

(OPEN ACCESS)

Heavy metal accumulation and distribution in four broadleaf and coniferous tree species cultivated at Mobarakeh Steel company

Kobra Badfar¹, Ali Soltani^{*2}, Siavash Bakhtiyarvand Bakhtiari³, Hormoz Sohrabi⁴

1. M.Sc. Graduate in Forestry, Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, I. R. Iran. E-mail: -----
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, I. R. Iran. E-mail: ali.soltani@sku.ac.ir
3. Ph.D. in Forest Science and Engineering, Department of Green Space, Mobarakeh Steel Company, Isfahan, I. R. Iran. E-mail: -----
4. Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modares University, Noor, I. R. Iran. E-mail: -----

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 02.10.2026
Revised: -----
Accepted: 04.15.2026

Keywords:
Heavy Environmental
Pollution,
Phytoremediation,
Plant Biomass,
Transfer Factor

ABSTRACT

Background and Objectives: Environmental contamination by heavy metals, particularly in industrial areas such as steel production facilities, poses a serious threat to ecosystems and human health. Phytoremediation is recognized as a sustainable and cost-effective approach for removing pollutants such as heavy metals from soil and water. Tree species, due to their extensive root systems, high biomass production, and perennial nature, are considered suitable candidates for long-term phytoremediation. This study investigated the capacity of four tree species-*Cupressus arizonica*, *Morus alba*, *Pinus eldarica*, and *Robinia pseudoacacia*-grown in a heavy-metal-contaminated environment (the Mobarakeh Steel Complex) to accumulate and distribute heavy metals among roots, stems, branches, and leaves. The trees had grown for 17 years under similar conditions with drip irrigation in mixed stands within a single plot of approximately 0.5 ha. The main objectives were to evaluate organ-specific metal accumulation patterns, quantify the relative contribution of each organ to remediation, and determine the overall phytoremediation potential. The novelty of this study lies in providing an integrated analysis of metal concentration data together with actual biomass allocation patterns across the whole plant to achieve a more accurate assessment of species-specific remediation capacity.

Materials and Methods: Cadmium (Cd), copper (Cu), zinc (Zn), and iron (Fe) were selected due to their prominent occurrence in effluents and soils surrounding steel and metal smelting facilities. Five individuals of each species were randomly selected. Samples were separated into major plant organs, and after drying and grinding, metal concentrations were determined using flame atomic absorption spectrophotometry. Transfer factor (TF), biomass allocation, inter-metal correlations, and cumulative metal accumulation were calculated and analyzed using a general linear model.

Results: *Cupressus arizonica* (Zn: 223 mg·kg⁻¹; Cd: 6 mg·kg⁻¹) and *Morus alba* (Fe: 1336 mg·kg⁻¹; Cu: 55 mg·kg⁻¹) showed the highest metal concentrations, whereas *Robinia pseudoacacia* exhibited the lowest levels across organs. Leaves showed the highest TF values for all metals in all species. The highest Fe translocation was observed in *Pinus eldarica* leaves (TF = 27.86), followed by *Morus alba* (5.96) and *Cupressus arizonica* (3.69), while Cd and Zn generally showed TF values >1 in leaves. Copper translocation was species-dependent. Strong positive correlations among Cd, Cu, and Zn were detected in leaves of *Morus* (r = 0.85–0.96) and *Robinia* (r = 0.88–0.93), whereas no significant correlations were observed in *Pinus*. *Pinus eldarica* produced the highest total dry biomass (110 kg) with dominant allocation to stems (47%) and showed the greatest total metal accumulation, particularly for Cd, Cu, and Zn. *Robinia pseudoacacia* allocated the highest biomass share to roots (36%). Despite its low total biomass (30 kg), *Morus alba* exhibited high Fe and Cu accumulation in leaves. Metal concentrations in leaves of all species exceeded reported toxicity thresholds, indicating severe meta contamination stress.

Conclusion: The results demonstrate pronounced species-specific differences in heavy metal accumulation, translocation, and stabilization. *Pinus eldarica* is suitable for long-term metal stabilization due to high biomass production and metal storage in stems and roots, whereas *Cupressus arizonica* shows potential for combined stabilization and extraction through substantial foliar accumulation. *Morus alba* and *Robinia pseudoacacia*, despite lower biomass, are appropriate for restoration and management of moderately contaminated sites due to effective metal transfer to harvestable aerial organs. Accordingly, species selection in phytoremediation programs should be based on dominant metal type, contamination level, and management objectives (stabilization vs. extraction).

Cite this article: Badfar, Kobra, Soltani, Ali, Bakhtiyarvand Bakhtiari, Siavash, Sohrabi, Hormoz. 2026. Heavy metal accumulation and distribution in four broadleaf and coniferous tree species cultivated at Mobarakeh Steel company. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 33 (1), 71-89.



© The Author(s).

DOI:

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تجمع و توزیع فلزات سنگین در چهار گونه درختی پهن برگ و سوزنی برگ کشت شده در شرکت فولاد مبارکه

کبری بادفر^۱، علی سلطانی^{۲*}، سیاوش بختیاروند بختیاری^۳، هرمز سهرابی^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد جنگلداری، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: -----
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: ali.soltani@sku.ac.ir
۳. دکتری علوم و مهندسی جنگل، دپارتمان فضای سبز شرکت فولاد مبارکه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: -----
۴. دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: -----

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: آلودگی محیط‌زیست با فلزات سنگین، به‌ویژه در مناطق صنعتی مانند واحدهای تولید فولاد، تهدیدی جدی برای سلامت اکوسیستم و انسان به شمار می‌رود. گیاه‌پالایی به‌عنوان روشی پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای حذف آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین از خاک و آب مطرح است. گونه‌های درختی به دلیل ریشه‌های گسترده، زی‌توده بالا و ماهیت چندساله، گزینه‌های مناسبی برای گیاه‌پالایی بلندمدت به‌حساب می‌آیند. این مطالعه به بررسی توانایی چهار گونه درختی سرو نقره‌ای (<i>Cupressus arizonica</i>)، توت سفید (<i>Morus alba</i>)، کاج تهران (<i>Pinus eldarica</i>) و اقاچیا (<i>Robinia pseudoacacia</i>) رشد یافته در محیط آلوده به فلزات سنگین (مجتمع فولاد مبارکه) در انباشت و توزیع فلزات سنگین در اندام‌های ریشه، تنه، شاخه و برگ پرداخته است. درختان مورد بررسی ۱۷ سال در شرایط مشابه آبیاری قطره‌ای و در قالب توده‌های آمیخته (در یک کرت با وسعت تقریبی نیم هکتار و در مجاورت یکدیگر) رشد کرده‌اند. اهداف اصلی شامل ارزیابی الگوهای اندام محور انباشت فلزات، سنجش سهم نسبی هر اندام در پالایش و تعیین پتانسیل کلی گیاه‌پالایی است. نوآوری این پژوهش در ارائه تحلیل یکپارچه‌ای از داده‌های مربوط به غلظت فلزات و الگوهای واقعی تخصیص زی‌توده در سراسر گیاه برای ارزیابی دقیق ظرفیت پالایش گونه‌ها است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱ تاریخ ویرایش: ----- تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۶	
واژه‌های کلیدی: آلودگی محیط‌زیست، زی‌توده گیاهی، شاخص انتقال، گیاه‌پالایی	
	مواد و روش‌ها: فلزات کادمیوم (Cd)، مس (Cu)، روی (Zn) و آهن (Fe) به دلیل حضور شاخص در پساب‌ها و خاک‌های اطراف کارخانه‌های فولاد و ذوب فلز انتخاب شدند. پنج پایه از هر گونه به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. نمونه‌ها به اندام‌های اصلی تفکیک و پس از

خشک و آسیاب کردن، غلظت فلزات با جذب اتمی شعله‌ای اندازه‌گیری شد. شاخص انتقال (TF)، تخصیص زی‌توده، همبستگی بین فلزات و مقدار تجمعی فلزات محاسبه و توسط مدل خطی عمومی تحلیل شد.

یافته‌ها: درختان سرو (روی: ۲۲۳ mg/kg و کادمیوم: ۶ mg/kg) و توت (آهن: ۱۳۳۶ mg/kg و مس: ۵۵ mg/kg) بیش‌ترین و افاقیا کم‌ترین غلظت فلزات را در اندام‌هایشان نشان دادند. برگ‌ها در همه گونه‌ها و برای تمام فلزات بالاترین TF را داشتند؛ بیش‌ترین انباشت Fe در برگ کاج با (TF=۲۷/۸۶) و پس‌از آن توت (۵/۹۶) و سرو (۳/۶۹) مشاهده شد، درحالی‌که انتقال Cd و Zn به برگ‌ها غالباً با TF بیش از ۱ بود. انتقال Cu وابسته به گونه بود و بیش‌ترین افزایش TF عمدتاً در مرحله برگ به شاخه رخ داد. همبستگی مثبت و قوی میان Cu، Cd و Zn در برگ‌های توت (r=۰/۸۵-۰/۹۶) و افاقیا (r=۰/۸۸-۰/۹۳) مشاهده شد، درحالی‌که در کاج همبستگی معناداری بین فلزات دیده نشد. کاج با بیش‌ترین زی‌توده خشک کل (۱۱۰ کیلوگرم) و تخصیص غالب به تنه (۰/۴۷٪)، بالاترین تجمع کلی فلزات سنگین را به‌ویژه برای Cu، Cd و Zn در اندام تنه نشان داد، درحالی‌که افاقیا بیش‌ترین تخصیص زی‌توده را به ریشه‌ها اختصاص داد (۰/۳۶٪). توت با وجود زی‌توده کل پایین (۳۰ کیلوگرم)، تجمع بالای Fe و Cu را در برگ‌ها ثبت کرد. غلظت همه فلزات در برگ گونه‌ها از آستانه‌های سمیت فراتر بود که نشان‌دهنده قرارگیری همه گونه‌ها تحت استرس شدید فلزی است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد الگوهای تجمع، انتقال و تثبیت فلزات سنگین به‌طور معناداری میان گونه‌های درختی متفاوت است و هر گونه کارکرد متمایزی در گیاه‌پالایی دارد. کاج با تولید بیش‌ترین زی‌توده خشک و تمرکز فلزات در تنه و ریشه، گزینه‌ای مناسب برای تثبیت بلندمدت فلزات سنگین محسوب می‌شود، درحالی‌که سرو با تجمع قابل‌توجه فلزات در برگ‌ها قابلیت ترکیب راهبردهای تثبیت و استخراج را دارد. توت و افاقیا با وجود زی‌توده کم‌تر، به دلیل انتقال مؤثر فلزات به اندام‌های هوایی و امکان برداشت سالانه برگ‌ها، برای بازسازی و مدیریت سایت‌های با آلودگی کم‌تر مناسب هستند. بر این اساس، انتخاب گونه در برنامه‌های گیاه‌پالایی باید بر مبنای نوع فلز غالب، سطح آلودگی و هدف مدیریتی (تثبیت یا استخراج) انجام گیرد.

استناد: بادفر، کبری، سلطانی، علی، بختیاروند بختیاری، سیاوش، سهرابی، هرمز (۱۴۰۵). تجمع و توزیع فلزات سنگین در چهار گونه درختی پهن‌برگ و سوزنی‌برگ کشت‌شده در شرکت فولاد مبارکه. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۳ (۱)، ۸۹-۷۱.

DOI:



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

آلودگی محیط‌زیست با فلزات سنگین به‌ویژه در نواحی صنعتی پیرامون واحدهای تولید فولاد که در آن‌ها رهاسازی مقادیر قابل‌توجهی از فلزات سنگین، سلامت اکوسیستم و سلامت انسان را تهدید می‌کند، یکی از چالش‌های پایدار جهانی به شمار می‌رود. از آن‌جاکه این آلاینده‌ها موجب افت کیفیت خاک و منابع آبی می‌شوند، مدیریت مؤثر آن‌ها ضرورتی انکارناپذیر است (۱، ۲، ۳). گیاه‌پالایی^۱ یعنی استفاده از گیاهان برای استخراج، تثبیت یا پالایش آلاینده‌های محیطی، به‌عنوان روشی پایدار و مقرون‌به‌صرفه در مقایسه با روش‌های مرسوم پاکسازی مطرح شده است (۴، ۵، ۶، ۷). گیاه‌پالایی از ظرفیت ذاتی گیاهان برای جذب، انباشت و در برخی موارد پالایش آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین از جمله کادمیوم (Cd)، مس (Cu)، روی (Zn) و آهن (Fe) که حضور آن‌ها در عرصه‌های پالایش فلزی رایج است بهره می‌گیرد (۸). در این میان، گونه‌های درختی به دلیل برخورداری از سامانه‌های ریشه‌ای گسترده، زی‌توده بالا و ماهیت چندساله، گزینه‌های امیدوارکننده‌ای برای پاکسازی بلندمدت عرصه‌های آلوده به فلزات سنگین از خاک و آب به شمار می‌روند و راهکارهای مبتنی بر طبیعت مانند گیاه‌پالایی را به ابزارهایی حیاتی برای بازسازی محیط‌زیست بدل می‌سازند (۶، ۹).

انتخاب گونه‌های درختی مناسب در این فرآیند از اهمیت بالایی برخوردار است، چراکه گونه‌های مختلف درختی کارایی متفاوتی در جذب و انباشت فلزات سنگین در بافت‌های خود (ریشه، تنه، شاخه و برگ) نشان می‌دهند. توانایی گیاه‌پالایی درختان به‌طور قابل‌توجهی بین گروه‌های متفاوت گیاهی مختلف است؛ به‌گونه‌ای که درختان پهن‌برگ (نهان‌انگان) و سوزنی‌برگ (بازدانگان) ویژگی‌های متمایزی را در

حذف آلاینده‌ها نشان می‌دهند (۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲). برخی گونه‌های درختی به معنای واقعی بیش‌اندوز^۲ (متخصص در جذب فلزات) هستند. درختان پهن‌برگ معمولاً به دلیل داشتن نرخ تعرق بالاتر، سیستم ریشه‌ای گسترده، رشد سریع‌تر و تنوع ژنتیکی بیش‌تر، در جذب مؤثر آلاینده‌ها و تولید زیست‌توده عملکرد بهتری دارند. در مقابل، سوزنی‌برگان با مزایایی چون پتانسیل گیاه‌پالایی در تمام طول سال، مقاومت بیش‌تر در برابر شرایط سخت و طول عمر بالاتر، گزینه‌هایی مناسب برای پالایش بلندمدت محسوب می‌شوند (۱۳، ۱۴، ۱۵). برخی گونه‌های گیاهی از مسیرهای انتقال و ذخیره غیرگزینشی بهره می‌برند که در آن، فلزات مختلف از مسیرهای مشترک عبور می‌کنند، درحالی‌که گونه‌های دیگر دارای مسیرهای انتقال اختصاصی و گزینشی هستند که در آن‌ها جذب و ذخیره عناصر را به‌صورت گزینشی و تنظیم‌شده کنترل می‌شود (۲). این تفاوت‌ها موجب بروز الگوهای همبستگی متفاوت بین فلزات در بافت‌های گیاهی می‌شود و انتخاب گونه مناسب برای گیاه‌پالایی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.

در این میان، شاخص انتقال^۳ به‌عنوان معیاری کلیدی در ارزیابی کارایی گونه‌ها در گیاه‌پالایی مطرح است. این شاخص نسبت غلظت فلز در اندام‌های هوایی به ریشه را نشان می‌دهد و بر اساس آن، گونه‌های دارای شاخص بالا برای استخراج گیاهی^۴ و گونه‌های دارای شاخص پایین برای گیاه‌ماندگاری^۵ مناسب‌تر هستند (۱۵). افزون بر این، ویژگی‌های فیزیولوژیکی مانند نرخ تعرق، سرعت رشد و ساختار ریشه در الگوی انباشت فلزات نقش مهمی دارند؛ به‌طوری‌که گونه‌های با تعرق بالا و رشد سریع معمولاً فلزات بیش‌تری را در اندام‌های هوایی تجمع می‌دهند،

- 2- Hyperaccumulators
- 3- Transfer Factor
- 4- Phytoextraction
- 5- Phytostabilization

- 1- Phytoremediation

در حالی که گونه‌های دارای ریشه‌های گسترده و مقاوم به تثبیت فلزات در خاک تمایل بیش‌تری دارند (۱۶). اگرچه مطالعات متعددی توانایی گونه‌های مختلف درختی را در انباشت فلزات سنگین گزارش کرده‌اند (۱۷، ۱۸)، این پژوهش‌ها عمدتاً به اندازه‌گیری غلظت فلزات در یک یا چند اندام گیاهی محدود شده‌اند. در نتیجه، اغلب مشخص نیست که سهم واقعی هر اندام در پالایش فلزات تا چه اندازه ناشی از غلظت فلز و تا چه اندازه تابع میزان زی‌توده آن اندام است. نادیده گرفتن الگوهای تخصیص زی‌توده می‌تواند به برآورد نادرست ظرفیت واقعی گیاه‌پالایی گونه‌ها منجر شود، زیرا اندامی با غلظت بالا اما زی‌توده اندک ممکن است نقش محدودی در پالایش کل ایفا کند. این شکاف دانشی مهم، توسعه راهبردهای بهینه گیاه‌پالایی را با چالش مواجه می‌سازد؛ چراکه پتانسیل واقعی یک گونه در استخراج فلزات سنگین، نه تنها به غلظت فلز در اندام‌های خاص، بلکه به سهم زی‌توده هر اندام از کل گیاه نیز وابسته است. رویکردهایی که توزیع زی‌توده را در نظر نمی‌گیرند، می‌توانند تصویری ناقص از ظرفیت پالایش ارائه دهند؛ برای مثال، اگرچه غلظت فلز در برگ‌ها ممکن است بالا باشد، اما به دلیل زی‌توده پایین این اندام، سهم آن در حذف کل فلز از محیط ممکن است کم‌تر از اندامی مانند تنه باشد که دارای زی‌توده بالاتر و غلظت متوسطی از فلز است؛ بنابراین، انجام تحلیل‌های یکپارچه‌ای که داده‌های مربوط به انباشت فلز در اندام‌های مختلف را با الگوهای واقعی تخصیص زی‌توده تلفیق کنند، برای ارزیابی دقیق و مقایسه اثربخشی واقعی گونه‌ها در گیاه‌پالایی و تدوین راهبردهای عملی برداشت، ضرورتی انکارناپذیر دارد.

در حالی که گونه‌های دارای ریشه‌های گسترده و مقاوم به تثبیت فلزات در خاک تمایل بیش‌تری دارند (۱۶). اگرچه مطالعات متعددی توانایی گونه‌های مختلف درختی را در انباشت فلزات سنگین گزارش کرده‌اند (۱۷، ۱۸)، این پژوهش‌ها عمدتاً به اندازه‌گیری غلظت فلزات در یک یا چند اندام گیاهی محدود شده‌اند. در نتیجه، اغلب مشخص نیست که سهم واقعی هر اندام در پالایش فلزات تا چه اندازه ناشی از غلظت فلز و تا چه اندازه تابع میزان زی‌توده آن اندام است. نادیده گرفتن الگوهای تخصیص زی‌توده می‌تواند به برآورد نادرست ظرفیت واقعی گیاه‌پالایی گونه‌ها منجر شود، زیرا اندامی با غلظت بالا اما زی‌توده اندک ممکن است نقش محدودی در پالایش کل ایفا کند. این شکاف دانشی مهم، توسعه راهبردهای بهینه گیاه‌پالایی را با چالش مواجه می‌سازد؛ چراکه پتانسیل واقعی یک گونه در استخراج فلزات سنگین، نه تنها به غلظت فلز در اندام‌های خاص، بلکه به سهم زی‌توده هر اندام از کل گیاه نیز وابسته است. رویکردهایی که توزیع زی‌توده را در نظر نمی‌گیرند، می‌توانند تصویری ناقص از ظرفیت پالایش ارائه دهند؛ برای مثال، اگرچه غلظت فلز در برگ‌ها ممکن است بالا باشد، اما به دلیل زی‌توده پایین این اندام، سهم آن در حذف کل فلز از محیط ممکن است کم‌تر از اندامی مانند تنه باشد که دارای زی‌توده بالاتر و غلظت متوسطی از فلز است؛ بنابراین، انجام تحلیل‌های یکپارچه‌ای که داده‌های مربوط به انباشت فلز در اندام‌های مختلف را با الگوهای واقعی تخصیص زی‌توده تلفیق کنند، برای ارزیابی دقیق و مقایسه اثربخشی واقعی گونه‌ها در گیاه‌پالایی و تدوین راهبردهای عملی برداشت، ضرورتی انکارناپذیر دارد.

این مطالعه با هدف رفع محدودیت‌های موجود در درک الگوهای انباشت فلزات سنگین، به ارائه یک تحلیل تطبیقی از چهار گونه درختی سرو نقره‌ای

مواد و روش‌ها

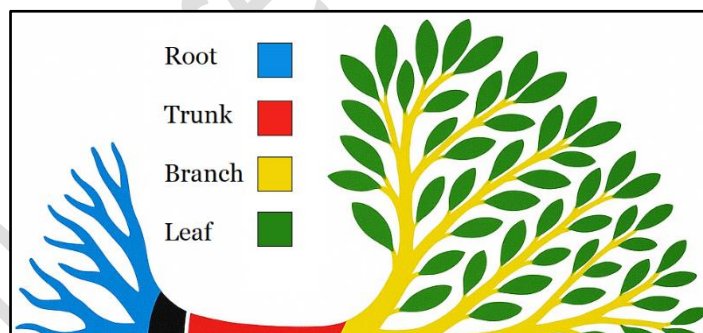
منطقه مورد مطالعه: منطقه تحقیق بخشی از جنگلکاری‌های مجتمع فولاد مبارکه اصفهان است که در ۵۰ کیلومتری جنوب غربی شهر اصفهان و در محدوده جغرافیایی عرض‌های شمالی ۸° ۱۳' ۳۲" تا ۱۷° ۱۷' ۳۲" و طول‌های شرقی ۱۹° ۲۳' ۵۱" تا ۲۷° ۵۱' ۵۱" واقع شده است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، اقلیم منطقه خشک و سرد بوده و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۱۵۰ میلی‌متر است. ارتفاع از سطح دریا بین ۱۷۱۹ تا ۱۸۲۳ متر متغیر است. جنگلکاری منطقه در قالب توده‌های همسال (به‌صورت آمیخته یا خالص) با استفاده از گونه‌های مختلف درختی انجام شده است. این جنگل‌کاری‌ها تحت آبیاری قطره‌ای منظم با آب برگشتی از سیستم خنک‌کننده کارخانه قرار داشته‌اند. از میان توده‌های آمیخته و هفده ساله، چهار گونه کاج تهران (*Pinus eldarica*)، سرو نقره‌ای (*Cupressus arizonica*)، افاقیا (*Robinia pseudoacacia*) و توت سفید (*Morus alba*) انتخاب شدند. این درختان در شرایط زیستی مشابه، در یک کرت با

انتخاب و در پایان فصل رویش (تابستان) قطع و ریشه‌کن شدند. پس از برداشت، هر پایه به اندام‌هایی اصلی شامل برگ، شاخه، تنه و ریشه تفکیک شد. بخش یقه ریشه (کنده) به دلیل ماهیت گذار بین اندام‌هایی هوایی و زیرزمینی، دشواری تفکیک دقیق آن از تنه و ریشه و سهم ناچیز آن در زی‌توده کل، در محاسبات مربوط به انباشت و تخصیص فلزات لحاظ نشد (شکل ۱). نمونه‌های برگ سرو به‌ناچار شامل سرشاخه‌های کوچک نیز می‌شد. وزن تر هر بخش بلافاصله پس از تفکیک با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری شد. سپس از هر اندام، نمونه‌هایی به وزن تقریبی ۱۰۰ گرم جدا شده، توزین و در شرایط مهروموم‌شده جهت تعیین وزن خشک به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌برداری از اندام‌های مختلف با حداقل پنج تکرار و از بخش‌های مختلف هر اندام به‌گونه‌ای انجام شد که نماینده مناسبی از کل آن اندام باشد (۲۰).

وسعت تقریبی نیم هکتار و در مجاورت یکدیگر (آمیختگی ردیفی) در بخش جنوبی منطقه قرار داشتند و در فاصله کاشت اولیه حدود ۴ × ۵ متر (بین نهال‌های یک ردیف ۴ متر و فاصله بین ردیف‌ها ۵ متر) کاشته شده بودند. در ادامه این پژوهش، از نام‌های فارسی کاج، سرو، توت و افاقیا و از نام جنس لاتین درختان استفاده خواهد شد.

در این مطالعه، غلظت فلزات سنگین در خاک، آب آبیاری و هوای کرت و منطقه جنگلکاری شده مستقیماً اندازه‌گیری نشد. در عوض، به نتایج یک پژوهش پیشین در همین منطقه استناد شده است. طبق آن پژوهش، اگرچه میزان فلزات سنگین در پساب مورد استفاده برای آبیاری ناچیز گزارش شده بود، اما پس از شش سال آبیاری، غلظت آهن، مس و روی در خاک به ترتیب حدود ۸۱۶۱، ۴/۷۷ و ۶۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم برآورد شد (۱۹).

نمونه‌گیری و برآورد زی‌توده: با در نظر گرفتن اثر حاشیه ۱۰ متری، به‌طور تصادفی پنج پایه از هر گونه



شکل ۱- طرح کلی چهار اندام درختی مورد بررسی در این مطالعه: ریشه، تنه، شاخه و برگ. کنده (نمایش داده‌شده با رنگ سیاه) از اندازه‌گیری‌ها مستثنی گردید.

Figure 1. Schematic representation of the four tree organs analyzed in this study: root, trunk, branch, and leaf. The stump (shown in black) was excluded from measurement.

شود. وزن تر و خشک هر نمونه ثبت شد و درصد رطوبت با استفاده از اختلاف آن‌ها محاسبه گردید. بر این اساس، زی‌توده خشک هر اندام با اعمال ضریب تصحیح رطوبت به وزن تر برآورد شد.

نمونه‌ها پیش از واکاوی شسته نشدند. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند و سپس به دسیکاتور منتقل گردیدند تا از جذب رطوبت محیطی جلوگیری

فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفت. مقدار کل فلز در هر اندام از طریق ضرب غلظت اندازه‌گیری شده در وزن خشک آن اندام محاسبه شد و به‌عنوان شاخص تجمع کلی فلز در اندام‌های مختلف گیاه در نظر گرفته شد (۲۲).

تحلیل آماری: پس از تأیید نرمال بودن داده‌ها با آزمون Shapiro-Wilk، از مدل خطی عمومی (GLM) برای بررسی اثرات گونه درختی، نوع اندام (برگ، شاخه، تنه و ریشه) و نوع فلز سنگین بر متغیرهای وابسته استفاده شد. به‌منظور کاهش خطای مدل، شناسه هر درخت به‌عنوان عامل تصادفی در تحلیل لحاظ گردید تا اثر تفاوت‌های فردی بین درختان کنترل شود. متغیرهای مورد بررسی شامل غلظت فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)، کارایی استخراج به‌ازای واحد زی‌توده (میانگین غلظت فلزات در اندام‌ها)، شاخص انتقال (TF) و درصد تخصیص زی‌توده در هر اندام بودند. داده‌های درصدی پیش از ورود به مدل با تبدیل ArcSin نرمال‌سازی شدند. برای بررسی تفاوت‌های معنی‌دار بین گروه‌ها، از آزمون تعقیبی Tukey's HSD در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده گردید. شاخص انتقال به‌صورت نسبت غلظت فلز در اندام‌های هوایی به غلظت آن در ریشه تعریف شد. هم‌چنین، به‌منظور تحلیل روابط خطی میان غلظت فلزات مختلف در گونه‌ها و اندام‌های گوناگون، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد و همبستگی‌ها در صورت کم‌تر بودن مقدار احتمال (p) از ۰/۰۵، معنی‌دار تلقی شدند.

نتایج

غلظت فلزات سنگین: مقایسه بین‌گونه‌ای کارایی درختان در استخراج فلزات سنگین نشان داد که گونه‌های سرو و توت بالاترین شاخص‌های کارایی را به‌ازای واحد زی‌توده دارا هستند. درختان توت

نمونه‌های خشک‌شده پس‌از آن با آسیاب تا دستیابی به ذرات با اندازه کم‌تر از ۰/۰۱ میلی‌متر پودر شدند (۲۱).

اندازه‌گیری فلزات سنگین: برای تعیین غلظت فلزات سنگین، ۰/۲۵ گرم از پودر خشک هر اندام با ۴ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک تحت دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در دستگاه Digesdahl تا زمان شفاف شدن محلول هضم شد. سپس، ۲-۳ میلی‌لیتر آب‌اکسیژنه ۳۰٪ به‌صورت تدریجی افزوده شد تا اکسیداسیون کامل شود. پس از سرد شدن، حجم محلول با آب مقطر به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده و از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ عبور داده شد. غلظت فلزات با دستگاه جذب اتمی شعله‌ای (GBC 932 PLUS) مجهز به لامپ دوتریوم اندازه‌گیری شد. قبل از آن دستگاه بر اساس دستورالعمل، با سه غلظت استاندارد ۰/۱ تا ۱۰ ppm برای هر عنصر کالیبره شد. اندازه‌گیری جذب در طول موج‌های اختصاصی برای هر فلز انجام شد: کادمیوم (Cd) ۲۲۸/۸، مس (Cu) ۳۲۴/۷، آهن (Fe) ۲۴۸/۳۳ و روی (Zn) ۲۱۳/۹ نانومتر. غلظت نهایی فلزات در نمونه‌ها به‌صورت ppm (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

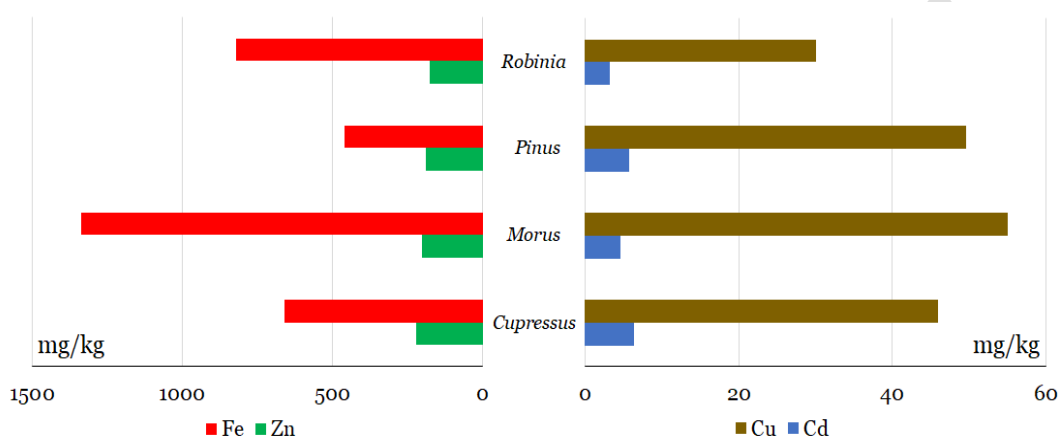
$$C = \frac{V \times 1000 \times (A - B)}{W \times DM} \quad (1)$$

که در آن، C غلظت نهایی، A غلظت اندازه‌گیری شده نمونه، B غلظت نمونه شاهد (اصلاح شده با جذب بلنک)، V حجم نهایی عصاره (میلی‌لیتر)، W وزن نمونه (گرم) و DM درصد وزن خشک اندام مورد نظر (بین اعداد صفر تا یک) هستند.

میانگین غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف گیاه به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی غلظت به‌ازای واحد زی‌توده و کارایی گونه‌ها در استخراج

در مقابل، گونه افاقیا به جز در مورد Fe، در مجموع کمترین میانگین غلظت عناصر Cu، Cd و Zn را در اندام‌های مختلف خود ثبت کرد. این امر بیانگر ظرفیت پایین این گونه در جذب و انباشت فلزات سنگین و در نتیجه کارایی محدود آن در فرآیند پالایش زیستی است (شکل ۲).

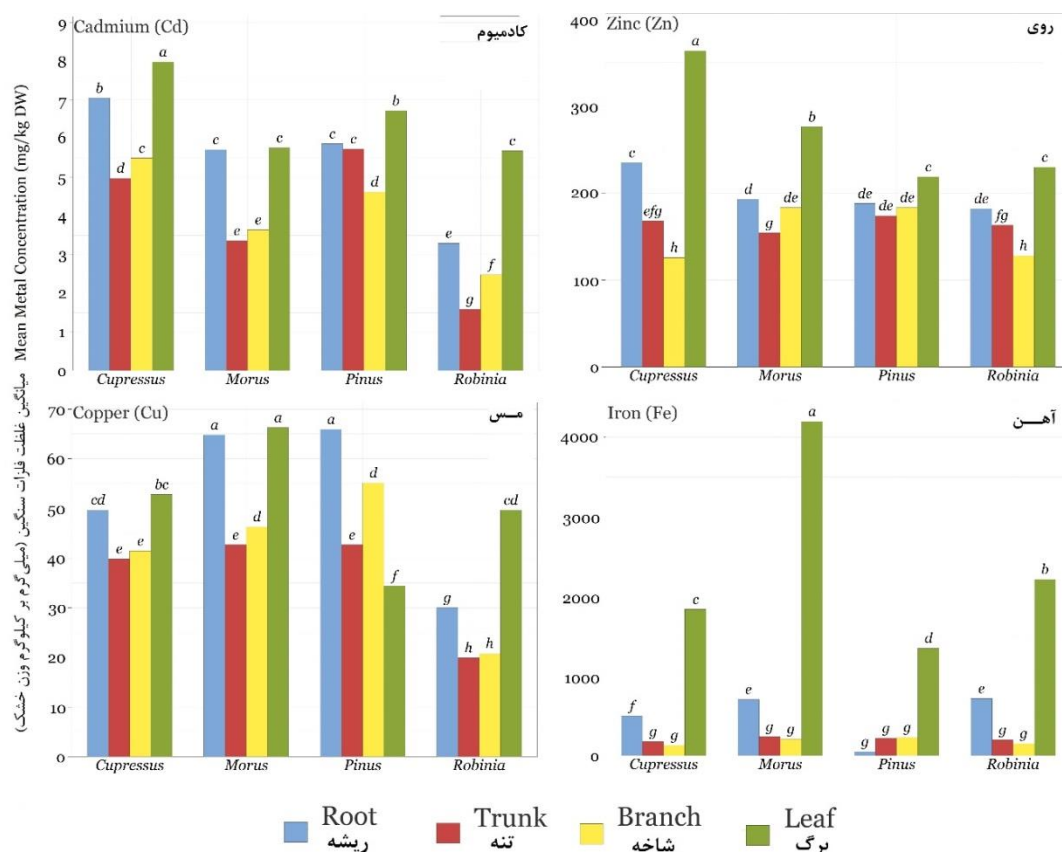
بیشترین غلظت عناصر Cu و Fe و پس از آن Zn را در اندام‌های مختلف خود نشان دادند. از سوی دیگر، گونه سرو عملکرد برجسته‌ای در حذف فلزات Cd و Zn از خود نشان داد و به‌عنوان گونه‌ای با توان پالایشی بالا شناخته شد.



شکل ۲- میانگین غلظت فلزات سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در چهار گونه درختی.
Figure 2. Mean concentrations (mg/kg DW) of heavy metals in four tree species.

احتمالی فرا انباشت این عناصر معرفی می‌کنند؛ به‌ویژه غلظت Fe در برگ‌های توت به‌طور قابل توجهی بالاتر از میانگین سایر گونه‌ها بود (شکل ۳). در مقابل، بیشترین غلظت Cu در ریشه‌های دو گونه کاج و توت مشاهده شد. این الگو می‌تواند بیانگر جذب مؤثر ولی انتقال محدود عنصر Cu به اندام‌های هوایی در گونه کاج باشد. پس از توت، غلظت بالای Fe در برگ‌های افاقیا نیز مشاهده شد که نشان‌دهنده کارایی نسبتاً بالای دو گونه‌ی پهن‌برگ (*Robinia* و *Morus*) در تجمع این فلز فراوان در محیط آلوده پیرامون کارخانه فولاد است (شکل ۳).

یافته‌ها الگوهای مشخص و معناداری از تجمع فلزات سنگین را در اندام‌های مختلف گیاهی و گونه‌های مورد مطالعه نشان دادند. به‌جز گونه کاج که در آن غلظت Cu در برگ‌ها پایین‌ترین بود، در سایر گونه‌ها برگ‌ها و پس از آن ریشه‌ها بیشترین غلظت فلزات سنگین را داشتند که نقش کلیدی این دو اندام در جذب و انباشت عناصر فلزی را برجسته می‌کند. برگ‌های گونه سرو بیشترین غلظت Cd و Zn را نشان دادند که بیانگر ظرفیت بالای این گونه در انباشت این عناصر است. به‌طور مشابه، برگ‌های درخت توت بیشترین غلظت Fe و Cu را داشتند و این گونه را به‌عنوان گزینه‌ای بالقوه برای تجمع بالا و



شکل ۳- میانگین غلظت فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) در اندام‌های مختلف چهار گونه درختی.

حروف متفاوت در بالای ستون‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار آماری بین اندام‌های گیاهی در هر گونه است ($P < 0.05$).

Figure 3. Mean concentrations (mg/kg DW) of heavy metals in different plant organs in four tree species. Different letters above the bars indicate statistically significant differences among plant organs within each species ($P < 0.05$).

در دو گونه پهن‌برگ (توت *Morus* و افاقیا *Robinia*)، به‌ویژه در برگ‌ها، همبستگی‌های قوی و معنی‌داری میان غلظت فلزات سنگین مشاهده شد. در برگ‌های این دو گونه، سه عنصر *Cd*، *Cu* و *Zn* به‌طور هم‌زمان و نسبتاً یکنواخت جذب و انباشت شده بودند. همچنین، بین غلظت *Cd* و *Cu* در شاخه‌های این دو گونه پهن‌برگ نیز همبستگی معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۱).

همبستگی جذب فلزات سنگین: تحلیل همبستگی میان غلظت فلزات سنگین در گونه‌ها و اندام‌های مختلف گیاهی، الگوهای وابسته به گونه و اندام را در جذب عناصر فلزی آشکار کرد (جدول ۱). در گونه کاج هیچ همبستگی معنی‌داری ($P < 0.05$) بین غلظت فلزات مختلف در اندام‌های مختلف مشاهده نشد. هم‌چنین در درختان سرو تنها یک همبستگی معنی‌دار بین غلظت *Zn* و *Cd* در اندام تنه ثبت شد. در مقابل،

جدول ۱- ضرایب همبستگی پیرسون برای جفت‌های غلظت فلزات در ترکیب گونه-اندام. مقادیر فقط برای جفت‌هایی گزارش شده‌اند که دارای همبستگی معنی‌دار آماری هستند ($P < 0.05$).

Table 1. Pearson correlation coefficients for metal concentration pairs across species-organ combinations. Values are reported only for pairs with statistically significant correlations ($P < 0.05$).

گونه Species	اندام Organ	جفت فلز Metal Pair	ضریب همبستگی Correlation (r)	p -value
<i>Cupressus</i>	Trunk	Cd-Zn	0.899	0.015
	Branch	Cd-Cu	0.856	0.030
	Branch	Zn-Fe	0.942	0.005
<i>Morus</i>	Leaf	Cd-Cu	0.955	0.003
	Leaf	Cd-Zn	0.851	0.031
	Leaf	Cu-Zn	0.862	0.027
<i>Robinia</i>	Root	Cd-Fe	0.823	0.044
	Branch	Cd-Cu	0.868	0.025
	Leaf	Cd-Cu	0.931	0.007
	Leaf	Cd-Zn	0.881	0.021
	Leaf	Cu-Zn	0.896	0.015

در برگ‌های افاقیا برابر با $1/73$ بود. در مقابل، رفتار فلز Cu وابسته به گونه بود و در کاج، کاهش نسبی آن در برگ‌ها مشاهده شد ($TF=0.52$). گونه کاج روندهای منحصربه‌فردی را نشان داد، از جمله کاهش فاکتور انتقال Cd از تنه به شاخه و انباشت غیرمعمول Fe در برگ‌ها. بیش‌ترین افزایش در TF معمولاً در مرحله انتقال از شاخه به برگ رخ داد، درحالی‌که انتقال از تنه به شاخه عمدتاً پایدار باقی ماند یا بسته به گونه نوسان داشت (جدول ۲).

شاخص انتقال (TF): تحلیل شاخص‌های انتقال فلزات سنگین در اندام‌های تنه، شاخه و برگ چهار گونه درختی، الگوهای مشخص و وابسته به گونه و نوع فلز را آشکار ساخت. در میان اندام‌های مورد بررسی، برگ‌ها در تمامی گونه‌ها و برای تمام فلزات مورد اندازه‌گیری، بالاترین مقادیر TF را نشان دادند. افزایش چشمگیر فاکتور انتقال Fe در برگ‌ها بیانگر ظرفیت بالای این اندام برای انباشت این عنصر است. فلزات Cd و Zn معمولاً انتقال عمودی قابل‌توجهی به سمت برگ‌ها داشتند؛ برای نمونه، فاکتور انتقال Cd

جدول ۲- شاخص انتقال (TF) فلزات در اندام‌های چهار گونه درختی.

پیکان‌ها نشان‌دهنده افزایش (↑)، کاهش (↓) یا شباهت (≈) نسبت به اندام قبلی در هر گونه هستند (آزمون توکی، $P < 0.05$).

Table 2. Metal Translocation Factors (TF) in organs in four tree species.
Arrows indicate increase (↑), decrease (↓), or similarity (≈) relative to the preceding organ within the species (Tukey's HSD test ($P < 0.05$)).

گونه Species	اندام Organ	TF (Cd)	TF (Cu)	TF (Zn)	TF (Fe)
<i>Cupressus</i>	Trunk	0.71±0.03	0.80±0.01	0.71±0.02	0.35±0.04
	Branch	0.78±0.02 ≈	0.83±0.03 ≈	0.54±0.10 ≈	0.26±0.03 ≈
	Leaf	1.13±0.03 ↑	1.06±0.03 ↑	1.55±0.03 ↑	3.69±0.26 ↑
<i>Morus</i>	Trunk	0.59±0.05	0.66±0.02	0.80±0.07	0.34±0.06
	Branch	0.64±0.04 ≈	0.72±0.03 ≈	0.95±0.04 ↑	0.30±0.02 ≈
	Leaf	1.01±0.06 ↑	1.02±0.06 ↑	1.43±0.05 ↑	5.96±0.52 ↑
<i>Pinus</i>	Trunk	0.98±0.03	0.65±0.03	0.93±0.10	4.51±0.44
	Branch	0.79±0.03 ↓	0.84±0.02 ↑	0.98±0.07 ≈	4.73±0.47 ≈
	Leaf	1.15±0.05 ↑	0.52±0.02 ↓	1.17±0.06 ↑	27.86±0.81 ↑
<i>Robinia</i>	Trunk	0.48±0.08	0.66±0.07	0.90±0.04	0.28±0.01
	Branch	0.75±0.02 ↑	0.69±0.06 ≈	0.70±0.03 ↓	0.21±0.02 ≈
	Leaf	1.73±0.02 ↑	1.66±0.08 ↑	1.26±0.03 ↑	3.09±0.31 ↑

اندام اختصاص داد. بیش‌ترین تخصیص زی‌توده به شاخه‌ها در توت مشاهده شد، سرو در مرتبه بعد قرار گرفت و کاج و افاقیا کم‌ترین مقادیر را نشان دادند. سرو بیش‌ترین درصد را به برگ‌ها اختصاص داد، توت و افاقیا مقادیر مشابه و نسبتاً کم‌تری داشتند و کاج بین این دو گروه قرار گرفت (جدول ۳). برای نمایش الگوهای تخصیص زی‌توده، در جدول ۳ درصد سهم هر اندام از زی‌توده کل گزارش شده است؛ این درصدها صرفاً برای درک اهمیت نسبی هر اندام ارائه شده‌اند و مبنای مقایسه‌های آماری نبوده‌اند. آزمون‌های آماری تنها بر روی مقادیر وزن خشک اندام‌ها (کیلوگرم) انجام شده است.

تخصیص زی‌توده در گونه‌های درختی: زی‌توده خشک کل در میان چهار گونه درختی مورد بررسی به‌طور معناداری متفاوت بود؛ به‌گونه‌ای که کاج بیش‌ترین مقدار را داشت و پس‌از آن سرو قرار گرفت، درحالی‌که توت و افاقیا دارای مقادیر به‌طور معناداری کم‌تر و از نظر آماری مشابه بودند. الگوهای تخصیص زی‌توده نیز میان گونه‌ها تفاوت‌های قابل‌توجهی نشان دادند (جدول ۳).

کاج دارای راهبرد تخصیص غالب به تنه بود و سهم این اندام در زی‌توده آن به‌طور معناداری بیش‌تر از سایر گونه‌ها بود. در مقابل، افاقیا بیش‌ترین تخصیص را به ریشه داشت و پس‌از آن توت و کاج قرار گرفتند، درحالی‌که سرو کم‌ترین سهم را به این

جدول ۳- میانگین تخصیص زی توده اندامها (درصد سهم از زی توده کل) و زی توده خشک کل (کیلوگرم) در چهار گونه درختی. مقایسه‌های آماری تنها بر اساس مقادیر وزن خشک اندامها (کیلوگرم) انجام شده و گروه‌بندی‌ها از آزمون توکی ($P < 0.05$) گزارش شده‌اند. درصد سهم اندامها برای نمایش اهمیت نسبی هر بخش در ترکیب زی توده درج شده است. حروف لاتین متفاوت در ستون‌های مربوط به اندامها و حروف یونانی متفاوت در ستون زی توده کل نشان‌دهنده تفاوت معنادار میانگین‌ها هستند.

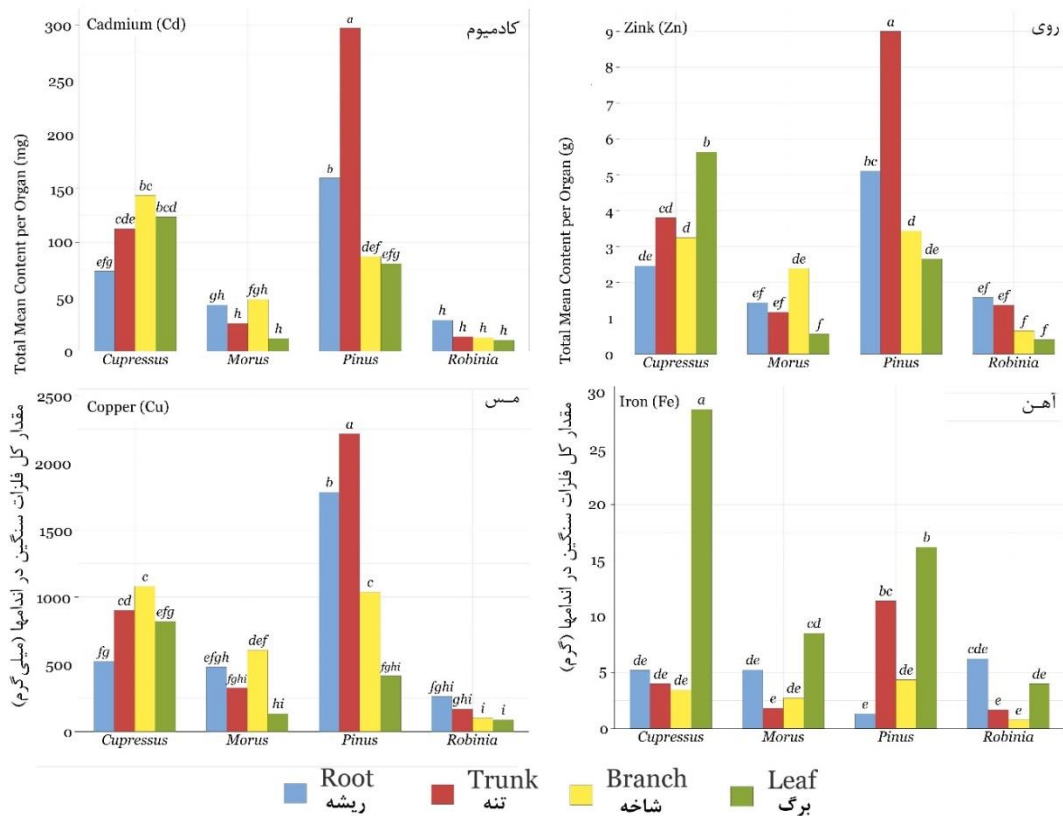
Table 3. Mean biomass allocation to organs (% of total) and total dry biomass (kg) in four tree species. Statistical comparisons were based on organ dry weights using Tukey's test ($P < 0.05$). Different Latin letters in organ columns and Greek letters in the total biomass column indicate significant differences.

گونه	ریشه	تنه	شاخه	برگ	کل زی توده
Species	Root (%)	Trunk (%)	Branch (%)	Leaf (%)	Total Biomass (kg)
<i>Cupressus</i>	13.98 ^{gh}	30.32 ^{bcd}	34.92 ^{bc}	20.78 ^{def}	74.65 ^β
<i>Morus</i>	24.64 ^{ghi}	25.29 ^{ghi}	43.34 ^{efg}	6.73 ⁱ	30.13 ^γ
<i>Pinus</i>	24.67 ^b	47.17 ^a	17.13 ^{cde}	11.03 ^{efgh}	109.91 ^α
<i>Robinia</i>	36.31 ^{fghi}	35.12 ^{fghi}	21.11 ^{hi}	7.46 ⁱ	23.89 ^γ

که بیش‌ترین تجمع در شاخه‌ها مشاهده شد. توت و اقاچیا کم‌ترین میزان مس را در تمامی اندامها داشتند و اقاچیا یکنواخت‌ترین و پایین‌ترین الگوی تجمع را نشان داد (شکل ۴).

در خصوص روی، تجمع در تنه‌های کاج غالب بود، درحالی‌که سرو سطوح بالاتری از روی را در برگ‌ها نسبت به سایر اندامها نشان داد. کاج در بیش‌تر اندامها میزان بالاتری از روی را در مقایسه با سایر گونه‌ها حفظ کرد، درحالی‌که توت و اقاچیا مجدداً تجمع کلی پایین‌تر و توزیع یکنواخت‌تری را میان اندامهای خود نشان دادند. الگوی توزیع آهن به‌طور قابل‌توجهی با سایر فلزات متفاوت بود؛ به‌طوری‌که برگ‌های سرو بیش‌ترین میزان آهن را نشان دادند و پس‌از آن برگ‌های کاج قرار گرفتند. این الگو با تجمع غالب در تنه که در سایر فلزات برای کاج مشاهده شد، در تضاد بود. در اقاچیا، ریشه‌ها نسبت به سایر اندامها محتوای بالاتری از آهن را نشان دادند (شکل ۴).

مقدار کل تجمع فلزات سنگین در اندامهای مختلف: الگوهای تجمع فلزات سنگین به‌طور معناداری میان گونه‌های درختی و اندامهای مختلف تفاوت داشتند. این تفاوت بیش‌تر تحت‌تأثیر مقدار تخصیص زی توده و پس‌از آن غلظت فلزات سنگین در بافت‌ها قرار گرفت. در خصوص تجمع کادمیوم، کاج بیش‌ترین میزان جذب کلی این فلز را نشان داد، به‌طوری‌که بالاترین میزان این فلز در تنه مشاهده شد و پس‌از آن ریشه‌ها قرار داشتند. سرو سطوح متوسطی از کادمیوم را با توزیع نسبتاً متعادل میان اندامها نشان داد، هرچند میزان این فلز در شاخه‌ها و برگ‌ها بیش‌تر از تنه و ریشه بود. هر دو گونه توت و اقاچیا میزان کادمیوم به‌مراتب پایین‌تری را در تمامی اندامها نشان دادند و تفاوت‌های اندکی میان اندامهای مختلف درون هر گونه مشاهده شد. الگوی توزیع مس مشابه کادمیوم بود؛ به‌طوری‌که کاج بار دیگر بالاترین میزان تجمع را، به‌ویژه در تنه و ریشه‌ها، نشان داد. سرو سطوح متوسطی از مس را در اندامهای خود داشت



شکل ۴- مقدار کل فلزات سنگین در اندام‌های مختلف چهار گونه درختی. محتوای فلزات به صورت مقدار کل در هر اندام بیان شده است. حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری بین اندام‌های گیاهی درون و بین گونه‌ها ($P < 0.05$) می‌باشند.

Figure 4. Total content of heavy metals in different plant organs of four tree species. Metal content is expressed as the total amount per organ. Different letters above the bars indicate statistically significant differences among plant parts within and across species ($P < 0.05$).

برگ‌های پهن این‌گونه است؛ عواملی که می‌توانند انتقال جرمی عناصر از خاک و انتقال فلزات به بافت‌های هوایی را تسهیل کنند (۷، ۱۵). درختان سرو با غلظت‌های بالای Cd و Zn در برگ‌ها، نشان دادند که سیستم ریشه‌ای گسترده و برگ‌های فلس‌دار آن‌ها بستر مؤثری برای جذب و نگهداری آلاینده‌های هوا برد ایجاد می‌کند. این‌گونه هم‌چنین از کارایی انتقال مناسبی برای جابه‌جایی فلزات از ریشه به بخش‌های هوایی برخوردار است (۱۶، ۲۳).

ترکیب جذب ریشه‌ای و رسوب سطحی ذرات معلق موجب تجمع بالای فلزات سنگین در برگ تمامی گونه‌های مورد مطالعه شد، به‌گونه‌ای که غلظت

بحث

در این پژوهش، توانایی گونه‌های مختلف درختی در تجمع و انتقال فلزات سنگین بررسی شد. نتایج اختلافات معناداری در الگوهای جذب، انتقال و تخصیص فلزات میان گونه‌ها نشان داد که می‌تواند مبنای مناسبی برای انتخاب گونه‌ها در برنامه‌های گیاه‌پالایی باشد.

الگوهای تجمع فلزات: درختان توت توان بالایی در تجمع آهن و مس در برگ‌ها نشان دادند. این ویژگی که در مناطق آلوده به ذرات فلزی تشدید می‌شود، احتمالاً ناشی از تعرق زیاد، رشد سریع، فعال بودن سیستم آوندی و رسوب مستقیم ذرات روی سطح

ریشه‌ها نشان داد، اما انتقال آن به برگ‌ها بسیار محدود بود که این الگو نشان‌دهنده یک سازوکار دفاعی برای محدودسازی انتقال فلزات سمی به بافت‌های فتوسنتزی است که از طریق نگهداری فلزات در ریشه‌ها صورت می‌گیرد (۲۵).

الگوهای همبستگی فلزات: الگوهای متضاد همبستگی فلزات بین گونه‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ، تفاوت‌های اساسی در راهبردهای انتقال فلزات را آشکار می‌سازد و فرضیه وجود سامانه‌های انتقال فلزات بسیار گزینشی در سوزنی‌برگان را تقویت می‌کند (۲، ۲۳). کاج هیچ همبستگی معناداری میان فلزات نشان نداد که بیانگر وجود سازوکارهای جذب بسیار اختصاصی و مستقل برای هر فلز است؛ احتمالاً این ویژگی از طریق پروتئین‌های ناقل مجزا و سامانه‌های تنظیمی خاص کنترل می‌شود و امکان تنظیم دقیق جذب هر عنصر به‌طور جداگانه را فراهم می‌سازد (۱۳). این رویکرد «متخصصانه» می‌تواند یک راهبرد تکاملی به‌شمار رود که در آن گیاه با اولویت‌بخشی به جذب عناصر ضروری و دفع فعال فلزات سمی مانند کادمیوم، بقای خود را تضمین می‌کند؛ ویژگی‌هایی مانند نفوذپذیری پایین برگ‌های سوزنی، نرخ تعرق محدود و ساختار فیزیولوژیکی متمایز ریشه‌ها، این سازوکار را تقویت می‌کنند (۱۰، ۱۵). درختان سرو تنها یک همبستگی معنادار بین روی و کادمیوم در بافت ساقه نشان دادند که با گزارش‌های علمی پیشین سازگار است و به استفاده مشترک این عناصر از مسیرهای انتقالی مشترک از خانواده ناقلین شبیه پروتئینی ZIP بازمی‌گردد (۲).

در مقابل توت و افاقیا همبستگی‌های قوی میان کادمیوم، مس و روی در بافت برگ‌ها نشان دادند که نشان‌دهنده استفاده از سازوکارهای انتقال غیرگزینشی و مشترک برای این کاتیون‌های دوظرفیتی است. این تجمع هماهنگ احتمالاً از طریق ناقلین غشاء سلولی

عناصر اندازه‌گیری شده از دامنه‌های سمیت گزارش شده برای بافت برگ فراتر رفت. بر اساس منبع اصلی (۱۶)، آستانه سمیت آهن در برگ‌ها حدود ۵۰۰-۳۰۰، روی ۳۰۰-۱۰۰، مس ۳۰-۲۰ و کادمیوم ۱-۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک است؛ درحالی‌که مقادیر اندازه‌گیری شده در این پژوهش در تمامی گونه‌ها بالاتر از این حدود قرار داشت. با این حال، دامنه غلظت‌های مشاهده شده با مقادیر گزارش شده برای درختان رشد یافته در مناطق صنعتی و مجاور صنایع فولاد هم‌خوانی دارد؛ به‌طوری‌که مطالعات پیشین غلظت‌هایی تا حدود چند هزار میلی‌گرم بر کیلوگرم برای آهن و مقادیر بالاتر از آستانه سمیت برای Cu، Zn و Cd را در چنین محیط‌هایی گزارش کرده‌اند (۲۴). از آن‌جاکه برگ‌ها پیش از آنالیز شسته نشدند، تفکیک دقیق سهم جذب فیزیولوژیک از رسوب سطحی ممکن نیست و بخشی از فلزات اندازه‌گیری شده احتمالاً ناشی از تجمع ذرات معلق بر سطح برگ، به‌ویژه در نواحی دارای کوتیکول و کرک، بوده است. با این وجود، فراتر رفتن غلظت فلزات از حدود سمیت نشان می‌دهد که تمامی گونه‌ها تحت تنش شدید فلزی قرار داشته‌اند؛ شرایطی که می‌تواند رشد، کارایی فتوسنتزی و پایداری بلندمدت این درختان را به‌طور جدی تحت‌تأثیر قرار دهد.

اندام‌های افاقیا غلظت‌های پایین‌تری از اغلب فلزات نشان دادند که احتمالاً به وجود سازوکارهای محدودکننده جذب در سطح ریشه مرتبط است؛ سازوکارهایی که از طریق حذف فعال یا گزینش در جذب، ورود فلزات را کنترل می‌کنند. با این حال، تجمع نسبتاً بالای آهن در این گونه - که بعد از توت بیش‌ترین مقدار را دارد - قابل توجه بوده و احتمالاً به نیاز متابولیکی بالای آن برای فعالیت آنزیم نیتروژناز در فرآیند تثبیت زیستی نیتروژن مربوط است (۱۱، ۱۴). درخت کاج نیز غلظت بالای مس را در

مشترک در ریشه‌ها یا مسیرهای کلاته‌سازی و انتقال مشابهی صورت می‌گیرد که فلزات را به‌طور تجمعی از ریشه به بخش‌های هوایی منتقل می‌کنند؛ این فرایند ممکن است با نرخ بالای تعرق که ویژگی گونه‌های پهن‌برگ تقویت می‌شود (۱۴). هم‌چنین همبستگی میان کادمیوم و مس در بافت‌های شاخه هر دو گونه، احتمال نقش بافت‌های آوند چوبی یا آبکش را به‌عنوان مخزن میانی فلزات تقویت می‌کند (۱۲).

شاخص انتقال (TF): مقادیر بسیار بالای TF برای آهن، علی‌رغم تحرک محدود آن در گیاهان، نشان‌دهنده وجود سازوکارهای ویژه برای افزایش انتقال این عنصر است؛ سازوکارهایی که احتمالاً شامل کلاته‌سازی با اسیدهای آلی یا فیتوسیدروفورها می‌شوند، به‌ویژه در شرایط غلظت بالای آهن در مجاورت کارخانه فولاد. این نتایج تأیید می‌کند که اندام‌های هوایی نه‌تنها بازتابی از میزان مواجهه گیاه با فلزات هستند، بلکه به‌عنوان اهداف اصلی برای راهبردهای گیاه‌استخراجی و پایش زیستی نیز مطرح می‌شوند (۱۵، ۲۶).

در بین فلزات بررسی‌شده، کادمیوم و روی بالاترین تحرک را نشان دادند. نتایج شاخص انتقال برای افاقیا در این زمینه قابل‌توجه است، زیرا این گونه، با وجود داشتن غلظت کلی پایین فلزات، مقادیر TF بالایی برای کادمیوم (<1) نشان داد که بیانگر انتقال کارآمد آن از ریشه به بخش‌های هوایی است. این یافته طبقه‌بندی اولیه این گونه به‌عنوان یک انباشته‌کننده ضعیف را به چالش می‌کشد و نشان می‌دهد که تحت شرایط خاک‌های با کادمیوم بالا، افاقیا می‌تواند به‌عنوان یک استخراج‌کننده گیاهی مؤثر عمل کند. در مقابل، کاج مقادیر پایین شاخص انتقال برای مس را نشان داد که بر نقش این گونه در گیاه‌ماندگاری از طریق نگهداری فلز در ریشه‌ها تأکید می‌کند (۲۳، ۲۵).

تخصیص زی‌توده و تثبیت فلزات سنگین: یافته‌های این پژوهش نشان داد که گونه‌های مورد بررسی از نظر مقدار و الگوی تخصیص زی‌توده خشک تفاوت‌های معناداری دارند که بازتابی از راهبردهای اکولوژیک متمایز هر گونه در پاسخ به تنش‌های محیطی، از جمله آلودگی فلزی، است. کاج با بیش‌ترین زی‌توده و تخصیص غالب آن به تنه، راهبردی مبتنی بر رشد عمودی و ذخیره‌سازی بلندمدت منابع را دنبال می‌کند. این الگو ضمن تضمین پایداری سازه‌ای درخت، امکان تثبیت بلندمدت فلزات سنگین در بافت چوب و ترسیب هم‌زمان کربن و آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد (۲۰، ۲۷، ۲۸). افاقیا با سهم بالای زی‌توده ریشه‌ای، از توانایی تثبیت زیستی نیتروژن بهره می‌برد و هم‌زمان حاصلخیزی خاک را بهبود می‌بخشد و ظرفیت تثبیت فلزات در ناحیه ریزوسفر را افزایش می‌دهد (۸، ۱۱). توت با راهبرد متمرکز بر شاخه، جذب نور جانبی را بهینه کرده و با سرمایه‌گذاری کم‌تر در برگ و ریشه، رشد افقی تاج را بر رشد عمودی ترجیح می‌دهد که هم‌زمان زیستگاه حیات‌وحش را پشتیبانی می‌کند. سرو، با زیست‌توده کل متوسط، تخصیص متعادل دارد و با سرمایه‌گذاری بالای برگ و تخصیص متوسط به تنه، کارایی فتوسنتزی و گردش سریع تاج را تقویت می‌کند که می‌تواند پایداری گونه را در محیط‌های شهری یا نیمه‌خشک افزایش دهد (۲۳).

الگوهای توزیع فلزات و کاربردهای گیاه‌پالایی: کاج با تولید زیست‌توده بالا و تمرکز قابل‌توجه در تنه، به‌گونه‌ای شاخص تبدیل شد. این ویژگی امکان ذخیره طولانی‌مدت فلزاتی مانند کادمیوم، مس و روی را در چوب فراهم کرده و کاج را به گزینه‌ای مناسب برای گیاه‌پالایی فلزات تبدیل می‌کند (۹، ۱۰). در مقام بعدی، سرو قرار داشت که بخش قابل‌توجهی از

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با بررسی الگوهای تجمع فلزات سنگین در چهار گونه درختی شامل کاج تهران، سرو نقره‌ای، توت سفید و افاقیا نشان داد کارایی گیاه‌پالایی به‌طور هم‌زمان به گونه، اندام گیاهی و نوع فلز وابسته است. برگ‌ها اصلی‌ترین محل تجمع فلزات بودند و در برخی موارد غلظت‌ها از آستانه‌های سمیت فراتر رفت که بیانگر تنش فلزی شدید است. تلفیق غلظت عناصر با الگوی تخصیص زی‌توده نشان داد ساختار زی‌توده نقش تعیین‌کننده‌ای در راهبرد مدیریتی دارد. کاج تهران با زی‌توده بالا و تمرکز فلزات در تنه و ریشه برای تثبیت بلندمدت Cd، Cu و Zn مناسب است. سرو نقره‌ای با انباشت برگی، گزینه‌ای کارآمد برای استخراج تدریجی از طریق هرس دوره‌ای محسوب می‌شود. توت سفید با انتقال مؤثر Fe و Cu به برگ و امکان برداشت فصلی، برای آلودگی‌های متوسط توصیه می‌شود. افاقیا نیز به دلیل زی‌توده ریشه‌ای و توان تثبیت نیتروژن، در تثبیت زیستی و بازسازی اولیه سایت‌های آلوده نقش کلیدی دارد. بر این اساس، انتخاب گونه باید متناسب با فلز غالب و هدف مدیریتی (تثبیت یا استخراج) انجام شود و همراه با پایش سالانه خاک و زی‌توده و مدیریت ایمن بقایای آلوده باشد.

زیست‌توده خود را به برگ‌ها اختصاص می‌دهد. این ویژگی امکان برداشت دوره‌ای برای استخراج فلزات و کاهش تدریجی آلودگی خاک توسط فلزات سنگین را بدون آسیب به گیاه فراهم می‌کند.

در مقابل، گونه‌های خزان‌کننده توت و افاقیا زیست‌توده نسبتاً کمی تولید کردند که پتانسیل گیاه‌پالایی آن‌ها را محدود می‌کند، مگر آن‌که بازده بالای تجمع فلزات در درختان جوان توت مدنظر قرار گیرد؛ در این مطالعه، سن درختان لحاظ نشده و همه نمونه‌ها همسال بودند. تخصیص بالای زیست‌توده به ریشه در افاقیا، توانایی این‌گونه را برای تثبیت فلزات در خاک افزایش می‌دهد، درحالی‌که توت ممکن است به گیاه‌پالایی مبتنی بر برداشت شاخه یا برگ‌های افتاده گرایش داشته باشد و بر توسعه شاخه‌ها تمرکز کند (۱۴). ماهیت خزان‌کننده توت و افاقیا امکان برداشت سالانه برگ‌های آلوده به فلز را فراهم می‌کند، راهبردی که برای گونه‌های همیشه‌سبز مانند کاج و سرو قابل‌اجرا نیست. در تمامی گونه‌ها، مقادیر پایین فلزات در ساقه و شاخه‌ها نشان‌دهنده کارایی سامانه‌های سم‌زدایی داخلی است که بافت‌های آوندی را محافظت کرده و رشد و تثبیت بلندمدت گیاه را تضمین می‌کند. بر این اساس، کاج برای تثبیت دائمی فلزات، سرو برای ترکیب راهبردهای تثبیت و استخراج و توت و افاقیا به‌عنوان گونه‌های پیشگام در بازسازی اکوسیستم‌های با آلودگی کم‌تر مناسب هستند.

منابع

1. Abyareh, M., NejadKoorki, F., Ekhtesasi, M., & Ghalibaf, M. A. (2019). Evaluation of heavy metals contamination in surface soil caused by steel industry. *Journal of Research in Environmental Health*. 4(4), 302-310, <http://doi.org/10.22038/jreh.2019.37316.1266>. [In Persian]
2. Grotz, N., & Guerinot, M. L. (2006). Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*. 1763(7), 595-608, <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2006.05.014>.
3. Solgi, E., Abbasitabar, H., Hasanvand, F., & Bakhshi, F. (2024). Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil and leaf of pistachio trees (Case Study: Kabootar Khaneh - Rafsanjan).

- Iranian Journal of Forest*. 16(2), 243-256, <https://doi.org/10.22034/ijf.2024.362563.1891>.
4. 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>.
 5. Jani, Y., Mutafela, R. N., Ferrans, L., Ling, G., Burlakovs, J., & Hogland, W. (2019). Phytoremediation as a promising method for the treatment of contaminated sediments. *Iranian Journal of Energy and Environment*. <https://doi.org/10.5829/ijee.2019.10.03.10>.
 6. Mudgal, V., Raninga, M., Patel, D., Ankoliya, D., & Mudgal, A. (2023). A review on Phytoremediation: Sustainable method for removal of heavy metals. *Materials Today: Proceedings*. 77, 201-208, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.261>.
 7. Tangahu, B. V., Sheikh Abdullah, S. R., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*. 2011(1), 939161, <https://doi.org/10.1155/2011/939161>.
 8. Brear, E. M., Day, D. A., & Smith, P. M. (2013). Iron: an essential micronutrient for the legume-rhizobium symbiosis. *Frontiers in Plant Science*. 4 (2013), <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00359>.
 9. Zhang, Q., Wang, Y., Shang, K., Fang, H., Zhang, G., & Guidi Nissim, W. (2025). Strategy on rapid selection of woody species for phytoremediation in soils contaminated with copper, lead and zinc in Shanghai. *International Journal of Phytoremediation*. 27(4), 462-471, <https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2426772>.
 10. Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*. 88(11), 1707-1719, <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>.
 11. Gao, L., Wang, S., Zou, D., Fan, X., Guo, P., Du, H., et al. (2024). Physiological responses of low- and high-cadmium accumulating Robinia pseudoacacia-rhizobium symbioses to cadmium stress. *Environmental Pollution*. 345, 123456, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123456>.
 12. Mendoza-Cózatl, D. G., Jobe, T. O., Hauser, F., & Schroeder, J. I. (2011). Long-distance transport, vacuolar sequestration, tolerance, and transcriptional responses induced by cadmium and arsenic. *Current Opinion in Plant Biology*. 14(5), 554-562, <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2011.07.004>.
 13. Ivanov, Y. V., Savochkin, Y. V., & Kuznetsov, V. V. (2012). Scots pine as a model plant for studying the mechanisms of conifers adaptation to heavy metal action: 2. Functioning of antioxidant enzymes in pine seedlings under chronic zinc action. *Russian Journal of Plant Physiology*. 59(1), 50-58, <https://doi.org/10.1134/S1021443712010098>.
 14. Masarovičová, E., & Kráľová, K. (2012). Plant-heavy metal interaction: phytoremediation, biofortification and nanoparticles. In G. Montanaro & B. Dichio (Eds.), *Advances in Selected Plant Physiology Aspects* (Pp: 75-101). Rijeka: InTech.
 15. Pulford, I. D., & Watson, C. (2003). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees-a review. *Environment International*. 29(4), 529-540, [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00152-6).
 16. Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton: CRC Press.
 17. Rafati, M., Mohammadi Roozbahani, M., & Pirmoradi, Z. (2020). Bioaccumulation of some heavy metals by the soil and leaves of *Ziziphus spinachristi* in Khouzestan Oxin Steel Company. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*. 17(2), 173-184, <https://doi.org/10.22092/ijfrpr.2020.127153.1389>. [In Persian]

18. Moslehi, M., Salmanmahiny, A., Yaghoubzadeh, M., Mikaeili Tabrizi, A., & Danehkar, A. (2021). Comparison of heavy metals concentration in sediments and vegetative organs of two species of Grey and Red mangrove. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*. 28(4), 119-134. [https://doi: 10.22069/jwfst.2022.19223.1931](https://doi.org/10.22069/jwfst.2022.19223.1931).
19. Moradinasab, V., Shirvani, M., Shamsaee, M., & Babae, M. R. (2016). Assessing some chemical and biological quality attributes of soils irrigated with groundwater and treated industrial wastewater in greenspace of Mobarake Steel Complex. *Journal of Water and Soil Science*. 19(74), 101-111, <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.74.9>.
20. Bakhtiarvand Bakhtiari, S., & Sohrabi, H. (2012). Allometric equations for estimating above and below-ground carbon storage of four broadleaved and coniferous trees. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 20(3), 492-981, <http://dx.doi.org/10.22092/ijfpr.2012.107454>. [In Persian]
21. Pauls, V. R., & Verloo, M. W. (2022). *Soil and Plant Analysis for Use by Students, Researchers, and Soil and Plant Analysis Laboratories*. Translator: Ghazanshahi, J. Tehran: Aeizh Publishing; 296p. [In Persian]
22. Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis*. Boston: Cengage Learning; 992p.
23. Yavarian, R., Salehi, A., & Mohammadi Glangash, M. (2021). Accumulation of heavy metals in various organs of *Pinus eldarica* medw and *Cupressus arizonica* green var. *arizonica* trees in Isfahan steel company area. *Forest and Wood Products*. 74(1), 85-95, <https://doi.org/10.22059/jfw.2020.305046.1115>. [In Persian]
24. Salih, Z., & Aziz, F. (2019). Heavy metals accumulation in leaves of five plant species as a bioindicator of steel factory pollution and their effects on pigment content. *Polish Journal of Environmental Studies*. 28(6), 4351-8, <https://doi.org/10.15244/pjoes/99304>.
25. Rezanejad, F., Oloumi, H., Gholipoor, Z., & Manouchehri Kalantari, K. (2017). Response of two pine species (*Pinus nigra* and *P. eldarica*) around copper complex of Sarcheshmeh in heavy metals assimilation and some structural characteristics of leaf. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*. 30(2), 393-407, <https://doi.org/10.22059/jfw.2020.305046.1115>. [In Persian]
26. Ghasemi Aghbash, F., Mortazavi, S., & Naderi, R. (2020). Distribution of heavy metals in leaf and bark of trees used in urban forestry of Hamadan. *Environmental Researches*. 10(20), 105-114, <https://doi.org/10.22092/er.2020.342600.1001>. [In Persian]
27. Askari, Y., Soltani, A., Akhavan, R., & Tahmasebi Kohyani, P. (2017). Assessment of root-shoot ratio biomass and carbon storage of *Quercus brantii* Lindl. in the central Zagros forests of Iran. *Journal of Forest Science*. 63(6), 282-289, <https://doi.org/10.17221/122/2015-JFS>.
28. Sohrabi, H., Bakhtiarvand-Bakhtiari, S., & Ahmadi, K. (2016). Above-and below-ground biomass and carbon stocks of different tree plantations in central Iran. *Journal of Arid Land*. 8(1), 138-145, <https://doi.org/10.1007/s40333-015-0087-z>.

Uncorrected Proof