



University of Tehran

Potential for heavy metal accumulation in *Robinia pseudoacacia* L. and *Fraxinus excelsior* L. trees planted in the green spaces of the Sungun Copper Mine

Mohammad Hossein Lotfi¹ | Omid Fathizadeh^{2,4*} | Sajad Ghanbari^{3,4}

1. Senior Green Space Supervisor, Sungun Copper Complex, Iran. E-mail: lotfim066@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Forestry, Ahar Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ahar, University of Tabriz, Iran. E-mail: omid.fathizadeh@yahoo.com

3. Department of Forestry, Ahar Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ahar, University of Tabriz, Iran. E-mail: ghanbarisajad@gmail.com

4. Research Center of Biosciences and Biotechnology (RCBB), University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 09 June 2026

Revised: 22 July 2026

Accepted: 28 July 2026

Published online: 14 September 2026

Keywords:

Bioaccumulation,

Comprehensive Bioaccumulation Index (CBI),

Metal Accumulation Index (MAI),

Phytoremediation.

ABSTRACT

Introduction: Open-pit mining operations generate substantial environmental disturbances, most notably the formation of massive waste rock piles and deep excavation pits. These waste deposits, composed largely of fragmented rock material, typically exhibit low moisture-holding capacity, high bulk density, poor nutrient content, lower pH, and elevated concentrations of potentially toxic elements, including heavy metals. Such characteristics pose significant risks to both environmental and human health. Consequently, developing effective remediation strategies is essential. Among available approaches, phytoremediation leverages the capacity of plant species to extract, stabilize, or accumulate heavy metals from contaminated substrates. The present study aimed to evaluate the uptake of heavy metals by the leaves of *Robinia pseudoacacia* (black locust) and *Fraxinus excelsior* (ash) trees planted around the Sungun copper mine in Varzeqan, Iran.

Method: Leaf samples were collected from mature black locust and ash trees (approximately 15–20 years old) established within the green belt surrounding the Sungun copper mine. Sampling trees were selected randomly from healthy, pest-free individuals with intact crowns, using five trees per species and three replicates. From each tree, 20–30 leaves were harvested from the upper third of the canopy in a single sampling event. Samples were transported to the laboratory in paper bags and digested prior to analysis. Concentrations of copper (Cu), molybdenum (Mo), lead (Pb), and cadmium (Cd) were quantified using ICP-MS. In addition, bioconcentration factor (BCF), comprehensive bioconcentration index (CBCI), and metal accumulation index (MAI) were calculated. Data normality was assessed using the Shapiro–Wilk test, followed by t-tests to determine significant differences between species.

Results: Statistical analyses revealed significant differences in the bioconcentration of Mo, Cu, Pb, and Cd between black locust and ash. According to t-test results, black locust exhibited significantly higher leaf concentrations of all four metals compared with ash. Overall, the highest extraction levels across both species occurred in the order Cu > Mo > Pb > Cd. Concentrations of Cu, Pb, and Mo in all leaf samples exceeded standard permissible limits. Based on bioconcentration indices, black locust was identified as a specialized hyperaccumulator of Mo, whereas ash functioned as a Mo indicator species. For other metals, differences between species were less pronounced. MAI values further confirmed that black locust had the highest overall heavy-metal accumulation capacity, and CBCI results similarly ranked black locust above ash. Species classification based on heavy-metal uptake indicated that black locust acts as a Mo hyperaccumulator, while ash falls within the indicator category for Mo. Additionally, black locust showed strong affinity for Cu, Pb, and Cd, whereas ash demonstrated greater resistance to these metals.

Conclusion: The combined evidence from bioconcentration indices demonstrates that black locust possesses superior capacity for heavy-metal accumulation compared with ash and can be classified as a hyperaccumulator species in this context. Nevertheless, despite its lower index values, ash remains a viable candidate for phytoremediation, particularly in environments requiring species with moderate uptake but higher ecological resilience. This study provides an initial insight into the phytoremediation potential of these two species in mining-impacted landscapes and highlights future research pathways for improving contaminated-site management through biomonitoring and bioaccumulation assessment.

Cite this article: Lotfi, M.H., Fathizadeh, O., Ghanbari, S. (2026). Potential for heavy metal accumulation in *Robinia pseudoacacia* L. and *Fraxinus excelsior* L. trees planted in the green spaces of the Sungun Copper Mine. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (2), 147-160. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2026.416154.1396>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2026.416154.1396>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۳۳۸۳

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

پتانسیل تجمع فلزات سنگین در درختان اقاچیا و زبان گنجشک کاشته شده در فضای سبز معدن مس سونگون

محمد حسین لطفی^۱ | امید فتحی‌زاده^{۲*} | سجاد قنبری^{۳*}

۱. کارشناس ارشد ناظر فضای سبز مجتمع مس سونگون، ایران. رایانامه: lotfim066@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی اهر، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه: omid.fathizadeh@yahoo.com
۳. گروه جنگلداری، گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی اهر، دانشگاه تبریز، ایران. رایانامه: ghanbarisajad@gmail.com
۴. گروه پژوهشی منابع طبیعی و گیاهان دارویی، مرکز تحقیقات علوم و فناوری‌های زیستی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

کلیدواژه:

انباشت زیستی،

شاخص تجمع فلز،

شاخص جامع تجمع زیستی،

گیاه پالایی.

مقدمه: یکی از اثرات عمده محیط‌زیستی ناشی از استخراج روباز معادن، ایجاد توده‌های عظیم روباره و حفره‌های عمیق در محل‌های استخراج است. در واقع این توده‌ها، زباله‌های معدنی هستند که علاوه بر محتوای بالای قطعات سنگ، ظرفیت نگهداری رطوبت کم، چگالی ظاهری بالاتر، مواد مغذی کم، pH پایین تر حاوی عناصر بالقوه سمی مانند فلزات سنگین بوده و بر سلامت محیط‌زیست و انسان تأثیر منفی می‌گذارند. از این‌رو، توسعه روش‌های درمانی برای کاهش اثرات مخرب محیط‌زیستی آن ضروری است. در میان این روش‌های درمانی، گیاه‌پالایی از پتانسیل گونه‌های مختلف گیاهی برای حذف فلزات سنگین از مکان‌های آلوده استفاده می‌کند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی جذب فلزات سنگین توسط برگ گونه‌های درختی اقاچیا و زبان گنجشک بود که در اطراف معدن مس سونگون ورزقان کاشته شده بودند.

روش پژوهش: برای انجام این پژوهش نمونه‌های برگ از دو درخت اقاچیا و زبان گنجشک که در فضای سبز اطراف معدن مس سونگون کاشته شده بود، جمع‌آوری شد. سن تقریبی درختان انتخاب شده بین ۱۵ تا ۲۰ سال بود. درختان انتخاب‌شده برای نمونه‌برداری، از بین پایه‌های بالغ، کاملاً سالم، بدون آفت و آسیب فیزیکی، با تاج‌پوشش طبیعی و در دسترس انتخاب شدند. نحوه انتخاب پایه‌ها به‌صورت تصادفی و با پنج پایه درختی با سه تکرار انجام گرفت. تعداد ۲۰ تا ۳۰ برگ از یک‌سوم بالایی تاج درخت و طی یک مرحله برداشت شدند. پس از جمع‌آوری برگ‌ها، نمونه‌ها در بسته‌های کاغذی به آزمایشگاه منتقل و هضم شدند. در آزمایشگاه، غلظت عناصر سنگین مس، مولیبدن، سرب و کادمیوم با استفاده از دستگاه ICP-MS اندازه‌گیری شد. همچنین شاخص‌های تجمع زیستی (BCF)، شاخص جامع تجمع زیستی (CBCI) و شاخص تجمع فلز (MAI) محاسبه شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا از آزمون‌های شاپیرو-ویلک، برای بررسی نرمال بودن داده‌ها استفاده شد و سپس از آزمون تی تست برای بررسی معنی‌داری استفاده شد.

یافته‌ها: تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد تجمع زیستی عناصر سنگین مولیبدن، مس، سرب و کادمیوم در بین دو گونه درختی اقاچیا و زبان گنجشک اختلاف معنی‌داری با هم دارند. نتایج آزمون تی نشان داد که غلظت فلز مولیبدن، مس، سرب و کادمیوم در گونه اقاچیا به‌طور معنی‌داری نسبت به زبان گنجشک بیشتر است. به‌طور کلی بیشترین میزان جذب و استخراج توسط گونه‌های درختی برحسب فلزات به‌ترتیب عناصر مس، مولیبدن، سرب و کادمیوم بودند. مشاهده شد که میزان فلزات سنگین مس، سرب و مولیبدن در تمامی نمونه‌های برگ بیشتر از حد استاندارد است. براساس نتایج شاخص تجمع زیستی به‌دست آمده از این پژوهش، مشخص شده که گونه اقاچیا بیش انباشت‌گر اختصاصی مولیبدن و گونه زبان گنجشک شاخص مولیبدن می‌باشد، درحالی‌که جذب سایر عناصر در هر دو گونه تفاوت چشمگیری نشان نداد. همچنین براساس شاخص تجمع فلز گونه اقاچیا بیشترین میزان تجمع فلزات سنگین را در بین دو گونه مورد مطالعه دارد. همچنین بیشترین مقدار شاخص جامع تجمع فلزات مربوط به گونه اقاچیا بود. نتایج تقسیم‌بندی گونه‌های درختی براساس میزان جذب فلزات سنگین نشان داد که گونه اقاچیا به‌عنوان بیش انباشت‌گر اختصاصی مولیبدن معرفی شده و زبان گنجشک در گروه شاخص برای مولیبدن قرار گرفتند. با این حال، اقاچیا نسبت به عناصر مس، سرب و کادمیوم شاخص به جذب بود و زبان گنجشک در گروه مقاوم قرار گرفت.

نتیجه‌گیری: در مجموع، با توجه به نتایج حاصل از شاخص‌های مورد بررسی در این پژوهش، مشاهده شد که گونه اقاچیا نسبت به زبان گنجشک توانایی بیشتری در تجمع فلزات سنگین از خاک دارد و به‌عنوان بیش‌انباشت‌کننده طبقه‌بندی شد. علاوه بر این، مطابق با نتایج مطالعه حاضر، استفاده از گونه زبان گنجشک ممکن است صرف‌نظر از مقادیر پایین‌تر شاخص‌های آنها، انتخاب موفقی برای گیاه‌پالایی باشد. این مطالعه به‌عنوان یک پیش‌مقدماتی عمل می‌کند که مسیر پژوهش‌های آینده را در مورد بهبود مدیریت محیط‌های آلوده از طریق پایش زیستی و تجمع زیستی عناصر سنگین روشن می‌سازد.

استناد: لطفی، محمدحسین، فتحی‌زاده، امید، قنبری، سجاد (۱۴۰۵). پتانسیل تجمع فلزات سنگین در درختان اقاچیا و زبان گنجشک کاشته شده در فضای سبز معدن مس سونگون. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۹ (۲)، ۱۶۰-۱۴۷. DOI: <https://10.22059/jfwf.2026.416154.1396>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2026.416154.1396>



۱. مقدمه

تجمع فلزات سنگین در جو، آب و خاک به یک مشکل جهانی فزاینده برای محیط زیست و سلامت عمومی تبدیل شده است. افزایش صنعتی شدن و شهرنشینی، انتشار و آلودگی فلز ناشی از فعالیت های انسانی را تسریع کرده است. معادن، ذوب و تصفیه فلزات، نفت و گاز، فاضلاب، ترافیک جاده ای و محل های دفن زباله در آلودگی فلزات نقش داشته و محیط زیست و سلامت انسان را با خطر مواجه می کنند. فلزات سنگین عناصری هستند که به طور طبیعی با جرم اتمی بالا و چگالی حداقل پنج برابر آب وجود دارند. فلزات، پس از جذب، می توانند در بدن یک موجود زنده تا سطوحی که برای سمی شدن کافی است، تجمع یابند. به دلیل سمیت آنها، فلزات گونه هایی را که در معرض چنین آلاینده هایی قرار دارند، به طور جدی تهدید می کنند [۱].

در میان منابع مختلف تولید این آلاینده ها، صنعت معدن کاری و فرآوری فلزات، به ویژه استخراج مس، سهم قابل توجهی در انتشار فلزات سنگین به خاک، آب و هوا دارد [۲]. استخراج و فرآوری سنگ های معدنی مس، به ویژه در معادن پورفیری، منجر به تولید حجم عظیمی از باطله ها، پسماندهای اکسیدی و زهاب اسیدی معدن می شود. مطالعات انجام شده در معادن مس نشان می دهد که عناصر مس، مولیبدن، سرب، آرسنیک، کادمیوم، روی، کبالت و منگنز از شاخص ترین آلاینده های این مناطق هستند [۲]. به عنوان مثال، در منطقه معدن مس سونگون، غلظت مس در خاک های مجاور باطله ها تا بیش از ۳۱۰۰ میکروگرم بر گرم و مولیبدن تا ۸۶ میکروگرم بر گرم گزارش شده است که بیانگر آلودگی شدید این منطقه است [۳]. همچنین پژوهش ها نشان داده اند که در مناطق تحت تأثیر معادن مس، غلظت فلزات سنگین در خاک اغلب از استانداردهای جهانی فراتر رفته و خطرات اکولوژیک قابل توجهی ایجاد می کند [۲]. در این میان، گیاه پالایی^۱ به عنوان یک رویکرد پایدار، کم هزینه و سازگار با محیط زیست، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این روش از پتانسیل گیاهان برای حذف، تثبیت یا کاهش سمیت آلاینده ها از طریق مکانیسم های مختلف استفاده می کند [۴]. مهم ترین این مکانیسم ها عبارتند از: استخراج گیاهی^۲ یا انباشت گیاهی^۳ که شامل جذب فلزات توسط ریشه و انتقال به اندام های هوایی است؛ تثبیت گیاهی^۴ که به کاهش تحرک و فراهمی زیستی آلاینده ها در خاک از طریق تثبیت در ریشه یا ریزوسفر منجر می شود؛ و تبخیر گیاهی^۵ که در آن گیاهان آلاینده ها را جذب، به ترکیبات فرار تبدیل و به جو آزاد می کنند [۴].

تجمع زیستی، تجمع آلاینده ها توسط ارگانیسم ها از منابع غذایی (انتقال تغذیه ای) و محیط غیرزیستی (یعنی هوا، آب، خاک) است. در نتیجه، این مکانیسم شامل جذب سموم در گونه ها سریع تر از حذف آنها است. تجمع زیستی با گیاهان و میکروارگانیسم ها می تواند برای زیست پالایی مکان های آلوده به آلاینده های فلزی مورد استفاده قرار گیرد [۱]. تجمع زیستی در دو مرحله انجام می شود: جذب یون فلزی روی سطح سلول که به عنوان روش جذب زیستی شناخته می شود و انتقال فعال گونه های فلزی در داخل سلول ها. تجمع و غلظت آلاینده ها از یک محیط آلوده توسط ریشه های گیاهان به عنوان تجمع گیاهی شناخته می شود. آلاینده ها متعاقباً منتقل شده و در قسمت های هوایی گیاه (برگ ها و شاخه ها) رسوب می کنند. جذب آلاینده ها توسط ریشه های گیاه، همراه با انتقال و تجمع در شاخه ها و برگ ها، به عنوان جذب گیاهی، ترسیب گیاهی یا تجمع گیاهی شناخته می شود [۵].

تجمع زیستی فلزات سنگین فرآیندی است که از طریق آن فلزات سمی یا ترکیبات شیمیایی در داخل ساختار سلولی پیوند می خورند. تجمع زیستی فلزات به ویژه به عنوان یک شاخص مواجهه مفید است، زیرا فلزات متابولیزه نمی شوند. از سوی دیگر، تجمع زیستی یک شاخص مفید برای مواجهه موجودات با مواد شیمیایی در محیط های آلوده است. فعالیت زیستی زیست توده در فرآیند تجمع زیستی حیاتی است. سلول ها باید زنده باشند تا آلاینده ها را از طریق فرآیندهای متابولیکی جذب کنند. در طول تجمع زیستی، یون های فلزی توسط کل سلول جذب می شوند. فلزات از طریق همان مسیرهایی که مواد غذایی وارد سلول های موجودات زنده می شوند، وارد می شوند [۶].

بازایی سلامت محیطی و اکولوژیک پس از استخراج معدن نیازمند کاهش مؤثر فلزات سنگین و عناصر بالقوه سمی است.

¹Phytoremediation

²Phytoextraction

³Phytoaccumulation

⁴Phytostabilization

⁵Phytovolatilization

معمولاً گونه‌های چوبی برای حذف آلاینده‌ها از محیط‌زیست یا بی‌ضرر کردن آنها در اطراف معادن کاشته می‌شوند. استفاده از گیاهان به‌عنوان پایشگرهای زیستی، با توجه به تمایل آنها به جذب عناصر سنگین، در پایش محیطی مورد توجه قرار گرفته است. برخی از گیاهان به‌واسطه قابلیت جذب عناصر سنگین، به‌عنوان ابزاری کارآمد در پایش محیطی شناخته شده‌اند و با هزینه کم و نمونه‌برداری ساده، معیاری قابل اعتماد برای ارزیابی کیفیت محیط‌زیست ارائه می‌دهند. کاربرد گیاهان به‌عنوان شاخص‌های زیستی ناشی از واکنش سریع آنها به تغییرات شیمیایی محیطی و حساسیت آنها به طیف وسیعی از آلاینده‌های مؤثر بر هوا، خاک و آب است. نکته قابل توجه این است که گیاهان نه تنها وجود عناصر کمیاب در خاک را تأیید می‌کنند، بلکه می‌توانند این عناصر را در زیست‌توده هوایی (مثلاً برگ‌ها/پوست درختان) در سطوحی که اغلب از سطوح موجود در ماتریس خاک فراتر می‌رود، تجمع کنند [۷]. بسیاری از محققان بر اهمیت استفاده از برگ‌های درختان به‌منظور تجمع زیستی آلودگی فلزات سنگین تأکید کرده‌اند [۸]. موارد متعدد، به‌نظر می‌رسد گیاهان فلزات سنگین مانند سرب را در غلظت‌های بالا در دیواره‌های سلولی خود جمع می‌کنند [۷]. بررسی تأثیر پوشش گیاهی به‌ویژه درختان، بر توزیع مکانی عناصر بالقوه سمی، می‌تواند به توسعه استراتژی‌های احیای مکان با هدف به حداقل رساندن سمیت آنها کمک کند.

داده‌های تحقیقاتی بسیار محدودی در مورد توزیع عناصر سمی در ضایعات معدنی تحت تأثیر گونه‌های درختی موجود است. گونه‌های درختی نقش عمده‌ای در پیشروی خاک و توزیع مجدد عناصر سمی در زمین‌های اطراف معادن دارند. بنابراین، شناسایی و طبقه‌بندی درختان به‌عنوان "انباشت‌کننده یا دفع‌کننده" و گروه‌های حساس و مقاوم برای به حداقل رساندن ظرفیت و پتانسیل آنها در کاهش و حذف آلاینده‌ها در مناطق شهری و صنعتی ضروری است. با وجود این پژوهش‌ها، تاکنون مطالعه‌ای بر روی گونه‌های درختی کاشته‌شده (فضای سبز) به‌عنوان بخشی از برنامه‌های احیای معدن و کمربند سبز در محدوده معدن مس سونگون انجام نشده است. ااقیا و زبان‌گنجشک هر دو از گونه‌های پرکاربرد در فضای سبز معادن ایران هستند و بررسی مستقیم عملکرد آنها در شرایط واقعی آلودگی معدن، اهمیت بالایی دارد. این پژوهش برای اولین بار در منطقه معدن سونگون، از بررسی همزمان سه شاخص تجمع زیستی (BCF)، شاخص مقدار شاخص جامع تجمع فلزات (CBCI) و شاخص تجمع فلز (MAI) برای ارزیابی توانایی گونه‌های درختی استفاده کرده است. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی نقش گونه‌های ااقیا و زبان‌گنجشک در برابر آلودگی فلزات سنگین اطراف معدن مس سونگون بود. برای دستیابی به این هدف، تجمع زیستی فلزات سنگین مس، مولیبدن، سرب و کادمیوم در برگ‌های ااقیا و زبان‌گنجشک ارزیابی شد. همچنین پژوهش حاضر به دنبال اثبات فرضیه‌های زیر است:

۱. بین دو گونه درختی ااقیا و زبان‌گنجشک از نظر غلظت فلزات سنگین (مس، مولیبدن، سرب و کادمیوم) در برگ‌ها تفاوت معنی‌داری وجود دارد.

۲. غلظت مولیبدن، مس، سرب و کادمیوم در برگ‌های ااقیا به‌طور معنی‌داری بیشتر از زبان‌گنجشک است.

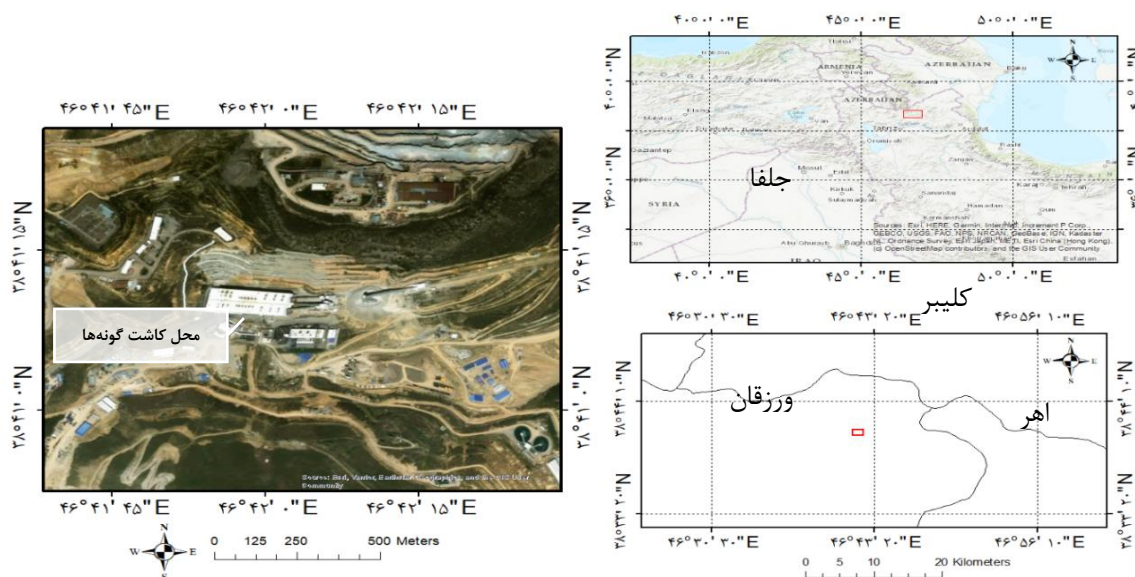
۳. شاخص‌های تجمع زیستی، شاخص جامع تجمع فلزات و شاخص تجمع فلز در گونه ااقیا به‌طور معنی‌داری بالاتر از زبان‌گنجشک است که نشان‌دهنده پتانسیل بالاتر آن در گیاه‌پالایی است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

معدن مس سونگون در استان آذربایجان شرقی و در فاصله ۱۳۰ کیلومتری شهر تبریز و ۳۰ کیلومتری شمال شهر ورزقان و با مختصات جغرافیایی بین طول ۴۶° ۳۰' ۰۸" تا ۴۶° ۵۲' ۱۷" شرقی و عرض ۳۸° ۳۳' ۴۲" تا ۳۸° ۴۰' ۰۷" شمالی واقع شده است (شکل ۱). براساس طبقه‌بندی با اقلیم نمای آمبرژه، منطقه دارای آب و هوای خشک و سرد و جهت باد غالب جنوب غربی می‌باشد. ارتفاع منطقه مورد مطالعه از ۱۶۴۵ متر تا ۲۷۰۰ متر از سطح دریا متغیر است و میانگین بارندگی سالانه حدود ۴۰۰ میلی‌متر است. همچنین، میانگین دمای ماهانه در تابستان و زمستان بین ۳۳ درجه سانتی‌گراد و ۲۰- درجه سانتی‌گراد متغیر است. منطقه معدن در نزدیکی میراث طبیعی حفاظت شده ارسباران واقع شده است و پوشش گیاهی آن عمدتاً از گونه‌های اوری (*Quercus macranthera*)، ممیز (*Carpinus betulus*)، زبان‌گنجشک (*Fraxinus excelsior*)، زرشک (*Berberis spp.*)، سرخدار (*Taxus baccata*)،

هفت کول (*Viburnum spp.*)، ارس (*Juniperus foetidissima*)، زغال اخته (*Cornus mas*)، آلوچه (*Prunus spp.*) و زالزالک (*Crataegus spp.*) تشکیل شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه واقع در معدن مس سونگون

۲-۲. روش تحقیق

برای انجام این تحقیق دو گونه درختی افاقیا (*Robinia pseudoacacia* L.) و زبان گنجشک (*Fraxinus excelsior* L.) که حدود ۱۵ تا ۲۰ سال سن داشتند و به تعداد زیاد در فضای سبز محوطه اطراف معدن مس سونگون کاشته شده بودند، انتخاب شدند. نحوه انتخاب گونه‌ها به صورت تصادفی و با سه تکرار برای هر گونه درختی انجام گرفت. در اوایل مهرماه ۱۴۰۳، از برگ گونه‌های درختی مورد نظر در ایستگاه‌های مطالعاتی نمونه‌برداری شد. نمونه‌برداری بدون در نظر گرفتن باد غالب و در چهار جهت جغرافیایی انجام گرفت. برگ‌های آفت‌زده و ناسالم برداشت نشدند و تا حد امکان از برگ‌های سالم و بالغ نمونه‌برداری شد. برای هر گونه در هر ایستگاه، سه تکرار با پنج پایه درختی و در چهار جهت اصلی (در مجموع برای هر گونه ۶۰ نمونه) برداشت شد. برای هر پایه درختی تعداد ۲۰ تا ۳۰ برگ از قسمت یک سوم بالایی برداشت شد. پس از جمع‌آوری برگ‌ها، نمونه‌ها در بسته‌های کاغذی به آزمایشگاه منتقل و هضم شدند.

همچنین، جهت اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در خاک برای محاسبه شاخص جامع انباشت زیستی، نمونه‌های خاک از زیر تاج پوشش هر یک از ۵ پایه درختی انتخاب‌شده برای هر گونه، از چهار جهت اصلی و در سه تکرار (جمعاً ۳۰ نمونه خاک) و از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری (به دلیل تمرکز بالای فلزات سنگین در لایه‌های سطحی خاک) برداشت شدند و به آزمایشگاه انتقال یافت. مبنای تعیین تعداد نمونه‌ها، تأمین نمایندگی آماری و مطابقت با پروتکل‌های استاندارد نمونه‌برداری خاک در مطالعات پایش فلزات سنگین (EPA 3050B) بود.

۲-۳. اندازه‌گیری

در آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌های برگ درخت با آب مقطر شسته شدند، سپس به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا کاملاً خشک شوند. پس از خشک شدن، نمونه‌ها توسط آسیاب برقی آسیاب و سپس الک شدند. سپس، حدود نیم گرم از هر نمونه توزین و در ظروف تفلونی قرار داده شد و به آن پنج سی‌سی اسید نیتریک (HNO_3) اضافه شد. محلول را به مدت پنج دقیقه حرارت داده و سپس شش سی‌سی اسید مخلوط ($4\text{cc HF} + 2\text{cc HClO}_4$) به آن افزوده و در بلوک هضم تحت

دمای کنترل شده (حدود ۱۸۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) تا شفاف شدن کامل محلول حرارت داده شدند. هنگامی که دود سفید رنگ از محلول خارج شد، محلول را سرد کرده و سپس به آن یک سی‌سی اسید کلریدریک (HCl) اضافه و مقداری حرارت داده شد. بعد از آن که نمونه به خوبی در اسید حل شد، محلول صاف و با آب مقطر به حجم پنجاه سی‌سی رسانده شد. سپس با استفاده از دستگاه ICP-MS نسبت به قرائت فلزات سنگین مس، مولیبدن، سرب و کادمیوم اقدام شد.

۲-۳-۱. شاخص تجمع زیستی (BCF)

شاخص تجمع زیستی از تقسیم غلظت فلز سنگین در بافت گیاهی (برگ) به غلظت همان عنصر در خاکی که گیاه در آن مستقر است، به دست می‌آید (رابطه ۱). اگر مقدار این ضریب بیشتر از ۱ باشد، نشان‌دهنده بیش انباشتگر بودن درخت، بین ۰/۱ تا ۱ بیانگر متوسط انباشتگر و اگر کمتر از ۰/۱ باشد، غیر انباشتگر خواهد بود [۹]. مقدار بیشتر از ۱ این شاخص در هر اندام، نشان‌دهنده قدرت انتقال فلز از خاک و تجمع در آن اندام است. بر این اساس، انباشت فلز در اندام‌های هوایی و زمینی به ترتیب نشان‌دهنده قابلیت استخراج و تثبیت گیاهی آنهاست.

$$BCF = \frac{C_{plant}}{C_{soil}} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن BCF: شاخص تجمع زیستی، C_{Plant} : غلظت عنصر در بافت گیاهی (برگ) و C_{Soil} : غلظت عنصر در خاک است. غلظت فلزات سنگین خاک با دستگاه ICP-MS اندازه‌گیری گردید.

۲-۳-۲. شاخص جامع تجمع زیستی (CBCI)

شاخص جامع تجمع زیستی برای ارزیابی میزان انباشت فلزات سنگین (چه یک فلز، چه چند فلز) در یک گونه درختی استفاده می‌شود. این شاخص در سال ۲۰۱۴ توسط Zhao و همکارانش (۲۰۱۴) معرفی شد و از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۱۰].

$$CBCI = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N \mu_i \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن N: تعداد کل فلزات مورد اندازه‌گیری در این مطالعه μ_i برابر $\mu(x)$ فلز i است که از طریق رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\mu(X) = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن X: برابر با BCF فلز i (کادمیوم، مس، سرب و مولیبدن) است و X_{min} و X_{max} نشان‌دهنده حداقل و حداکثر مقادیر BCF برای فلز مورد نظر در بین گونه‌های گیاهی مشاهده شده هستند.

۲-۳-۳. شاخص تجمع فلز (MAI)

از آنجا که گیاهان قادرند به طور همزمان چندین فلز را در خود انباشته کنند، شاخص تجمع فلز برای بررسی میزان انباشت فلزات مختلف به طور همزمان توسط گونه‌های گیاهی استفاده می‌شود که از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$MAI = \left(\frac{1}{N} \right) \times \sum_{j=1}^N I_j \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، N: تعداد فلزات اندازه‌گیری شده (چهار فلز مورد آزمایش)، I_j : برای هر فلز از تقسیم میانگین غلظت در اندام گیاه بر مقدار انحراف معیار آن به دست می‌آید. بعد از محاسبه شاخص تجمع زیستی و شاخص تجمع فلز برای گونه‌های مورد مطالعه، می‌توان در ارتباط با وضعیت میزان جذب و انباشت عناصر سنگین در گونه‌های مورد بررسی اظهار نظر کرد.

۲-۴. تجزیه و تحلیل آماری

به منظور بررسی و تجزیه و تحلیل آماری غلظت هر یک از فلزات سنگین در برگ، ابتدا از آزمون‌های شاپیرو-ویلک^۱، برای بررسی نرمال بودن داده‌ها استفاده شد. از آزمون تی تست غیر جفتی برای بررسی معنی‌داری تفاوت مشاهده شده بین میانگین دو گونه برای داده‌های با توزیع نرمال استفاده شد. کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد و در نرم‌افزار SPSS انجام گرفت.

¹Shapiro-Wilk Test

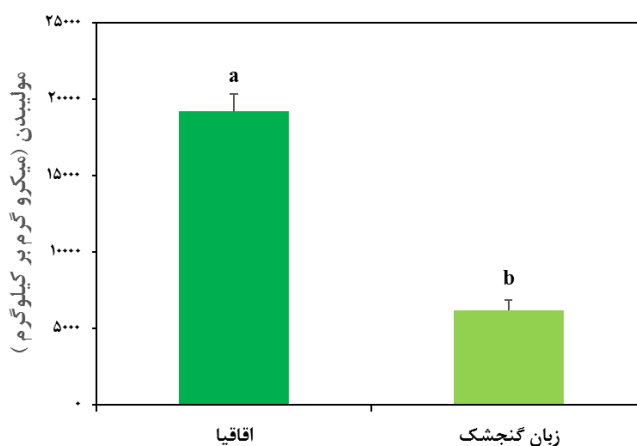
۳. یافته‌های پژوهش

نتایج آزمون t (t-test) نشان داد که تجمع زیستی عناصر سنگین مولیبدن، مس، سرب و کادمیوم بین دو گونه افاقیا و زبان گنجشک معنی‌دار بود (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج آزمون t برای غلظت فلزات سنگین در برگ دو گونه افاقیا و زبان گنجشک

پارامتر	درجه آزادی	t -value	P -value
Mo	۴	-۲/۸۳	۰/۰۲۵
Cu	۴	-۳/۱۷۹	۰/۰۰۰
Pb	۴	-۲/۲۵	۰/۰۱۹
Cd	۴	-۲/۳۹۹	۰/۰۰۳

نتایج مقایسه میانگین غلظت مولیبدن بین دو گونه افاقیا و زبان گنجشک با استفاده از آزمون t نشان داد که گونه افاقیا به‌طور معنی‌داری (در بازه اطمینان ۹۵ درصد) غلظت بیشتری دارد (شکل ۲).



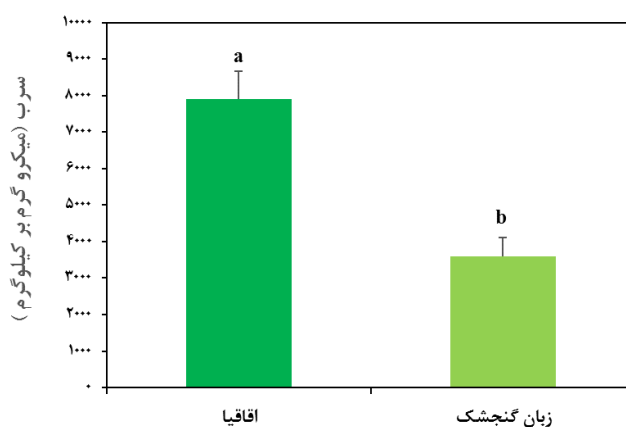
شکل ۲. مقایسه میانگین‌های غلظت مولیبدن در برگ گونه‌های افاقیا و زبان گنجشک با استفاده از آزمون تی غیر جفتی

مقایسه میانگین‌های دو گونه افاقیا و زبان گنجشک نشان داد که غلظت مس در گونه افاقیا به‌طور معنی‌داری (در بازه اطمینان ۹۵ درصد) با سطح بالاتر است (شکل ۳).



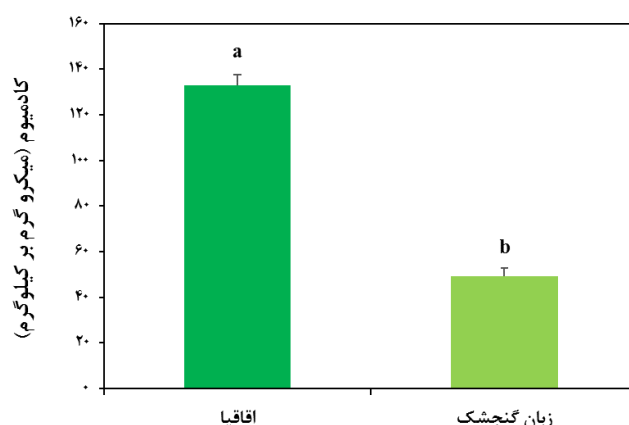
شکل ۳. مقایسه میانگین‌های غلظت مس در برگ گونه‌های افاقیا و زبان گنجشک با استفاده از آزمون تی غیر جفتی

مطابق با نتایج مقایسه میانگین‌ها مشاهده شد که غلظت سرب در گونه آفاقیا در مقایسه با گونه زبان گنجشک به‌طور معنی‌داری (در بازه اطمینان ۹۵ درصد) بیشتر است (شکل ۴).



شکل ۴. مقایسه میانگین‌های غلظت سرب در برگ گونه‌های آفاقیا و زبان گنجشک با استفاده از آزمون تی غیر جفتی

نتایج آزمون تی نشان داد که غلظت فلز کادمیوم در گونه آفاقیا به‌طور معنی‌داری نسبت به زبان گنجشک به‌طور معنی‌داری (در بازه اطمینان ۹۵ درصد) بیشتر است (شکل ۵).



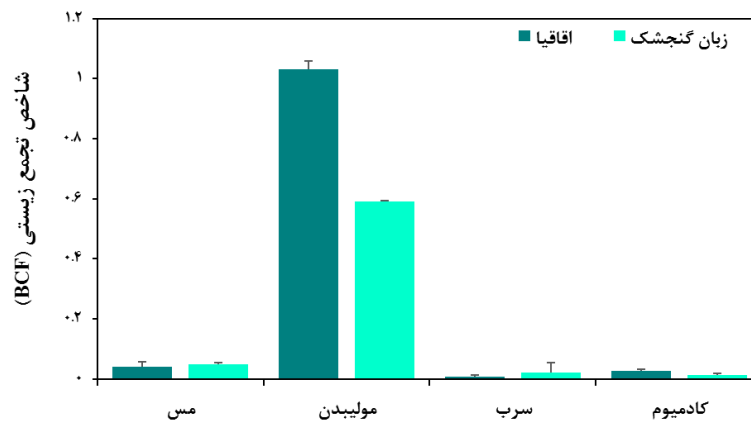
شکل ۵. مقایسه میانگین‌های غلظت کادمیوم در برگ گونه‌های آفاقیا و زبان گنجشک با استفاده از آزمون تی غیر جفتی

اگرچه یک «استاندارد جهانی برای فلزات سنگین» وجود ندارد، اما مقررات و دستورالعمل‌های مختلفی از سوی نهادهای بین‌المللی و دولت‌های ملی برای کنترل آلودگی فلزات سنگین در زمینه‌های مختلف و محافظت از سلامت انسان و محیط‌زیست وجود دارد (جدول ۲) [۱۲]. میزان فلزات سنگین مس، سرب و مولیبدن در تمامی نمونه‌های برگ بیشتر از حد استاندارد می‌باشد. میزان کادمیوم در تمامی نمونه‌های برگ در حد استاندارد بود.

جدول ۲. میانگین جهانی محدوده نرمال فلزات سنگین در گیاه برحسب پی پی ام یا میکروگرم بر کیلوگرم [۱۲]

گیاه	فلزات سنگین
۰/۴-۴۵/۸	Cu
۰/۳-۱/۵	Mo
۳	Pb
۲	Cd

محاسبه شاخص تجمع زیستی (BCF) نشان می‌دهد که گونه افاقیا بیش انباشتگر و گونه زبان گنجشک شاخص مولیبدن می‌باشد، درحالی که جذب سایر عناصر در هر دو گونه بسیار محدود بوده و تفاوت چشمگیری بین آنها مشاهده نشد (شکل ۶).



شکل ۶. شاخص تجمع زیستی گونه‌های مورد مطالعه

همچنین، نتایج تقسیم‌بندی گونه‌های درختی براساس میزان جذب فلزات سنگین (جدول ۳) نشان داد که گونه افاقیا به‌عنوان بیش انباشتگر اختصاصی مولیبدن معرفی شده و توانایی بالاتری در تجمع این عنصر نسبت به سایر گونه‌ها نشان داد. در مقابل، زبان گنجشک در گروه شاخص برای مولیبدن قرار گرفتند، درحالی که نسبت به سایر عناصر (مس، سرب و کادمیوم) مقاوم به جذب بود. به‌علاوه، گونه افاقیا تنها در مورد مولیبدن بیش انباشتگر بوده و برای سایر فلزات عمدتاً در گروه مقاوم یا شاخص قرار گرفته‌اند.

جدول ۳. وضعیت میزان جذب فلزات در افاقیا و زبان گنجشک براساس (۱) بیش انباشتگر (۲) شاخص و (۳) مقاوم به جذب بودن

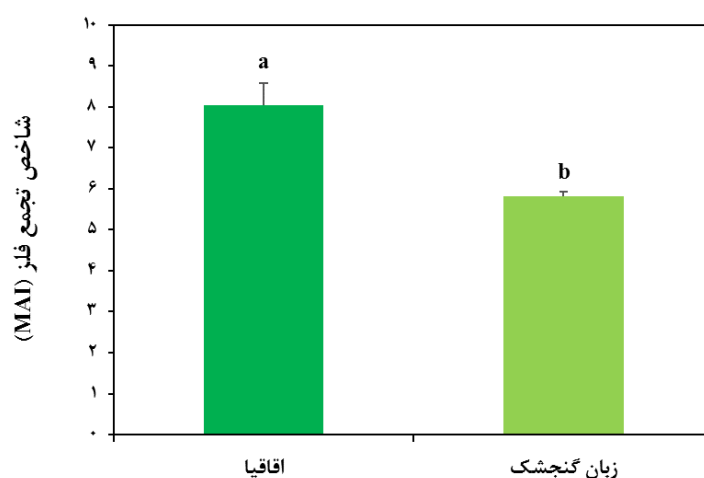
ردیف	گونه‌های درختی	بیش انباشتگر	شاخص	مقاوم به جذب
۱	افاقیا	Mo	-	Cd و Pb, Cu
۲	زبان گنجشک	-	Mo	Cu, Pb و Cd

نتایج محاسبه شاخص جامع تجمع فلزات (CBCI) نشان داد که بیشترین مقدار مربوط به گونه افاقیا بود که برابر ۰/۷۱ بود و مقدار آن در گونه زبان گنجشک برابر ۰/۵۲ بود (شکل ۷).



شکل ۷. شاخص جامع تجمع فلزات گونه‌های مورد مطالعه

نتایج بررسی شاخص تجمع فلزات در گونه‌های درختی (شکل ۸) نشان داد که اقاچیا با شاخص ۸/۰۵ بالاترین میزان تجمع فلزات را نشان داد و به‌طور قابل توجهی از سایر گونه‌ها متمایز شد. پس از آن، زبان گنجشک (۵/۸۱) در سطح نسبتاً بالا قرار گرفت.



شکل ۸. شاخص تجمع فلز گونه‌های مورد مطالعه

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک و برگ گونه‌های مختلف درختی نشان داد که گونه‌ها رفتار متفاوتی در جذب و انباشت عناصر دارند و این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی، اکولوژیک و شیمی خاک باشد؛ به‌طور مشخص، بین دو گونه اقاچیا و زبان گنجشک تفاوت معنی‌دار مشاهده شد به‌طوری‌که گونه اقاچیا بیشترین میزان جذب مولیبدن و کادمیوم در برگ را نشان داد و به‌طور مستقل در گروه‌های بالاتر قرار گرفت. این یافته‌ها با مطالعات پیشین همخوانی دارد، به‌گونه‌ای که Alloway (۲۰۱۳) گزارش کرده‌اند که گونه‌های مختلف گیاهی بسته به ساختار ریشه، ترشحات ریزوسفری و توانایی انتقال فلزات در آینده، ظرفیت متفاوتی در جذب فلزات دارند [۱۳]. همچنین پژوهش Ali و همکاران (۲۰۱۳) نشان داده‌اند که گونه‌های لگومینه مانند اقاچیا به دلیل توان تثبیت نیتروژن و فعالیت بالای آنزیم‌های ریشه‌ای، توانایی بیشتری در جذب عناصر ریزمغذی و فلزات سنگین دارند [۱۴]. همچنین، پراکندگی داده‌ها و نتایج آزمون‌های آماری نشان داد که هر دو گونه رفتارهای متفاوتی در مواجهه با فلزات مختلف از خود نشان می‌دهند. به‌گونه‌ای که اقاچیا اگرچه برای مولیبدن به‌عنوان بیش‌انباشتگر عمل می‌کند، اما در برابر جذب مس، سرب و کادمیوم مقاومت نسبی نشان می‌دهد و در گروه مقاوم قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، زبان گنجشک نیز نسبت به هر چهار فلز مورد مطالعه (مولیبدن، مس، سرب و کادمیوم) رفتار مقاوم یا شاخص از خود نشان داده و در سطح پایین‌تری از جذب قرار دارد. این الگوی مقاومت انتخابی می‌تواند ناشی از ویژگی‌های شیمیایی خاک اطراف ریشه، مکانیسم‌های دفع فلزات در سلول‌های گیاهی و یا تفاوت در ساختار ریشه و ترشحات ریزوسفری باشد.

در مجموع، این نتایج با مطالعات جهانی در زمینه زیست‌پالایی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که انتخاب گونه‌های خاص مانند اقاچیا می‌تواند در مدیریت آلودگی خاک و کاهش غلظت فلزات سنگین مؤثر باشد، درحالی‌که گونه‌های مقاوم مانند زبان گنجشک می‌تواند در پایداری اکوسیستم نقش ایفا کنند؛ بنابراین، یافته‌های این پژوهش نه تنها اهمیت تفاوت‌های گونه‌ای در جذب فلزات سنگین را برجسته می‌سازد، بلکه کاربرد عملی آنها را در برنامه‌های احیای خاک‌های آلوده و مدیریت زیست‌محیطی تأیید می‌کند. همچنین، بررسی شاخص تجمع زیستی (BCF) نشان داد که گونه اقاچیا تنها برای مولیبدن (۱/۰۳) بیش‌انباشتگر بوده و زبان گنجشک در گروه مقاوم یا شاخص قرار گرفت. گونه‌های بیش‌انباشتگر گیاهانی هستند که توانایی جذب و تجمع غلظت‌های بسیار بالایی از فلزات را در اندام‌های هوایی خود دارند و گونه‌های شاخص گیاهانی هستند که غلظت فلز در بافت‌های آنها به‌طور مستقیم با غلظت فلز در خاک مرتبط است و تغییرات آلودگی را منعکس می‌کنند [۱۵]. به‌علاوه، مهم‌ترین ویژگی گیاهان مقاوم، توانایی آنها در

ثابت نگه داشتن غلظت پایین فلزات در شاخه‌ها و برگ‌ها، حتی زمانی که غلظت فلز در خاک بسیار بالا است، می‌باشد.

نتایج شاخص تجمع فلز (MAI) نشان داد که گونه افاقیا با مقدار $8/05$ بالاترین میزان تجمع کلی فلزات سنگین را دارد؛ این موضوع بیانگر آن است که افاقیا به عنوان گونه‌ای با ظرفیت بالای گیاه‌پالایی می‌تواند در مدیریت آلودگی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین نقش کلیدی ایفا کند، درحالی که زبان گنجشک با مقاومت نسبی در برابر تجمع فلزات، بیشتر در تثبیت عناصر در خاک مؤثر است. این یافته‌ها با مطالعات جدید همخوانی دارد؛ به‌طور مثال، Erdem و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که غلظت فلزات سنگین در گونه‌های جنگلی بسته به نوع گونه، اندام گیاهی و عمق خاک تفاوت قابل توجهی دارد [۱۶].

بررسی الگوهای انباشت و مقاومت گونه‌های درختی نسبت به فلزات سنگین نشان داد که هر گونه درختی رفتار متفاوتی در جذب و تجمع عناصر دارد. گونه افاقیا نیز توانایی بالایی در انباشت مولیبدن داشت، اما در برابر جذب مس، سرب و کادمیوم مقاوم بود. افاقیا به عنوان یک گونه‌ی لگومینه، با ایجاد گره‌های ریشه‌ای، بستری برای زندگی همزیست با ریزوبیوم‌ها فراهم می‌آورد. این باکتری‌ها نه تنها با تثبیت نیتروژن مولکولی و تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه، موجب افزایش رشد و زیست توده می‌شوند، بلکه از طریق تغییرات شیمیایی و بیوشیمیایی در ناحیه ریزوسفر، فراهمی زیستی عناصر کم مصرف و فلزات سنگین را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۷]. از آنجایی که آنزیم نیتروژناز که مسئول تثبیت نیتروژن است، یک آنزیم وابسته به مولیبدن محسوب می‌شود، حضور فعال ریزوبیوم‌ها در گره‌های ریشه افاقیا، تقاضای فیزیولوژیکی بالایی برای این عنصر ایجاد می‌کند. در نتیجه، غلظت قابل دسترس مولیبدن در اطراف ریشه‌های افاقیا به مراتب بیشتر از سایر گونه‌های فاقد این همزیستی، مانند زبان گنجشک، خواهد بود. این سازوکار زیستی به خوبی توجیه کننده اختلاف معنی دار غلظت مولیبدن در برگ‌های افاقیا در مقایسه با زبان گنجشک است. این یافته با گزارش‌های پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند گونه‌های خانواده Fabaceae به دلیل همزیستی با باکتری‌های تثبیت کننده نیتروژن و ترشح ترکیبات آلی ریشه‌ای، قابلیت تغییر فراهمی زیستی عناصر کم مصرف مانند مولیبدن را دارند [۱۴].

در مقابل، زبان گنجشک گرایش کمتری به انباشت فلزات سنگین نشان داد و تنها در شاخص مولیبدن مقادیر بالاتری داشت. این امر می‌تواند ناشی از ویژگی‌های عمومی جذب و انباشت عناصر در زبان گنجشک باشد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در برگ‌های زبان گنجشک، عناصر غیرضروری مانند مولیبدن و سرب تمایل به انباشت در طول فصل رشد دارند [۱۸]. بنابراین، مقادیر بالاتر مولیبدن در برگ این گونه، ممکن است بیش از آنکه نشان دهنده یک سازوکار انتقال اختصاصی از ریشه باشد، نتیجه مستقیم انباشت طبیعی این عنصر غیرضروری در بافت برگ باشد. این در حالی است که زبان گنجشک برای سایر عناصر (مس، سرب و کادمیوم) الگوی مشابهی از خود نشان نداده و عموماً در گروه مقاوم یا شاخص قرار گرفته است.

مقایسه نتایج این پژوهش با استانداردهای جهانی [۱۲] نشان داد که غلظت فلزات سنگین در برگ گونه‌های مورد مطالعه به‌طور قابل توجهی بالاتر از محدوده‌های نرمال گزارش شده در منابع بین‌المللی است؛ به‌طور مشخص، میانگین غلظت مس و مولیبدن در تمامی نمونه‌های برگ بیش از حد استاندارد بود. با وجود آنکه قابلیت تحرک کادمیوم در خاک به مراتب بیشتر از سرب است و این فلز توانایی بالایی در انتقال از ریشه به اندام هوایی دارد، غلظت کادمیوم در برگ‌های هر دو گونه در محدوده استاندارد قرار داشت. این موضوع نشان دهنده غلظت پایین کادمیوم در خاک منطقه مورد مطالعه است. در مقابل، سرب با وجود تحرک پایین‌تر در خاک (به دلیل تمایل به اتصال به ماده آلی و اکسیدها)، در اغلب نمونه‌های برگ بالاتر از حد استاندارد مشاهده شد که می‌تواند ناشی از جذب سطحی و ته نشینی جوی بر روی برگ‌ها باشد و لزوماً نشان دهنده انتقال از ریشه نیست. این یافته‌ها بیانگر آن است که منطقه مورد مطالعه تحت فشار آلودگی فلزات سنگین قرار دارد و گونه‌های گیاهی به عنوان شاخص‌های زیستی توانسته‌اند این آلودگی را در بافت خود منعکس کنند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که حضور فلزات سنگین در خاک‌های آلوده به فعالیت‌های صنعتی، شهری و کشاورزی می‌تواند منجر به افزایش غلظت این عناصر در گیاهان شود [۱۳]. بنابراین، مشاهده غلظت بالای فلزات در برگ گونه‌های مورد مطالعه نه تنها اهمیت انتخاب گونه‌های خاص برای زیست‌پالایی و مدیریت آلودگی خاک را برجسته می‌سازد، بلکه نشان دهنده خطر بالقوه برای سلامت اکوسیستم و انسان نیز هست؛ زیرا انتقال این فلزات از طریق زنجیره غذایی می‌تواند اثرات سمی جدی ایجاد کند.

اندام‌های گوناگون گیاه این توانایی را دارند که به‌طور همزمان چندین فلز سنگین مختلف را در خود انباشت کنند. در این زمینه،

شاخص CBCI به‌عنوان یکی از ابزارهای عددی مفید و کارآمد شناخته می‌شود که برای ارزیابی قابلیت اندام‌های گیاه در جذب و تجمع همزمان چندین عنصر از خاک به کار می‌رود [۱۹]. هرچه مقدار عددی CBCI برای یک گونه درختی بیشتر باشد، به این معناست که آن گونه توانایی بالاتری در انباشت همزمان چندین فلز سنگین در اندام‌های خود دارد و بنابراین گزینه مناسب‌تری برای کاربرد در پروژه‌های گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به چندین فلز خواهد بود [۱۰]. اعمال مفهوم CBCI در جذب فلزات سنگین برای هر یک از گونه‌های مورد بررسی، شاخص مفیدی برای توانایی آنها در تجمع فلزات متعدد در بخش‌های هوایی خود است. داده‌های CBCI برای هر یک از گونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که افاقیا بالاترین مقادیر CBCI برگ را دارد. مقادیر CBCI برگ برای زبان گنجشک نیز بالا بود، اما به‌طور قابل توجهی کمتر از افاقیا بود. براساس یافته‌های این پژوهش، گونه‌های افاقیا و زبان گنجشک توانایی تجمع همزمان چندین فلز سنگین را دارند و می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای گیاه‌پالایی خاک‌های اطراف معدن مس سونگون مورد توجه قرار گیرند. در مطالعات دیگر گونه‌های مختلف درختی نقش انباشتگر فلزات سنگین را ایفا کرده اند؛ به‌عنوان مثال، گونه سرو مدیترانه‌ای با CBCI بالای ۰/۸ به‌عنوان یک انباشتگر فوق‌العاده برای چندین فلز معرفی شده است [۱۹]. همچنین تحقیقات اخیر در ایران نشان داده است که گونه‌هایی مانند عرعر و توت سیاه بیشترین مقادیر CBCI را در مناطق آلوده شهری-صنعتی دارا هستند [۲۰].

گونه‌های گیاهی نقش مهمی در تنظیم غلظت و فراهمی زیستی فلزات سنگین در ضایعات معدن دارند که اهمیت اکولوژیک آنها را در فرآیندهای بازسازی پس از استخراج نشان می‌دهد. غلظت فلزات در برگ‌های افاقیا و زبان گنجشک نشان‌دهنده آلودگی محیط است و می‌تواند برای پایش زیستی و شناسایی مناطق آلوده و گونه‌های حساس مورد استفاده قرار گیرد. داده‌های این مطالعه نشان می‌دهد که گونه افاقیا نسبت به زبان گنجشک توانایی بیشتری را در تجمع فلزات سنگین از خاک دارد و در نتیجه، همان‌طور که از مقادیر بالای MAI و CBCI آنها مشخص است، به‌عنوان بیش‌انباشت‌کننده در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این، استفاده از گونه زبان گنجشک ممکن است صرف‌نظر از مقادیر پایین‌تر شاخص‌های آنها، انتخاب موفقی برای گیاه‌پالایی باشد. در مجموع، تحقیقات بیشتری برای درک کامل و بهینه‌سازی استفاده از گیاهان و میکروارگانیسم‌ها در زیست‌پالایی مورد نیاز است. از محدودیت‌های این پژوهش، عدم اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای مؤثر خاک مانند pH، ماده آلی و بافت بود. با این وجود، استناد به داده‌های منتشرشده منطقه نشان می‌دهد که خاک‌های مورد مطالعه دارای ویژگی‌های مشابه با سایر مناطق معدنی هستند که در آنها جذب فلزات سنگین توسط گونه‌های جنگلی تأیید شده است. توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده، این پارامترها به‌صورت همزمان اندازه‌گیری شده و ارتباط آنها با شاخص‌های تجمع زیستی به کمک مدل‌های چندمتغیره بررسی گردد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی و معنوی از این پژوهش از طرف دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی اهر، در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی کارشناسی ارشد نویسنده اول و همچنین هزینه شخصی نامبرده انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول، دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش‌ها و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تحلیل و تفسیر اطلاعات

و نتایج، تهیه پیشنهاد مقاله

نویسنده دوم، استاد راهنمای پایان نامه: طراحی فازهای پژوهش به تفکیک، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله
نویسنده سوم، استاد مشاور پایان نامه: مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر روش‌های اجرای پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

References

- [1] Ojuederie, O.B. & Babalola, O.O. (2017). Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1504. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121504>
- [2] Rouhani, A., Hejman, M. & Trögl, J. (2025). A review of soil pollution by potentially toxic elements and remediation strategies in copper mining areas in Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(10), 9793-9806. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05800-8>
- [3] Alizadeh, A., Ghorbani, J., Motamedi, J., Vahabzadeh, G., van der Ent, A. & Edraki, M. (2024). Soil contamination around porphyry copper mines: an example from a semi-arid climate. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2), 204. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12384-w>
- [4] Cozma, P., Roșca, M., Minuț, M. & Gavrilă, M. (2025). Phytoremediation: A sustainable and promising bio-based approach to heavy metal pollution management. *Science of the Total Environment*, 1001, 180458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180458>
- [5] Abdel-Shafy, H. I., El-Khateeb, M. A. & Shehata, M. (2017). Blackwater treatment via combination of sedimentation tank and hybrid wetlands for unrestricted reuse in Egypt. *Desalination and Water Treatment*, 71, 145-151. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20538>
- [6] Nnaji, N. D., Onyeaka, H., Miri, T. & Ugwa, C. (2023). Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Applied Sciences*, 5(5), 125. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6>
- [7] Sawidis, T., Metentzoglou, E., Mitrakas, M. & Vasara, E. (2011). A study of chromium, copper, and lead distribution from lignite fuels using cultivated and non-cultivated plants as biological monitors. *Water, Air, & Soil Pollution*, 220(1), 339-352. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0758-0>
- [8] Siregar, E., Jumilawaty, E., Tanjung, M., Syafitri, A., Kusmana, C., Basyuni, M. & Rahmania, R. (2025). Bioaccumulation of Heavy Metals by *Acanthus ilicifolius* in Polluted Mangrove Ecosystems. *Emerging Science Journal*, 9, 557-568. <http://dx.doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-02-03>
- [9] Almahasheer, H. (2019). High levels of heavy metals in Western Arabian Gulf mangrove soils. *Molecular Biology Reports*, 46(2), 1585-1592. <https://doi.org/10.1007/s11033-019-04603-2>
- [10] Zhao, X., Liu, J., Xia, X., Chu, J., Wei, Y., Shi, S., Chang, E., Yin, W. & Jiang, Z. (2014). The evaluation of heavy metal accumulation and application of a comprehensive bio-concentration index for woody species on contaminated sites in Hunan, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(7), 5076-5085. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2393-3>
- [11] Hu, Y., Wang, D., Wei, L., Zhang, X. & Song, B. (2014). Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan' a city of the Loess Plateau, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 110, 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.08.021>
- [12] Hajar, E. W. I., Sulaiman, A.Z.B. & Sakinah, A.M. (2014). Assessment of heavy metals tolerance in leaves, stems and flowers of *Stevia rebaudiana* plant. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 386-393. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.049>
- [13] Alloway, B.J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (3rd ed.). Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- [14] Ali, H., Khan, E. & Sajad, M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>

- [15] Massoura, S.T., Echevarria, G., Leclerc-Cessac, E. & Morel, J. L. (2004). Response of excluder, indicator, and hyperaccumulator plants to nickel availability in soils. *Soil Research*, 42(8), 933-938. <https://doi.org/10.1071/SR03157>
- [16] Erdem, R., Aricak, B., Cetin, M. & Sevik, H. (2023). Change in some heavy metal concentrations in forest trees by species, organ, and soil depth. *Forestist*, 73 (3), 257-263. <https://doi.org/10.5152/forestist.2023.22069>
- [17] Liu, R., Oliphant, K. D., Xia, Z., Chen, Z., Hou, R., Zhang, R., Peng, T., Hänsch, R., Wang, D., Rennenberg, H. & Hu, B. (2025). Rhizobial symbiosis modulates mercury accumulation and metabolic adaptation under hydrological extremes. *Journal of Hazardous Materials*, 495, 139141. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139141>
- [18] Hasmik, H., Tepanosyan, G., Gevorgyan, A., Baldacchini, C. & Sahakyan, L. (2021). Similarities and differences of potentially toxic elements contents in leaves of *Fraxinus excelsior* L. and *Platanus orientalis* L. in an urban environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, 65, 127359. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127359>
- [19] Al-Sayaydeh, R. S., Al-Hawadi, J. S., Al-Hababbeh, K. A., Al-Nawaiseh, M. B., Albdaiwi, R. N. & Ayad, J. Y. (2022). Phytoremediation potential of selected ornamental woody species to heavy metal accumulation in response to long-term irrigation with treated wastewater. *Water*, 14(13), 2086. <https://doi.org/10.3390/w14132086>
- [20] Mohtadi, A. & Hatami-Manesh, M. (2025). Assessment of resistance and biochemical responses of tree species as a biomonitor of heavy metals pollution in an urban-industrial setting (Yasouj, Iran). *Chemosphere*, 378, 144402. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144402>