



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

ارزیابی قابلیت گونه‌های افاقیا (*Robinia pseudoacacia*) و کاج تهران (*Pinus eldarica*) برای پالایش زیستی عناصر سرب، کروم و نیکل در مناطق شهری همدان، غرب ایران

علیرضا زند عباس‌آبادی، مهرداد چراغی*، سهیل سبحان اردکانی، بهاره لرستانی، مریم کیانی صدر

گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله:

زمینه و هدف: از آنجا که پایش آلاینده‌های سمی در اکوسیستم‌های شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، این پژوهش با هدف ارزیابی قابلیت گونه‌های افاقیا و کاج تهران برای پالایش زیستی عناصر سرب، کروم و نیکل در مناطق شهری همدان در سال ۱۴۰۲ انجام یافت. روش بررسی: در مجموع ۳۶ نمونه خاک و ۷۲ نمونه گیاهی از ۱۲ مکان نمونه‌برداری برداشت شد و پس از آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه، محتوای عناصر در آن‌ها با استفاده از ICP-OES خوانده شد. همچنین مقادیر شاخص‌های PI، PLI، BAF، CR و محاسبه شد. یافته‌ها: بیشینه میانگین محتوای عناصر سرب، کروم و نیکل (mg/kg) در نمونه‌های خاک با ۶۷/۵، ۷۲/۲ و ۱۰۱ به ترتیب مربوط به مکان‌های تجاری، صنعتی و تجاری بود. در نمونه‌های برگ اسوزن شسته نشده و شسته شده بیشینه میانگین محتوای عنصر سرب مربوط به کاربری تجاری و برای عناصر کروم و نیکل نیز مربوط به کاربری صنعتی بود. میانگین مقادیر PI از ترتیب نزولی کروم < نیکل < سرب تبعیت کرد. میانگین مقادیر شاخص PLI نیز بیان‌گر شرایط آلودگی "متوسط" در همه مکان‌های مورد مطالعه بود. میانگین مقادیر شاخص BAF عناصر برای برگ افاقیا و سوزن کاج تهران در دامنه ۰/۱-۱/۰۰ متغیر و بیشینه میانگین مقادیر شاخص CR برای عناصر سرب و کروم مربوط به کاج تهران و برای عنصر نیکل نیز مربوط به گونه افاقیا بود. نتیجه‌گیری: افاقیا و کاج تهران از قابلیت پالایش عناصر بالقوه سمی از محیط برخوردار بوده و استفاده از آن‌ها به عنوان زیست‌نشانه‌گر مناسب و کارآمد عناصر فلزی در اکوسیستم‌های آلوده توصیه می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

واژگان کلیدی: آلودگی فلزی، شاخص‌های آلودگی، پالایش زیستی، افاقیا، کاج تهران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
cheraghi@iauh.ac.ir

Please cite this article as: Zand Abbas Abadi A, Cheraghi M, Sobhanardakani S, Lorestani B, Kiani Sadr M. Evaluation of the capability of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus eldarica* for bioremediation of heavy metals (Pb, Cr and Ni) in urban areas of Hamedan, west of Iran. Iranian Journal of Health and Environment. 2024;16(4):607-28.

مقدمه

در قرن حاضر، شهرنشینی و فعالیت‌های مرتبط با آن (توسعه زیرساخت‌های شهری، ترافیک و...) به سبب رهاسازی و انتشار فزاینده و مداوم آلاینده‌های فلزی ناشی از منابع ثابت و متحرک آلودگی، افزون بر تأثیرات بوم‌شناختی متعدد بر اکوسیستم شهری، منجر به افزایش غلظت و انباشت فلزات سنگین در محیط شهری نیز شده است (۱، ۲). سرب، کروم و نیکل به سبب کاربردهای گسترده و متنوع خانگی، صنعتی، کشاورزی و فن‌آوری از رایج‌ترین آلاینده‌های فلزی مناطق شهری محسوب می‌شوند. این عناصر با برخورداری از ویژگی‌هایی همچون پایداری در محیط، سمیت، نیمه عمر زیستی طولانی و قابلیت تجمع و انباشت زیستی تهدیدی بالقوه برای سلامت شهروندان محسوب می‌شوند (۳-۵). قرار گرفتن انسان در معرض سرب به عنوان یک عنصر غیرضروری، حتی در مقادیر بسیار کم، می‌تواند آسیب و اختلال در عملکرد قلب، کلیه، کبد، طحال و همچنین سیستم عصبی، ابتلا به سرطان و حتی مرگ را نیز به دنبال داشته باشد. این در حالی است که مشکلات پوستی، اختلالات تنفسی، گوارشی، جهش و تغییرات ژنتیکی و حتی مرگ از جمله عوارض تجمع مقادیر بیش از حد مجاز کروم در بدن انسان است. مسمومیت مزمن با نیکل و ترکیبات آن نیز در غلظت‌های زیاد می‌تواند منجر به بروز عفونت‌های موضعی، التهاب، بیماری‌های پوستی، تأخیر در رشد، کاهش توانایی تولیدمثل، تداخل در جذب آهن، ابتلا به انواع سرطان (خون، مغز، پروستات، استخوان و دستگاه تنفسی) و حتی مرگ شود (۶-۸).

امروزه آلودگی خاک به عناصر فلزی به عنوان مانعی مهم برای رشد و توسعه اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی جوامع انسانی، یکی از مهم‌ترین معضلات محیط‌زیستی و بهداشتی اکوسیستم‌های شهری است. افزایش محتوای و انباشت آلاینده‌های فلزی، افزون بر تغییر در ساختار شیمیایی و برهم

زدن تعادل طبیعی لیتوسفر، به‌طور غیرمستقیم از طریق زنجیره غذایی و به‌طور مستقیم از طریق استنشاق، بلع و تماس پوستی تهدیدی بالقوه برای سلامت شهروندان محسوب می‌شوند (۹، ۱۰). از طرفی، خاک به‌عنوان منبع و مخزن فلزات سنگین از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ذخیره‌سازی و تعلیق مجدد عناصر فلزی در محیط محسوب می‌شود (۱۱). همچنین خاک به‌عنوان بخشی ضروری از سیستم زیست-زمین-شیمیایی، رابطه اجزای غیرزنده و زنده را حمایت و تولید غذا را حفظ می‌کند. علاوه بر این، تبادلات محیطی (فرونشست‌های جوی مرطوب و خشک، گردوغبار، تعلیق مجدد ذرات، انتشار گاز و آبشویی) بین خاک، هوا و آب، افزون بر توزیع آلاینده‌های فلزی در محیط شهری، منجر به تأثیرات متقابل آلودگی فلزات سنگین بین اجزای اصلی سازنده بیوسفر می‌شود (۱۲، ۱۳). بنابراین، تعیین مقدار این آلاینده‌ها در خاک، به‌عنوان شاخص مهم سطوح آلودگی محیط شهری، برای حفظ سلامت اکوسیستم و شهروندان در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۱۴، ۱۵). در این راستا، شاخص‌هایی از جمله شاخص آلودگی ((Pollution Index (PI) و شاخص بار آلودگی ((Pollution Load Index (PLI) در بسیاری از مطالعات برای تعیین سطح آلودگی خاک ناشی از فلزات سنگین استفاده شده‌اند (۱۶-۱۸). با این حال، استفاده بالقوه از گیاهان به‌عنوان گزینه‌ای موثر، اقتصادی و پایدار برای تخمین و کاهش آلاینده‌های فلزی خاک در چند دهه گذشته مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است (۱۳، ۱۹). در بین گونه‌های مختلف گیاهی، گونه‌های آوندی (علفی و چوبی) به سبب سهولت شناسایی و نمونه‌برداری، به‌طور گسترده به‌عنوان شاخص‌های زیستی مناسب و مطلوب در بررسی شرایط بوم‌شناختی و ارزیابی کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۲۰، ۲۱). از دیگر سو، گونه‌های چوبی و به‌ویژه درختان به‌عنوان جزء اصلی و دائمی فضای سبز شهری، به‌دلیل طول عمر طولانی و قابل

به‌عنوان شاخص‌های بالقوه عناصر فلزی معرفی شده‌اند. از آن‌جا که مطالعات اندکی در خصوص پالایش زیستی فلزات سنگین توسط گونه‌های درختی در محیط‌های شهری ایران انجام شده و نظر به تأثیر فعالیت‌های مختلف شهری (صنعتی، ترافیکی، خانگی، و ...) به‌عنوان منابع اصلی و عمده انسان‌پدیدانتشار آلاینده‌های فلزی در اکوسیستم شهری از یک‌سو و از طرفی، توسعه فزاینده صنعتی، شهری و ترافیکی در شهر همدان، این پژوهش با هدف ارزیابی قابلیت گونه‌های اقاویا و کاج تهران برای پالایش زیستی عناصر سرب، کروم و نیکل در مناطق شهری همدان در سال ۱۴۰۲ انجام شد.

مواد و روش‌ها

— معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر همدان به‌عنوان مرکز استان همدان با وسعت تقریبی 56 km^2 و 651827 نفر جمعیت در ارتفاع حدود 1850 m از سطح دریا بین مدارهای $48^\circ 48'$ عرض جغرافیایی شمالی و $48^\circ 31'$ طول جغرافیایی شرقی در غرب ایران واقع شده است. میانگین دمای سالانه و بارندگی این شهر به‌ترتیب برابر با $11/3^\circ \text{C}$ و 318 mm گزارش شده است. شهر همدان به‌عنوان اولین قطب جمعیتی استان به‌سبب رشد سریع شهرنشینی، توسعه صنعتی و افزایش حجم ترافیک، در معرض آلودگی محیطی به‌ویژه از لحاظ محتوای عناصر بالقوه سمی قرار دارد (۱۱، ۳۸).

— نمونه‌برداری از خاک و گیاه

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، دو گونه درختی شامل اقاویا و کاج تهران به‌عنوان گونه‌های غالب و با پراکنش گسترده در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. به‌منظور ایجاد شرایط یکنواخت و کاهش عوامل مداخله‌گر احتمالی، نمونه‌برداری (خاک و گیاه) در یک روز کاری با سه تکرار از ۱۲ مکان منتخب با کاربری‌های مختلف شامل تجاری (چهار مکان)، مسکونی (چهار

دسترس بودن در همه فصول سال، شاخص زیستی مفیدی برای سنجش آلودگی فلزات سنگین محیط شهری محسوب می‌شوند (۲۲-۲۴). این در حالی است که در بین اندام‌های مختلف گونه‌های چوبی، برگ‌ها به‌سبب برخورداری از سطح بیش‌تر در مواجهه با محیط به‌عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین اندام‌ها در جذب و انباشت عناصر فلزی از طرق مختلف (خاک، هوا و آب) محسوب و به مناسب‌ترین ابزار محیطی برای پالایش زیستی (Bioremediation) عناصر فلزی بدل شده‌اند (۲۵-۲۷).

اقاویا (*R. pseudoacacia*) از خانواده باقلاییان (Fabaceae) و کاج تهران (*P. eldarica*) از خانواده شب‌بویان (Pinaceae) از جمله درختان زینتی در بیش‌تر نقاط جهان از جمله ایران، به‌سبب سازگاری با شرایط مختلف محیطی و پراکنش گسترده در کاربری‌های مختلف شهری از جمله صنعتی، تجاری و مسکونی، می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های زیستی مناسب در نظر گرفته شوند (۲۸).

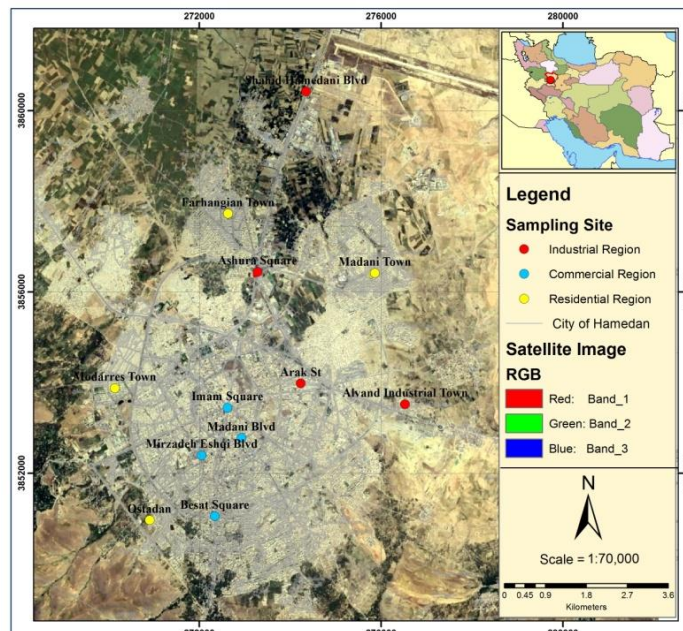
تاکنون چندین مطالعه در رابطه با پالایش زیستی فلزات سنگین در محیط‌های شهری توسط گونه‌های درختی انجام یافته و برخی از درختان از جمله کنار (*Ziziphus spina-christi*) (۲۵)، کنوکارپوس (*Conocarpus erectus* L.) (۲۱)، خرم‌سرا (*Phoenix dactylifera* L.) (۲۹)، بلوط همیشه‌سبز (*Quercus ilex* L.) (۳۰)، چنار (*Platanus orientalis* L.) (۳۱)، فلوس (*Cassia fistula* L.) (۳۲)، کاج ماسون (*Pinus massoniana* Lamb L.) و کاج یونانی (*Pinus yunnanensis*) (۳۳)، زیتون (*Olea europaea* L.) (۳۴) و راش‌هندی (*Millettia pinnata* L.) (۳۵)، نارون چتری (*Ulmus umbraculifera*)، لارک (*Pterocarya fraxinifolia*)، شاتوت (*Morus nigra* L.) (۳۶) و سنجد (*Elaeagnus angustifolia* L.) (۳۷)

دستگاه GPS کارمین مدل eTrex 32x ثبت شد که موقعیت استقرار آن‌ها در شکل ۱ آورده شده است.

آماده‌سازی و تعیین محتوای عناصر در نمونه‌های خاک و گیاه

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، به مدت ۱ هفته هوا خشک شدند. سپس، برای حذف ذرات بزرگ و بقایای آلی، نمونه‌ها از الک ۲ mm عبور داده شدند (۴۱). نمونه‌های برگ نیز در آزمایشگاه به دو گروه شسته شده و شسته نشده تقسیم شدند. بدین صورت که یک گروه از نمونه‌ها به منظور زدودن و حذف آلاینده‌های سطحی (گردوغبار و مواد نهشته‌شده روی برگ)، ابتدا با آب شرب و پس از آن با آب دوبار تقطیر شسته شدند، در حالی که در گروه دیگر عمل شستشو انجام نشد. نمونه‌های گیاهی تا زمان خشک شدن کامل (در حدود ۴۸ h) در آن با دمای ۷۰ تا ۷۵ °C قرار گرفتند. در نهایت، پس از پودر کردن نمونه‌های خشک گیاهی توسط آسیاب برقی و انتقال آن‌ها به کیسه‌های پلی‌اتیلنی، نمونه‌ها در دمای ۴ °C نگهداری شدند (۳۳، ۴۰).

مکان) و صنعتی (چهار مکان) در اواخر فصل بهار سال ۱۴۰۲ انجام شد. نمونه‌های خاک سطحی (۰ تا ۲۰ cm) با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی جمع‌آوری شدند. بدین صورت که از هر مکان، پنج نمونه خاک سطحی با وزن تقریبی ۱ kg توسط بیلچه باغبانی برداشت و برای تهیه یک نمونه همگن، نمونه‌های جمع‌آوری شده با یکدیگر مخلوط و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌دار ذخیره شده و پس از برچسب‌گذاری، برای مطالعات بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند (۳۹). همچنین به منظور تهیه نمونه همگن از گیاهان (برگ و سوزن) در هر مکان، از هر گونه درختی ۱۰ پایه (با شرایط مشابه رویشی و سلامتی) انتخاب و نمونه‌برداری از برگ درختان در ارتفاع حدود ۱/۵۰ تا ۲ m از سطح زمین با استفاده از دستکش یک‌بار مصرف و قیچی استیل ضدزنگ از ناحیه دم‌برگ انجام و به تفکیک گونه با یکدیگر مخلوط و به پاکت‌های پلی‌اتیلنی برچسب‌دار منتقل شدند (۴۰). بدین صورت، در مجموع ۳۶ نمونه خاک سطحی و ۷۲ نمونه گیاهی (۳۶ نمونه برگ افاقیا و ۳۶ نمونه سوزن کاج) برداشت شد. موقعیت جغرافیایی مکان‌های نمونه‌برداری توسط



شکل ۱- موقعیت استقرار ایستگاه‌های نمونه‌برداری

مورد مطالعه نیز از ۹۵/۰ تا ۹۹/۸ درصد متغیر و نشان‌دهنده آن بود که روش مورد استفاده برای تعیین محتوای عناصر مورد مطالعه از اطمینان کافی و دقت مناسب برخوردار بوده است.

محاسبه شاخص آلودگی ((Pollution Index (PI))، شاخص بار آلودگی ((Pollution Load Index (PLI))، فاکتور تجمع زیستی ((Bioaccumulation Factor (BAF)) و شاخص نرخ جذب سطحی اتمسفری ((Capture Rate (CR)) در این پژوهش، برای ارزیابی سطح آلودگی نمونه‌های خاک به عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه، شاخص‌های PI و PLI به ترتیب با استفاده از معادلات ۱ و ۲ محاسبه شدند (۴۶، ۴۷):

$$PI = \frac{C_{\text{sample}}}{C_{\text{background}}} \quad (1)$$

در معادله ۱:

$C_{\text{background}}$ و C_{sample} به ترتیب نشان‌دهنده محتوای عنصر مورد نظر در نمونه خاک و غلظت عنصر در پوسته زمین (برابر با ۳۴/۲، ۲۰/۸ و ۴۵/۷ به ترتیب برای عناصر سرب، کروم و نیکل) هر دو بر حسب mg/kg هستند (۴۸). سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها بر اساس مقادیر PI در جدول ۱ آورده شده است (۴۹).

$$PLI = \sqrt[n]{PI_1 \times PI_2 \times PI_3 \times \dots \times PI_n} \quad (2)$$

در معادله ۲:

PLI بیان‌گر شاخص بار آلودگی و PI_i نیز نشان‌دهنده شاخص آلودگی هر یک از عناصر مورد مطالعه هستند. طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر شاخص PLI در جدول ۱ آورده شده است (۵۰).

برای عصاره‌گیری نمونه‌های خاک، ۰/۵ g از هر نمونه خاک را به‌طور مجزا به بشر ۲۵۰ mL منتقل کرده و پس از افزودن ۱۲ mL تیزاب (مخلوطی از اسید نیتریک و اسید کلریدریک با نسبت ۱:۳) به هر بشر، محلول حاصل به مدت ۳ h روی هیتر در دمای ۱۱۰ °C حرارت داده شد. پس از خنک شدن محلول‌ها، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و با آب دوبار تقطیر به حجم ۱۰۰ mL رسانده شد (۳۸، ۴۲). از طرفی برای عصاره‌گیری نمونه‌های گیاهی، ۰/۲ g از هر نمونه برگ/سوزن را به‌طور مجزا به ظروف هضم با حجم ۵۰ mL منتقل کرده و پس از افزودن ۵ mL اسید نیتریک به هر ظرف، محلول حاصل به مدت ۴۵ min در دمای ۱۰۰ °C حرارت داده شد. پس از خنک شدن محلول‌ها، به هر یک از آن‌ها ۰/۵ mL اسید پرکلریک افزوده و محلول حاصل به مدت ۳۰ تا ۴۰ min در دمای ۱۶۰ °C تا ۱۷۰ °C حرارت داده شد. سپس عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و با آب دوبار تقطیر به حجم ۱۰ mL رسانده شد (۴۳، ۴۴). در نهایت، پس از ساخت محلول مادر (استوک) و استاندارد نمک عناصر و کالیبره کردن دستگاه ICP-OES مدل 710-ES ساخت شرکت Varian استرالیا، محتوای عناصر سرب، کروم و نیکل به ترتیب در طول موج‌های ۲۲۰/۳۵۳، ۲۶۷/۷۱۶ و ۲۳۱/۶۰۴ nm خوانده شدند. مقادیر تضمین و کنترل کیفیت (Quality Assurance/Quality Control) اندازه‌گیری‌ها با استفاده از مرجع استاندارد خاک (SQC-001) خریداری شده از شرکت سیگما-آلدریج اسپانیا تعیین شدند (۴۵). مقادیر حد تشخیص ((Limit of Detection (LOD)) برای عناصر سرب، کروم و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۰۲۸، ۰/۱۲۱ و ۰/۰۸۱ mg/kg حاصل شدند. مقادیر محدودیت کمی ((Limits of Quantification (LOQ)) عناصر (mg/kg) نیز برای سرب، کروم و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۰۸۴، ۰/۳۶۷ و ۰/۲۶۸ حاصل شد. نرخ بازیابی (Recovery Rate) عناصر

جدول ۱- طبقه‌بندی مقادیر شاخص‌های PI و PLI

شاخص آلودگی		شاخص بار آلودگی		فاکتور تجمع‌زیستی	
ارزش	طبقه توصیفی	ارزش	طبقه توصیفی	ارزش	طبقه توصیفی
$PI < 1$	آلودگی کم	$PLI < 1$	آلودگی کم	$BAF > 1$	بیش‌انباشت‌گر
$1 \leq PI < 3$	آلودگی متوسط	$1 \leq PLI < 2$	آلودگی متوسط	$0.1 < BAF < 1$	متوسط انباشت‌گر
$3 \leq PI < 6$	آلودگی زیاد	$2 \leq PLI < 3$	آلودگی زیاد	$BAF < 0.1$	غیرانباشت‌گر
$PI \geq 6$	آلودگی خیلی زیاد	$PLI \geq 3$	آلودگی خیلی زیاد		

است که CR ابزار مفید و مناسبی برای ارزیابی و تعیین سطح آلاینده‌های فلزی حاصل از تنشینی فرونشست‌های اتمسفری است و گونه گیاهی با مقادیر بیش‌تر CR از توانایی بهتر در جذب سطحی آلاینده‌های اتمسفری برخوردار است.

– پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۱۹ بسته آماری برای علوم اجتماعی (SPSS) انجام یافت. بدین صورت که فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس‌ها به ترتیب توسط آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov (K-S)) و لوین (Levene Test) بررسی شدند. به منظور مقایسه میانگین محتوای عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک و گیاه بین مکان‌های نمونه‌برداری از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) و به دنبال آن آزمون چند دامنه‌ای دانکن (Duncan Multiple Range Test) در سطح معنی‌داری ۵ درصد استفاده شد.

یافته‌ها

– آمار توصیفی مربوط به تعیین مقادیر عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های خاک و گیاه

شاخص‌های BAF و CR به منظور ارزیابی قابلیت پایش عناصر بالقوه سمی توسط گونه‌های درختی مورد مطالعه به ترتیب با استفاده از معادلات ۳ و ۴ محاسبه شدند (۲۱، ۴۴):

$$BAF = \frac{C_{\text{washed leaves/needles}}}{C_{\text{soil}}} \quad (3)$$

در معادله ۳:

C_{soil} و $C_{\text{washed leaves/needles}}$ به ترتیب نشان‌دهنده محتوای عنصر مورد مطالعه در برگ شسته شده و خاک هر دو بر حسب mg/kg هستند. طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر فاکتور BAF در جدول ۱ آورده شده است (۵۱).

(۴)

$$CR (\%) = \frac{C_{\text{unwashed leaves/needles}} - C_{\text{washed leaves/needles}}}{C_{\text{unwashed leaves/needles}}} \times 100$$

در معادله ۴:

$C_{\text{unwashed leaves/needles}}$ و $C_{\text{washed leaves/needles}}$ به ترتیب نشان‌دهنده محتوای عنصر در نمونه‌های برگ شسته نشده و برگ شسته شده هر دو بر حسب mg/kg هستند. لازم به ذکر

عناصر سرب، کروم و نیکل (mg/kg) در نمونه‌های خاک به‌ترتیب با ۶۷/۵، ۷۲/۲ و ۱۰۱ مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از مکان‌های تجاری، صنعتی و تجاری بوده است. به‌علاوه، میانگین محتوای عناصر در نمونه‌ها روند نزولی نیکل < سرب < کروم را نشان داد.

آمار توصیفی مربوط به محتوای عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های خاک و گیاه در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. نتایج مندرج در جدول ۲ بیان‌گر آن است که میانگین محتوای عناصر سرب، کروم و نیکل به‌ترتیب برابر با ۶۵/۵، ۵۲/۸ و ۹۷/۷ mg/kg بوده است. از طرفی، بیشینه میانگین محتوای

جدول ۲- آمار توصیفی محتوای عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی مناطق شهری همدان (mg/kg)

عنصر	مکان نمونه‌برداری (کاربری)		
	مسکونی	تجاری	صنعتی
سرب	۵۳/۵ ± ۶/۹۷ ^a	۷۲/۲ ± ۱۹/۹ ^a	۷۰/۹ ± ۱۵/۰ ^a
کروم	۳۹/۵ ± ۵/۷۵ ^b	۵۱/۶ ± ۸/۱۹ ^{ab}	۶۷/۵ ± ۱۹/۸ ^a
نیکل	۹۲/۷ ± ۱/۰۸ ^a	۱۰۱ ± ۸/۹۹ ^a	۹۸/۶ ± ۶/۱۰ ^a

حروف غیرمشترک (a, b, c و ...) در هر ردیف، بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0/05$) میانگین محتوای عناصر سرب، کروم و

نیکل در نمونه‌های خاک بر اساس نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

همچنین، بیشینه میانگین محتوای عنصر سرب (mg/kg) در برگ/سوزن‌های شسته نشده و شسته شده به‌ترتیب با ۱۷/۳ و ۱۴/۱ مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از کاربری تجاری بود (میانگین دو گونه). از دیگر سو، بیشینه میانگین محتوای عناصر کروم و نیکل در برگ/سوزن‌های شسته نشده به‌ترتیب برابر با ۱۲/۲ و ۵۹/۹ mg/kg و در برگ/سوزن‌های شسته شده نیز به‌ترتیب با ۸/۹۱ و ۵۶/۰ mg/kg مربوط به نمونه‌های برداشت‌شده از کاربری صنعتی بود.

با استناد به نتایج مندرج در جدول ۳، محتوای عناصر سرب، کروم و نیکل در برگ/سوزن‌های گونه‌های درختی به‌ترتیب در دامنه ۷/۹۶-۱۷/۷ mg/kg، ۶/۵۰-۱۲/۷ mg/kg و ۲۸/۸-۶۳/۲ mg/kg متغیر بود. بیشینه میانگین محتوای عناصر سرب و کروم به‌ترتیب با ۱۴/۸ و ۱۰/۷ mg/kg مربوط به سوزن‌های شسته نشده کاج بود (میانگین سه مکان نمونه‌برداری). از طرفی، بیشینه میانگین محتوای عنصر نیکل با ۴۷/۶ mg/kg به برگ‌های شسته نشده افاقیا تعلق داشت.

جدول ۳- آمار توصیفی محتوای عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های گیاهی (mg/kg)

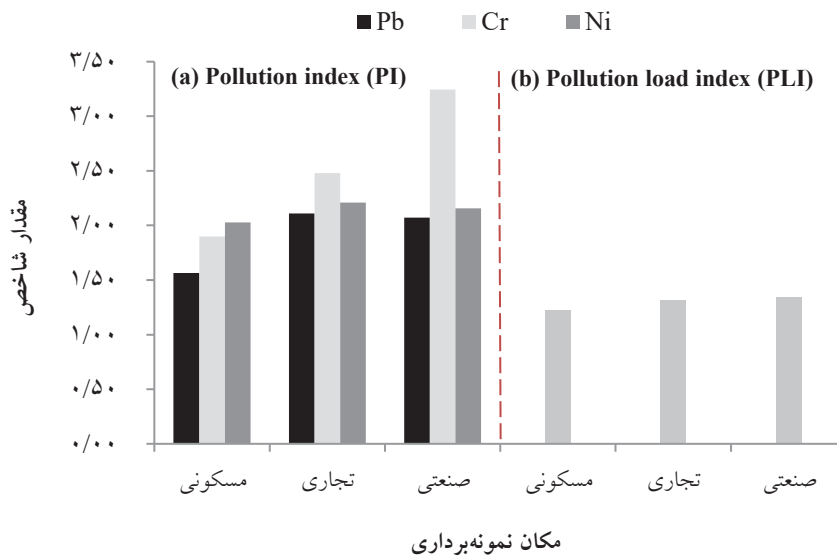
عصر	مکان نمونه برداری	افاقیا		کاج تهران		میانگین دو گونه	
		برگ شسته نشده	برگ شسته شده	سوزن شسته نشده	سوزن شسته شده	برگ/سوزن شسته نشده	برگ/سوزن شسته شده
سرب	مسکونی	۹/۸۹ ± ۰/۵۴۹ ^C	۷/۹۶ ± ۰/۴۵۶ ^B	۱۱/۲ ± ۰/۲۹۵ ^C	۸/۵۹ ± ۰/۳۳۴ ^C	۱۰/۵ ± ۰/۷۹۵ ^C	۸/۲۷ ± ۰/۴۹۹ ^C
	تجاری	۱۶/۹ ± ۰/۴۸۹ ^A	۱۳/۸ ± ۱/۱۷ ^A	۱۷/۷ ± ۰/۴۵۵ ^A	۱۴/۴ ± ۱/۰۰ ^A	۱۷/۳ ± ۰/۵۷۱ ^A	۱۴/۱ ± ۱/۰۷ ^A
	صنعتی	۱۵/۱ ± ۰/۳۵۹ ^B	۱۲/۵ ± ۱/۰۹ ^A	۱۵/۸ ± ۰/۶۴۹ ^B	۱۲/۹ ± ۱/۰۵ ^B	۱۵/۵ ± ۰/۶۱۶ ^B	۱۲/۷ ± ۱/۰۲ ^B
	میانگین	۱۳/۹ ± ۳/۱۷ ^{ba}	۱۱/۴ ± ۲/۷۴ ^c	۱۴/۸ ± ۲/۸۹ ^a	۱۱/۹ ± ۲/۶۹ ^{bc}	۱۴/۴ ± ۳/۰۰	۱۱/۷ ± ۲/۶۷
کروم	مسکونی	۸/۲۴ ± ۰/۵۵۲ ^C	۶/۵۰ ± ۱/۲۱ ^B	۸/۸۸ ± ۰/۶۲۷ ^C	۷/۰۸ ± ۱/۳۴ ^B	۸/۵۵ ± ۰/۶۴۵ ^C	۶/۷۹ ± ۱/۲۲ ^B
	تجاری	۹/۳۲ ± ۰/۳۹۹ ^B	۷/۲۲ ± ۰/۶۰۷ ^B	۱۰/۴ ± ۰/۴۸۷ ^B	۷/۶۵ ± ۰/۵۶۷ ^{AB}	۹/۸۸ ± ۰/۷۲۶ ^B	۷/۴۳ ± ۰/۵۸۹ ^B
	صنعتی	۱۱/۷ ± ۰/۶۷۹ ^A	۸/۷۶ ± ۰/۷۹۳ ^A	۱۲/۷ ± ۰/۶۱۱ ^A	۹/۰۶ ± ۰/۷۴۱ ^A	۱۲/۲ ± ۰/۷۴۹ ^A	۸/۹۱ ± ۰/۷۲۹ ^A
	میانگین	۹/۷۶ ± ۱/۵۹ ^a	۷/۴۹ ± ۱/۲۸ ^b	۱۰/۷ ± ۱/۷۰ ^a	۷/۹۳ ± ۱/۲۱ ^b	۱۰/۲ ± ۱/۶۸	۷/۷۱ ± ۱/۲۴
نیکل	مسکونی	۳۳/۲ ± ۱/۰۹ ^C	۳۰/۵ ± ۱/۳۷ ^C	۳۱/۲ ± ۱/۰۹ ^C	۲۸/۸ ± ۱/۶۱ ^C	۳۲/۲ ± ۱/۴۷ ^C	۲۹/۷ ± ۱/۶۷ ^C
	تجاری	۴۶/۵ ± ۱/۰۹ ^B	۴۱/۳ ± ۱/۵۹ ^B	۴۳/۹ ± ۰/۸۱۳ ^B	۴۰/۲ ± ۲/۰۳ ^B	۴۵/۲ ± ۱/۶۴ ^B	۴۰/۷ ± ۱/۷۹ ^B
	صنعتی	۶۳/۲ ± ۱/۲۲ ^A	۵۶/۹ ± ۲/۳۷ ^A	۵۶/۷ ± ۴/۱۴ ^A	۵۵/۰ ± ۱/۹۵ ^A	۵۹/۹ ± ۴/۴۸ ^A	۵۶/۰ ± ۲/۲۷ ^A
	میانگین	۴۷/۶ ± ۱۲/۹ ^a	۴۲/۹ ± ۱۱/۵ ^a	۴۳/۹ ± ۱۱/۱ ^a	۴۱/۳ ± ۱۱/۳ ^a	۴۵/۸ ± ۱۱/۹	۴۲/۱ ± ۱۱/۲

مقادیر مشخص شده با حروف کوچک غیرمشترک (a, b, c و ...) در هر ردیف، بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0.05$) میانگین محتوای عناصر مورد بررسی بین نمونه برگ/سوزن‌های گونه‌های درختی و مقادیر مشخص شده با حروف بزرگ غیرمشترک (A, B, C) و ... در هر ستون، بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0.05$) میانگین محتوای عناصر مورد بررسی در نمونه برگ/سوزن‌های گونه‌های درختی بین کاربری‌های مختلف بر اساس نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه و چند دامنه‌ای دانکن است.

نتایج ارزیابی کیفیت خاک

نتایج ارزیابی کیفیت خاک در نمودار ۱ نشان داده شده است. بر این اساس، میانگین مقادیر محاسبه شده PI در دامنه ۱/۵۶ تا ۳/۲۴ متغیر و بیانگر آلودگی متوسط تا زیاد خاک به عناصر سرب، کروم و نیکل در همه مکان‌های نمونه‌برداری

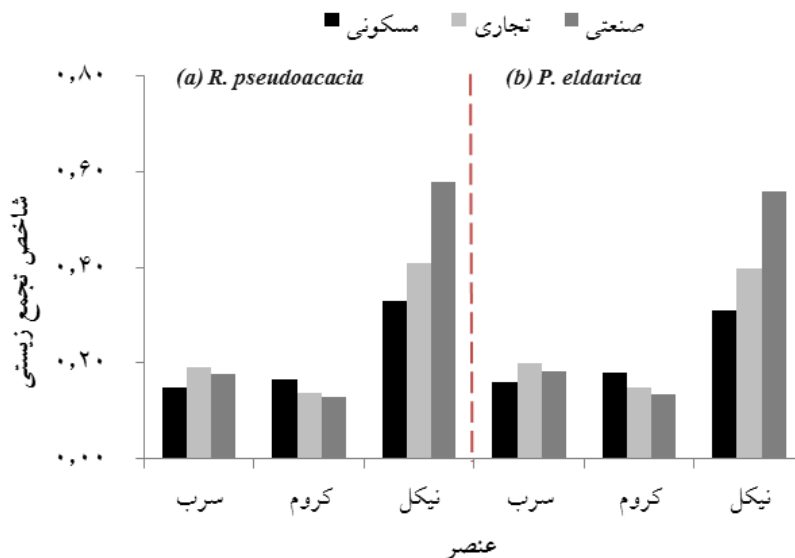
(۱۰۰ درصد نمونه‌ها) بود. همچنین، روند نزولی میانگین مقادیر شاخص PI برای عناصر به شرح کروم < نیکل < سرب بود. از طرفی، مقادیر محاسبه شده شاخص PLI در دامنه ۱/۳۴-۱/۲۲ متغیر و بیانگر سطح آلودگی "متوسط" در همه مکان‌های مورد مطالعه بود.



نمودار ۱- مقادیر شاخص‌های PI و PLI عناصر سرب، کروم و نیکل در نمونه‌های خاک به تفکیک مکان نمونه‌برداری

نتایج محاسبه فاکتور BAF
 با گونه کاج تهران نیز مقادیر BAF عناصر سرب، کروم و نیکل به ترتیب در دامنه ۰/۱۶۵-۰/۱۲۹ و ۰/۵۷۷-۰/۳۲۹ متغیر بوده است. در رابطه با گونه کاج تهران نیز مقادیر BAF عناصر سرب، کروم و نیکل به ترتیب در دامنه ۰/۱۹۹-۰/۱۶۱، ۰/۱۷۹-۰/۱۳۴ و ۰/۵۵۸-۰/۳۱۰ متغیر بودند.

نتایج محاسبه فاکتور BAF عناصر سرب، کروم و نیکل در نمونه‌های برگ/سوزن گونه‌های افاقیا و کاج تهران در نمودار ۲ آورده شده است. بر این اساس، مقادیر BAF عناصر سرب، کروم و نیکل برگ افاقیا به ترتیب در دامنه ۰/۱۹۱-۰/۱۴۹،



نمودار ۲- مقادیر فاکتور BAF عناصر سرب، کروم و نیکل در نمونه برگ/سوزن‌های گونه‌های افاقیا و کاج تهران

کاج تهران نیز به ترتیب برابر با ۱۸/۳-۲۳/۳، ۲۰/۳-۲۸/۷ و ۲/۹۹-۸/۴۳ بوده است. از سوی دیگر، بیشینه میانگین مقادیر این شاخص برای عناصر سرب و کروم به ترتیب با ۱۹/۶ و ۲۵/۹ درصد به گونه کاج تهران و برای عنصر نیکل با ۹/۸۷ درصد به گونه افاقیا تعلق داشت.

نتایج محاسبه شاخص CR در نمونه‌های گیاهی در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان داد که دامنه مقادیر CR عناصر سرب، کروم و نیکل برای گونه افاقیا به ترتیب برابر با ۱۷/۲-۱۹/۵، ۲۱/۱-۲۵/۱ و ۸/۱۳-۱۱/۲ درصد و برای گونه

جدول ۴- مقادیر شاخص CR عناصر سرب، کروم و نیکل در نمونه‌های گیاهی به تفکیک مکان نمونه‌برداری

گونه	کاربری	نرخ جذب سطحی اتمسفری (درصد)		
		سرب	کروم	نیکل
اقاقیا	مسکونی	۱۹/۵	۲۱/۱	۸/۱۳
	تجاری	۱۸/۳	۲۲/۵	۱۱/۲
	صنعتی	۱۷/۲	۲۵/۱	۹/۹۶
	میانگین	۱۷/۹	۲۳/۳	۹/۸۷
کاج تهران	مسکونی	۲۳/۳	۲۰/۳	۷/۶۹
	تجاری	۱۸/۶	۲۶/۴	۸/۴۳
	صنعتی	۱۸/۳	۲۸/۷	۲/۹۹
	میانگین	۱۹/۶	۲۵/۹	۵/۹۲

به مقادیر محتوای عناصر در نمونه‌های خاک سطحی و گیاه از توزیع نرمال برخوردار بوده‌اند (جدول ۵).

نتایج پردازش آماری داده‌ها K-S نشان داد با توجه به سطح معنی‌داری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ ($p > ۰/۰۵$)، همه داده‌های مربوط

جدول ۵- مقادیر سطح معنی‌داری مربوط به بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها

عنصر	خاک	برگ شسته نشده		برگ شسته شده	
		کاج تهران	اقاقیا	کاج تهران	اقاقیا
سرب	۰/۸۲۱	۰/۰۸۲	۰/۹۲۷	۰/۳۵۹	۰/۷۰۶
کروم	۰/۵۰۱	۰/۵۸۴	۰/۵۱۱	۰/۹۹۹	۰/۶۵۴
نیکل	۰/۷۵۹	۰/۴۷۹	۰/۹۳۲	۰/۵۰۹	۰/۷۰۵

عناصر سرب، کروم و نیکل در نمونه‌های خاک و گیاه اختلاف معنی‌دار آماری وجود داشته است ($p < 0/05$).

نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (جدول ۲ و ۶) نیز نشان داد که بین مکان‌های نمونه‌برداری از حیث میانگین محتوای

جدول ۶- مقایسه مکان‌های نمونه‌برداری از حیث میانگین محتوای عناصر سرب، کروم و نیکل در نمونه‌های گیاه

گونه	برگ/سوزن	سرب		کروم		نیکل	
		آماره F	سطح معنی‌داری	آماره F	سطح معنی‌داری	آماره F	سطح معنی‌داری
اقاقیا	شسته نشده	۳۱۲/۲	۰/۰۰۰	۸۸/۳	۰/۰۰۰	۲۳۰/۰	۰/۰۰۰
	شسته شده	۲۷۴/۶۹	۰/۰۰۰	۱۰۵/۱۶	۰/۰۰۰	۵۳۵/۵۴	۰/۰۰۰
کاج تهران	شسته نشده	۹۸/۵۹	۰/۰۰۰	۲۱/۰۶	۰/۰۰۰	۳۰۴/۹۷	۰/۰۰۰
	شسته شده	۶۵/۱۶	۰/۰۰۰	۱۳/۲۸	۰/۰۰۰	۱۴۲/۱۳	۰/۰۰۰
میانگین	شسته نشده	۴۳۴/۵۳	۰/۰۰۰	۱۲۷/۳۲	۰/۰۰۰	۵۳۴/۵۸	۰/۰۰۰
	شسته شده	۹۸/۵۹	۰/۰۰۰	۲۱/۰۶	۰/۰۰۰	۳۰۴/۹	۰/۰۰۰

بحث

همکاران (۲۰۱۵)، Ugulu و همکاران (۲۰۱۹)، El-Khatib و همکاران (۲۰۲۰) و Roy و همکاران (۲۰۲۰) بیش‌ترین غلظت آلاینده‌های فلزی را در نمونه‌های خاک و گیاه برداشت شده از کاربری‌های تجاری و صنعتی گزارش کردند (۵۲-۵۷). ثابت شده است که سرب به‌عنوان شاخص فعالیت‌های ترافیکی به‌طور عمده از منابع احتراقی (سوخت خودرو) و غیر احتراقی (نشت روان‌کننده‌ها، ذرات حاصل از فرسایش و استهلاک بدنه خودرو و لنت ترمز) در محیط انتشار می‌یابد (۵۸). از این‌رو، بیشینه محتوای سرب در نمونه‌های جمع‌آوری شده (خاک و گیاه) از مکان‌های تجاری را می‌توان با حجم ترافیک مرتبط دانست. نتایج پژوهش‌های Kamani و همکاران (۲۰۱۵) و Chen و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داد انتشارات مداوم ناشی از ترافیک (احتراق بنزین، نشت روان‌کننده‌ها، سایش و خوردگی قطعات خودرو) منبع عمده افزایش محتوای عنصر سرب در خاک و پوشش گیاهی مناطق تجاری بوده است (۵۳، ۵۹). از طرفی، انتشارات ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، فعالیت‌های صنعتی و ترافیک از منابع عمده کروم و نیکل

خاک به‌عنوان منبع و مخزن عناصر فلزی و گیاه به‌سبب حضور ثابت در یک منطقه ابزارهای محیطی مناسب و مفیدی برای سنجش آلودگی عناصر بالقوه سمی در اکوسیستم شهری به‌شمار می‌آیند. نتایج پژوهش نشان داد که بیشینه میانگین محتوای عناصر سرب، کروم و نیکل در نمونه‌های خاک به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از کاربری‌های تجاری، صنعتی و تجاری بود. از طرفی، بیشینه میانگین محتوای عنصر سرب در برگ/سوزن‌های شسته نشده و شسته شده هر دو مربوط به نمونه‌های برداشت شده از کاربری تجاری و بیشینه میانگین محتوای عناصر کروم و نیکل در برگ/سوزن‌های شسته نشده همگی مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از کاربری صنعتی بود. در این خصوص، بیشینه محتوای عناصر در مکان‌های تجاری و صنعتی در مقایسه با کاربری مسکونی را می‌توان با تشدید فعالیت‌های انسانی از جمله انتشارات ترافیکی و صنعتی مرتبط دانست. در مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، Zhang و همکاران (۲۰۱۳)، Kamani و همکاران (۲۰۱۵)، Xu و

در محیط شهری محسوب می‌شوند (۳۹، ۶۰، ۶۱). بنابراین، افزایش محتوای عناصر کروم و نیکل در مناطق صنعتی مورد مطالعه را می‌توان با توسعه صنایعی همچون جوشکاری و آبکاری، چاپ کاغذ، مواد غذایی و آشامیدنی، محصولات پلاستیکی، چرمی و همچنین کارگاه‌های تعمیرات و نقاشی خودرو مرتبط دانست. همان‌طور که Mahmood و همکاران (۲۰۱۹) و Patel و همکاران (۲۰۲۳) نیز بیشینه غلظت عناصر کروم و نیکل را در مناطق صنعتی گزارش و آن‌را با فعالیت‌های ذوب فلزات و ریخته‌گری، تولید رنگدانه، تأسیسات دارویی، نساجی، چاپ کاغذ، محصولات چرمی، پلاستیک و صنایع غذایی مرتبط دانستند (۳۵، ۶۲). افزون بر این، نتایج سنجش میانگین محتوای عناصر در نمونه‌های گیاهی نشان داد که بیشینه میانگین محتوای تجمع‌یافته عناصر سرب و کروم به ترتیب برابر با $14/8$ و $10/7$ mg/kg و به سوزن‌های شسته نشده کاج و بیشینه میانگین محتوای عنصر نیکل با $47/6$ mg/kg به برگ‌های شسته نشده افاقیا تعلق داشت (میانگین از سه کاربری). در این رابطه، می‌توان اذعان داشت که محتوای عناصر سرب، کروم و نیکل در نمونه‌های گیاهی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع گونه گیاهی است. Turkylmaz و همکاران (۲۰۱۸، ۲۰۲۰)، Wang و همکاران (۲۰۱۸) و Hajizadeh و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که تفاوت در مقادیر جذب و انباشت عناصر فلزی در گونه‌های مختلف گیاهی می‌تواند با ویژگی‌های مختلف وراثتی و ریخت‌شناسی آن‌ها مرتبط باشد (۶۳-۶۶).

شاخص‌های PI و PLI ابزارهایی مناسب برای تعیین سطح آلودگی و برآوردی جامع از میزان آلودگی خاک به عناصر بالقوه سمی به‌شمار می‌آیند (۴۹، ۶۷). مقادیر محاسبه شده شاخص PI بیان‌گر آلودگی "متوسط" تا "زیاد" خاک به عناصر سرب، کروم و نیکل در همه کاربری‌های مورد مطالعه بود (نمودار ۱). از طرفی، بیشینه میانگین مقادیر PI برای عناصر سرب، کروم

و نیکل به ترتیب با $2/11$ ، $3/25$ و $2/21$ مربوط به مکان‌های تجاری، صنعتی و تجاری بود. علاوه بر این، بیشینه میانگین مقدار PLI با $1/34$ نیز مربوط به کاربری صنعتی بود. این موضوع را می‌توان با میانگین غلظت عناصر مرتبط دانست که نشان‌دهنده تأثیر انتشارات ترافیکی و صنعتی انسان‌پدید در ایجاد این وضعیت است (۱، ۶۸). در مطالعات مشابه و در تایید نتایج حاصل، Ziyae و همکاران (۲۰۱۹) و Men و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش کردند افزایش آلودگی فلزی در کاربری‌های تجاری و صنعتی با فعالیت‌های انسانی (تجاری و صنعتی) مرتبط بوده است (۶۹، ۷۰).

گیاهان می‌توانند فلزات سنگین را از خاک به‌واسطه اندام‌های زیرزمینی (ریشه) یا از فرونشست‌های اتمسفری توسط اندام‌های هوایی (روزنه‌های هوایی برگ‌ها) جذب کنند (۳۸، ۷۱). گرچه به‌طور معمول تشخیص منبع آلاینده (هوا یا خاک) مشکل است؛ با این حال، فاکتور BAF به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در گیاه‌پالایی (Phytoremediation)، منعکس‌کننده توانایی گیاه برای جذب و تجمع عناصر فلزی از خاک محسوب می‌شود (۷۲، ۷۳). نتایج این پژوهش نشان داد که مقادیر شاخص BAF برای همه عناصر در برگ‌ها/سوزن‌های هر دو گونه درختی (میانگین از همه مکان‌های نمونه‌برداری) کوچک‌تر از یک بود (نمودار ۲). این یافته می‌تواند بیان‌گر آن باشد که جذب عناصر فلزی در برگ/سوزن‌های افاقیا و کاج تهران از طریق ریشه رخ نداده و به‌طور عمده ناشی از فرونشست‌های اتمسفری (جذب توسط روزنه‌ها) بوده است. در مطالعه مشابه و در تأیید نتایج حاصل، Liu و همکاران (۲۰۲۲) نیز با محاسبه مقادیر شاخص BAF نسبت به ارزیابی قابلیت برگ درختان عرعر (*Ailanthus altissima*)، توت کاغذی (*Broussonetia papyrifera*)، کاج کلسرادو (*Pinus tabuliformis*) و سماق (*Rhus typhina*) در گیاه‌پالایی فلزات سنگین مناطق شهری پکن اقدام کرده و

برای عنصر کادمیم معرفی کردند (۷۷). ثابت شده است که گیاهان و به‌ویژه گونه‌های چوبی، ابزارهای مناسب و موثری برای فیلتر کردن (جذب آلاینده‌ها از طریق روزنه‌های هوایی برگ‌ها) و به‌دام انداختن و نگهداری آلاینده‌های اتمسفری بر روی سطح اندام‌های هوایی خود (جذب سطحی آلاینده‌های همراه فرونشست‌های اتمسفری) هستند (۴۰، ۵۹). در این راستا، شستشوی برگ‌ها با آب، راه‌کاری مفید و مناسب برای تمایز بین عناصر جذب شده توسط اندام‌های هوایی و عناصر ترسیب کرده روی سطح اندام‌های هوایی به‌شمار می‌آید. در این خصوص، شاخص CR از جمله ابزارهای مناسب برای ارزیابی و تعیین سطح آلاینده‌های فلزی حاصل از تهنشینی فرونشست‌های اتمسفری است (۴۰). نتایج محاسبه CR (جدول ۴) بیان‌گر آن بود که بیشینه میانگین مقادیر نرخ جذب سطحی برای عناصر سرب و کروم مربوط به گونه کاج تهران و برای عنصر نیکل نیز به گونه افاقیا مربوط بوده است. در این خصوص، تفاوت بین میانگین مقادیر جذب سطحی اتمسفری عناصر مورد ارزیابی در گونه‌های افاقیا و کاج تهران را می‌توان با ویژگی‌های فیزیولوژیکی آن‌ها مرتبط دانست؛ با این حال، سطح وسیع برگ‌های افاقیا و لایه مومی سطح سوزن‌های کاج تهران می‌تواند عاملی موثر در جذب و انباشت ذرات اتمسفری توسط گونه‌های درختی مورد مطالعه محسوب شود. نتایج مطالعات Dzierzanowski و همکاران (۲۰۱۱)، Thao و همکاران (۲۰۱۴)، Simon و همکاران (۲۰۱۴)، Mori و همکاران (۲۰۱۵)، Liu و همکاران (۲۰۲۲) و Tan و همکاران (۲۰۲۲) نیز که با هدف ارزیابی فرونشست آلاینده‌های اتمسفری بر روی برگ درختان شهری انجام یافت، نشان دادند که ویژگی‌های ساختار و سطح برگ نظیر تراکم و تعداد روزنه‌ها، کوتیکول، موم و اپیدرم نقش مهم و مؤثری در جذب و انباشت ذرات اتمسفری داشته‌اند؛ به‌علاوه خصوصیات فیزیولوژیکی و ترکیب شیمیایی سطوح برگ را نیز می‌توان با توانایی جذب متفاوت

تجمع عناصر روی، سرب، کروم، مس و منگنز در برگ را با جذب ذرات اتمسفری مرتبط دانستند (۷۴). همچنین، Solgi و همکاران (۲۰۱۹) با استناد به مقادیر محاسبه شده شاخص BAF، جذب و انباشت عناصر روی و مس در سوزن کاج تهران (*P. eldarica*) و برگ ون (*Fraxinus excelsior*) را با ذرات اتمسفری مرتبط دانستند (۷۵).

نتایج نشان داد بیشینه میانگین مقادیر شاخص BAF برای سرب و کروم مربوط به سوزن‌های کاج و برای عنصر نیکل مربوط به برگ‌های افاقیا بود (نمودار ۲). در این خصوص، می‌توان ادعان داشت توانایی برگ افاقیا برای جذب و انباشت عنصر نیکل از خاک، بیش‌تر از سوزن کاج تهران بوده است؛ در حالی‌که سوزن کاج تهران قابلیت جذب و انباشتگی بیش‌تری را برای عناصر سرب و کروم نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که درختان افاقیا و کاج تهران با میانگین مقادیر BAF محدوده ۰/۱-۱/۰۰، از کارایی متوسط در جذب و انباشت عناصر سرب، کروم و نیکل از خاک برخوردار بوده‌اند. نتایج مطالعه Solgi و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان داد که بیشینه میانگین مقادیر شاخص BAF عناصر روی، کادمیم و منگنز مربوط به گونه افاقیا و برای عنصر نیکل نیز مربوط به درخت سنجد بوده است (۳۷). به‌علاوه، Habibi و همکاران (۲۰۲۲) با ارزیابی تجمع آلودگی فلزات سنگین در خاک و برگ سه گونه درختی در شهر بندرعباس گزارش کردند که درختان چریش، کهور و کنوکارپوس با مقادیر شاخص $BAF < 1$ برای عناصر روی، سرب، کادمیم و منگنز، گونه‌هایی متوسط انباشت‌گر برای این فلزات محسوب می‌شوند (۷۶). از طرفی، Rafati و همکاران (۲۰۲۰) با ارزیابی تجمع‌زیستی برخی از فلزات سنگین در خاک و برگ درختان کنار، مقادیر شاخص BAF برای عناصر آهن، سرب، کادمیم و منگنز را به‌ترتیب برابر با ۰/۷۰، ۰/۷۴۰، ۱/۹۴ و ۰/۱۹۰ گزارش و گونه کنار را گونه‌ای غیر انباشت‌گر برای آهن، انباشت‌گر متوسط برای عناصر سرب و منگنز و بیش‌اندوز

منطقه مورد مطالعه را نشان داد. از طرفی، مقادیر محاسبه شده شاخص BAF نشان دادند که گونه‌های درختی اقاچیا و کاج تهران به‌عنوان انباشت‌گر متوسط می‌توانند گزینه‌های مناسب برای پالایش زیستی عناصر سرب، کروم و نیکل خاک مناطق آلوده محسوب شوند. میانگین مقادیر شاخص CR نیز بیان‌گر قابلیت گونه‌های اقاچیا و کاج تهران در جذب ذرات اتمسفری آلوده به عناصر سرب، کروم و نیکل بود. هرچند که داده‌های حاصل برای تسهیل در سیاست‌های محیط‌زیستی از طریق اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی مفید خواهند بود، اما با توجه به اثرات بوم‌شناختی و بهداشتی عناصر بالقوه سمی بر سلامت محیط و شهروندان، پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک و همچنین کنترل منابع انتشار آلاینده‌های فلزی پیشنهاد می‌شود. در نهایت، با توجه به محدودیت‌های زمانی و کمبود منابع مالی در اجرای این پژوهش، مطالعه سایر گونه‌های گیاهی رشدیافته در اکوسیستم‌های شهری برای شناسایی و معرفی گونه‌هایی با قابلیت پایش و پالایش آلاینده‌ها و به‌ویژه عناصر فلزی سمی، توصیه می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان همه نکات اخلاقی از جمله عدم سرقت ادبی، عدم انتشار مقاله در سایر نشریه‌ها، عدم تحریف داده‌ها و پرهیز از داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از رساله دکتری تخصصی محیط‌زیست مصوب واحد همدان دانشگاه آزاد اسلامی با عنوان "محتوای، توزیع و منشاء‌یابی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی و گردوغبار خیابانی و ارزیابی قابلیت برخی گونه‌های چوبی به‌عنوان پایش‌گر زیستی عناصر، مورد مطالعه: کلان شهر همدان" و با کد ۱۷۱۲۴۸۷۴۰۵۰۷۶۱۷۷۷۴۰۲۹۱۶۲۷۴۳۷۱۵ است.

عناصر فلزی متصل به ذرات اتمسفری مرتبط دانست (۷۴، ۷۸-۸۲). Liang و همکاران (۲۰۱۷) نیز با بررسی غلظت عناصر فلزی در برگ ۱۲ گونه گیاهی و با استناد به مقادیر شاخص CR، اذعان داشتند که گونه مگنولیا سفید (*Magnolia grandiflora*) با برخورداری از سطوح بزرگ برگ‌ها و گونه خرزهره (*Nerium indicum*) نیز به‌سبب سطح مخاطی برگ‌ها از توانایی جذب و انباشت ذرات اتمسفری آلوده به عناصر سرب، کادمیم و مس برخوردار بوده‌اند (۴۰). همچنین، Hatami-Manesh و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی میزان جذب و تجمع فلزات سنگین توسط برخی از گونه‌های درختی در کلان‌شهر اصفهان، بیشینه مقادیر نرخ جذب سطحی عناصر روی (۸/۱۸ درصد)، سرب (۱۵/۲ درصد)، کادمیم (۸/۹۲ درصد)، مس (۱۰/۴ درصد) و نیکل (۱۰/۴ درصد) را به‌ترتیب برای گونه‌های درختی نارون چتری، لارک، شاتوت، نارون چتری و لارک گزارش کرده و آن‌را با ویژگی‌های ساختار و سطح برگ (اندازه، زبری سطح، تراکم و وجود یک لایه مخاطی در سطح برگ) مرتبط دانستند (۳۶).

نتیجه‌گیری

خاک و گیاه، شاخص‌های محیطی مناسب و مفید برای سنجش آلودگی آلاینده‌های فلزی در اکوسیستم محسوب می‌شوند. نتایج نشان داد که بیشینه محتوای عناصر سرب، کروم و نیکل به نمونه‌های برداشت‌شده از کاربری‌هایی با فعالیت‌های انسانی شدیدتر (تجاری و صنعتی) مربوط بوده است که تأثیر انتشارات انسان‌پدید ناشی از ترافیک، صنایع مواد غذایی، رنگ‌سازی و کارگاه‌های تعمیر و نقاشی خودرو بر محتوای عناصر فلزی خاک و گیاهان را نشان می‌دهد. همچنین، مقادیر شاخص PI در نمونه‌های خاک، سطح آلودگی "متوسط" تا "زیاد" برای عناصر سرب، کروم و نیکل را نشان داد. میانگین مقدار شاخص PLI نمونه‌های خاک نیز با ۱/۲۹ شرایط آلودگی "متوسط" در

References

1. Ali-Taleshi MS, Feiznia S, Masiol M. Seasonal and spatial variations of atmospheric depositions-bound elements over Tehran megacity, Iran: Pollution levels, PMF-based source apportionment and risks assessment. *Urban Climate*. 2022;42:101113.
2. Yadav IC, Devi NL, Singh VK, Li J, Zhang G. Spatial distribution, source analysis, and health risk assessment of heavy metals contamination in house dust and surface soil from four major cities of Nepal. *Chemosphere*. 2019;218:1100-13.
3. Cheraghi M, Sobhanardakani S, Zandipak R, Lorestani B, Merrikhpour H. Removal of Pb (II) from aqueous solutions using waste tea leaves. *Iranian Journal of Toxicology*. 2015;9(28):1247-53.
4. Long Z, Zhu H, Bing H, Tian X, Wang Z, Wang X, et al. Contamination, sources and health risk of heavy metals in soil and dust from different functional areas in an industrial city of Panzhihua City, Southwest China. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;420:126638.
5. Sobhan Ardakani S, Maanijou M, Asadi H. Investigation of Pb, Cd, Cu and Mg concentrations in groundwater resources of Razan Plain. *Avicenna Journal of Clinical Medicine*. 2015;21(4):319-29 (In Persian).
6. Rahdarian S, Mashjoor S, Abba A, Esmaili A, Ziarati P, Hassibi P. Heavy metal phytoremediation potential of *Vigna radiata* (L.) Wilczek for use in contaminated regions of West Karun River, Iran. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022;10:100373.
7. Talebzadeh F, Zandipak R, Sobhanardakani S. CeO₂ nanoparticles supported on CuFe₂O₄ nanofibers as novel adsorbent for removal of Pb (II), Ni (II), and V (V) ions from petrochemical wastewater. *Desalination and Water Treatment*. 2016;57(58):28363-77.
8. Wen Y, Li W, Yang Z, Zhang Q, Ji J. Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China. *Chemosphere*. 2020;245:125620.
9. Hosseini NS, Sobhan Ardakani S. Evaluation of the impact of traffic volume on pollution and potential ecological risk of Zn, Pb, and Ni in suburban roadside soils in Hamedan, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*. 2021;35(2):119-34 (In Persian).
10. Selahvarzi M, Sobhanardakani S, Hemmasi AH, Taghavi L, Ghoddousi J. Contamination and source apportionment of iron, zinc, cadmium and chromium elements in surface soil of Khorramabad county, Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2023;15(4):651-70 (In Persian).
11. Sobhanardakani S. Human health risk assessment of potentially toxic heavy metals in the atmospheric dust of city of Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(28):28086-93.
12. Baltas H, Sirin M, Gökbayrak E, Ozcelik AE. A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey. *Chemosphere*. 2020;241:125015.
13. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Feasibility of using *Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba* for biomonitoring and bioremediation of heavy metals (Zn, Pb and Ni) in the roadside environments.

- Iranian Journal of Health and Environment. 2021;13(4):607-20 (In Persian).
14. Sobhan Ardakani S. Assessment of Pb and Ni contamination in the topsoil of ring roads' green spaces in the city of Hamadan. *Pollution*. 2018;4(1):43-51.
 15. Yin F, Meng W, Liu L, Feng K, Yin C. Spatial distribution and associated risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil surrounding the Ganhe Industrial Park in Qinghai Province, China. *Land*. 2023;12(6):1172.
 16. Borah G, Deka H. Crude oil associated heavy metals (HMs) contamination in agricultural land: Understanding risk factors and changes in soil biological properties. *Chemosphere*. 2023;310:136890.
 17. Chen X, Guo M, Feng J, Liang S, Han D, Cheng J. Characterization and risk assessment of heavy metals in road dust from a developing city with good air quality and from Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26:11387-98.
 18. Sabet Aghlidi P, Cheraghi M, Lorestani B, Sobhanardakani S, Merrikhpour H. Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, case study: South of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2020;18(2):665-76.
 19. Eid EM, Galal TM, Shaltout KH, El-Sheikh MA, Asaeda T, Alatar AA, et al. Biomonitoring potential of the native aquatic plant *Typha domingensis* by predicting trace metals accumulation in the Egyptian Lake Burullus. *Science of The Total Environment*. 2020;714:136603.
 20. Hosseini NS, Sobhan Ardakani S. Evaluation of bio-monitoring and remediation capacities of heavy metals (Co, Cr, and Mn) by some herbaceous species collected from roadside biotype. *Environmental Researches*. 2023:21-38 (In Persian).
 21. Safari M, Ramavandi B, Sanati AM, Sorial GA, Hashemi S, Tahmasebi S. Potential of trees leaf/bark to control atmospheric metals in a gas and petrochemical zone. *Journal of Environmental Management*. 2018;222:12-20.
 22. Dołęgowska S, Gałuszka A, Migaszewski ZM. Significance of the long-term biomonitoring studies for understanding the impact of pollutants on the environment based on a synthesis of 25-year biomonitoring in the Holy Cross Mountains, Poland. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28:10413-35.
 23. Mazari K, Filippelli GM. Using deciduous trees as bioindicators of trace element deposition in a small urban watershed, Indianapolis, IN, USA. *Journal of Environmental Quality*. 2020;49(1):163-71.
 24. Rajfur M. Assessment of the possibility of using deciduous tree bark as a biomonitor of heavy metal pollution of atmospheric aerosol. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26(35):35945-56.
 25. Abbaszadeh H, Roozbahani M, Sobhanardakani S. Use of *Ziziphus spina-christi* and *Prosopis cineraria* leaves as bio-indicators of environmental pollution emitted from industrial areas. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2019;12(1).(In Persian)
 26. Uka UN, Belford EJ, Elebe FA. Effects of road traffic on photosynthetic pigments and heavy metal accumulation in tree species of Kumasi Metropolis,

- Ghana. SN Applied Sciences. 2021;3:1-12.
27. Zhang L, Zhang Z, Chen L, McNulty S. An investigation on the leaf accumulation-removal efficiency of atmospheric particulate matter for five urban plant species under different rainfall regimes. *Atmospheric Environment*. 2019;208:123-32.
28. Nadgórska-Socha A, Kandziora-Ciupa M, Trzęsicki M, Barczyk G. Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes. *Chemosphere*. 2017;183:471-82.
29. Al-Khashman OA, Ala'a H, Ibrahim KA. Date palm (*Phoenix dactylifera* L.) leaves as biomonitors of atmospheric metal pollution in arid and semi-arid environments. *Environmental Pollution*. 2011;159(6):1635-40.
30. Ugolini F, Tognetti R, Raschi A, Bacci L. *Quercus ilex* L. as bioaccumulator for heavy metals in urban areas: Effectiveness of leaf washing with distilled water and considerations on the trees distance from traffic. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2013;12(4):576-84.
31. Norouzi S, Khademi H, Cano AF, Acosta JA. Using plane tree leaves for biomonitoring of dust borne heavy metals: a case study from Isfahan, Central Iran. *Ecological Indicators*. 2015;57:64-73.
32. Janta R, Chantara S. Tree bark as bioindicator of metal accumulation from road traffic and air quality map: A case study of Chiang Mai, Thailand. *Atmospheric Pollution Research*. 2017;8(5):956-67.
33. Wang Z, Liu X, Qin H. Bioconcentration and translocation of heavy metals in the soil-plants system in Machangqing copper mine, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2019;200:159-66.
34. Guarino F, Improta G, Triassi M, Castiglione S, Cicutelli A. Air quality biomonitoring through *Olea europaea* L.: The study case of "Land of pyres". *Chemosphere*. 2021;282:131052.
35. Patel K, Chaurasia M, Rao KS. Heavy metal accumulation in leaves of selected plant species in urban areas of Delhi. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;30(10):27622-35.
36. Hatami-Manesh M, Mortazavi S, Solgi E, Mohtadi A. Assessing the uptake and accumulation of heavy metals and particulate matter from ambient air by some tree species in Isfahan Metropolis, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28:41451-63.
37. Solgi E, Beigmohammadi F. Investigating the effect of distance from source and species type on the absorption ability of heavy metals by tree species around Nahavand cement factory. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*. 2020;8(16):321-43 (In Persian).
38. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Heavy metal concentrations in roadside plants (*Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba*) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research* 2020;27(12):13301-14.
39. Hosseini NS, Sobhanardakani S. Concentration, sources, potential ecological and human health risks assessment of trace elements in roadside soil in Hamedan metropolitan, west of Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2022:1-24.
40. Liang J, Fang H, Zhang T, Wang X, Liu Y. Heavy

- metal in leaves of twelve plant species from seven different areas in Shanghai, China. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017;27:390-98.
41. Odabasi M, Tolunay D, Kara M, Falay EO, Tuna G, Altiok H, et al. Investigation of spatial and historical variations of air pollution around an industrial region using trace and macro elements in tree components. *Science of The Total Environment*. 2016;550:1010-21.
42. Chen M, Ma LQ. Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty Florida soils. *Soil Science Society of America Journal*. 2001;65(2):491-99.
43. Gómez-Arroyo S, Cortés-Eslava J, Loza-Gómez P, Arenas-Huertero F, de la Mora MG, Bermea OM. In situ biomonitoring of air quality in rural and urban environments of Mexico Valley through genotoxicity evaluated in wild plants. *Atmospheric Pollution Research*. 2018;9(1):119-25.
44. Hosseini N, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Expansive herbaceous species as bio-tools for elements detection in the vicinity of major roads of Hamedan, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19(3):1611-24.
45. Davodpour R, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Abdi N, Lorestani B. Honeybees (*Apis mellifera* L.) as a potential bioindicator for detection of toxic and essential elements in the environment (case study: Markazi Province, Iran). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2019;77(3):344-58.
46. Kavsar N, Eziz M, Sidikjan N. Pollution and Health Risk Assessment of hazardous elements in surface dust along an urbanization gradient. *Sustainability*. 2023;15(15):11842.
47. Mohebian M, Sobhanardakani S, Taghavi L, Ghoddousi J. Analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in the surface soils collected from various land uses around Shazand Oil Refinery Complex, Arak, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14(19):1-16.
48. Mohammadi SM, Lorestani B, Sobhan Ardakani S, Cheraghi M, Tayebi L. Source identification and ecological risk assessment of some heavy metals in surface soils collected from the vicinity of Arad-Kouh processing and disposal complex, Tehran, Iran. *Environmental Sciences*. 2021;19(3):1-22 (In Persian).
49. Fan P, Lu X, Yu B, Fan X, Wang L, Lei K, et al. Spatial distribution, risk estimation and source apportionment of potentially toxic metal (loid) s in resuspended megacity street dust. *Environment International*. 2022;160:107073.
50. Bhuiyan MAH, Karmaker SC, Bodrud-Doza M, Rakib MA, Saha BB. Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods. *Chemosphere*. 2021;263:128339.
51. Sawidis T, Breuste J, Mitrovic M, Pavlovic P, Tsigaridas K. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environmental Pollution*. 2011;159(12):3560-70.
52. El-Khatib AA, Barakat NA, Youssef NA, Samir NA. Bioaccumulation of heavy metals air pollutants by urban trees. *International Journal of Phytoremediation*. 2020;22(2):210-22.
53. Kamani H, Ashrafi SD, Isazadeh S, Jaafari J, Hoseini M, Mostafapour FK, et al. Heavy metal contamination in street dusts with various land

- uses in Zahedan, Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2015;94:382-86.
54. Roy A, Bhattacharya T, Kumari M. Air pollution tolerance, metal accumulation and dust capturing capacity of common tropical trees in commercial and industrial sites. *Science of The Total Environment*. 2020;722:137622.
55. Ugulu I, Unver MC, Dogan Y. Potentially toxic metal accumulation and human health risk from consuming wild *Urtica urens* sold on the open markets of Izmir. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2019;4(1):36.
56. Xu X, Lu X, Han X, Zhao N. Ecological and health risk assessment of metal in resuspended particles of urban street dust from an industrial city in China. *Current Science*. 2015:72-79.
57. Zhang J, Deng H, Wang D, Chen Z, Xu S. Toxic heavy metal contamination and risk assessment of street dust in small towns of Shanghai suburban area, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013;20:323-32.
58. Xiao R, Guo D, Ali A, Mi S, Liu T, Ren C, et al. Accumulation, ecological-health risks assessment, and source apportionment of heavy metals in paddy soils: A case study in Hanzhong, Shaanxi, China. *Environmental Pollution*. 2019;248:349-57.
59. Chen Y, Ning Y, Bi X, Liu J, Yang S, Liu Z, et al. Pine needles as urban atmospheric pollution indicators: Heavy metal concentrations and Pb isotopic source identification. *Chemosphere*. 2022;296:134043.
60. Chai L, Wang Y, Wang X, Ma L, Cheng Z, Su L, et al. Quantitative source apportionment of heavy metals in cultivated soil and associated model uncertainty. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;215:112150.
61. Yuanan H, He K, Sun Z, Chen G, Cheng H. Quantitative source apportionment of heavy metal (loid) s in the agricultural soils of an industrializing region and associated model uncertainty. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;391:122244.
62. Mahmood Q, Shaheen S, Bilal M, Tariq M, Zeb BS, Ullah Z, et al. Chemical pollutants from an industrial estate in Pakistan: a threat to environmental sustainability. *Applied Water Science*. 2019;9:1-9.
63. Hajizadeh Y, Mokhtari M, Faraji M, Abdolahnejad A, Mohammadi A. Biomonitoring of airborne metals using tree leaves: Protocol for biomonitor selection and spatial trend. *MethodsX*. 2019;6:1694-700.
64. Turkyilmaz A, Cetin M, Sevik H, Isinkaralar K, Saleh EAA. Variation of heavy metal accumulation in certain landscaping plants due to traffic density. *Environment, Development and Sustainability*. 2020;22:2385-98.
65. Turkyilmaz A, Sevik H, Cetin M, Ahmaida Saleh EA. Changes in Heavy Metal accumulation depending on traffic density in some landscape plants. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2018;27(5).
66. Wang H, Nie L, Xu Y, Li M, Lv Y. Traffic-emitted metal status and uptake by *Carex meyeriana* Kunth and *Thelypteris palustris* var. pubescens Fernald growing in roadside turfy swamp in the Changbai Mountain area, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:18498-509.
67. Jiang W, Meng L, Liu F, Sheng Y, Chen S, Yang J, et al. Distribution, source investigation, and risk assessment of topsoil heavy metals in areas with intensive anthropogenic activities using the

- positive matrix factorization (PMF) model coupled with self-organizing map (SOM). *Environmental Geochemistry and Health*. 2023;1-18.
68. Mahmoud N, Al-Shahwani D, Al-Thani H, Isaifan RJ. Risk assessment of the impact of heavy metals in urban traffic dust on human health. *Atmosphere*. 2023;14(6):1049.
69. Men C, Liu R, Wang Q, Miao Y, Wang Y, Jiao L, et al. Spatial-temporal characteristics, source-specific variation and uncertainty analysis of health risks associated with heavy metals in road dust in Beijing, China. *Environmental Pollution*. 2021;278:116866.
70. Ziyae A, Hirmas DR, Karimi A, Kehl M, Macpherson G, Lakzian A, et al. Geogenic and anthropogenic sources of potentially toxic elements in airborne dust in northeastern Iran. *Aeolian Research*. 2019;41:100540.
71. Jankowski K, Ciepiela A, Jankowska J, Szulc W, Kolczarek R, Sosnowski J, et al. Content of lead and cadmium in aboveground plant organs of grasses growing on the areas adjacent to a route of big traffic. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015;22:978-87.
72. Zhai Y, Dai Q, Jiang K, Zhu Y, Xu B, Peng C, et al. Traffic-related heavy metals uptake by wild plants grow along two main highways in Hunan Province, China: effects of soil factors, accumulation ability, and biological indication potential. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:13368-77.
73. Zhuang P, Yang QW, Wang H, Shu W. Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2007;184:235-42.
74. Liu Y, Zhao X, Liu R, Zhou J, Jiang Z. Biomonitoring and phytoremediation potential of the leaves, bark, and branch bark of street trees for heavy metal pollution in urban areas. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022;194(5):344.
75. Solgi E, Keramaty M, Solgi M. Biomonitoring of airborne Cu, Pb, and Zn in an urban area employing a broad leaved and a conifer tree species. *Journal of Geochemical Exploration*. 2020;208:106400.
76. Habibi S, Behrouzi M, Nohegar A. Measurement and evaluation of heavy metal pollution accumulation in soil and three tree species (*Azadirachta indica*, *Conocarpus Eerctus L.* and *Prosopis juliflora*) in Bandar Abbas. *Environmental Science* 2022:https://doi.org/10.48308/envs.2021.36989 (In Persian).
77. Rafati M, Mohammadi Roozbahani M, Pirmoradi Z. Bioaccumulation of some heavy metals by the soil and leaves of *Ziziphus spina-christi* in Khuzestan Oxin Steel Company. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*. 2020;17(2):173-84 (In Persian).
78. Dzierżanowski K, Popek R, Gawrońska H, Sæbø A, Gawroński SW. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. *International Journal of Phytoremediation*. 2011;13(10):1037-46.
79. Mori J, Sæbø A, Hanslin HM, Teani A, Ferrini F, Fini A, et al. Deposition of traffic-related air pollutants on leaves of six evergreen shrub species during a Mediterranean summer season. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2015;14(2):264-73.
80. Simon E, Baranyai E, Braun M, Cserhádi C, Fábíán I, Tóthmérész B. Elemental concentrations in deposited dust on leaves along an urbanization gradient. *Science of The Total Environment*.

2014;490:514-20.

81. Tan X-Y, Liu L, Wu D-Y. Relationship between leaf dust retention capacity and leaf microstructure of six common tree species for campus greening. *International Journal of Phytoremediation*. 2022;24(11):1213-21.
82. Thao N, Yu X, Zhang H. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in epicuticular waxes of urban forest species in summer and fall in Beijing, China. *International Journal of Sciences*. 2014;3.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



Evaluation of the capability of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus eldarica* for bioremediation of heavy metals (Pb, Cr and Ni) in urban areas of Hamedan, west of Iran

Alireza Zand Abbas Abadi, Mehrdad Cheraghi*, Soheil Sobhanardakani, Bahareh Lorestani, Maryam Kiani Sadr

Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 26 August 2023
Revised: 27 September 2023
Accepted: 02 October 2023
Published: 05 March 2024

Keywords: Metal pollution, Pollution indices, Bioremediation, *R. pseudoacacia*, *P. eldarica*

ABSTRACT

Background and Objective: Monitoring of pollutants in urban ecosystems is of particular importance. Therefore, this study was conducted to evaluate the capability of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus eldarica* for biomonitoring of Pb, Cr and Ni in urban areas of Hamedan in 2023.

Materials and Methods: A total of 36 soils and 72 plant samples were collected from 12 sites. The contents of elements were determined using ICP-OES. Also, the values of PI, PLI, BAF, and CR indices were computed.

Results: The highest values of Pb, Cr, and Ni (mg/kg) in soil samples with 72.2, 67.5 and 101 values belonged to the commercial, industrial, and commercial sites, respectively. The highest average content of analyzed elements in unwashed and washed leaves/needles for Pb both belonged to the commercial areas; for Cr and Ni, all belonged to the industrial areas. The average values of PI followed the descending order of Cr > Ni > Pb. The average values of PLI varied from 1.22 to 1.34. Moreover, BAF values of Pb, Cr, and Ni of *R. pseudoacacia* leaves and *P. eldarica* needles were found to be in the range of 0.100-1.00. Also, the highest mean values of CR of Pb and Cr were both found in *P. eldarica*; and the highest mean value of CR of Ni was found in *R. pseudoacacia*.

Conclusion: *R. pseudoacacia* and *P. eldarica* could be used as suitable and efficient species for monitoring and remediation of toxic elements from soil and air in polluted ecosystems.

*Corresponding Author:

cheraghi@iauh.ac.ir

Please cite this article as: Zand Abbas Abadi A, Cheraghi M, Sobhanardakani S, Lorestani B, Kiani Sadr M. Evaluation of the capability of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus eldarica* for bioremediation of heavy metals (Pb, Cr and Ni) in urban areas of Hamedan, west of Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2024;16(4):607-28.

