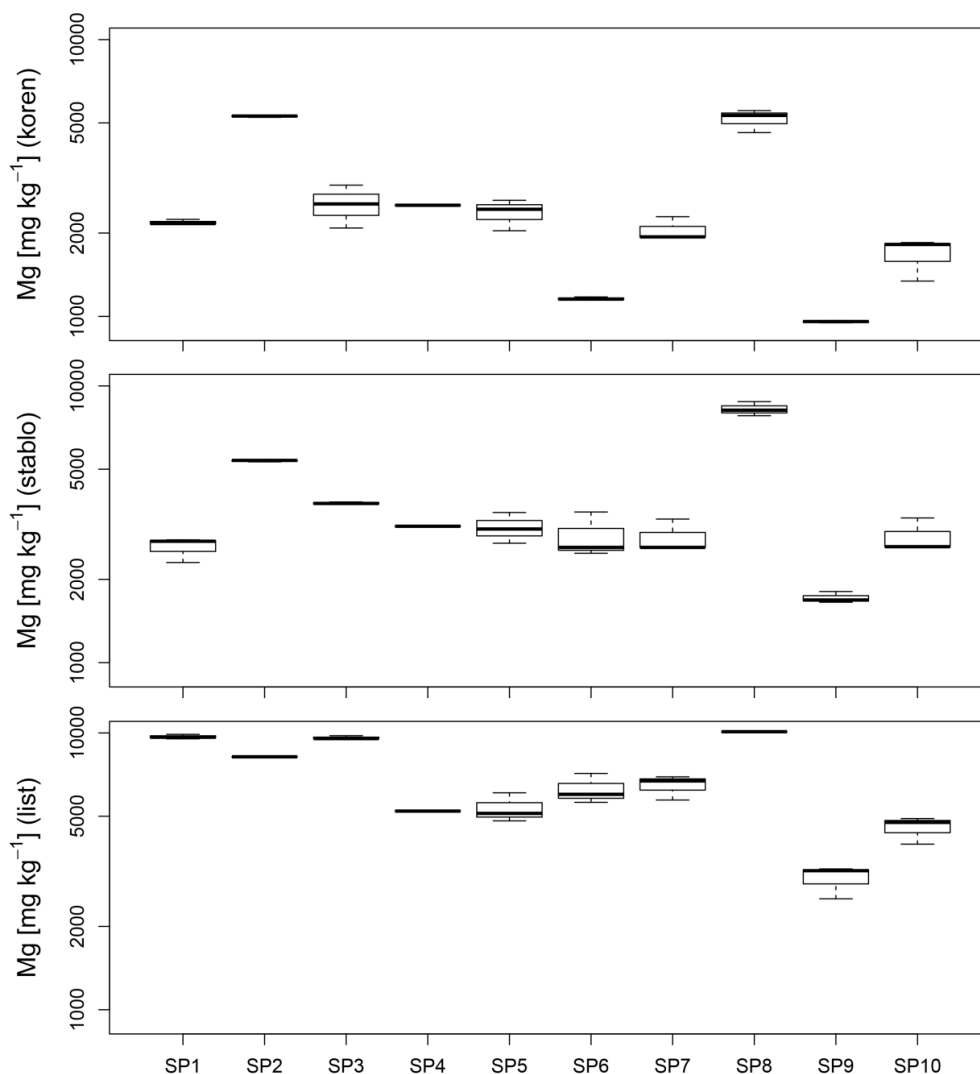
Grafik 9. Koncentracija Fe (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Uprkos niskoj koncentraciji raspoloživog Ca u uzorcima tla (od 112 mg kg⁻¹ (SP8) do 2419 mg kg⁻¹ (SP6)), u uzorcima biljnih organa kod *A. murale* konstatovane su visoke koncentracije Ca, od 3234 mg kg⁻¹ (SP3) do 8653 mg kg⁻¹ (SP10) u korenima, od 7233 mg kg⁻¹ (SP8) do 41419 mg kg⁻¹ (SP1) u stablima, i od 13104 mg kg⁻¹ (SP8) do 61169 mg kg⁻¹ (SP1) u listovima. Najniže koncentracije zabeležene su u korenima, a najviše u listovima *A. murale* (Grafik 10). Rezultati Kruskal–Wallis *H* testa pokazali su da postoje statistički značajne razlike u sadržaju Ca u korenu ($\chi^2 = 28,673$, *df* = 9, *p* = 0,0007), stablu ($\chi^2 = 28,742$, *df* = 9, *p* = 0,0007) i listovima ($\chi^2 = 28,742$, *df* = 9, *p* = 0,0007) vrste *A. murale* na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini.



Grafik 10. Koncentracija Ca (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Nasuprot tome, koncentraciju raspoloživog Mg u zemljištu prati neznatno veći sadržaj Mg u svim uzorcima *A. murale*. Koncentracija magnezijuma varira od 957 mg kg⁻¹ (SP9) do 8250 mg kg⁻¹ (SP8) u stablima, i između 2974 mg kg⁻¹ (SP9) i 10103 mg kg⁻¹ (SP8) u listovima. Kao i u slučaju Ca, najniže koncentracije Mg zabeležene su u korenima, a najviše u listovima vrste *A. murale* (Grafik 11). Na osnovu rezultata Kruskal–Wallis *H* testa, na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini, takođe, su konstatovane statistički značajne razlike u koncentracijama Mg u biljnim organima *A. murale* (koren: $\chi^2 = 26,841$, df = 9, p = 0,0015; stablo: $\chi^2 = 23,885$, df = 9, p = 0,0045; listovi: $\chi^2 = 27,684$, df = 9, p = 0,0011).



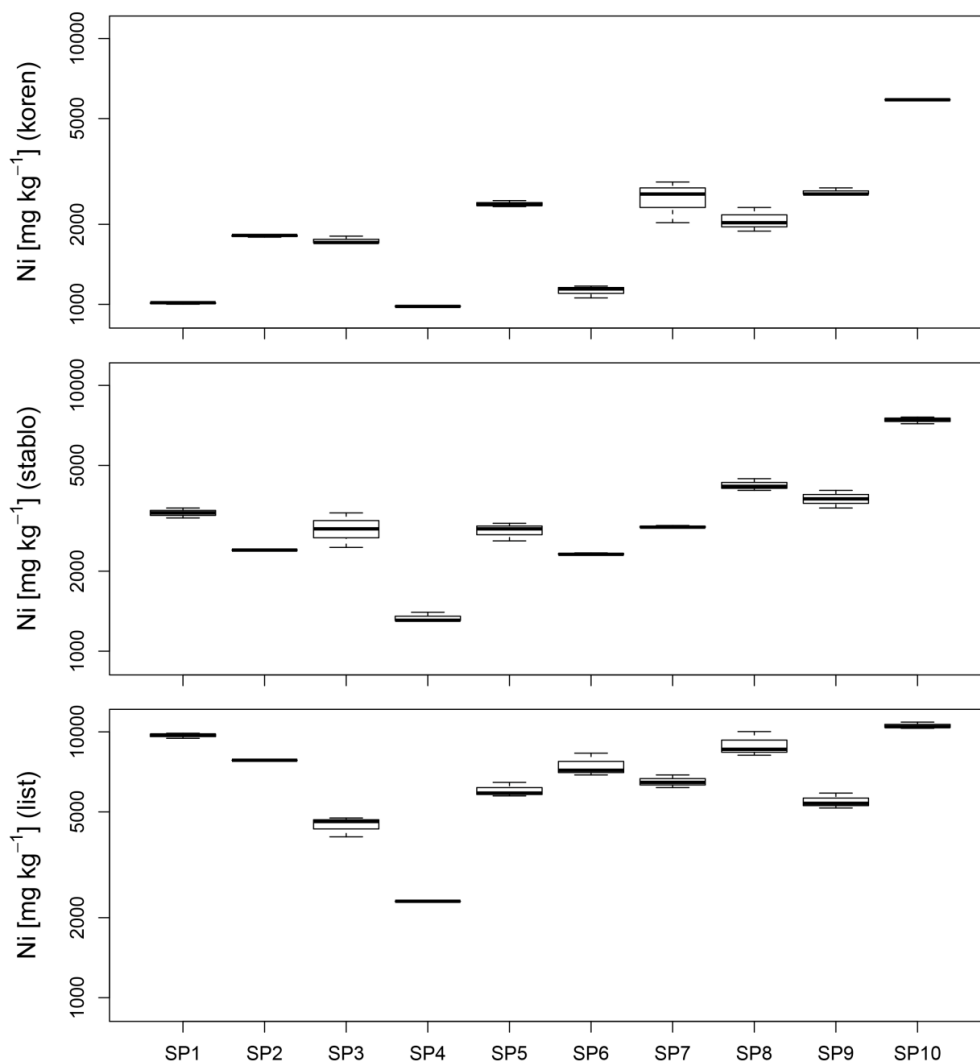
Grafik 11. Koncentracija Mg (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Odnosi koncentracija kalcijuma i magnezijuma u ispitivanim biljnim organima vrste *A. murale* su dati u Tabeli 16. Naime, odnos Ca/Mg bio je manji od 1 samo u uzorcima korena i stabala sa lokaliteta SP8 (koreni: 0,86; stabla: 0,88). Najniža vrednost količnika koncentracija kalcijuma i magnezijuma, takođe, je zabeležena i u uzorku listova *A. murale* sa lokaliteta SP8 (1,3). Najviši odnosi Ca/Mg zabeleženi su u uzorcima korena (8,11) i listova (14,24) sa lokaliteta SP9 i stabala sa lokaliteta SP1 (15,88).

Tabela 16. Odnos kalcijuma i magnezijuma (Ca/Mg) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

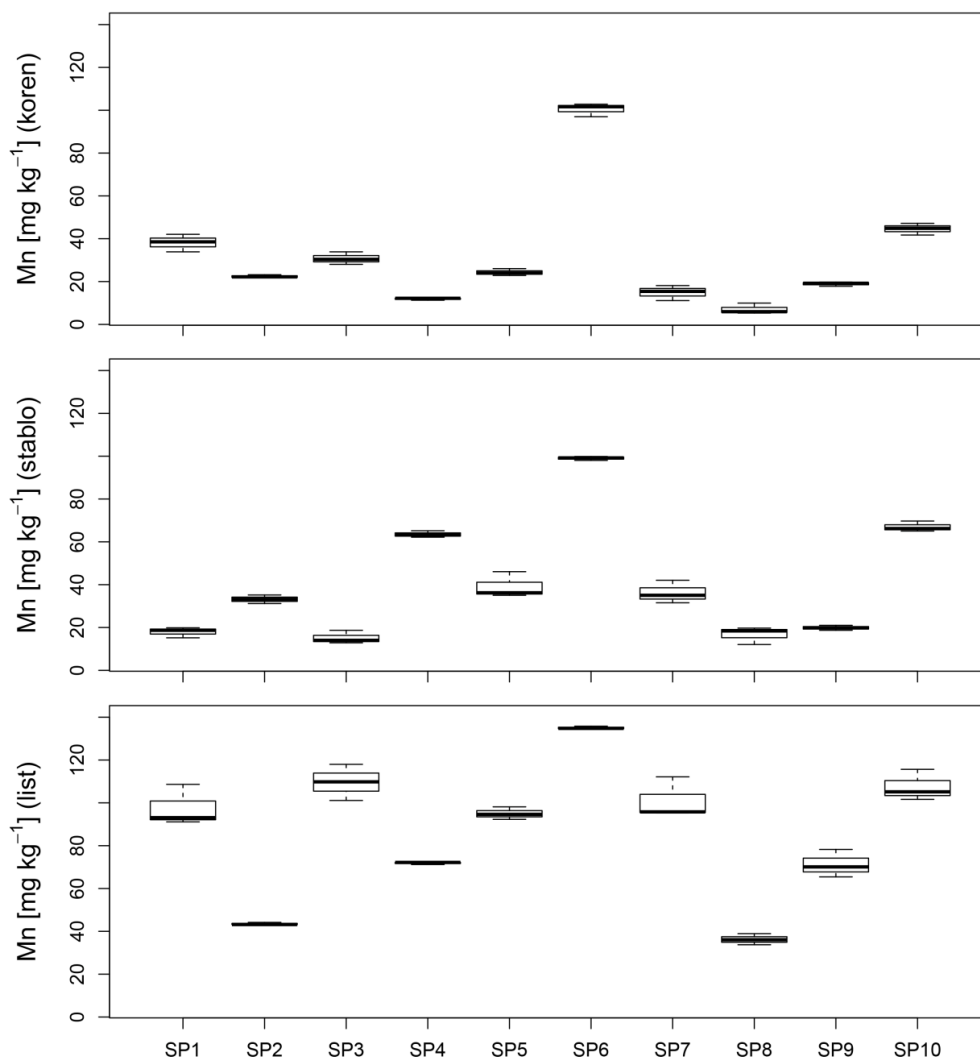
Lokalitet	Ca/Mg _{koren}	Ca/Mg _{stablo}	Ca/Mg _{list}
SP1	3,79	15,88	6,32
SP2	1,01	5,45	5,15
SP3	1,28	5,09	4,28
SP4	2,91	7,16	10,56
SP5	3,54	3,69	3,24
SP6	4,43	11,67	8,58
SP7	1,86	3,47	3,52
SP8	0,86	0,88	1,30
SP9	8,11	10,24	14,24
SP10	5,18	6,83	7,37

Sadržaj nikla kod *A. murale* bio je najniži u korenima, nešto viši u stablima, a najviši u listovima (Grafik 12). Najniže koncentracije Ni zabeležene su u uzorcima svih ispitivanih biljnih organa vrste *A. murale* sa lokaliteta SP4 (koreni: 984 mg kg⁻¹; stable: 1336 mg kg⁻¹; listovi: 2304 mg kg⁻¹), a najviše u uzorcima sa lokaliteta SP10 (koreni: 5585 mg kg⁻¹; stabla: 7409 mg kg⁻¹; listovi: 10552 mg kg⁻¹). Za sadržaj Ni u biljnim organima *A. murale*, takođe, je potvrđeno postojanje statistički značajnih razlika među lokalitetima (koren: $\chi^2 = 28,062$, df = 9, p = 0,0009; stablo: $\chi^2 = 27,820$, df = 9, p = 0,0010; listovi: $\chi^2 = 28,032$, df = 9, p = 0,0009).



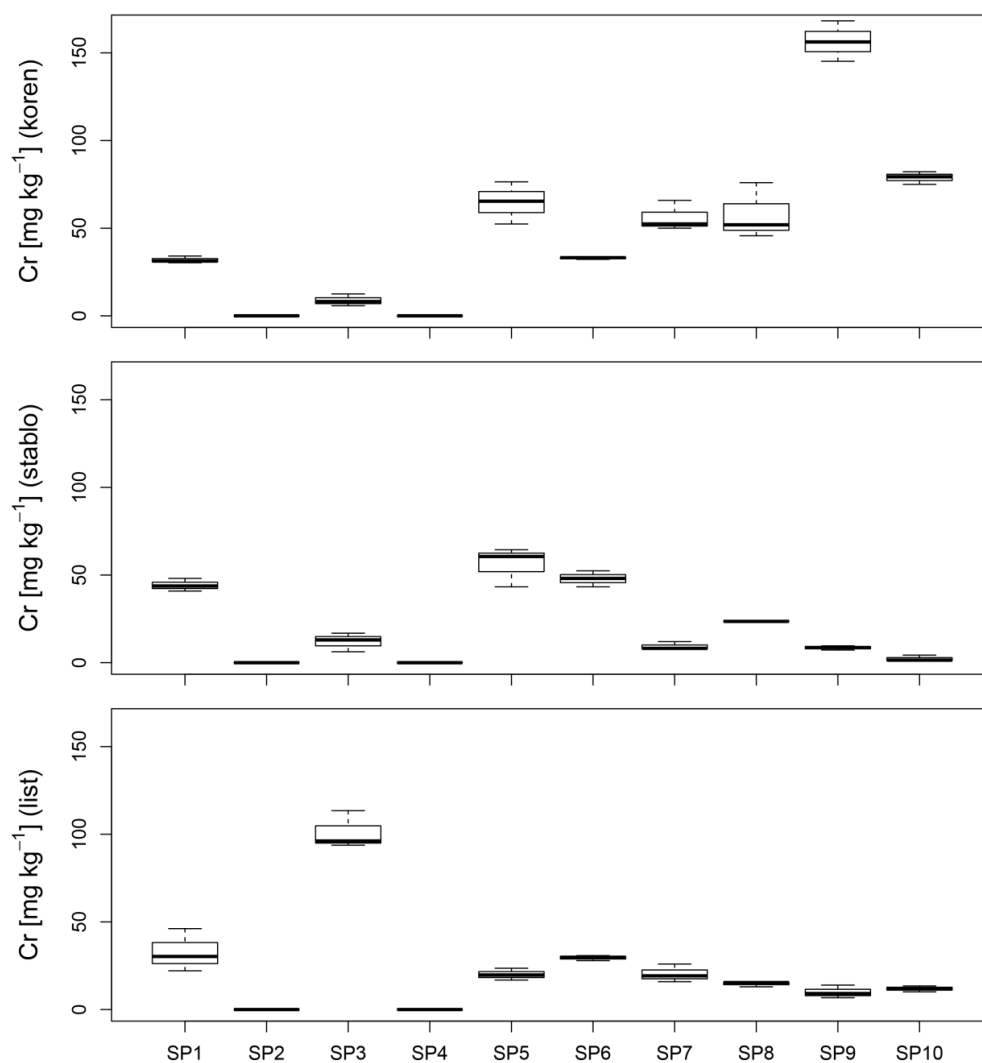
Grafik 12. Koncentracija Ni (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Kod *A. murale* minimalna koncentracija mangana zabeležena je u korenima i listovima uzorka sa lokaliteta SP8 (koren – 7,06 mg kg⁻¹, listovi – 36,3 mg kg⁻¹), kao i stablima uzorka sa lokaliteta SP3 (15,2 mg kg⁻¹). Maksimalni sadržaj Mn u svim ispitivanim organima kod *A. murale* zabeležene su u uzorcima sa lokaliteta SP6 (koren: 101 mg kg⁻¹, stablo: 99,0 mg kg⁻¹, listovi: 135 mg kg⁻¹). Najniže vrednosti gradijenta koncentracija Mn u biljnim organima *A. murale* konstatovane su u korenima, a najviše u listovima (Grafik 13). Rezultati Kruskal–Wallis *H* testa ukazali su na postojanje statistički značajne razlike u sadržaju Mn u korenu ($\chi^2 = 28,320$, $df = 9$, $p = 0,0009$), stablu ($\chi^2 = 27,286$, $df = 9$, $p = 0,0013$) i listovima ($\chi^2 = 26,841$, $df = 9$, $p = 0,0015$) ove vrste sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini.



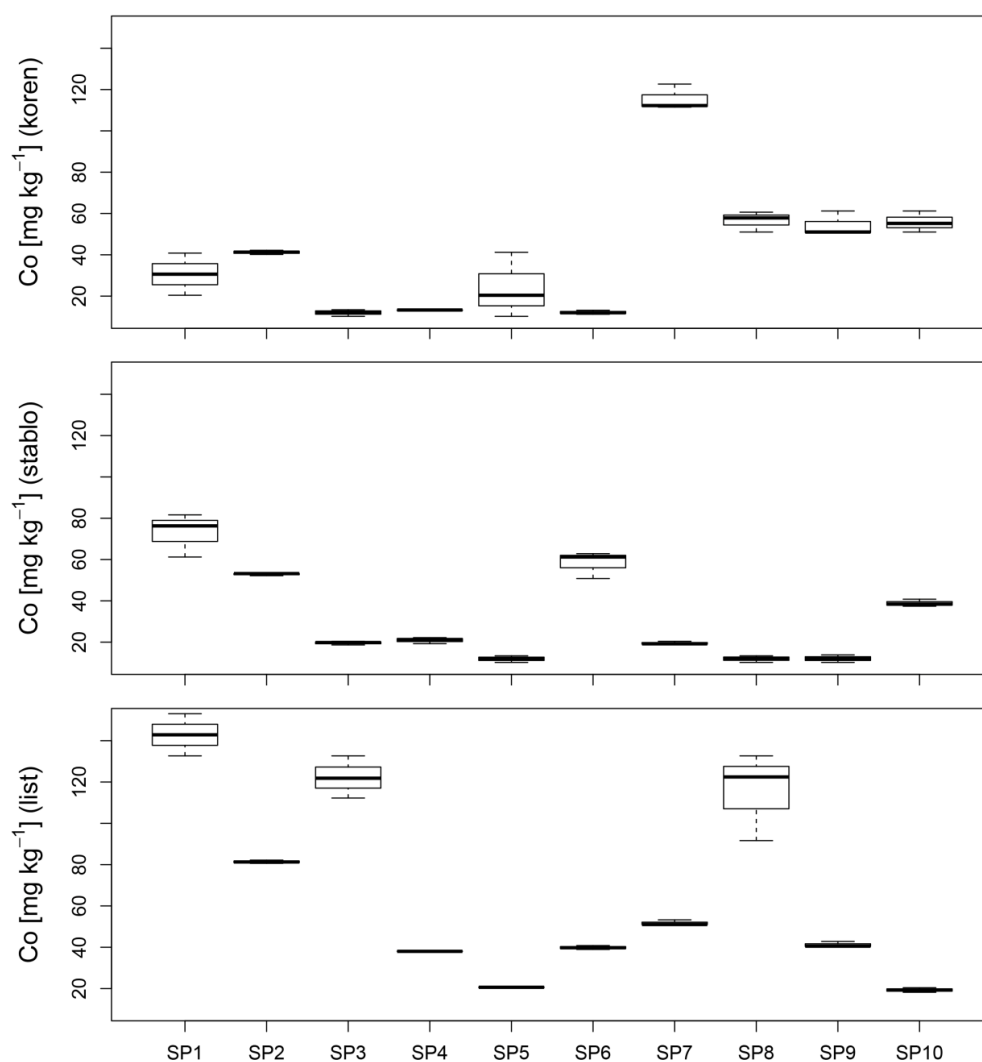
Grafik 13. Koncentracija Mn (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

U uzorcima svih biljnih organa vrste *A. murale* sa lokaliteta SP2 i SP4 koncentracija hroma bila je ispod nivoa detekcije, dok je minimalna izmerena vrednost u korenu bila 8,81 mg kg⁻¹ (SP3). Najniža izmerena vrednost koncentracije hroma u stablu bila je 2,24 mg kg⁻¹ (SP10) i 9,94 mg kg⁻¹ (SP9) u listovima. Maksimalne vrednosti koncentracije hroma zabeležene su u uzorku korenova sa lokaliteta SP9 (157 mg kg⁻¹), stabla u uzorku sa lokaliteta SP5 (56,1 mg kg⁻¹) i listova u uzorku sa lokaliteta SP3 (101 mg kg⁻¹). Najmanji prosečan sadržaj Cr zabeležen je u stablima, a najveći u korenovima vrste *A. murale* sa istraživanih serpentinititskih lokaliteta u Bosni i Hercegovini (Grafik 14). Sadržaji Cr u korenu, stablu i listovima ove vrste sa navedenih lokaliteta pokazali su statistički značajne razlike (koren: $\chi^2 = 27,803$, df = 9, p = 0,0010; stablo: $\chi^2 = 27,642$, df = 9, p = 0,0011; listovi: $\chi^2 = 27,725$, df = 9, p = 0,0011).



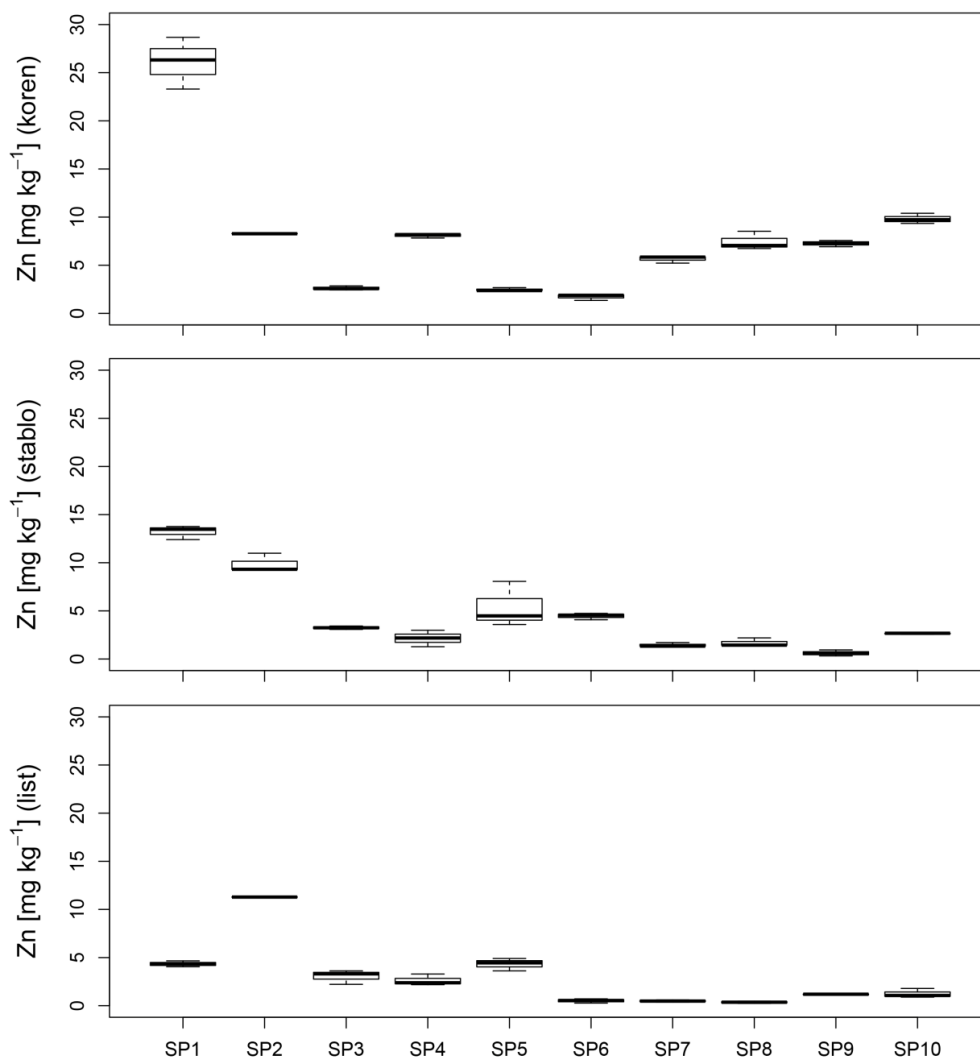
Grafik 14. Koncentracija Cr (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Koncentracija kobalta u uzorcima biljnih organa vrste *A. murale* je bila u opsegu od od 12,0 mg kg⁻¹ (SP3) do 116 mg kg⁻¹ (SP7) u korenovima. U stablima je koncentracija Co (mg kg⁻¹) varirala od 11,9 (SP5) do 73,1 (SP1), dok su u listovima koncentracije Co (mg kg⁻¹) bile značajno više, od 19,3 (SP10) do 143 (SP1). Na istraživanim lokalitetima, najniže koncentracije Co zabeležene su u stablima, a najviše u listovima *A. murale* (Grafik 15). Kao i slučaju sadržaja prethodno prikazanih elemenata u biljnim organima *A. murale*, i za Co su rezultati Kruskal–Wallis *H* testa potvrdili postojanje statistički značajnih razlika među lokalitetima (koren: $\chi^2 = 26,054$, *df* = 9, *p* = 0,0020; stablo: $\chi^2 = 27,348$, *df* = 9, *p* = 0,0012; listovi: $\chi^2 = 28,339$, *df* = 9, *p* = 0,0008).



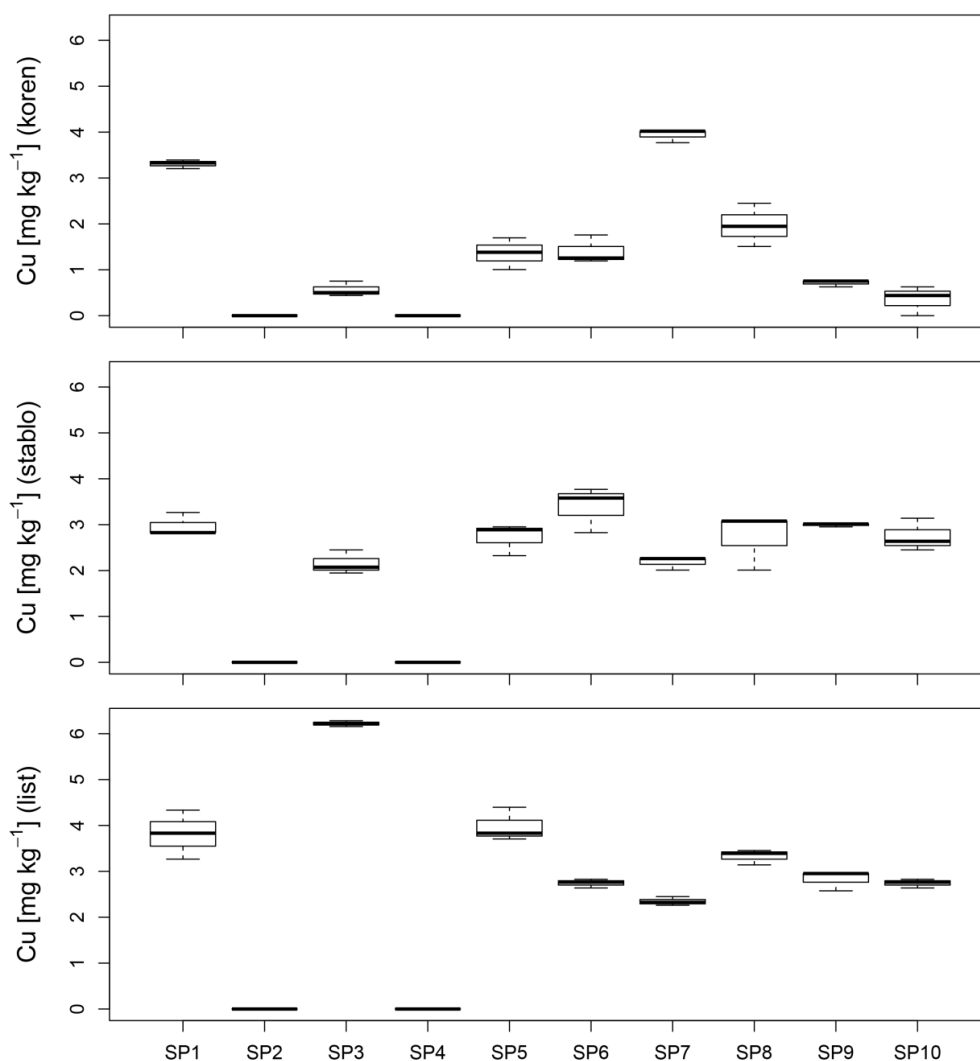
Grafik 15. Koncentracija Co (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Koncentracija cinka kod *A. murale* bila je najviša u korenima, vrednosti su bile od 1,72 mg kg⁻¹ (SP6) do 26,1 mg kg⁻¹ (SP1). U stablima je koncentracija Zn varirala od 0,61 mg kg⁻¹ (SP9) do 13,2 mg kg⁻¹ (SP1), dok su u listovima koncentracije bile značajno niže, od 0,35 mg kg⁻¹ (SP8), do 11,3 mg kg⁻¹ (SP2) (Grafik 16). Za sve analizirane biljne organe kod *A. murale*, utvrđeno je postojanje statistički značajnih razlika u koncentracijama Zn među lokalitetima (koren: $\chi^2 = 27,606$, df = 9, p = 0,0011; stablo: $\chi^2 = 27,659$, df = 9, p = 0,0011; listovi: $\chi^2 = 27,770$, df = 9, p = 0,0010).



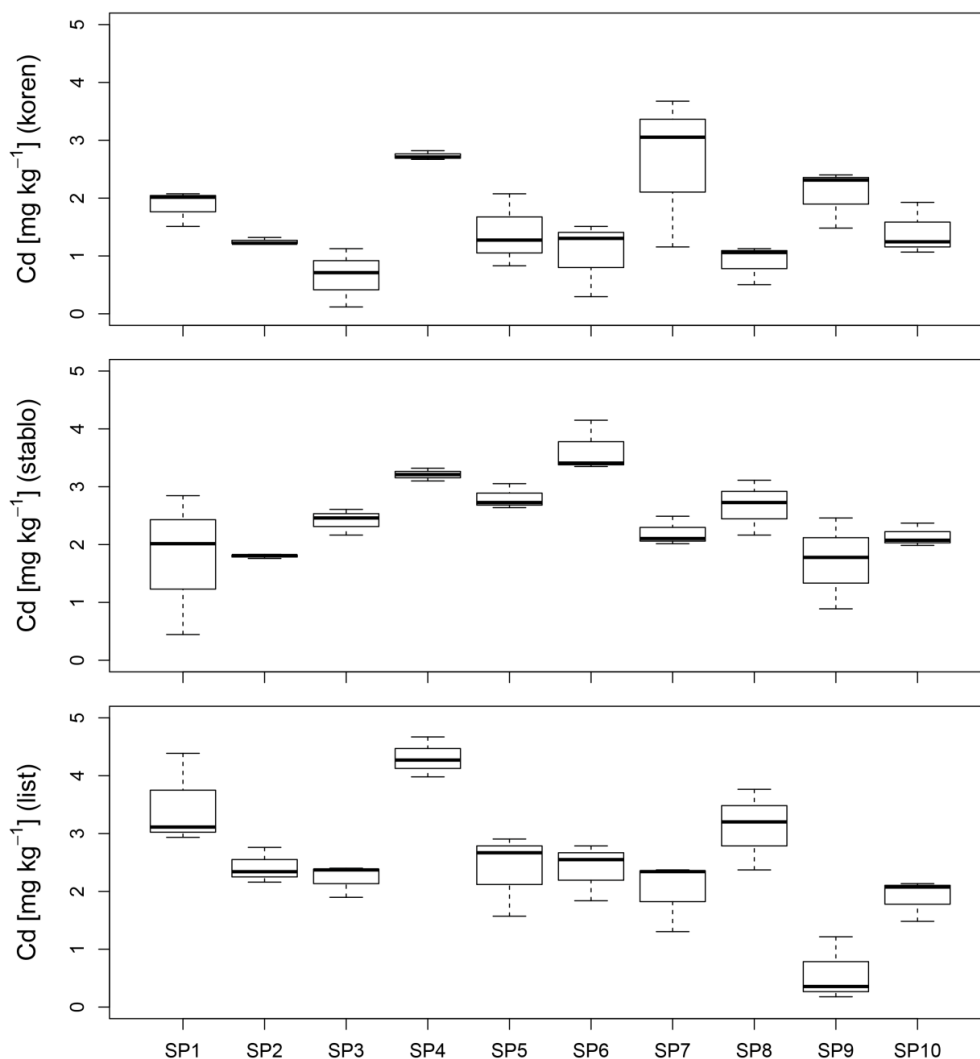
Grafik 16. Koncentracija Zn (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Kao i u slučaju hroma, u uzorcima svih biljnih organa vrste *A. murale* sa lokaliteta SP2 i SP4 koncentracija Cu bila je ispod nivoa detekcije instrumenta, dok su minimalne izmerene vrednosti iznosile 0,36 mg kg⁻¹ (SP10) u korenu; 2,16 mg kg⁻¹ (SP3) u stablu i 11,9 mg kg⁻¹ (SP10) u listovima. Maksimalna izmerena vrednost Cu je bila: u korenima 3,94 mg kg⁻¹ (SP7), 3,39 mg kg⁻¹ u stablima (SP6) i 6,22 mg kg⁻¹ u listovima (SP3). Iz prikazanih rezultata sledi da je najmanja koncentracija Cu izmerena u korenovima, a najveća u listovima vrste *A. murale* (Grafik 17). Na osnovu rezultata Kruskal–Wallis *H* testa konstatovano je postojanje statistički značajnih razlika u sadržaju Cu u korenu ($\chi^2 = 27,853$, *df* = 9, *p* = 0,0001), stablu ($\chi^2 = 22,229$, *df* = 9, *p* = 0,0082) i listovima ($\chi^2 = 27,830$, *df* = 9, *p* = 0,0010) ove vrste sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini.



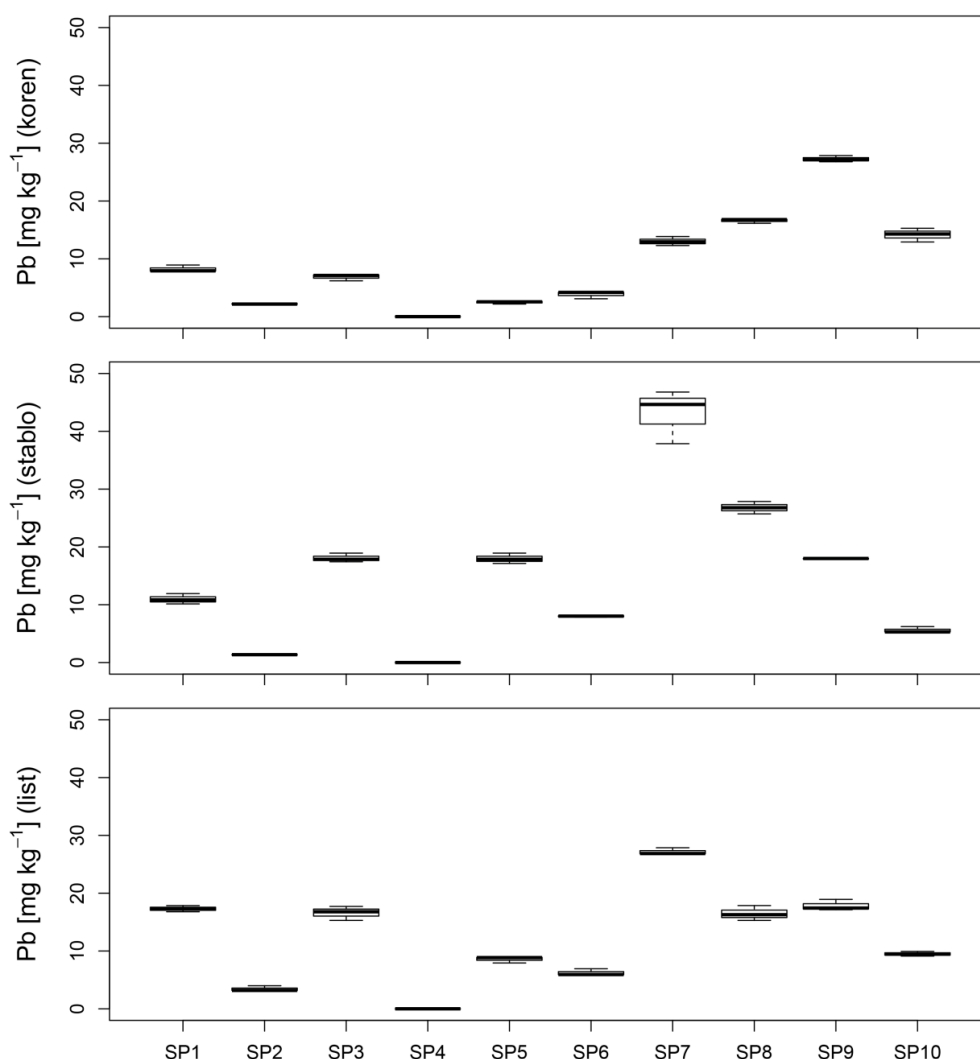
Grafik 17. Koncentracija Cu (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Najniže koncentracije kadmijuma, u opsegu od 0,65 mg kg⁻¹ (SP3) do 2,72 mg kg⁻¹ (SP4), zabeležene su u uzorcima korenova vrste *A. murale*. Analizirajući prikazane prosečne vrednosti koncentracije Cd zaključuje se da su u stablima i listovima približno iste i da su koncentracije Cd u uzorcima listova sa različitih lokaliteta više varirale. Rezultati ukazuju da je koncentracija Cd u stablima u opsegu od 1,71 mg kg⁻¹ (SP9) do 3,63 mg kg⁻¹ (SP6), a u listovima *A. murale* od 0,58 mg kg⁻¹ (SP9) do 4,30 mg kg⁻¹ (SP4) (Grafik 18). Rezultati Kruskal–Wallis *H* testa potvrdili su da postoje statistički značajne razlike u sadržaju Cd u korenu ($\chi^2 = 19,331$, *df* = 9, *p* = 0,0225), stablu ($\chi^2 = 22,409$, *df* = 9, *p* = 0,0077) i listovima ($\chi^2 = 22,147$, *df* = 9, *p* = 0,0084) *A. murale* na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini.



Grafik 18. Koncentracija Cd (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

Analizirajući podatke sa grafika 19 zaključuje se da su koncentracije Pb u korenu, stablu i listu vrste *A. murale* sa lokaliteta SP4 ispod granice detekcije instrumenta. Rezultati ukazuju i da su minimalne vrednosti koncentracije Pb izmerene u svim biljnim organima (korenu, stablu i listu) *A. murale* sa lokaliteta SP3 (2,21 mg kg⁻¹, 1,34 mg kg⁻¹ i 3,45 mg kg⁻¹, respektivo). Maksimalne izmerene koncentracije Pb (mg kg⁻¹) bile su 27,3 u korenima (SP9); 43,1 u stablima (SP7) i 27,2 u listovima (SP7). Iz grafikona sledi da su najniže koncentracije Pb izmerene u listovima, a najviše u stablima vrste *A. murale* (Grafik 19). Analiziranjem podataka za izmerene koncentracije Pb kod vrste *A. murale*, dobijeni rezultati Kruskal–Wallis *H* testa su ukazali na postojanje statistički značajnih razlika u sadržaju ovog elementa među istraživanim lokalitetima na serpentinitima u Bosni i Hercegovini (koren: $\chi^2 = 28,584$, df = 9, p = 0,0008; stablo: $\chi^2 = 28,129$, df = 9, p = 0,0009; listovi: $\chi^2 = 27,422$, df = 9, p = 0,0012).



Grafik 19. Koncentracija Pb (mg kg⁻¹) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

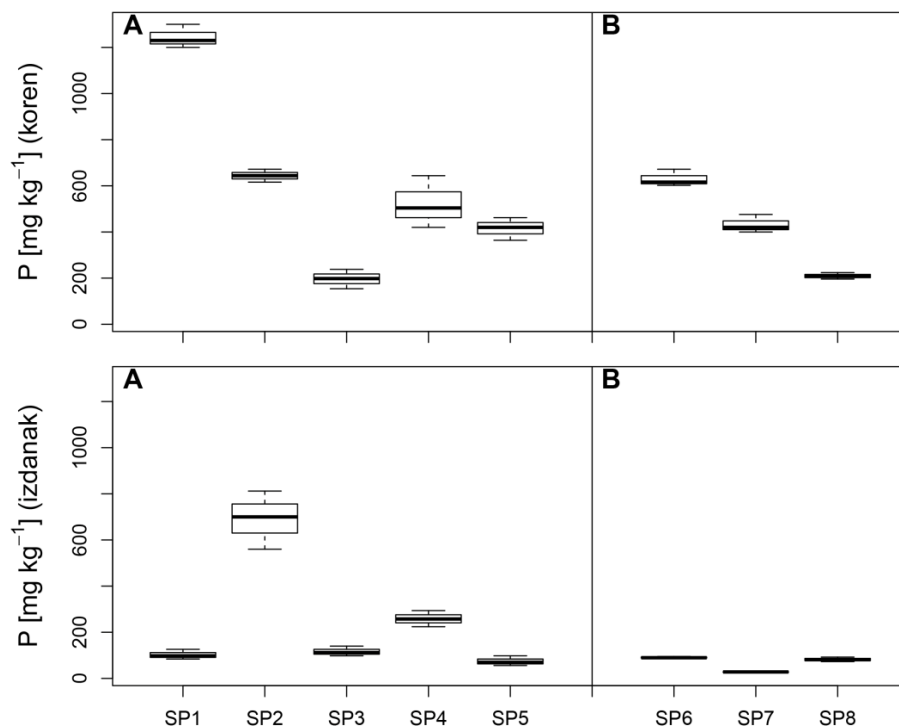
4.2.2. *Thlaspi kovatsii* i *Lepidium campestre*

Koncentracije P_2O_5 i K_2O u korenima i nadzemnom delu vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* sa serpentinitiskih lokaliteta Bosne i Hercegovine prikazane su na Graficima 20 i 21.

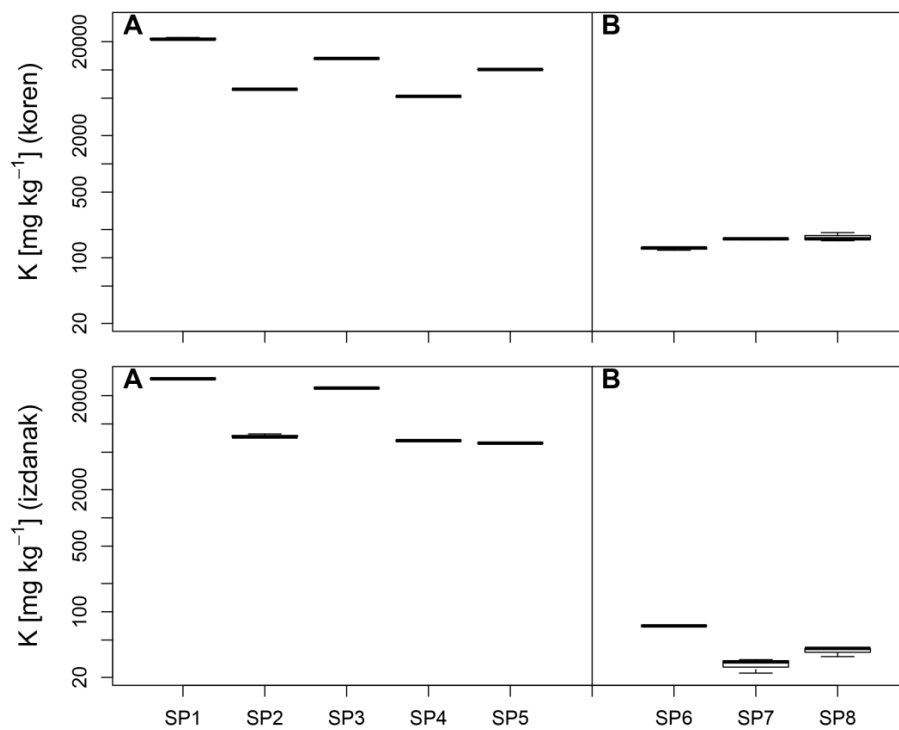
Analiziranjem podataka iz grafikona 20 i 21 zaključuje se da su kod obe analizirane vrste značajno veće koncentracije P_2O_5 u korenima u odnosu na nadzemne delove. Kod *T. kovatsii* koncentracije P_2O_5 su bile: od 197 mg kg^{-1} (SP3) do 1243 mg kg^{-1} (SP1) u korenu i od 74,7 mg kg^{-1} (SP5) do 691 mg kg^{-1} (SP2) u nadzemnom delu biljaka, a kod *L. campestre* od 209 mg kg^{-1} (SP8) do 630 mg kg^{-1} (SP6) u korenu i od 28,0 mg kg^{-1} (SP6), do 90,5 mg kg^{-1} (SP6) u nadzemnom delu. Kod vrste *T. kovatsii* je na osnovu rezultata Kruskal–Wallis H testa konstatovano postojanje statistički značajnih razlika u sadržaju P_2O_5 u svim analiziranim delovima biljke na istraživanim lokalitetima (koren: $\chi^2 = 12,720$, $df = 4$, $p = 0,0127$; nadzemni deo: $\chi^2 = 12,321$, $df = 4$, $p = 0,0151$), dok su kod *L. campestre* statistički značajne razlike potvrđene samo na nivou korena (koren: $\chi^2 = 7,200$, $df = 2$, $p = 0,0273$; nadzemni deo: $\chi^2 = 5,9556$, $df = 2$, $p = 0,0509$).

Analizirajući dobijene vrednosti koncentracija K_2O zaključuje se da je kod vrste *T. kovatsii* veća vrednost zabeležena u nadzemnom delu, dok je kod vrste *L. campestre* konstatovan značajno veći sadržaj K_2O u korenima. Kod *T. kovatsii* izmerene koncentracije bile su u opsegu od 5230 mg kg^{-1} (SP4) do 21535 mg kg^{-1} (SP1) u korenu i od 6239 mg kg^{-1} (SP5) do 30313 mg kg^{-1} (SP1) u nadzemnim delovima, a kod *L. campestre* od 126 mg kg^{-1} (SP6) do 165 mg kg^{-1} (SP8) u korenu i od 27,5 mg kg^{-1} (SP7) do 70,7 mg kg^{-1} (SP6) u nadzemnim delovima. U slučaju sadržaja K_2O su, takođe, kod vrste *T. kovatsii* notirane statistički značajne razlike u svim analiziranim biljnim delovima na istraživanim lokalitetima (koren: $\chi^2 = 13,500$, $df = 4$, $p = 0,0091$; nadzemni deo: $\chi^2 = 13,524$, $df = 4$, $p = 0,0090$), dok su kod *L. campestre* statistički značajne razlike potvrđene samo na nivou nadzemnog dela biljke (koren: $\chi^2 = 5,4454$, $df = 2$, $p = 0,0657$; nadzemni deo: $\chi^2 = 7,2605$, $df = 2$, $p = 0,0265$).

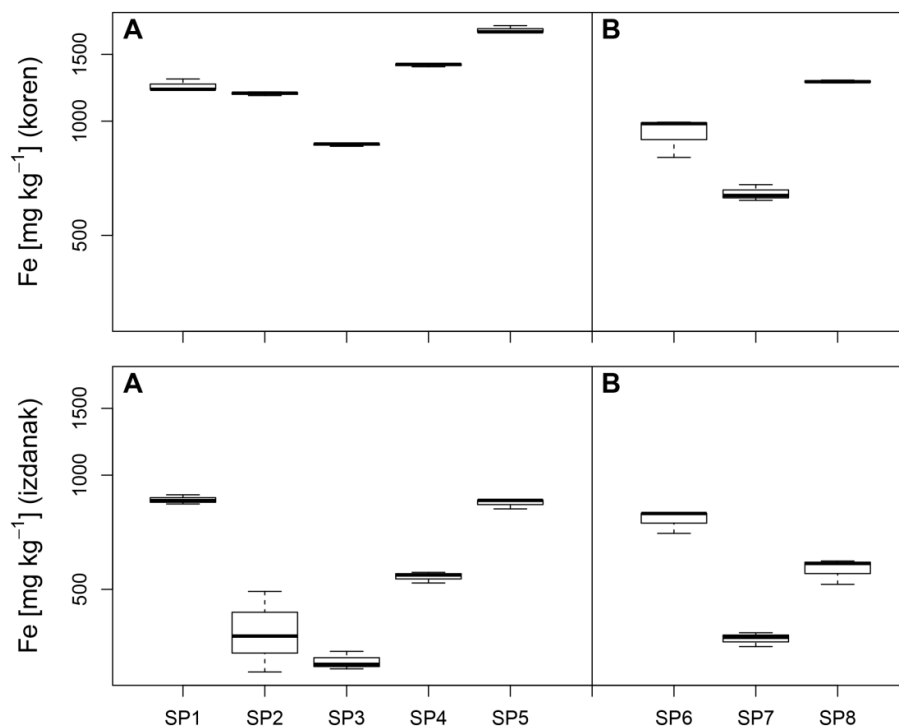
Iz prikazanih rezultata na Grafikonu 22 evidentno je da su koncentracije gvožđa bile više u korenima u odnosu na nadzemne delove, kako kod vrste *T. kovatsii*, tako i kod vrste *L. campestre*. Koncentracija Fe u korenima vrste *T. kovatsii* bila je od 868 mg kg^{-1} (SP3) do 1739 mg kg^{-1} (SP5), a u korenima vrste *L. campestre* od 645 mg kg^{-1} (SP7) do 1272 mg kg^{-1} (SP8). U nadzemnim delovima koncentracija Fe je bila od 323 mg kg^{-1} (SP3) do 861 mg kg^{-1} (SP1) kod *T. kovatsii* i od 370 mg kg^{-1} (SP7) do 763 mg kg^{-1} (SP6) kod *L. campestre*. Navedene razlike u sadržaju Fe su kod obe vrste bile statistički značajne (*T. kovatsii* – koren: $\chi^2 = 13,500$, $df = 4$, $p = 0,0091$; *T. kovatsii* – nadzemni deo: $\chi^2 = 12,255$, $df = 4$, $p = 0,0156$; *L. campestre* – koren | nadzemni deo: $\chi^2 = 7,200$, $df = 2$, $p = 0,0273$).



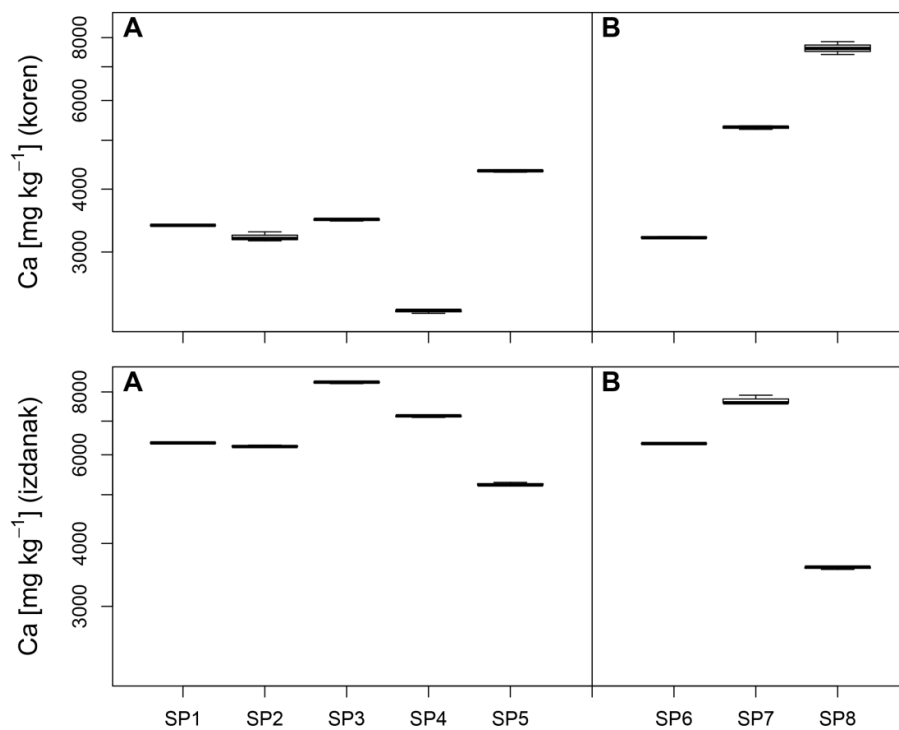
Grafik 20. Koncentracija P₂O₅ (mg kg⁻¹) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.



Grafik 21. Koncentracija K₂O (mg kg⁻¹) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.



Grafik 22. Koncentracija gvožđa (mg kg^{-1}) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.



Grafik 23. Koncentracija Ca (mg kg^{-1}) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.

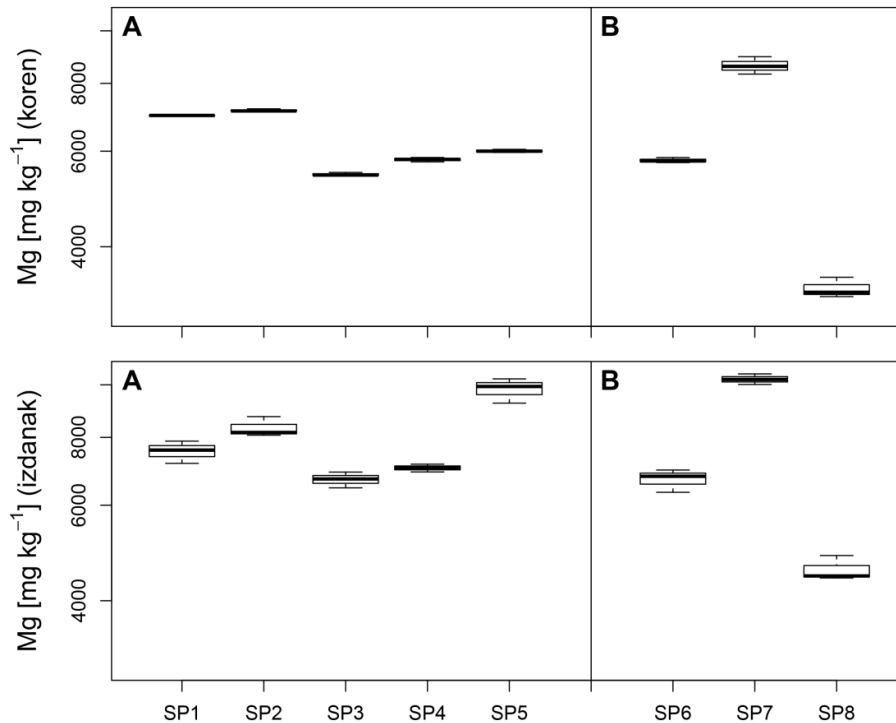
Koncentracije kalcijuma kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* bile su više u nadzemnim delovima u odnosu na korene. Kod vrste *L. campestre* zabeležene su manje razlike u sadržaju Ca između navedenih biljnih delova (Grafik 23). Kod vrste *T. kovatsii* koncentracija Ca je bila od 2289 mg kg⁻¹ (SP4) do 4347 mg kg⁻¹ (SP5) u korenima i od 524 mg kg⁻¹ (SP5) do 8358 mg kg⁻¹ (SP3) u nadzemnom delu. Kod vrste *L. campestre* sadržaj Ca bio je u opsegu od 2289 mg kg⁻¹ (SP4) do 4347 mg kg⁻¹ (SP5) u korenima i od 524 mg kg⁻¹ (SP5) do 8358 mg kg⁻¹ (SP3) u nadzemnim delovima. Kod obe vrste konstatovane su statistički značajne razlike u sadržaju Ca u korenu i nadzemnom delu na istraživanim lokalitetima (*T. kovatsii* – koren | nadzemni deo: $\chi^2 = 13,500$, df = 4, p = 0,0091; *L. campestre* – koren | nadzemni deo: $\chi^2 = 7,200$, df = 2, p = 0, 0273).

Kao i u slučaju kalcijuma, koncentracije magnezijuma kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* sa serpentinitских lokaliteta u Bosni i Hercegovini bile su više u nadzemnim delovima u odnosu na korene (Grafik 24). Najniže koncentracije Mg kod *T. kovatsii* zabeležene su u uzorku sa lokaliteta SP3 (5438 mg kg⁻¹ u korenu i 6690 mg kg⁻¹ u nadzemnom delu), kao i u uzorku *L. campestre* sa lokaliteta SP8 (3349 mg kg⁻¹ u korenu i 4565 mg kg⁻¹ u nadzemnom delu). Kod vrste *T. kovatsii* najviša izmerena koncentracija Mg u korenu bila je 7138 mg kg⁻¹ (SP2) i 9812 mg kg⁻¹ (SP5) u nadzemnom delu, a kod vrste *L. campestre* 8628 mg kg⁻¹ (SP7) u korenu i 10239 mg kg⁻¹ (SP7) u nadzemnom delu. Kod obe vrste konstatovan je isti nivo statističke značajnosti razlika u koncentraciji Mg, kao za sadržaj Ca na istraživanim lokalitetima (*T. kovatsii* – koren | nadzemni deo: $\chi^2 = 13,500$, df = 4, p = 0,0091; *L. campestre* – koren | nadzemni deo: $\chi^2 = 7,200$, df = 2, p = 0, 0273).

Vrednosti odnosa koncentracija Ca i Mg u korenima i nadzemnim delovima vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* na istraživanim lokalitetima su prikazane su u Tabeli 17. Vrednosti veće od 1,00 su zabeležene samo u uzorcima nadzemnog dela vrste *T. kovatsii* sa lokaliteta SP3 (1,25) i SP4 (1,02), kao i kod uzorka korena vrste *L. campestre* sa lokaliteta SP8 (2,28).

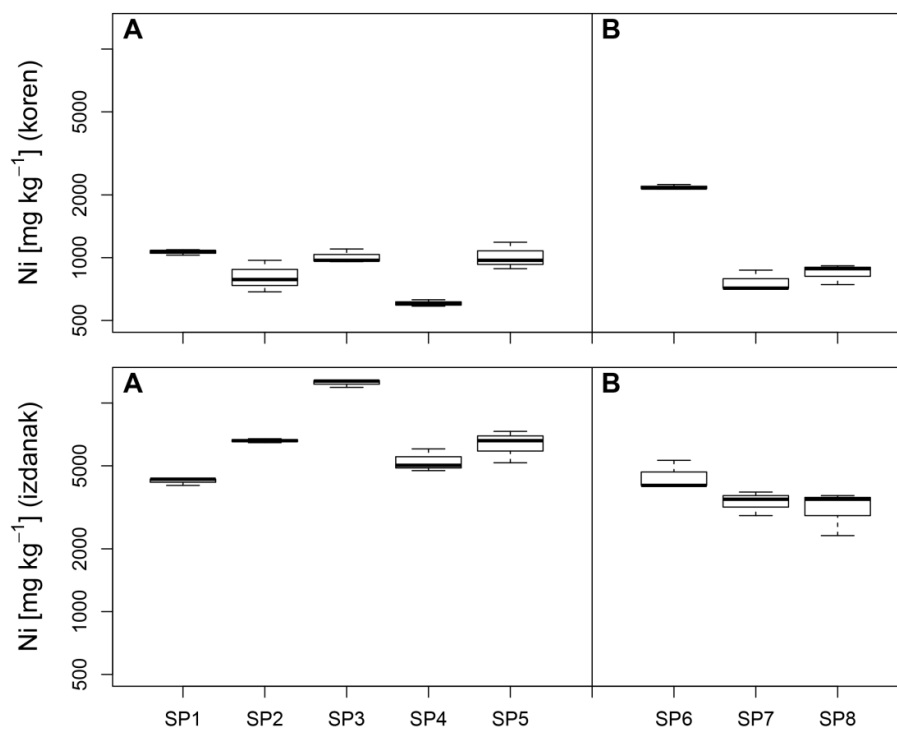
Tabela 17. Odnos kalcijuma i magnezijuma (Ca/Mg) u uzorcima korena i nadzemnih delova vrsta *Thlaspi kovatsii* i *Lepidium campestre*.

Lokalitet	<i>Thlaspi kovatsii</i>		<i>Lepidium campestre</i>	
	Ca/Mg koren	Ca/Mg izdanak	Ca/Mg koren	Ca/Mg izdanak
SP1	0,49	0,84		
SP2	0,45	0,75		
SP3	0,64	1,25		
SP4	0,40	1,02		
SP5	0,72	0,53		
SP6			0,57	0,94
SP7			0,61	0,75
SP8			2,28	0,78

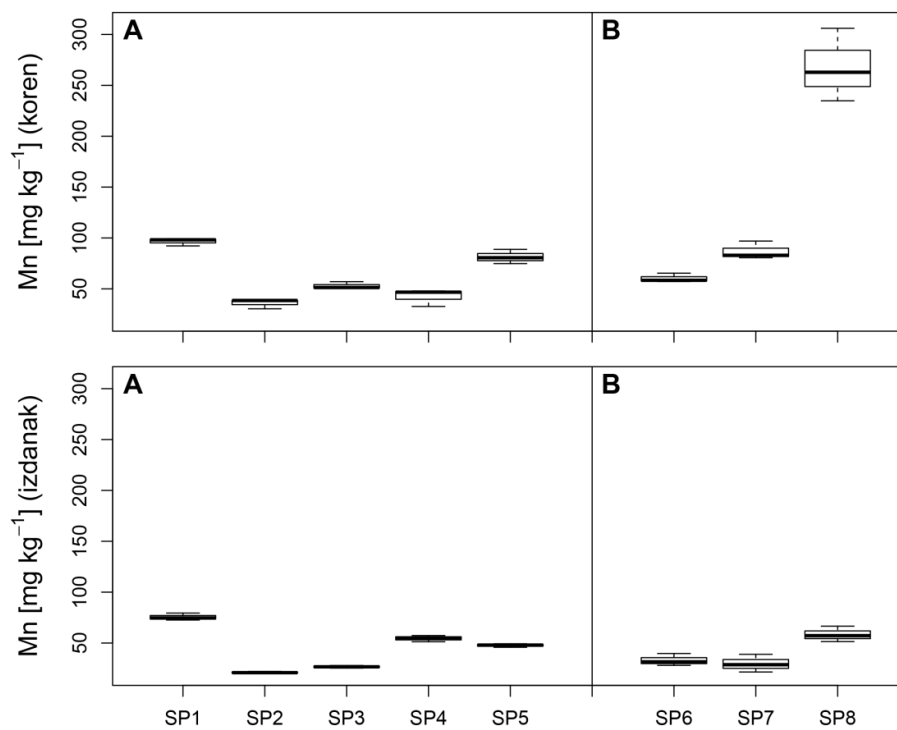


Grafik 24. Koncentracija Mg (mg kg^{-1}) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.

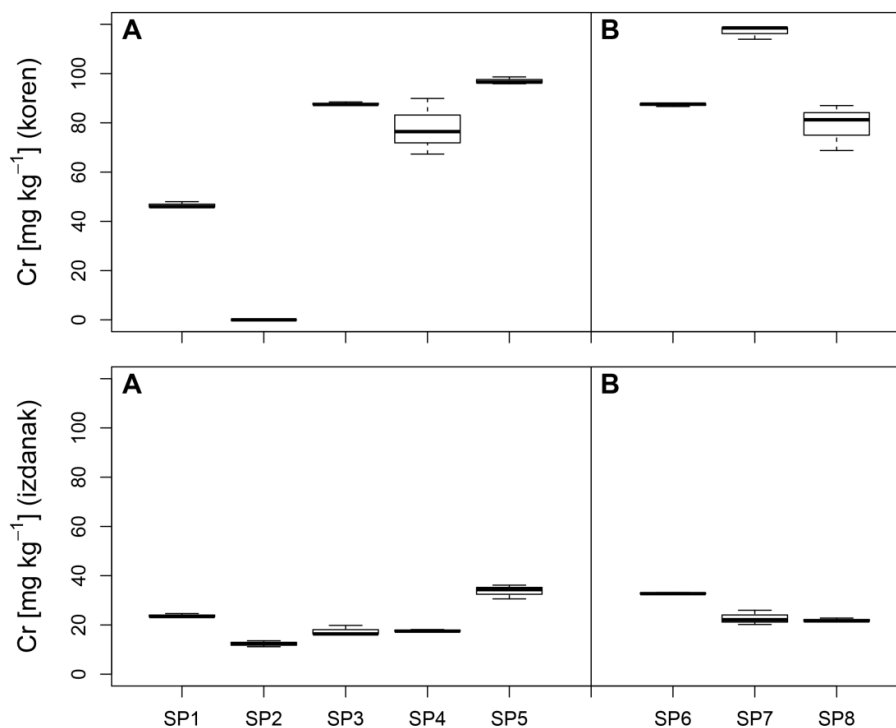
Koncentracije nikla kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* sa istraživanih serpentinitičkih lokaliteta u Bosni i Hercegovini bile su značajno više u nadzemnim delovima u odnosu na korene, iako su te razlike kod *L. campestre* bile nešto manjeg obima (Grafik 25). Sadržaj Ni u korenu *T. kovatsii* imao je vrednosti koje su bile u opsegu od 605 mg kg^{-1} (SP4) do 1064 mg kg^{-1} (SP1), dok je u nadzemnom delu koncentracija Ni imala vrednosti koje su bile od 4219 mg kg^{-1} (SP1) do 12505 mg kg^{-1} (SP3). Kod *L. campestre* izmeren sadržaj Ni je bio od 768 mg kg^{-1} (SP7) do 2176 mg kg^{-1} (SP6) u korenima i od 3124 mg kg^{-1} (SP8) do 4457 mg kg^{-1} (SP6) u nadzemnim delovima. Kruskal–Wallis H test potvrdio je postojanje razlika u sadržaju Ni kod *T. kovatsii* sa istraživanih lokaliteta (koren: $\chi^2 = 9,6691$, $df = 4$, $p = 0,0464$; nadzemni deo: $\chi^2 = 12,453$, $df = 4$, $p = 0,0143$). Kod vrste *L. campestre* statistički značajne razlike u koncentraciji Ni u biljci nisu konstatovane (koren | nadzemni deo: $\chi^2 = 5,5819$, $df = 2$, $p = 0,0614$).



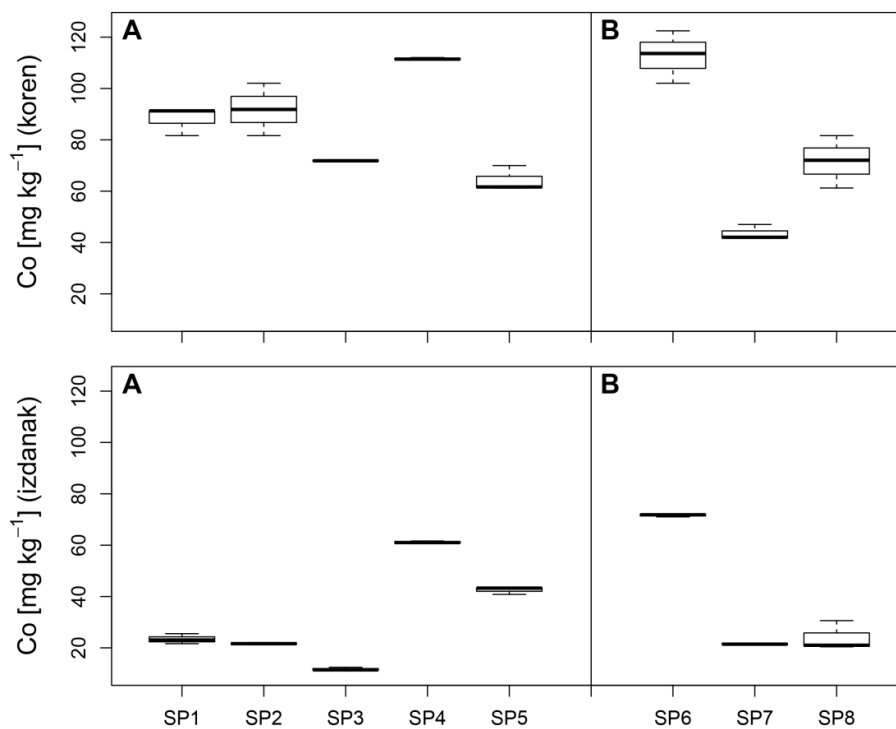
Grafik 25. Koncentracija Ni (mg kg^{-1}) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.



Grafik 26. Koncentracija Mn (mg kg^{-1}) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.



Grafik 27. Koncentracija Cr (mg kg⁻¹) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.

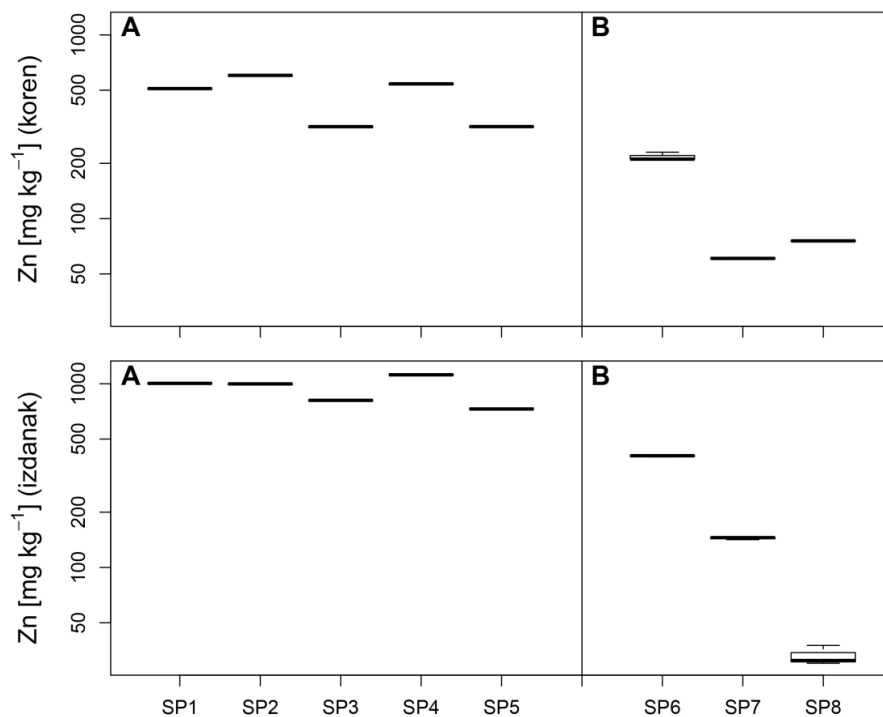


Grafik 28. Koncentracija Co (mg kg⁻¹) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.

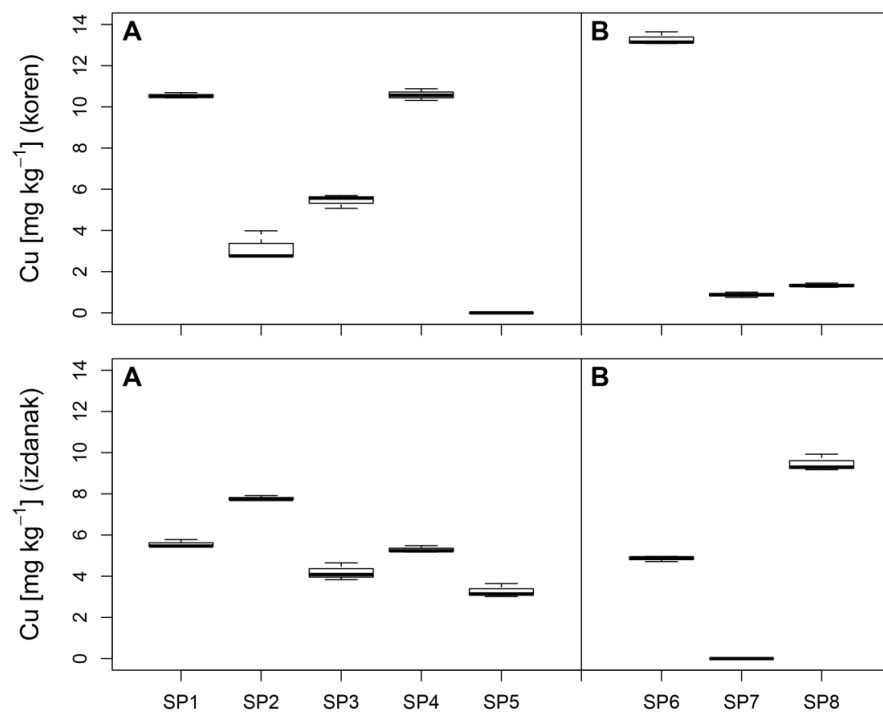
Istraživanja su pokazala da se značajna koncentracija mangana u vrstama *T. kovatsii* i *L. campestre* nalazi u korenovima (Grafik 26). Kod vrste *T. kovatsii* minimalne vrednosti Mn izmerene su u uzorcima sa lokaliteta SP2 (35,8 mg kg⁻¹ u korenu i 21,1 mg kg⁻¹ u nadzemnom delu), dok su maksimalne vrednosti izmerene u uzorku sa lokaliteta SP1 (96,5 mg kg⁻¹ u korenu i 75,6 mg kg⁻¹ u nadzemnom delu). Kod vrste *L. campestre*, koncentracija Mn je bila od 60,4 mg kg⁻¹ (SP6) do 268 mg kg⁻¹ (SP8) u korenima i od 29,7 mg kg⁻¹ (SP7) do 58,4 mg kg⁻¹ (SP8) u nadzemnim delovima. Na osnovu rezultata Kruskal–Wallis *H* testa kod vrste *T. kovatsii* ustanovljeno je prisutvo statistički značajnih razlika u sadržaju Mn u svim analiziranim delovima biljke na istraživanim lokalitetima (koren: $\chi^2 = 13,500$, df = 4, p = 0,0091; nadzemni deo: $\chi^2 = 13,057$, df = 4, p = 0,0110), dok su kod *L. campestre* statistički značajne razlike utvrđene samo na nivou korena (koren: $\chi^2 = 7,200$, df = 2, p = 0,0273; nadzemni deo: $\chi^2 = 5,600$, df = 2, p = 0,0608).

Koncentracije hroma kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* su bile više u korenima u odnosu na nadzemne delove (Grafik 27). U uzorku korena *T. kovatsii* sa lokaliteta SP2 koncentracija Cr bila je ispod granice detekcije instrumenta, dok je minimalna vrednost izmerena u uzorku sa lokaliteta SP1 (46,5 mg kg⁻¹). Najviša koncentracija Cr u korenu *T. kovatsii* zabeležena je za uzorak sa lokaliteta SP5 (97,0 mg kg⁻¹). Vrednosti sadržaja Cr u nadzemnim delovima vrste *T. kovatsii* bile su od 12,4 mg kg⁻¹ (SP2) do 33,7 mg kg⁻¹ (SP5). Najniže koncentracije Cr kod vrste *L. campestre* zabeležene su za uzorke sa lokaliteta SP8 (79,0 mg kg⁻¹ u korenu i 21,9 mg kg⁻¹ u nadzemnom delu), a najviše u uzorku sa lokaliteta SP7 u korenu (117 mg kg⁻¹) i uzorku sa lokaliteta SP6 u nadzemnom delu (32,8 mg kg⁻¹). Za vrednosti koncentracije Cr su, takođe, kod vrste *T. kovatsii* konstatovane statistički značajne razlike u sadržaju ovog elementa u svim analiziranim delovima biljke na istraživanim lokalitetima (koren: $\chi^2 = 12,993$, df = 4, p = 0,0113; nadzemni deo: $\chi^2 = 12,923$, df = 4, p = 0,0117), dok su kod *L. campestre* statistički značajne razlike ustanovljene samo na nivou korena (koren: $\chi^2 = 6,4889$, df = 2, p = 0,0390; nadzemni deo: $\chi^2 = 5,4222$, df = 2, p = 0,0665).

Kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* koncentracije kobalta, kao u slučaju mangana i hroma, bile su više u korenima u odnosu na nadzemne delove (Grafik 28). Koncentracije Co u korenima *T. kovatsii* bile su od 64,3 mg kg⁻¹ (SP5) do 112 mg kg⁻¹ (SP4), a u korenima *L. campestre* od 43,6 mg kg⁻¹ (SP7) do 113 mg kg⁻¹ (SP6). U nadzemnim delovima je sadržaj Co bio od 11,7 mg kg⁻¹ (SP3) do 61,1 mg kg⁻¹ (SP4) kod *T. kovatsii*, i od 21,5 mg kg⁻¹ (SP7) do 71,6 mg kg⁻¹ (SP6) kod *L. campestre*. Statistički značajne razlike u sadržaju Co u svim analiziranim delovima biljke na istraživanim lokalitetima notirane su kod vrste *T. kovatsii* (koren: $\chi^2 = 12,900$, df = 4, p = 0,0118; nadzemni deo: $\chi^2 = 13,148$, df = 4, p = 0,0106), a kod *L. campestre* one su zabeležene samo na nivou korena (koren: $\chi^2 = 7,200$, df = 2, p = 0,0273; nadzemni deo: $\chi^2 = 5,600$, df = 2, p = 0,0608).



Grafik 29. Koncentracija Zn (mg kg^{-1}) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.

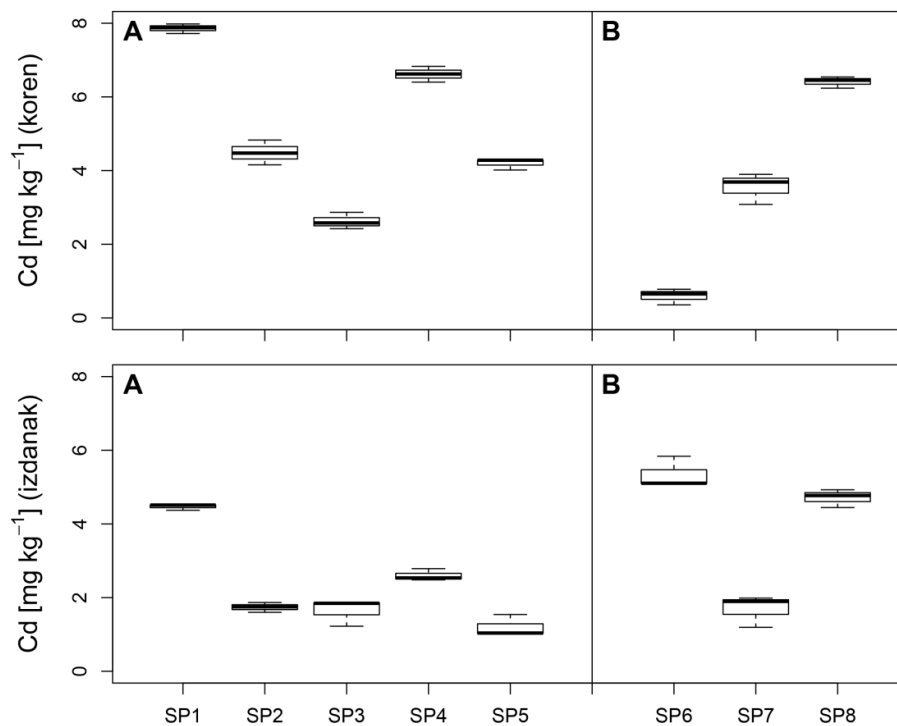


Grafik 30. Koncentracija Cu (mg kg^{-1}) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.

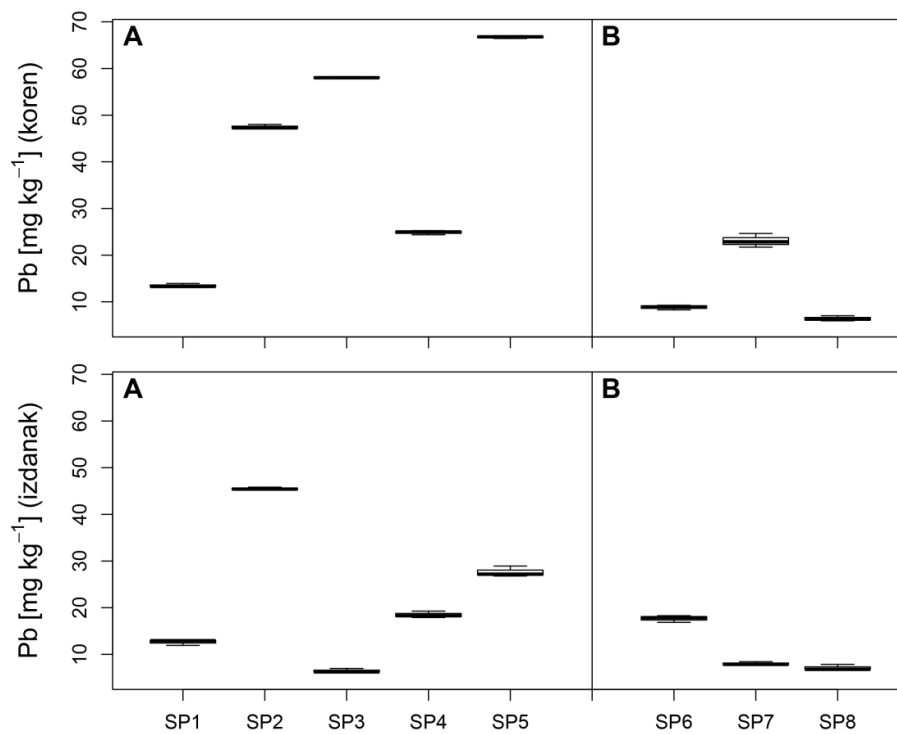
Osim nikla, više koncentracije u nadzemnim delovima u odnosu na korene kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* konstatovane su i za cink (Grafik 29). U korenima *T. kovatsii* koncentracije Zn su bile u opsegu od 316 mg kg⁻¹ (SP3) do 602 mg kg⁻¹ (SP2), dok su vrednosti u nadzemnim delovima bile od 729 mg kg⁻¹ (SP5) do 1120 mg kg⁻¹ (SP4). Kod *L. campestre* zabeležene su niže vrednosti u odnosu na *T. kovatsii*, posebno u nadzemnim delovima, koje su bile od 60,9 mg kg⁻¹ (SP6) do 217 mg kg⁻¹ (SP6) u korenima i od 33,0 mg kg⁻¹ (SP8) do 404 mg kg⁻¹ (SP8) u nadzemnim delovima. Na istraživanim lokalitetima kod ispitivanih vrsta ustanovljene su statistički značajne razlike u sadržaju Zn u korenu i nadzemnom delu (*T. kovatsii* – koren: $\chi^2 = 13,033$, df = 4, p = 0,0111; *T. kovatsii* – nadzemni deo: $\chi^2 = 13,500$, df = 4, p = 0,0091; *L. campestre* – koren | nadzemni deo: $\chi^2 = 7,200$, df = 2, p = 0,0273).

Koncentracije bakra kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* su bile više u korenima u odnosu na nadzemne delove (Grafik 30). U uzorku korena *T. kovatsii* sa lokaliteta SP5 koncentracija Cu je bila ispod granice detekcije instrumenta, dok je najniža vrednost izmerena u uzorku sa lokaliteta SP2 (3,15 mg kg⁻¹). Maksimalna koncentracija Cu u korenu zabeležena je u uzorku sa lokaliteta SP4 (10,6 mg kg⁻¹). U nadzemnim delovima vrste *T. kovatsii* koncentracije Cu su bile opsegu od 3,27 mg kg⁻¹ (SP5) do 7,78 mg kg⁻¹ (SP2), dok je koncentracija Cu u korenima vrste *L. campestre* bila od 0,88 mg kg⁻¹ (SP7) do 13,3 mg kg⁻¹ (SP6). Za ovu vrstu sa lokaliteta SP7 koncentracija Cu u nadzemnom delu bila je ispod granice detekcije instrumenta. Minimalna vrednost u izdanku izmerena je u uzorku sa lokaliteta SP6 (4,86 mg kg⁻¹), a maksimalna u uzorku sa lokaliteta SP8 (9,46 mg kg⁻¹). Rezultati Kruskal–Wallis *H* testa pokazali su da postoje statistički značajne razlike u sadržaju Cu u korenu kod *T. kovatsii* i *L. campestre* sa istraživanih lokaliteta (*T. kovatsii* – koren: $\chi^2 = 12,926$, df = 4, p = 0,0116; *T. kovatsii* – nadzemni deo: $\chi^2 = 13,080$, df = 4, p = 0,0109; *L. campestre* – koren: $\chi^2 = 7,200$, df = 2, p = 0,0273; *L. campestre* – nadzemni deo: $\chi^2 = 7,4483$, df = 2, p = 0,0241).

Rezultati sa grafikona 31 ukazuju da je koncentracija kadmijuma kod obe ispitivane vrste (*T. kovatsii* i *L. campestre*) u korenima bila viša nego u nadzemnim delovima. Kod vrste *T. kovatsii* koncentracija Cd u korenu je bila od 2,62 mg kg⁻¹ (SP3) do 7,86 mg kg⁻¹ (SP1). Najniža koncentracija Cd u nadzemnom delu konstatovana je za uzorak sa lokaliteta SP5 (1,20 mg kg⁻¹), a najviša za uzorak sa lokaliteta SP1 (4,47 mg kg⁻¹). Kod vrste *L. campestre*, koncentracija Cd je bila od 0,60 mg kg⁻¹ (SP6) do 6,41 mg kg⁻¹ (SP8) u korenima i od 1,69 mg kg⁻¹ (SP7) do 5,35 mg kg⁻¹ (SP6) u nadzemnim delovima (Grafik 31). Na istraživanim lokalitetima, ustanovljene razlike u sadržaju Cd bile su kod obe vrste statistički značajne (*T. kovatsii* – koren: $\chi^2 = 13,033$, df = 4, p = 0,0111; *T. kovatsii* – nadzemni deo: $\chi^2 = 12,400$, df = 4, p = 0,0146; *L. campestre* – koren | nadzemni deo: $\chi^2 = 7,200$, df = 2, p = 0,0273).



Grafik 31. Koncentracija Cd (mg kg⁻¹) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.



Grafik 32. Koncentracija Pb (mg kg⁻¹) u korenima i nadzemnim delovima vrsta *Thlaspi kovatsii* (A) i *Lepidium campestre* (B) sa istraživanih lokaliteta.

Koncentracije olova kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* bile su više u korenima u odnosu na nadzemne delove (Grafik 32). Sadržaj Pb u korenima *T. kovatsii* bio je od 13,5 mg kg⁻¹ (SP1) do 66,8 mg kg⁻¹ (SP5), dok su u nadzemnim delovima vrednosti bile u opsegu od 6,45 mg kg⁻¹ (SP3) do 45,5 mg kg⁻¹ (SP2). Kod *L. campestre* zabeležene su niže vrednosti u odnosu na *T. kovatsii*, kako u korenima, tako u nadzemnim delovima, koje su bile u opsegu od 6,41 mg kg⁻¹ (SP8) do 23,1 mg kg⁻¹ (SP7) – u korenima, kao i od 7,13 mg kg⁻¹ (SP8) do 17,7 mg kg⁻¹ (SP8) – u nadzemnim delovima. U svim biljnim delovima vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini evidentno je da za koncentraciju Pb, rezultati Kruskal–Wallis *H* testa potvrđuju postojanje statistički značajnih razlika (*T. kovatsii* – koren | nadzemni deo: $\chi^2 = 13,500$, df = 4, p = 0,0091; *L. campestre* – koren: $\chi^2 = 7,200$, df = 2, p = 0,0273; *L. campestre* – nadzemni deo: $\chi^2 = 6,2521$, df = 2, p = 0,0439).

4.3 Odnosi koncentracija ispitivanih elemenata u zemljištu i biljkama

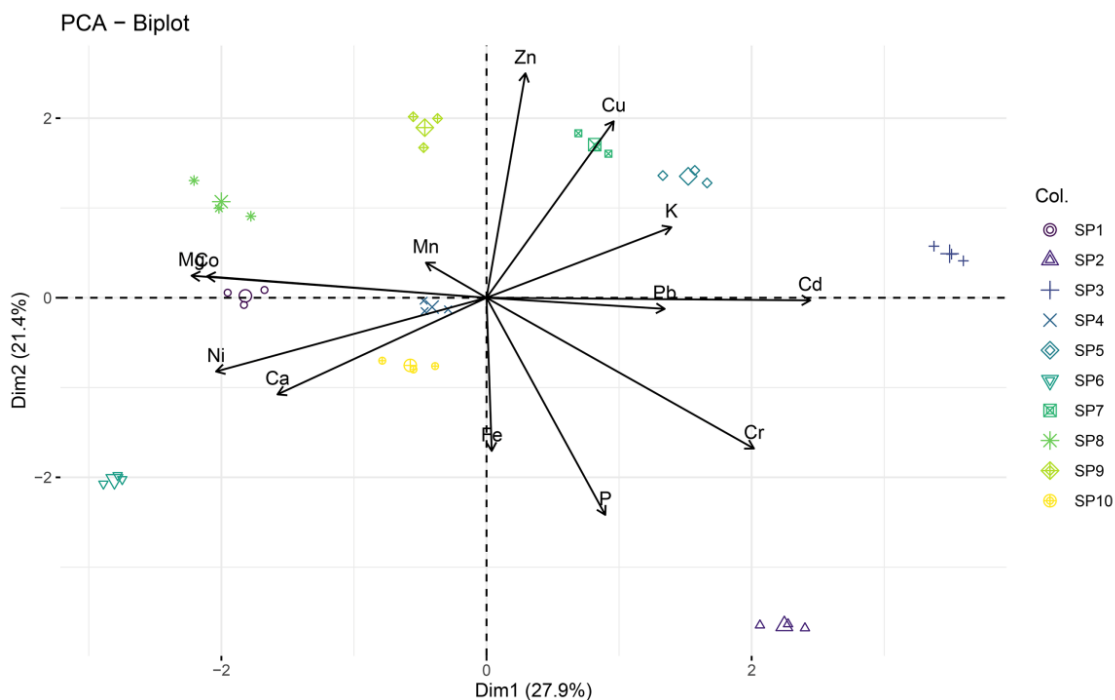
4.3.1 Odnosi između koncentracija elemenata u zemljištu

Pomoću analize glavnih komponenti (PCA) koja se bazirala na korelacionoj matrici njihovih ukupnih koncentracija dobijen je uvid u odnose između elemenata u zemljištu na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini. Rezultati analize glavnih komponenti (PCA) prikazani su u Tabeli 18 i na Grafiku 33.

Tabela 18. Koeficijenti korelacije za analizirane varijable i prvih pet glavnih komponenti, procenat komunaliteta varijabli, svojstvene vrednosti i procenat objašnjene varijanse za PC1 – PC5 (koeficijenti korelacije >0,70 su boldirani).

Varijable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	Procenat komunaliteta
P	0,3024	0,8161	-0,3019	0,0858	-0,0545	85,89
K	0,4706	-0,2652	0,7113	0,3516	-0,1662	94,90
Ca	-0,5321	0,3632	0,5461	0,2375	0,4387	96,22
Mg	-0,7510	-0,0830	0,2047	0,2452	0,0751	67,85
Fe	0,0133	0,5757	-0,0672	0,6868	0,3596	93,72
Ni	-0,6885	0,2771	0,4516	-0,3310	0,0853	87,16
Mn	-0,1543	-0,1319	-0,2184	-0,6252	0,7041	97,56
Cr	0,6809	0,5667	-0,1761	-0,2150	-0,0997	87,20
Co	-0,7118	-0,0805	-0,5712	0,0256	-0,1555	86,44
Zn	0,0991	-0,8437	-0,0090	0,1672	0,0801	75,61
Cu	0,3238	-0,6633	-0,2370	0,2189	0,2743	72,42
Cd	0,8242	0,0097	-0,0393	0,0906	0,5226	96,22
Pb	0,4536	0,0418	0,6664	-0,4670	-0,0509	87,22
Svojstvene vrednosti	3,63	2,78	2,05	1,57	1,25	
Procenat ukupne varijabilnosti	27,91	21,4	15,79	12,07	9,64	

Od početnog skupa podataka koji je činilo 13 varijabli (koncentracije P, K, Ca, Mg, Fe, Ni, Mn, Cr, Co, Zn, Cu, Cd i Pb u uzorcima zemljišta sa istraživanih lokaliteta), izdvojeno je pet glavnih komponenti koje su imale svojstvene vrednosti veće od 1,00 i kumulativno objašnjavale 86,8% ukupne varijanse analiziranog uzorka. Procenat komunaliteta promenljivih za izdvojene glavne komponente, koji je bio je u opsegu od 67,85% za Mg, do 97,56% za Mn, pokazao je da izdvojene glavne komponente obuhvataju najznačajniji deo varijanse ulaznih varijabli. Rezultati PCA su pokazali da je prva glavna komponenta (PC1), koja objašnjava 27,91% ukupne varijanse, značajno pozitivno korelisana sa Cd, a negativno sa Mg i Co. PC1 je, takođe, umereno pozitivno korelisana sa Cr i umereno negativno sa Ca i Ni. Druga glavna komponenta (PC2), koja objašnjava 21,40% ukupne varijanse, značajno je pozitivno korelisana sa P, a negativno sa Zn, kao i umereno negativno korelisana sa Cu. Treća (PC3), četvrta (PC4) i peta glavna komponenta (PC5), koje objašnjavaju 15,79%, 12,07% i 9,64% ukupne varijanse, određene su koncentracijama K i Pb (PC3), Fe (PC4) i Mn (PC5).



Grafik 33. Međusobni odnosi elemenata u zemljištu na istraživanim lokalitetima.

Asocijacije između koncentracija dostupnih metala u tragovima, njihovog ukupnog sadržaja u zemljištu, pH vrednosti u zemljištu, procentualnog sadržaja organske materije, kao i srednjih godišnjih temperatura i godišnjih suma padavina na istraživanim serpentinitским lokalitetima u Bosni i Hercegovini analizirane su na osnovu izračunatih koeficijenata Spirmanove korelacije rangova (ρ) koji su prikazani u Tabeli 19.

Na osnovu dobijenih vrednosti Spirmanovog koeficijenta korelacije rangova, u analiziranim uzorcima zemljišta konstatovane su najjače pozitivne asocijacije između ukupnog i dostupnog sadržaja Zn ($\rho = 0,80$; $p = 0,0000$) i Pb ($\rho = 0,75$; $p = 0,0000$). Umerene pozitivne korelacije zabeležene su i u slučaju ukupnog i dostupnog sadržaja Ni ($\rho = 0,52$; $p = 0,0029$) i Mn ($\rho = 0,50$; $p = 0,0046$). Za koncentraciju dostupnog Zn, takođe, je uočena i značajna pozitivna povezanost sa godišnjom sumom padavina ($\rho = 0,61$; $p = 0,0003$). Najjača negativna veza, kada su u pitanju antagonistički odnosi, konstatovana je između koncentracije dostupnog Zn i sadržaja organske materije u zemljištu ($\rho = -0,82$; $p = 0,0000$). Umereni antagonizam zabeležen je između udela frakcije gline i koncentracija dostupnog Mn ($\rho = -0,58$; $p = 0,0007$) i Cd ($\rho = -0,58$; $p = 0,0008$) u analiziranim uzorcima zemljišta, kao i između srednje godišnje temperature i sadržaja dostupnog Zn ($\rho = -0,56$; $p = 0,0012$).

Tabela 19. Koeficijenti korelacije (ρ) između faktora koji utiču na količinu razmenljivih metala u zemljištu i njihove dostupne koncentracije u ispitivanim uzorcima tla sa serpentinitских lokaliteta u Bosni i Hercegovini. Statistički značajni koeficijenti korelacije su boldirani ($p < 0,05$; * $p < 0,01$; ** $p < 0,001$).

	Ukupna koncentracija elementa	pH	Procenat organske materije	Procenat gline	Srednja godišnja temperatura	Godišnja suma padavina
Ni	0,52*	0,09	-0,33	-0,38	0,10	0,26
Mn	0,50*	0,01	0,08	-0,58**	0,06	0,21
Cr	0,26	-0,10	0,17	0,15	-0,02	-0,45
Co	0,14	-0,05	-0,02	0,01	0,38	-0,02
Zn	0,80**	0,03	-0,82**	0,18	-0,56*	0,61**
Cu	0,02	-0,19	-0,27	-0,47*	0,23	-0,07
Cd	0,26	0,05	-0,15	-0,58**	0,30	-0,26
Pb	0,75**	-0,41	-0,08	0,25	0,30	0,02

4.3.2. Odnosi između koncentracija elemenata u zemljištu i biljkama

Međusobni odnosi koncentracija dostupnih elemenata u zemljištu i koncentracija u biljnim organima istraživanih vrsta sa serpentinitских lokaliteta u Bosni i Hercegovini analizirani su na osnovu izračunatih koeficijenata Spirmanove korelacije rangova (ρ) koji su prikazani u Tabeli 20.

Za vrstu *A. murale* konstatovana je umereno jaka pozitivna korelacija između koncentracije Ca u zemljištu i koncentracija u stablu ($\rho = 0,59$; $p = 0,0006$) i listovima ($\rho = 0,56$; $p = 0,0013$), kao i između Mn u zemljištu i korenu ($\rho = 0,51$; $p = 0,0043$) i između Ni u zemljištu i listovima ($\rho = 0,47$; $p = 0,0093$). Između koncentracije dostupnog Cd u zemljištu i sadržaja ovog elementa u stablu konstatovana je jaka negativna korelacija ($\rho = -0,76$; $p = 0,0000$). Umereno negativna povezanost zabeležena je u slučaju odnosa koncentracija Co i Cr. Naime, za Co je konstatovan umeren antagonizam između koncentracije dostupnog Co u zemljištu i koncentracije ovog elementa u listovima ($\rho = -0,68$; $p = 0,0000$), a za Cr između dostupne koncentracije u zemljištu i koncentracija u korenu ($\rho = -0,52$; $p = 0,0036$) i listovima ($\rho = -0,47$; $p = 0,0083$).

Najizraženija pozitivna veza kod vrste *T. kovatsii* konstatovana je između koncentracije P u zemljištu i koncentracije ovog elementa u nadzemnim delovima biljke ($\rho = 0,79$; $p = 0,0005$), a najjača negativna između sadržaja dostupnog Ni u zemljištu i njegove koncentracije u nadzemnim delovima ($\rho = -0,75$; $p = 0,0014$). Za vrstu *T. kovatsii* zabeležene su i umereno jake pozitivne korelacije između dostupnih koncentracija u zemljištu i koncentracija u nadzemnim delovima za Ca ($\rho = 0,68$; $p = 0,0051$), Co ($\rho = 0,66$; $p = 0,0077$) i Cu ($\rho = 0,69$; $p = 0,0044$), a umereno jaka negativna za Pb ($\rho = -0,65$; $p = 0,0083$).

Jake negativne korelacije između koncentracija dostupnih elemenata u zemljištu i koncentracija u ispitivanim biljnim organima kod *L. campestre* ($\rho < -0,90$; $p < 0,001$) zabeležene su za Ca (koreni) i Zn (nadzemni delovi), a prilično jake negativne ($-0,90 \leq \rho < -0,80$; $p < 0,01$) za Mn (koreni) i Cu (nadzemni delovi). Prilično jake pozitivne korelacije ($0,90 \geq \rho > 0,80$; $p < 0,01$) konstatovane su između sadržaja dostupnih P i Pb u zemljištu i koncentracija ovih elemenata u korenovima vrste *L. campestre*.

Tabela 20. Koeficijenti korelacije (ρ) između koncentracija dostupnih elemenata u zemljištu i ispitivanim biljnim organima vrsta *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre*. Statistički značajni koeficijenti korelacije su boldirani ($p < 0,05$; * $p < 0,01$; ** $p < 0,001$).

	<i>A. murale</i>			<i>T. kovatsii</i>		<i>L. campestre</i>	
	Koren	Stablo	List	Koren	Nadzemni deo	Koren	Nadzemni deo
P	-0,03	-0,29	-0,45	-0,09	0,79**	0,87*	0,23
K	0,04	0,26	0,26	0,26	0,26	-0,02	-0,39
Ca	0,21	0,59**	0,56*	-0,19	0,68*	-0,92**	0,40
Mg	-0,41	-0,29	-0,04	0,29	0,19	0,08	-0,10
Fe	0,11	-0,18	-0,03	-0,13	0,21	-0,43	0,45
Ni	-0,09	0,35	0,47*	0,10	-0,75*	0,29	-0,17
Mn	0,51*	0,08	0,21	0,63	0,10	-0,82*	-0,72
Cr	-0,52*	-0,29	-0,47*	-0,38	-0,39	0,55	-0,77
Co	0,28	-0,38	-0,68**	0,08	0,66*	-0,30	-0,78
Zn	0,20	-0,22	-0,18	-0,52	-0,20	-0,40	-0,93**
Cu	0,15	-0,09	-0,27	0,25	0,69*	-0,76	-0,82*
Cd	0,22	-0,76**	-0,30	0,35	0,27	-0,04	-0,78
Pb	0,37	0,05	0,30	0,12	-0,65*	0,84*	-0,19

4.3.3 Odnosi između koncentracija elemenata u biljkama

Međusobne veze između koncentracija elemenata u istraživanim biljnim vrstama sa serpentinitičkih lokaliteta u Bosni i Hercegovini analizirane su na osnovu izračunatih koeficijenata Spirmanove korelacije rangova (ρ).

Rezultati korelacione analize sadržaja elemenata u korenu i stablu vrste *A. murale* prikazani su u Tabeli 21, a u listu u Tabeli 21. Značajne pozitivne korelacije u korenima ove vrste, navedene prema opadajućem redosledu jčine povezanosti između elemenata, zabeležene su za Ni-Cr, Cr-Pb, K-Cr, Ni-Co, Co-Pb, P-Cu, K-Ni i Ni-Pb ($0,80 \geq \rho \geq 0,61$; $p < 0,001$), dok je za Fe-Cu notirana značajna negativna korelacija ($\rho = -0,78$; $p = 0,0000$). Za Ca-Co u stablima *A. murale* konstatovana je najjača značajna pozitivna korelacija ($\rho = 0,87$; $p = 0,0000$) u odnosu na sve ostale parove elemenata u svim ispitivanim biljnim organima ove vrste. Pored toga, značajne pozitivne korelacije u stablu zabeležene su i za K-Cu, K-Cr, Ca-Zn, P-Ni, Co-Zn i Cr-Cu ($0,77 \geq \rho \geq 0,62$; $p < 0,001$), a značajne negativne za Ca-Pb, Co-Pb i P-Mg ($-0,75 \leq \rho \leq -0,58$; $p < 0,001$).

Analize međusobnih odnosa sadržaja elemenata u listovima *A. murale*, pokazuju da su značajne pozitivne korelacije zabeležene za Mg-Co, Cr-Cu, P-Pb, Mn-Cr i K-Cr ($0,83 \geq \rho \geq 0,64$; $p < 0,001$), a značajne negativne za K-Zn i P-Fe ($-0,65 \leq \rho \leq -0,59$; $p < 0,001$).

Rezultati korelacione analize sadržaja elemenata u korenu i nadzemnom delu vrste *Thlaspi kovatsii* prikazani su u Tabeli 23. Najjače značajne negativne korelacije u odnosu na sve ostale parove elemenata u svim ispitivanim delovima ove vrste zabeležene su za Ca-Co u korenu ($\rho = -0,96$; $p = 0,0000$) i Ca-Mg u nadzemnom delu ($\rho = -0,96$; $p = 0,0000$). Značajne negativne korelacije konstatovane su još i za parove Ca-Zn, Cu-Pb, Cd-Pb i P-Pb ($-0,82 \leq \rho \leq -0,76$; $p < 0,001$) u korenu i Ni-Mn, P-Cr i Ca-Pb ($-0,78 \leq \rho \leq -0,76$; $p < 0,001$) u nadzemnom delu *T. kovatsii*. Pored toga, prilično jake značajne pozitivne korelacije notirane su i za parove P-Cd, K-Mn i Co-Zn ($0,83 \geq \rho \geq 0,76$; $p < 0,001$) u korenu i Fe-Cr, Zn-Cd, Mg-Pb i P-Cu ($0,80 \geq \rho \geq 0,76$; $p < 0,001$) u nadzemnom delu ove vrste. Kao i u slučaju *A. murale*, i za *T. kovatsii* su parovi elemenata navođeni prema opadajućem redosledu jačine njihove međusobne povezanosti.

Rezultati korelacione analize sadržaja elemenata u korenu i nadzemnom delu vrste *L. campestre* prikazani su u Tabeli 24. Kod navedene vrste, vrlo jake značajne pozitivne korelacije u korenu ($r > 0,90$; $p < 0,001$) zabeležene su za Co-Cu, Ca-Mn, Mg-Pb, Cr-Pb, Mg-Cr i Mn-Cd ($0,93 \geq \rho \geq 0,90$; $p < 0,001$), a vrlo jake značajne negativne korelacije za P-Ca, Fe-Pb, P-Mn i P-Cd ($-0,98 \leq \rho \leq -0,90$; $p < 0,001$). U nadzemnom delu *L. campestre*, vrlo jake značajne pozitivne korelacije zabeležene su za Fe-Cd, Co-Pb, K-Cd, K-Fe, Ni-Co, Ca-Mg i Ni-Cr ($0,98 \geq \rho \geq 0,90$; $p < 0,001$), a vrlo jaka značajna negativna korelacija za Mg-Cu ($\rho = -0,95$; $p = 0,0000$). Za *L. campestre*, parovi elemenata su, takođe, navedeni prema opadajućem redosledu jačine njihove međusobne povezanosti.

Tabela 21. Koeficijenti korelacije (ρ) između koncentracija ispitivanih elemenata u korenu i stablu vrste *Alyssum murale*; gornji desni deo tabele se odnosi na koren, a donji levi na stabla; statistički značajni koeficijenti korelacije su boldirani ($p < 0,05$; $*p < 0,01$; $**p < 0,001$).

	P	K	Ca	Mg	Fe	Ni	Mn	Cr	Co	Zn	Cu	Cd	Pb
P		-0,02	-0,39	-0,12	-0,28	-0,08	0,37	0,04	-0,05	-0,21	0,61**	-0,28	0,31
K	0,23		0,46	-0,39	-0,51*	0,61**	0,12	0,69**	0,36	-0,15	0,38	0,10	0,26
Ca	0,03	-0,25		-0,30	-0,13	0,24	0,32	0,37	0,04	0,47*	-0,20	0,27	-0,02
Mg	-0,58**	-0,20	-0,17		0,14	-0,30	-0,45	-0,55*	-0,04	0,17	-0,14	-0,22	-0,36
Fe	-0,12	-0,02	-0,35	0,38		-0,23	0,23	-0,4*7	-0,50*	-0,18	-0,78**	-0,24	-0,47*
Ni	0,64**	0,26	-0,40	-0,11	0,09		-0,09	0,80**	0,67**	-0,01	0,09	-0,14	0,61**
Mn	-0,22	-0,14	0,30	-0,27	-0,38	-0,37		-0,01	-0,40	-0,08	-0,05	-0,19	-0,14
Cr	0,24	0,7**	-0,06	-0,12	-0,32	0,12	-0,12		0,54*	-0,04	0,34	0,01	0,76**
Co	0,04	-0,36	0,87**	-0,03	-0,48*	-0,28	0,31	-0,09		0,39	0,31	0,16	0,67**
Zn	-0,03	-0,20	0,66**	0,18	-0,14	-0,30	0,05	0,30	0,63**		-0,19	0,23	0,17
Cu	0,44	0,77**	0,00	-0,29	-0,30	0,41	0,05	0,62**	-0,05	-0,01		0,01	0,43
Cd	-0,31	0,24	0,03	0,04	-0,32	-0,46	0,35	0,34	-0,05	0,01	0,05		-0,09
Pb	0,28	0,49*	-0,75**	-0,04	0,09	0,46*	-0,51*	0,46	-0,60**	-0,39	0,27	-0,10	

Tabela 22. Koeficijenti korelacije (ρ) između koncentracija ispitivanih elemenata u listovima vrste *Alyssum murale*; statistički značajni koeficijenti korelacije su boldirani ($p < 0,05$; $*p < 0,01$; $**p < 0,001$).

	P	K	Ca	Mg	Fe	Ni	Mn	Cr	Co	Zn	Cu	Cd
K	0,39											
Ca	-0,19	-0,32										
Mg	-0,15	0,50*	-0,12									
Fe	-0,59**	-0,30	-0,31	0,30								
Ni	0,32	0,41	-0,15	0,23	-0,32							
Mn	-0,03	0,32	0,15	-0,16	-0,37	0,04						
Cr	0,20	0,64**	-0,02	0,39	-0,17	0,02	0,64**					
Co	0,13	0,39	0,12	0,83**	0,10	0,13	-0,22	0,35				
Zn	-0,32	-0,65**	0,31	0,03	0,30	-0,17	-0,15	-0,09	0,08			
Cu	0,38	0,40	-0,23	0,33	0,05	0,05	0,26	0,73**	0,32	0,08		
Cd	-0,26	0,10	0,27	0,41	0,07	0,01	-0,23	0,02	0,26	0,14	0,02	
Pb	0,72**	0,53*	-0,27	0,16	-0,47*	0,13	0,08	0,39	0,44	-0,36	0,38	-0,33

Tabela 23. Koeficijenti korelacije (ρ) između koncentracija ispitivanih elemenata u korenu i nadzemnim delovima vrste *Thlaspi kovatsii*; gornji desni deo tabele se odnosi na koren, a donji levi na nadzemne delove; statistički značajni koeficijenti korelacije su boldirani ($p < 0,05$; $*p < 0,01$; $**p < 0,001$).

	P	K	Ca	Mg	Fe	Ni	Mn	Cr	Co	Zn	Cu	Cd	Pb
P		0,11	-0,42	0,74*	0,15	-0,04	0,20	-0,70*	0,46	0,62	0,34	0,83**	-0,76**
K	0,02		0,58	0,00	-0,28	0,73*	0,79**	-0,01	-0,47	-0,55	0,09	0,01	-0,11
Ca	0,17	0,50		-0,20	0,11	0,67*	0,63	0,58	-0,96**	-0,82**	-0,61	-0,52	0,66*
Mg	-0,19	-0,48	-0,96**		0,09	0,03	-0,04	-0,66*	0,14	0,64*	-0,20	0,45	-0,27
Fe	-0,58	-0,14	-0,46	0,51		-0,11	0,26	0,47	-0,06	0,01	-0,16	0,35	0,08
Ni	0,04	-0,17	0,20	-0,18	-0,63		0,71*	0,16	-0,56	-0,54	-0,21	-0,15	0,12
Mn	-0,44	0,21	0,10	-0,11	0,67*	-0,78**		0,28	-0,51	-0,59	0,05	0,22	-0,10
Cr	-0,77**	-0,25	-0,38	0,34	0,80**	-0,34	0,60		-0,53	-0,71*	-0,25	-0,42	0,63
Co	-0,01	-0,62	-0,31	0,31	0,58	-0,51	0,49	0,41		0,76**	0,66*	0,56	-0,75*
Zn	0,05	0,30	0,39	-0,38	0,05	-0,60	0,48	-0,30	0,39		0,19	0,49	-0,50
Cu	0,76**	0,42	0,01	-0,02	-0,22	-0,36	-0,13	-0,62	-0,13	0,60		0,61	-0,80**
Cd	0,23	0,58	0,40	-0,40	0,17	-0,69*	0,64*	-0,02	0,14	0,79**	0,49		-0,80**
Pb	0,36	-0,56	-0,76**	0,78**	0,08	-0,05	-0,39	-0,15	0,34	-0,09	0,31	0,00	

Tabela 24. Koeficijenti korelacije (ρ) između koncentracija ispitivanih elemenata u korenu i nadzemnim delovima vrste *Lepidium campestre*; gornji desni deo tabele se odnosi na koren, a donji levi na nadzemne delove; statistički značajni koeficijenti korelacije su boldirani ($p < 0,05$; $*p < 0,01$; $**p < 0,001$).

	P	K	Ca	Mg	Fe	Ni	Mn	Cr	Co	Zn	Cu	Cd	Pb
P		-0,68	-0,98**	0,50	-0,38	0,49	-0,90**	0,38	0,47	0,45	0,43	-0,90**	0,42
K	0,83*		0,71	0,13	0,10	-0,52	0,80*	0,10	-0,74	-0,68	-0,72	0,63	0,03
Ca	-0,65	-0,40		-0,48	0,42	-0,47	0,92**	-0,37	-0,50	-0,47	-0,42	0,87*	-0,40
Mg	-0,48	-0,43	0,90**		-0,83*	-0,28	-0,40	0,90**	-0,48	-0,40	-0,52	-0,45	0,92**
Fe	0,67	0,91**	-0,38	-0,47		0,35	0,52	-0,87*	0,42	0,43	0,43	0,42	-0,93**
Ni	0,30	0,58	0,17	0,03	0,65		-0,49	-0,28	0,85*	0,88*	0,85*	-0,50	-0,27
Mn	0,20	0,15	-0,65	-0,80*	0,17	-0,11		-0,38	-0,48	-0,45	-0,47	0,90**	-0,48
Cr	0,32	0,66	0,18	0,02	0,73	0,90**	-0,02		-0,47	-0,45	-0,50	-0,30	0,92**
Co	0,33	0,64	0,23	0,17	0,60	0,91**	-0,27	0,80*		0,88*	0,93**	-0,38	-0,50
Zn	0,28	0,46	0,47	0,53	0,45	0,71	-0,58	0,75	0,75		0,82*	-0,40	-0,42
Cu	0,51	0,45	-0,88*	-0,95**	0,47	-0,03	0,85*	-0,02	-0,12	-0,49		-0,47	-0,47
Cd	0,70	0,93**	-0,40	-0,45	0,98**	0,61	0,10	0,65	0,62	0,43	0,47		-0,48
Pb	0,38	0,56	0,31	0,32	0,44	0,85*	-0,42	0,71	0,94**	0,82*	-0,29	0,47	

4.4 Procena akumulacionih potencijala istraživanih biljnih vrsta

U Tabeli 25 dat je prikaz vrednosti biokoncentracionih faktora za koren (BCF_k) i nadzemni deo, odnosno za stablo i list zbirno (BCF_{s+l}) koji su izračunati u odnosu na koncentracije dostupnih metala u zemljištu, kao i vrednosti translokacionih faktora (TF) kod vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini.

Tabela 25. BCF i TF kod vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta.

	Ca	Mg	Fe	Ni	Mn	Cr	Co	Zn	Cu	Cd	Pb
BCF_k (koren/zemljište)											
SP1	7,84	0,90	0,41	5,00	0,06	59,27	3,29	0,97	3,38	3,58	-
SP2	23,88	8,05	1,13	16,02	0,04	0,00	1,94	4,81	0,00	0,85	-
SP3	6,15	6,17	4,64	13,87	0,06	-	0,58	0,22	-	-	0,54
SP4	23,10	2,72	3,38	5,33	0,03	0,00	0,18	4,76	-	-	0,00
SP5	44,89	2,68	0,64	14,56	0,04	12,59	0,37	0,21	-	-	-
SP6	2,12	0,27	0,56	7,72	0,21	7,98	0,24	1,13	-	-	-
SP7	9,21	0,57	0,32	19,31	0,03	3,22	2,09	0,41	2,68	6,04	9,16
SP8	39,42	1,50	1,47	11,08	0,05	6,19	0,77	0,20	-	-	-
SP9	11,29	0,44	1,39	22,86	0,03	-	1,05	0,48	-	7,88	5,79
SP10	4,69	0,50	1,08	28,90	0,05	-	0,64	4,15	0,11	1,05	0,38
BCF_{s+l} (nadzemni deo/zemljište)											
SP1	97,19	5,08	0,46	64,47	0,20	143,2	23,19	0,65	6,93	10,06	-
SP2	320,56	20,67	3,35	90,53	0,14	0,00	6,33	12,28	0,00	2,86	-
SP3	114,39	32,56	5,52	58,58	0,25	-	6,90	0,52	-	-	2,73
SP4	243,44	9,00	8,04	19,72	0,32	0,00	0,81	2,80	-	-	0,00
SP5	153,35	9,53	2,49	54,08	0,21	14,8	0,50	0,84	-	-	-
SP6	36,00	2,14	1,08	67,16	0,49	18,71	1,98	3,25	-	-	-
SP7	78,59	2,56	1,65	72,81	0,29	1,70	1,29	0,14	3,08	9,67	49,41
SP8	181,49	5,35	6,64	70,22	0,35	4,11	1,73	0,06	-	-	-
SP9	87,19	2,13	4,22	79,63	0,13	-	1,03	0,12	-	8,75	7,60
SP10	28,68	2,23	2,13	88,21	0,20	-	0,67	1,64	1,65	3,01	0,41

	Ca	Mg	Fe	Ni	Mn	Cr	Co	Zn	Cu	Cd	Pb
TF (nadzemni deo/koren)											
SP1	12,40	5,63	1,12	12,88	3,03	2,42	7,05	0,67	2,05	2,81	3,43
SP2	13,42	2,57	2,95	5,65	3,43	-	3,26	2,55	-	3,38	2,17
SP3	18,59	5,28	1,19	4,22	4,06	12,84	11,86	2,40	14,81	7,11	5,05
SP4	10,54	3,30	2,38	3,70	11,39	-	4,48	0,59	-	2,75	-
SP5	3,42	3,55	3,88	3,71	5,52	1,18	1,36	3,93	4,92	3,72	10,66
SP6	16,95	7,87	1,94	8,70	2,33	2,34	8,11	2,88	4,37	5,81	3,73
SP7	8,53	4,53	5,24	3,77	9,22	0,53	0,62	0,35	1,15	1,60	5,39
SP8	4,60	3,56	4,52	6,33	7,51	0,66	2,26	0,28	3,07	6,45	2,61
SP9	7,72	4,90	3,03	3,48	4,81	0,12	0,98	0,25	8,18	1,11	1,31
SP10	6,12	4,43	1,97	3,05	3,91	0,18	1,04	0,40	15,41	2,86	1,07

U Tabeli 26 dat je prikaz vrednosti biokoncentracionih faktora za koren (BCF_k) i nadzemni deo (BCF_{s+1}) koji su izračunati u odnosu na koncentracije dostupnih metala u zemljištu, kao i vrednosti translokacionih faktora (TF) kod vrste *T. kovatsii* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini.

Kao i u slučaju vrste *A. murale*, i kod *T. kovatsii* je na svim istraživanim lokalitetima konstatovano izuzetno efikasno usvajanje, kao i transport nikla kroz biljku, to jest, vrednosti BCF_k , BCF_{s+1} i TF bile su $>1,00$. Kod *T. kovatsii* BCF_k za Ni je bio u opsegu od 3,27 (SP4) do 8,05 (SP3), BCF_{s+1} od 20,91 (SP1) do 99,75 (SP3), dok su vrednosti translokacionog faktora (TF) bile u opsegu od 3,96 (SP1) do 12,38 (SP3). Za *T. kovatsii*, takođe, je konstatovano i izuzetno efikasno usvajanje i translokacija Zn kroz biljku, BCF_k je bio od 19,03 (SP1) do 349,42 (SP2), BCF_{s+1} od 37,48 (SP1) do 577,53 (SP2), a TF od 1,65 (SP2) do 2,57 (SP3).

U slučaju Mn kod *T. kovatsii*, jedino je na lokalitetu SP4 zabeležen TF $>1,00$, dok su na svim ostalim lokalitetima vrednosti BCF_k , BCF_{s+1} i TF bile <1 . Za Co, BCF_k je bio $>1,00$, osim na lokalitetu SP5, $BCF_{s+1} >1,00$ na lokalitetima SP1 i SP2, a TF $<1,00$ na svim istraživanim lokalitetima. Za Cr, BCF_k i BCF_{s+1} su bili $>1,00$ na SP1 i SP5, a TF svuda $<1,00$. Kao što je već napomenuto za *A. murale*, ni kod *T. kovatsii* nije bilo moguće izračunati BCF_k i BCF_{s+1} za Cu, Cd i Pb na većini istraživanih lokaliteta, s obzirom da je dostupna koncentracija u zemljištu bila ispod granica detekcije instrumenta. Međutim, za razliku od *A. murale*, ovde su vrednosti translokacionih faktora bile manje od 1,00 na svim istraživanim lokalitetima.

Tabela 26. Biokoncentracioni i translokacioni faktori kod vrste *T. kovatsii* sa istraživanih lokaliteta.

	Ca	Mg	Fe	Ni	Mn	Cr	Co	Zn	Cu	Cd	Pb
BCF_k (koren/zemljište)											
SP1	3,21	2,88	1,59	5,27	0,16	86,49	9,46	19,03	10,76	15,10	-
SP2	14,41	10,88	1,51	7,21	0,07	0,00	4,33	349,42	6,10	3,04	-
SP3	6,60	13,23	1,73	8,05	0,10	-	3,50	26,29	-	-	4,57
SP4	7,20	6,25	9,91	3,27	0,10	3,29	1,53	317,64	-	-	36,60
SP5	23,27	6,80	2,56	6,19	0,13	18,86	0,98	27,56	-	-	-
BCF_{s+1} (nadzemni deo/zemljište)											
SP1	6,00	3,11	1,11	20,91	0,13	44,16	2,51	37,48	5,69	8,57	-
SP2	28,00	12,69	0,50	58,45	0,04	0,26	1,02	577,53	15,08	1,18	-
SP3	15,85	16,27	0,64	99,75	0,05	-	0,57	67,58	-	-	0,51
SP4	22,51	7,59	3,80	28,52	0,13	0,75	0,84	658,77	-	-	27,2
SP5	28,08	11,11	1,24	38,80	0,07	6,55	0,65	63,31	-	-	-
TF (nadzemni deo/koren)											
SP1	1,87	1,08	0,69	3,96	0,78	0,51	0,27	1,97	0,53	0,57	0,94
SP2	1,94	1,17	0,33	8,11	0,59	-	0,24	1,65	2,47	0,39	0,96
SP3	2,40	1,23	0,37	12,38	0,50	0,20	0,16	2,57	0,77	0,63	0,11
SP4	3,13	1,21	0,38	8,71	1,28	0,23	0,55	2,07	0,50	0,39	0,74
SP5	1,21	1,63	0,49	6,27	0,59	0,35	0,66	2,30	-	0,29	0,41

Kod vrste *L. campestre* zabeležen je sličan obrazac akumulacije i translokacije analiziranih elemenata kao i kod *T. kovatsii*: efikasna apsorpcija i translokacija Ni i Zn, slabo usvajanje i transport Mn, efikasno usvajanje i slab transport Cr, kao i slab transport Co, Cu, Cd i Pb. Vrednosti biokoncentracionih faktora za koren (**BCF_k**) i nadzemni deo (**BCF_{s+1}**) koji su izračunati u odnosu na koncentracije dostupnih metala u zemljištu, kao i translokacionih faktora (TF) kod vrste *L. campestre* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini prikazani su u Tabeli 27.

Tabela 27. Biokoncentracioni i translokacioni faktori kod vrste *L. campestre* sa istraživanih lokaliteta.

	Ca	Mg	Fe	Ni	Mn	Cr	Co	Zn	Cu	Cd	Pb
BCF_k (koren/zemljište)											
SP6	1,33	1,36	1,09	14,94	0,13	21,13	2,27	141,84	-	-	-
SP7	12,80	2,38	1,66	5,91	0,18	6,71	0,79	4,45	0,60	8,17	16,23
SP8	68,03	0,98	5,12	4,53	1,78	8,45	0,97	2,08	-	-	-
BCF_{s+1} (nadzemni deo/zemljište)											
SP6	2,61	1,57	0,90	30,60	0,07	7,93	1,44	264,31	-	-	-
SP7	18,57	2,82	0,96	25,92	0,06	1,30	0,39	10,57	0,00	3,89	5,64
SP8	31,94	1,33	2,27	16,68	0,39	2,34	0,33	0,91	-	-	-
TF (nadzemni deo/koren)											
SP6	1,97	1,16	0,82	2,05	0,55	0,38	0,64	1,86	0,37	8,98	2,00
SP7	1,45	1,19	0,57	4,39	0,34	0,19	0,49	2,37	0,00	0,48	0,35
SP8	0,47	1,36	0,44	3,69	0,22	0,28	0,34	0,44	7,08	0,74	1,11

5. DISKUSIJA

5.1 Fizičke i hemijske karakteristike zemljišta i njihovi međusobni odnosi

Na osnovu rezultata analiza fizičkih i hemijskih karakteristika koji su dobijeni u ovom radu, može se zaključiti da zemljišta sa istraživanih serpentinitičkih lokaliteta u Bosni i Hercegovini imaju tipične osobine tla na ultramafitskoj geološkoj podlozi širom sveta (Alexander & DuShay, 2011; Vithanage, Rajapaksha, Oze, Rajakaruna, & Dissanayake, 2014; Teptina, Paukov, & Rajakaruna, 2018). Istraživanja drugih istraživača su pokazala da serpentinitička zemljišta na ultramafitima karakteriše nizak odnos Ca/Mg, visok sadržaj metala u tragovima i toksičnih metala, poput Ni, Cr, Co i Mn, kao i niske koncentracije važnih nutritivnih elemenata, poput N, P i K, zbog čega su ona nepovoljna za rast i produkciju biljaka (Brooks, 1987; Kazakou et al., 2008; Pędziwiatr et al., 2018), ali i da na sastav zemljišta, koje nastaje raspadanjem ultramafitskih stena, najviše utiče njihova geochemija i mineralogija, kao i klimatski faktori, poput temperature i padavina, koji značajno utiču na pedogenetske procese (Lee, Graham, Laurent, Amrhein, & Creasy, 2001; Kierczak, Neel, Bril, & Puziewicz, 2007). Rezultati iz ove disertacije ukazuju da su, u odnosu na svoje fizičke i hemijske karakteristike, analizirana zemljišta iz Bosne i Hercegovine najbližija onima na ultramafitima u umerenim oblastima, i to pre svega u neposrednom okruženju, to jest, u Srbiji i na Kosovu (Tumi, Mihailović, Gajić, Niketić, & Tomović, 2012; Tomović et al., 2013; Salihaj, Bani, Shahu, Benizri, & Echevarria, 2018).

Kada se posmatraju fizičke osobine, Brady, Kruckeberg, & Bradshaw (2005), su pokazali da zemljišta sa ultramafitima odlikuje nizak sadržaj najsitnijih čestica, odnosno praha i gline, čiji je prečnik manji od 0,075 mm. Rezultati ispitivanih uzoraka zemljišta, koji su prikazani u ovoj disertaciji, su u saglasnosti sa istraživanjima navedenih autora, jer je sadržaj frakcije najsitnijih čestica bio manji od 50% u svim analiziranim uzorcima (Brady et al., 2005). Zbog svega navedenog, a u skladu sa USCS klasifikacijom, ispitivani uzorci zemljišta se svrstavaju u krupno-zrnasti tip tla (ASTM, 2011), odnosno peskovite ilovače prema USDA klasifikaciji (Rowell, 1997; USDA, 2006). Posledica svih navedenih fizičkih karakteristika, je da su zemljišta na ultramafitima obično suva i siromašna nutrijentima (Brady et al., 2005; Ghaderian, Mohtadi, Rahiminejad, & Baker, 2007a).

Kiselost zemljišta, to jest pH vrednost predstavlja jedan od osnovnih faktora koji utiče na prirodu mnogih hemijskih procesa, aktivnost mikroorganizama u zemljištu i ima najveći uticaj na rastvorljivost i pokretljivost jona, a takođe određuje i dostupnu količinu mineralnih elemenata koju biljke mogu da apsorbuju (Kabata-Pendias, 2011; Rakić et al., 2013; Kierczak, Pędziwiatr, Waroszewski, & Modelska, 2016). Izmerene vrednosti aktivne kiselosti (tj. pH izmeren u vodi) u analiziranim uzorcima su bile od 6,57 do 8,60 i u saglasnosti su sa širokim opsegom od 3,8 do 9,00 koji za ovaj tip zemljišta navode Oze, Fendorf, Bird i Coleman (2004), mada navedeni autori (Oze et al., 2004) konstatuju da su serpentinitička zemljišta najčešće slabo kisela (pH~6,00).

U ovoj disertaciji je pokazano da je kod većine ispitivanih uzoraka (osam od deset analiziranih) tla iz Bosne i Hercegovine aktivna kiselost zemljišta bila bazna (pH 7,56 – 8,60). Slični opsezi aktivne kiselosti zabeleženi su i u slučaju zemljišta na ultramafitima Srbije i Kosova (Tumi et al., 2012; Salihaj et al., 2018). U disertaciji je, takođe, pokazano i da su prikazane vrednosti supstitucione kiselosti (pH izmeren u 1 N KCl) bile za 0,80 – 1,30 niže u odnosu na aktivnu kiselost, i da se slažu sa vrednostima ispitivanih serpentinitičkih zemljišta u Poljskoj (Kierczak et al., 2016).

U disertaciji je pokazano da se plitka skeletogena zemljišta na serpentinitičkoj podlozi najčešće karakterišu niskim sadržajem organske materije, kao i esencijalnih nutrijenata (P, K), što je u saglasnosti sa istraživanjima drugih istraživača (Teptina et al., 2018). Sadržaj organske materije u analiziranim uzorcima (0,50 – 4,85%), koja je značajna za obrazovanje adsorptivnog kompleksa i stepen dostupnosti metala za biljke (Kabata-Pendias, 2011; Pędziwiatr et al., 2018), bila je u nivou vrednosti koje su zabeležene na ultramafitima u Srbiji (Tumi et al., 2012; Tomović et al., 2013). Niske koncentracije esencijalnih nutrijenata (P i K) koje su prikazane u disertaciji, a odnose se na ispitivana zemljišta iz Bosne i Hercegovine, bile su u opsegu vrednosti, za ovaj tip zemljišta, prikazanih od drugih istraživača (Teptina et al., 2018). Lee i saradnici su pokazali da je niska koncentracija K u serpentinitičkim zemljištima posledica izuzetno niskog sadržaja ovog elementa u ultramafitskim stenama i da obično ne prelazi 200 mg kg⁻¹ (Lee et al., 2001).

S obzirom da se tokom procesa serpentinizacije gubi Ca iz matične podloge (Alexander & DuShey, 2011), jedna od tipičnih karakteristika serpentinitičkih zemljišta koja je konstatovana i na lokalitetima istraživanim u ovom radu jeste redukovani sadržaj Ca koji je praćen povećanim sadržajem Mg, odnosno vrednost količnika kalcijuma i magnezijuma (Ca/Mg) koja je manja od 1,00. Naime, zbog velike količine Mg koji se oslobađa raspadanjem minerala serpentinske grupe (npr. antigorit, krizolit, lizardit) koji su bogati ovim elementom i relativno nestabilni u površinskim slojevima podloge (Hseu, Tsai, Hsi, & Chen, 2007), u uslovima umerene klime upravo Mg ima glavnu ulogu među razmenljivim katjonima što dovodi do karakteristično niskog odnosa Ca i Mg u zemljištu (Lee et al., 2001; Kierczak et al., 2007). U ovoj disertaciji je pokazano da je na devet od deset istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini odnos Ca/Mg bio manji od 1,00, što je u saglasnosti sa drugim ispitivanim serpentinitičkim zemljištima u regionu (Rakić et al., 2013; Tomović et al., 2013; Mišljenović et al., 2018; Salihaj et al., 2018). Rezultati prikazani u ovoj disertaciji, a odnose se na koncentracije Fe u zemljištu, su pokazale visok sadržaj Fe u ispitivanom zemljištu, što je, takođe, u saglasnosti sa nalazima drugih istraživača (Cheng et al., 2009; Tumi et al., 2012; Tomović et al., 2013).

Rezultati ovog rada pokazali su da se zemljišta na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini, odlikuju visokim koncentracijama metala u tragovima i toksičnih metala koji su tipični za ultramafitska staništa, poput nikla, hroma, kobalta i mangana. Istraživanja drugih istraživača su pokazala da je sadržaj Ni u zemljištima širom sveta u vrlo širokom rasponu od 5 do 500 mg kg⁻¹, mada najčešće od 13 do 37 mg kg⁻¹ (Alves et al., 2011; Kabata-Pendias, 2011). U zemljištima na ultramafitima sadržaj Ni je od 500 do 8000 mg kg⁻¹, a može da bude i >10000 mg kg⁻¹ (Ghaderian, Mohtadi, Rahiminejad, Reeves, & Baker, 2007b; Alves et al., 2011).

Teptina i saradnici (2018) navode da ukupna koncentracija Ni u serpentinitiskim zemljištima najviše zavisi od hemizma matične stene, odnosno da nema jasnog gradijenta koncentracija uslovljenog klimatskim razlikama, ukupne količine Ni na ultramafitima Bosne i Hercegovine ($1077 - 2232 \text{ mg kg}^{-1}$), ipak, su bile u skladu sa vrednostima tipičnim za umerene oblasti, pre svega ultramafite Balkanskog poluostrva (Shallari, Schwartz, Haskob, & Morela, 1998; Bani et al., 2010; Tumi et al., 2012; Rakić *et al.*, 2013; Tomović et al., 2013; Mišljenović et al., 2018; Salihaj et al., 2018).

Uobičajeni sadržaj ukupnog mangana u zemljištima u svetu iznosi od 411 do 550 mg kg^{-1} (Kabata-Pendias, 2011), dok u zemljištima na ultramafitskog podlozi može da bude i do $1000 - 5000 \text{ mg kg}^{-1}$ (Zitka *et al.*, 2013). Koncentracije ukupnog Mn na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini ($1298 - 2540 \text{ mg kg}^{-1}$) odgovaraju vrednostima koje se u literaturi navode za ultramafite u regionu (Bani et al., 2010; Tumi et al., 2012; Tomović et al., 2013; Mišljenović et al., 2018; Salihaj et al., 2018). Zemljišta u svetu uobičajeno sadrže oko 60 mg kg^{-1} Cr (Kabata-Pendias, 2011), dok sadržaj ovog toksičnog metala u zemljištima na ultramafitskog podlozi varira u širokom opsegu (od 634 do $125000 \text{ mg kg}^{-1}$) (Shanker, Cervantes, Loza-Tavera, & Avudainayagam, 2005), pre svega zbog hemijskog sastava matične stene, ali i drugih faktora koji utiču na procese pedogeneze (Oze et al., 2004). Istraživanja i u ovoj disertaciji na serpentinitiskim zemljištima Bosne i Hercegovine beleže širok opseg koncentracija ukupnog Cr ($154 - 1748 \text{ mg kg}^{-1}$) koji je bio u skladu sa vrednostima za ultramafite u Srbiji i na Kosovu (Tumi et al., 2012; Tomović et al., 2013; Mišljenović et al., 2018; Salihaj et al., 2018). Prosečan sadržaj Co u zemljištima širom sveta iznosi $11,3 \text{ mg kg}^{-1}$, dok na ultramafitima može da ide i do 520 mg kg^{-1} (Kabata-Pendias, 2011). Na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini sadržaj Co bio je visok i bio je od $76,4$ do 297 mg kg^{-1} , a navedene vrednosti bile su oko deset puta manje u odnosu na ukupni sadržaj Ni, što je uobičajeno za serpentinitiska zemljišta (Tappero et al., 2007; Kazakou et al., 2008). Slični rasponi koncentracija ukupnog Co konstatovani su i za ultramafite Srbije i Kosova (Tumi et al., 2012; Tomović et al., 2013; Mišljenović et al., 2018; Salihaj et al., 2018), Albanije, Bugarske i severne Grčke (Bani et al., 2010).

Koncentracije esencijalnih mikronutrijenata Zn i Cu u zemljištima na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini, uglavnom su se preklapale sa prosečnim sadržajima ovih elemenata u različitim tipovima tla u svetu, a koji se nalaze u opsegu od 60 do 89 mg kg^{-1} , tj. do 300 mg kg^{-1} u poljoprivrednim zemljištima za Zn, kao i od 14 do 109 mg kg^{-1} za Cu (Kabata-Pendias, 2011). Vrednosti sadržaja Zn i Cu u zemljištima na ultramafitima Bosne i Hercegovine su u saglasnosti sa vrednostima sadržaja ispitivanim sličnim lokalitetima u regionu (Tumi et al., 2012; Tomović et al., 2013; Mišljenović et al., 2018; Salihaj et al., 2018).

Kadmijum i olovo su poznati i izuzetno značajni zagađivači tla (Alloway, 2013). Prisutni su i u nezagađenim zemljištima, mada u jako niskim koncentracijama ($0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ za Cd i 17 mg kg^{-1} za Pb) s obzirom na njihovu malu zastupljenost u površinskim stenama kontinentalne kore (Alloway, 2013). Sa razvojem ljudske civilizacije, glavni izvori ovih elemenata postale su različite ljudske delatnosti, pre svega industrija i poljoprivreda (Nagayoti et al., 2010). U disertaciji je pokazano da su maksimalne zabeležene koncentracije ovih toksičnih metala u uzorcima tla iz Bosne i Hercegovine $3,93 \text{ mg kg}^{-1}$ za Cd i 129 mg kg^{-1} za Pb. Upoređujući

prikazane maksimalne vrednosti sadržaja Cd i Pb sa rasponom prosečnih vrednosti sadržaja ovih elemenata u različitim tipovima zemljišta širom sveta (0,2 – 1,1 mg kg⁻¹ za Cd i 3 – 90 mg kg⁻¹ za Pb) (Kabata-Pendias, 2011) zaključuje se da su dobijene maksimalne vrednosti u tlu BiH više od prosečnih. Istraživanja u disertaciji su, takođe, pokazala da su prosečne koncentracije Cd i Pb u uzorcima zemljišta iz Bosne i Hercegovine (1,92 mg kg⁻¹ za Cd i 55,8 mg kg⁻¹ za Pb), više od svetskog proseka za prirodno nezagađena zemljišta (0,41 mg kg⁻¹ za Cd i 27 mg kg⁻¹ za Pb) (Kabata-Pendias, 2011). Kada se prikazane vrednosti koncentracija Cd i Pb uporede sa vrednostima u serpentinskih zemljišta regiona evidentno je da su koncentracije Cd i Pb u analiziranim uzorcima iz Bosne i Hercegovine više (Tumi et al., 2012; Tomović et al., 2013; Mišljenović et al., 2018; Salihaj et al., 2018). Visoki sadržaj Cd i Pb u analiziranim uzorcima može se objasniti neposrednom blizinom puteva ili naseljenih mesta gde su bili izloženi snažnom antropogenom uticaju. Rezultati analize osnovnih komponenti u disertaciji su potvrdili da se na istraživanim lokalitetima jasno izdvajaju elementi litogenog, od onih antropogenog porekla među kojima su najistaknutiji upravo Cd i Pb. Rezultati prikazani u disertaciji su u saglasnosti sa rezultatima hemometrijskih analiza za druga serpentinitiska zemljišta na Balkanskom poluostrvu (Kazakou et al., 2010; Mišljenović et al., 2018; Salihaj et al., 2018).

Iz literature je poznato da biološki efekti povećane koncentracije metala u tragovima u zemljištu na biljke, tj. njihova fitotoksičnost, ne zavisi direktno od ukupne količine ovih elemenata, već, pre svega, od njihove biodostupnosti (Alexander, 2000; Harmsen, 2007), u uzorcima tla sa istraživanih ultramafitskih lokaliteta u Bosni i Hercegovini ispitivane su i dostupne koncentracije Ni, Mn, Cr, Co, Zn, Cu, Cd i Pb. Poznata je činjenica da je sadržaj dostupnih metala u tragovima u zemljištu, kao i njihov kasniji transport i potencijalna fitotoksičnost određena prvenstveno njihovim oslobađanjem iz zemljišnog matriksa (Alves et al., 2011). Različiti hemijski i biološki procesi u rizosferi u kojima se ostvaruju interakcije između tla, biljaka i mikroorganizama, takođe, mogu uticati na dostupnost metala u zemljištu (Harmsen, 2007; Alves et al., 2011). Samo oslobađanje uslovljeno je klimatskim karakteristikama (temperatura i vodni režim), kao i različitim osobinama tla (mehanička struktura, kiselost (pH), redoks potencijal (Eh), katjonski izmenjivački kapacitet (CEC), sadržaj organske materije i oksida Fe i Mn (Alves et al., 2011; Pędziwiatr et al., 2018), što je i ovom radu potvrđeno značajnom povezanošću nekih od navedenih faktora i određenih analiziranih elemenata u tragovima.

Znajući da je povećana koncentracija nikla jedna od glavnih karakteristika serpentinitiskih zemljišta, za ovaj tip tla, detaljno su istraživani različiti faktori koji potencijalno utiču na njegovu dostupnost (Massoura et al., 2006; Chardot, Echevarria, Gury, Massoura, & Morel, 2007; Hseu et al., 2007; Hseu, Su, Zehetner, & Hsi, 2017; Kierczak *et al.*, 2007, 2016; Alves et al., 2011; Pędziwiatr et al., 2018). Istraživanja su pokazala da koncentracija ukupnog i dostupnog Ni u serpentinitiskim zemljištima umerene zone najviše zavisi od tipa matične podloge, odnosno vrste minerala koji sadrže Ni (Massoura et al., 2006; Pędziwiatr et al., 2018). U disertaciji je konstatovana izraženija umerena pozitivna povezanost između ukupne i dostupne koncentracije Ni u odnosu na identičnu povezanost koja je zabeležena u slučaju serpentinita u Italiji (Lombini, Dinelli, Ferrari, & Simoni, 1998), dok je procenat dostupnosti ovog elementa na istraživanim lokalitetima u Bosni i Hercegovini bio u nivou serpentinitiskih zemljišta u Poljskoj (5,6 – 15,2%,

odnosno 5,2 – 18% od ukupne količine Ni), bez obzira na nešto hladniju i suvlju varijantu umerene klime u odnosu na Balkansko poluostrvo (Kierczak *et al.*, 2007, 2016; Pędzwiatr *et al.*, 2018). Dostupnost Ni zavisi i od sadržaja organske materije i frakcije gline, kao i pH vrednosti zemljišta (Kabata-Pendias, 2011).

Sadržaj dostupnog mangana zavisi od prirode matične podloge i najviše od redoks potencijala (Eh) i kiselosti zemljišta (pH), tj. faktora koji određuju redoks stanje ovog elementa (Fernando & Lynch, 2015). Istraživanja su pokazala da se u tlu Mn javlja u obliku različitih katjona i anjona, i da je u zemljišnom rastvoru Mn relativno mobilan (Kabata-Pendias, 2011), kao i da dostupne koncentracije Mn mogu biti visoke, što je izmereno i u analiziranim uzorcima iz Bosne i Hercegovine (30,4% od ukupne količine Mn), dok je, zbog veće količine padavina i posledično veće vlažnosti zemljišta, tj. redukujućih uslova koji u njima vladaju, sadržaj dostupnog Mn bio je daleko viši u istraživanim serpentinititskim zemljištima u Srbiji (62,2% od ukupne količine Mn) (Mišljenović *et al.*, 2018).

Sa geohemijskog aspekta, hrom jeste najistraživaniji element u serpentinititskom zemljištu i odgovarajućoj matičnoj podlozi (Oze *et al.*, 2004; Vithanage *et al.*, 2014). Bez obzira na visok ukupan sadržaj Cr u serpentinititskim zemljištima, pa i u onim analiziranim u ovom radu, dostupna količina ovog elementa je daleko niža u odnosu na Ni, s obzirom da je ovaj toksični metal u ultramafitskoj podlozi najčešće prisutan u obliku relativno nerastvorljivih minerala kao što je hromit (Oze *et al.*, 2004; Kazakou *et al.*, 2008). Na istraživanim serpentinititskim lokalitetima u Bosni i Hercegovini prosečna dostupnost Cr u zemljištu je iznosila 1,4% u odnosu na ukupnu koncentraciju ovog elementa, što približno odgovara njegovoj generalnoj dostupnosti u zemljištima koja iznosi 1% (Oze *et al.*, 2004; Chrysochoou, Theologou, Bompoti, Dermatas, & Panagiotakis, 2016).

Rezultati drugih istraživača su pokazala da dostupni sadržaj kobalta u zemljištu zavisi od količine Fe, a posebno Mn oksida koji imaju izraženi afinitet za selektivnu adsorpciju Co (Kabata-Pendias, 2011; Lange *et al.*, 2016). Kao i u slučaju ukupnih količina ovog elementa, dostupnost Co u analiziranim uzorcima zemljišta iz Bosne i Hercegovine je, takođe, bila manja u odnosu na dostupnost Ni, što je u saglasnosti sa rezultatima istraživača iz Poljske (Pędzwiatr *et al.*, 2018). Procentualni udeo u odnosu na ukupnu koncentraciju Co (24,3%) je u saglasnosti sa vrednostima koje su zabeležene za ultramafite u Srbiji (Mišljenović *et al.*, 2018).

Prema Kabata-Pendias (Kabata-Pendias, 2011), ukupni sadržaj cinka u zemljištima širom sveta određen je njegovom koncentracijom u matičnoj podlozi, dok je koncentracija dostupnog Zn direktno vezana za njegovu ukupnu koncentraciju. Ova povezanost potvrđena je i u ovoj disertaciji jakom pozitivnom korelacijom između ukupne i dostupne koncentracije Zn u analiziranim uzorcima tla. Osim ukupnog sadržaja Zn, jedan od najznačajnijih faktora koji određuje njegovu dostupnost u zemljištu jeste i njegova kiselost (Gupta, Ram, & Kumar, 2016). Naime, sa povećanjem pH vrednosti intenzivira se adsorpcija Zn na amorfim oksidima i mineralima gline, što smanjuje dostupnost ovog elementa u zemljišnom rastvoru (Gupta *et al.*, 2016). Istraživanja u disertaciji su pokazala da je dostupnost Zn u serpentinititskim zemljištima Bosne i Hercegovine manja u odnosu na isti tip podloge u Srbiji (13,0% prema 20,2% od ukupne

količine Zn), gde su zabeležene i niže pH vrednosti tla (pH 7,86 u Bosni i Hercegovini, nasuprot pH 6,64 u Srbiji) (Mišljenović et al., 2018).

Bakar se smatra prilično nepokretnim elementom u zemljištu, a na njegovu dostupnu količinu, pored ukupnog sadržaja, utiču još i kiselost (pH) i sadržaj organske materije (OM) (Ponizovsky, Thakali, Allen, Di Toro, & Ackerman 2006; Kabata-Pendias, 2011). Vrlo slabe negativne korelacije između dostupne količine Cu u zemljištima sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini i navedenih parametara (pH i sadržaj organske materije - OM) u skladu su sa činjenicom da dostupnost Cu u tlu opada sa porastom pH i većim sadržajem organske materije (Oorts, 2013). Kao i u slučaju Zn, zbor razlika u kiselosti tla, i za Cu je konstatovana manja dostupnost u odnosu na serpentinitiska zemljišta u Srbiji (18,4% prema 30,7% od ukupne količine Cu) (Mišljenović et al., 2018).

Iz literaturnih podataka sledi da sadržaj dostupnog kadmijuma u zemljištu osim od ukupnog sadržaja ovog elementa, zavisi od kiselosti zemljišta, tj. da količina dostupnog Cd opada sa porastom pH vrednosti tla (Kirkham, 2006; Yanai, Zhao, McGrath, & Kosaki 2006). Posledica navedenog je, kao što je već objašnjeno za Zn i Cu, da je dostupni sadržaj Cd u uzorcima zemljišta koji su ispitivani u ovom radu bio nešto niži nego na serpentinitima Srbije (23,3% prema 29,6% od ukupne količine Cd) (Mišljenović et al., 2018). Za olovo, Kabata-Pendias (2011) navodi da se radi o elementu koji je najslabije mobilan od svih navedenih metala u tragovima i toksičnih metala. Olovo je u tlu obično nedostupno (osim u slučaju kada je prisutno u izuzetno visokim koncentracijama), jer se u zemljištima bogatim organskim materijama vezuje za huminske supstance, a kada one nisu prisutne, npr. u mineralnim zemljištima, za minerale gline i okside gvožđa (Steinnes, 2013). Osim navedenih faktora, na dostupnost Pb utiče i pH zemljišta na identičan način kao i u slučaju već navedenih metala, tj. smanjuje se sa povećanjem pH (Kabata-Pendias, 2011). Uzimajući u obzir značajno manju količinu organske materije kao i manji procentualni udeo frakcije gline, bilo je za očekivati da će dostupnost Pb na istraživanim serpentinitiskim lokalitetima u Bosni i Hercegovini biti značajno manja u odnosu na ultramafite Srbije (6,4% prema 43,3% od ukupne količine Pb) (Mišljenović et al., 2018).

5.2 Sadržaj elemenata i njihovi međusobni odnosi u istraživanim biljnim vrstama

Kao što je već istaknuto, jedan od najvećih izazova za biljke na serpentinitnim staništima jeste život u uslovima visoke koncentracije Mg u podlozi, uz istovremeni nedostatak Ca (Brady et al., 2005; Pędziwiatr et al., 2018). Biljke se na ovom tipu podloge suočavaju sa nedostatkom Ca, potencijalnom toksičnošću Mg, kao i nepovoljnim odnosom Ca/Mg, to jest disbalansom razmenljivih katjona u zemljištu (Proctor, 1970; Brooks, 1987; Kazakou et al., 2008). Visok sadržaj Mg u zemljištu ima antagonističan efekat na usvajanje Ca, zbog čega su biljkama neophodni posebni fiziološki mehanizmi za održavanje adekvatnih unutrašnjih koncentracija Ca (O'Dell et al., 2006). Neki autori smatraju da je upravo nepovoljan odnos Ca/Mg glavni pokretač lokalizovane adaptacije biljnih populacija na ovaj tip podloge (Brady et al., 2005; Palm, Brady, & Van Volkenburgh, 2012). Mogući mehanizmi pomoću kojih vrste koje su adaptirane na serpentinitnu podlogu prevazilaze navedene probleme uključuju selektivnost u usvajanju Ca i Mg, toleranciju niske koncentracije Ca i visoke Mg, kao i prekomerno usvajanje i skladištenje Mg (Kazakou et al., 2008). Među istraživanim vrstama sa serpentinitnih staništa Bosne i Hercegovine kod kojih je potvrđena adaptiranost na nepovoljne uslove izazvane neadekvatnim sadržajem i nepovoljnim odnosom Ca i Mg u podlozi, za vrstu *A. murale* je konstatovano da selektivno usvaja ove elemente (Ca>Mg) i toleriše visoke koncentracije Mg, dok vrste *T. kovatsii* i *L. campestre* usvajaju i tolerišu visoke koncentracije Mg.

Kod vrste *A. murale* u korenu, stablu i listovima, uprkos relativno niskog sadržaja Ca u istraživanim serpentinitnim zemljištima Bosne i Hercegovine sa kojih su prikupljene ispitivane jedinice (223 – 2420 mg kg⁻¹), konstatovana je i preko trideset puta veća koncentracija ovog elementa (3243 – 61169 mg kg⁻¹), a najviše vrednosti su zabeležene u listovima. Prosečna količina Ca u analiziranim biljnim organima *A. murale* bila je u opsegu vrednosti karakterističnih za biljke koje žive u uslovima dobre snabdevenosti ovim elementom (0,1 – 5% suve težine) (White & Broadley, 2003). Sadržaj Mg u analiziranim biljnim organima *A. murale* bio je niži u odnosu na Ca (957 – 10103 mg kg⁻¹) i u opsegu vrednosti karakterističnih za vrste koje žive u uslovima dobre snabdevenosti magnezijumom (1000 – 10000 mg kg⁻¹ suve težine) (White & Broadley, 2009). Zbog svega navedenog, za razliku od zemljišta gde je samo u jednom od deset analiziranih uzoraka odnos Ca/Mg bio veći od 1,0, u najvećem broju uzoraka i biljnih organa vrste *A. murale* (osim u slučaju korena i stabala sa lokaliteta SP8) bilo više Ca od Mg, tj. odnos ova dva elementa bio je veći od 1,0. Najviše Mg je zabeleženo u listovima, ali je translokacioni faktor (TF), tj. odnos koncentracija u nadzemnom i podzemnom delu biljke, za Ca bilo duplo viši u odnosu na Mg (TF za Ca: 10,2; TF za Mg: 4,6). Mehanizmi za selektivno usvajanje veće količine Ca u odnosu na Mg, bez obzira na odnos Ca/Mg manji od 1,0 u zemljištu, kao i efikasniju translokaciju Ca u odnosu na Mg u samoj biljci koji su konstatovani kod vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini, prisutni su i kod većine biljaka sa serpentinitnih staništa (O'Dell et al., 2006; Kazakou et al., 2010; Pędziwiatr et al., 2018). Isti obrasci kontrole usvajanja i akumulacije Ca i Mg konstatovani su kod vrste *A. murale* sa drugih lokaliteta (Shallari et al., 1998; Bani et al., 2010; Tumi et al., 2012; Broadhurst & Chaney, 2016;

Salihaj et al., 2018), kao i nekih drugih predstavnika roda *Alyssum* sa serpentinitičkih staništa, npr., *A. bertolonii* (Lombini et al., 1998), *A. lesbiacum* (Kazakou et al., 2010), *A. montanum* (Tomović et al., 2013; Broadhurst & Chaney, 2016), *A. repens* (Tomović et al., 2013) i *A. tortuosum* (Shallari et al., 1998; Teptina & Paukov, 2015).

Vrste *T. kovatsii* i *L. campestre* kada se uporede sa vrstom *A. murale*, sa istih staništa u Bosni i Hercegovini usvojili su značajno manje količine Ca (*T. kovatsii*: 2289 – 8358 mg kg⁻¹; *L. campestre*: 3208 – 7700 mg kg⁻¹), iako je sadržaj Ca i kod njih bio u opsegu vrednosti karakterističnih za biljke koje žive u uslovima dobre snabdevenosti ovim elementom (White & Broadley, 2003). Pored toga, iako *T. kovatsii* i *L. campestre* sadrže više Ca u nadzemnim organima, pokazalo se da je translokacija ovog elementa iz korena u nadzemne delove biljke slabija u odnosu na vrstu *A. murale* (TF kod *T. kovatsii*: 2,1; TF kod *L. campestre*: 1,3; TF kod *A. murale*: 10,2). Značajna razlika u odnosu na prethodnu vrstu je i što *T. kovatsii* i *L. campestre* usvajaju više Mg u odnosu na Ca, mada su i ovde prosečne vrednosti u podzemnim i nadzemnim delovima bile u opsegu vrednosti karakterističnih za biljke koje žive u uslovima dobre snabdevenosti ovim elementom (White & Broadley, 2009). Zbog svega navedenog u najvećem broju uzoraka biljnih organa vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* (osim u nadzemnom delu *T. kovatsii* sa lokaliteta SP3 i SP4 i korena vrste *L. campestre* sa lokaliteta SP8) bilo je manje Ca od Mg, tj. odnos ova dva elementa bio je manji od 1,0. Slični obrasci usvajanja Ca i Mg od strane biljaka na serpentinskim zemljištima konstatovani su i u radovima drugih autora (Kazakou et al., 2010; Jakovljević et al., 2015; Mišljenović et al., 2018; Tomović et al., 2018). Istraživanja pokazuju da biljke sa serpentinitičkih staništa mogu da održe prilično visoke koncentracije Mg u svojim tkivima pretpostavljajući da je to rezultat njegove sekvestracije u vakuolama (Palm et al., 2012; Chen, Peng, Li, & Liao, 2018). Moguće objašnjenje ovog mehanizma je da su biljke sa serpentinitičkih staništa stekle povećanu potrebu za Mg adaptirajući se na specifične edafske uslove (Asemaneh, Ghaderian, & Baker, 2007; Salehi-Eskandari, Ghaderian, & Schat, 2018).

Sadržaj gvožđa bio je visok u svim biljnim organima kod sve tri istraživane vrste, s obzirom da biljke mogu da usvajaju velike količine ovog elementa kada je Fe u zemljištu dostupno u velikim količinama (Kabata-Pendias, 2011). Visoke koncentracije Ni u podlozi, što je inače jedna od osnovnih karakteristika serpentinitičkih zemljišta, pa i onih na istraživanim lokalitetima, intenziviraju usvajanje Fe kod hiperakumulatorskih vrsta *Alyssum inflatum* (syn. *A. tortuosum*) (Ghasemi, Ghaderian, & Krämer, 2009) i *Thlaspi caerulescens* (Deng et al., 2019). Slični rezultati dobijeni su i za vrstu *Arabidopsis thaliana* koja se koristi kao model sistem u botaničkim istraživanjima u širokom smislu (Nishida et al., 2011). Smatra se da se ovakav odnos gvožđa i nikla može objasniti činjenicom da se za usvajanje Ni delimično koriste Fe transporteri, odnosno da povećana količina Ni ometa Fe transportni sistem u biljkama, a takođe i nedostatak gvožđa intenzivira usvajanje Ni (Nishida et al., 2011; Deng et al., 2019). S obzirom da primarni transporteri Fe u korenu nisu specifični u odnosu na supstrat, oni mogu da posreduju u prenosu i drugih dvovalentnih katjona, poput Zn²⁺ i Ni²⁺ (Deng et al., 2019). Kod različitih biljnih vrsta, između ostalog i kod *A. inflatum* (Ghasemi et al., 2009), pokazano je da prekomerna količina Ni u podlozi inhibira translokaciju Fe iz podzemnih u nadzemne delove biljke, dovodeći do izražene akumulacije Fe u korenu. Ovakav slučaj zabeležen je kod *T. kovatsii* i *L. campestre* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini. Kod ovih vrsta najveće koncentracije gvožđa

zabeležene su u podzemnim organima. Kod *T. kovatsii* prosečan sadržaj gvožđa iznosio je 1287 mg kg⁻¹, a translokacioni faktor (TF) 0,5, dok je prosečan sadržaj Fe u korenu kod *L. campestre* bio je 948 mg kg⁻¹, a TF 0,6. Identičan obrazac u sadržaju Fe u biljci konstatovan je i kod određenih populacija hiperakumulatorske vrste *Thlaspi praecox* sa serpentinita Srbije (Mišljenović et al., 2018).

Na istraživanim serpentinitским lokalitetima u Bosni i Hercegovini za vrstu *A. murale* zabeležene su izuzetno visoke koncentracije nikla u svim biljnim organima koje su daleko prevazilazile sadržaj dostupnog Ni u podlozi (≤ 204 mg kg⁻¹), što jeste očekivano imajući u vidu da se radi o vrsti koja je potvrđeni hiperakumulator ovog elementa (Brooks & Radford, 1978; Li, Chaney, Brewer, Angle, & Nelkin, 2003; Tappero et al., 2007). Najmanje koncentracije zabeležene su u korenu (1010 – 5885 mg kg⁻¹), a najveće u listovima (2305 – 10552 mg kg⁻¹), tako da su vrednosti sadržaja Ni u svim delovima vrste *A. murale* prevazilazile prag od 1000 mg kg⁻¹ kojim se kod biljaka definiše hiperakumulacija ovog elementa (Van der Ent et al., 2013). Zabeleženi sadržaj Ni kod vrste *A. murale* u ovom radu bio je u opsegu koncentracija koje su još Brooks & Radford (1978) konstatovali kod herbarijumskih primeraka ove vrste sa Balkanskog poluostrva (1360 – 7080 mg kg⁻¹ u listovima), a takođe i onih u populacijama sa ultramafita Srbije (Tumi et al., 2012), a Bani i saradnici (2010) su utvrdili nešto viši sadržaj Ni kod vrste *A. murale* u Albaniji i Grčkoj.

Za razumevanje mehanizma hiperakumulacije i tolerancije prekomerne količine toksičnih elemenata kod hiperakumulatorskih vrsta izuzetno su važne informacije o lokalizaciji metala, kao i njihovim međusobnim odnosima u samoj biljci (Tappero et al., 2007). Kako navode Broadhurst & Chaney (2016), kod “Kotodesh” genotipa *A. murale* iz Albanije, Ni se akumulira prvenstveno u listovima, i to u vakuolama epidermalnih ćelija, kao i bazalnim delovima stelatnih trihoma na listovima koje su prisutne kod svih do sada poznatih hiperakumulatorskih vrsta iz roda *Alyssum*. Drugim rečima, tolerancija visoke koncentracije Ni koja je inače toksična za većinu biljaka, kod vrste *A. murale* na ćelijskom nivou omogućena je vakuolarnom sekvestracijom ovog elementa (Tappero et al., 2007). Preferencijalna distribucija Ni u epidermalnim ćelijama serpentinskih biljaka zapravo štiti ćelije mezofila od nakupljanja i toksičnog dejstva Ni čineći ih funkcionalnim u širokom rasponu koncentracija ovog elementa u listovima (Asemaneh, Ghaderian, Crawford, Marshall, & Baker, 2006).

Što se tiče puta do vakuola u epidermalnim ćelijama listova, pretpostavka je da se kod *A. murale* Ni usvaja preko transportnih sistema niskog afiniteta za različite dvovalentne katjone, npr. Zn²⁺, Fe²⁺ i Cu²⁺, s obzirom da kod Ni hiperakumulatora, niti biljaka uopšte, nisu pronađeni specifični Ni transporteri (Deng et al., 2018). Postoje dokazi da samo usvajanje u velikoj meri stimulišu specifične rizosferne bakterije koje su endemične za serpentinitiska zemljišta (Broadhurst & Chaney, 2016). U korenu Ni obrazuje komplekse sa histidinom koji sprečavaju njegovu sekvestraciju u vakuolama korenskih ćelija i olakšavaju transport ka ostalim delovima biljke (Kozhevnikova, Seregin, Verweij, & Schat, 2014; Deng et al., 2018). Drugim rečima, smatra se da Ni ulazi u i transportuje se kroz ksilem u obliku Ni-histidinskih kompleksa (Seregin, Kozhevnikova, & Schat, 2019). Na kraju, preko ksilema u provodnim sudovima listova Ni

dospeva u vakuole epidermalnih ćelija u kojima se obično skladišti u obliku kompleksa sa organskim kiselinama, najčešće malatima (McNear, Chaney, & Sparks, 2010).

U biljnim organima vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* iz Bosne i Hercegovine, takođe, su zabeležene daleko veće koncentracije Ni, kako u odnosu na dostupnu količinu ovog elementa u zemljištu, tako i u odnosu na uobičajeni sadržaj za većinu biljaka koje se sreću na serpentinitским zemljištima (10 – 100 mg kg⁻¹) (Ghaderian et al., 2009). Kod obe vrste najmanje koncentracije zabeležene su u korenu (605 – 1064 mg kg⁻¹ kod *T. kovatsii*, odnosno 767 – 2176 mg kg⁻¹ kod *L. campestre*), a najveće u nadzemnim delovima (4219 – 12505 mg kg⁻¹ kod *T. kovatsii*, odnosno 3123 – 4457 mg kg⁻¹ kod *L. campestre*). Na osnovu izmerenog sadržaja Ni kod *T. kovatsii* i *L. campestre* može se zaključiti da su obe vrste hiperakumulatori ovog elementa, jer kod obe, bez obzira na količinu Ni u podlozi, koncentracije Ni u nadzemnim organima na svim lokalitetima prevazile prag od 1000 mg kg⁻¹ kojim se definiše njegova hiperakumulacija kod biljaka (Van der Ent et al., 2013). Bani i saradnici (2010) su istakli da vrsta *T. kovatsii* koja je fakultativna serpentinoфита ima potencijal za hiperakumulaciju Ni koji se realizuje kada raste na serpentinitским zemljištima bogatim ovim elementom, kao što je to bio slučaj i u ovoj studiji (Bani et al., 2010; Pavlova, Karadjova, & Ganeva, 2013). Rezultati ovog rada ukazuju da se isto može zaključiti i za *L. campestre*.

Kod vrste *T. kovatsii* Ni se verovatno usvaja preko transportera niskog afiniteta koji ima veći afinitet za Zn u odnosu na Ni, što je i eksperimentalno potvrđeno kod drugih vrsta roda *Thlaspi* (Assunção, Bleeker, ten Bookum, Vooijs, & Schat, 2008; Deng et al., 2018, 2019). Kao što postoje antagonistički efekti između Fe i Ni, postoje i antagonistički efekti između Ni i Zn koji su zabeleženi tokom njihove translokacije iz korena u nadzemne delove (Deng et al., 2018). Negativna korelacija između Zn i Ni u biljnim organima vrste *T. kovatsii* podržava ovu pretpostavku, za razliku od *L. campestre* gde ovakav odnos elemenata nije konstatovan. Ako se prati put nikla kroz biljku, veruje se da on je za ove dve vrste verovatno vrlo sličan onom već opisanom za *A. murale*, s obzirom da je sličan obrazac usvajanja Ni konstatovan i kod različitih hiperakumulatorskih vrsta roda *Thlaspi* (Heath, Southworth, & D'Allura, 1997; Krämer, Pickering, Prince, Raskin, & Salt, 2000; Küpper, Lombi, Zhao, Wieshammer, & McGrath, 2001; Krämer, 2010). Pretpostavlja se da je i kod ovih vrsta za toleranciju povećane količine Ni ključna njegova sekvestracija formiranjem kompleksa sa organskim kiselinama u vakuolama epidermalnih ćelija listova (Krämer et al., 2000; Küpper et al., 2001).

Sadržaj mangana kod vrste *A. murale* sa istraživanih serpentinskih lokaliteta u Bosni i Hercegovini bio je niži u odnosu na količinu dostupnog Mn u podlozi (prosečno 540 mg kg⁻¹) i u opsegu uobičajenih vrednosti za biljke (30 – 300 mg kg⁻¹) (Kabata-Pendias, 2011), s tim da su koncentracije bile više u nadzemnim (prosečno 86,9 mg kg⁻¹ u listovima), nego u podzemnim organima (prosečno 31,3 mg kg⁻¹ u korenu). Drugi autori su zabeležili sličan sadržaj Mn na serpentinitima Albanije, Bugarske, Grčke i Srbije (Bani et al., 2010; Tumi et al., 2012). Kod vrste *A. murale* potvrđeno je da se Mn, kao delom i Ni, koncentriše u bazalnim delovima trihoma na listovima koji su bogati kalcijumom (McNear et al., 2010), a zabeležena je i velika individualna varijabilnost u sadržaju ovog elementa, čak i u različitim listovima na istoj biljci (Broadhurst & Chaney, 2016). Isti autori ističu da se u trihomama na listovima kod vrste *A.*

murale Ni i Mn mogu istovremeno akumulirati do veoma visokih koncentracija, a da se pri tom ne dostigne prag za hiperakumulaciju Mn (Broadhurst et al., 2009). Istraživanja su pokazala da Mn i Ni kod vrste *A. murale* pokazuju isti obrazac akumulacije u nadzemnom delu biljke (Broadhurst & Chaney, 2016). U eksperimentalnim uslovima je za vrstu *A. murale* potvrđena povezanost navedenih metala i na nivou njihovog usvajanja u korenu (Broadhurst et al., 2009). Istraživači su pokazali da kod vrste *A. murale* povećana koncentracija dostupnog Mn u podlozi inhibira usvajanje Ni, ali ne i njegovu translokaciju iz korena u nadzemne delove biljke (Broadhurst et al., 2009), potvrđujući da se za usvajanje Ni koriste transporteri niskog afiniteta za različite elemente (Ghaderian, Ghasemi, & Hajhashemi, 2015; Deng et al., 2018), kao i da Mn ne utiče na translokaciju Ni kroz biljku i da je moguće je da se za prenos ovih elemenata kroz biljku koriste različiti fiziološki putevi (Ghaderian et al., 2015).

Kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* koncentracija Mn bila je još niža u odnosu na zemljište i u uobičajenom rasponu vrednosti za biljke (30 – 300 mg kg⁻¹) (Kabata-Pendias, 2011). Kod ovih vrsta prosečno veći sadržaj mangana zabeležen je u korenu (*T. kovatsii*: 61,8 mg kg⁻¹; *L. campestre*: 138 mg kg⁻¹) u odnosu na nadzemni deo (*T. kovatsii*: 45,1 mg kg⁻¹; *L. campestre*: 40,4 mg kg⁻¹). Pretpostavka je da se ovakav odnos Mn u analiziranim organima *T. kovatsii* i *L. campestre* može objasniti kompeticijom Ni i Mn za iste nespecifične transportere dvovalentnih katjona, s obzirom da je kod Zn/Cd hiperakumulatorske vrste *T. caerulea* eksperimentalno potvrđeno da povećana količina Ni ograničava usvajanje i translokaciju Mn iz podzemnih u nadzemne delove biljke (Deng et al., 2019). Kazakou i saradnici (2010) smatraju da se biljke sa serpentinitičkih zemljišta mogu svrstati u ekskludere mangana, tj. vrste kod kojih se kontrola usvajanja elementa ostvaruje na nivou korena, tako da koncentracija u nadzemnom delu ostaje stabilna u širokom opsegu njegovih koncentracija u zemljištu (Baker, 1981). Ovakav obrazac sadržaja Mn, kao i same koncentracije u biljnim organima bili su u saglasnosti sa postojećim podacima za druge vrste roda *Thlaspi* na Balkanskom poluostrvu (Bani et al., 2010; Mišljenović et al., 2018).

Kod sve tri istraživane vrste iz Bosne i Hercegovine konstatovane su visoke koncentracije hroma u poređenju sa uobičajenim sadržajem ovog elementa u biljkama sa nezagađenih staništa (0,02 – 0,2 mg kg⁻¹, retko >5 mg kg⁻¹) (Zayed & Terry, 2003). Dobijene vrednosti su bile više i u odnosu na količinu dostupnog Cr u podlozi (prosečno 10,8 mg kg⁻¹). Sadržaj Cr u podzemnim i nadzemnim delovima kod vrsta *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* nije prevazilazio prag od 100 mg kg⁻¹ koji se navodi kao gornja granica sadržaja Cr za biljke koje žive na serpentinitima (Shahandeh & Hossner, 2000). Zbog slabe pokretljivosti, sadržaj Cr je kod biljaka nizak, a najviše koncentracije beleže se za predstavnike porodice Brassicaceae (Zayed, Lytle, Qian, & Terry, 1998) kojoj pripadaju i vrste analizirane u ovom radu. Hrom se usvaja preko nespecifičnih transportera (Singh, Mahajan, Kaur, Batish, & Kohli, 2013) i zbog svoje izuzetno slabe pokretljivosti ne prenosi u nadzemne delove biljke, već se uglavnom akumulira u korenima (Shanker et al., 2005), kao i kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* u ovom istraživanju. Iako to nije bio slučaj sa navedenim vrstama, Zayed i saradnici (1998) navode da koreni generalno sadrže čak i 100 puta više Cr u odnosu na nadzemne delove. Smatra se da bi mogući razlog izražene akumulacije Cr u podzemnim organima mogao da bude njegova imobilizacija u vakuolama ćelija korena, čime bi se smanjila toksičnost ovog elementa za biljke (Shanker et al., 2005).

Translokaciju ovog elementa iz podzemnih u nadzemne delove biljke ograničava i sklonosti jona trovalentnog hroma (Cr^{3+}) ka vezivanju za ćelijske zidove (Zayed et al., 1998). Konstatovani sadržaj Cr kod vrsta *A. murale* i *T. kovatsii* u ovom istraživanju bio je u saglasnosti sa vrednostima koje su za njihove populacije sa ultramafita Albanije, Bugarske i Grčke dali Bani i saradnici (2010).

Ne postoje jasni dokazi o hiparakumulaciji Co u prirodnim uslovima kod biljaka sa serpentinitских zemljišta, uprkos visokim koncentracijama navedenog elementa u ovom tipu podloge (Ghaderian et al., 2009). Smatra se da je razlog tome nizak odnos Co/Ni, manja dostupnost Co i visok pH u serpentinitским zemljištima, kao i odsustvo specifičnih mehanizama za usvajanje i akumulaciju Co kod Ni hiperakumulatora sa serpentinita (Li et al., 2003, Ghaderian et al., 2009). Pretpostavlja se da je kod ovih biljaka hiperakumulacija Ni povezana sa potencijalnom akumulacijom Co (Ghaderian et al., 2009), odnosno da se akumulacije Co i Ni poklapaju odvijajući se preko sličnih fizioloških puteva (Lange et al., 2016).

Ghaderian i saradnici (2009) navode da biljke sa serpentinita koje hiperakumuliraju Ni, a kojim pripadaju i vrste istraživane u ovom radu, pokazuju izuzetno veliku varijabilnost u sadržaju Co. Koncentracija Co u biljkama sa ovog tipa podloge kreće se od $<1,0 \text{ mg kg}^{-1}$, do vrednosti u opsegu $10\text{-}100 \text{ mg kg}^{-1}$ (Ghaderian et al., 2009). Iako je koncentracija Co u biljnim organima vrste *A. murale* sa serpentinita Bosne i Hercegovine bila veća od uobičajenih za ovaj tip zemljišta ($\leq 116 \text{ mg kg}^{-1}$ u korenu; $\leq 143 \text{ mg kg}^{-1}$ u listovima) i značajno veća u odnosu na vrstu *A. murale* sa serpentinita Albanije, Bugarske, Grčke i Srbije (Bani et al., 2010; Tumi et al., 2012), dobijene vrednosti bile su ispod granice od 300 mg kg^{-1} kojim se definiše hiperakumulacija ovog elementa (Van der Ent et al., 2013). Povećana koncentracija Co kod *A. murale* sa lokaliteta u Bosni i Hercegovini mogla bi se objasniti nešto većom količinom Co u zemljištu, s obzirom da je pokazano da akumulacija Co u biljkama direktno zavisi od njegove količine u podlozi (Lange et al., 2016). Zbog toga ni jedna potencijalna Co hiperakumulatorska vrsta ne može da zadovolji osnovni princip definicije hiperakumulacije da se konstantan visok sadržaj elementa u nadzemnim organima održava u širokom opsegu koncentracija u podlozi (Van der Ent et al., 2013).

Sadržaj Co u herbarijumskim primercima *A. murale* sa Balkanskog poluostrva ispitivali su još Brooks & Radford (1978), konstatujući da listovi ove vrste sadrže $4 - 34 \text{ mg kg}^{-1}$ Co. S obzirom da su, pored Co analizirali i sadržaj Ni, autori su ustanovili da je sadržaj Ni u listovima bio nekoliko stotina puta veći od koncentracije Co i to ne samo kod *A. murale*, već kod svih istraživanih vrsta roda *Alyssum* (Brooks & Radford, 1978). Imajući u vidu da je uobičajeni odnos Ni i Co u serpentinitским zemljištima 10:1, zaključili su da vrste roda *Alyssum* koje hiperakumuliraju Ni preferencijalno usvajaju navedeni element u odnosu na Co (Brooks & Radford, 1978). Kod vrsta roda *Alyssum* koje hiperakumuliraju Ni, antagonistički odnos između Ni i Co, kao i mogućnost akumulacije velike količine Co, pa čak i njegove hiperakumulacije, u uslovima visoke koncentracije Co u podlozi potvrđeni su i u eksperimentalnim uslovima (Homer, Morrison, Brooks, Clemens, & Reeves, 1991; Malik, Chaney, Brewer, Li, & Angle, 2000; Tappero et al., 2007). Tappero i saradnici (2007) navode da je antagonistički odnos Ni i Co kod *A. murale* očekivan i da je verovatno uzrokovan kompeticijom za delimično selektivne

transportere niskog afiniteta u korenu. Izraženija kompeticija prisutna je za intercelularne ligande koji učestvuju u apsorpciji ovih elemenata, njihovom transportu na velike udaljenosti, kao i detoksikaciji (Tappero et al., 2007). Treba naglasiti da se, za razliku od Ni čija se toksičnost kod *A. murale* ublažava sekvestracijom u vakuolama epidermalnih ćelija u obliku Ni kompleksa sa organskim kiselinama (McNear et al., 2010), toksičnost Co prevazilazi sekvestracijom ovog elementa izvan samih ćelija (u apoplastu), tako da se najviše Co nakuplja na vrhovima i ivicama listova (Tappero et al., 2007). Smatra se da se tolerancija na Co kod vrste *A. murale* bazira na mehanizmima njegovog hemijskog vezivanja i isključivanja koje uključuje izlučivanje (pretpostavlja se preko hidatoda) i taloženje na površini listova (Tappero et al., 2007; Broadhurst et al., 2009).

Što se tiče vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre*, sadržaj Co bio je različit i viši u korenu (64,3 – 112 mg kg⁻¹ kod *T. kovatsii*, odnosno 43,6 – 113 mg kg⁻¹ kod *L. campestre*) u odnosu na nadzemni deo biljke kod obe vrste (11,7 – 61,1 mg kg⁻¹ kod *T. kovatsii*, odnosno 21,5 – 71,6 mg kg⁻¹ kod *L. campestre*). Izmerene koncentracije Co kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* bile su ispod granice od 300 mg kg⁻¹ kojim se definiše hiperakumulacija ovog elementa (Van der Ent et al., 2013) i u rasponu nalaza za *T. kovatsii* iz Bugarske, kao i neke druge vrste roda *Thlaspi* (*T. ochroleucum*, *T. tymphaeum* i *T. praecox*) sa nekoliko serpentinitskih lokacija na Balkanskom poluostrvu (Bani et al., 2010). Kada se govori o mehanizmu usvajanja i akumulacije Co kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre*, pretpostavlja se da je i kod njih hiperakumulacija Ni povezana sa potencijalnom akumulacijom Co (Ghaderian et al., 2009). Ova pretpostavka može se potkrepiti činjenicama da je u eksperimentalnim uslovima gajenja na podlozi sa velikom količinom Co za *T. goesingense*, vrstu koja hiperakumulira Ni kada raste na serpentinitskim staništima, dokazana akumulacija Co preko vrednosti praga kojim se definiše njegova hiperakumulacija (Reeves & Baker, 1984) i da je kod *T. caerulescens* potvrđeno postojanje kompeticije Co i Ni za neselektivne transportere niskog afiniteta u korenu (Deng et al., 2019).

Cink je prema sadržaju u živim organizmima drugi prelazni metal, posle gvožđa i jedini metal koji je prisutan u šest klasa enzima (oksidoreduktaze, transferaze, hidrolaze, lijaze, izomeraze, ligaze) (Broadley, White, Hammond, Zelko, & Lux, 2007). Količina Zn u biljkama može da varira u odnosu na same vrste, kao i prirodu ekosistema u kojima žive (Kabata-Pendias, 2011). Uobičajeni sadržaj Zn u listovima koji je neophodan biljkama za normalno funkcionisanje iznosi 15 – 20 mg kg⁻¹ (Broadley et al., 2007). Kod vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini, bez obzira na relativno visok sadržaj Zn u podlozi, zabeležene su niske i prilično ujednačene koncentracije ovog elementa u korenu (prosečno 7,95 mg kg⁻¹) i nadzemnim delovima biljke (prosečno 7,41 mg kg⁻¹). Dobijeni rezultati su u skladu sa pretpostavkom da se vrste adaptirane na život na serpentinitskim staništima mogu svrstati u ekskludere cinka prema Bejkeru (Baker, 1981), kao što je već navedeno u slučaju mangana kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* (Kazakou et al., 2010). Kada se govori o usvajanju, transportu i akumulaciji Zn, Tappero i saradnici (2007) navode da ovaj element kod vrste *A. murale* sledi sličan obrazac kao i Ni, osim što se Zn u manjem obimu sekvestrira u vakuolama epidermalnih ćelija zbog čega je njegova distribucija u listovima ravnomernija.

Osim efikasnog usvajanja nikla, u disertaciji je konstatovano da vrsta *T. kovatsii* akumulira i velike koncentracije cinka, posebno u nadzemnim delovima biljke. Ovakav obrazac usvajanja navedenih elementa od strane vrste *T. kovatsii* već su zabeležili Reeves & Brooks (1983) na prostoru bivše Jugoslavije, kao i Bani i saradnici (2010) za jedinke iz Bugarske. Sadržaj Zn u analiziranim biljnim organima ove vrste ($\leq 602 \text{ mg kg}^{-1}$ u podzemnim, odnosno $\leq 1120 \text{ mg kg}^{-1}$ u nadzemnim delovima) bio je značajno veći od dostupne koncentracije ovog elementa u zemljištu (prosečno $10,8 \text{ mg kg}^{-1}$). Dobijene vrednosti su značajno prevazilazile kritični toksični prag za Zn od 300 mg kg^{-1} (Krämer, 2010). Veći sadržaj Zn u nadzemnom u odnosu na podzemne organe može da bude rezultat olakšanog transporta ovog elementa kroz biljku, kao što se navodi za vrstu *T. caerulescens* koja je Zn/Cd hiperakumulator, a kod koje hiperakumulacija Zn predstavlja konstitutivnu osobinu (Assunção, Schat, & Aarts, 2003). Za Zn hiperakumulatore karakteristična je izuzetno brza translokacija ovog elementa iz korena u nadzemni deo biljke, kao i veoma izražena tolerancija na Zn, posebno u nadzemnim organima (Sinclair & Krämer, 2012).

Treba istaći da je sadržaj Zn kod vrste *T. kovatsii*, ipak, bio manji od granice od 3000 mg kg^{-1} kojim se definiše hiperakumulacija ovog elementa kod biljaka (Van der Ent et al., 2013) zbog čega se navedena vrsta može označiti kao hiperakumulator nikla i jak akumulator cinka (Kazakou et al., 2010). Manja koncentracija usvojenog Zn može da bude rezultat niskih koncentracija Zn i visokih Ni koje su zabeležene u analiziranim uzorcima zemljišta. Isti obrazac usvajanja ova dva elementa konstatovan je kod nekoliko predstavnika roda *Thlaspi* koji žive na serpentinitским staništima, npr. *T. montanum* (Boyd & Martens 1998), *T. sylvium* i *T. tymphaeum* (Taylor & Macnair 2006), *T. ochroleucum* (Kazakou et al., 2010) i *T. praecox* (Mišljenović et al., 2018), kao i kod različitih predstavnika ovog roda sa ultramafita u Turskoj (Reeves, 1981; Reeves, Kruckeberg, Adigüzel, & Krämer, 2001). Kada je koncentracija Ni u podlozi znatno veća od koncentracije Zn, kao što je to slučaj u serpentinitima, ove biljke ispoljavaju hiperakumulaciju Ni, dok se sa povećanjem koncentracije Zn u zemljištu povećava i usvajanje Zn u odnosu na Ni (Assunção et al., 2003; Deng et al., 2018). Ovakvi obrasci, potvrđeni i u eksperimentalnim studijama, čak i za vrstu *A. murale* koja je hiperakumulator Ni, ali ne i akumulator Zn prema Bejkeru (Baker, 1981; Deng et al., 2018), povezuju se sa različitim mehanizmima usvajanja ova dva elementa (Assunção et al., 2003; Deng et al., 2019). Smatra se da se Zn transportuje kako preko Zn-specifičnih transportera visokog afiniteta na koje ne utiče Ni, tako i preko transportera niskog afiniteta koji pored Zn prenose i Ni, dok Ni, kao što je već napomenuto, prenose samo transporteri niskog afiniteta koji očigledno preferiraju Zn u odnosu na Ni (Assunção et al., 2008; Deng et al., 2018, 2019). Pretpostavlja se da se kod *T. kovatsii* Zn preferencijalno sekvestira u vakuolama epidermalnih ćelija, kao što je već potvrđeno za Zn/Cd hiperakumulatorsku vrstu *T. caerulescens* (Küpper et al., 2001).

Sadržaj Zn u biljnim organima *L. campestre* je bio znatno veći u odnosu na njegovu kako ukupnu, tako i dostupnu koncentraciju u zemljištu (prosečno 118 mg kg^{-1} u podzemnim, odnosno 194 mg kg^{-1} u nadzemnim delovima), mada su dobijene koncentracije bile ispod toksičnog praga za ovaj element (300 mg kg^{-1}) (Krämer, 2010). Imajući u vidu da za *L. campestre* ne postoje podaci o akumulaciji metala u tragovima sa drugih serpentinitских staništa, niti sa lokaliteta sa različitom geološkom podlogom, neophodno je sprovesti dalja detaljna

ispitivanja potencijala za akumulaciju kako bi se bolje razumeli odnosi navedene vrste prema Zn, ali i ostalim analiziranim metalima u tragovima.

Koncentracija bakra kod svih istraživanih vrsta sa serpentinita Bosne i Hercegovine bila je manja od ukupne koncentracije ovog elementa u zemljištu i u rasponu optimalnih vrednosti za biljke (5 – 20 mg kg⁻¹) (Pinto, Aguiar, & Ferreira, 2014). Kao i kod Co, istaknuto je da koncentracija Cu u biljkama u velikoj meri zavisi od njegove koncentracije u podlozi, što za posledicu ima izraženu inter- i intrapopulacionu varijabilnost u sadržaju ovog elementa (Lange et al., 2016). Pokazalo se da su razlike među populacijama posebno uočljive u slučaju vrste *A. murale*, za koju su na nekim lokalitetima u Srbiji koji se karakterišu povećanim sadržajem Cu u podlozi, konstatovane i 100 puta veće koncentracije ovog elementa u odnosu na istraživane biljke sa serpentinita Bosne i Hercegovine (Tumi et al., 2012). Na serpentinitima Balkanskog poluostrva sa sličnim sadržajem Cu u zemljištu kao i u Bosni i Hercegovini, zabeležen je i sličan sadržaj Cu i u analiziranim biljnim organima *A. murale* (Bani et al., 2010; Tumi et al., 2012; Salihaj et al., 2018). Sadržaj Cu koji je konstatovan kod vrste *T. kovatsii* sa serpentinitičkih lokaliteta istraživanih u ovom radu bio je u u istom opsegu vrednosti kao kod vrste *T. kovatsii* iz Bugarske (Bani et al., 2010).

Koncentracija kadmijuma kod svih istraživanih vrsta sa serpentinita Bosne i Hercegovine bila je veća kako od dostupne (prosečno 0,40 mg kg⁻¹), tako i ukupne količine ovog elementa u zemljištu (prosečno 1,92 mg kg⁻¹), mada su izmerene koncentracije bile ispod praga toksičnosti za ovaj element (10 mg kg⁻¹) (Krämer, 2010). Kod vrste *A. murale* najviše Cd bilo je u listovima (prosečno 2,47 mg kg⁻¹), a dobijene vrednosti bile su u opsegu onih koje za ovu vrstu sa serpentinita Srbije navode Tumi i saradnici (2012). Kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* zabeležen je veći sadržaj Cd, s tim da je kod *T. kovatsii* koncentracija Cd bila veća u podzemnim ($\leq 7,86$ mg kg⁻¹) u odnosu na nadzemne delove ($\leq 4,47$ mg kg⁻¹), pretpostavlja se zbog izražene sekvestracije ovog elementa u vakuolama ćelija korena (Martos et al., 2016). Sličan obrazac usvajanja i translokacije Cd konstatovan je i kod populacija vrste *T. praecox* sa serpentinitičkih staništa Srbije koje hiperkumuliraju Ni (Mišljenović et al., 2018), bez obzira što je dokazano da *T. praecox* hiperakumulira Cd kada se uzgaja na zemljištima kontaminiranim ovim elementom (Vogel-Mikuš, Drobne, & Regvar, 2005), a takođe i u eksperimentalnim uslovima pri izlaganju velikim količinama Cd u medijumu za gajenje (Xing et al., 2008; Pongrac, Zhao, Razinger, Zrimec, & Regvar, 2009). Osim kod *T. praecox*, sposobnost akumulacije Cd u nadzemnim delovima preko vrednosti praga od 100 mg kg⁻¹ kojim se definiše njegova hiperakumulacija (Van der Ent et al., 2013), eksperimentalno je potvrđeno i za Ni hiperakumulatorsku vrstu *T. goesingense* pri izlaganju velikim količinama Cd u medijumu za gajenje (Lombi, Zhao, Dunham, & McGrath, 2000). S obzirom da vrsta *T. kovatsii* iz Bosne i Hercegovine efikasno usvaja Cd, čak i pri ne toliko visokim koncentracijama u podlozi, u daljim istraživanjima koja uključuju binarno izlaganje različitim metalima potrebno je detaljnije ispitati njegov akumulacioni potencijal za ovaj element. Isto važi i za vrstu *L. campestre* kod koje su u ovom radu zabeležene ujednačene koncentracije u podzemnim i nadzemnim organima, odnosno prosečno 3,52 mg kg⁻¹ Cd u podzemnim i 3,92 mg kg⁻¹ Cd u nadzemnim organima.

Koncentracija olova u zemljištu sa istraživanih serpentinitičkih lokaliteta u Bosni i Hercegovini (prosečno $55,8 \text{ mg kg}^{-1}$) je bila viša od proseka za nezagađena staništa (27 mg kg^{-1}) (Kabata-Pendias, 2011). Istraživanja su pokazala da su koncentracije Pb kod vrsta *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* bile više u odnosu na biljke koje rastu na prirodno nezagađenim mestima, a kod kojih njegov sadržaj obično ne prelazi 10 mg kg^{-1} (Zitka *et al.*, 2013). Koncentracija Pb u korenu vrste *T. kovatsii* (prosečno $42,1 \text{ mg kg}^{-1}$) koja se karakterisala najvećim ukupnim sadržajem olova među istraživanim vrstama, bila je iznad praga toksičnosti za ovaj element (28 mg kg^{-1}) (Krämer, 2010). Kod srodne vrste *T. praecox* sa zagađenih zemljišta u blizini rudnika i topionice olova u Sloveniji koja sadrže izuzetno visoke koncentracije Zn, Cd i Pb, osim hiperakumulacije Zn i Cd, sa povećanjem ukupnog Pb u podlozi konstatovano i eksponencijalno povećanje sadržaja ovog elementa u biljkama (Vogel-Mikuš *et al.*, 2005). Navedeno povećanje rezultuje hiperakumulacijom Pb, odnosno koncentracijama koje prevazilaze prag od 1000 mg kg^{-1} kojim se definiše hiperakumulacija ovog elementa (Van der Ent *et al.*, 2013), i to kako u podzemnim, tako i nadzemnim delovima biljke (Vogel-Mikuš *et al.*, 2005). Međutim, bez obzira na visok sadržaj u nadzemnim delovima, kod *T. praecox* sa zagađenih staništa iz Slovenije se čak 80% Pb ipak zadržava u korenu (Vogel-Mikuš *et al.*, 2005), zato što je njegova mobilnost u biljkama relativno niska (Gupta, Huang, & Corpas, 2013). Zbog toga autori navode da je isključivanje na nivou korena osnovni mehanizam tolerancije ovog toksičnog metala kod *T. praecox* (Vogel-Mikuš *et al.*, 2005), odnosno da se ova vrsta prema Bejkeru može okarakterisati kao ekskluder olova (Baker, 1981; Dinh, Van der Ent, Mulligan, & Nguyen, 2018). Inače, kod *T. praecox* sa serpentinitičkih staništa u Srbiji koja sadrže nešto manje Pb nego ona u Bosni i Hercegovini, kontsatovane koncentracije Pb u biljnim organima bile su ispod 10 mg kg^{-1} (Mišljenović *et al.*, 2018). Niži sadržaj Pb u biljkama u odnosu na populacije analizirane u ovom radu zabeležen je, takođe, i za vrstu *A. murale* sa ultramafita Srbije i Kosova (Tumi *et al.*, 2012; Salihaj *et al.*, 2018).

5.3 Procena akumulacionog potencijala istraživanih biljnih vrsta

Biljke koje žive na zemljištima koja se karakterišu povećanim sadržajem potencijalno toksičnih metala, kao što je to slučaj sa onim na serpentinitskoj podlozi, koriste dve različite strategije za prevazilaženje ovog problema (Ghasemi et al., 2009). Većina vrsta odlikuje se strategijom isključivanja kojom se sprečava prekomerni unos metala u nadzemni deo biljke (Ghasemi et al., 2009) i one se prema Bejkeru mogu označiti kao ekskluderi (Baker, 1981). Određene biljke na edafski stres izazvan prekomernom koncentracijom potencijalno toksičnih metala u podlozi odgovaraju njihovom akumulacijom i detoksikacijom u nadzemnim delovima (Ghasemi et al., 2009) i one se prema Bejkeru nazivaju akumulatorima (Baker, 1981). U ekstremnim slučajevima, kada se određeni elementi akumuliraju u nadzemnim delovima biljaka u izuzetno velikim koncentracijama koje prevazilaze određeni prag bez ispoljavanja simptoma toksičnosti, vrste se još označavaju kao hiperakumulatori (Krämer, 2010). Obe navedene grupe biljaka, kako ekskluderi, tako i akumulatori mogu da imaju potencijalnu primenu u fitoremedijaciji, prva u fitostabilizaciji, to jest prevođenju metala u oblike koji nisu fito- ili biodostupni, a druga u fitoekstrakciji, to jest upotrebi biljaka za uklanjanje potencijalno toksičnih metala iz zemljišta (Prasad & Freitas, 2003; Robinson, Bañuelos, Conesa, Evangelou, & Schulin, 2009; Chaney, Baker, & Morel, 2018). Osim toga, biljke akumulatori, a posebno hiperakumulatori, mogu da se koriste i za agromajning, tj. fitomajning, koji podrazumeva uzgoj biljaka koje izvlače metale iz zemljišta kao alternativna poljoprivredna tehnologija u cilju njihovog komercijalnog iskorišćavanja (Robinson et al., 2009; Nkrumah et al., 2016; Chaney et al., 2018).

Za procenu strategije i akumulacionog potencijala tri istraživane vrste iz porodice Brassicaceae, *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* sa serpentinitskih staništa u Bosni i Hercegovini za ispitivane metale u tragovima, kao i toksične metale korišćeni su indeksi bioakumulacije, odnosno faktori biokoncentracije (BCF) i translokacije (TF) koji se izračunavaju na osnovu izmerenih koncentracija navedenih elemenata u zemljištu i biljkama (Nouri et al., 2009). Biokoncentracioni faktori (BCF), koji se definišu kao odnosi koncentracije metala u korenu (BCF_k) ili nadzemnom delu biljke (BCF_{s+1}) i dostupne količine u zemljištu, ukazuju na njenu sposobnost da usvaja metale iz podloge, dok translokacioni faktor (TF), koji se definiše kao odnos koncentracije metala u podzemnim i nadzemnim organima, ukazuje na sposobnost biljke da premešta metale iz korena ka listovima (Yoon, Cao, Zhou, & Ma, 2006). Biljke sa visokim vrednostima biokoncentracionog (BCF_k), a niskim translokacionog faktora (TF) mogu da se koriste za fitostabilizaciju, dok biljke sa BCF i TF vrednostima koje su veće od 1,00 mogu da se koriste za fitoekstrakciju i fitomajning (Nouri et al., 2009).

Najistaknutiji potencijal akumulacije u ovoj disertaciji, i to kod sve tri istraživane vrste na svim lokalitetima zabeležen je za nikel. Na osnovu podataka iz istraživanja koja su pokazala da su kod sve tri vrste na svim lokacijama koncentracije Ni daleko prevazišle njegov dostupni sadržaj u podlozi, da su koncentracije u nadzemnim delovima biljaka bile veće od praga kojim se definiše hiperakumulacija ovog elementa (1000 mg kg^{-1}) (Van der Ent et al., 2013) i da su sve izračunate vrednosti BCF_k , BCF_{s+1} i TF bile veće od 1,00, zaključuje se da se vrste *A. murale*, *T.*

kovatsii i *L. campestre* mogu svrstati u hiperakumulatore ovog elementa, odnosno vrste koje konstantno održavaju visok sadržaj Ni u nadzemnim organima u širokom rasponu njegovih koncentracija u podlozi (Baker, 1981; Van der Ent et al., 2013). Međutim, u odnosu na dobijene vrednosti faktora biokoncentracije i translokacije, za istraživane vrste sa serpentinitičkih staništa u Bosni i Hercegovini se, ipak, uočava gradijent potencijala za akumulaciju Ni i to u poretku *A. murale* > *T. kovatsii* > *L. campestre*. Tolerancija izuzetno visokih koncentracija Ni kod navedenih vrsta, a koje su inače toksične za većinu biljaka, obezbeđuje se vakuolarnom sekvestracijom ovog elementa u ćelijama epidermisa (Tappero et al., 2007). Za vrstu *A. murale* potvrđeno je da se značajna količina Ni akumulira i u bazalnim delovima trihoma na listovima (Broadhurst & Chaney, 2016). Imajući u vidu rezultate dobijene u ovoj disertaciji, zatim biološke karakteristike samih istraživanih vrsta, kao i činjenicu da se uzgoj *A. murale* za potrebe komercijalnog dobijanja nikla već testira u praksi (Bani, Echevarria, Sulçe, & Morel, 2015), ova vrsta i u Bosni i Hercegovini predstavlja najboljeg kandidata za primenu tehnologije agromajninga, tj. fitomajninga nikla na lokalnom nivou.

Bez obzira na izraženu varijabilnost u saržaju mangana koja je posebno karakteristična za *A. murale* (Broadhurst & Chaney, 2016), za svaku od istraživanih vrsta na svim lokacijama konstatovani su uniformni obrasci usvajanja i translokacije Mn. Kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* BCF_k , BCF_{s+1} i TF bili su manji od 1,00 što ukazuje da se radi o vrstama koje kontrolišu usvajanje Mn na nivou korena održavajući konstatnim njegov sadržaj u nadzemnom delu, i to u širokom rasponu koncentracija ovog elementa u zemljištu (Kazakou et al., 2010). Vrste *T. kovatsii* i *L. campestre* se prema Bejkeru mogu okarakterisati kao ekskluderi mangana (Baker, 1981). Kod vrste *A. murale* su BCF_k , i BCF_{s+1} takođe bili manji od 1,00 na svim lokalitetima, dok su TF vrednosti bile veće od 1,00 i tek neznatno niže od translokacionog faktora za Ni. Kod vrste *A. murale* je izražena prostorna povezanost ovih elemenata u nadzemnom delu biljke koji se zajedno akumuliraju u u bazalnim delovima trihoma na listovima, kao i kompeticija za usvajanje na nivou korenovog sistema, jer Mn i Ni verovatno koriste iste nespecifične transportere (Broadhurst et al., 2009; Ghaderian et al., 2015; Broadhurst & Chaney, 2016).

Kao što je već ranije istaknuto, zbog svoje izuzetno male pokretljivosti Cr se relativno slabo usvaja i ne prenosi u nadzemne delove biljke, već se uglavnom zadržava u vakuolama ćelija korena, čime se smanjuje njegova toksičnost (Shanker et al., 2005). Ovakav obrazac usvajanja i translokacije Cr potvrđen je i kod vrsta *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* sa serpentinitičkih staništa Bosne i Hercegovine, s obzirom da su, kod sve tri vrste na većini istraživanih lokaliteta, BCF_k , BCF_{s+1} bili veći od 1,00, a TF manji od 1,00. Na osnovu dobijenih rezultata istraživane vrste se mogu svrstati u ekskludere hroma (Baker, 1981).

Kada se analizira koncentracija kobalta u istraživanim vrstama sa serpentinitičkih staništa u Bosni i Hercegovini zaključuje se da su pokazale različiti potencijal za njegovu akumulaciju i translokaciju kroz biljku. Kod vrste *A. murale* na većini lokaliteta BCF_k je bio manje od 1,00, za razliku od vrednosti BCF_{s+1} i TF koje su preovlađujuće bile veće od 1,00, ukazujući na efikasno usvajanje i translokaciju Co u nadzemne delove biljke, odnosno akumulaciju Co koja je zavisna od dostupne količine ovog elementa u podlozi (Lange et al., 2016). Kod vrste *A. murale* je

potvrđeno da se Co akumulira na vrhovima i ivicama listova (Tappero et al., 2007). S druge strane, kod vrste *T. kovatsii* konstatovan je suprotan obrazac u odnosu na vrstu *A. murale*, BCF_k je na svim lokalitetima bio veći od 1,00, dok su vrednosti BCF_{s+1} na većini, a TF na svim lokalitetima bile manje od 1,00, ukazujući na isključivanje Co na nivou korena kod ove vrste. Za *L. campestre* konstatovan je još ekstremniji slučaj isključivanja, s obzirom da su na samo jednom lokalitetu konstatovani BCF_k , i BCF_{s+1} koji su bili veći od 1,00.

Različiti odnos istraživane biljne vrste sa serpentinita Bosne i Hercegovine imale su i prema cinku. Kod vrste *A. murale* na većini lokaliteta BCF_k , BCF_{s+1} i TF bili su manji od 1,00, što ukazuje da ova vrsta kontroliše usvajanje Zn na nivou korena zbog čega se može svrstati u ekskludere ovog elementa (Baker, 1981). Nasuprot, vrste *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* pokazale su se kao akumulatori Zn s obzirom da su na svim lokalitetima, osim jednog za *L. campestre*, BCF_k , BCF_{s+1} i TF bili veći od 1,00, s tim da je akumulacioni potencijal vrste *T. kovatsii* za Zn značajno veći nego kod *L. campestre*. Uzimajući u obzir konkretan Zn usvojen od strane *T. kovatsii* ($\leq 602 \text{ mg kg}^{-1}$ u podzemnim, odnosno $\leq 1120 \text{ mg kg}^{-1}$ u nadzemnim delovima), može se reći da je ova vrsta sa serpentinitskih staništa u Bosni i Hercegovini jak akumulator cinka (Kazakou et al., 2010). Pretpostavlja se da se Zn kod istraživanih vrsta akumulira u vakuolama epidermalnih ćelija sledeći sličan obrazac kao i Ni (Küpper et al., 2001; Tappero et al., 2007).

Dostupne koncentracije bakra, kadmijuma i olova u zemljištu bile su ispod granica detekcije na većini istraživanih lokaliteta, tako da se za vrste *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* nisu mogle izračunati sve vrednosti biokoncentracionih faktora za ove elemente. Dobijene vrednosti faktora translokacije za Cu, Cd i Pb koje su kod *A. murale* bile veće od 1,00 na svim lokalitetima, ukazuju na njihov efikasni prenos iz korena u nadzemne delove kod ove vrste. S druge strane, za *T. kovatsii* i *L. campestre* je i TF za Cu, Cd i Pb na većini lokacija bio manji od 1,00, ukazujući da se navedeni elementi kod ove dve vrste zadržavaju na nivou korena, odnosno da se one, prema Bejkeru, mogu okarakterisati kao ekskluderi ovih elemenata (Baker, 1981), što se u literaturi i navodi kao uobičajena strategija biljaka za ove elemente (Lange et al., 2016).

6. ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata analiza fizičkih i hemijskih karakteristika zemljišta sa deset istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini zaključuje se da ispitivana zemljišta pripadaju tipičnim serpentinitiskim zemljištima koja se formiraju na ultramafitskoj geološkoj podlozi.

Rezultati granulometrijske analize zemljišta upućuju da je procentualno učešće frakcije najsitnijih čestica prečnika manjeg od 0,075 mm manje od 50%. Na osnovu dobijenih rezultata zaključuje se da istraživana zemljišta pripadaju krupno-zrnastom tipu zemljišta, odnosno peskovitoj ilovači.

U osam od deset analiziranih uzoraka zemljišta iz Bosne i Hercegovine rezultati merenja aktivne kiselosti ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) pokazuju da je $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ od blago bazne do bazne (7,56 – 8,60).

U svim ispitivanim uzorcima zemljišta iz Bosne i Hercegovine u ovom istraživanju sadržaj organske materije, humusa i esencijalnih nutrijenata (P, K) je izuzetno nizak, što je i jedna od osnovnih karakteristika serpentinitiskog zemljišta.

Osim toga, rezultati analiziranih uzoraka zemljišta pokazuju da je sadržaj raspoloživog kalcijuma od 112 do 2420 mg kg^{-1} , dostupnog magnezijuma od 411-4257 mg kg^{-1} i da je odnos Ca /Mg manji od 1,00 na devet od deset istraživanih lokaliteta.

U svim ispitivanim uzorcima tla iz Bosne i Hercegovine koncentracija gvožđa, ukupnih i dostupnih metala u tragovima je visoka, što je jedna od odlika serpentinskog zemljišta.

Kada se upoređi sadržaj bakra i cinka analiziranog zemljišta iz Bosne i Hercegovine sa zemljištem sveta, rezultati u disertaciji pokazuju da je sadržaj ukupnog bakra i cinka u analiziranim uzorcima prosečan u odnosu na svet, dok je sadržaj dostupnog bakra i cinka neznatno niži. Pretpostavlja se da je ovo posledica viših vrednosti aktivne kiselosti zemljišta.

Povišen sadržaj olova i kadmijuma u analiziranom zemljištu u uzorcima sakupljenim u blizini puteva i naseljenih mesta, govori o antropogenom uticaju. Antropogeno poreklo ovih elemenata u analiziranim uzorcima potvrđuju i rezultati analize osnovnih komponenti koja na istraživanim lokalitetima jasno izdvaja elemente litogenog, od onih antropogenog porekla, među kojima se posebno izdvajaju Cd i Pb.

Rezultati Kruskal–Wallis H testa pokazali su da se svi mereni parametri koji određuju fizičke i hemijske karakteristike analiziranih uzoraka zemljišta sa istraživanih ultramafitskih lokaliteta u Bosni i Hercegovini međusobno razlikuju ukazujući na značaj lokalnih klimatskih faktora na pedogenetske procese.

Na osnovu rezultata analiza sadržaja elemenata i njihovih međusobnih odnosa u istraživanim biljnim vrstama, zaključuje se da tri istraživane vrste iz porodice Brassicaceae,

Alyssum murale, *Thlaspi kovatsii* i *Lepidium campestre*, na svojim staništima u Bosni i Hercegovini uspešno prevazilaze specifične izazove edafskog stresa koji nameće serpentinitiska podloga, a među kojima su najvažniji mala dostupnost kalcijuma u odnosu na magnezijum, nedostatak esencijalnih makronutrijenata, kao i visoke koncentracije potencijalno fitotoksičnih metala kao što su Ni, Cr, Co i Mn.

Istraživanja u disertaciji pokazuju da su se ispitivane vrste različito prilagodile životu na staništima sa nepovoljnim odnosom kalcijuma i magnezijuma. Rezultati istraživanja pokazuju da su kod vrste *A. murale* prisutni mehanizmi za selektivno usvajanje veće količine Ca u odnosu na Mg, iako je odnos Ca/Mg manji od 1,0 u zemljištu, i da je efikasnija translokacija Ca u odnosu na Mg u samoj biljci. Kod vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* rezultati istraživanja upućuju da ove dve vrste usvajaju više Mg u odnosu na Ca, tolerišući visoke koncentracije ovog elementa u svojim tkivima.

Analiziranjem rezultata zaključuje se da je koncentracija gvožđa visoka u svim ispitivanim vrstama. Istraživanja su pokazala da je u listovima najviše gvožđa izmereno kod vrste *A. murale*, a u vrstama *T. kovatsii* i *L. campestre* u korenu.

Kod sve tri istraživane vrste utvrđene su veoma visoke koncentracije nikla koje prevazilazile dostupnu koncentraciju ovog elementa u zemljištu. Izmerene koncentracije u nadzemnim organima kod sve tri istraživane vrste prevazilaze prag od 1000 mg kg⁻¹ kojim se definiše hiperakumulacija nikla kod biljaka. Rezultati ukazuju da su vrste *A. murale* i *T. kovatsii* hiperakumulatori Ni.

Rezultati prikazani u disertaciji pokazuju da jedinke vrste *L. campestre* iz populacija koje žive na serpentinitskom zemljištu u Bosni i Hercegovini imaju potencijal za hiperakumulaciju Ni i to je novina u odnosu na postojeće podatke za ovu vrstu u svetu.

Vrednosti faktora biokoncentracije (BCF) i translokacije (TF) za istraživane vrste sa serpentinitskih staništa Bosne i Hercegovine upućuju na zaključak da postoji gradijent potencijala za akumulaciju Ni u poretku *A. murale* > *T. kovatsii* > *L. campestre*. U disertaciji je pokazano da vrsta *A. murale* ispoljava najizraženiju hiperakumulaciju Ni, izraženu toleranciju u odnosu na povišene koncentracije analiziranih toksičnih metala u zemljištu i najveću biomasu. To ukazuje da vrsta *A. murale* predstavlja najperspektivnijeg kandidata za fitoekstrakciju Ni iz zagađenih zemljišta, i da ima najveći potencijal za primenu u tehnologiji agromajninga, tj. fitomajninga nikla na lokalnom nivou.

Istraživane vrste, analizirane u disertaciji usvajaju nižu koncentraciju mangana u odnosu na dostupnu koncentraciju ovog elementa u zemljištu i pokazuju različiti odnos prema ovom elementu. Ispitivane jedinke iz populacija vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* sa serpentinitskih staništa Bosne i Hercegovine mogu se okarakterisati kao ekskluderi Mn, jer kontrolišu usvajanje ovog elementa zadržavajući ga na nivou korenovog sistema. Za razliku od vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre*, rezultati disertacije pokazuju da vrsta *A. murale* najveći procenat usvojenog Mn prenosi u nadzemni deo biljke i akumulira u listovima.

Rezultati istraživanja upućuju na zaključak da je kod sve tri istraživane vrste sa serpentinitičkih staništa Bosne i Hercegovine konstatovan uobičajeni sadržaj hroma za biljke koje žive na ovom tipu podloge. Na osnovu izračunatih vrednosti faktora biokoncentracije (BCF) i translokacije (TF) zaključuje se da vrste *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* pripadaju ekskluderima ovog elementa, jer usvojeni Cr ne transportuju u nadzemne organe, već zadržavaju na nivou korenovog sistema.

Kod jedinki vrste *A. murale* iz populacija sa serpentinitičkih staništa Bosne i Hercegovine izmerene su relativno visoke koncentracije kobalta, koje su bile proporcionalne višim koncentracijama ovog elementa u zemljištu. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se usvojeni Co kod analiziranih jedinki *A. murale* efikasno transportuje iz korena u nadzemni deo biljke i akumulira u listovima. Rezultati iz disertacije upućuju da, za razliku od vrste *A. murale*, vrste *T. kovatsii* i *L. campestre* iz zemljišta usvajaju mnogo veću koncentraciju kobalta, ali i da ga ne transportuju u nadzemne delove biljke, već akumuliraju na nivou korenovog sistema. Zbog svega navedenog zaključuje se da se vrste *T. kovatsii* i *L. campestre* sa serpentinitičkih staništa Bosne i Hercegovine mogu koristiti za fitostabilizaciju zemljišta zagađenih kobaltom.

Dobijeni rezultati u ovoj disertaciji ukazuju da se istraživane vrste sa serpentinitičkih staništa u Bosni i Hercegovini odlikuju različitim odnosom prema cinku, to jest, da vrste *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* ispoljavaju različite obrasce usvajanja i translokacije ovog elementa. U populacijama vrste *A. murale* izmerene su niske i ujednačene koncentracije cinka, kako u korenu, tako i u nadzemnom delu biljke, bez obzira na relativno visok sadržaj Zn u podlozi. Na osnovu navedenog zaključuje se da se jedinke iz analiziranih populacija vrste *A. murale* mogu okarakterisati kao ekskluderi cinka. Rezultati ukazuju i da analizirane jedinke iz populacija vrste *L. campestre*, a posebno vrste *T. kovatsii* iz zemljišta usvajaju izuzetno velike koncentracije cinka, koji se efikasno transportuje kroz biljku, tako da znatne količine ovog elementa akumuliraju u nadzemnim organima. Znajući da izmerene koncentracije Zn u nadzemnim delovima *T. kovatsii* ne prelaze granicu od 3000 mg kg^{-1} , kojom se definiše hiperakumulacija ovog elementa kod biljaka, zaključuje se da se vrsta *T. kovatsii* sa prostora Bosne i Hercegovine može označiti kao jak akumulator cinka i da se može koristiti za fitostabilizaciju zagađenih zemljišta.

Kod sve tri istraživane vrste sa serpentinitičkih staništa u Bosni i Hercegovini izmerene su niske koncentracije bakra koje su bile proporcionalne njegovoj koncentraciji u podlozi i u rasponu optimalnih vrednosti za biljke. U najvećem broju analiziranih populacija najveće koncentracije beleže se u korenu, tako da se vrste *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* iz Bosne i Hercegovine mogu označiti kao ekskluderi bakra.

Izmerene koncentracije kadmijuma u populacijama vrsta *A. murale*, *T. kovatsii* i *L. campestre* sa serpentinita Bosne i Hercegovine, bile su veće kako od dostupnih tako i ukupnih koncentracija ovog elementa u zemljištu. Kod vrste *A. murale* izmerena je nešto viša koncentracija Cd u listovima, dok je u analiziranim populacijama vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* izraženo efikasno usvajanje i akumulacija ovog elementa na nivou korenovog sistema. Na osnovu rezultata koji pokazuju da vrste *T. kovatsii* i *L. campestre* iz Bosne i Hercegovine

efikasno usvajaju Cd i pri njegovim relativno niskim koncentracijama u podlozi, zaključuje se da bi se ove dve vrste potencijalno mogle koristiti za fitostabilizaciju zemljišta zagađenih ovim toksičnim metalom.

Rezultati su pokazali povećane koncentracije olova u zemljištu, pri čemu su kod sve tri istraživane vrste izmerene više koncentracije ovog elementa u odnosu na prosečan sadržaj u biljkama koje rastu na prirodno nezagađenim mestima. Rezultati merenja koncentracije Pb u ispitivanim vrstama, kao i u slučaju kadmijuma, kod vrste *A. murale* pokazuju da su u nadzemnim organima izmerene nešto više koncentracije Pb u odnosu na korenove, dok su u analiziranim populacijama vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* najviše koncentracije u korenovima. Na osnovu svega navedenog, zaključuje se da se analizirane populacije vrsta *T. kovatsii* i *L. campestre* mogu okarakterisati kao ekskluderi olova i iskoristiti za fitostabilizaciju zemljišta zagađenih ovim elementom.

Na osnovu dobijenih rezultata u ovoj disertaciji može se zaključiti da sve tri istraživane vrste iz porodice Brassicaceae, *Alyssum murale*, *Thlaspi kovatsii* i *Lepidium campestre*, imaju potencijal za fitostabilizaciju zemljišta opterećenih toksičnim metalima koji su tipično prisutni u visokim koncentracijama na ultramafitskoj podlozi, poput nikla, hroma, kobalta i mangana, ali takođe i cinka, kadmijuma i olova.

Zaključuje se da se kao potvrđeni hiperakumulatori nikla, istraživane vrste mogu koristiti za fitoekstrakciju i komercijalno dobijanje ovog metala koristeći tehnologiju agromajninga, tj. fitomajninga. Poznato je da je u praksi već testirano gajenje vrste *A. murale* za potrebe komercijalnog dobijanja nikla, a zaključuje se, na osnovu svih prikazanih rezultata, da analizirane populacije ove vrste iz u Bosne i Hercegovine, predstavljaju najbolje kandidate za primenu ove nove tehnologije na lokalnom nivou.

7. LITERATURA

- Abou-Shanab, R., Van Berkum, P., & Angle, J. (2007). Heavy metal resistance and genotypic analysis of metal resistance genes in gram-positive and gram-negative bacteria present in Ni-rich serpentine soil and in the rhizosphere of *Alyssum murale*. *Chemosphere*, 68: 360–367.
- Alexander, E., Coleman, R., Keeler-Wolf, T., & Harrison, S. (2007). *Serpentine geoecology of Western North America: geology, soils, and vegetation*. New York: Oxford University Press.
- Alexander, E. B., & DuShey, J. (2011). Topographic and soil differences from peridotite to serpentinite. *Geomorphology*, 135(3-4), 271-276.
- Alexander, M. (2000). Aging, bioavailability, and overestimation of risk from environmental pollutants. *Environmental science & technology*, 34(20), 4259-4265.
- Alloway, B. J. (2013). Sources of heavy metals and metalloids in soils. In B. Alloway (ed) *Heavy metals in soils* (pp. 11-50). Springer, Dordrecht
- Al-Shehbaz, I. (1986). The genera of Lepidieae (Cruciferae; Brassicaceae) in the southeastern United States. *Journal of the Arnold Arboretum*, 67(3), 265-311.
- Al-Shehbaz, I. A., Beilstein, M. A., & Kellogg, E. A. (2006). Systematics and phylogeny of the Brassicaceae (Cruciferae): An overview. *Plant Systematics and Evolution*, 259(2–4), 89–120.
- Alves, S., Ascensão Trancoso, M., Simões Gonçalves, M. de L., & Correia dos Santos, M. M (2011). A nickel availability study in serpentinised areas of Portugal. *Geoderma*, 164(3-4), 155-163.
- Appel, O., & Al-Shehbaz, I. A. (2003). Cruciferae. In Kubitzki K., Bayer C. (eds.) *The families and genera of vascular plants* (pp. 75–174). Springer, Berlin.
- Asemaneh, T., Ghaderian, S. M., & Baker, A. J. M. (2007). Responses to Mg/Ca balance in an Iranian serpentine endemic plant, *Cleome heratensis* (Capparaceae) and a related non-serpentine species, *C. foliolosa*. *Plant and Soil*, 293(1-2), 49-59.
- Asemaneh, T., Ghaderian, S. M., Crawford, S. A., Marshall, A. T., & Baker, A. J. M. (2006). Cellular and subcellular compartmentation of Ni in the Eurasian serpentine plants *Alyssum bracteatum*, *Alyssum murale* (Brassicaceae) and *Cleome heratensis* (Capparaceae). *Planta*, 225(1), 193–202.

- Assunção, A. G. L., Bleeker, P., ten Bookum, W. M., Vooijs, R., & Schat, H. (2008). Intraspecific variation of metal preference patterns for hyperaccumulation in *Thlaspi caerulescens*: Evidence from binary metal exposures. *Plant and Soil*, 303(1–2), 289–299.
- Assunção, A. G., Schat, H., & Aarts, M. G. (2003). *Thlaspi caerulescens*, an attractive model species to study heavy metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist*, 159(2), 351–360.
- ASTM (2011). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. ASTM D2487, West Conshohocken, PA.
- Aubouin, J. (1973). Des tectoniques superposées et de leur signification par rapport aux modèles géophysiques: l'exemple des Dinarides; paléotectonique, tectonique, tarditectonique, neotectonique. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 7(15): 428–459.
- Aubouin, J., Blanchet, R., Cadet, J.-P., Charvet, J., Chorowisz, J., Cousin, & Rampnoux, J.-P. (1970). Essai sur la géologie des Dinarides. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 7(12): 1060–1095.
- Baker, A. (1981). Accumulators and excluders - strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3: 643–654.
- Baker, A., & Brooks, R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1: 81–126.
- Ball, P. W. & Dudley, T. R. (1964). *Alyssum* L. – In: Tutin, T. G. et al. (eds), *Flora of Europeae. Vol. 1. Lycopodiaceae to Platanaceae*. Cambridge Univ. Press, pp. 359–369.
- Bani, A., Echevarria, G., Sulçe, S., & Morel, J. L. (2015). Improving the agronomy of *Alyssum murale* for extensive phytomining: a five-year field study. *International Journal of Phytoremediation*, 17: 117–127.
- Bani, A., Pavlova, D., Echevarria, G., Mullaj, A., Reeves, R. D., Morel, J. L., & Sulçe, S. (2010). Nickel hyperaccumulation by the species of *Alyssum* and *Thlaspi* (Brassicaceae) from the ultramafic soils of the Balkans. *Botanica Serbica*, 34(1), 3–14.
- Basu, M., Bhattacharya, S., & Paul, A. K. (1997). Isolation and characterization of chromium-resistant bacteria from tannery effluents. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 58 (4): 535–542.
- Bonet, A., Poschenrieder, C., & Barcelo, J. (1991). Chromium III-iron interaction in Fe-deficient and Fe-sufficient bean plants. I. Growth and nutrient content. *Journal of Plant Nutrition*, 14: 403–414.
- Boyd, R. S., & Martens, S. N. (1998). Nickel hyperaccumulation by *Thlaspi montanum* var. *montanum* (Brassicaceae): a constitutive trait. *American journal of botany*, 85(2), 259–265.

- Brady, K. U., Kruckeberg, A. R., & Bradshaw Jr, H. D. (2005). Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils. *Annual review of ecology, evolution, and systematics.*, 36, 243-266.
- Broadhurst, C. L., Chaney, R. L., Angle, J. S., Mangel, T. K., Erbe, E. F., & Murphy, C. A. (2004). Simultaneous hyperaccumulation of nickel, manganese and calcium in *Alyssum* leaf trichomes. *Environmental Science and Technology*, 38: 5797–5802.
- Broadhurst, C. L., Tappero, R. V., Mangel, T. K., Erbe, E. F., Sparks, D. L., & Chaney, R. L. (2009). Interaction of nickel and manganese in accumulation and localization in leaves of the Ni hyperaccumulators *Alyssum murale* and *Alyssum corsicum*. *Plant and Soil*, 314(1-2), 35-48.
- Broadhurst, C., & Chaney, R. (2016): Growth and Metal Accumulation of an *Alyssum murale* Nickel Hyperaccumulator Ecotype Co-cropped with *Alyssum montanum* and Perennial Ryegrass in Serpentine Soil. *Frontiers in plant science*, 7: 451.
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New phytologist*, 173(4), 677-702
- Brooks, R. (1987). *Serpentine and Its Vegetation: a Multidisciplinary Approach*. Portland: Dioscorides Press.
- Brooks, R. (1998). *Plants that hyperaccumulate heavy metals*. CAB International. Cambridge: University Press.
- Brooks, R. R., Lee, J., Reeves, R. D., & Jaffré, T. (1977). Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration*, 7: 49-57.
- Brooks, R. R., Morrison, R. S., Reeves, R. D., Dudley, T. R., & Akman, Y. (1979). Hyperaccumulation of Nickel by *Alyssum* Linnaeus (Cruciferae). *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 203(1153), 387–403.
- Brooks, R., & Radford, C. (1978). Nickel accumulation by European species of the genus *Alyssum*. *The Royal Society publishing*, B200: 217-224.
- Brooks, R., & Yang, X. (1984). Elemental levels and relationships in the endemic serpentine flora of the Great Dyke, Zimbabwe, and their significance as controlling factors for the flora. *Taxon*, 33: 392–399.
- Burt, R., Fillmore, M., Wilson, M. A., Gross, E. R., Langridge, R. W., & Lammers, D. A. (2001). Soil properties of selected pedons on ultramafic rocks in Klamath Mountains, Oregon. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(13–14), 2145–2175.
- Cabello-Conejo, M., Becerra-Castro, C., Prieto-Fernández, A., Monterroso, C., Saavedra-Ferro, A., Mench, M. & Kidd, P.S. (2014). Rhizobacterial inoculants can improve nickel phytoextraction by the hyperaccumulator *Alyssum pintodasilvae*. *Plant Soil*, 379: 35–50.

- Cannat, M., Fontaine, F., & Escartín, J. (2010). Serpentinization and associated hydrogen and methane fluxes at slow spreading ridges. In: Rona, P.A., Devey, C.W., Dymont, J., Murton, B.J. (eds.) *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*. American Geophysical Union Geophysical Monograph 188, pp. 241-264.
- Cecchi, L., Gabbriellini, R., Arnetoli, M., Gonnelli, C., Hasko, A., & Selvi, F. (2010). Evolutionary lineages of nickel hyperaccumulation and systematics in European *Alyseae* (Brassicaceae): evidence from nrDNA sequence data. *Annals of Botany*, 106: 751-767.
- Centofanti, T., Sayers, Z., Cabello-Conejo, M., Kidd, P., Nishizawa, N., Kakei, Y., Davis, A.P., Sicher, R.C. & Chaney, R.L. (2013). Xylem exudate composition and root-to-shoot nickel translocation in *Alyssum* species. *Plant Soil*, 373: 59–75.
- Chaney, R. L., Baker, A. J., & Morel, J. L. (2018). The long road to developing agromining/phytomining. In Van der Ent, A., Echevarria, G., Baker, A.J.M., Morel, J.L. (eds.), *Agromining: farming for metals* (pp. 1-17). Springer, Cham.
- Chardot, V., Echevarria, G., Gury, M., Massoura, S., & Morel, J. L. (2007). Nickel bioavailability in an ultramafic toposequence in the Vosges Mountains (France). *Plant and Soil*, 293(1-2), 7-21.
- Chen, P. S., Toribara, T. Y., & Warner, H. (1956). Microdetermination of phosphorus. *Analytical Chemistry*, 28: 1756–1758.
- Chen, Z. C., Peng, W. T., Li, J., & Liao, H. (2018). Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. *Seminars in cell & developmental biology*, 74, 142-152.
- Cheng, C. H., Jien, S. H., Tsai, H., Chang, Y. H., Chen, Y. C., & Hseu, Z. Y. (2009). Geochemical element differentiation in serpentine soils from the ophiolite complexes, eastern Taiwan. *Soil Science*, 174(5), 283-291.
- Chiarucci, A. (2004). Vegetation ecology and conservation on Tuscan ultramafic soils. *Botanical Review*, 69: 252–268.
- Chrysochoou, M., Theologou, E., Bompoti, N., Dermatas, D., & Panagiotakis, I. (2016). Occurrence, origin and transformation processes of geogenic chromium in soils and sediments. *Current Pollution Reports*, 2(4), 224-235.
- Clarkson, D. T., & Hanson, J. B. (1980). The Mineral Nutrition of Higher Plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 31, 239–298.
- Condit, R., Engelbrecht, B. M., Pino, D., Pérez, R., & Turner, B. L. (2013). Species distributions in response to individual soil nutrients and seasonal drought across a community of tropical trees. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(13), 5064-5068.
- Deng, T. H. B., van der Ent, A., Tang, Y. T., Sterckeman, T., Echevarria, G., Morel, J-L., & Qiu, R. L. (2018). Nickel hyperaccumulation mechanisms: a review on the current state of knowledge. *Plant and Soil* 423, 1–11.

- Deng., T., Tang, Y. T., Sterckeman, T., Echevarria, G., Morel, J. L., & Qiu, R. L. (2019). Effects of the interactions between nickel and other trace metals on their accumulation in the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens*. *Environmental and experimental botany*, 158, 73-79.
- Dimitrijević, M. D. & Dimitrijević ć, M. N. (1970). *Kulm flysch Prača*. VIII kongres geologa Jugoslavije, Zagreb.
- Dinh, N., Van der Ent, A., Mulligan, D. R., & Nguyen, A. V. (2018). Zinc and lead accumulation characteristics and in vivo distribution of Zn²⁺ in the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens* elucidated with fluorescent probes and laser confocal microscopy. *Environmental and Experimental Botany*, 147, 1-12.
- Doksoopulo, E. (1961). *Nickel in rocks, soils, water and plants adjacent to the talc deposits of the Chorchanskaya group*. Tbilisi: Tbilisk Univeristety.
- Egner, H., Riehm, H., & Domingo, W. R. (1960). Studies on the chemical soil analysis as a basis for the assessment of the ground nutrient status of the soil II Chemical Extraction methods to Phosphorus and Potassium determination. *Lantbr Hogsk Annlr WR*, 26: 199 [In German].
- Eskew, D. L., Welch, R. M. & Cary, E. E. (1983). Nickel: an essential micronutrient for legumes and possible all higher plants. *Science*, 222: 621-623.
- FAO (1974). *The Euphrates Pilot Irrigation Project. Methods of soil analysis, Gadeb Soil Laboratory (A laboratory manual)*. Rome: Food and Agriculture Organization.
- Fernando, D. R., & Lynch, J. P. (2015). Manganese phytotoxicity: new light on an old problem. *Annals of botany*, 116(3), 313-319.
- Fick, S.E. & Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.
- Freitas, H., & Mooney, H. (1996). Effects of water and soil texture on the performance of two *Bromus hordeaceus* ecotypes from sandstone and serpentine soils. *Acta Oecologica*, 17: 307–317.
- Garcia, W. J., Blessin, C. W., Sandford, H. W., & Inglett, G. E. (1979). Translation and accumulation of seven heavy metals in tissues of corn plants grown on sludge-treated stripmined soil. *Journal of agricultural and food chemistry*, 27: 1088-1094.
- Ghaderian, S. M., Ghasemi, R., & Hajhashemi, F. (2015). Interaction of nickel and manganese in uptake, translocation and accumulation by the nickel-hyperaccumulator plant, *Alyssum bracteatum* (Brassicaceae). *Australian Journal of Botany*, 63(2), 47.
- Ghaderian, S. M., Mohtadi, A., Rahiminejad, M. R., & Baker, A. J. M. (2007a). Nickel and other metal uptake and accumulation by species of *Alyssum* (Brassicaceae) from the ultramafics of Iran. *Environmental Pollution*, 145(1), 293-298.

- Ghaderian, S. M., Mohtadi, A., Rahiminejad, R., Reeves, R. D., & Baker, A. J. M. (2007b). Hyperaccumulation of nickel by two *Alyssum* species from the serpentine soils of Iran. *Plant and Soil*, 293(1-2), 91-97.
- Ghaderian, S. M., Movahedi, M., & Ghasemi, R. (2009). Uptake and accumulation of cobalt by *Alyssum bracteatum*, an endemic Iranian Ni hyperaccumulator. *Northeastern Naturalist*, 16(sp5), 131-138.
- Ghasemi, R., Ghaderian, S. M., & Krämer, U. (2009). Interference of nickel with copper and iron homeostasis contributes to metal toxicity symptoms in the nickel hyperaccumulator plant *Alyssum inflatum*. *New Phytologist*, 184(3), 566-580.
- Goolsby, E., & Mason, C. (2015). Toward a more physiology and evolutionarily relevant definition of metal hyperaccumulation in plants. *Plant science*, 6, article 33: 1-4.
- Guillot, S., & Hattori, K. (2013). Serpentinites: Essential Roles in Geodynamics, Arc Volcanism, Sustainable Development, and the Origin of Life. *Elements*, 9: 95-98.
- Gupta, D. K., Huang, H. G., & Corpas, F. J. (2013). Lead tolerance in plants: strategies for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(4), 2150-2161.
- Gupta, N., Ram, H., & Kumar, B. (2016). Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 15(1), 89-109.
- Gustafsson, C., Willforss, J., Lopes-Pinto, F., Ortiz, R., & Geleta, M. (2018). Identification of genes regulating traits targeted for domestication of field cress (*Lepidium campestre*) as a biennial and perennial oilseed crop. *BMC Genet.*, 19: 36.
- Harmsen, J. (2007). Measuring bioavailability: from a scientific approach to standard methods. *Journal of Environmental quality*, 36(5), 1420-1428.
- Heath, S. M., Southworth, D., & D'Allura, J. A. (1997). Localization of nickel in epidermal subsidiary cells of leaves of *Thlaspi montanum* var. *siskiyouense* (Brassicaceae) using energy-dispersive X-ray microanalysis. *International Journal of Plant Sciences*, 158(2), 184-188.
- Herak, M. (1986). A new concept of the geotectonics of the Dinarides. *Acta Geologica*, 6, 1-42.
- Herak, M. (1991). Mobilistic view of the genesis and structures of the Dinarides (in Croatian). *Acta Geologica*, 21: 35-117.
- Homer, F. A., Morrison, R. S., Brooks, R. R., Clemens, J., & Reeves, R. D. (1991). Comparative studies of nickel, cobalt, and copper uptake by some nickel hyperaccumulators of the genus *Alyssum*. *Plant and Soil*, 138(2), 195-205.
- Hossner, L., Loeppert, R., Newton, R., Szaniszló, P., & Moses Attrep, J. (1998). *Literature review: phytoaccumulation of chromium, uranium, and plutonium in plant systems*. Amarillo National Resource Center for Plutonium: – Report ANRCP- May.

- Hrvatović, H. (2005). *Geological Survey of Federation of Bosnia and Herzegovina*. Sarajevo: Zavod za geologiju.
- Hseu, Z. Y., Su, Y. C., Zehetner, F., & Hsi, H. C. (2017). Leaching potential of geogenic nickel in serpentine soils from Taiwan and Austria. *Journal of environmental management*, 186, 151-157.
- Hseu, Z. Y., Tsai, H., Hsi, H. C., & Chen, Y. C. (2007). Weathering sequences of clay minerals in soils along a serpentinitic toposequence. *Clays and Clay Minerals*, 55(4), 389-401.
- Jaffré, T., Brooks, R. R., Lee, J., & Reeves, R. D. (1976). *Sebertia acuminata*: a hyperaccumulator of nickel from New Caledonia. *Science*, 193: 579-580.
- Jaffré, T., Pillon, Y., Thomine, S., & Merlot, S. (2013). The metal hyperaccumulators from New Caledonia can broaden our understanding of nickel accumulation in plants. *Frontiers in Plant Science*, 4(July), 279.
- Jaffré, T., & Schmid, M. (1974). Accumulation du nickel par une Rubiacée de Nouvelle Calédonie, *Psychotria douarrei* (G. Beauvisage) Däniker. *Compt Rend Acad Sci (Paris)*, Sér D 278: 1727-1730.
- Jakovljević, K., Buzurović, U., Andrejić, G., Đurović, S., Niketić, M., Mihailović, N., & Tomović, G. (2015). Trace elements contents and accumulation in soils and plant species *Goniolimon tataricum* (L.) Boiss.(Plumbaginaceae) from the ultramafic and dolomitic substrates of the central Balkans. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 10, 147-160.
- James, B. (1996). The challenge of remediating chromium-contaminated soil. *Environmental Science & Technology*, 30 (6): 248-251.
- Jenny, H. (1980). *The Soil Resource: Origin and Behavior*. *Ecology Study*, 37: 256–59. New York: Springer-Verlag.
- Jovanović-Dunjić, R., Diklić, N., & Nikolić, V. (1972). Fam. Brassicaceae Burn. In: Josifović, M. (ed.) *Flora SR Srbije III*. Srpska Akademija Nauka i Umetnosti, Beograd, pp. 177-393.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. – Florida: CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton. London, New York.
- Kaiser, H. F., & Rice, J. (1974). Little jiffy, mark IV. *Educational and psychological measurement*, 34: 111-117.
- Kazakou, E., Adamidis, G., Baker, A., Reeves, R., Godino, M., & Dimitrakopoulos, P. (2010). Species adaptation in serpentine soils in Lesbos Island (Greece): metal hyperaccumulation and tolerance. *Plant and Soil*, 332: 369–385.

- Kazakou, E., Dimitrakopoulos, P. Baker, A., Reeves, R., & Troumbis, A. (2008). Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level. *Biological Review*, 83: 495-508.
- Khalid, B. Y., & Tinsley, J. (1980). Some effects of nickel toxicity on ryegrass. *Plant Soil*, 55:139-144.
- Kierczak, J., Neel, C., Bril, H., & Puziewicz, J. (2007). Effect of mineralogy and pedoclimatic variations on Ni and Cr distribution in serpentine soils under temperate climate. *Geoderma*, 142(1-2), 165-177.
- Kierczak, J., Pędziwiatr, A., Waroszewski, J., & Modelska, M. (2016). Mobility of Ni, Cr and Co in serpentine soils derived on various ultrabasic bedrocks under temperate climate. *Geoderma*, 268, 78-91.
- Kirkham, M. B. (2006). Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma*, 137(1-2), 19-32.
- Knežević - Đorđević, V., & Đorđević, P. (1976). *Osnovi petrologije*. Beograd: Zavod za izdavanje udžbenika.
- Koch, M. A., & Kiefer, C. (2006). Molecules and migration: Biogeographical studies in cruciferous plants. *Plant Systematics and Evolution*, 259(2-4), 121-142.
- Kozhevnikova, A. D., Seregin, I. V., Verweij, R., & Schat, H. (2014). Histidine promotes the loading of nickel and zinc, but not of cadmium, into the xylem in *Noccaea caerulea*. *Plant signaling & behavior*, 9(9), e29580.
- Krämer, U. (2010). Metal hyperaccumulation in plants. *Annual review of plant biology*, 61, 517-534.
- Krämer, U., Pickering, I. J., Prince, R. C., Raskin, I., & Salt, D. E. (2000). Subcellular localization and speciation of nickel in hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species. *Plant physiology*, 122(4), 1343-1354.
- Kruckeberg, A. (1954). The ecology of serpentine soils: A symposium. III. Plant species in relation to serpentine soils. *Ecology*, 35: 267-274.
- Kruckeberg, A. (2002). The influences of lithology on plant life. In *Geology and Plant Life: The Effects of Landforms and Rock Type on Plants*, pp. 160-81. Seattle/London: University Washington Press.
- Küpper, H., Lombi, E., Zhao, F. J., Wieshammer, G., & McGrath, S. P. (2001). Cellular compartmentation of nickel in the hyperaccumulators *Alyssum lesbiacum*, *Alyssum bertolonii* and *Thlaspi goesingense*. *Journal of Experimental Botany*, 52(365), 2291-2300.
- Lange, B., van der Ent, A., Baker, A. J. M., Echevarria, G., Mahy, G., Malaisse, F., Meerts, P., Pourret, O., Verbruggen, N., & Faucon, M. P. (2016). Copper and cobalt accumulation in

- plants: a critical assessment of the current state of knowledge. *New Phytologist* 213, 537–551.
- Lee, B. D., Graham, R. C., Laurent, T. E., Amrhein, C., & Creasy, R. M. (2001). Spatial distributions of soil chemical conditions in a serpentinitic wetland and surrounding landscape. *Soil Science Society of America Journal*, 65(4), 1183-1196.
- Li, Y. M., Chaney, R. L., Brewer, E. P., Angle, J. S., & Nelkin, J. (2003). Phytoextraction of nickel and cobalt by hyperaccumulator *Alyssum* species grown on nickel-contaminated soils. *Environmental science & technology*, 37(7), 1463-1468.
- Li, Y., Feng, Y., Lv, G., Liu, B., & Qi, A. (2015). The phylogeny of *Alyssum* (Brassicaceae) inferred from molecular data. *Nordic Journal of Botany*, 33(6), 715–721.
- Loew, O., & May, D. (1901). The relation of lime and magnesia to plant growth. U.S. Dep. Agric. Bur. Plant Ind. Bull., 1: 1–53.
- Lombi, E., Zhao, F. J., Dunham, S. J., & McGrath, S. P. (2000). Cadmium accumulation in populations of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi goesingense*. *New Phytologist*, 145(1), 11-20.
- Lombini, A., Dinelli, E., Ferrari, C., & Simoni, A. (1998). Plant-soil relationships in the serpentinite screes of Mt Prinzera (Northern Apennines, Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 64: 19–33.
- Lugović, B., Altherr, R., Raczek, I., Hofmann, A. W., & Majer, V. (1991). Geochemistry of peridotites and mafic igneous rocks from the Central Dinaric Ophiolite Belt, Yugoslavia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106(2), 201-216.
- Malik, M., Chaney, R. L., Brewer, E. P., Li, Y. M., & Angle, J. S. (2000). Phytoextraction of soil cobalt using hyperaccumulator plants. *International Journal of Phytoremediation*, 2(4), 319-329.
- Markert, B. (1995). Sample preparation (cleaning, drying, homogenization) for trace element analysis in plant matrices. *Science of the total environment*, 176: 45-61.
- Marschner, H. (2002). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, New York.
- Martos, S., Gallego, B., Sáez, L., López-Alvarado, J., Cabot, C., & Poschenrieder, C. (2016). Characterization of Zinc and Cadmium Hyperaccumulation in Three *Noccaea* (Brassicaceae) Populations from Non-metalliferous Sites in the Eastern Pyrenees. *Frontiers in Plant Science*, 7, 128.
- Massoura, S. T., Echevarria, G., Becquer, T., Ghanbaja, J., Leclerc-Cessac, E., & Morel, J. L. (2006). Control of nickel availability by nickel bearing minerals in natural and anthropogenic soils. *Geoderma*, 136(1-2), 28-37.

- McNear, D.H., Chaney, R.L., & Sparks, D.L. (2010). The hyperaccumulator *Alyssum murale* uses complexation with nitrogen and oxygen donor ligands for Ni transport and storage. *Phytochemistry*, 71: 188–200.
- Menezes de Sequeira, E. (1969). Toxicity and movement of heavy metals in serpentinitic rocks (north-eastern Portugal). *Agron Lusit*, 30: 115- 154.
- Minguzzi, C., & Vergnano, O. (1948). Il contenuto di nichel nelle ceneri di *Alyssum bertolonii* Desv. *Atti Soc Tosc Sci Nat*, Mem Ser A 55: 49-77.
- Mišljenović, T., Jakovljević, K., Jovanović, S., Mihailović, N., Gajić, B., & Tomović, G. (2018). Micro-edaphic factors affect intra-specific variations in trace element profiles of *Noccaea praecox* on ultramafic soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(31), 31737-31751.
- Mišljenović, T., Jovanović, S., Mihailović, N., Gajić, B., Tomović, G., Baker, A. J. M., Echevarria, G., & Jakovljević, K. (2020). Natural variation of nickel, zinc and cadmium (hyper)accumulation in facultative serpentinophytes *Noccaea kovatsii* and *N. praecox*. *Plant Soil*, 447: 475-495.
- Nagayoti, P. C., Lee K. D., & Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 8: 199-216.
- Nagy, L., & Proctor, J. (1997). Plant growth and reproduction on a toxic Alpine ultramafic soil: adaptation to nutrient limitation. *New Phytologist*, 137: 267–274.
- Nishida, S., Tsuzuki, C., Kato, A., Aisu, A., Yoshida, J., & Mizuno, T. (2011). AtIRT1, the primary iron uptake transporter in the root, mediates excess nickel accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant and Cell Physiology*, 52(8), 1433-1442.
- Nkrumah, P.N., Baker, A.J., Chaney, R.L., Erskine, P.D., Echevarria, G., Morel, J.L. & Van der Ent, A., (2016). Current status and challenges in developing nickel phytomining: an agronomic perspective. *Plant and Soil*, 406: 55-69.
- Nouri, J., Khorasani, N., Lorestani, B., Karami, M., Hassani, A. H., & Yousefi, N. (2009). Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential. *Environmental Earth Sciences*, 59(2), 315–323.
- O'Dell, R., James, J., & Richards, J. (2006). Congeneric serpentine and nonserpentine shrubs differ more in leaf Ca:Mg than in tolerance of low N, low P, or heavy metals. *Plant and Soil*, 280:49–64.
- Oorts, K. (2013). Copper. In: Alloway B (ed) *Heavy Metals in Soils* (pp. 366-394). Environmental Pollution, vol 22. Springer, Dordrecht.
- Oze, C., Bird, D., & Fendorf, S. (2007). Genesis of hexavalent chromium from natural sources in soil and groundwater. *PNAS* 104, 16: 6544-6549.

- Oze, C., Fendorf, S., Bird, D. K., & Coleman, R. G. (2004). Chromium geochemistry of serpentine soils. *International Geology Review*, 46(2), 97-126.
- Palm, E., Brady, K., & Van Volkenburgh, E. (2012). Serpentine tolerance in *Mimulus guttatus* does not rely on exclusion of magnesium. *Functional Plant Biology*, 39(8), 679-688.
- Pamić, J. (1971). Some petrological features of the Bosnian gabbro-peridotite complexes in the Dinaride Ophiolite Zone of Yugoslavia.-*Tscher.min.-petr. Mitt.*, 15: 14-42.
- Pamić, J. (1979). *Geology of the Teslić sheet*. Beograd.
- Pamić, J. (1984). Triassic magmatism of the Dinarides in Yugoslavia. *Tectonophysics*, 109: 273-307.
- Pamić, J. (2000) Basic data on the geology and petrology of Krivaja-Konjuh ophiolite complex. In: Pamić, J. & Tomljenović, B. (eds.), *Outline of the geology of the Dinarides and South Tisia with field guidebook*. PANCARDI, Dubrovnik, Hrvatska.
- Pamić, J., & Desmons, J. (1989). A complete ophiolite sequence in Ržav, area of Zlatibor and Vardar ultramafic massifs in the Dinaride Ophiolite Zone. *Ophioliti*, 14: 13-32.
- Pamić, J., Gušić, J., & Jelaska, V. (1998). Geodynamic evolution of the Central Dinarides. *Tectonophysics*, 297: 251-268.
- Pamić, J., & Jurković, I. (1995). *Geology of Bosnia and Herzegovina*. In: Moor, R. (ed.) *Encyclopedia of the World Regional Geology*.
- Pamić, J., Sunarić-Pamić, O., Olujić, J., & Antić, R (1977). Geology, petrography and petrology of the Krivaja Konjuh ophiolite complex in the central parts of the Dinarides, Yugoslavia (in Croatian, Summary in English). *Acta Geologica*, 9: 39-135.
- Pamić, J., Tomljenović, B., & Balen, D. (2002). Geodynamic and petrogenic evolution of Alpine ophiolites from the Central and NW Dinarides: an overview. *Lithos*, 65: 113-142.
- Pardo, T., Rodriguez-Garrido, B., Saad, R. F., Soto-Vazquez, J. L., Loureiro-Vinas, M., Prieto-Fernandez, A., Echevarria, G., Benizri, E., & Kidd, P. S. (2018). Assessing the agromining potential of Mediterranean nickel-hyperaccumulating plant species at field-scale in ultramafic soils under humid-temperate climate. *Science of the Total Environment*, 630: 275-286.
- Pavlova, D., Karadjova, I. & Ganeva, A. (2013). Nickel accumulation screening of the ultramafic flora of Bulgaria. *OT Sistematič Botanik Dergisi*, 20(2), 41–52.
- Pędzwiatr, A., Kierczak, J., Waroszewski, J., Ratić, G., Quantin, C., & Ponzevera, E. (2018). Rock-type control of Ni, Cr, and Co phytoavailability in ultramafic soils. *Plant and Soil*, 423(1-2), 339-362.
- Pinto, E., Aguiar, A. A., & Ferreira, I. M. (2014). Influence of soil chemistry and plant physiology in the phytoremediation of Cu, Mn, and Zn. *Critical reviews in plant sciences*, 33(5), 351-373.

- Pollard, A. J., Reeves, R. D., & Baker, A. J. (2014). Facultative hyperaccumulation of heavy metals and metalloids. *Plant Science*, 217, 8-17.
- Pongrac, P., Zhao, F. J., Razinger, J., Zrimec, A., & Regvar, M. (2009). Physiological responses to Cd and Zn in two Cd/Zn hyperaccumulating *Thlaspi* species. *Environmental and Experimental Botany*, 66(3), 479-486.
- Ponizovsky, A. A., Thakali, S., Allen, H. E., Di Toro, D. M., & Ackerman, A. J. (2006). Effect of soil properties on copper release in soil solutions at low moisture content. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(3), 671-682.
- Prasad, M. & Freitas, H. (2003). Metal hyperaccumulation in plants – Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6(3): 285–321.
- Proctor, J. (1970). Magnesium as a toxic element. *Nature*, 227(5259), 742-743.
- Proctor, J. (1971). The Plant Ecology of Serpentine: III. The Influence of a High Magnesium/Calcium Ratio and High Nickel and Chromium Levels in Some British and Swedish Serpentine Soils. *Journal of Ecology*, 59(3): 827–842.
- Proctor, J., & Woodell, S. (1975). The ecology of serpentine soil. *Advance Ecology Research*, 9: 255–366.
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Rakić, T., Ilijević, K., Lazarević, M., Gržetić, I., Stevanović, V., & Stevanović, B. (2013). The resurrection flowering plant *Ramonda nathaliae* on serpentine soil—coping with extreme mineral element stress. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 208(10-12), 618-625.
- Rascio, N. & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180:169-181.
- Reeves, R. (1988). Nickel and zinc accumulation by species of *Thlaspi* L., *Cochlearia* L., and other genera of the Brassicaceae. *Taxon*, 37: 309-318.
- Reeves, R. (1992). Hyperaccumulation of nickel by serpentine plants. In: Proctor, J., Baker, A., Reeves, R. (eds.) *The vegetation of ultramafic (serpentine) soils*. Andover: Intercept Ltd., pp. 253-277.
- Reeves, R. D., & Adigüzel, N. (2008). The nickel hyperaccumulating plants of the serpentines of Turkey and adjacent areas: a review with new data. *Turkish Journal of Biology*, 32(3), 143-153.
- Reeves, R. D., & Brooks, R. R. (1983). European species of *Thlaspi* L.(Cruciferae) as indicators of nickel and zinc. *Journal of Geochemical Exploration*, 18(3), 275-283.
- Reeves, R. D., Brooks, R. R., & Dudley, T. R. (1983). Uptake of nickel by species of *Alyssum*, *Bornmuellera*, and other genera of old world tribus Alysseae. *Taxon*, 32(2): 184-192.

- Reeves, R. D., Laidlaw, W. S., Doronila, A., Baker, A. J. M., & Batianoff, G. N. (2015). Erratic hyperaccumulation of nickel, with particular reference to the Queensland serpentine endemic *Pimelea leptospermoides*. *Australian Journal of Botany*, 63(2), 119–127.
- Reeves, R., & Baker, A. (2000). Metal-accumulating plants. In: Raskin, I., Ensley, B. (eds.) *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up the Environment*. New York: John Wiley & Sons, pp. 193-229.
- Reeves, R., Baker, A., Borhidi, A., & Berazain, R. (1999). Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. *Annals of Botany*, 83: 29–38.
- Reeves, R., Kruckeberg, A., Adigüzel, N., & Krämer, U. (2001). Studies on the flora of serpentine and other metalliferous areas of western Turkey. *South African Journal of Science*, 97: 513-517.
- Reeves, R.D., & Baker, A.J.M. (1984). Studies on Metal Uptake By Plants From Serpentine and Non-Serpentine Populations of *Thlaspi goesingense* Hálácsy (Cruciferae). *New Phytologist*, 98(1), 191-204.
- Robinson, B. H., Bañuelos, G., Conesa, H. M., Evangelou, M. W. H., & Schulin, R. (2009). The phytomanagement of trace elements in soil. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(4), 240–266.
- Robinson, W., Edgington, G., & Byers, H. (1935). *Chemical studies of infertile soils derived from rocks high in magnesium and generally high in chromium and nickel*. U. S. Dept. Agr. Tech. Bull. 471.
- Rowell, D.L. (1997). *Soil Science. Research methods and their applications*. Springer: Berlin. [In German].
- Salehi-Eskandari, B., Ghaderian, S. M., & Schat, H. (2018). Differential interactive effects of the Ca/Mg quotient and PEG-simulated drought in *Alyssum inflatum* and *Fortuynia garcinii*. *Plant and Soil*, 428(1-2), 213-222.
- Salihaj, M., Bani, A., Shahu, E., Benizri, E., & Echevarria, G. (2018). Metal accumulation by the ultramafic flora of Kosovo. *Ecological research*, 33(4), 687-703.
- Seregin, I. V., Kozhevnikova, A. D., & Schat, H. (2019). Comparison of L-Histidine Effects on Nickel Translocation into the Shoots of Different Species of the Genus *Alyssum*. *Russian Journal of Plant Physiology*, 66(2), 340-344.
- Severne, B., & Brooks, R. (1972). A nickel accumulating plant from Western Australia. *Planta*, 103: 91-94.
- Shahandeh, H., & Hossner, L. R. (2000). Plant screening for chromium phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 2(1), 31–51.

- Shallari, S., Schwartz, C., Haskob, A., & Morela, J.L. (1998). Heavy metals in soils and plants of serpentine and industrial sites of Albania. *Science of the total environment*, 209: 133-142.
- Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., & Avudainayagam, S. (2005). Chromium toxicity in plants. *Environment international*, 31(5), 739-753.
- Sinclair, S. A., & Krämer, U. (2012). The zinc homeostasis network of land plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*, 1823(9), 1553-1567.
- Singh, H. P., Mahajan, P., Kaur, S., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2013). Chromium toxicity and tolerance in plants. *Environmental Chemistry Letters*, 11(3), 229-254.
- Steinnes, E. (2013). Lead. In: Alloway B (ed) *Heavy Metals in Soils* (pp. 395-). Environmental Pollution, vol 22. Springer, Dordrecht.
- Stevanović, B., & Janković, M. (2001). Ekologija biljaka sa osnovama fiziološke ekologije biljaka. Prvo izdanje. NNK International, Beograd.
- Stevanović, V., Tan, K., & Iatrou, G. (2003). Distribution of the endemic Balkan flora on serpentine I. – obligate serpentine endemics. *Plant Systematics and Evolution*, 242: 149-170.
- Tappero, R., Peltier, E., Grafe, M., Heidel, K., Ginder-Vogel, M., Livi, K., Rivers, M.L., Marcus, M.A., Chaney, R.L. & Sparks, D.L. (2007). Hyperaccumulator *Alyssum murale* relies on a different metal storage mechanism for cobalt than for nickel. *New Phytologist*, 175, 641–654.
- Taylor, S. I., & Macnair, M. R. (2006). Within and between population variation for zinc and nickel accumulation in two species of *Thlaspi* (Brassicaceae). *New Phytologist*, 169(3), 505-514.
- Teptina, A. Y., & Paukov, A. G. (2015). Nickel accumulation by species of *Alyssum* and *Noccaea* (Brassicaceae) from ultramafic soils in the Urals, Russia. *Australian Journal of Botany*, 63(2), 78-84.
- Teptina, A., Paukov, A., & Rajakaruna, N. (2018). Ultramafic vegetation and soils in the circumboreal region of the Northern Hemisphere. *Ecological research*, 33(3), 609-628.
- Tomović, G., Buzurović, U., Đurović, S., Vicić, D., Mihailović, N., & Jakovljević, K. (2018). Strategies of heavy metal uptake by three *Armeria* species growing on different geological substrates in Serbia. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(1), 507-522.
- Tomović, G.M., Mihailović, N.L., Tumi, A.F., Gajić, B.A., Mišljenović, T.D., & Niketić, M.S. (2013). Trace metals in soils and several Brassicaceae plant species from serpentine sites of Serbia. *Archives of Environmental Protection*, 39(4): .29-49.

- Trubelja, F., Marching, V., Burgath, K.P., & Vujović, Ž. (1995). Origin of the Jurassic Tethyan ophiolites in Bosnia: a geochemical approach to tectonic setting. *Geol.Croatica*, 48: 49-66.
- Tumi, A.F., Mihailović, N., Gajić, B.A., Niketić, M., & Tomović, G. (2012). Comparative Study of Hyperaccumulation of Nickel by *Alyssum murale* s.l. Populations from the Ultramafics of Serbia. *Pol J Environ Stud*, 21: 1855-1866.
- USDA (2006). *Keys to soil taxonomy, 10th ed.* USDA-Natural Resources Conservation Service: Washington, DC.
- Van der Ent, A., Baker, A. J., Reeves, R. D., Pollard, A. J., & Schat, H. (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction. *Plant and Soil*, 362(1-2), 319-334.
- Van der Ent, A., Baker, A., Reeves, R., Chaney, R., Anderson, C., Meech, J., Erskine, P., Simonnot, M., Vaughan, J., Morel, J., & Echevarria, G., (2015). Agromining: farming for metals in the future? *Environmental Science and Technology*, 49: 4773–4780.
- Van Reeuwijk, L.P. (1995). *Procedures for Soil Analysis. 5th ed.* Wageningen Technical Paper/International Soil Reference and Information Centre.
- Van Reeuwijk, L.P. (2002). *Procedures for Soil Analysis. 6th ed.* Wageningen. Technical Paper/International Soil Reference and Information Centre.
- Verbruggen, N., Hermans, C., & Schat, H. (2009). Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist*, 181: 759–776.
- Visioli, G., D'Egidio, S., & Sanangelantoni, A. (2015). The bacterial rhizobiome of hyperaccumulators: future perspectives based on omics analysis and advanced microscopy. *Frontiers in Plant Science*, 5: 752.
- Vithanage, M., Kumarathilaka, P., Oze, C., Karunatilake, S., Seneviratne, M., Hseu, Z.-Y., Gunarathne, V., Dassanayake, M., & Ok, Y. S. (2019). Occurrence and cycling of trace elements in ultramafic soils and their impacts on human health: A critical review. *Environment International*, 131, 104974.
- Vithanage, M., Rajapaksha, A. U., Oze, C., Rajakaruna, N., & Dissanayake, C. B. (2014). Metal release from serpentine soils in Sri Lanka. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(6), 3415-3429.
- Vlams, J., & Jenny, H. (1948). Calcium deficiency in serpentine soils as revealed by absorbent technique. *Science*, 107: 549–551.
- Vogel-Mikuš, K., Drobne, D., & Regvar, M. (2005). Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonisation of pennycress *Thlaspi praecox* Wulf.(Brassicaceae) from the vicinity of a lead mine and smelter in Slovenia. *Environmental Pollution*, 133(2), 233-242.

- Walker, R. (1954). Factors affecting plant growth on serpentine soils. In: Whittaker, R. H. (Ed.) *The Ecology of Serpentine Soils. Ecology*, 35(2): 259–26.
- Walker, R., Walker, H., & Ashworth, P. (1955). Calcium-magnesium nutrition with special reference to serpentine soils. *Plant Physiology*, 30: 214–221.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of botany*, 92(4), 487-511.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist*, 182(1), 49-84.
- Whittaker, R.H. (1954). The Ecology of Serpentine Soils. *Ecology*, 35(2): 258–288.
- Wild, H. (1970). The vegetation of nickel-bearing soils. *Kirkia*, 7: 162-169.
- Xhaferri, B., Shallari, S., Echevarria, G., & Bani, A. (2018). Nickel accumulation by *Alyssum murale* in serpentine sites of Prrenjias and Rajce, Albania. *European Academic Research*, 6(8): 4791-4803.
- Xing, J. P., Jiang, R. F., Ueno, D., Ma, J. F., Schat, H., McGrath, S. P., & Zhao, F. J. (2008). Variation in root-to-shoot translocation of cadmium and zinc among different accessions of the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi praecox*. *New Phytologist*, 178(2), 315-325.
- Yanai, J., Zhao, F. J., McGrath, S. P., & Kosaki, T. (2006). Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Environmental Pollution*, 139(1), 167-175.
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L. Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the total environment*, 368(2-3), 456-464.
- Zayed, A. M., & Terry, N. (2003). Chromium in the environment: Factors affecting biological remediation. *Plant and Soil*, 249(1), 139–156.
- Zayed, A., Lytle, C. M., Qian, J. H., & Terry, N. (1998). Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops. *Planta*, 206(2), 293-299.
- Zitka, O., Krystofova, O., Hynek, D., Sobrova, P., Kaiser, J., Sochor, J., Zehnalek, J., Babula, P., Ferrol, N., Kizek, R., & Adam, V. (2013). Metal transporters in plants. In D.K. Gupta, F.J. Corpas, J.M. Palma, (Eds.), *Heavy metal stress in plants* (pp. 19-41). Springer, Berlin, Heidelberg.

PRILOZI

Prilog 1

Istraživane biljne vrste



Alyssum murale



Thlaspi kovatsii



Lepidium campestre

Prilog 2

Istraživani lokaliteti



Bakotić (SP1)



Bosansko Petrovo selo (SP2)



Čauševica (SP3)



Klokotnica (SP4)



Liplje (SP5)



Maglaj (SP6)



Stanari (SP7)



Šehar (SP8)



Teslić (SP9)



Zvornik (SP10)

Prilog 3

Koncentracije ukupnih (u) i dostupnih (d) elemenata u analiziranim uzorcima zemljišta (mg kg^{-1}) sa serpentinitičkih staništa u Bosni i Hercegovini; vrednosti su izražene kao srednja vrednost \pm standardna devijacija

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8	SP9	SP10
Fe (d)	778 \pm 23,4	780 \pm 8,75	502 \pm 8,18	142 \pm 1,68	679 \pm 13,5	850 \pm 14,2	388 \pm 4	248 \pm 15,3	331 \pm 4,49	507 \pm 25,4
Ca (d)	1056 \pm 36,1	223 \pm 19,6	527 \pm 44,8	318 \pm 10,8	187 \pm 8,28	2420 \pm 148	415 \pm 20,2	112 \pm 10,6	687 \pm 62,8	1847 \pm 39,9
Mg (d)	2422 \pm 69,4	656 \pm 51	411 \pm 40,3	926 \pm 11,9	883 \pm 12,1	4258 \pm 93,2	3631 \pm 123	3430 \pm 405	2198 \pm 166	3312 \pm 151
Ca/Mg	0,44	0,34	1,28	0,34	0,21	0,57	0,11	0,03	0,31	0,56
Ni (u)	2232 \pm 62,4	1675 \pm 47,4	1637 \pm 11,4	2105 \pm 51,4	1077 \pm 47,6	2223 \pm 121	1556 \pm 34,8	1862 \pm 35,7	2052 \pm 19,8	2222 \pm 52
Ni (d)	202 \pm 1,71	113 \pm 0,75	125 \pm 9,23	185 \pm 3,58	164 \pm 8,99	146 \pm 3,06	130 \pm 0,17	187 \pm 0,09	116 \pm 0,63	204 \pm 5,04
Mn (u)	1578 \pm 13	1773 \pm 125	1426 \pm 84,6	1735 \pm 67,1	1876 \pm 58,5	1459 \pm 18,4	1298 \pm 7,6	1884 \pm 129	2540 \pm 13,1	2443 \pm 79,8
Mn (d)	591 \pm 8,02	549 \pm 5,56	509 \pm 2,31	427 \pm 18,5	648 \pm 1,72	480 \pm 7,84	476 \pm 11,3	151 \pm 11,8	713 \pm 1,15	860 \pm 26,5
Zn (u)	108 \pm 5,77	37 \pm 4,15	101 \pm 2,25	48,5 \pm 1,09	88,1 \pm 1,16	36,8 \pm 2,95	106 \pm 1,3	95,9 \pm 9,14	120 \pm 6,49	56,5 \pm 0,75
Zn (d)	26,8 \pm 3,42	1,72 \pm 0,27	12 \pm 0,71	1,7 \pm 0,23	11,5 \pm 0,55	1,53 \pm 0,2	13,7 \pm 2,63	36,4 \pm 3,09	15,1 \pm 2,8	2,37 \pm 0,42
Cu (u)	0,81 \pm 0,02	2,35 \pm 0,39	7,52 \pm 0,2	5,18 \pm 0,02	27,2 \pm 1,36	2,53 \pm 0,34	28,5 \pm 1,8	3,56 \pm 0,18	21,5 \pm 1,04	9,39 \pm 0,18
Cu (d)	0,98 \pm 0,06	0,52 \pm 0,05	<UDL	<UDL	<UDL	<UDL	1,47 \pm 0,03	<UDL	<UDL	3,33 \pm 0,06
Cr (u)	154 \pm 32,4	1748 \pm 26,7	837 \pm 18,9	675 \pm 18,8	539 \pm 14,1	267 \pm 44,6	799 \pm 14	403 \pm 118	306 \pm 1,34	804 \pm 9,81
Cr (d)	0,54 \pm 0,36	47,3 \pm 0,05	<UDL	23,7 \pm 0,02	5,14 \pm 0,41	4,14 \pm 0,41	17,4 \pm 0,2	9,35 \pm 0,04	<UDL	<UDL
Co (u)	243 \pm 12	201 \pm 7,96	76,4 \pm 15,9	212 \pm 15,9	224 \pm 20,8	229 \pm 18,8	234 \pm 13,8	297 \pm 22,7	200 \pm 18,3	205 \pm 18,3
Co (d)	9,31 \pm 2,73	21,2 \pm 1,9	20,6 \pm 2,41	73,1 \pm 13	65,4 \pm 5,38	49,7 \pm 5,55	55,2 \pm 8,5	73,7 \pm 3,66	51,5 \pm 4,78	86,9 \pm 7,98
Cd (u)	1,35 \pm 1,35	3,39 \pm 3,39	3,83 \pm 3,83	<UDL	3,58 \pm 3,58	<UDL	1,89 \pm 1,89	<UDL	2,3 \pm 2,3	2,89 \pm 2,89
Cd (d)	0,52 \pm 0	1,48 \pm 0,15	<UDL	<UDL	<UDL	<UDL	0,44 \pm 0,15	<UDL	0,26 \pm 0	1,34 \pm 0,03
Pb (u)	17,6 \pm 0,04	46,9 \pm 1,19	128 \pm 0,58	87 \pm 0,52	11,4 \pm 0,04	13,7 \pm 0,06	71,5 \pm 0,19	32,1 \pm 0,54	21,1 \pm 1,2	129 \pm 0,04
Pb (d)	<UDL	<UDL	12,7 \pm 0,02	0,68 \pm 0,06	<UDL	<UDL	1,42 \pm 0,05	<UDL	4,71 \pm 0,01	37,2 \pm 0,25

Prilog 4

Koncentracije elemenata (mg kg^{-1}) u uzorcima korena, stabala i listova vrste *A. murale* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini; vrednosti su izražene kao srednja vrednost \pm standardna devijacija

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8	SP9	SP10
P₂O₅ koren	63 \pm 3,7	<UDL	74,5 \pm 1,48	<UDL	11,8 \pm 4,31	28,9 \pm 4,5	49,5 \pm 17,11	21,9 \pm 3,52	5,32 \pm 1,01	19,6 \pm 3,7
P₂O₅ stablo	121 \pm 9,83	<UDL	89,6 \pm 11,2	<UDL	72,3 \pm 10,5	47,6 \pm 14	80,3 \pm 8,55	29,9 \pm 7,96	113 \pm 13,2	118 \pm 17,0
P₂O₅ list	71,4 \pm 1,4	<UDL	13,5 \pm 0,81	<UDL	59,7 \pm 13,23	35,9 \pm 6,62	66,3 \pm 13,2	67,2 \pm 11,2	88,7 \pm 14,1	56 \pm 7,41
K₂O koren	2464 \pm 273	2033 \pm 264	1539 \pm 99,6	2361 \pm 309	7667 \pm 225	2957 \pm 82,5	5333 \pm 357	2759 \pm 211	2837 \pm 437	70266 \pm 741
K₂O stablo	2691 \pm 299	<UDL	2972 \pm 512	<UDL	3346 \pm 252	9877 \pm 1132	2393 \pm 212	4214 \pm 401	9296 \pm 98	2337 \pm 390
K₂O list	3667 \pm 98	<UDL	3271 \pm 252	<UDL	2321 \pm 344	4802 \pm 1111	4363 \pm 456	5462 \pm 517	543 \pm 171	2528 \pm 913
Fe koren	319 \pm 12	885 \pm 8,6	2329 \pm 251	480 \pm 1,2	436 \pm 25	472 \pm 14	122 \pm 1,9	365 \pm 5,7	461 \pm 5,7	548 \pm 179
Fe stablo	145 \pm 14	1159 \pm 41	1601 \pm 157	387 \pm 4,9	764 \pm 43	279 \pm 4,1	306 \pm 5,0	685 \pm 7,0	836 \pm 35	637 \pm 21
Fe list	213 \pm 22	1454 \pm 39	1173 \pm 47	756 \pm 3,7	928 \pm 12	637 \pm 39	335 \pm 13	965 \pm 35	562 \pm 26	444 \pm 17
Ca koren	8273 \pm 64	5324 \pm 3,7	3244 \pm 40	7344 \pm 26	8386 \pm 42	5139 \pm 99	3820 \pm 23	4417 \pm 31	7757 \pm 26	8653 \pm 20
Ca stablo	41419 \pm 42	29256 \pm 18	19170 \pm 17	22276 \pm 11	11363 \pm 9,5	33455 \pm 18	9849 \pm 19	7234 \pm 31	17570 \pm 6,6	19504 \pm 3,8
Ca list	61169 \pm 1,9	42198 \pm 3,9	41132 \pm 10	55116 \pm 4,2	17284 \pm 16	53660 \pm 25	22733 \pm 40	13104 \pm 24	42344 \pm 33	33459 \pm 36
Mg koren	2184 \pm 41	5284 \pm 34	2537 \pm 365	2523 \pm 4,7	2368 \pm 245	1159 \pm 12	2052 \pm 169	5158 \pm 395	957 \pm 7,2	1669 \pm 232
Mg stablo	2609 \pm 217	5363 \pm 33	3767 \pm 31	3111 \pm 6,3	3077 \pm 321	2866 \pm 453	2840 \pm 326	8250 \pm 400	1715 \pm 66	2856 \pm 337
Mg list	9686 \pm 150	8201 \pm 14	9620 \pm 110	5221 \pm 6,3	5337 \pm 538	6252 \pm 647	6457 \pm 528	10103 \pm 31	2974 \pm 323	4541 \pm 411
Ca/Mg koren	3,79	1,01	1,28	2,91	3,54	4,43	1,86	0,86	8,11	5,18
Ca/Mg stablo	15,88	5,45	5,09	7,16	3,69	11,67	3,47	0,88	10,24	6,83
Ca/Mg list	6,32	5,15	4,28	10,56	3,24	8,58	3,52	1,3	14,24	7,37
Ni koren	1010 \pm 6,1	1809 \pm 14	1739 \pm 47	984 \pm 3,1	2387 \pm 52	1124 \pm 48	2505 \pm 356	2076 \pm 178	2648 \pm 67	5885 \pm 11
Ni stablo	3314 \pm 116	2401 \pm 2,1	2886 \pm 349	1337 \pm 45	2838 \pm 178	2324 \pm 13	2938 \pm 24	4219 \pm 178	3743 \pm 233	7410 \pm 178
Ni list	9695 \pm 178	7821 \pm 1,5	4457 \pm 308	2304 \pm 2,4	6029 \pm 308	7457 \pm 617	6505 \pm 293	8933 \pm 793	5481 \pm 299	10552 \pm 242

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8	SP9	SP10
Mn koren	38,2±3,3	22,4±0,6	30,8±2,4	11,9±0,4	24,3±1,3	101±2,5	14,9±2,8	7,06±2	18,9±0,8	44,6±2,2
Mn stablo	17,9±1,9	33,2±1,6	15,2±2,5	63,5±1,2	39,1±4,9	99,0±0,7	36,2±4,3	16,7±3,3	19,9±0,9	67±1,9
Mn list	97,6±7,8	43,5±0,4	110±6,8	71,9±0,4	95,0±2,4	135±0,5	101±7,8	36,2±2	71,3±5,3	108±5,9
Zn koren	26,1±2,2	8,28±0,00	2,62±0,1	8,09±0,1	2,46±0,1	1,72±0,2	5,64±0,3	7,44±0,7	7,26±0,2	9,81±0,4
Zn stablo	13,2±0,5	9,86±0,7	3,24±0,1	2,14±0,7	5,37±1,9	4,45±0,2	1,46±0,1	1,69±0,3	0,61±0,2	2,64±0,04
Zn list	4,34±0,2	11,3±0,01	3,04±0,6	2,62±0,4	4,33±0,5	0,51±0,1	0,49±0,09	0,35±0,09	1,17±0,06	1,25±0,3
Cu koren	3,31±0,1	<UDL	0,57±0,17	<UDL	1,36±0,35	1,4±0,31	3,94±0,15	1,97±0,47	0,71±0,07	0,36±0,32
Cu stablo	2,97±0,25	<UDL	2,16±0,26	<UDL	2,72±0,35	3,39±0,5	2,18±0,15	2,72±0,62	2,99±0,04	2,74±0,36
Cu list	3,81±0,53	<UDL	6,22±0,06	<UDL	3,98±0,37	2,74±0,1	2,35±0,1	3,33±0,17	2,83±0,22	2,74±0,1
Cr koren	31,89±2	<UDL	8,81±3,41	<UDL	64,7±12,0	33,0±0,73	56,1±8,55	57,8±16	157±11,5	78,8±3,63
Cr stablo	44,2±3,63	<UDL	12,0±5,35	<UDL	56,1±11,3	47,9±4,57	9,29±2,37	23,7±0,28	8,49±1,21	2,24±1,82
Cr list	32,8±12,22	<UDL	101±10,75	<UDL	20,0±3,38	29,5±1,47	20,4±5,14	14,7±1,55	9,94±3,67	11,9±1,69
Co koren	30,6±8,3	41,2±0,82	12±1,32	13,2±0,16	24±12	12,1±0,80	116±5,0	56,5±4,0	54,3±4,9	55,8±4,1
Co stablo	73,1±8,6	52,9±0,50	19,7±0,72	21±1,21	11,9±1,31	58,3±5,3	19,5±0,6	11,9±1,3	12,0±1,4	38,9±1,4
Co list	143±8,3	81,4±0,64	122±8,3	38,1±0,08	20,6±0,16	39,9±0,76	51,8±1,05	116±17	41,2±1,1	19,3±0,8
Cd koren	1,87±0,25	1,25±0,04	0,65±0,4	2,72±0,06	1,39±0,51	1,03±0,53	2,63±1,0	0,90±0,27	2,06±0,41	1,41±0,37
Cd stablo	1,76±0,9	1,8±0,02	2,41±0,18	3,21±0,08	2,81±0,17	3,63±0,36	2,20±0,21	2,66±0,38	1,71±0,64	2,14±0,16
Cd list	3,47±0,6	2,42±0,25	2,22±0,23	4,30±0,28	2,38±0,58	2,39±0,40	2,00±0,49	3,11±0,57	0,58±0,45	1,89±0,29
Pb koren	8,23±0,4	2,21±0,05	6,87±0,4	<UDL	2,48±0,2	3,82±0,5	13,0±0,6	16,6±0,3	27,3±0,4	14,2±0,9
Pb stablo	11±0,7	1,34±0,04	18,1±0,6	<UDL	18±0,7	8,00±0,1	43,1±3,8	26,8±0,8	18±0,07	5,60±0,4
Pb list	17,3±0,4	3,45±0,3	16,6±0,9	<UDL	8,57±0,4	6,24±0,4	27,2±0,4	16,5±1	17,8±0,7	9,50±0,3

Prilog 5

Koncentracije elemenata (mg kg^{-1}) u uzorcima korena i nadzemnih organa vrste *T. kovatsii* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini; vrednosti su izražene kao srednja vrednost \pm standardna devijacija.

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
P₂O₅ koren	1243 \pm 51,3	644 \pm 28	197 \pm 42,0	523 \pm 113	415 \pm 49,2
P₂O₅ nadzem. deo	103 \pm 21,4	691 \pm 126	117 \pm 21,4	259 \pm 35,0	74,7 \pm 21,4
K₂O koren	21535 \pm 534	6224 \pm 1,22	13237 \pm 22,8	5230 \pm 6,75	10112 \pm 1,79
K₂O nadzem. deo	30313 \pm 221	7445 \pm 329	24056 \pm 42,7	6636 \pm 2,35	6239 \pm 0,41
Fe koren	1239 \pm 45,4	1182 \pm 13,2	868 \pm 8,08	1407 \pm 14,8	1739 \pm 40,6
Fe nadzem. deo	861 \pm 24,4	391 \pm 96,3	323 \pm 18	540 \pm 18	844 \pm 25
Ca koren	3390 \pm 1,06	3213 \pm 69,1	3479 \pm 19,5	2289 \pm 19,9	4347 \pm 24,0
Ca nadzem. deo	6335 \pm 2,25	625 \pm 27,2	8358 \pm 44,7	7155 \pm 31,2	5246 \pm 38,9
Mg koren	6981 \pm 7,35	7138 \pm 37,2	5438 \pm 39,7	5790 \pm 53,2	6005 \pm 38,8
Mg nadzem. deo	7540 \pm 357	8328 \pm 359	6690 \pm 224	7028 \pm 116	9812 \pm 511
Ca/Mg koren	0,49	0,45	0,64	0,40	0,72
Ca/Mg nadzem. deo	0,84	0,75	1,25	1,02	0,53
Ni koren	1064 \pm 32,7	814 \pm 145	1010 \pm 79,0	605 \pm 21,8	1014 \pm 154,5
Ni nadzem. deo	4219 \pm 165	6600 \pm 143	12505 \pm 541	5267 \pm 675	6362 \pm 1091
Mn koren	96,5 \pm 3,79	35,8 \pm 4,7	52,9 \pm 3,63	42,4 \pm 8,4	81,4 \pm 7,04
Mn nadzem. deo	75,6 \pm 3,54	21,2 \pm 0,92	26,6 \pm 1,3	54,5 \pm 16,9	477 \pm 1,77
Zn koren	510 \pm 0,07	602 \pm 0,64	316 \pm 1,55	540 \pm 4,84	317 \pm 1,45
Zn nadzem. deo	1005 \pm 0,3	995 \pm 6,22	812 \pm 0,69	1120 \pm 5,38	729 \pm 0,59
Cu koren	10,5 \pm 0,13	3,2 \pm 0,72	5,4 \pm 0,33	10,6 \pm 0,28	<UDL
Cu nadzem. deo	5,57 \pm 0,18	7,78 \pm 0,11	4,19 \pm 0,42	5,30 \pm 0,16	3,27 \pm 0,33
Cr koren	46,5 \pm 1,26	<UDL	87,8 \pm 0,62	77,9 \pm 11,37	97,0 \pm 1,45
Cr nadzem. deo	23,8 \pm 0,74	12,4 \pm 1,21	17,5 \pm 2,00	17,6 \pm 0,38	33,7 \pm 2,84
Co koren	88,1 \pm 5,57	91,8 \pm 10,2	71,9 \pm 0,31	112 \pm 0,42	64,3 \pm 4,94
Co nadzem. deo	23,4 \pm 1,97	21,6 \pm 0,41	11,7 \pm 0,65	61,1 \pm 17,8	42,5 \pm 1,46
Cd koren	7,86 \pm 0,13	4,49 \pm 0,34	2,62 \pm 0,23	6,62 \pm 0,21	4,20 \pm 0,16
Cd nadzem. deo	4,47 \pm 0,08	1,74 \pm 0,13	1,65 \pm 0,37	2,6 \pm 0,16	1,20 \pm 0,30
Pb koren	13,5 \pm 0,37	47,5 \pm 0,48	58,1 \pm 0,16	24,9 \pm 0,45	66,8 \pm 0,30
Pb nadzem. deo	12,6 \pm 0,6	45,5 \pm 0,28	6,45 \pm 0,46	18,5 \pm 0,71	27,6 \pm 1,14

Prilog 6

Koncentracije elemenata (mg kg^{-1}) u uzorcima korena i nadzemnih organa vrste *L. campestre* sa istraživanih lokaliteta u Bosni i Hercegovini; vrednosti su izražene kao srednja vrednost \pm standardna devijacija.

	SP6	SP7	SP8
P₂O₅ koren	630 \pm 37,0	432 \pm 39,4	209 \pm 14,0
P₂O₅ nadzem. deo	90,5 \pm 4,28	28,0 \pm 1,0	82,1 \pm 9,83
K₂O koren	126 \pm 4,55	158 \pm 2,38	165 \pm 17,5
K₂O nadzem. deo	70,7 \pm 0,37	27,4 \pm 4,6	38,3 \pm 4,28
Fe koren	927 \pm 108	645 \pm 31,7	1272 \pm 10,6
Fe nadzem. deo	763 \pm 52,4	370 \pm 15,8	565 \pm 43
Ca koren	3208 \pm 9,68	5304 \pm 43,2	7623 \pm 224
Ca nadzem. deo	6318 \pm 1,94	7700 \pm 157	3579 \pm 23,5
Mg koren	5771 \pm 63,2	8628 \pm 320	3349 \pm 146
Mg nadzem. deo	6695 \pm 323	10239 \pm 230	4565 \pm 244
Ca/Mg koren	0,57	0,61	2,28
Ca/Mg nadzem. deo	0,94	0,75	0,78
Ni koren	2176 \pm 59,5	767 \pm 90,73	848 \pm 91,8
Ni nadzem. deo	4457 \pm 742	3362 \pm 436	3124 \pm 705
Mn koren	60,4 \pm 4,43	86,8 \pm 8,85	268 \pm 35,9
Mn nadzem. deo	33,1 \pm 5,99	29,7 \pm 8,74	58,4 \pm 7,66
Zn koren	217 \pm 11,2	60,9 \pm 0,63	75,6 \pm 0,40
Zn nadzem. deo	404 \pm 3,79	144 \pm 2,39	33 \pm 4,10
Cu koren	13,3 \pm 0,31	0,88 \pm 0,13	1,34 \pm 0,10
Cu nadzem. deo	4,86 \pm 0,13	<UDL	9,46 \pm 0,40
Cr koren	87,4 \pm 0,73	117 \pm 9,72	79,0 \pm 9,34
Cr nadzem. deo	32,8 \pm 0,31	22,8 \pm 2,94	21,9 \pm 0,79
Co koren	113 \pm 10,2	43,6 \pm 2,30	71,6 \pm 10,2
Co nadzem. deo	71,6 \pm 0,54	21,5 \pm 0,31	24,0 \pm 5,72
Cd koren	0,6 \pm 0,6	3,56 \pm 0,42	6,41 \pm 0,16
Cd nadzem. deo	5,35 \pm 0,43	1,69 \pm 0,43	4,71 \pm 0,25
Pb koren	8,82 \pm 0,5	23,1 \pm 1,48	6,41 \pm 0,56
Pb nadzem. deo	17,7 \pm 0,13	8,02 \pm 0,35	7,13 \pm 0,63

Biografija autora

Una Matko Stamenković rođena je u Beogradu 1978. godine gdje je završila osnovnu školu i gimnaziju. Upisala je Rudarsko-geološki fakultet 1998. godine smer hidrogeologija. Na kraju treće godine studija prebacila se na fakultet u inostranstvu. Diplomirala je 2004. godine geologiju na fakultetu u Santa Barbari (UCSB) u Sjedinjenim Američkim Državama. Nakon studija radila je godinu dana kod Prof. Ire Leifer na UCSB na instrumentima za prikupljanje metana sa morskog dna.

Magistrirala je na fakultetu UCL u Londonu u Engleskoj 2005.godine na odseku za geografiju sa temom „Invazivna vrsta *Caulerpa taxifolia* i uticaj aluminijumovih soli na algu“ pod mentorstvom Prof. Dr. Brenda Thake

Doktorske studije Ekologije, modul Zaštita biodiverziteta, upisala je školske 2008/2009. godine na Biološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Zaposlena je u firmi EFT od 2005.godine na mestu konsultanta za zaštitu životne sredine. Učestvovala je u fazi planiranja, projektovanja i izgradnje više energetskih projekata od kojih se izdvaja rad na ekološkoj dozvoli za rudnik i termo-elektranu Stanari u Bosni i Hercegovini. Trenutno radi na pripremi dokumentacije izgradnje hidroelektrane od 35MW na reci Neretvi u mestu Ulog u Bosni i Hercegovini.

Koautor je dvadesetak publikacija (naučnih i stručnih članaka) na temu zaštite životne sredine u energetici kao i na temi rekultivacije degradiranih površina.

Piše i govori engleski jezik i služi se nemačkim jezikom.

Aktivni je član planinarskog društva „Radnički“ sekcije podmlatka „Klinci planinci“ jer uživa da je u prirodi sa svoje troje dece.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а **Уна Матко Стаменковић**

број индекса **E5203/2008**

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

„Потенцијал врста *Alyssum murale* Waldst. & Kit., *Thlaspi kovatsii* Heuffel и *Lepidium campestre* (L.) R. Br. (Brassicaceae) са серпентинитских станишта у Босни и Херцеговини за биоакумулацију метала“

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 30.06.2020.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора **Уна Матко Стаменковић**

Број индекса **E5203/2008**

Студијски програм **Екологија**

Наслов рада „Потенцијал врста *Alyssum murale* Waldst. & Kit., *Thlaspi kovatsii* Heuffel и *Lepidium campestre* (L.) R. Br. (Brassicaceae) са серпентинитских станишта у Босни и Херцеговини за биоакумулацију метала“

Ментор **проф. др Јасмина Шинжар-Секулић** и доцент др **Маја Лазаревић**

Потписани/а **Уна Матко Стаменковић**

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 30.06.2020.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Потенцијал врста *Alyssum murale* Waldst. & Kit., *Thlaspi kovatsii* Heuffel и *Lepidium campestre* (L.) R. Br. (Brassicaceae) са серпентинитских станишта у Босни и Херцеговини за биоакумулацију метала“

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 30.06.2020.

1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.