



Evaluating the ability of *Cardaria draba* (L.) Desv. and *Achillea wilhelmsii* C. Koch as biomonitors and bioremediators of potentially toxic elements in the roadside environment

Soheil Sobhanardakani¹ | Nayereh Sadat Hosseini²

1. Corresponding Author, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. E-mail: s_sobhan@iauh.ac.ir

2. Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran. E-mail: ny_hosseini@iauh.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 02 January 2024

Received in revised form 01

February 2024

Accepted 04 February 2024

Published online 22 July 2024

Keywords:

Bioaccumulation factor,

Bioconcentration factor,

Biomonitoring,

Herbaceous species,

Potentially toxic elements.

ABSTRACT

Monitoring and remediation of metal pollutants related to traffic is a suitable way to manage and create a safe ecosystem for living beings. Therefore, the present study was conducted to assess the ability of *cardaria draba* L. Desva and *Achillea wilhelmsii* C. Koch as biomonitors and bioremediators of potentially toxic elements (As, Cd and Cu) in the roadside environment in 2020. In so doing, a total of 63 surface soil samples and 126 plant samples were collected along 700 m from a 9 km section of Goltepeh, Saveh and Kermanshah roads. After acidic digestion of soil and plant samples in the laboratory; the contents of As, Cd and Cu were determined using ICP-OES. Atmospheric capture rate index (CR), bioconcentration factor (BCF), bioaccumulation factor (BAF), transfer factor (TF), comprehensive bio-concentration index (CBCI) and comprehensive and bioaccumulation index (CBAI) were calculated. Also, the SPSS statistics software (IBM) was used to analyze the obtained data. The results showed that the highest mean values of CR for As and Cd in *A. wilhelmsii* were 34.0% and 14.8%, respectively; and the highest mean value of CR for Cu in *C. draba* was 30.9%. On the other hand, *C. draba* had average BAF and TF values greater than 1 for all elements. *A. wilhelmsii* had mean BCF values greater than 1 and TF values less than 1 for As and Cd, and mean BAF and TF values greater than 1 for Cu. The average values of the CBCI and CBAI indices in *C. draba* were 0.501 and 0.527, respectively, and in *A. wilhelmsii* were 0.441 and 0.536, respectively. Based on the average values of CR, BCF, BAF, TF, CBCI, and CBAI of elements it should be argued that *C. draba* and *A. wilhelmsii* could be used as an efficient native species for monitoring and remediation of heavy metals from air and soil in contaminated areas.

Cite this article: Sobhanardakani, S., & Hosseini, N.S. (2024). Evaluating the ability of *Cardaria draba* (L.) Desv. and *Achillea wilhelmsii* C. Koch as biomonitors and bioremediators of potentially toxic elements in the roadside environment. *Journal of Natural Environment*, 77 (Special Issue), 61-76.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.353266.2511>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.353266.2511>

ارزیابی قابلیت گونه‌های ازمک (*Cardaria draba* (L.) Desv.) و بومادران (*Achillea wilhelmsii* C. Koch) به‌عنوان پایش‌گر و پالاینده زیستی عناصر بالقوه سمی در محیط حاشیه جاده

سهیل سبحان اردکانی^۱ | نیره السادات حسینی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: s_sobhan@iauh.ac.ir
۲. گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. رایانامه: ny_hosseini@iauh.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱	
کلیدواژه‌ها: پایش زیستی، عناصر بالقوه سمی، فاکتور تجمع زیستی، فاکتور تغلیظ زیستی، گونه علفی.	پایش و پالایش آلاینده‌های فلزی مرتبط با ترافیک، راهکاری مناسب به‌منظور مدیریت و ایجاد زیست‌بوم امن برای زیست‌مندان است. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی قابلیت گونه‌های گیاهی ازمک (<i>Cardaria draba</i> L. Desva) و بومادران (<i>Achillea wilhelmsii</i> C. Koch) به‌عنوان پایش‌گر و پالاینده زیستی عناصر بالقوه سمی آرسنیک، کادمیم و مس در محیط حاشیه جاده در سال ۱۳۹۸ انجام یافت. به این منظور، در مجموع ۱۲۶ نمونه گیاهی و ۶۳ نمونه خاک سطحی در طول ۷۰۰ متر از یک قطعه ۹ کیلومتری از جاده‌های گلته، ساوه و کرمانشاه واقع در شهرستان همدان جمع‌آوری و پس از آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌های خاک و گیاه در آزمایشگاه، محتوی عناصر در آن‌ها به‌روش طیف‌سنجی نوری پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES) خوانده شده و شاخص نرخ جذب سطحی هواسپهری (CR)، فاکتورهای تغلیظ زیستی (BCF)، تجمع زیستی (BAF)، انتقال (TF) و شاخص‌های جامع تغلیظ زیستی (CBCI) و تجمع زیستی (CBAI) محاسبه شدند. پردازش آماری نتایج نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام یافت. نتایج نشان داد که بیشینه میانگین مقادیر نرخ جذب سطحی عناصر آرسنیک و کادمیم به‌ترتیب با ۳۴/۰٪ و ۱۴/۸٪ مربوط به بومادران و بیشینه مقدار نرخ جذب سطحی عنصر مس با ۳۰/۹٪ مربوط به ازمک بوده است. از طرفی، ازمک دارای میانگین مقادیر BAF و TF بزرگ‌تر از یک برای همه عناصر بود. بومادران دارای میانگین مقادیر BCF و TF بزرگ‌تر و کوچک‌تر از یک به‌ترتیب برای عناصر آرسنیک و کادمیم و میانگین مقادیر BAF و TF بزرگ‌تر از یک برای عنصر مس بود. میانگین مقادیر شاخص‌های CBAI و CBCI در ازمک به‌ترتیب برابر با ۰/۵۰۱ و ۰/۵۲۷ و در بومادران نیز به‌ترتیب برابر با ۰/۴۴۱ و ۰/۵۳۶ بود. با استناد به میانگین مقادیر شاخص نرخ جذب سطحی هواسپهری، فاکتورهای تغلیظ زیستی، تجمع زیستی، انتقال و شاخص‌های جامع تغلیظ زیستی و تجمع زیستی عناصر می‌توان از ازمک و بومادران به‌عنوان گونه‌های بومی کارآمد برای پایش و پالایش فلزات سنگین از هوا و خاک در مناطق آلوده استفاده کرد.

استناد: سبحان اردکانی، سهیل، و حسینی، نیره السادات (۱۴۰۳). ارزیابی قابلیت گونه‌های ازمک (*Cardaria draba* (L.) Desv.) و بومادران (*Achillea wilhelmsii* C. Koch) به‌عنوان پایش‌گر و پالاینده زیستی عناصر بالقوه سمی در محیط حاشیه جاده. *مجله زیست طبیعی*، ۷۷ (ویژه نامه)، ۷۶-۶۱

۶۱

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.353266.2511>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

آلاینده‌های فلزی با منشاء طبیعی و انسانی به‌سبب ماندگاری طولانی در محیط، غیرقابل تجزیه زیستی بودن، تجمع و انباشت زیستی و اثرات سمیت حاد و مزمن، چالش و نگرانی مهم و مشترک محیط‌زیستی، اقتصادی و بهداشت عمومی در سراسر جهان به‌شمار می‌آیند (Sobhan Ardakani et al., 2014; Maisha et al., 2022).

در قرن حاضر، گسترش روزافزون شبکه‌های ارتباطات جاده‌ای به‌عنوان یکی از ارکان اساسی توسعه اقتصادی و اجتماعی هر کشور، حمل و نقل جاده‌ای و فعالیت‌های مرتبط با آن را تبدیل به دومین منبع غیرنقطه‌ای آلودگی فلزات سنگین کرده است (Hosseini and Sobhan Ardakani, 2021; Gorke et al., 2022). آرسنیک، کادمیم و مس از جمله رایج‌ترین آلاینده‌های حاصل از فرآیندهای احتراقی (سوخت خودرو) و غیر احتراقی (نشت روان‌کننده‌ها و سوخت، ذرات حاصل از فرسایش و استهلاک تایر، بدنه خودرو، اجزای موتور، لنت ترمز، کلاج و سطح پوششی جاده) هستند که به‌سبب پراکنش وسیع در محیط حاشیه جاده، به‌لحاظ بوم‌شناختی و زیستی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Obiri-Nyarko et al., 2021; Nag et al., 2022). اگرچه، مس به‌عنوان عنصر ضروری در مقادیر اندک برای بقا و فرآیندهای زیستی جانداران لازم و بی‌خطر است، اما قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بیش‌تر از حد مجاز آن می‌تواند موجب اختلال در عملکرد طبیعی اندام‌ها، بروز بیماری‌ها (ناراحتی‌های گوارشی، قلبی، کلیوی، تغییرات در استخوان‌ها و انواع سرطان‌ها) و حتی مرگ ناشی از مسمومیت شود (Sobhanardakani et al., 2017, 2019). آرسنیک و کادمیم نیز به‌عنوان عناصر غیرضروری که هیچ‌گونه نقش زیستی شناخته‌شده‌ای در فرآیندهای زیستی ندارند، نوروتوکسین‌های قدرتمندی هستند که قرار گرفتن انسان در معرض آن‌ها، حتی در مقادیر بسیار کم، می‌تواند به سرطان، آسیب و اختلال عملکرد قلب، کلیه، طحال و کبد منجر شود (Sobhan Ardakani and Jahangard, 2017; Bi et al., 2018).

انتشارات فلزی حاصل از ترافیک جاده‌ها که تحت تأثیر شرایط محیطی (آب و هوایی از جمله میزان بارندگی و دما)، ترافیک (حجم ترافیک و سرعت وسایل نقلیه) و جاده (طول، عمر، شیب و نوع پوشش سطحی) است، افزایش غلظت و انباشت فلزات سنگین در محیط حاشیه جاده (هواسپهر، آب و خاک) را در پی خواهد داشت (Nikolaeva et al., 2017; Hosseini and Sobhan Ardakani, 2022). در این خصوص، تبادلات محیطی (فرونشست‌های جوی مرطوب و خشک، گردوغبار، انتشار گاز و آبشویی) بین اجزای اصلی سازنده زیست‌سپهر افزون بر توزیع آلاینده‌های فلزی در محیط کنار جاده، منجر به اثرات متقابل آلودگی فلزات سنگین بین هوا، آب و خاک نیز می‌شود (Hosseini et al., 2021). آلودگی فلزی در محیط نه‌تنها می‌تواند کیفیت بوم‌سازگان را کاهش دهد، بلکه به‌طور غیرمستقیم (از طریق زنجیره غذایی) و یا به‌طور مستقیم (از طریق استنشاق، بلع و تماس پوستی) تهدیدی بالقوه برای سلامت زیست‌مندان و انسان محسوب می‌شود. از این‌رو، پایش و پالایش این گروه از آلاینده‌ها به‌منظور مدیریت و ایجاد محیط‌زیست امن برای زیست‌مندان در سال‌های اخیر توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است (Hosseini et al., 2020; Hosseini et al., 2022).

امروزه، از فن‌آوری زیستی به‌دلیل هزینه به‌نسبت اندک، سهولت در اجرا و سازگاری با محیط‌زیست به‌منظور ارزیابی آلودگی، شناسایی و از طرفی کاهش عوامل بالقوه مخاطره‌آمیز محیط‌زیستی استفاده می‌شود (Abbaszadeh et al., 2019; Chen et al., 2022). در این راستا، گیاهان به‌سبب سهولت شناسایی گونه‌ها، نمونه‌برداری آسان، حضور فراگیر و ثابت در بیش‌تر محیط‌ها به‌عنوان مناسب‌ترین ابزار زیستی برای تخمین و کاهش مقدار آلاینده‌های فلزی، معرفی شده‌اند (Hosseini et al., 2022). با این حال، گونه‌های بومی و علفی که قابلیت تطابق در شرایط محیطی آلوده و توانایی جذب و انباشت فلزات سنگین را داشته باشند، گزینه‌های مناسب برای پایش و پالایش زیستی آلاینده‌های فلزی محسوب می‌شوند (Mohebian et al., 2022).

بومادران (*Achillea wilhelmsii* C. Koch) از خانواده کاسنی (Asteraceae) بومی آسیا، اروپا و شمال آمریکا و از مک (*Cardaria draba* L. Desv) از خانواده شب‌بویان (Brassicaceae) بومی غرب آسیا و جنوب شرق اروپا از جمله پوشش‌های علفی رایج در مناطق حاشیه جاده‌ها، به‌سبب سازگاری با شرایط مختلف محیطی، رشد سریع، زیست‌توده به‌نسبت زیاد و پراکنش گسترده در زیست‌بوم‌های مختلف طبیعی (مراتع و باغ‌ها)، نیمه‌طبیعی (زمین‌های کشاورزی) و مصنوعی (مناطق صنعتی و شهری)، می‌تواند به‌عنوان نشانگرهای زیستی مناسب در نظر گرفته شوند (Hosseini et al., 2020).

علی‌رغم آنکه تاکنون مطالعات متعددی در رابطه با پایش و پالایش زیستی فلزات سنگین در محیط‌های حاشیة جاده توسط گیاهان انجام یافته و برخی از گیاهان کنار جاده از جمله بارهنگ (*Plantago major* L.) (Galal and Shehata, 2015)، علف‌باغ (*Dactylis glomerata*) و یولافک (*Arrhenatherum elatius*) (Jankowski et al., 2019)، نوک لک‌لکی (*Erodium glaucophyllum* L.) (Jeddi and Chaieb, 2018)، کرچک (*Ricinus communis*) و تاتوره (*Datura alba*) (Khalid et al., 2019)، استبرق (*Calotropis procera* L.) و ترشک (*Rumex dentatus* L.) (Anwar et al., 2020)، برگ بیدی عنابی (*Tradescantia pallida*) (Campos et al., 2020)، کاج استرالیایی (*Casuarina equisetifolia*) و سرو لوسیتانی (*Cupressus lusitanica*) (Salazar-Rojas et al., 2023) به‌عنوان پایش‌گر و پالاینده بالقوه عناصر فلزی مرتبط با ترافیک معرفی شده‌اند، اما مشکل آلاینده‌های فلزی مرتبط با ترافیک جاده‌ای همچنان پابرجا و قابل ارزیابی است (Jankowski et al., 2019). افزون بر این، نظر به مطالعات بسیار محدود در خصوص قابلیت پایش و پالایش زیستی فلزات سنگین توسط گونه‌های علفی در حال رشد در امتداد جاده‌های اصلی ایران از یک‌سو و از طرفی، گسترش فزاینده زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل جاده‌ای و وجود راه‌های ارتباطی مهم در کلان‌شهر همدان به‌عنوان نقطه تأکیدگاهی ثقل ارتباطات جاده‌ای غرب کشور (Hosseini and Sobhan Ardakani, 2022)، این پژوهش با هدف ارزیابی قابلیت از مک (*Cardaria draba*) و بومادران (*Achillea wilhelmsii*) به‌عنوان نشانگرهای زیستی عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در محیط حاشیة جاده در سال ۱۳۹۸ انجام یافت.

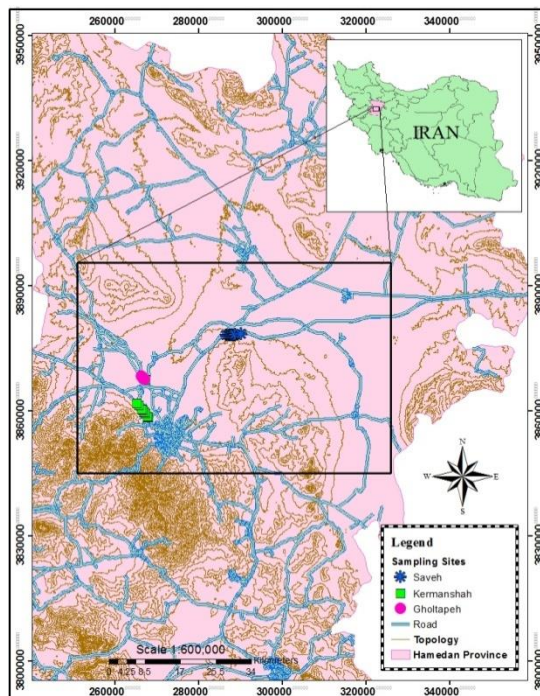
روش‌شناسی پژوهش

معرفی منطقه مورد مطالعه: در این پژوهش، نمونه‌برداری از سه جاده همدان-گلپتیه، همدان-ساوه و همدان-کرمانشاه به‌ترتیب با میانگین ترافیک روزانه ۲۴۱۷، ۱۱۳۲۶ و ۱۴۷۹۷ وسیله نقلیه انجام شد. مناطق مورد مطالعه دارای آب و هوای سرد نیم خشک، میانگین بارندگی سالانه ۳۳۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۱ درجه سلسیوس هستند (Hosseini et al., 2022). موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری توسط دستگاه GPS گارمین مدل ETRE 32X ثبت شد که موقعیت استقرار آن‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.

نمونه‌برداری از خاک و گیاه: در این پژوهش توصیفی-مقطعی، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به منابع مالی در اختیار، دو گونه علفی شامل از مک و بومادران به‌سبب فراوانی (گونه غالب) و پراکنش گسترده در مناطق مورد مطالعه انتخاب شدند. به‌منظور ایجاد شرایط یکنواخت و کاهش عوامل مداخله‌گر احتمالی، در همه ایستگاه‌ها، نمونه‌برداری (خاک و گیاه) در روز آفتابی و پس از ۱۳ روز بارندگی در طول ۷۰۰ متر از یک قطعه ۹ کیلومتری هر جاده با ویژگی‌های مشابه (مانند میانگین سرعت وسیله نقلیه و پوشش جاده)، در فواصل ۱۰۰ متر از یکدیگر و از هر دو طرف حاشیة جاده (۲-۰ متر از لبه جاده) با سه تکرار به‌روش تصادفی در اواخر خردادماه ۱۳۹۸ انجام شد. به‌منظور تهیه نمونه همگن از ریشه و شاخسار گیاهان در هر جاده، از هر گونه ۲۰ پایه (با شرایط مشابه رویشی و سلامتی) از هر فاصله برداشت و به‌تفکیک گونه با یکدیگر مخلوط و نمونه‌ها به پاکت‌های کاغذی با برچسب معین منتقل شدند (Zhai et al., 2016; Wang et al., 2018; Hosseini et al., 2022). از هر ایستگاه ۵۰۰ گرم نمونه خاک سطحی (عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر) با استفاده از بیلچه باغبانی برداشت و برای تهیه یک نمونه همگن، نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده هر منطقه با یکدیگر مخلوط و به کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌دار منتقل شدند (Sabet Aghlidi et al., 2020). بدین‌صورت که با لحاظ کردن فرمول تعیین حجم نمونه کوکران، در مجموع ۱۲۶ نمونه گیاهی و ۶۳ نمونه خاک سطحی جمع‌آوری شدند.

آماده‌سازی نمونه‌های گیاهی و خاک و تعیین محتوی عناصر در آن‌ها: در آزمایشگاه، پس از جدا کردن شاخسارها (اندام‌های هوایی) و ریشه‌ها (اندام‌های زیرزمینی)، نمونه‌های شاخسار به دو گروه تقسیم شدند. نمونه‌های ریشه و یک گروه از شاخسارها به‌منظور زدودن و حذف آلاینده‌های سطحی، ابتدا با آب شرب و سپس با آب دوبار تقطیر شسته شدند. در گروه دیگر فرآیند شستشوی شاخسارها انجام نشد. نمونه‌های گیاهی تا زمان خشک شدن کامل (در حدود ۴۸ ساعت) در آون با دمای ۶۰

درجه سلسیوس قرار داده شدند. در نهایت، پس از پودر کردن نمونه‌های خشک گیاهی با آسیاب برقی و انتقال آن‌ها به کیسه‌های پلی‌اتیلنی، نمونه‌ها در دمای چهار درجه سلسیوس نگهداری شدند (Zhai et al., 2016; Hosseini et al., 2022). نمونه‌های خاک نیز در آزمایشگاه ابتدا هوا خشک شده و سپس به منظور حذف ذرات بزرگ و بقایای آلی از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند (Sobhanardakani et al., 2018).



شکل ۱- موقعیت استقرار مکان‌های نمونه‌برداری

به منظور عصاره‌گیری از نمونه‌های گیاهی، یک گرم از هر نمونه گیاهی پودر شده (شاخسار و ریشه) را به طور مجزا به بشر ۱۵۰ میلی‌لیتری منتقل کرده و پس از افزودن پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرک به هر بشر، محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه روی هیتر با دمای ۹۵ درجه سلسیوس رفلاکس شد. پس از تغییر رنگ و سرد شدن محلول‌ها، در دو مرحله متوالی هر بار پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرک را به نمونه‌ها افزوده و محلول حاصل روی هیتر با دمای ۹۵ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه مجدداً رفلاکس شد. پس از آن، با افزودن دو میلی‌لیتر آب مقطر و سه میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰٪ سیگما-آلدریچ به محلول، آن‌را به مدت دو تا پنج دقیقه روی هیتر با دمای ۷۵ درجه سلسیوس حرارت دادیم. در مرحله بعد، پس از خنک شدن محلول‌ها به هر یک از آن‌ها ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک غلیظ مرک اضافه شد و بعد از ۱۵ دقیقه رفلاکس، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و با آب دوبار تقطیر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد (Khalid et al., 2018).

از سوی دیگر، به منظور تعیین محتوی کل فلزات سنگین در نمونه‌های خاک، به یک گرم از هر نمونه خاک، پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرک افزوده و پس از آن، محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه بر روی هیتر با دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. نمونه‌ها پس از تغییر رنگ از روی هیتر برداشته و سرد شدند. در گام بعد، طی دو مرحله متوالی هر بار پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرک را به نمونه‌ها افزوده و محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه مجدداً رفلاکس و روی هیتر با دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. پس از آن، دو میلی‌لیتر آب مقطر و سه میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰٪ مرک به محلول افزوده و محتویات به مدت دو تا پنج دقیقه روی هیتر با دمای ۷۵ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. پس از خنک شدن نمونه‌ها، به هر یک از آن‌ها ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک غلیظ مرک افزوده شد و بعد از ۱۵ دقیقه رفلاکس، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و محلول‌ها با آب دوبار تقطیر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شدند (Sobhanardakani, 2018). از طرفی، برای تعیین جزء قابل دسترس فلزات (بخش قابل جذب فلزات سنگین) در نمونه‌های خاک، از عصاره‌گیر DTPA (دی اتیلن تری آمین پنتا استیک اسید ۰/۰۰۵ مول در لیتر و کلرورکلسیم ۰/۰۱ مول در لیتر و تری اتانول آمین ۰/۱ مول در لیتر) استفاده شد. سپس، ۱۰ گرم از هر نمونه خاک را به طور مجزا به ارلن ۱۵۰ میلی‌لیتری منتقل کرده و پس از افزودن ۲۰ میلی‌لیتر از

محلول استخراج DTPA به هر ارلن، درب آن‌ها بسته و به مدت دو ساعت با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه، روی همزن مکانیکی دورانی قرار داده شدند. در مرحله بعد، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف شد (Lindsay and Norvell, 1978; Randelović et al., 2018).

در نهایت، پس از ساخت محلول مادر (استوک) و استاندارد نمک عناصر و کالیبره کردن دستگاه نشر اتمی Varian مدل ES-۷۱۰، محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در نمونه‌های مورد مطالعه اعم از گیاه و خاک به ترتیب در طول موج‌های ۱۸۸/۹۸۰، ۲۲۶/۵۰۲ و ۳۲۴/۷۵۴ نانومتر و در سه تکرار خوانده شدند. مقادیر حد تشخیص برای عناصر آرسنیک، کادمیم و مس به ترتیب برابر با ۰/۰۳۳، ۰/۰۲۳ و ۰/۲۳۲ و مقادیر محدودیت کمی نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۹۷، ۰/۰۷۳ و ۰/۶۹۳ به دست آمد. نتایج حاصل از درصد بازیابی عناصر (بین ۹۵-۱۰۶٪ برای نمونه‌های گیاهی و بین ۹۴-۱۰۱٪ برای نمونه‌های خاک) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای تعیین محتوی عناصر مورد مطالعه از اطمینان و دقت کافی برخوردار بوده است.

محاسبه شاخص‌ها

شاخص نرخ جذب سطحی هواسپهری (CR): به منظور تعیین و برآورد سطح آلاینده‌های فلزی حاصل از فرونشست‌های هواسپهری، نرخ جذب سطحی هواسپهری (CR٪) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Liang et al., 2017):

$$CR (\%) = \frac{X_{unwashed\ shoot} - X_{washed\ shoot}}{X_{unwashed\ shoot}} \times 100$$

در رابطه ۱:

$X_{unwashed\ shoot}$ و $X_{washed\ shoot}$ به ترتیب نشان‌دهنده محتوی عنصر در نمونه‌های شاخسار شسته نشده و شسته شده بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند.

فاکتورهای تغلیظ‌زیستی (BCF)، تجمع‌زیستی (BAF) و انتقال (TF): در این پژوهش، شاخص‌های تغلیظ‌زیستی (BCF)، تجمع‌زیستی (BAF) و فاکتور انتقال (TF) به منظور ارزیابی قابلیت گیاهان مورد بررسی در پایش و پالایش عناصر به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۲ تا ۴ محاسبه شدند (Wang et al., 2018; Aghelan et al., 2021; Hosseini et al., 2022):

رابطه ۲

$$BCF = \frac{C_{root}}{C_{soil}}$$

در رابطه ۲:

C_{soil} و C_{root} به ترتیب نشان‌دهنده محتوی عنصر در ریشه گیاه و خاک بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند.

رابطه ۳

$$BAF = \frac{C_{shoot}}{C_{soil}}$$

در رابطه ۳:

C_{soil} و C_{shoot} به ترتیب بیان‌گر محتوی عنصر در شاخسار گیاه (اندام هوایی) و خاک بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند.

رابطه ۴

$$TF = \frac{C_{shoot}}{C_{root}}$$

در رابطه ۴:

C_{shoot} : نشان‌دهنده محتوی عنصر در شاخسار و C_{root} : نیز بیان‌گر محتوی عنصر در ریشه گیاه بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند.

شاخص‌های جامع تغلیظ‌زیستی (CBCI) و تجمع‌زیستی (CBAI): به منظور ارزیابی توانایی گیاه در تغلیظ و تجمع زیستی همزمان عناصر گوناگون شاخص جامع تغلیظ‌زیستی (CBCI) و تجمع‌زیستی (CBAI) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۵ تا ۷ محاسبه شدند (Haghnazar et al., 2021; Al-Sayaydeh et al., 2022):

رابطه ۵

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

رابطه ۶

$$CBAI = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N \mu_i$$

رابطه ۷

$$\mu = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

در روابط ۵ تا ۷: N: نشان‌دهنده تعداد کل عناصر مورد مطالعه، X ، X_{\min} و X_{\max} نیز به ترتیب بیانگر مقدار BCF یا BAF هر یک از عناصر مورد ارزیابی (به طور مجزا)، کمینه مقدار BCF یا BAF هر یک از عناصر و بیشینه مقدار BCF یا BAF هر یک از عناصر برای هر گونه مورد مطالعه هستند (Haghnazar et al., 2021; Al-Sayaydeh et al., 2022). لازم به ذکر است که X می‌تواند برابر با X_{\min} یا X_{\max} و یا در دامنه X_{\min} تا X_{\max} باشد؛ از این رو، مقدار عددی X در دامنه ۰ تا ۱ خواهد بود.

پردازش آماری داده‌ها: پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۱۹ نرم‌افزار آماری SPSS انجام یافت. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس‌ها به ترتیب از آزمون‌های کلموگروف-اسمیرنوف و لون، به منظور مقایسه میانگین غلظت عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های گیاه و خاک بین مکان‌های نمونه‌برداری از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه و به دنبال آن آزمون تعقیبی دانکن در سطح معنی‌داری ۵٪ استفاده شد. برای شناسایی رابطه بین عناصر در نمونه‌های خاک و گیاه و منابع بالقوه احتمالی فلزات در گیاه از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

آمار توصیفی مربوط به تعیین مقادیر عناصر در نمونه‌های خاک: آمار توصیفی مربوط به محتوی عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های خاک کنار جاده‌ای به تفکیک محل نمونه‌برداری در جدول ۱ ارائه شده است. بر این اساس، بیشینه میانگین محتوی عنصر آرسنیک کل و جزء قابل دسترس گیاه به ترتیب با ۳/۷۲ و ۰/۰۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به محل نمونه‌برداری ساوه بود. همچنین، بیشینه میانگین محتوی کادمیم کل و جزء قابل دسترس گیاه به ترتیب با ۰/۲۹۰ و ۰/۰۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و مس کل و جزء قابل دسترس گیاه به ترتیب با ۲۵/۰ و ۳/۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه بودند. از طرفی، میانگین محتوی عناصر در نمونه‌ها از روند نزولی مس < آرسنیک < کادمیم تبعیت کرد.

جدول ۱- آمار توصیفی محتوی عناصر (کل و جزء قابل دسترس گیاه) مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی کنار جاده

ایستگاه	آرسنیک		کادمیم		مس	
	کل	جزء قابل دسترس گیاه	کل	جزء قابل دسترس گیاه	کل	جزء قابل دسترس گیاه
گلپتیه	۱/۶۷±۰/۱۴ ^a	۰/۰۳±۰/۰۱ ^a	۰/۱۸±۰/۰۱ ^b	۰/۰۱±۰/۰۰ ^a	۱۲/۸±۰/۴۷ ^b	۰/۸۶±۰/۰۳ ^b
ساوه	۳/۷۲±۰/۴۴ ^b	۰/۰۸±۰/۰۳ ^b	۰/۱۶±۰/۰۱ ^a	۰/۰۱±۰/۰۰ ^a	۸/۶±۰/۱۹ ^a	۰/۳۸±۰/۰۳ ^a
کرمانشاه	۳/۳۹±۰/۱۸ ^b	۰/۰۵±۰/۰۱ ^a	۰/۲۹±۰/۰۱ ^c	۰/۰۲±۰/۰۰ ^a	۲۵/۰±۰/۵۳ ^c	۳/۴۰±۰/۳۹ ^c
میانگین	۲/۹۳±۰/۹۹	۰/۰۵±۰/۰۱	۰/۲۱±۰/۰۱	۰/۰۱±۰/۰۰	۱۵/۵±۰/۴۰	۱/۵۵±۰/۱۵

حروف غیر مشترک (a, b, c و ...) در هر ستون، بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($P < 0.05$) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در نمونه‌های خاک براساس نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه و چند دامنه‌ای دانکن است.

آمار توصیفی مربوط به تعیین مقادیر فلزات سنگین در نمونه‌های گیاهی: آمار توصیفی مربوط به سنجش محتوی عناصر در نمونه‌های گیاهی به تفکیک محل نمونه‌برداری در جدول ۲ ارائه شده است. با استناد به نتایج، بیشینه غلظت آرسنیک و کادمیم

به‌ترتیب با ۲/۷۴ و ۰/۳۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در شاخسارهای شسته نشده از مک جمع‌آوری شده از ایستگاه کرمانشاه و ساوه تجمع یافته بود. از سوی دیگر، بیشینه غلظت تجمع‌یافته مس با ۶/۴۷ میلی‌گرم در کیلوگرم به شاخسارهای شسته نشده بومادران جمع‌آوری شده از ایستگاه کرمانشاه تعلق داشت.

نتایج آزمون تحلیل واریانس یکطرفه بیانگر آن بود که محتوی عناصر کادمیم و مس در اندام‌های مختلف گیاهی به‌طور قابل توجه تحت تأثیر حجم ترافیک بوده است (میانگین تجمعی اندام‌های مشابه از دو گونه). براساس نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها (دانکن)، بیشینه میانگین محتوی عنصر آرسنیک در نمونه‌های شاخسار شسته نشده و شسته شده به‌ترتیب با ۲/۷۰ و ۲/۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه ساوه بودند. همچنین، بیشینه میانگین محتوی عنصر کادمیم در نمونه‌های شاخسار شسته نشده و شسته شده به‌ترتیب با ۰/۲۵ و ۰/۲۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به ایستگاه ساوه و در نمونه‌های ریشه با ۰/۱۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به ایستگاه کرمانشاه بودند. از سوی دیگر، بیشینه میانگین محتوی عنصر مس در نمونه‌های شاخسار شسته نشده، شسته شده و ریشه به‌ترتیب با ۵/۲۶، ۴/۴۲ و ۴/۲۹ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه کرمانشاه بودند.

نتایج نشان داد که میانگین تجمعی محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم و مس مربوط به سه محل نمونه‌برداری بین بافت‌های مختلف گونه‌های گیاهی متفاوت بود (میانگین تجمعی از سه ایستگاه). بدین‌صورت که بیشینه میانگین محتوی تجمع‌یافته عناصر آرسنیک و مس به‌ترتیب با ۲/۰۹ و ۴/۹۸ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به شاخسارهای شسته نشده بومادران بود. افزون بر این، بیشینه میانگین محتوی عنصر کادمیم با ۰/۲۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به شاخسارهای شسته نشده از مک بود.

جدول ۲- آمار توصیفی محتوی عناصر مورد ارزیابی در اندام‌های مختلف گونه‌های از مک و بومادران به تفکیک مکان نمونه‌برداری

ایستگاه	گونه	بافت	آرسنیک	کادمیم	مس
		شاخسار شسته نشده	۱/۶۴±۰/۲۰ Aa	۰/۱۶۰±۰/۰۱ Aa	۲/۸۷±۰/۰۳ Bb
	از مک	شاخسار شسته شده	۱/۳۹±۰/۴۳ Aa	۰/۱۴۰±۰/۰۳ Aa	۱/۹۹±۰/۰۷ Ba
	گلته	ریشه	۱/۱۲±۰/۳۸ Aa	۰/۱۴۰±۰/۰۴ Aa	۱/۸۷±۰/۰۳ Aa
		شاخسار شسته نشده	۱/۵۶±۰/۹۷ Aa	۰/۱۶۰±۰/۰۱ Aa	۴/۵۱±۰/۱۰ Be
	بومادران	شاخسار شسته شده	۱/۳۸±۰/۷۸ Aa	۰/۱۴۰±۰/۰۱ Aa	۴/۰۱±۰/۲۶ Bd
		ریشه	۱/۸۱±۰/۶۲ Aa	۰/۱۳۰±۰/۰۱ Aa	۳/۴۳±۰/۱۹ Ac
		شاخسار شسته نشده	۱/۸۴±۰/۲۱ ABab	۰/۳۱۰±۰/۰۲ Bc	۲/۲۴±۰/۰۵ Ab
	از مک	شاخسار شسته شده	۱/۴۷±۰/۴۴ Aab	۰/۲۵۰±۰/۰۴ Bb	۱/۶۱±۰/۱۸ Aa
	ساوه	ریشه	۱/۵۱±۰/۵۹ Aab	۰/۱۶۰±۰/۰۳ Aa	۱/۵۹±۰/۲۲ Aa
		شاخسار شسته نشده	۲/۰۴±۰/۸۱ Ab	۰/۱۸۰±۰/۰۱ Aa	۳/۹۶±۰/۲۲ Ae
	بومادران	شاخسار شسته شده	۰/۹۳±۰/۶۹ Aa	۰/۱۶۰±۰/۰۱ ABa	۲/۹۴±۰/۰۹ Ac
		ریشه	۲/۰۰±۰/۱۶ Ab	۰/۱۷۰±۰/۰۲ ABa	۳/۳۹±۰/۰۳ Ad
		شاخسار شسته نشده	۲/۷۴±۰/۷۶ Ba	۰/۱۸۰±۰/۰۲ Aab	۴/۰۴±۰/۱۸ Cb
	از مک	شاخسار شسته شده	۲/۳۱±۰/۵۸ Aa	۰/۱۶۰±۰/۰۱ Aa	۲/۶۷±۰/۱۳ Ca
		ریشه	۱/۲۳±۰/۳۰ Aa	۰/۱۴۰±۰/۱۱ Aa	۲/۴۶±۰/۰۲ Ba
	کرمانشاه	شاخسار شسته نشده	۲/۶۶±۰/۲۹ Aa	۰/۲۴۰±۰/۰۲ Bc	۶/۴۷±۰/۲۵ Cc
	بومادران	شاخسار شسته شده	۱/۷۰±۱/۰۳ ^{Aa}	۰/۱۹۰±۰/۰۳ Bab	۶/۱۶±۰/۲۰ Cc
		ریشه	۱/۹۳±۱/۵۴ Aa	۰/۲۳۰±۰/۰۵ Bbc	۶/۱۲±۰/۲۳ Bc
	گلته	شاخسار شسته نشده	۱/۶۰±۰/۵۹ ^a	۰/۱۶۰±۰/۰۱ ^a	۳/۶۹±۰/۰۷ ^b
	ساوه		۱/۹۴±۰/۵۱ ^a	۰/۲۵۰±۰/۰۲ ^a	۳/۱۰±۰/۱۴ ^a
	کرمانشاه		۲/۷۰±۰/۵۳ ^a	۰/۲۱۰±۰/۰۲ ^b	۵/۲۶±۰/۲۳ ^c
	گلته	شاخسار شسته شده	۱/۳۹±۰/۶۱ ^a	۰/۱۴۰±۰/۰۳ ^a	۲/۸۱±۰/۲۳ ^a
	ساوه		۱/۲۰±۰/۵۷ ^a	۰/۲۱۰±۰/۰۳ ^b	۲/۲۸±۰/۱۴ ^a
	کرمانشاه		۲/۰۱±۰/۸۱ ^a	۰/۱۸۰±۰/۰۲ ^b	۴/۴۲±۰/۱۷ ^b

۲/۶۵±۰/۱۱ ^b	۰/۱۵۰±۰/۰۲ ^a	۱/۴۷±۰/۵۰ ^a	ریشه	میانگین دو گونه	گلته
۱/۵۶±۰/۱۳ ^a	۰/۱۷۰±۰/۰۳ ^a	۱/۷۶±۰/۳۸ ^a			ساوه
۴/۲۹±۰/۱۳ ^c	۰/۱۹۰±۰/۰۸ ^a	۱/۵۸±۰/۹۲ ^a			کرمانشاه
مس	کادمیم	آرسنیک	یافت	گونه	ایستگاه
۳/۰۵±۰/۰۹ ^B	۰/۲۲۰±۰/۰۲ ^D	۲/۰۷±۰/۳۹ ^B	شاخسار شسته نشده	ازمک	میانگین سه ایستگاه
۲/۰۹±۰/۱۳ ^A	۰/۱۸۰±۰/۰۳ ^{BC}	۱/۷۲±۰/۴۸ ^{AB}	شاخسار شسته شده		
۱/۹۸±۰/۰۹ ^A	۰/۱۵۰±۰/۰۶ ^A	۱/۲۹±۰/۴۲ ^A	ریشه		
۴/۹۸±۰/۱۹ ^D	۰/۱۹۰±۰/۰۱ ^C	۲/۰۹±۰/۶۹ ^B	شاخسار شسته نشده	بومادران	
۴/۳۷±۰/۱۸ ^C	۰/۱۷۰±۰/۰۲ ^{AB}	۱/۳۴±۰/۷۲ ^A	شاخسار شسته شده		
۴/۳۲±۰/۱۵ ^C	۰/۱۸۰±۰/۰۳ ^{BC}	۱/۹۱±۰/۷۷ ^{AB}	ریشه		

مقادیر مشخص شده با حروف کوچک غیر مشترک (a, b, c و ...) در هر ستون، بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($P < 0.05$) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در نمونه اندام‌های مختلف گیاهی هر دو گونه در مکان‌های مشابه (دسته‌بندی ایستگاه‌ها) و مقادیر مشخص شده با حروف بزرگ غیر مشترک (A, B, C و ...) در هر ستون، بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($P < 0.05$) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در نمونه اندام‌های مشابه گیاهی هر گونه در مکان‌های مختلف (دسته‌بندی بافت‌ها) براساس نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه و چند دامنه‌ای دانکن است.

ارزیابی رابطه محتوی عناصر بین اندام‌های گیاهی و خاک: نتایج ارزیابی رابطه محتوی عناصر بین اندام‌های گیاهی و خاک نشان داد که رابطه بین محتوی کادمیم کل خاک با شاخسارهای شسته شده از مک با ضریب همبستگی (r) برابر با ۰/۷۰۲ در سطح معنی‌داری برابر با ۰/۰۱، مثبت (مستقیم) و معنی‌دار بود. همچنین، رابطه بین محتوی کادمیم ریشه با شاخسار شسته شده بومادران با r برابر با ۰/۹۷۲ و غلظت مس شاخسارهای شسته شده با ریشه هر دو گونه از مک و بومادران با r به ترتیب برابر با ۰/۹۳۷ و ۰/۷۲۲ همگی در سطح معنی‌داری برابر با ۰/۰۱، مثبت و معنی‌دار بود.

نتایج محاسبه شاخص نرخ جذب سطحی هواسپهری (CR): نتایج محاسبه شاخص نرخ جذب سطحی هواسپهری در نمونه‌های گیاهی در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که مقادیر CR عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در گونه از مک به ترتیب در دامنه ۲۰/۱٪-۱۵/۲٪، ۱۱/۱-۱۹/۴٪ و ۲۸/۱-۳۳/۹٪ و برای گونه بومادران به ترتیب در دامنه ۱۱/۵-۵۴/۴٪، ۱۱/۱-۲۰/۸٪ و ۴/۷۹-۲۵/۸٪ بوده‌اند. از سوی دیگر، بیشینه مقادیر میانگین CR عناصر آرسنیک و کادمیم به ترتیب با ۳۴/۰٪ و ۱۴/۸٪ مربوط به گونه بومادران و بیشینه مقدار میانگین CR عنصر مس با ۳۰/۹٪ به گونه از مک مربوط بود.

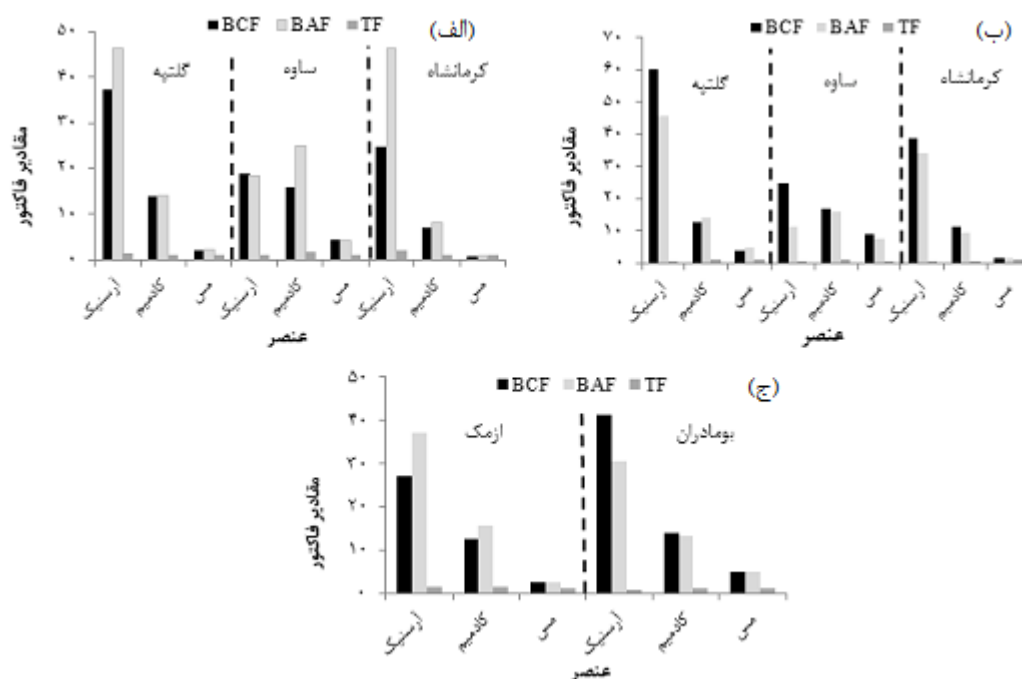
جدول ۳- مقادیر شاخص CR عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در نمونه‌های گیاهی به تفکیک مکان نمونه‌برداری

CR%			گونه	ایستگاه
مس	کادمیم	آرسنیک		
۳۰/۷	۱۲/۵	۱۵/۲	ازمک	گلته
۲۸/۱	۱۹/۴	۲۰/۱		ساوه
۳۳/۹	۱۱/۱	۱۵/۷		کرمانشاه
۱۱/۱	۱۲/۵	۱۱/۵	بومادران	گلته
۲۵/۸	۱۱/۱	۵۴/۴		ساوه
۴/۷۹	۲۰/۸	۳۶/۱		کرمانشاه
۳۰/۹	۱۴/۳	۱۷/۰	ازمک	میانگین
۱۳/۹	۱۴/۸	۳۴/۰	بومادران	

نتایج محاسبه فاکتور تغلیظ‌زیستی (BCF)، تجمع‌زیستی (BAF) و فاکتور انتقال (TF): در این پژوهش، فاکتورهای BCF, BAF و TF براساس مقادیر جزء قابل دسترس زیستی به منظور کاهش عوامل مؤثر احتمالی و ارزیابی دقیق قابلیت پایش و پالایش گونه‌های گیاهی مورد مطالعه، محاسبه شدند (شکل ۲).

براساس نتایج، مقادیر BCF و BAF گونه از مک برای عناصر آرسنیک و کادمیم در همه ایستگاه‌ها و برای عنصر مس در ایستگاه‌های گلته و ساوه بزرگ‌تر از یک بودند (شکل ۲-الف). این در حالی است که مقادیر BCF و BAF بومادران برای همه عناصر در همه مکان‌های نمونه‌برداری بزرگ‌تر از یک بود (شکل ۲-ب). همچنین، از نظر میانگین مقادیر TF، گونه از مک دارای

TF > ۱ برای همه عناصر مورد ارزیابی در همه مکان‌های نمونه‌برداری بود. به علاوه، میانگین مقادیر TF عنصر کادمیم در مکان‌های نمونه‌برداری گلته و ساوه و عنصر مس در مکان‌های نمونه‌برداری گلته و کرمانشاه برای گونه بومادران بزرگ‌تر از ۱ بود. از طرفی، میانگین مقادیر BCF و BAF همه عناصر شاخسارهای شسته شده و ریشه هر دو گونه مورد مطالعه بزرگ‌تر از ۱ بودند (شکل ۲-ج). از نظر میانگین مقادیر TF، گونه ازمک دارای TF > ۱ برای همه عناصر بود. در رابطه با گونه بومادران نیز میانگین مقادیر TF عنصر مس بزرگ‌تر از یک بود.



شکل ۲- (الف) و (ب) به ترتیب میانگین مقادیر فاکتورهای BCF، BAF، TF عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در اندام‌های ازمک و بومادران به تفکیک مکان نمونه‌برداری و (ج) میانگین مقادیر فاکتورهای BCF، BAF، TF عناصر آرسنیک، کادمیم و مس به تفکیک گونه گیاهی مورد مطالعه

نتایج محاسبه شاخص‌های جامع تغلیظ‌زیستی (CBCI) و جامع تجمع زیستی (CBAI): نتایج محاسبه شاخص‌های CBCI و CBAI عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در اندام‌های گیاهی ازمک و بومادران به تفکیک مکان نمونه‌برداری نشان داد که بیشینه میانگین مقدار CBCI با ۰/۵۰۱ مربوط به گونه ازمک و بیشینه میانگین مقدار CBAI با ۰/۵۳۶ مربوط به گونه بومادران بود. از سوی دیگر، مقادیر CBCI برای گونه‌های ازمک و بومادران به ترتیب در دامنه ۰/۷۳۳-۰/۱۰۳ و ۰/۶۶۷-۰/۱۳۰ و مقادیر CBAI به ترتیب در دامنه ۰/۶۶۷-۰/۳۳۳ و ۰/۷۲۳-۰/۲۱۷ بود.

نتایج پردازش آماری داده‌ها: نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف نشان داد که داده‌های مربوط به محتوی همه عناصر در نمونه‌های خاک و اندام‌های گیاهی از توزیع نرمال برخوردار بودند. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نیز نشان داد که بین مکان‌های نمونه‌برداری گلته، ساوه و کرمانشاه از نظر میانگین محتوی عناصر کادمیم (مقادیر عنصر کل) و مس (مقادیر عنصر کل و جزء قابل دسترس) در نمونه‌های خاک اختلاف معنی‌دار آماری ($P < 0.05$) وجود داشته است.

بحث و نتیجه‌گیری

خاک (به‌عنوان منبع و مخزن فلزات سنگین) و گیاه (به‌سبب حضور ثابت در یک منطقه) ابزارهای محیطی مناسب و مفیدی برای سنجش آلودگی ناشی از عناصر بالقوه سمی در بوم‌سازگان به‌شمار می‌آیند (Qin et al., 2020; Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در نمونه‌های خاک (مقادیر کل عنصر به ترتیب برابر با ۳/۷۲، ۰/۲۹۰ و ۲۵/۰ میلی‌گرم در کیلوگرم)، شاخسارهای شسته نشده (میانگین تجمعی از دو

گونه به‌ترتیب برابر با ۲/۷۰، ۰/۲۵۰ و ۵/۲۶ میلی‌گرم در کیلوگرم)، شاخسارهای شسته شده (میانگین تجمعی از دو گونه به‌ترتیب برابر با ۲/۰۱، ۰/۲۱۰ و ۴/۴۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) و ریشه (میانگین تجمعی از دو گونه به‌ترتیب برابر با ۱/۷۶، ۰/۱۹۰ و ۴/۲۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به مکان‌های نمونه‌برداری با حجم زیاد ترافیک (ایستگاه‌های ساوه و کرمانشاه) بودند. این موضوع را می‌توان با حجم زیاد ترافیک و به‌تبع آن نرخ زیاد احتراق سوخت‌های فسیلی و استهلاک قطعات خودروها مرتبط دانست. در مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، Jiang و همکاران (۲۰۱۷)، Khalid و همکاران (۲۰۱۸) و Bernardino و همکاران (۲۰۱۹) نیز با مطالعه زیست‌ردیابی آلودگی فلزات در محیط حاشیه جاده، بیش‌ترین غلظت آلاینده‌های فلزی مرتبط با ترافیک را در نمونه‌های گیاه و خاک برداشت شده از امتداد بزرگراه‌هایی با حجم زیاد ترافیک گزارش کردند و منابع عمده افزایش محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در خاک حاشیه جاده‌ها را با انتشارات ناشی از احتراق بنزین، نشت روان‌کننده‌ها، سایش و خوردگی قطعات خودرو مرتبط دانستند. افزون بر این، نتایج سنجش میانگین محتوی عناصر در نمونه‌های گیاهی نشان داد که بیشینه میانگین محتوی تجمع‌یافته عناصر آرسنیک و مس (به‌ترتیب با ۲/۰۹ و ۴/۹۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به شاخسارهای شسته نشده بومادران و بیشینه میانگین محتوی عنصر کادمیم (۰/۲۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) مربوط به شاخسارهای شسته نشده از مک بود (میانگین تجمعی از سه ایستگاه). در این رابطه، می‌توان بیان کرد که محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در نمونه‌های گیاهی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اندام‌ها و گونه‌های مختلف گیاهی بوده است. Jankowski و همکاران (۲۰۱۵)، Zhang و همکاران (۲۰۱۶) و Wang و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند که گونه‌های مختلف گیاهی بسته به ویژگی‌های وراثتی و ریخت‌شناسی مقادیر متفاوتی از عناصر فلزی را انباشته کرده‌اند. همچنین، Taskila و همکاران (۲۰۱۲) و Shi و همکاران (۲۰۱۷) با ارزیابی تجمع فلزات سنگین مرتبط با ترافیک در خاک و گیاهان حاشیه جاده بیان داشتند که تفاوت در محتوی انباشت عناصر فلزی در اندام‌های مختلف گیاهی ممکن است با راه‌های مختلف جذب فلزات در خاک و گیاهان مرتبط بوده باشد.

انتشارات فلزی مرتبط با ترافیک ممکن است از طریق فرونشست‌های هواسپهری و جذب توسط اندام‌های هوایی (روزنه‌های هوایی) یا از طریق رسوب بر سطح خاک و جذب توسط اندام‌های زیرزمینی (ریشه) در گیاهان حاشیه جاده تجمع یابند (Feng et al., 2020; Hosseini et al., 2011). اگرچه اغلب تشخیص منبع آلاینده (هوا یا خاک) مشکل است، با این حال، در مطالعات مختلف از ضرایب همبستگی به‌منظور تعیین منشأ احتمالی عناصر در گیاهان و ارزیابی گونه‌های گیاهی در بازتاب اثرات تجمعی فلزات سنگین در محیط (هواسپهر و خاک) استفاده شده است. در این خصوص، همبستگی معنی‌دار و مثبت بین عناصر فلزی نمونه‌های خاک (غلظت کل فلز) و اندام‌های گیاهی (نمونه‌های شسته شده) نشان‌دهنده این واقعیت است که تجمع این عناصر در گیاه از طریق ریشه رخ داده است (آلودگی ناشی از خاک)؛ در حالی که روابط مثبت و معنی‌دار بین اندام‌های هوایی و ریشه بیانگر منشأ هواسپهری عناصر است (Jankowski et al., 2015; Liang et al., 2017; Hosseini et al., 2020). نتایج آزمون همبستگی پیرسون بیان‌گر همبستگی مثبت و معنی‌دار بین میانگین غلظت کادمیم خاک با شاخسار شسته شده از مک بود. در این خصوص، می‌توان بیان کرد که تجمع کادمیم در از مک از طریق ریشه رخ داده است. از طرفی، رابطه بین محتوی مس ریشه با شاخسار شسته شده از مک و محتوی کادمیم و مس ریشه با شاخسار شسته شده بومادران مثبت و معنی‌دار بود. بر این اساس، محتوی مس در از مک و کادمیم و مس در بومادران را می‌توان به‌طور عمده با فرونشست‌های هواسپهری و به‌تبع آن جذب توسط روزنه‌های هوایی مرتبط دانست. Zhang و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش کردند که کادمیم در گونه کوزه‌شیپوری ارغوانی (*Sarracenia purpurea*) منشأ غیرخاکی داشته است. همچنین، Malinowska و همکاران (۲۰۱۵) و Wange و همکاران (۲۰۱۵) نیز اذعان داشتند که تجمع عناصر در گیاهان حاشیه جاده به‌طور عمده ناشی از فرونشست‌های هواسپهری مرتبط با ترافیک جاده بوده است. چنین یافته‌هایی نشان می‌دهد که هنگام ارزیابی تجمع عناصر در گیاهانی که در حاشیه جاده‌ها رشد می‌کنند، باید به فرونشست‌های هواسپهری فلزات سنگین بیش‌تر توجه شود. از طرفی، روابط مثبت و معنی‌دار بین میانگین غلظت کادمیم خاک با شاخسار شسته شده از مک، محتوی مس ریشه با شاخسار شسته شده از مک و محتوی کادمیم و مس ریشه با شاخسار شسته شده بومادران نشان‌دهنده آن است که مقادیر زیاد عناصر کادمیم و مس در محیط (خاک یا هواسپهر) می‌تواند به افزایش محتوای این فلزات در گیاهان مورد ارزیابی منجر شده باشد (Eid et al., 2012; Bonanno et al., 2013; Galal

(and Shehata, 2015). از این رو، می‌توان بیان کرد که از مک و بومادران به‌عنوان گونه‌های بومی کارآمد، نشانگر زیستی بالقوه این عناصر محسوب می‌شوند. Jimenez و همکاران (۲۰۱۱) نیز غلظت فلزات سنگین در گیاه را با غلظت فلزات سنگین در محیط مرتبط دانستند.

گیاهان ابزارهای بسیار مؤثری برای فیلتر کردن آلاینده‌های هوا (جذب آلاینده‌ها از طریق روزنه‌های هوایی برگ‌ها)، به‌دام انداختن و نگهداری آن‌ها بر روی سطح اندام‌های هوایی خود (جذب سطحی آلاینده‌های همراه فرونشست‌های هواسپه‌ری) هستند (Liang et al., 2017; Shahid et al., 2017; Chen et al., 2022). در این راستا، شستن برگ‌ها با آب مقطر راهکاری مفید و مناسب برای تمایز بین فلزات ته‌نشین شده روی سطح اندام‌های هوایی و فلزات جذب شده توسط اندام‌های هوایی به‌شمار می‌آید. بنابراین، شاخص نرخ جذب سطحی هواسپه‌ری از جمله ابزارهای مفید و مناسب برای ارزیابی و تعیین سطح آلاینده‌های فلزی حاصل از ته‌نشینی فرونشست‌های هواسپه‌ری است (Liang et al., 2017). نتایج محاسبه CR (جدول ۳) بیان‌گر آن بود که بیشینه میانگین مقادیر شاخص CR عناصر آرسنیک و کادمیم به‌ترتیب با ۳۴/۰٪ و ۱۴/۸٪ مربوط به گونه بومادران و بیشینه میانگین مقدار CR عنصر مس با ۳۰/۹٪ به گونه ازمک مربوط بود. بنابراین، می‌توان اذعان داشت که به‌طور بالقوه، ازمک از توانایی بهتری در جذب سطحی هواسپه‌ری عنصر مس و بومادران از قابلیت بهتری در جذب سطحی هواسپه‌ری عناصر آرسنیک و کادمیم برخوردار هستند. در این خصوص، تفاوت بین میانگین مقادیر جذب سطحی هواسپه‌ری عناصر مورد ارزیابی در گونه‌های ازمک و بومادران را می‌توان با ویژگی‌های ساختار و سطح برگ از قبیل کوتیکول، موم و اپیدرم مرتبط دانست که با نتایج مطالعات Mortazavi و همکاران (۲۰۲۱)، Liu و همکاران (۲۰۲۲) و Tan و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد. از طرفی، Liang و همکاران (۲۰۱۷) نیز با بررسی غلظت فلزات سنگین در برگ ۱۲ گونه گیاهی جمع‌آوری شده از هفت منطقه مختلف شانگهای چین عنوان کردند که براساس نرخ جذب، گونه‌های مختلف از توانایی متفاوتی در جذب سطحی و نگهداری آلاینده‌های فلزی هواسپه‌ری (کادمیم و مس) برخوردار بودند، به‌طوری‌که بیشینه میانگین مقادیر شاخص CR عناصر مس و کادمیم به‌ترتیب با ۹۲/۷٪ و ۴۹/۱٪ مربوط به خرزهره (*Nerium indicum*) و ماگنولیا (*Magnolia grandiflora*) بوده است. گیاه‌پالایی به‌عنوان فناوری سبز و دوست‌دار محیط‌زیست روشی کم‌هزینه به‌منظور برآورد و کاهش آلاینده‌های محیط‌زیستی به‌ویژه فلزات سنگین محسوب می‌شود (Aghelan et al., 2020). از این رو، ارزیابی دقیق پوشش گیاهی موجود در مناطقی که به‌سبب فعالیت‌های انسانی آلوده محسوب می‌شوند، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است و می‌تواند منجر به شناسایی گونه‌های گیاهی مناسب برای پایش و پالایش آلاینده‌های محیطی شود. در این راستا، سه شاخص BCF، BAF و TF به‌عنوان عوامل اصلی تعیین‌کننده توانایی گیاه در جذب و انتقال عناصر از خاک مهم‌ترین ابزارها در ارزیابی قابلیت گیاه‌پالایی محسوب می‌شوند (Galal and Shehata, 2015; Zhang et al., 2016). بدین‌صورت که گونه گیاهی با $BCF > 1$ و $TF < 1$ برای تثبیت گیاهی (phytostabilization) و گونه گیاهی با $BAF > 1$ و $TF > 1$ برای برداشت یا استخراج گیاهی (phytoextraction) مناسب است (Cheraghi et al., 2011; Abbaszadeh et al., 2019; Devi et al., 2019; Hosseini et al., 2022). نتایج این پژوهش نشان داد که گونه ازمک با میانگین مقادیر BAF و TF بزرگ‌تر از یک برای عناصر آرسنیک، کادمیم و مس، گیاهی مناسب برای برداشت این عناصر از خاک محسوب می‌شود. در مورد بومادران نیز میانگین مقادیر BAF و TF برای عنصر مس بزرگ‌تر از یک بود. از طرفی، گونه بومادران دارای میانگین مقادیر $BCF > 1$ و $TF < 1$ برای عناصر آرسنیک و کادمیم بود. بنابراین، بومادران گونه‌ای مناسب برای برداشت فلز مس و تثبیت عناصر آرسنیک و کادمیم در خاک محسوب می‌شود. از تثبیت گیاهی می‌توان برای کاهش تحرک فلزات و به‌تبع آن محدود کردن گسترش آلودگی در خاک استفاده کرد. در این فرآیند از توانایی ریشه‌های گیاه برای کاهش تحرک و روان‌شویی فلز به منابع آب زیرزمینی استفاده می‌شود و در نتیجه فراهمی زیستی فلزات برای ورود به زنجیره غذایی کاهش می‌یابد. یکی از مزایای این فرآیند نسبت به استخراج گیاهی این است که دفع مواد گیاهی که مقادیر متناهی از فلزات در اندام‌های هوایی آن تجمع یافته است، مورد نیاز نیست (Naderi et al., 2013). در مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، Hosseini و همکاران (۲۰۲۰) نیز با بررسی غلظت فلزات سنگین در گیاهان کنار جاده (بومادران و ازمک) و خاک در امتداد برخی از بزرگراه‌های همدان واقع در غرب ایران با استناد به مقادیر محاسبه شده

شاخص‌های BAF، BCF و TF، عنوان کردند که از مک، گونه‌ای مناسب برای برداشت عناصر کبالت و منگنز و تثبیت فلز کروم و بومادران گونه‌ای مناسب برای برداشت فلز منگنز و تثبیت عناصر کبالت و کروم در خاک بوده است. از طرفی، Glišić و همکاران (۲۰۲۱) با استناد به مقادیر شاخص‌های BCF، BAF و TF برای سه گونه علفی (*Matricaria inodora* L.)، گیاهان بابونه (*M. inodora*) و بومادران (*A. millefolium*) را گونه‌هایی مناسب برای تثبیت عنصر روی و برداشت عناصر آهن، منگنز، مس و کروم از خاک معرفی کردند.

اندام‌های مختلف گیاهی (شاخسار و ریشه) قادرند به‌طور همزمان چندین فلز مختلف را در خود انباشته کنند. در این راستا، شاخص‌های CBAI و CBCI از جمله ابزارهای کمی مفید و کارآمد برای ارزیابی قابلیت اندام‌های زمینی (ریشه) و هوایی (شاخسار) در تغلیظ و تجمع همزمان عناصر متعدد از خاک هستند (Haghnazar et al., 2021; Al-Sayaydeh et al., 2022). نتایج محاسبه CBAI و CBCI نشان داد که گونه‌های از مک و بومادران با میانگین مقادیر CBCI به ترتیب برابر با ۰/۵۰۱ و ۰/۴۴۱ و میانگین مقادیر CBAI به ترتیب برابر با ۰/۵۲۷ و ۰/۵۳۶ می‌توانند به‌عنوان گونه‌های مناسب برای پالایش محیط‌های با آلودگی همزمان عناصر آرسنیک، کادمیم و مس معرفی شوند. در تأیید نتایج حاصل، Haghnazar و همکاران (۲۰۲۱) نیز پس از ارزیابی آلودگی برخی عناصر در رسوبات سطحی رودخانه بهمنشیر با استناد به مقادیر شاخص CBCI گزارش کردند که گیاه لویی (*Typha latifolia* L.) یک ابزار گیاه‌پالایی مناسب برای حذف همزمان عناصر بالقوه سمی آرسنیک، کادمیم و مس از رسوبات سطحی بوده است (Haghnazar et al., 2021). همچنین، Al-Sayaydeh و همکاران (۲۰۲۲) با استناد به مقادیر شاخص CBCI محاسبه شده برای برگ و پوست درختان مورد مطالعه، گونه‌های سرو زربین (*Cupressus sempervirens* L.) و انجیر پرده‌ای (*Ficus nitida* L.) را به‌عنوان بهترین گزینه‌ها برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به عناصر کادمیم و مس پیشنهاد کردند (Al-Sayaydeh et al., 2022). به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که گیاهان علفی از مک و بومادران به‌عنوان گونه‌های بومی کارآمد از قابلیت پایش و پالایش فلزات سنگین محیطی (خاک و هوا) در مناطق آلوده برخوردارند. در خاتمه نظر به محدودیت‌های مالی و زمانی در اجرای این پژوهش، ارزیابی قابلیت پایش و پالایش سایر گونه‌های گیاهی و آلودگی خاک به سایر عناصر بالقوه سمی در مطالعه‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

References

- Abbaszadeh, H., Mohammadi Roozbahani, M., Sobhanardakani, S., 2019. Use of *Ziziphus spinachristi* and *Prosopis cineraria* leaves as bio-indicators of environmental pollution emitted from industrial areas. Iranian Journal of Health and Environment 12(1), 87-100. (In Persian)
- Aghelan, N., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., Merrikhpour, H., 2020. Evaluation of chelating agents with different biodegradability rates on the enhanced phytoremediation efficiency of ornamental species (*Amaranthus caudatus* and *Tagetes patula*) in cadmium contaminated soils. Journal of Environmental Health Engineering 7(4), 427-442. (In Persian)
- Al-Sayaydeh, R.S., Al-Hawadi, J.S., Al-Habahbeh, K.A., Al-Nawaiseh, M.B., Albawai, R.N., Ayad, J.Y., 2022. Phytoremediation potential of selected ornamental woody species to heavy metal accumulation in response to long-term irrigation with treated wastewater. Water 14(13), 2086.
- Anwar, S., Naz, A., Ashraf, M.Y., Malik, A., 2020. Evaluation of inorganic contaminants emitted from automobiles and dynamics in soil, dust, and vegetations from major highways in Pakistan. Environmental Science and Pollution Research 27, 32494-32508.
- Bernardino, C.A.R., Mahler, C.F., Santelli, R.E., Freire, A., Braz, B., Novo, L., 2019. Metal accumulation in roadside soils of Rio de Janeiro, Brazil: impact of traffic volume, road age, and urbanization level. Environmental Monitoring and Assessment 191, 156.
- Bi, C., Zhou, Y., Chen, Z., Jia, J., Bao, X., 2018. Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China. Science of the Total Environment 619-620, 1349-1357.
- Bonanno, G., 2013. Comparative performance of trace element bioaccumulation and bio-monitoring in the plant species *Typha domingensis*, *Phragmites australis* and *Arundo donax*. Ecotoxicology and Environmental Safety 97, 124-130.

- Campos, C.F., Cunha, M.C., Santos, V.S., de Campos Júnior, E.O., Bonetti, A.M., Pereira, B.B., 2020. Analysis of genotoxic effects on plants exposed to high traffic volume in urban crossing intersections. *Chemosphere* 259, 127511.
- Chen, Y., Ning, Y., Bi, X., Liu, J., Yang, S., Liu, Z., Huang, W., 2022. Pine needles as urban atmospheric pollution indicators: Heavy metal concentrations and Pb isotopic source identification. *Chemosphere* 296, 134043.
- Cheraghi, M., Lorestani, B., Khorasani, N., Yousefi, N., Karami, M., 2011. Findings on the phytoextraction and phytostabilization of soils contaminated with heavy metals. *Biological Trace Element Research* 144(1), 1133-1141.
- Devi, U., Taki, K., Shukla, T., Sarma, K.P., Hoque, R.R. and Kumar, M., 2019. Microzonation, ecological risk and attributes of metals in highway road dust traversing through the Kaziranga National Park, Northeast India: implication for confining metal pollution in the national forest. *Environmental Geochemistry and Health* 41(3), 1387-1403.
- Eid, E.M., Shaltout, K.H., El-SheikhMA, A.T., 2012. Seasonal courses of nutrients and heavy metals in water, sediment and above-and below- ground *Typha domingensis* biomass in Lake Burullus (Egypt): perspectives for phytoremediation. *Flora* 207, 783-794.
- Feng, J., Wang, Y., Zhao, J., Zhu, L., Bian, X., Zhang, W., 2011. Source attributions of heavy metals in rice plant along highway in Eastern China. *Journal of Environmental Sciences* 23(7), 1158-1164
- Galal, T.M., Shehata, H.S., 2015. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological Indicators*. 48, 244-251.
- Glišić, R.M., Simić, Z.B., Grbović, F.J., Rajičić, V.R., Branković, S.R., 2021. Phytoaccumulation of metals in three plants species of the Asteraceae family sampled along a highway. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 49(2), 12180-12180.
- Gorka, R., Kumar, R., Yadav, S., Verma, A., 2022. Health implications, distribution and source apportionment of heavy metals in road deposited dust of Jammu City in northern India. *Chemosphere* 308, 136475.
- Habibi, H., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., Kiani Sadr, M. 2022. Analysis, sources and health risk assessment of trace elements in street dust collected from the city of Hamedan, west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 15, 168.
- Haghnazar, H., Hudson-Edwards, K. A., Kumar, V., Pourakbar, M., Mahdavianpour, M., Aghayani, E., 2021. Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere* 285, 131446.
- Hosseini, N.S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., Merrikhpour, H., 2020. 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* 27(12), 13301-13314.
- Hosseini, N.S., Sobhan Ardakani, S., 2021. 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* 35(2), 119-34. (In Persian)
- Hosseini, N.S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., Merrikhpour, H., 2021. 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* 13(4), 607-620. (In Persian)
- Hosseini, N.S., Sobhanardakani, S., 2022. Pollution and potential ecological risk assessment of Pb, Cd, Cr and Ni in surface soils along some roads of city of Hamedan. *Journal of Environmental Health Engineering* 9(3), 349-364. (In Persian)
- Hosseini, N.S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B., Merrikhpour, H., 2022. 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* 19(3), 1611-1624.
- Jankowski, K., Ciepela, A.G., Jankowska, J., Szulc, W., Kolczarek, R., Sosnowski, J., Wiśniewska-Kadzajan, B., Malinowska, E., Radzka, E., Czełusciński, W., Deska, J., 2015. 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* 22(2), 978-987.
- Jankowski, K., Malinowska, E., Ciepiela, G.A., Jankowska, J., Wiśniewska-Kadzaján, B., Sosnowski, J., 2019. Lead and cadmium content in grass growing near an expressway. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 76(1), 66-75.
- Jeddi, K., Chaieb, M., 2018. Evaluation of the potential of *Erodium glaucophyllum* L. for phytoremediation of metal-polluted arid soils. *Environmental Science and Pollution Research* 25(36), 36636-36644.
- Jiang, Y., Chao, S., Liu, J., Yang, Y., Chen, Y., Zhang, A., Cao, H., 2017. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. *Chemosphere* 168, 1658-1668.
- Jime'nez, M.N., Bacchetta, G., Casti, M., Navarro, F.B., Lallena, A.M., Ferná'ndez-Ondono, E., 2011. Potential use in phytoremediation of three plant species growing on contaminated mine-tailing soils in Sardinia. *Ecological Engineering* 37, 392-398.
- Khalid, N., Hussain, M., Young, H.S., Ashraf, M., Hameed, M., Ahmad, R., 2018. Lead concentrations in soils and some wild plant species along two busy roads in Pakistan. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 100(2), 250-258.
- Liang, J., Fang, H.L., Zhang, T.L., Wang, X.X., Liu, Y.D., 2017. Heavy metal in leaves of twelve plant species from seven different areas in Shanghai, China. *Urban Forestry & Urban Greening* 27, 390-398.
- Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42(3), 421-428.
- Liu, Y., Zhao, X., Liu, R., Zhou, J. and Jiang, Z., 2022. 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* 194(5), 1-14.
- Maisha, B.S., Tasrina, R.C., Md Nur, E.A., Md Bodrud, D., Md Mostazur, R., 2022. Soil, dust, and leaf-based novel multi-sample approach for urban heavy metal contamination appraisals in a megacity, Dhaka, Bangladesh. *Environmental Advances* 7, 100154.
- Malinowska, E., Jankowski, K., Wiśniewska-Kadzaján, B., Sosnowski, J., Kolczarek, R., Jankowska, J., Ciepiela, G.A., 2015. Content of zinc and copper in selected plants growing along a motorway. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 95(5), 638-673.
- Mohebian, M., Sobhanardakani, S., Taghavi, L., Ghoddousi, J. 2022. Optimization of phytoremediation of contaminated soil with heavy metals and petroleum hydrocarbons using SEM and MCDM techniques. *International Journal of Environmental Science and Technology* 19(10), 9535-9548.
- Mortazavi, S., Hatamimanesh, M. and Veysanlou, F., 2021. A comparative study on the capability of tree species in urban afforestation to accumulate heavy metals. *Journal of Advances in Environmental Health Research* 9(1), 79-90.
- Nag, R., O'Rourke, S.M., Cummins, E., 2022. A GIS study to rank Irish agricultural lands with background and anthropogenic concentrations of metal (loid) s in soil. *Chemosphere*. 286,131928.
- Nikolaeva, O., Rozanova, M., Karpukhin, M., 2017. Distribution of traffic-related contaminants in urban topsoils across a highway in Moscow. *Journal of Soils and Sediments* 17(4), 1045-53.
- Obiri-Nyarko, F., Duah, A.A., Karikari, A.Y., Agyekum, W.A., Manu, E., 2021. Tagoe R. Assessment of heavy metal contamination in soils at the Kpone landfill site, Ghana: Implication for ecological and health risk assessment. *Chemosphere* 282, 131007.
- Qin, C., Yuan, X., Xiong, T., Tan, Y.Z., Wang, H., 2020. Physicochemical properties, metal availability and bacterial community structure in heavy metal-polluted soil remediated by montmorillonite-based amendments. *Chemosphere* 261, 128010.
- Randelović, D., Jakovljević, K., Mihailović, N., Jovanović, S., 2018. Metal accumulation in populations of *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth from diverse anthropogenically degraded sites (SE Europe, Serbia). *Environmental Monitoring and Assessment* 190(4), 1-17.
- Sabet Aghlidi, P., Cheraghi, M., Lorestani, B., Sobhanardakani, S., Merrikhpour, H., 2020. 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* 18(2), 665-676.

- Salazar-Rojas, T., Cejudo-Ruiz, F.R., Calvo-Brenes, G., 2023. Assessing magnetic properties of biomonitors and road dust as a screening method for air pollution monitoring. *Chemosphere* 310, 136795.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., Niazi, N., 2017. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials* 325, 36-58.
- Shi, J., Zhang, G., An, H., Yin, W., Xia, X., 2017. Quantifying the particulate matter accumulation on leaf surfaces of urban plants in Beijing. *Atmospheric Pollution Research* 8(5), 836-842.
- Sobhan Ardakani, S., 2018a. Assessment of Pb and Ni contamination in the topsoil of ring roads' green spaces in the city of Hamadan. *Pollution* 4(1), 43-51.
- Sobhanardakani, S., 2019. Ecological and human health risk assessment of heavy metals content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran. *Biological Trace Element Research* 187(2), 602-610.
- Sobhan Ardakani, S., Jahangard, A., 2017. Toxicological assessment of inorganic arsenic and zinc content in button mushrooms. *Journal of Advances in Environmental Health Research* 5(4), 246-251.
- Sobhan Ardakani, S., Razban, S.S., Maànijou, M., 2014. Evaluation of concentration of some heavy metals in ground water resources of Qahavand Plain-Hamedan. *Journal of Kermanshah University of Medical Sciences* 18(6), 339-348. (In Persian)
- Sobhanardakani, S., Taghavi, L., Shahmoradi, B., Jahangard, A., 2017. Groundwater quality assessment using the water quality pollution indices in Toyserkan Plain. *Environmental Health Engineering and Management Journal* 4(1), 21-27.
- Soltani-Gerdefaramarzi, S., Ghasemi, M., Gheysouri, M., 2021. Pollution, human health risk assessment and spatial distribution of toxic metals in urban soil of Yazd City, Iran. *Environmental Geochemistry and Health* 43(9), 3469-3484.
- Tan, X.Y., Liu, L. and Wu, D.Y., 2022. Relationship between leaf dust retention capacity and leaf microstructure of six common tree species for campus greening. *International Journal of Phytoremediation* 24(11), 1213-1221.
- Taskila, S., Tuomola, M., Ojamo, H., 2012. Enrichment cultivation in detection of food-borne salmonella. *Food Control* 26, 369-377.
- Wang, H., Nie, L., Xu, Y., Li, M., Lv, Y., 2018. 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* 25(19), 18498-18509.
- Zhai, Y., Dai, Q., Jiang, K., Zhu, Y., Xu, B., Peng, C., Wang, T., Zeng, G., 2016. 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* 21(2), 1572-1158.
- Zhang, H., Zhang, Y., Wang, Z., Ding, M., Jiang, Y., Xie, Z., 2016. Trafficrelated metal (loid) status and uptake by dominant plants growing naturally in roadside soils in the Tibetan plateau, China. *Science of the Total Environment* 573, 915-923.