



Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research
(Soil and Water Sci.)

<https://srjournal.areeo.ir/>


Ecological Risk Assessment of Potentially Toxic Elements in Urban Soils Based on Deterministic and Stochastic Models (Case Study: City of Hamedan, Iran)

Soheil Sobhanardakani^{a*} , and Nayereh Sadat Hosseini^a

^a Department of Environmental Sciences, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

May 18, 2026

Revised

June 04, 2026

Accepted

July 08, 2026

Published online

September 06, 2026

Keywords

Soil,
Toxic pollutants,
Risk management,
Monte Carlo simulation.

*Corresponding author's email

s_sobhan@iau.ac.ir

Extended Abstract

Background and Objectives: Ecological risk assessment of potentially toxic elements in urban soils and scientific-practical recommendations for reducing environmental risks have attracted widespread attention as a necessary measure to protect and promote sustainable urban development. In this regard, determining the priority of control factors in ecological risk management of potentially toxic elements of urban soil is of great importance in order to develop and accurately prioritize preventive measures and effective strategies for protecting the health of the urban ecosystem based on the importance and necessity of their implementation. Therefore, this study was conducted with the aim of determining the priority of control factors in ecological risk management of potentially toxic elements (As, Pb, Cu, and Mn) in urban soils of Hamedan city in 2023.

Materials and Methods: In this study, a total of 135 urban surface soil samples were collected from 15 sampling sites from three different functional regions (i.e., commercial, residential, and industrial). Following sample preparation and acid digestion, the concentrations of the analyzed elements were determined using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). Statistical analyses were done using SPSS software. Additionally, the potential ecological effects of the studied elements on ecosystem health, the modified ecological risk factor (MER) and modified ecological risk index (MERI) were calculated. Also, a stochastic ecological risk assessment based on Monte Carlo simulation was performed using Crystal Ball software with 10,000 iterations and a 95% confidence level.

Results: The results from determining the content of the elements showed that the highest average content of As and Cu (mg/kg) with 6.91 and 30.9, respectively, belonged to the industrial areas and for Pb and Mn with 31.2 and 293 (mg/kg), respectively, belonged to the commercial areas, revealing the effect of various urban activities and land uses on the spatial variations of the PTE contents. The average MERI index of the elements was equal to 406, indicating the occurrence of very high ecological risk in the study area. The results of the ecological risk assessment based on the stochastic model showed that 100% of the ecological risk values in the study area were in the "very high" risk range. The results of the sensitivity analysis showed that arsenic as a key influencing factor has the greatest impact on ecological risk in the study area. The results showed that the stochastic model compared to the deterministic model significantly improved and increased the accuracy and performance of ecological risk assessment.

Conclusion: The results showed that arsenic, as the main and key factor in the occurrence of ecological hazards, was the priority metalloid pollutant for

the control and management of the ecological risk of the studied elements in the soil of Hamedan city. Therefore, control of emission sources and regular and periodic monitoring of soil arsenic content with the aim of reducing risk is recommended to ensure the health of the urban ecosystem and protect sustainable urban development.

Cite this article: Sobhanardakani, S., Hosseini, N.S., 2026. Ecological Risk Assessment of Potentially Toxic Elements in Urban Soils Based on Deterministic and Stochastic Models (Case Study: City of Hamedan, Iran). Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (2), pp 147-166.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372801.818>

Publisher: Soil Science Society of Iran



ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر بالقوه سمی خاک شهری مبتنی بر مدل‌های قطعی و تصادفی (مورد مطالعه: شهر همدان)

سهیل سبوحان اردکانی^{۱*}  و نیره‌السادات حسینی^۱

^۱ گروه محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

واژه‌های کلیدی

خاک،

آلاینده‌های سمی،

مدیریت ریسک،

شبیه‌سازی مونت کارلو.

* ایمیل نویسنده مسئول

s_sobhan@iaui.ac.ir

توسعه و اولویت‌بندی دقیق اقدامات پیشگیرانه و راهبردهای مؤثر حفاظت از سلامت بوم‌سامانه شهری اقدام ضروری در راستای حفاظت و دستیابی به توسعه پایدار شهری محسوب می‌شود. از این‌رو، این پژوهش با هدف تعیین اولویت عوامل کنترلی در مدیریت ریسک بوم‌شناختی عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز خاک شهری همدان در سال ۱۴۰۲ انجام یافت. در این پژوهش، در مجموع ۱۳۵ نمونه خاک سطحی از کاربری‌های تجاری، مسکونی و صنعتی برداشت و محتوی عناصر در آن‌ها به‌روش طیف‌سنجی نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) اندازه‌گیری شد. برای کمی‌سازی و تعیین اثرات بالقوه بوم‌شناختی، عناصر مورد مطالعه بر سلامت بوم‌سازگان نسبت به محاسبه شاخص ریسک بوم‌شناختی اصلاح شده (MERI) مبتنی بر مدل‌های قطعی و تصادفی (شبیه‌سازی مونت کارلو) اقدام شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص MERI عناصر مبتنی بر مدل قطعی برابر با ۴۰۶ بود که ریسک بوم‌شناختی خیلی شدید در محدوده نمونه‌برداری را نشان داد. نتایج ارزیابی ریسک بوم‌شناختی مبتنی بر مدل تصادفی نشان داد که ۱۰۰ درصد مقادیر ریسک بوم‌شناختی در منطقه مورد مطالعه در محدوده ریسک "خیلی شدید" بود. نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که آرسنیک به‌عنوان عامل مؤثر کلیدی از بیش‌ترین تأثیر بر ریسک بوم‌شناختی برخوردار بود. نتایج همچنین نشان داد که عنصر آرسنیک آلاینده واجد اولویت برای کنترل و مدیریت ریسک بوم‌شناختی عناصر سمی در خاک شهر همدان بود. لذا، کنترل منابع انتشار و پایش منظم و دوره‌ای محتوی این عنصر در خاک با هدف کاهش ریسک برای تضمین سلامت بوم‌سامانه شهری و حفاظت از توسعه پایدار شهری توصیه می‌شود.

استناد: سبوحان اردکانی، س.، حسینی، ن.، س.، ۱۴۰۵. ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر بالقوه سمی خاک شهری مبتنی بر مدل‌های قطعی و تصادفی

(مورد مطالعه: شهر همدان). مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲)، ۴۰، ص ۱۴۷-۱۶۶.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372801.818>



مقدمه

در قرن حاضر، روند فزاینده آلودگی اجزای مختلف بوم‌سامانه‌های شهری به انواع آلاینده‌های سمی ناشی از توسعه فزاینده شهرنشینی، صنعتی و تجاری به یکی از مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین موانع و نگرانی‌ها برای توسعه پایدار شهری تبدیل شده است (Akbarimorad et al., 2024a; Chen et al., 2026; Han et al., 2025). در میان طیف وسیعی از آلاینده‌های انتشار یافته در محیط شهری، عناصر بالقوه سمی^۱ به سبب برخورداری از پایداری زیاد، زیست تخریب‌ناپذیری و قابلیت تجمع و انباشت زیستی در زمره مهم‌ترین آلاینده‌های سمی دارای اولویت کنترل و یک چالش و تهدید مهم برای پایداری محیطی در مقیاس جهانی به‌شمار می‌آیند (Proshad et al., 2026a; Sobhanardakani and Hosseini, 2024). در این خصوص، روند افزایشی محتوی آلاینده‌های فلزی خاک شهری ناشی از تنوع و تعدد منابع انتشار و به سبب توزیع گسترده و ماندگاری طولانی آلاینده‌های فلزی در خاک و ریسک‌های بالقوه بوم‌شناختی-بهداشتی مترتب با آن‌ها توجه جهانی را به خود جلب کرده است (Han and Gu, 2023; Singh et al., 2025; Akbarimorad et al., 2024b).

به‌طور کلی، خاک شهری به‌عنوان بخشی ضروری از زیست‌بوم شهری نه تنها ماتریس مهم و اساسی برای تضمین و حفاظت از توسعه پایدار اجتماعی-اقتصادی به‌شمار می‌آیند؛ بلکه، به‌عنوان مخزن مهم و اصلی انباشت آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی نقش مهمی در انتشار و ذخیره‌سازی این آلاینده‌های سمی دارند (Fei et al., 2024; Zhang et al., 2024). از طرفی، خاک به‌عنوان یک واسطه کلیدی در زیست‌بوم شهری، عامل مهم انتقال آلودگی به دیگر اجزای محیط یعنی هوا، آب و گیاه و به تبع آن ایجاد اختلال در پایداری و تعادل عملکردی بوم‌سامانه شهری محسوب می‌شود (Hosseini et al., 2020; Shen et al., 2024). از این‌رو، طبق قطعنامه مجمع محیط‌زیست سازمان ملل متحد وابسته به برنامه محیط‌زیست این سازمان (مصوب سال ۲۰۱۷)، کشورهای عضو ملزم به ارائه گزارش آلودگی جهانی خاک به عناصر بالقوه سمی هستند (Juste Ruiz, 2020; Perrez, 2020). به‌علاوه، کمی‌سازی مخاطرات محیط‌زیستی مرتبط با آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی خاک شهری به سبب سطوح مختلف شهرنشینی، صنعتی، توسعه زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل شهری و افزایش حجم ترافیک رویکردی اساسی و ضروری در راستای بهبود، بازنگری و تدوین استانداردهای کیفی محیط و وضع قوانین و راهبردهای محیط‌زیستی به‌منظور سالم‌سازی و مدیریت جامع زیست‌بوم

شهری متناسب با وضعیت هر بوم‌سامانه شهری محسوب می‌شود. در این خصوص، مدل ارزیابی ریسک بالقوه بوم‌شناختی^۲ به‌عنوان یک ابزار تشخیصی مؤثر برای تعیین اولویت عوامل کنترلی (آلاینده‌های مسئول) در بروز اثرات مضر بوم‌شناختی و به‌منظور تسهیل در مدیریت ریسک، حفاظت از محیط‌زیست، تضمین و ارتقای توسعه پایدار شهری از طریق بهینه‌سازی، بهبود و توسعه اقدامات پیشگیرانه حائز اهمیتی ویژه است (Goncharov et al., 2024; Arıman and Balkaya, 2025).

به‌طور کلی، شاخص ریسک بالقوه ریسک بالقوه بوم‌شناختی به‌عنوان رویکرد کمی مبتنی بر محتوی و سمیت عناصر، ابزاری کارآمد و مفید برای شناسایی و اولویت‌بندی مدیریت مناطق با ریسک احتمالی و بالقوه ناشی از خاک آلوده به عناصر سمی محسوب می‌شود (Saha et al., 2024; Zhu et al., 2026; Li et al., 2024). افزون بر این، تشدید ریسک آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی خاک ناشی از اثرات تجمعی عناصر سمی بر لزوم و ضرورت شناسایی و تعیین اولویت عوامل کنترلی در مدیریت ریسک بوم‌شناختی این آلاینده‌ها به‌منظور کاهش مؤثر ریسک و هزینه‌های مرتبط با مدیریت آن تأکید می‌کند. با این حال، چالش‌های ناشی از عدم قطعیت محتوای آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی، معضل مهم و اساسی در رابطه با اثربخشی اقدامات کنترلی و پیشگیرانه مبتنی بر ارزیابی ریسک بوم‌شناختی قطعی به‌شمار می‌آید. از این‌رو، ترکیب ریسک بوم‌شناختی با مدل‌های تصادفی برای افزایش قابلیت اطمینان ارزیابی‌ها و ارائه تخمین قابل اعتمادتر و واقعی‌تر از ریسک به‌منظور تدوین، توسعه و بهینه‌سازی راهبردهای کنترلی برای مدیریت مؤثر ریسک از اهمیتی ویژه برخوردار بوده و به‌طور فزاینده مورد توجه قرار گرفته است (Xiao et al., 2024; Li et al., 2025a; Liu et al., 2026). در این راستا، شبیه‌سازی مونت کارلو^۳ به‌عنوان ابزار مؤثر و مفید در ارزیابی تصادفی ریسک بوم‌شناختی عناصر بالقوه سمی توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است و ارزیابی ریسک بوم‌شناختی مبتنی بر این مدل نه تنها می‌تواند عدم قطعیت‌های مربوط به فرآیند ارزیابی را کاهش دهد، بلکه می‌تواند به‌واسطه شناسایی و تعیین اولویت دقیق عوامل کلیدی مؤثر بر ریسک منجر به توسعه و اولویت‌بندی دقیق اقدامات پیشگیرانه و راهبردهای مؤثر حفاظت از سلامت بوم‌سازگان بر اساس اهمیت و لزوم اجرای آن‌ها شود (Öncü et al., 2025; Maitituersun et al., 2026).

² Potential Ecological Risk³ Monte Carlo Simulation¹ Potentially Toxic Elements

واقع شده است. میانگین دمای سالانه و بارندگی این شهر به ترتیب برابر با ۱۱/۳ درجه سلسیوس و ۳۱۸ میلی‌متر ثبت شده است. توسعه شهری- صنعتی و رشد شتابان و مستمر شهرنشینی، و همچنین افزایش حجم ترافیک درون شهری منجر به بروز نگرانی‌های فزاینده مرتبط از اثرات نامطلوب آلودگی‌های احتمالی بر سلامت بوم‌سامانه این شهر به‌ویژه از لحاظ محتوی عناصر بالقوه سمی خاک شده است (Sobhanardakani and Hosseini, 2026b).

نمونه‌برداری از خاک

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، پس از انجام مطالعه‌های اولیه میدانی و به‌منظور تعیین محتوی، ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز مبتنی بر مدل‌های قطعی و تصادفی و تعیین اولویت عوامل کنترلی (آلاینده‌های مسئول) در مدیریت ریسک، نسبت به نمونه‌برداری از خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) در سه کاربری عمده شهر همدان به‌روش تصادفی-طبقه‌بندی‌شده اقدام شد. بر این اساس و به‌منظور توزیع یکنواخت مکان‌های نمونه‌برداری، پس از طبقه‌بندی محدوده مورد مطالعه به سه منطقه عملکردی عمده شامل مناطق تجاری (واجد بیش‌ترین حجم ترافیک)، مسکونی (واجد بیشینه استقرار سکونت‌گاه‌ها) و صنعتی (واجد صنایع سبک نظیر کارگاه‌های جوشکاری و آب‌کاری فلزات، تولید محصولات پلاستیکی و چرمی و کارگاه‌های تعمیر و نقاشی خودرو)، ۱۵ مکان نمونه‌برداری (پنج مکان از هر کاربری) به‌صورت تصادفی و با پراکنش مناسب انتخاب شد. لازم به‌ذکر است که در تعیین تعداد مکان‌های نمونه‌برداری و نمونه‌های خاک سطحی، محدودیت‌های مالی و زمانی پژوهش هم مدنظر قرار گرفته شدند. نمونه‌برداری در همه مکان‌ها در سه نوبت طی فصل تابستان انجام شد. به‌منظور ایجاد شرایط یکنواخت و کاهش عوامل مداخله‌گر احتمالی، نمونه‌ها در همه مکان‌ها در یک روز کاری با سه تکرار و بر اساس روش استاندارد با استفاده از بیلچه استیل برداشت شدند. به‌منظور تهیه نمونه‌های همگن، پنج نمونه خاک برداشت شده از هر مکان (مرکز و رئوس پلات مربعی به ضلع پنج متر) با یکدیگر مخلوط و در نهایت یک نمونه یک کیلوگرمی در کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌دار واجد برچسب ذخیره و برای پردازش‌های بعدی به آزمایشگاه منتقل شد (Birke et al., 2018; Upadhyay et al., 2024). از این‌رو، تعداد کل نمونه‌های خاک سطحی در مجموع ۱۳۵ عدد (۴۵ نمونه از کاربری تجاری، ۴۵ نمونه از کاربری مسکونی و ۴۵ نمونه از کاربری صنعتی) بود. مختصات جغرافیایی مکان‌های نمونه‌برداری نیز توسط دستگاه موقعیت‌یاب مکانی (GPS)

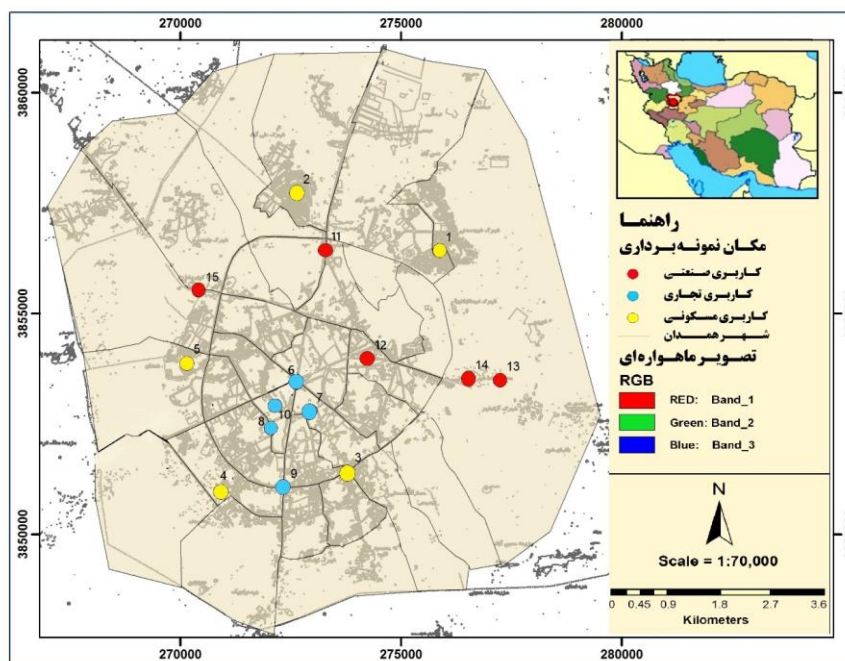
تاکنون چندین مطالعه بین‌المللی در رابطه با تعیین اولویت عوامل کنترلی در مدیریت ریسک بوم‌شناختی عناصر سمی خاک شهری بر اساس مدل تصادفی در راستای تضمین توسعه پایدار شهری انجام شده است که در این خصوص می‌توان به پژوهش‌های Guan و همکاران (۲۰۲۲) در لیانگژو چین، Li و همکاران (۲۰۲۴) در حوضه رودخانه زرد چین، Xie و همکاران (۲۰۲۴) در جیانگشی چین، Li و همکاران (۲۰۲۵a) در لانژو (چین)، Zhang و همکاران (۲۰۲۵a) در شوگوانگ چین اشاره کرد. این در حالی است که هرچند مطالعاتی در خصوص ارزیابی ریسک بوم‌شناختی آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی خاک مبتنی بر مدل قطعی در شهرهای ایران از جمله اهواز (Ghanavati et al., 2019)، تهران (Yaghoubi et al., 2022)، گرمسار (Lotfi, 2024) و اصفهان (Mirtamizdoost et al., 2024) انجام شده است؛ ولی، ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر سمی خاک شهری مبتنی بر مدل تصادفی در ایران چندان مورد توجه نبوده است. از این‌رو، نظر به اهمیت و ضرورت ارزیابی مخاطرات محیط‌زیستی مرتبط با آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی خاک شهری و تعیین اولویت عوامل کنترلی در مدیریت مؤثر آلودگی و ریسک بوم‌شناختی متناسب با وضعیت هر بوم‌سامانه شهری از یک‌سو، و نظر به توسعه شهرنشینی، صنعتی و روند افزایشی حجم ترافیک در شهر همدان و بروز نگرانی‌های فزاینده مرتبط از اثرات نامطلوب آلودگی احتمالی خاک شهری بر کیفیت محیط و سلامت بوم‌سامانه شهری و شهروندان، کمی‌سازی دقیق ریسک بوم‌شناختی عناصر در خاک شهری همدان و تعیین اولویت عوامل کنترلی در مدیریت ریسک عناصر در خاک شهری با هدف ارزیابی راهبردهای کاربردی برای کنترل آلودگی و مدیریت مؤثر و جامع ریسک در راستای نیل به توسعه پایدار شهری از اهمیتی ویژه برخوردار است. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز در خاک سطحی شهر همدان مبتنی بر مدل‌های قطعی و تعیین اولویت عوامل کنترلی در مدیریت ریسک بوم‌شناختی عناصر در سال ۱۴۰۲ انجام شد. همچنین، عملکرد و دقت مدل‌های قطعی و تصادفی ریسک بوم‌شناختی عناصر خاک شهری نیز مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

شهر همدان به‌عنوان مرکز و اولین قطب جمعیتی استان همدان با وسعت ۵۶ کیلومترمربع و حدود ۶۵۲۰۰۰ نفر جمعیت بین مدارهای ۴۷ تا ۴۹ درجه طول جغرافیایی شرقی و ۳۳ تا ۳۵ درجه عرض جغرافیایی شمالی در نیمه غربی ایران

گارمین مدل 32X ETRE ثبت شدند که موقعیت استقرار آن‌ها در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت استقرار مکان‌های نمونه‌برداری.

Figure. 1- Location of sampling sites.

از شرکت سیگما-آلدريج اسپانیا بررسی شدند. بر این اساس، مقادیر حد تشخیص برای عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز به ترتیب برابر با ۰/۰۸۹، ۰/۰۳۸، ۰/۰۶۴ و ۰/۰۷۱ میلی‌گرم در کیلوگرم و مقادیر محدودیت کمی عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز برای همین عناصر به ترتیب برابر با ۰/۲۶۱، ۰/۱۳۳، ۰/۱۸۷ و ۰/۲۰۸ به دست آمدند. نتایج حاصل از درصد بازیابی عناصر مورد مطالعه (۸۸/۹-۹۷/۴٪) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه از دقت مناسب برخوردار بوده است.

ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر بر اساس مدل قطعی

در این پژوهش، به منظور کمی‌سازی و برآورد جامعی از خطرات بالقوه بوم‌شناختی عناصر در نمونه‌های خاک شهری نسبت به محاسبه شاخص ریسک بوم‌شناختی اصلاح شده با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ اقدام شد (Afolabi et al. 2023; Liu et al. 2024):

رابطه (۱)

$$MERI = \sum_{i=1}^n MER_i; MER_i = Tr_i \times EF_i$$

آماده‌سازی نمونه‌های خاک و تعیین محتوی عناصر در آن‌ها

نمونه‌های خاک در آزمایشگاه ابتدا هوا خشک شده و سپس به منظور حذف ذرات بزرگ و بقایای آلی از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند (Hosseini and Sobhanardakani, 2024).

برای تعیین غلظت کل عناصر در نمونه‌های مورد مطالعه، ۵۰۰ گرم از هر نمونه خاک سطحی را به‌طور مجزا به بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری منتقل کرده و پس از افزودن ۱۲ میلی‌لیتر از مخلوط اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک به هر بشر (با نسبت ۱:۳ اسید نیتریک و ۶۵٪ اسید هیدروکلریک ۳۰٪)، محلول‌ها در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس، به مدت سه ساعت بازروانی شدند. محلول‌ها پس از سرد شدن، توسط کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف و به ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل و سپس با آب دوبار تقطیر به حجم رسانده شدند (Chen and Ma, 2001; Hosseini et al., 2022). 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، سرب، مس و منگنز در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. تضمین و کنترل کیفیت اندازه‌گیری‌ها نیز با استفاده از مرجع استاندارد خاک (SQC-001, Sigma-Aldrich, Spain) خریداری شده

رابطه (۲)

$$EF = \frac{(C_n/C_r)_{\text{sample}}}{(C_n/C_r)_{\text{background}}}$$

در روابط (۱) و (۲):

MEr_i ، MEr_i و Tr_i به ترتیب بیان‌گر شاخص ریسک بوم‌شناختی اصلاح شده، فاکتور ریسک بالقوه بوم‌شناختی هر عنصر و ضریب واکنش سمیت عناصر مورد مطالعه (برابر با ۱۰، ۵، ۵ و ۱ به ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز) هستند. EF شاخص غنی‌شدگی را نشان می‌دهد، $(C_n/C_r)_{\text{sample}}$ بیان‌گر نسبت محتوی عنصر مورد مطالعه به محتوی عنصر مرجع در نمونه خاک برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم و

$(C_n/C_r)_{\text{background}}$ نیز نشان‌دهنده نسبت غلظت زمینه عنصر مورد مطالعه (برابر با ۲/۰۰، ۳۹/۶، ۳۶/۶ و ۳۶۸ به ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز) به غلظت زمینه عنصر مرجع در شیل برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم است. در این مطالعه عنصر آلومینیم با میانگین غلظت برابر با ۸۵۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در محدوده نمونه‌برداری و غلظت زمینه برابر با ۸۲۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به عنوان عنصر مرجع در نظر گرفته شد. طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر شاخص‌های MEr و MEr_i در جدول ۱ آورده شده است (Afolabi et al. 2023; Liu et al. 2024).

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص ریسک بالقوه بوم‌شناختی اصلاح شده.

Table 1. Modified potential ecological risk index and its classifications.

شاخص ریسک بوم‌شناختی اصلاح شده (MERI) Modified Ecological Risk Index (MERI)		فاکتور ریسک بالقوه بوم‌شناختی (MEr) Potential ecological risk factor (MEr)	
طبقه توصیفی (خطر مجموع عناصر) Descriptive class (risk of total elements)	محدوده (بدون واحد) Range (unitless)	طبقه توصیفی (خطر هر عنصر) Descriptive class (risk of each element)	محدوده (بدون واحد) Range (unitless)
خطر کم Low risk	$MEr_i < 25$	خطر کم Low risk	$MEr < 40$
خطر متوسط Moderate risk	$25 \leq MEr_i < 50$	خطر متوسط Moderate risk	$40 \leq MEr < 80$
خطر شدید High risk	$50 \leq MEr_i < 100$	خطر قابل توجه Considerable risk	$80 \leq MEr < 160$
خطر خیلی شدید Very high 1 risk	$MEr_i \geq 100$	خطر شدید High risk	$160 \leq MEr < 320$
		خطر خیلی شدید Very high risk	$MEr \geq 320$

توزیع نرمال تعریف شدند. در همین حال، برای شناسایی متغیرهای ورودی با بیش‌ترین تأثیر بر نرخ ریسک، تحلیل حساسیت^۴ پارامترها اجرا شد (Islam et al., 2024; Wu et al., 2025; Zhang et al., 2025b).

پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۲۴ نرم‌افزار SPSS^۵ انجام شد. بدین‌صورت که برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد و برابری واریانس‌ها نیز توسط آزمون لوین مورد ارزیابی قرار گرفت. از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه و به‌دنبال آن چند دامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌داری ۵٪ برای مقایسه میانگین غلظت عناصر بین کاربری‌های مختلف استفاده شد. همچنین، ارزیابی ریسک تصادفی و تحلیل حساسیت با

ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر بر اساس مدل تصادفی

شبیه‌سازی مونت کارلو به عنوان یک روش آماری مبتنی بر نمونه‌گیری تصادفی، مهم‌ترین روش مدل‌سازی ارائه شده توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده برای تخمین ریسک‌های قابل اعتمادتر و واقع‌بینانه‌تر است. تعیین فرضیه و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مدل ارزیابی ریسک، ایجاد مدل توزیع برای متغیر فرضیه و انجام شبیه‌سازی و پردازش نتایج ریسک به ترتیب مراحل اصلی شبیه‌سازی مونت کارلو هستند. در این مطالعه، غلظت عناصر، ضرایب سمیت و مقادیر غلظت زمینه عناصر به عنوان متغیرهای فرضیه تعیین و مدل احتمالی برای محاسبه ریسک بوم‌شناختی عناصر سمی خاک تعریف و در نرم‌افزار کریستال بال در محیط اکسل اجرا شد. بر این اساس، غلظت عناصر در خاک شهری با استفاده از توزیع لگاریتمی نرمال مدل‌سازی شد. علاوه بر این، سایر متغیرهای ورودی مانند ضرایب سمیت و مقادیر غلظت زمینه عناصر نیز با

^۴ Sensitivity Analysis^۵ Statistical Package for Social Sciences

محتوی عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز در خاک به ترتیب با میانگین برابر با ۶/۸۴، ۲۰/۲، ۲۶/۶ و ۲۸۴ میلی‌گرم در کیلوگرم در دامنه ۵/۲۴-۷/۷۵، ۸/۱۶-۳۳/۶، ۷/۵۱-۳۶/۹ و ۲۳۵-۳۴۲ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود. بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک و مس مربوط به نمونه‌های خاک سطحی جمع‌آوری شده از کاربری صنعتی بود. در همین حال، بیشینه میانگین محتوی عناصر سرب و منگنز به نمونه‌های خاک سطحی کاربری تجاری تعلق داشت. از سوی دیگر، میانگین محتوی عناصر (همه کاربری‌ها) در نمونه‌ها از روند نزولی منگنز < مس < سرب < آرسنیک تبعیت کرد. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نیز نشان داد که بین کاربری‌های مختلف از حیث میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در نمونه‌های خاک اختلاف معنی‌دار آماری در سطح ۹۵٪ وجود داشته است. روند کاهشی میانگین محتوی عناصر آرسنیک و مس برای کاربری‌های مختلف به‌صورت صنعتی < تجاری < مسکونی و برای عناصر سرب و منگنز نیز به‌صورت تجاری < صنعتی < مسکونی بود.

استفاده نسخه ۱۱/۱/۲۴ نرم‌افزار کرسنال بال در محیط آفیس اکسل ۲۰۱۳ با ۱۰۰۰۰ تکرار در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

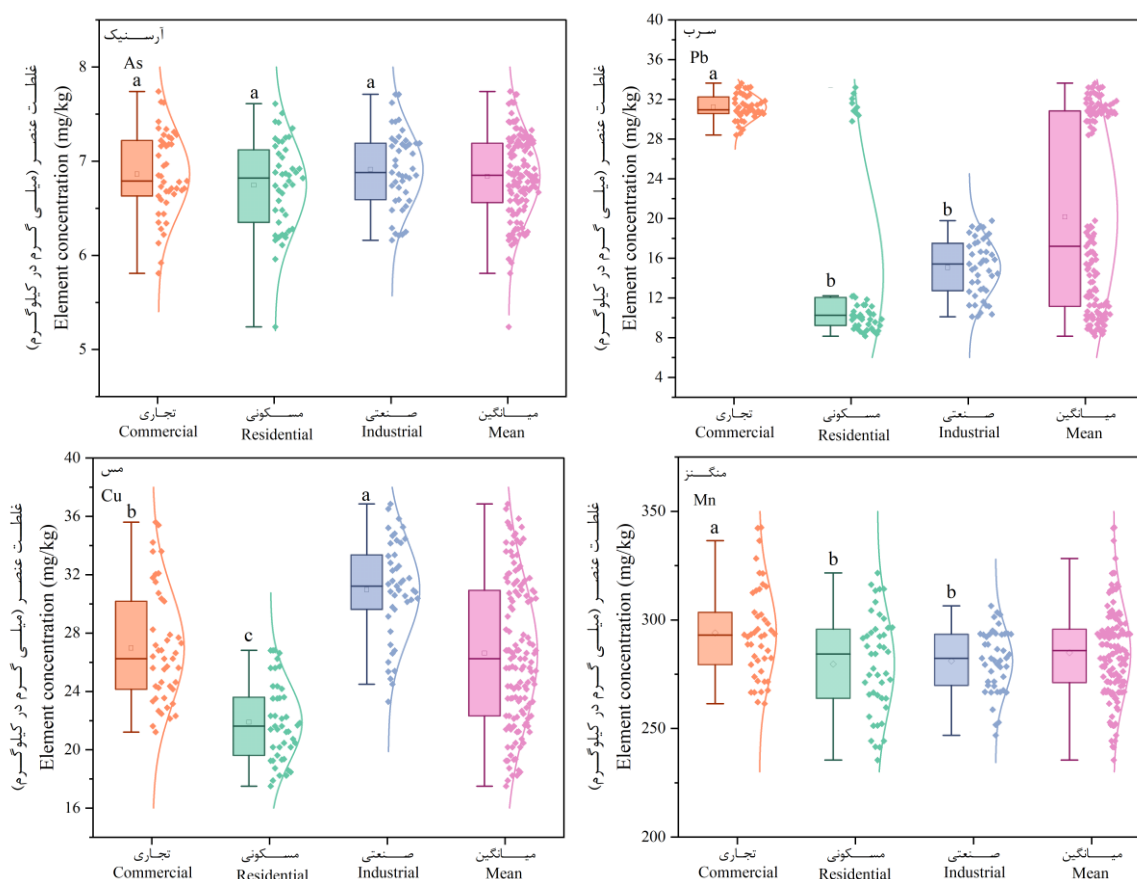
نتایج

نتایج پردازش آماری داده‌ها

با استناد به نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، سطح معنی‌داری برای عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز به ترتیب برابر ۰/۴۵۸، ۰/۸۱۳، ۰/۶۱۷ و ۰/۵۲۴ بود. بر این اساس، توزیع غلظت همه عناصر در نمونه‌های خاک سطحی با سطح معنی‌داری (p) بزرگ‌تر از ۰/۰۵، نرمال بود. از طرفی، با توجه به سطح معنی‌داری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ آزمون لوین، فرض برابری واریانس‌ها هم تأیید شد.

نتایج تعیین محتوی عناصر

نتایج تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های خاک سطحی در (شکل ۲) آورده شده است. بر این اساس،



شکل ۲- محتوی عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز (میلی‌گرم در کیلوگرم) در نمونه‌های خاک؛ حروف a، b، و c بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0.05$) بین میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در کاربری‌های مختلف بر اساس نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه و چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 2- Concentration of As, Pb, Cu, and Mn (mg/kg) in soil samples. Letters a, b, c denotes significant difference between the mean concentrations of elements in soil samples based on the results of one-way ANOVA and Duncan's multiple Range Test.

نتایج ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر مبتنی بر مدل قطعی

نتایج برآورد ریسک بوم‌شناختی عناصر مورد ارزیابی مبتنی بر مدل قطعی در (جدول ۲) آورده شده است. بر این اساس، میانگین مقادیر کل شاخص MER در خاک سطحی شهر همدان برای عنصر آرسنیک برابر با ۳۳۱ بود که سطح خطرزایی بوم‌شناختی "خیلی شدید" عنصر مذکور در منطقه را نشان داد ($MEr \geq 320$). در همین حال، میانگین مقادیر کل شاخص MER برای عنصر مس برابر با ۴۲/۸ و بیان‌گر ریسک بوم‌شناختی "متوسط" این عنصر در منطقه مورد مطالعه بود ($40 \leq MEr < 320$). همچنین، میانگین مقادیر کل شاخص MER در خاک سطحی شهر همدان برای عناصر سرب و منگنز به ترتیب با ۷/۵۱ و ۲۴/۷ سطح ریسک بوم‌شناختی "کم" عناصر مذکور در منطقه مورد مطالعه را نشان داد ($MEr < 40$). از طرفی،

بیشینه میانگین مقادیر شاخص MER محاسبه شده برای عناصر آرسنیک و منگنز به ترتیب با ۳۵۲ و ۷/۹۴ به کاربری مسکونی و برای عنصر سرب نیز با ۳۸/۵ به کاربری تجاری تعلق داشت. در همین حال، بیشینه میانگین مقادیر شاخص MER برای عنصر مس با ۴۶/۲ مربوط به مناطق صنعتی بود. همچنین، میانگین مقادیر MER برای عناصر ترتیب کاهشی آرسنیک < مس < سرب < منگنز را نشان داد.

نتایج برآورد شاخص MERI نشان داد که تمام مکان‌های واقع در مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی (۱۰۰ درصد نمونه‌ها در محدوده نمونه‌برداری) دارای سطوح ریسک بوم‌شناختی خیلی شدید هستند ($MERi \geq 100$). در همین حال، بیشینه میانگین مقدار شاخص MERI عناصر با ۴۲۴ با نمونه‌های برداشت‌شده از مناطق تجاری مرتبط بود (جدول ۲).

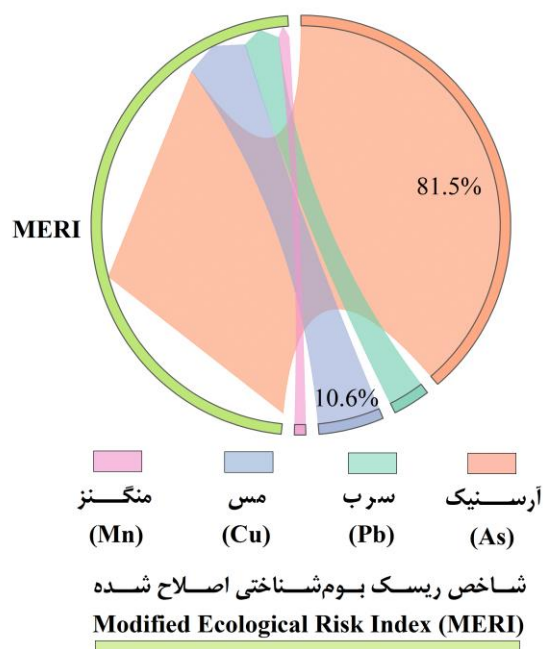
جدول ۲- نتایج ارزیابی ریسک بوم‌شناختی اصلاح شده (MER و MERI) عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک شهر همدان.

Table 2. Modified ecological risk (MER and MERI) of analyzed elements in soil samples of city of Hamedan.

شاخص ریسک بوم‌شناختی اصلاح شده (MERI) Modified Ecological Risk Index (MERI)	فاکتور ریسک بالقوه بوم‌شناختی (MER) Ecological Risk Factor (MER)				کاربری Land use
	منگنز (Mn)	مس (Cu)	سرب (Pb)	آرسنیک (As)	
424	7.79	43.9	38.5	334	تجاری Commercial
417	7.94	38.2	18.8	352	مسکونی Residential
377	6.81	46.2	16.9	308	صنعتی Industrial
406	7.51	42.8	24.7	331	میانگین Mean

MERI، از بیش‌ترین سهم در ایجاد ریسک بوم‌شناختی در نمونه‌های خاک برخوردار بود (شکل ۳).

نتایج ارزیابی رابطه بین عناصر و ریسک بوم‌شناختی نشان داد که عنصر آرسنیک با اختصاص ۸۱/۵ درصد از کل مقادیر

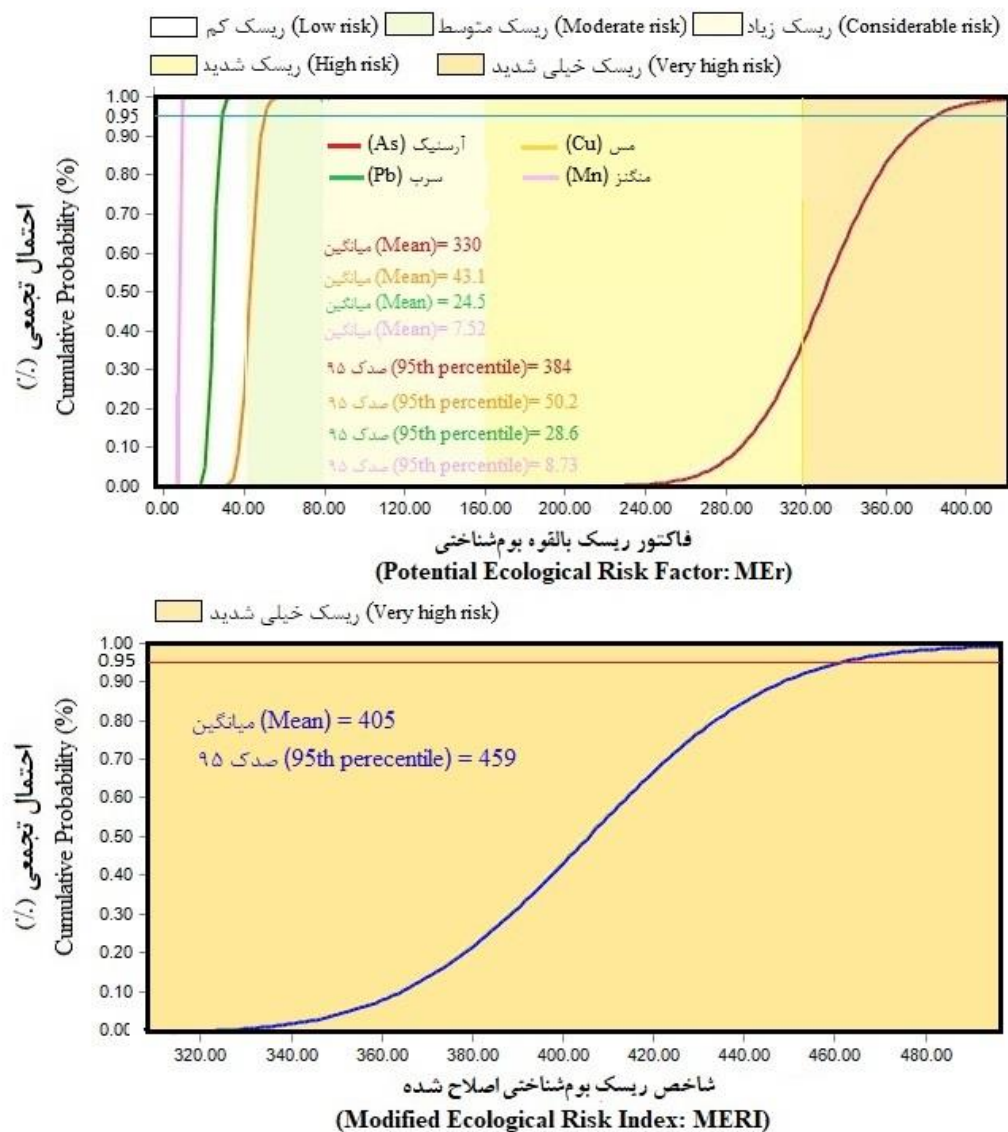


شکل ۳- رابطه بین عناصر و ریسک بوم‌شناختی؛ وترهای دایره نشان‌دهنده سهم عناصر در ریسک بوم‌شناختی است.
Figure. 3. Relationship between elements and ecological risk; the chords of the circle indicate the contribution of elements to ecological risk.

عنصر آرسنیک (۶۲/۵ درصد) بزرگ‌تر از ۳۲۰ و بیان‌گر بروز ریسک بوم‌شناختی خیلی شدید ناشی از آلودگی خاک با این عنصر بود (شکل ۴). در همین حال، ۷۷/۰ درصد مقادیر شاخص MERI برای عنصر مس در محدوده ۴۰ تا ۸۰ متغیر و بیان‌گر بروز ریسک بوم‌شناختی متوسط ناشی از این عناصر در منطقه مورد مطالعه بود. با این حال، سطح صدک ۹۵ عناصر سرب و منگنز (به‌ترتیب برابر با ۲۴/۵ و ۷/۵۲) در محدوده ریسک کم قرار داشت. از طرفی، مقادیر میانگین شاخص MERI عناصر از ترتیب نزولی آرسنیک < مس < سرب < منگنز تبعیت کرد. علاوه بر این، ۱۰۰ درصد مقادیر MERI در محدوده نمونه‌برداری بزرگ‌تر از حد آستانه (۱۰۰) و بیان‌گر بروز ریسک بوم‌شناختی خیلی شدید در منطقه مورد مطالعه بود (شکل ۴).

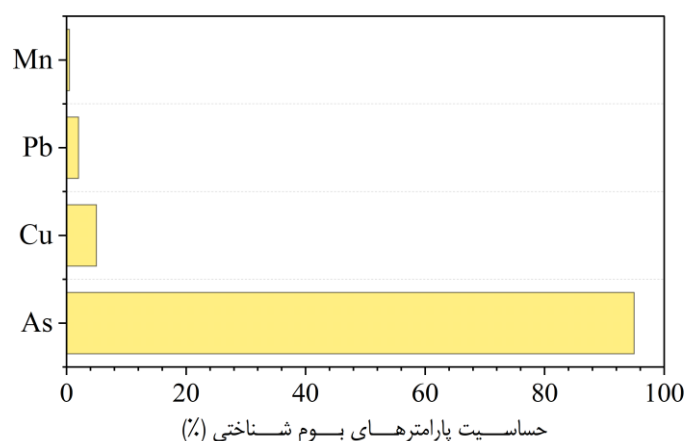
نتایج ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر مبتنی بر مدل تصادفی

در این پژوهش، از شبیه‌سازی مونت کارلو به‌منظور تخمین دقیق‌تر ریسک بوم‌شناختی در منطقه مورد مطالعه بر اساس ارزیابی ریسک تصادفی استفاده شد. لازم به‌ذکر است که این رویکرد با ارائه توصیف آماری از احتمال وقوع مخاطرات محیط‌زیستی در فواصل اطمینان ۵ تا ۹۵ درصد درک جامع و بهتری از اثرات آلودگی عناصر سمی خاک بر سلامت بوم‌سازگان فراهم می‌کند. در این خصوص، صدک ۹۵ ریسک بوم‌شناختی، عامل مهم پردازش ریسک تصادفی محسوب می‌شود. نتایج به‌دست آمده از توزیع احتمال فاکتور ریسک بوم‌شناختی نشان داد که سطح صدک ۹۵ شاخص MERI برای



شکل ۴- ریسک بوم‌شناختی تصادفی ناشی از عناصر مورد مطالعه در خاک شهری همدان و توزیع احتمال ریسک.
Figure 4. Stochastic ecological risks posed by tested elements in urban soils of Hamedan and probability distribution of risk

با استناد به نتایج پردازش حساسیت پارامترها (شکل ۵)، عنصر آرسنیک با بیش‌ترین تأثیر بر شاخص MERI آلاینده اصلی بروز ریسک بوم‌شناختی در منطقه مورد مطالعه بود.



شکل ۵- پردازش حساسیت پارامترهای ریسک بوم‌شناختی.
Figure. 5. Sensitivity analysis of ecological risk parameters.

تحلیل عملکرد و دقت مدل‌های قطعی و تصادفی ارزیابی ریسک بوم‌شناختی

در این پژوهش، ارزیابی و مقایسه عملکرد دو مدل ارزیابی ریسک بوم‌شناختی (قطعی و تصادفی) با استفاده از

انحراف معیار، واریانس و ضریب تغییرات به‌عنوان معیارهای عملکرد انجام شد (جدول ۳). بر این اساس، بیشینه مقدار انحراف معیار مربوط به مدل قطعی بود. در همین حال، مقادیر واریانس و ضریب تغییرات نیز الگوی مشابهی را نشان دادند.

جدول ۳- مقایسه عملکرد مدل‌های ارزیابی ریسک بوم‌شناختی قطعی و احتمالی.

Table 3. Comparison of performance of deterministic and probabilistic ecological risk assessment models.

پارامتر آماری Statistical parameter			مدل Model
ضریب تغییرات Coefficient of variability	واریانس Variance	انحراف معیار Standard deviations	
0.082	1456	38.2	قطعی Deterministic
0.077	1287	35.9	تصادفی Probabilistic

بحث

آلودگی خاک شهری به عناصر سمی به‌عنوان مخاطره بالقوه محیط‌زیستی و مانعی مهم برای توسعه پایدار شهری (به‌سبب نقش مهم خاک در ثبات اجتماعی، بوم‌شناختی و اقتصادی) توجه گسترده‌ای را به‌خود جلب کرده است. در این خصوص، تعیین محتوی عناصر سمی خاک شهری به‌عنوان اقدام مهم و ضروری برای تدوین و توسعه راهبردها و برنامه‌های نظارتی مناسب و کارآمد برای پیشگیری، کنترل و کاهش مؤثر آلودگی، سالم‌سازی و مدیریت جامع زیست‌بوم شهری حائز اهمیت ویژه‌ای بوده و به‌طور فزاینده مورد توجه قرار گرفته است (Binner et al., 2023; Liao et al., 2025; Wang et al., 2025). نتایج مربوط به تعیین مقادیر عناصر بیان‌گر تمایز در محتوی عناصر خاک بین مناطق عملکردی مختلف بود، به‌طوری‌که بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک و مس

مربوط به مناطق صنعتی و بیشینه میانگین محتوی عناصر سرب و منگنز مربوط به کاربری تجاری و بیان‌گر تأثیر قابل توجه ورودی‌های انسان‌پدید ناشی از تنوع و تفاوت منابع انتشار عناصر بود. به‌طور کلی، انتشارات ناشی از احتراق سوخت فسیلی (گاز طبیعی، نفت و گازوئیل) مرتبط با تأمین انرژی در صنایع مختلف و همچنین گرمایش ساختمان‌ها از منابع عمده و مهم انتشار عنصر آرسنیک در زیست‌بوم شهری به‌شمار می‌آید (Men et al., 2019; Sobhanardakani and Hosseini, 2026b). از طرفی، مس شاخص اصلی فعالیت‌های صنعتی و عناصر سرب و منگنز نیز ردیاب‌های مهم و اصلی انتشارات ترافیکی محسوب می‌شوند (Sobhanardakani et al., 2016; Hosseini and Sobhanardakani, 2023; Akbarimorad et al., 2024b). از این‌رو، افزایش محتوی عناصر آرسنیک و مس در مناطق صنعتی را می‌توان با انتشارات ناشی از فعالیت صنایع کوچک

حاصل افزون بر این که مؤید آلودگی خاک به عناصر مورد ارزیابی در شهر همدان است، می‌تواند بیان‌گر تأثیر فعالیت‌های مختلف شهری بر ریسک بوم‌شناختی عناصر مورد ارزیابی باشد. در این خصوص و نظر به بیشینه محتوی عناصر مورد مطالعه در کاربری‌های تجاری و صنعتی، افزایش غلظت این عناصر در آینده می‌تواند منجر به بروز تهدیدات بالقوه مضر محیط‌زیستی شود. از این‌رو، اقدامات نظارتی و کنترلی به‌منظور کاهش انتشار و ریسک محیط‌زیستی عناصر بالقوه سمی به‌ویژه در مناطق تجاری و صنعتی ضروری است. در مطالعات مشابه، Yaghoubi و همکاران (۲۰۲۲) و Li و همکاران (۲۰۲۵a) نیز با استناد به تغییرات مکانی میانگین مقادیر شاخص ریسک بوم‌شناختی عناصر آرسنیک، سرب و مس به‌ترتیب در خاک شهرهای تهران و لائو (چین)، بیش‌ترین ریسک بوم‌شناختی عناصر را مرتبط با مناطق تجاری و صنعتی و ناشی از فعالیت‌های شهری گزارش کردند. نتایج ارزیابی رابطه بین عناصر و شاخص MERI نشان داد که عنصر آرسنیک با اختصاص $81/5\%$ از کل مقادیر شاخص، عامل اصلی بروز مخاطرات بوم‌شناختی در منطقه مورد مطالعه بوده است. در این خصوص می‌توان اذعان داشت که آرسنیک مهم‌ترین و نگران‌کننده‌ترین آلاینده در خاک شهر همدان است. بر این اساس، توجه به محتوای آرسنیک و شناسایی منشأ انتشار این عنصر برای کاهش ریسک محیط‌زیستی ناشی از آلاینده‌های خاک شهری در منطقه مورد مطالعه ضروری است. در این خصوص و به‌منظور بهبود و حفاظت از سلامت بوم‌سامانه شهری نسبت به تدوین و توسعه برنامه‌ها و راهبردهای پایش و کنترل منابع اصلی انتشار این عنصر از جمله احتراق سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی و همچنین پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک به‌ویژه در مناطقی با سطح غنی‌شدگی زیاد توصیه می‌شود. در پژوهش مشابه، Liu و همکاران (۲۰۲۵) با استناد به میانگین مقادیر شاخص ریسک بوم‌شناختی تجمعی عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز در خاک داتونگ (چین)، ریسک بوم‌شناختی عناصر را "خیلی شدید" گزارش و عنصر آرسنیک را به‌عنوان عامل اصلی بروز ریسک معرفی کردند. همچنین، Lotfi و همکاران (۲۰۲۴) و Li و همکاران (۲۰۲۵b) نیز با ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر آرسنیک، سرب و مس در خاک نورالدین‌آباد شهرستان گرمسار و جینچانگ (چین)، آرسنیک را به‌عنوان آلاینده دارای اولویت برای کنترل و مدیریت ریسک معرفی کردند. شبیه‌سازی مونت کارلو به‌عنوان ابزار مؤثر و مفید در کاهش عدم قطعیت‌های مرتبط با فرآیند ارزیابی ریسک، رویکردی مناسب در ارزیابی تصادفی ریسک بوم‌شناختی محسوب می‌شود (Xie et al., 2024; Zhang et al., 2025). نتایج ارزیابی ریسک

محلی به‌ویژه کارگاه‌های نقاشی و تعمیرات خودرو، آبکاری و جوشکاری فلزات و همچنین تولیدات چرمی و پلاستیکی در منطقه مورد مطالعه مرتبط دانست. از طرفی، بیشینه میانگین محتوی عناصر سرب و منگنز در کاربری تجاری واجد حجم زیاد ترافیک شهری می‌تواند مؤید سهم قابل قبول انتشارات ترافیکی ناشی از منابع غیراحتراقی (نشت روان‌کننده‌ها و ذرات حاصل از استهلاک و فرسایش لنت ترمز و بدنه خودرو) و احتراقی باشد. در مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، Cai و همکاران (۲۰۱۹)، Goncharov و همکاران (۲۰۲۴)، Plak و همکاران (۲۰۲۵) و Shing و همکاران (۲۰۲۵) نیز بیش‌ترین محتوی عناصر آرسنیک، سرب و مس به‌ترتیب در خاک هوآلیا (چین)، یوفا (روسیه)، لوبلین و تورون (لهستان) و ناگپور (هند) را برای نمونه‌های برداشت شده از مناطق تجاری و صنعتی و متأثر از فعالیت‌های فرآوری فلزات، تولید رنگدانه، پلاستیک، نساجی و حمل‌ونقل شهری گزارش کردند. همچنین، Mirzaei و همکاران (۲۰۲۳)، Degvekar و همکاران (۲۰۲۵)، Kasimov و همکاران (۲۰۲۵) و Lan و همکاران (۲۰۲۶) با استناد به تغییرات مکانی محتوی عناصر به‌ترتیب در خاک آران و بیدگل (ایران)، مانیپال (هند)، مسکو (روسیه) و لائو (چین) اذعان داشتند که تنوع و تفاوت منابع انسان‌پدید به‌ویژه فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر محتوی عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز در خاک سطحی بوده است. کمی‌سازی و ارزیابی ریسک بالقوه بوم‌شناختی ابزار مفید برای شناسایی سطوح آلودگی و تدوین سیاست‌های مؤثر حفاظت از محیط‌زیست محسوب می‌شود (Arıman and Balkaya, 2025). نتایج ارزیابی ریسک بوم‌شناختی برای عناصر مورد مطالعه مبتنی بر مدل قطعی نشان داد که میانگین مقادیر شاخص MEr برای عنصر آرسنیک بزرگ‌تر از ۳۲۰ و بیان‌گر بروز ریسک بوم‌شناختی خیلی شدید ناشی از خاک آلوده به این عنصر بود. این در حالی است که میانگین مقادیر این شاخص برای عناصر سرب، مس و منگنز سطح ریسک کم تا متوسط را نشان داد. یافته‌ها نشان داد عناصری با ضریب فاکتور سمیت یا غنی‌شدگی بیش‌تر، مقادیر MEr بیش‌تری را به‌خود اختصاص داده‌اند که با یافته پژوهش Chakraborty و همکاران (۲۰۲۴) و Saha و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت دارد. همچنین، نتایج برآورد MERI که به‌عنوان شاخص نرمال شده در برابر یک عنصر مرجع برای تخمین مؤثر تأثیر محیط‌زیستی آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی بر خاک در زیست‌بوم شهری مورد استفاده گرفت، سطح ریسک بوم‌شناختی خیلی شدید در محدوده نمونه‌برداری را نشان داد. در همین حال، بیشینه میانگین مقدار شاخص MERI با نمونه‌های برداشت‌شده از مناطق تجاری مرتبط بود. یافته‌های

هدفمند در سناریوهای مختلف مدیریت محیط‌زیستی مورد استفاده قرار گیرد. در این خصوص، Sobhanardakani و Hosseini (۲۰۲۶a) نیز با ارزیابی و مقایسه عملکرد و دقت مدل‌های قطعی و تصادفی ارزیابی ریسک سلامت برخی عناصر بالقوه سمی، افزایش دقت و عملکرد مرتبط مدل‌سازی ریسک تصادفی در مقایسه با رویکرد قطعی را گزارش کردند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف کمی‌سازی ریسک بوم‌شناختی عناصر آرسنیک، سرب، مس و منگنز در خاک شهری همدان مبتنی بر مدل‌های قطعی و تصادفی، تعیین اولویت عوامل کنترلی در مدیریت ریسک عناصر و مقایسه عملکرد و دقت دو مدل مذکور انجام شد. نتایج بیان‌گر تأثیر قابل‌توجه فعالیت‌های ترافیکی و صنعتی بر محتوی عناصر در خاک منطقه مورد مطالعه بود. نتایج ارزیابی ریسک بوم‌شناختی بر اساس مدل‌های قطعی و تصادفی نشان‌دهنده بروز ریسک خیلی شدید در محدوده نمونه‌برداری بود. از طرفی، عنصر آرسنیک با بیش‌ترین تأثیر بر شاخص ریسک بوم‌شناختی به‌عنوان مهم‌ترین آلاینده مسئول و عامل کلیدی مؤثر بر ریسک بوم‌شناختی عناصر سمی خاک در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. از طرفی، مدل تصادفی در مقایسه با مدل قطعی به‌طور قابل‌توجهی دقت و عملکرد ارزیابی ریسک بوم‌شناختی را بهبود و افزایش داد. یافته‌ها با ارائه بینشی کامل از ریسک بوم‌شناختی ناشی از آلودگی عناصر در خاک شهری همدان، افزون بر این‌که می‌توانند مبنایی علمی برای کنترل و مدیریت مؤثر ریسک بوم‌شناختی مرتبط با عناصر بالقوه سمی خاک شهری در منطقه مورد مطالعه محسوب شوند؛ لزوم توجه به پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک و ارائه راهبردها و اقدامات پیشگیرانه و مدیریتی برای کاهش ریسک و تضمین نیل به توسعه پایدار شهری را نیز تأیید می‌کنند. در این خصوص، نظر به این‌که آرسنیک به‌عنوان آلاینده اصلی در بروز ریسک بوم‌شناختی شناخته شد؛ تعیین و اولویت‌بندی منشأ آلودگی و کنترل منابع انتشار این عنصر به‌عنوان اقدام ضروری و عملی برای حفظ سلامت بوم‌سامانه شهری مؤثر خواهد بود. همچنین، تدوین و اجرای برنامه‌های پایش و کنترل منظم با تمرکز بر محتوی عناصر سمی خاک شهری به‌عنوان یک رویکرد هشدار اولیه توصیه می‌شود. از طرفی، نظر به افزایش دقت و بهبود عملکرد مدل ریسک تصادفی در مقایسه با مدل قطعی، استفاده از رویکرد تصادفی به‌عنوان جایگزین مناسب رویکرد قطعی برای ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی و بهداشتی پیشنهاد می‌شود. در نهایت، از آن‌جا که اجرای این پژوهش با محدودیت‌های زمانی و منابع

بوم‌شناختی مبتنی بر مدل تصادفی نشان داد که ۶۲/۵ درصد مقادیر شاخص MEr برای آرسنیک بزرگ‌تر از حد آستانه (۳۲۰) و بیان‌گر بروز ریسک بوم‌شناختی خیلی شدید در منطقه مورد مطالعه بود. با این حال، توزیع احتمال شاخص ریسک MEr برای عنصر مس نشان داد که ۷۷/۰ درصد از مقادیر ریسک در محدوده ریسک "متوسط" و ۱۰۰ درصد مقادیر شاخص MEr برای عناصر سرب و منگنز در محدوده "کم" بود. به‌طور کلی، نتایج ارزیابی ریسک بوم‌شناختی تصادفی نیز تأیید کرد که ریسک محیط‌زیستی ناشی از عناصر مورد مطالعه در محدوده خیلی شدید بود. نتایج پردازش حساسیت پارامترها نشان داد که عنصر آرسنیک با بیش‌ترین تأثیر بر شاخص ریسک بوم‌شناختی، مهم‌ترین عامل کلیدی مؤثر بر ریسک بوم‌شناختی عناصر سمی خاک در منطقه مورد مطالعه بود. یافته‌ها افزون بر این‌که بیان‌گر همگرایی دو مدل قطعی و تصادفی بود، بر لزوم نظارت هدفمند بر منابع انتشار و محتوی آرسنیک برای کاهش مؤثر تهدیدات محیط‌زیستی آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی در شهر همدان تأیید کرد. در پژوهش مشابه، Li و همکاران (۲۰۲۴) نیز با ارزیابی ریسک بوم‌شناختی عناصر آرسنیک، مس و سرب خاک در حوضه رودخانه زرد چین مبتنی بر مدل‌های قطعی و تصادفی اذعان داشتند که رتبه‌بندی ریسک عناصر و شناسایی عامل کلیدی مؤثر بر ریسک بین دو مدل مورد ارزیابی سازگار بوده است. از دیگر سو، Li و همکاران (۲۰۲۵a) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند.

انحراف معیار، واریانس و ضریب تغییرات به‌عنوان معیارهای عملکرد، ابزارهای مهم و مناسب ارزیابی و مقایسه عملکرد و دقت مدل‌های قطعی و تصادفی ارزیابی ریسک بوم‌شناختی/بهداشتی محسوب می‌شوند (Vesković and Onjia, 2025). نتایج نشان داد که بیشینه مقدار انحراف معیار مربوط به رویکرد قطعی بود که نشان‌دهنده دقت بهبود یافته در ارزیابی ریسک تصادفی است. در همین حال، مقادیر واریانس و ضریب تغییرات نیز الگوی مشابهی را نشان دادند، به‌طوری‌که رویکرد تصادفی در مقایسه با رویکرد قطعی با کاهش مقادیر واریانس و ضریب تغییرات منجر به کاهش تغییرپذیری شد. با استناد به نتایج می‌توان اذعان داشت که استفاده از رویکرد تصادفی به‌طور قابل‌توجهی دقت مدل ارزیابی ریسک بوم‌شناختی را بهبود می‌بخشد. این افزایش دقت مرتبط با مدل‌سازی ارزیابی ریسک بوم‌شناختی تصادفی می‌تواند منجر به عملکرد بهتر آن نسبت به رویکرد قطعی و ارائه نتایج قابل‌اطمینان‌تر شود. به‌طور کلی، یافته‌ها تأکید می‌کنند که رویکرد تصادفی به‌سبب ارائه نتایج قابل‌اطمینان می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری آگاهانه و توسعه راهبردهای مؤثر و

مالی مواجه بود، مطالعه سایر عناصر بالقوه سمی، منشاء‌یابی منابع آن‌ها و ارزیابی ریسک سلامت مرتبط با عناصر می‌تواند برای تضمین توسعه پایدار شهری همدان مفید واقع شود.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان از معاونت پژوهش و فناوری واحد همدان دانشگاه آزاد اسلامی برای فراهم کردن شرایط اجرای پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی ندارند.

References

1. Afolabi, O.O., Wali, E., Asomaku, S.O., Olushola, I.T., Ogbuehi, N.C., Bosco-Abiahu, L.C., Orji, M.C. and Emelu, V.O., 2023. Ecotoxicological and health risk assessment of toxic metals and metalloids burdened soil due to anthropogenic influence. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5, pp. 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2022.12.002>
2. Akbarimorad, S., Sobhanardakani, S., Hosseini, N.S. and Martín, D.B., 2024a. *Pinus eldarica* (L.) bark as urban atmospheric trace element pollution bioindicator: Pollution status, spatial variations, and quantitative source apportionment based on positive matrix factorization receptor model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196 (8), pp.771. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12929-z>
3. Akbarimorad, S., Sobhanardakani, S., Martín, D.B. and Hosseini, N.S., 2024b. Contamination features and quantitative source apportionment of potentially toxic elements in the urban surface soil, the case of Hamedan, west of Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 113, pp. 54. <https://doi.org/10.1007/s00128-024-03964-0>
4. Arıman, S. and Balkaya, N., 2025. Spatial and seasonal assessment of heavy metal contamination in Golden Horn sediments, İstanbul, Türkiye: Ecological impacts, human health risks, and environmental monitoring. *Journal of Contaminant Hydrology*, 275, pp.104696. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2025.104696>
5. Binner, H., Sullivan, T., Jansen, M.A.K. and McNamara, M.E., 2023. Metals in urban soils of Europe: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 854, pp. 158734. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158734>
6. Birke, M., Rauch, U. and Hofmann, F., 2018. Tree bark as a bioindicator of air pollution in the city of Stassfurt, Saxony-Anhalt, Germany. *Journal of Geochemical Exploration*. 187, pp. 97-117. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.09.007>
7. Cai, L.M., Jiang, H.H. and Luo, J., 2019. Metals in soils from a typical rapidly developing county, Southern China: levels, distribution, and source apportionment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, pp.19282-93. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05329-1>
8. Chakraborty, P., Singh, S., Hazra, B., Majumdar, A.S. and Kumari, J., 2024. Spatial distribution, source apportionment, and health risks assessment of trace elements in pre-and post-monsoon soils in the coal-mining region of North Karanpura basin, India. *Science of the Total Environment*, 955, pp. 177173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177173>
9. Chen, M., Ma, L.Q., 2001. Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty Florida soils. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), pp.491-9. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652491x>
10. Chen, L., Xie, M., Li, G., Lin, S., Wang, D., Li, Z., Wang, Y. and Wang, Z., 2025. A spatial source-oriented and probability-based risk-assessment framework for heavy metal and PAH contamination of urban soils in Guangzhou, China. *Journal of Hazardous Materials*, 482, pp.136500. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136500>
11. Degvekar, J.V., Gadekar, E.U., Darshana, O., Chand, J., Amrishi, V.N., Jose, J., Priya, K., Prabhu, S. and Warriar, A.K., 2025. Tracking soil health and potentially toxic elements (PTEs) across land-use types using physico-chemical, magnetic, and geochemical proxies: a case study from Manipal, Southwestern India. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(9), pp. 397. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02665-9>
12. Fei, X., Lou, Z., Sheng, M., Xiaonan, L., Ren, Z. and Xiao, R., 2024. Source-oriented stochastic health risk assessment of toxic metals in soil via a hybrid model and Monte Carlo simulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 286, pp. 117209. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117209>
13. Ghanavati, N., Nazarpour, A. and Babaenejad, T., 2019. Assessing the ecological and health risks of some heavy metals in roadside soil of Ahvaz. *Journal of School of Public Health and Institute of Public Health Research*, 2019, 16 (4), pp. 373-390. <http://sjsph.tums.ac.ir/article-1-5707-en.html>. (In Persian)
14. Goncharov, G., Soktoev, B., Farkhutdinov, I. and Matveenkov, I., 2024. Heavy metals

- in urban soil: Contamination levels, spatial distribution and human health risk assessment (the case of Ufa city, Russia). *Environmental Research*, 257, pp. 119216. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119216>
15. Guan, Q., Liu, Z., Shao, W., Tian, J Luo, H., Ni, F. and Shan, Y., 2022. Probabilistic risk assessment of heavy metals in urban farmland soils of a typical oasis city in northwest China. *Science of the Total Environment*, 833 (10), pp.155096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155096>
16. Han, Y. and Gu, X., 2023. Enrichment, contamination, ecological and health risks of toxic metals in agricultural soils of an industrial city, northwestern China. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 3, pp. 100043. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2022.100043>
17. Han, X., Xu, W. and Zhou, J., 2026. The impact of artificial intelligence innovation networks on collaborative governance of urban pollution reduction and carbon reduction. *Journal of Innovation & Knowledge*, 14, pp. 100926. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100926>
18. Hosseini, N.S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. and 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), pp.13301–14. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07874-6>
19. Hosseini, N.S., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. and 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), pp.1611–24. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03183-8>
20. Hosseini, N.S. and Sobhan Ardakani, S., 2023. Assessment of level and source identification of heavy metals in the surface soil of the roadside: A case study. *Journal of Research in Environmental Health*, 9(2), pp. 197-214. <https://doi.org/10.22038/jreh.2023.66952.1537>. (In Persian)
21. Hosseini, N.S. and Sobhanardakani, S., 2024. 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*, 104 (17):5962–85. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2135997>
22. Islam S, Akbor, M.A., Chowdhury, F.N., Hasan, M., Nahar, A., Siddique, M.A.B., Moniruzzaman, M., Reza, M.S., Muhib M.I. and Rahman, M.M., 2024. Heavy metals in commonly consumed rice grains in Bangladesh and associated probabilistic human health risks. *Heliyon*, 10(21):e39561. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39561>
23. Juste Ruiz, J., 2020. The process towards a Global Pact for the Environment at the United Nations: From legal ambition to political dilution. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 29(3), pp. 479-490. <https://doi.org/10.1111/reel.12331>
24. Kasimov, N.S., Vasil'chuk, J.Y., Tereshina, M.A., Chalov, S.R., Erina, O.N., Kosheleva, N.E., Shinkareva, G., Sokolov, D.I., Vlasov, D. and Konoplev, A.V., 2025. Metals and metalloids pollution levels, partitioning, and sources in the environmental compartments of a small urban catchment in Moscow megacity. *Environmental Pollution*, 367, 125552. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125552>
25. Lan, Y., Li, Y., Liu, K., Chen, L., Huang, H., Cheng, X., Ye, Z., Jiang, Y. and Wang, M., 2026. Isotopic tracing of lead for source-specific probabilistic health risk assessment of heavy metals in soils of Lanzhou, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 282, pp.107964. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2025.107964>
26. Li, J., Li, X., Wang, C., Liu, J., Gao, Z., Li, K., Tuo, X. and Zang, F., 2024. Pollution characteristics and probabilistic risk assessment of heavy metal(loid)s in agricultural soils across the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 167, pp. 112676. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112676>
27. Li, J., Lu, J. Y., Tuo, X. Y., Wang, C., Liu, J. Z., Gao, Z. D., Yu, C.H. and Zang, F., 2025a. Machine learning-based source apportionment and source-oriented probabilistic ecological risk assessment of heavy metals in urban green spaces.

- Ecotoxicology and Environmental Safety*, 302, pp.118714. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118714>
28. Li, J., Li, X., Tai, X. S., Tuo, X. Y., Zhou, F. Y., Rong, Y. J. and Zang, F., 2025b. Machine learning-assisted source identification and probabilistic ecological-health risk assessment of heavy metal (loid)s in urban park soils. *Scientific Reports*, 15(1), pp. 17451. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02307-1>
29. Li, X., Kang, C., Xi, J., Liu, M., Zhang, J. and Yin, Z., 2026. Source identification and probabilistic health risk systematic assessment of soil metals and metalloids pollution in a typical coal-industrial city in Weibei, China. *Scientific Reports*, 16, pp. 6453. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-37561-4>.
30. Liao, R., Shi, Z., Cheng, K., Zhang, N., Jin, G., Wang, D., Lin, K., Yang, L., Zhang, K. and Zhang, J., 2025. Three-dimensional assessment of heavy metal contamination in soil affected by urbanization at the urban-rural interface of Chengdu. *Emerging Contaminants*, 11(2), pp. 100482. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2025.100482>
31. Liu, Y., Chen, H., Zhang, Z. and Wang, J., 2024. Development of an integrated framework for dissecting source-oriented ecological and health risks of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 364, pp. 143299. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143299>
32. Liu, Y., Guo, W. and Wu, Y., 2025. Source-oriented health risk assessment of heavy metals in soil and dust at coal resource-based urban parks in northern China based on bioaccessibilities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 297, pp. 118252. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118252>
33. Liu, X., He, Y., Guo, G., Liu, X. and Cao, Y., 2026. Spatiotemporal distribution of soil heavy metals and source-specific probabilistic risk assessment in arid gold mining cluster areas of northwest China. *Journal of Environmental Sciences*, 165, pp. 545-556. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2026.02.053>
34. Lotfi, Z., 2024. Identification and ecological risk assessment of heavy metals in the surface soil of Nuruddin abad in Garmsar. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 14(1), pp. 29-49. <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2024.20705.2080>. (In Persian)
35. Maitituersun, B., Ma, L., Li, Y., Kong, L., Zeng, T., Liu, W. and Abuduwaili, J., 2026. Dustfall source-apportionment and source-oriented health risk assessment using unsupervised machine learning, PMF, and HYSPLIT: Insights from a hotspot area in Xinjiang, China. *Journal of Hazardous Materials*, 502, pp.140634. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140634>
36. Men, C., Liu, R., Wang, Q., Guo, L., Miao, Y. and Shen, Z., 2019. Uncertainty analysis in source apportionment of heavy metals in road dust based on positive matrix factorization model and geographic information system. *Science of the Total Environment*, 652, pp.27-39. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.212>
37. Mirtamizdoost, M., Moghimi Kondolus, A., Salavti, M. and Mortazavi Amiri, S.J., 2023. Geochemical and environmental investigation of heavy metal contamination in the soils of the urban area of Esfahan. *Quaternary Journal of Iran*, 9 (1,2), pp. 108-130. <https://doi.org/10.22034/irqua.2023.709267>. (In Persian)
38. Mirzaei, R., Ravankhah, N., Masoum, S., Asadi, A. and Sorooshian, A., 2023. Assessment of land use effect, mapping of human health risks and chemometric analysis of potential toxic elements in topsoils of Aran-o-Bidgol, Iran. *Environmental Geochemistry Health System Research*, 45(11), pp. 8081-95. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01712-7>
39. Öncü, T., Yazman, M.M., Ustaoglu, F., Hristova, E. and Yüksel, B., 2025. Source dynamics and environmental risk of street dust as a vector of human exposure to potentially toxic elements in Istanbul, Türkiye. *Scientific Reports*, 15(1), pp. 30550. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11472-2>
40. Perrez, F. X., 2020. The role of the United Nations Environment Assembly in emerging issues of international environmental law. *Sustainability*, 12(14), pp. 5680.
41. Plak, A., Telecka, M., Charzyński, P. and Hanaka, A., 2025. Evaluation of hazardous element accumulation in urban soils of Cracow, Lublin and Torun (Poland): pollution and ecological risk indices. *Journal of Soils Sediments*, 25, pp. 510-32.

- https://doi.org/10.1007/s11368-024-03864-0
42. Proshad, R., Asha, S. A. A., Abedin, M. A., Chen, G., Li, Z., Zhang, S., Tan, R., Lu, Y., Zhang, X. and Zhao, Z., 2024. Pollution area identification, receptor model-oriented sources and probabilistic health hazards to prioritize control measures for heavy metal management in soil. *Journal of Environmental Management*, 369, pp. 122322. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122322>
43. Saha, A., Gupta, B.S., Patidar, S. Hernández-Martínez, J.L., Martín-Romero, F., meza-Fi Gueroa D., and Martínez-Villegas, N., 2024. A comprehensive study of source apportionment, spatial distribution, and health risks assessment of heavy metal (loid)s in the surface soils of a semi-arid mining region in Matehuala, Mexico. *Environmental Research*, 260, pp.119619. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119619>
44. Shen, C., Huang, S., Wang, M., Wu, J., Su, J., Lin, K., Chen, X., He, T., Li, Y., Sha, C. and Liu, M., 2024. Source-oriented health risk assessment and priority control factor analysis of heavy metals in urban soil of Shanghai. *Journal of Hazardous Materials*, 480, pp. 135859. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135859>
45. Singh, I., Jadhao, P.S. and Kumar, A.R., 2025. Occurrence, fractionation, and human health risk assessment of potentially toxic metals in urban soils of different land use types. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236, pp.183. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-07817-2>
46. Sobhanardakani, S., Ahmadi, M. and Zandipak, R., 2016. Efficient removal of Cu(II) and Pb(II) heavy metal ions from water samples using 2,4-dinitrophenylhydrazine loaded sodium dodecyl sulfate-coated magnetite nanoparticles. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 65(4), pp. 361-372. <https://doi.org/10.2166/aqua.2016.100>
47. Sobhanardakani, S. and Hosseini, N.S., 2026a. Modeling health risks from urban roadside soil toxic elements using two-dimensional Monte Carlo simulation paired with multiple linear regression. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 14 (2), pp. 121843. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121843>
48. Sobhanardakani, S. and Hosseini, N.S., 2026b. Quantitative source apportionment of potentially toxic elements input into the urban soils of Hamedan. *Advanced Environmental Sciences*, 23(4), pp. 879-896. <https://doi.org/10.48308/envs.2025.237077.1443>. (In Persian)
49. Upadhyay, V., Kumari, A. and Kumar, S., 2024. From soil to health hazards: Heavy metals contamination in northern India and health risk assessment. *Chemosphere*, 354, pp.141697. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141697>
50. Vesković, J. and Onjia, A., 2023. Influencing factors of groundwater ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K, and rare earth element contamination: Insights from the two-dimensional Monte Carlo simulation of radiological risks. *Marine Pollution Bulletin*, 213, pp. 117682. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117682>
51. Wang, S., Wang, L., Liao, X., Zhou, G., Huan, Y., Li, S. and Liang, T., 2025. Impact of residential density on heavy metal mobilization in urban soils: Human activity patterns and eco-health risks in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 302, pp. 118559. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118559>
52. Wu, J., Wang, H., Han, Z., Shu, Y., Huang, X., Zhong, Q., Li, R. and Fan, Z., 2025. Application of a PMF+ BMR hybrid model for source apportionment and ecological risk assessment of soil heavy metal (loid)s. *Journal of Hazardous Materials*, 495, pp.138734. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138734>
53. Xiao, M., Qian, L., Yang, B., Zeng, G. and Ren, S., 2024. Risk assessment of heavy metals in agricultural soil based on the coupling model of Monte Carlo simulation-triangular fuzzy number. *Environmental Geochemistry and Health*, 46, pp.62. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01866-y>
54. Xie, H., Shi, Y., Wang, L. Yan, H., Ci, M., Wang, Z. and Chen, Y., 2024. Source and risk assessment of heavy metals in mining-affected areas in Jiangxi Province, China, based on Monte Carlo simulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, pp. 21765–21780. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32554-0>

55. Yaghoubi, S.Z., Hosseini, S. A., Nabi Bidhendi, G.R. and Sharafati, A., 2022. Ecological risk assessment of heavy metals in the surface soil of selected parks in Tehran, based on sampling at year 1400. *Journal of Environmental Studies*, 48(2), pp. 179-196. <https://doi.org/10.22059/jes.2022.335276.1008262>. (In Persian)
56. Zhang, Z., Huang, S., Chen, H. and Wang, J., 2024. Deciphering the pollution risks, sources and their links of heavy metals in soils. *Science of the Total Environment*, 950, pp. 175331. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175331>
57. Zhang, Y., Huang, R. and Jiang, B., 2025a. Prioritizing soil heavy metal control based on source-specific probabilistic ecological-health risk assessment in industrial development areas of Shouguang, a typical agricultural city in China. *Environmental Geochemistry and Health*, 47, pp. 465. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02784-3>
58. Zhang, W., Xin, C., Du, W., Yu, S., 2025b. Health risk assessment of heavy metals based on source analysis and Monte Carlo in the Lijiang River Basin, China. *Ecological Indicators*, 176, pp.113620. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113620>
59. Zhu, Y., An, Y., Li, X., Cheng, L. and Lv, S., 2024. Geochemical characteristics and health risks of heavy metals in agricultural soils and crops from a coal mining area in Anhui province, China. *Environmental Research*, 241, pp.117670. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117670>