

Original Article

Quantitative source apportionment of potentially toxic elements input into the urban soils of Hamedan

Soheil Sobhanardakani^{1*}, Nayereh Sadat Hosseini¹

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

Introduction: The urban soil contamination with potentially toxic elements (PTEs) has elicited great public attention worldwide due to its potential threats to urban dwellers health and environmental sustainability. In this regard, identifying and quantifying the PTE pollution sources are of particular importance in urban soil pollution control as well as management and reduce potential environmental and health risk. Therefore, this research was conducted to identify and quantify of potentially toxic element sources (As, Pb, Cu, Mn, and Ni) in surface soil of Hamedan city in 2023.

Materials and methods: In this study, a total of 162 urban surface soil samples were collected from 18 sampling sites from three different functional regions (i.e. residential, commercial, 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). Additionally, the enrichment factor (EF) was calculated to assess the level of contamination and enrichment associated with these elements. Also, The Pearson's correlation coefficient (PCC), Principal Component Analyses (PCA), Hierarchical Cluster Analysis (HCA), and Absolute principal component score followed by multiple linear regression (APCS/MLR) model were utilized to identify and quantify the sources of soil PTEs pollution. Statistical analyses of data were done using SPSS software.

Results and discussion: The results from determining the content of the elements showed that the highest average content of As, Cu, and Ni (mg/kg) with 6.88, 30.9, and 24.3, respectively, were belonged to the industrial areas and for Pb and Mn with 31.2 and 293, respectively, were 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 EF value reflected "moderate" to "very severe" enrichment conditions in the study area. The results of source identifying based on the PCC, PCA, and HCA showed that the traffic emissions, industrial-geological emissions, and fossil fuel combustion have been three main sources of soil PTEs contamination in Hamedan city. The results obtained of the APCS/MLR model showed that the traffic emissions, industrial-geological emissions, and fossil fuel combustion accounted 56.0%, 30.0% and 14.0%, of contribution the PTE pollution in study area, respectively. Additionally, the results of determining the quantitative contribution of pollution sources for each PTEs represented that Pb and Mn mainly originated from traffic emissions; whereas, Cu and Ni emitted from industrial-geological emissions; meanwhile, As mainly derived from fossil fuel combustion emissions. Notably, the PTEs contamination in soil of city of Hamedan were mainly released from the anthropogenic origin (70.0%) and the traffic emissions as the primary pollution source (56.0%) had the highest contribution to the PTE pollution in study area.

Conclusion: Based on the results obtained, traffic was the major contribution sources of As, Pb, Cu, Mn, and Ni pollution in the soil of city of Hamedan; therefore, reducing the emission of elements from traffic sources is the most effective and necessary strategy of pollution control for maintaining the health of both the urban ecosystem and citizens. In this regard, optimize and improve of urban transportation is recommended for management and control policies and strategies, plan to create and develop special ways for public transportation, modernize the public transportation fleet using electric vehicles, and encourage citizens to use public transportation. In general, the results of this research emphasized the need to determine the quantitative contribution of pollution sources to facilitate the management and effective reduction of environmental pollutants.

Keywords: Urban soil, Inorganic pollutants, Traffic, Multivariate analysis, APCS/MLR model

کمی سازی سهم منابع انتشار عناصر بالقوه سمی خاک شهری همدان

سهیل سبحان اردکانی^{۱*}، نیره السادات حسینی^۱

۱- گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

*: مسئول مکاتبات، رایانامه: s_sobhan@iauh.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: آلودگی عناصر بالقوه سمی خاک شهری به عنوان تهدیدی بالقوه برای پایداری محیطی و سلامت شهروندان توجه گسترده ای را به خود جلب کرده است. در این خصوص، شناسایی منشأ و تعیین کمی سهم منابع آلودگی عناصر بالقوه سمی خاک به منظور پیشگیری، کنترل و مدیریت موثر آلودگی و به تبع آن کاهش عوامل بالقوه مخاطره آمیز محیط زیستی و بهداشتی از اهمیتی به سزا برخوردار است. از این رو، این پژوهش با هدف شناسایی منشأ و تعیین کمی سهم منابع آلودگی عناصر بالقوه سمی (آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل) خاک شهری همدان در سال ۱۴۰۲ انجام یافت.

مواد و روش ها: در این پژوهش توصیفی-مقطعی، در مجموع ۱۶۲ نمونه خاک سطحی از ۱۸ مکان نمونه برداری با کاربری های مختلف شهری (مسکونی، تجاری و صنعتی) برداشت شد. پس از آماده سازی و هضم اسیدی نمونه ها در آزمایشگاه، مقدار عناصر در آن ها به روش طیف سنجی نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) خوانده شد. مقادیر شاخص غنی شدگی (EF) نیز محاسبه شد. همچنین، نسبت به شناسایی منشأ و کمی سازی سهم منابع آلودگی عناصر با استفاده از آزمون های آماری همبستگی پیرسون (PCC)، تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA)، خوشه بندی سلسله مراتبی (HCA) و مدل امتیاز مؤلفه اصلی مطلق/گرسین خطی چندگانه (APCS/MLR) اقدام شد. داده ها نیز با استفاده از نرم افزار آماری SPSS مورد پردازش قرار گرفتند.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که بیشینه میانگین مقدار عناصر برای آرسنیک، مس و نیکل به ترتیب با ۶/۸۸، ۳۰/۹ و ۲۴/۳ میلی گرم در کیلوگرم مربوط به کاربری صنعتی و بیشینه میانگین محتوی عناصر سرب و منگنز به ترتیب با ۳۱/۲ و ۲۹۳ میلی گرم در کیلوگرم مربوط به کاربری تجاری و بیان گر تاثیر فعالیت ها و کاربری های مختلف شهری بر تغییرات مکانی محتوی عناصر بود. نتایج محاسبه شاخص EF بیان گر غنی شدگی "متوسط" تا "خیلی شدید" عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل در منطقه مورد مطالعه و مؤید تاثیر منابع انسان پدید بر مقدار و آلودگی عناصر مورد مطالعه بود. نتایج حاصل از آزمون های آماری تحلیل چندمتغیره (PCA، PCC و HCA) نشان داد که منابع ترافیکی، صنعتی-زمین زایی و احتراق سوخت فسیلی، منشأ عمده آلودگی عناصر فلزی/شبه فلزی خاک در شهر همدان بوده است. همچنین، نتایج مدل APCS/MLR بیان گر آن بود که منابع ترافیکی، صنعتی-زمین زایی و احتراق سوخت فسیلی به ترتیب ۵۶/۰٪، ۳۰/۰٪ و ۱۴/۰٪ از سهم آلودگی عناصر را به خود اختصاص داده اند. به علاوه، نتایج تعیین سهم کمی منابع آلودگی برای هر یک از عناصر نشان داد که سرب و منگنز به طور عمده از منابع ترافیکی، عناصر مس و نیکل از منابع صنعتی-زمین زایی و عنصر آرسنیک به طور عمده از انتشارات ناشی از احتراق سوخت فسیلی نشأت گرفته اند. به طور کلی، ورودی های انسان پدید با سهم نسبی ۷۰/۰٪، منشأ اصلی انتشار عناصر در منطقه مورد مطالعه بود و منابع ترافیکی با اختصاص ۵۶/۰٪ از سهم کل انتشار آلاینده های فلزی به عنوان منبع اصلی و عمده آلودگی عناصر مورد ارزیابی در خاک شهری همدان شناسایی شد.

نتیجه گیری: نتایج بیان گر سهم عمده منابع ترافیکی به عنوان منشأ اصلی آلودگی عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل در خاک شهر همدان بود؛ لذا، کاهش انتشار عناصر از منابع ترافیکی مؤثرترین و ضروری ترین راهبرد کنترل آلودگی برای حفظ سلامت زیست بوم شهری و شهروندان است. در این خصوص، بهینه سازی و بهبود سیاست ها و راهبردهای مدیریت و کنترل حمل و نقل شهری، برنامه ریزی برای ایجاد و توسعه مسیرهای ویژه برای حمل و نقل عمومی، نوسازی ناوگان حمل و نقل عمومی با استفاده از خودروهای برقی و ترغیب شهروندان در خصوص استفاده از وسایل نقلیه عمومی توصیه می شود. به طور کلی نتایج این پژوهش بر لزوم تعیین سهم کمی منابع آلودگی برای تسهیل در مدیریت و کاهش مؤثر آلاینده های محیطی تاکید دارد.

واژه های کلیدی: خاک شهری، آلاینده های معدنی، ترافیک، تحلیل چند متغیره، مدل APCS/MLR

مقدمه

در قرن حاضر، بروز و روند رو به رشد آلودگی‌های محیطی ناشی از انتشار فزاینده و مداوم آلاینده‌های مختلف به سبب توسعه مستمر شهرنشینی، افزایش تراکم جمعیت، و تمرکز و تعدد فعالیت‌های انسانی به یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی و بهداشتی بوم‌سامانه‌های شهری و مانعی مهم برای توسعه پایدار در این مناطق تبدیل شده است (Shokri Ragheb and Sobhanardakani, 2016; Kong et al., 2021; Shi et al., 2023). در میان انواع آلاینده‌های آلی و معدنی انتشار یافته در محیط شهری، عناصر بالقوه سمی به سبب تنوع و تعدد منابع انتشار، پایداری در محیط و سمیت، به عنوان تهدیدی بالقوه مضر برای پایداری محیطی و سلامت شهروندان توجه جهانی را به خود جلب کرده‌اند (Hosseini et al., 2020; Yan et al., 2024). در این خصوص، آلودگی خاک شهری با عناصر سمی به سبب پراکنش گسترده و ماندگاری طولانی عناصر در این ماتریس محیطی از اهمیتی ویژه برخوردار است (Hosseini et al., 2022; Han and Gu, 2023).

به طور کلی، ورود و انباشت عناصر سمی (با منشأ طبیعی و انسان‌پدید) در خاک شهری به عنوان مخزن اصلی ته‌نشست آلاینده‌ها نه تنها می‌تواند به کاهش کیفیت و آلودگی خاک منجر شود، بلکه می‌تواند به عنوان منبع بالقوه انتقال آلودگی، تهدید بالقوه غیرمستقیم برای سلامت بوم‌سازگان و شهروندان به شمار آید (Hosseini and Sobhanardakani, 2021; Selahvarzi et al., 2024; Li et al., 2024). افزون بر این، مواجهه مستقیم شهروندان با ذرات خاک آلوده (از طریق بلع، استنشاق و تماس پوستی) می‌تواند اثرات نامطلوب احتمالی عناصر بالقوه سمی بر سلامت شهروندان به ویژه کودکان را افزایش دهد (Hosseini and Sobhanardakani, 2022; Zheng et al., 2023; Laha et al., 2024). از این رو، تعیین مقدار این ترکیبات آلاینده در خاک شهری، به عنوان شاخص جامع کیفیت زیست‌بوم شهری، برای حفظ کیفیت بوم‌سامانه شهری و سلامت شهروندان به طور فزاینده مورد توجه قرار گرفته است.

اگرچه، ارزیابی کمی آلودگی مرتبط با آلاینده‌های فلزی خاک با استفاده از شاخص‌های آلودگی نقش مهمی در تعیین و تحلیل وضعیت آلودگی دارند، اما کنترل و مدیریت موثر آلودگی و به تبع آن کاهش عوامل بالقوه مخاطره‌آمیز محیط‌زیستی و بهداشتی مستلزم شناسایی و تعیین کمی سهم منابع آلودگی است. در این خصوص، آزمون‌های آماری چندمتغیره نظیر همبستگی (PCC)، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و خوشه‌بندی سلسله مراتبی (HCA) ابزارهای تشخیصی مفید برای شناسایی منشأ آلاینده‌ها به شمار می‌آیند (Sabet Aghlidi et al., 2020; Hosseini and Sobhanardakani, 2023a). از طرفی، مدل‌های گیرنده نظیر مدل امتیاز مؤلفه اصلی مطلق/رگرسیون خطی چندگانه (APCS/MLR) نیز ابزاری کارآمد و موثر برای کمی‌سازی سهم منابع انتشار عناصر محسوب می‌شوند (Deliboran et al., 2024; Liu et al., 2023). همچنین، تعیین تغییرات مکانی مقادیر و آلودگی عناصر بالقوه سمی خاک گامی اساسی و مهم برای تسهیل در شناسایی منشأ عناصر و ارائه راهبردهای محیط‌زیستی از طریق اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی است (Che et al., 2023; Pilková et al., 2024).

تاکنون در رابطه با کمی‌سازی سهم منابع آلودگی عناصر کمیاب در خاک شهری چندین مطالعه در شهرهای مختلف دنیا انجام شده است که در این خصوص می‌توان به پژوهش‌های Han et al. (2021) در موگان جمهوری آذربایجان، Shen et al. (2023) در ژنگزو چین، Wei et al. (2023) در کینگ‌یوان چین، Proshad et al. (2024) در ناریانگانج بنگلادش، Shen et al. (2024) در شانگهای چین، Saha et al. (2024) در متاهولا مکزیک و Sultana et al. (2024) در پاتواخالی، بارگونا و بولا بنگلادش اشاره کرد. اما، طبق بررسی سوابق، مطالعات متعددی در خصوص شناسایی منشأ آلودگی عناصر کمیاب در خاک شهرهای ایران از جمله سنندج (Saedpanah et al., 2018)، کرج (Fallah et al., 2020)، اراک (Bineshpour et al., 2021)، شهرکرد (Saffari et al., 2021)، زنجان (Pardakhti et al., 2022)، خرم‌آباد (Selahvarzi et al., 2023)، اراک (Taati et al., 2023) انجام شده است؛ این در حالی است که، در تعداد اندکی از آن‌ها مانند اصفهان (Mehr et al., 2017) و شیراز (Hoshyari et al., 2023) نسبت به کمی‌سازی سهم منابع آلودگی فلزی خاک شهری اقدام شده است. از این رو، با توجه به اهمیت و ضرورت تعیین کمی سهم منابع آلودگی عناصر کمیاب خاک شهری از یک سو، و نظر به توسعه شهری، صنعتی و افزایش حجم ترافیک در شهر همدان و بروز نگرانی‌های فزاینده مترتب از اثرات نامطلوب آلودگی احتمالی خاک بر کیفیت محیط و سلامت شهروندان، شناسایی و

کمی سازی سهم منابع آلودگی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهر همدان با هدف مدیریت مؤثر و کاهش آلایندهای فلزی حائز اهمیت ویژه است. این در شرایطی است که طبق بررسی سوابق، تاکنون مطالعه مشابهی در این خصوص در شهر همدان انجام نشده است، از این رو، این پژوهش با هدف شناسایی منشأ و کمی سازی سهم منابع آلودگی عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل در خاک کلان شهر همدان در سال ۱۴۰۲ انجام شد. همچنین، به منظور ارزیابی تاثیر فعالیتهای شهری بر محتوی عناصر در خاک و تسهیل در تعیین منشأ آنها، تغییرات مکانی مقدار عناصر نیز مورد بررسی قرار گرفت.

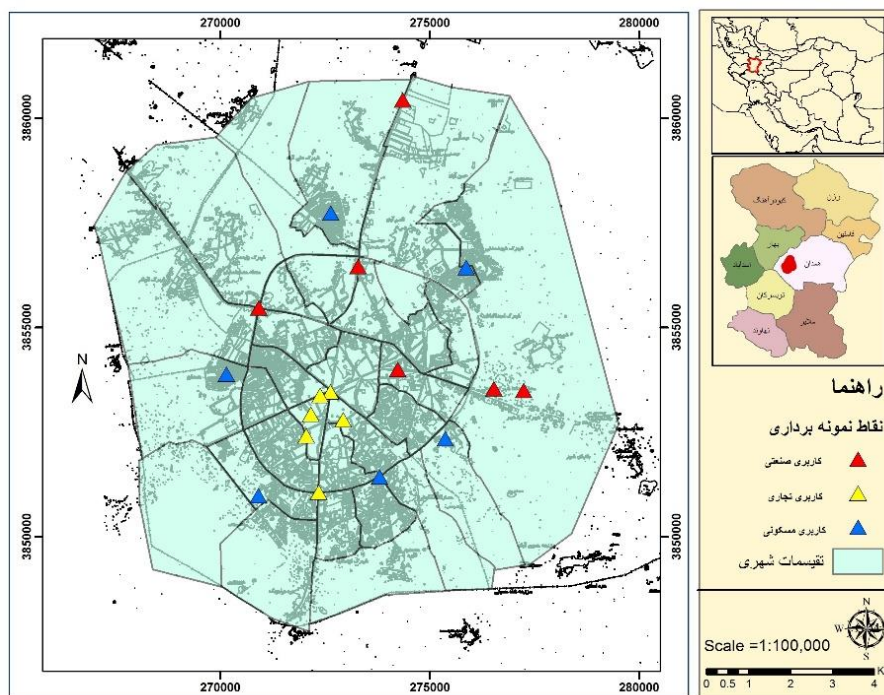
مواد و روش ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در شهر همدان (۴۷ تا ۴۹ درجه طول جغرافیایی شرقی و ۳۳ تا ۳۵ درجه عرض جغرافیایی شمالی) واقع در غرب ایران انجام شد. این منطقه با ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متر از سطح دریا، مساحت شهری به وسعت ۵۶ کیلومترمربع را دربر می گیرد و کل جمعیت آن در حدود ۶۵۰۰۰۰ نفر است. میانگین دمای سالانه و بارندگی این شهر به ترتیب برابر با ۱۱/۳ درجه سلسیوس و ۳۱۸ میلی متر ثبت شده است. شهر همدان به عنوان اولین قطب جمعیتی استان، به سبب رشد شهرنشینی، صنعتی، ساخت و ساز شهری، توسعه زیرساخت ها و برخورداری از شبکه حمل و نقل جاده ای و راه های ارتباطی مهم و همچنین افزایش حجم ترافیک درون شهری در معرض آلودگی محیط به ویژه از لحاظ مقدار عناصر بالقوه سمی قرار دارد (Hosseini et al., 2020).

نمونه برداری از خاک

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، پس از انجام مطالعه های اولیه میدانی و به منظور تعیین مقدار، تغییرات مکانی، ارزیابی غنی شدگی و شناسایی منشأ عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل، نسبت به نمونه برداری از خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی متری) در شهر همدان به روش تصادفی-طبقه ای اقدام شد. بر این اساس، با در نظر گرفتن کاربری های عمده شهری در منطقه مورد مطالعه و به منظور توزیع یکنواخت مکان های نمونه برداری، پس از طبقه بندی محدوده مورد مطالعه به سه منطقه عملکردی عمده شامل: مناطق مسکونی (واجد بیشترین سکونت گاه های شهروندان)، تجاری (واجد بیشترین حجم ترافیک) و صنعتی (واجد صنایع معمولی نظیر کارگاه های جوشکاری و آب کاری فلزات، تولید محصولات پلاستیکی و چرمی و کارگاه های تعمیر و نقاشی خودرو)، ۱۸ مکان نمونه برداری (۶ مکان از هر کاربری) به صورت تصادفی و با پراکنش مناسب انتخاب شد. لازم به ذکر است که در تعیین تعداد مکان های نمونه برداری و نمونه های خاک سطحی، محدودیت های مالی و زمانی پژوهش هم مدنظر قرار گرفتند. نمونه برداری در همه مکان ها در سه نوبت طی فصل تابستان ۱۴۰۲ انجام شد. به منظور ایجاد شرایط یکنواخت و کاهش عوامل مداخله گر احتمالی، نمونه ها در همه مکان ها در یک روز کاری با سه تکرار و بر اساس روش استاندارد با استفاده از بیلچه استیل برداشت شدند. به منظور تهیه یک نمونه همگن (یک کیلوگرمی) از هر مکان نمونه برداری، پنج نمونه خاک برداشت شده از هر مکان (مرکز و رئوس پلات مربعی به ضلع پنج متر) با یکدیگر مخلوط و در کیسه های پلی اتیلنی زیپ دار واجد برچسب ذخیره و برای پردازش های بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند (Birke et al., 2018; Upadhyay et al., 2024). از این رو، تعداد کل نمونه های خاک سطحی در مجموع ۱۶۲ عدد (۵۴ نمونه کاربری صنعتی، ۵۴ نمونه کاربری تجاری و ۵۴ نمونه کاربری مسکونی) بود. مختصات جغرافیایی مکان های نمونه برداری نیز توسط دستگاه موقعیت یاب مکانی (GPS) گارمین مدل Etre 32X ثبت شدند که موقعیت استقرار آنها در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت استقرار مکان‌های نمونه‌برداری
Fig. 1- Location of sampling sites

آماده‌سازی نمونه‌های خاک و تعیین مقدار 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 et al., 2022).

برای تعیین غلظت کل عناصر در نمونه‌های مورد مطالعه، ۰/۵۰۰ گرم از هر نمونه خاک سطحی را به‌طور مجزا به بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری منتقل کرده و پس از افزودن سه میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵٪ و ۹ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۳۰٪ به هر بشر، محلول‌ها در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس و به مدت سه ساعت بازروانی شدند. محلول‌ها پس از سرد شدن توسط کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف، به ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل و با آب دوبار تقطیر به حجم رسانده شد (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، مقدار عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل در نمونه‌ها خوانده شد. تضمین و کنترل کیفیت اندازه‌گیری‌ها نیز با استفاده از مرجع استاندارد خاک (SQC-001, Sigma-Aldrich, Spain) خریداری شده از شرکت سیگما-آلدریچ اسپانیا بررسی شدند. بر این اساس، مقادیر حد تشخیص برای عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۰۸۹، ۰/۰۳۸، ۰/۰۶۲، ۰/۰۷۱ و ۰/۰۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و مقادیر محدودیت کمی عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز برای این عناصر به ترتیب برابر با ۰/۲۶۱، ۰/۱۱۷، ۰/۱۷۹، ۰/۲۰۸ و ۰/۱۵۶ به دست آمدند. نتایج حاصل از درصد بازیابی عناصر مورد مطالعه (بین ۸۹/۷-۹۶/۳٪) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای تعیین مقدار عناصر بالقوه سمی از دقت مناسب برخوردار بوده است.

ارزیابی آلودگی خاک سطحی

در این پژوهش، به منظور ارزیابی سطح آلودگی هر یک از عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه و همچنین درک تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آلودگی خاک و تشخیص سهم آن‌ها از منابع زمین‌زاد و انسان‌پدید، نسبت به محاسبه شاخص غنی‌شدگی با استفاده از رابطه ۱ اقدام شد (Sobhan Ardakani and Hosseini, 2024; Mostafa et al., 2024):

(۱)

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

در رابطه ۱:

EF بیان‌گر شاخص غنی‌شدگی؛ $(C_s/C_r)_{\text{sample}}$ بیان‌گر نسبت غلظت عنصر مورد مطالعه به غلظت عنصر مرجع در نمونه خاک سطحی برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم و $(C_s/C_r)_{\text{background}}$ نیز نشان‌دهنده نسبت مقدار زمینه عنصر مورد مطالعه به مقدار زمینه عنصر مرجع در شیل (برابر با ۲/۰، ۳۴/۲، ۲۸/۳، ۸۵۰ و ۴۵/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل) است. در این مطالعه، عنصر آلومینیم با مقدار زمینه برابر با ۸۲۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دلیل فراوانی زیاد در پوسته، توزیع یکنواخت و تأثیرپذیری کم‌تر از فعالیت‌های انسانی به‌عنوان عنصر مرجع در نظر گرفته شد. مقادیر غنی‌شدگی بین ۰/۵۰ تا ۱/۵۰ نشان‌دهنده آن است که عنصر مورد ارزیابی از فرآیندهای زمین‌زاد نشأت گرفته است، در حالی که مقادیر بزرگ‌تر از ۱/۵۰ نشان‌دهنده تأثیر عوامل انسانی بر محتوی عناصر است (Gujre et al., 2021; Habibi et al., 2022). طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر شاخص EF در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص غنی‌شدگی (Saha et al., 2023)

Table 1. Enrichment index classification (Saha et al., 2023)

مقدار (ارزش)	طبقه توصیفی
Range	Descriptive class
$EF < 1$	بدون غنی‌شدگی No enrichment
$EF < 3$	غنی‌شدگی کم Lowly enrichment
$3 \leq EF < 5$	غنی‌شدگی متوسط Moderate enrichment
$5 \leq EF < 10$	غنی‌شدگی زیاد Moderate severe enrichment
$10 \leq EF < 25$	غنی‌شدگی شدید Severe enrichment
$25 \leq EF < 50$	غنی‌شدگی خیلی شدید Very severe enrichment
$EF \geq 50$	غنی‌شدگی فوق‌العاده شدید Extremely severe enrichment

مدل APCS/MLR

مدل APCS/MLR، به‌عنوان یکی از ابزارهای سنجش رابطه و مدل‌سازی بین متغیرهای مستقل و وابسته، رویکردی مناسب و مفید به‌منظور کمی‌سازی سهم منابع آلودگی و مشارکت آن‌ها در انتشار آلاینده‌های محیطی به‌ویژه عناصر کمیاب به‌شمار می‌آید. اصل مدل APCS-MLR بر مبنای محاسبه ماتریس عاملی چرخیده‌شده و مقادیر ویژه عوامل اصلی از طریق PCA است. سپس، رگرسیون خطی چندگانه (MLR) با لحاظ کردن امتیاز مؤلفه اصلی مطلق (APCS) به‌عنوان متغیر مستقل و محتوی آلاینده به‌عنوان متغیر وابسته برای محاسبه مقادیر کمی سهم منابع آلودگی شناسایی‌شده استفاده می‌شود. در این مدل، مقادیر سهم هر یک از منابع در انتشار آلاینده (عنصر فلزی) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Deng et al., 2024; Yan et al., 2024):

(۲)

$$C_k = b_k + \sum_{j=1}^n (b_{jk} \times APCS_{jk})$$

در رابطه ۲:

C_k نشان‌دهنده مقدار سهم منبع، b_k بیان‌گر مقدار ثابت رگرسیون خطی چندگانه، n و b_{jk} به ترتیب نشان‌دهنده تعداد عوامل و ضریب رگرسیون خطی چندگانه منبع j برای عنصر k ، $APCS_{jk}$ بیان‌گر امتیاز مؤلفه اصلی مطلق منبع j برای عنصر k و $b_{jk} \times APCS_{jk}$ نیز نشان‌دهنده سهم منبع j در محتوی عنصر k است (Peng and Yu., 2024).

پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۲۳ نرم‌افزار SPSS انجام شد. بدین‌صورت که برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد و فرض برابری واریانس‌ها نیز توسط آزمون لوین بررسی شد. از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه و آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌داری ۵٪ برای مقایسه میانگین غلظت عناصر بین کاربری‌های مختلف استفاده شد. همچنین، برای شناسایی رابطه بین عناصر و منابع بالقوه احتمالی آلودگی، روش‌های آماری تحلیل چندمتغیره شامل PCA، PCC، HCA مورد استفاده قرار گرفتند. به‌علاوه، سهم کمی منابع آلودگی عناصر مورد مطالعه با استفاده از مدل APCS/MLR تعیین شد.

نتایج و بحث

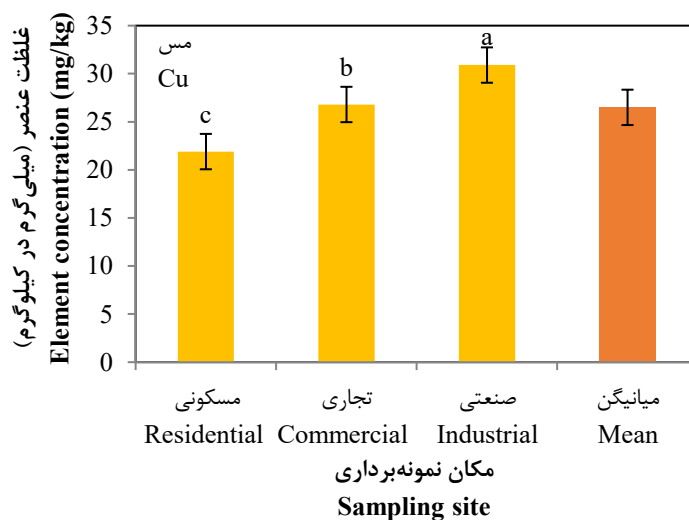
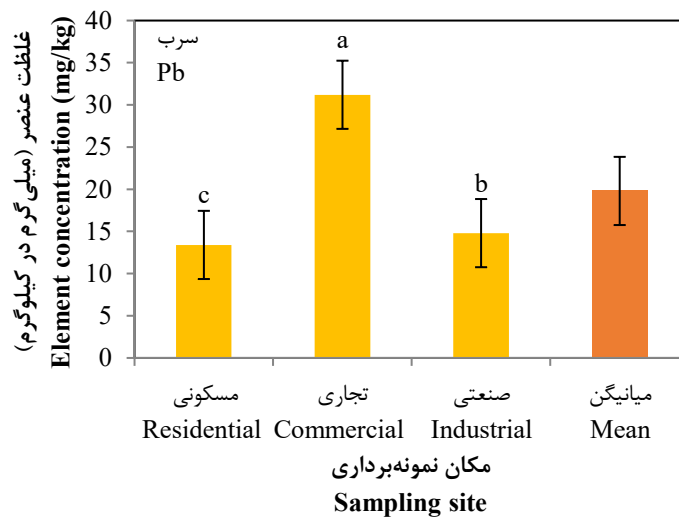
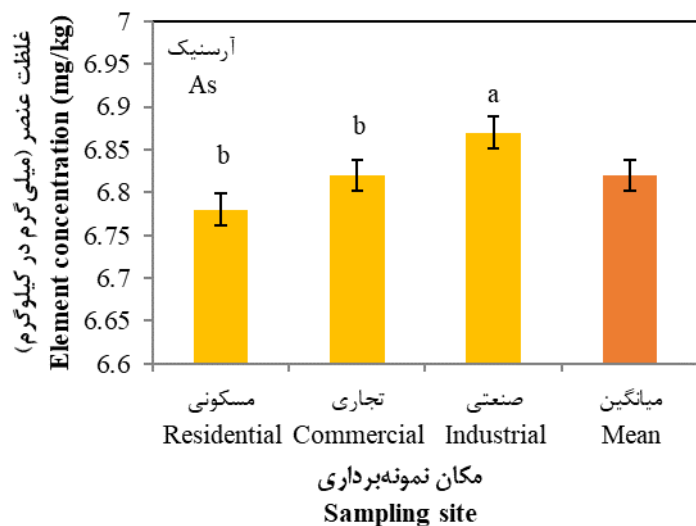
نتایج تعیین مقدار عناصر

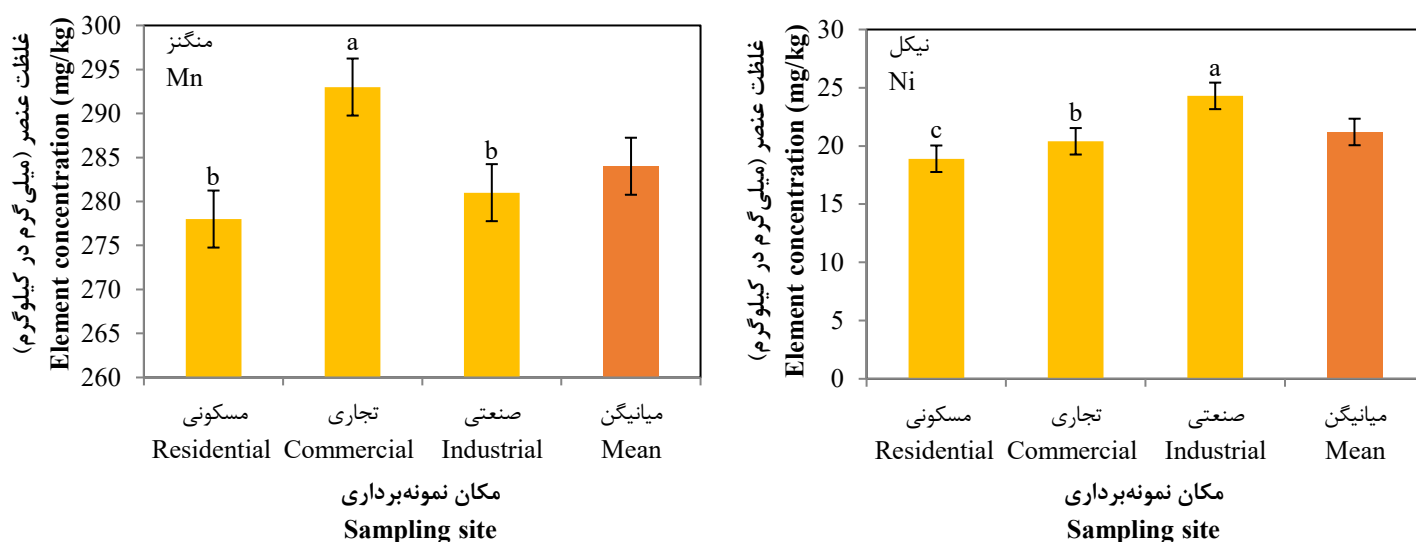
میانگین مقادیر قرائت شده عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های خاک سطحی در شکل ۲ آورده شده است. بر این اساس، کمینه و بیشینه میانگین مقدار عناصر مورد ارزیابی در خاک (همه کاربری‌ها) به ترتیب با ۶/۸۲ و ۲۸۴ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به عناصر آرسنیک و منگنز بود. از سوی دیگر، میانگین مقدار عناصر (همه کاربری‌ها) در نمونه‌ها از روند نزولی منگنز < مس < نیکل < سرب < آرسنیک تبعیت کرد. در این خصوص، می‌توان ادعا داشت که تنوع منشا عناصر عامل اصلی احتمالی مقدار متغیر عناصر در خاک سطحی منطقه مورد مطالعه بوده است. در مطالعات مشابه و در تایید نتایج حاصل، Li et al. (2022) و Tardani et al. (2023) نیز غلظت متغیر عناصر روی، سرب، کادمیم، کروم، مس و نیکل در خاک سطحی نانجینگ در چین و والدیو در شیلی را متأثر از تنوع منابع انتشار عناصر و شدت و تمرکز فعالیت‌های شهری گزارش کردند.

تغییرات مکانی مقدار عناصر

نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (شکل ۲) نشان داد که بین کاربری‌های مختلف از حیث میانگین مقدار عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل در نمونه‌های خاک اختلاف معنی‌دار آماری در سطح ۹۵٪ وجود داشته است. نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن نیز نشان داد که بیشینه میانگین غلظت عناصر آرسنیک، مس و نیکل به ترتیب با ۶/۸۸، ۳۰/۹ و ۲۴/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه‌های خاک سطحی جمع‌آوری شده از کاربری صنعتی بود. در همین حال، بیشینه میانگین مقدار عناصر سرب و منگنز به ترتیب با ۳۱/۲ و ۲۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به نمونه‌های خاک سطحی کاربری تجاری تعلق داشت. همچنین، کمینه میانگین مقدار عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل به ترتیب با ۶/۷۸، ۱۳/۴، ۲۱/۹، ۲۷۸ و ۱۸/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه‌های خاک سطحی جمع‌آوری شده از کاربری مسکونی بود. از طرفی، روند کاهشی میانگین مقدار عناصر آرسنیک، مس و نیکل برای کاربری‌های مختلف به‌صورت صنعتی < تجاری < مسکونی بود. این در حالی است که میانگین مقدار عناصر سرب و منگنز برای کاربری‌های مختلف از روند کاهشی تجاری < صنعتی < مسکونی تبعیت کرد. مقدار متمایز عناصر خاک در کاربری‌های مختلف می‌تواند بیان‌گر تأثیر قابل توجه ورودی‌های انسان‌پدید ناشی از تنوع و تفاوت منابع انتشار عناصر باشد که با یافته‌های تحقیقات مشابه قبلی مطابقت دارد (Gopal et al., 2024; Tardani et al., 2023; Lei et al., 2022). در این خصوص، بیشینه مقدار عناصر آرسنیک، مس و نیکل در کاربری صنعتی را می‌توان با انتشارات ناشی از فعالیت صنایع کوچک محلی نظیر فرآوری و جوشکاری فلزات، تولید محصولات چرمی، پلاستیکی، همچنین مراکز نقاشی و تعمیرات خودرو در منطقه مورد مطالعه مرتبط دانست. در پژوهش‌های Cai et al. (2019) و Goncharov et al. (2024) نیز نتایج مشابهی گزارش شده است.

از طرفی، بیشینه میانگین مقدار عناصر سرب و منگنز در کاربری تجاری (واجد حجم زیاد ترافیک) می‌تواند ناشی از انتشارات ترافیکی (احتراقی و غیراحتراقی) باشد. در این خصوص، Wang et al. (2019) و Adimalla et al. (2020) نیز در پژوهش خود به نتایج مشابهی دست یافتند.



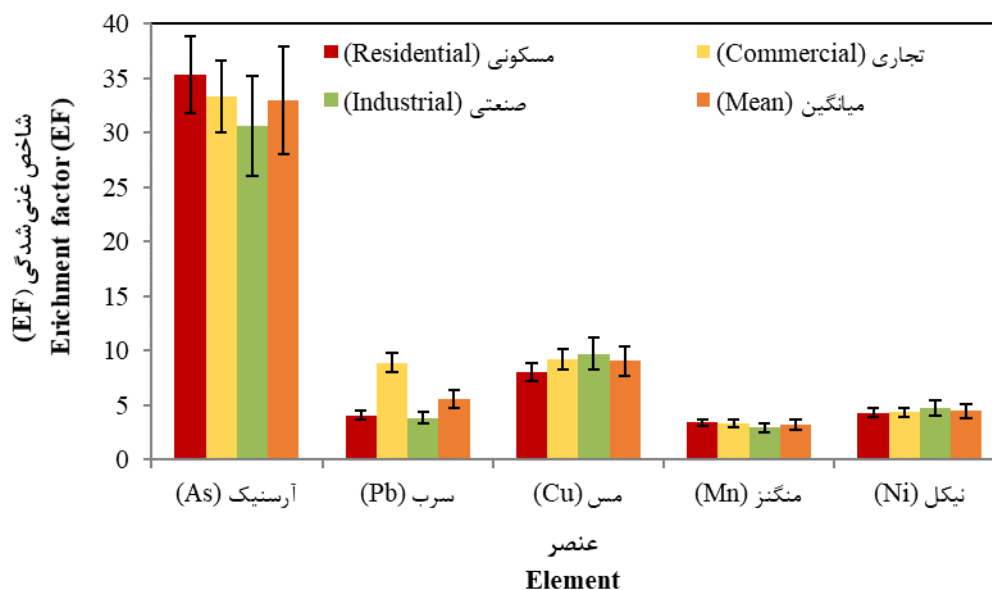


شکل ۲- مقدار عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل (میلی گرم در کیلوگرم) در نمونه‌های خاک؛ a، b و c بیان‌گر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0.05$) بین میانگین مقدار عناصر مورد بررسی در کاربری‌های مختلف بر اساس نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه و چند دامنه‌ای دانکن است.

Fig. 2- Concentration of elements (mg/kg) in soil samples. a, b, c significant difference between the mean concentration of elements in soil samples based on the results of one-way ANOVA and Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

ارزیابی کیفیت خاک شهری

نتایج محاسبه شاخص غنی‌شدگی (شکل ۳) نشان داد که میانگین مقادیر محاسبه شده EF در کاربری‌های مسکونی، تجاری و صنعتی برای عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل به ترتیب در دامنه ۳۵/۳-۳/۴۱، ۳۳/۲-۳/۳۶ و ۳۰/۶-۲/۹۵ متغیر بوده و بیان‌گر شرایط کیفی "غنی‌شدگی متوسط" تا "غنی‌شدگی خیلی شدید" این عناصر در همه مناطق نمونه‌برداری بود. همچنین، میانگین مقادیر EF عنصر آرسنیک برابر با ۳۲/۹ بود که غنی‌شدگی خیلی شدید خاک به این عنصر در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با این حال، میانگین مقادیر EF عناصر سرب و مس به ترتیب برابر با ۵/۵۹ و ۹/۰۴ و نشان‌دهنده غنی‌شدگی زیاد خاک منطقه مورد مطالعه به این عناصر بود. در همین حال، میانگین مقادیر EF عناصر منگنز و نیکل به ترتیب برابر با ۳/۲۲ و ۴/۴۸ و غنی‌شدگی متوسط خاک به این عناصر در منطقه مورد مطالعه را نمایندگی کرد. از طرفی، روند نزولی میانگین مقادیر شاخص غنی‌شدگی برای عناصر به صورت آرسنیک < مس < سرب < نیکل < منگنز بود. به علاوه، میانگین مقادیر فاکتور غنی‌شدگی برای همه عناصر مورد ارزیابی بزرگ‌تر از ۱/۵۰ بود. این موضوع، افزون بر این که مؤید آلودگی خاک به این عناصر است، می‌تواند نشان‌دهنده منشا انسان‌پدید عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل در منطقه مورد مطالعه باشد که با یافته پژوهش et al. (2022) Al-Swadi مطابقت دارد.



شکل ۳- مقادیر شاخص غنی‌شدگی (EF) عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل در نمونه‌های خاک

Fig. 3- Enrichment factor (EF) values of As, Pb, Cu, Mn, and Ni in soil samples

شناسایی منشأ عناصر مورد مطالعه در خاک شهری

نتایج ماتریس همبستگی پیرسون برای بررسی رابطه بین میانگین مقدار عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های خاک در جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس، بین میانگین مقادیر عنصر آرسنیک با نیکل، عنصر سرب با منگنز و عنصر مس با نیکل با ضریب همبستگی (r) به ترتیب برابر با ۰/۱۸۵، ۰/۴۲۳ و ۰/۳۳۷ در سطوح معنی‌داری ۰/۰۵۰، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۵۰ همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود داشت. در این خصوص می‌توان نتیجه گرفت که منابع ورود این عناصر در خاک به احتمال زیاد مشابه و مشترک بوده است (Hosseini and Sobhanardakani, 2023a)

جدول ۲- همبستگی بین میانگین مقدار عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های خاک

Table 2- Correlation between the average content of evaluated elements in soil samples

عنصر Element	آرسنیک As	سرب Pb	مس Cu	منگنز Mn	نیکل Ni
آرسنیک As	1				
سرب Pb	0.068	1			
مس Cu	0.028	0.144	1		
منگنز Mn	-0.082	0.423**	-0.075	1	
نیکل Ni	0.185*	-0.042	0.337*	0.024	1

* معنی‌داری در سطح ۰/۰۵۰

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱۰

*Correlation is significant at the 0.010 level ($p < 0.050$)

**Correlation is significant at the 0.010 level ($p < 0.010$)

نتایج آزمون تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تعیین منشأ احتمالی انتشار عناصر مورد مطالعه در خاک شهری همدان در جدول ۳ آورده شده است. نتایج خروجی PCA برای نمونه‌های مورد مطالعه بیان‌گر استخراج سه عامل اصلی اول (PC1)، دوم (PC2) و سوم (PC3) با واریانس مقدار ویژه به‌ترتیب برابر با ۳۲/۲٪، ۲۸/۲٪ و ۱۸/۸٪ بود که در مجموع ۷۹/۲٪ از واریانس کل را تشکیل داده و هر پنج عنصر مورد ارزیابی را شامل می‌شوند. اولین عامل اصلی شامل عناصر مس و نیکل بود. این عناصر دارای ضریب غنی‌شدگی بزرگ‌تر از ۱/۵۰ بودند، لذا می‌توان اذعان داشت که به‌طور عمده از منابع انسان‌پدید نشأت گرفته‌اند. در این خصوص، انتشار عنصر مس در زیست‌بوم شهری به‌عنوان شاخص مهم منبع صنعتی به‌طور عمده ناشی از فعالیت‌های پردازش و فرآوری فلزات است (Cheng et al., 2023). اگرچه، فعالیت‌های شهری (ترافیکی، صنعتی و ساخت‌وسازهای شهری) از منابع اصلی انسان‌زاد انتشار نیکل در زیست‌بوم شهری محسوب می‌شوند؛ اما، این عنصر به‌دلیل فراوانی و پراکنش گسترده در پوسته به‌طور عمده از فرایندهای زمین‌زایی نشأت می‌گیرد و به‌عنوان شاخص منابع طبیعی در نظر گرفته می‌شود (Haghi et al., 2024). تغییرات مکانی مقدار این عناصر نیز نشان داد که بیشینه مقدار عناصر مذکور مربوط به مناطق با کاربری صنعتی واجد صنایع آبکاری و جوشکاری فلز، تولید محصولات چرمی، ظروف پلاستیکی، مواد غذایی و همچنین کارگاه‌های تعمیر و نقاشی خودرو بوده است. بنابراین، عامل اول را می‌توان با انتشارات صنعتی و زمین‌زایی مرتبط دانست. در این خصوص، روابط مثبت بین عناصر مس و نیکل نیز منشأ مشترک این آلاینده‌ها را تایید کرد. عامل اصلی دوم شامل بارهای عاملی مثبت قابل توجه برای عناصر سرب و منگنز بود. این دو عنصر دارای ضریب غنی‌شدگی بزرگ‌تر از ۱/۵۰ بودند که می‌تواند بیان‌گر منشأ انسان‌زاد آن‌ها باشد. انتشار سرب در محیط به‌عنوان ردیاب انتشارات ترافیکی به‌طور عمده ناشی از منابع غیراحتراقی (نشت روان‌کننده‌ها و ذرات حاصل از استهلاک و فرسایش لنت ترمز و بدنه خودرو) است (Sabzevari and Sobhanardakani, 2018; Hosseini and Sobhan, 2024). همچنین، منگنز به‌عنوان افزودنی فلزی بهبود دهنده عدد اکتان سوخت (به‌شکل متیل سیکلوپنتادینیل منگنز تری کربونیل در گازوئیل و بنزین) به‌طور عمده با انتشارات احتراقی وسایل نقلیه مرتبط است (Hosseini and Sobhan Ardakani, 2023b). تغییرات مکانی مقدار عناصر سرب و منگنز نیز نشان داد که بیشینه مقدار این عناصر مربوط به مناطق تجاری و متأثر از حجم زیاد ترافیک بوده است. لذا، عامل دوم را می‌توان با انتشارات ترافیکی (غیراحتراقی و احتراقی) مرتبط دانست. در این خصوص، روابط مثبت بین عناصر سرب و منگنز نیز مؤید منشأ مشابه و مشترک این آلاینده‌ها بود. در همین حال، عامل اصلی سوم شامل بار عاملی مثبت قابل توجه برای عنصر آرسنیک بود. این عنصر دارای ضریب غنی‌شدگی بزرگ‌تر از ۱/۵۰ بود. آرسنیک به‌عنوان ردیاب اصلی احتراق سوخت فسیلی (نفت، گاز طبیعی و گازوئیل) به‌طور عمده از مصرف سوخت برای تامین انرژی در صنایع مختلف و همچنین گرمایش ساختمانی نشأت می‌گیرد (Guo et al., 2018; Men et al., 2021; Habibi et al., 2019). تغییرات مکانی مقدار عنصر آرسنیک نیز نشان داد که بیشینه مقدار این عنصر مربوط به کاربری صنعتی بوده است. از این‌رو، عامل سوم را می‌توان با احتراق سوخت فسیلی مرتبط دانست. در این خصوص، نتایج مشابهی توسط سایر پژوهشگران گزارش شده است (Li et al., 2024).

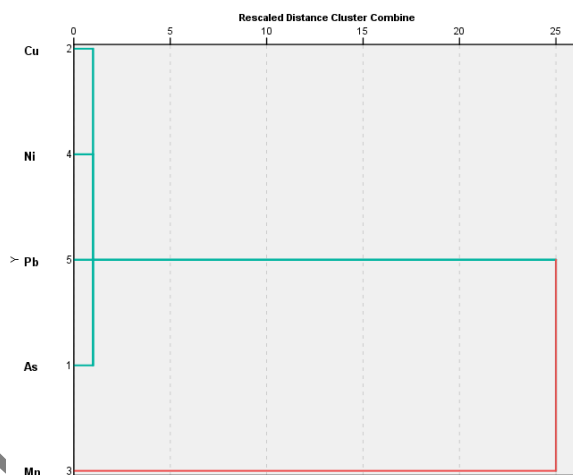
جدول ۳- نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک

Table 3- The results of the analysis of the main components of the analyzed elements in the soil samples

ماتریس عاملی چرخیده شده Rotated Component Matrix			عنصر Element
مؤلفه سوم (PC3)	مؤلفه دوم (PC2)	مؤلفه اول (PC1)	
0.973	-0.006	0.119	آرسنیک As
0.180	0.853	-0.042	سرب Pb
0.044	0.114	0.855	مس Cu
-0.193	0.830	0.091	منگنز Mn

0.101	-0.066	0.862	نیکل Ni
0.941	1.41	1.61	مقدار ویژه Eigenvalues
18.8	28.2	32.2	درصد واریانس Percentage of variance
79.2	60.4	32.2	درصد تجمعی Percentage of cumulative

با استناد به نتایج آزمون خوشه‌بندی سلسله مراتبی (شکل ۴)، می‌توان اذعان داشت که دو خوشه اصلی حاصل شده است. خوشه اول شامل عناصر آرسنیک، سرب، مس و نیکل و دومین خوشه فقط شامل عنصر منگنز است. به‌طور کلی، نتایج HCA نیز با نتایج PCA سازگار بود. عناصر آرسنیک، سرب، مس و نیکل در خوشه اول می‌تواند به‌عنوان انتشارات سوخت‌های فسیلی، منابع صنعتی، ترافیکی (غیر احتراقی) و فرآیندهای زمین‌زایی در نظر گرفته شوند. خوشه دوم را نیز می‌توان با انتشارات احتراقی ناشی از ترافیک در منطقه مورد مطالعه مرتبط دانست.

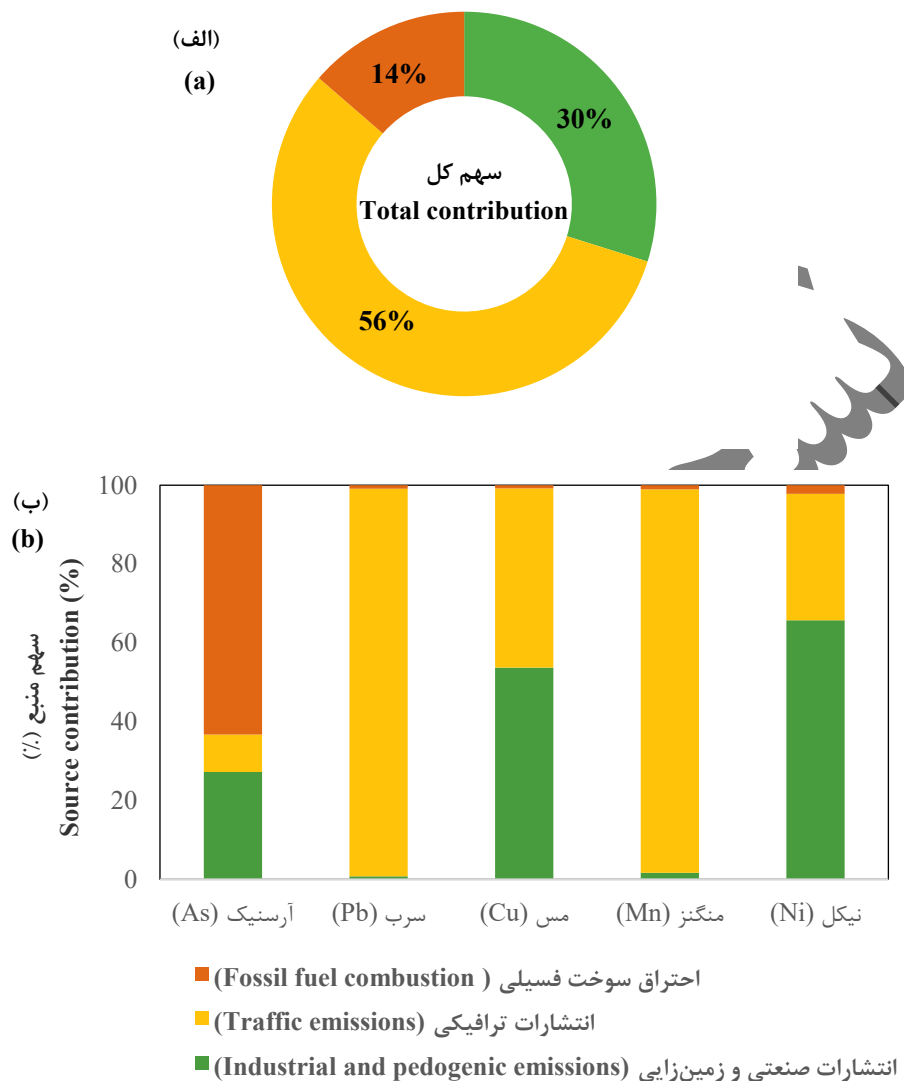


شکل ۴- دندوگرام تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی مقدار عناصر در خاک شهری همدان

Fig. 4- Hierarchical clustering of urban soil in Hamedan based on element concentrations

تعیین کمی سهم منابع آلودگی

نتایج مدل امتیاز مؤلفه اصلی مطلق و رگرسیون خطی چندگانه برای تعیین سهم منابع عناصر در نمونه‌های خاک شهری در شکل ۵ آورده شده است. شکل ۵-الف بیان‌گر آن است که منابع ترافیکی، صنعتی- زمین‌زایی و احتراق سوخت فسیلی به‌ترتیب ۵۶٪، ۳۰٪ و ۱۴٪ از سهم انتشار عناصر را به‌خود اختصاص داده‌اند. در این خصوص، می‌توان اذعان داشت که ورودی‌های انسان‌پدید (با سهم نسبی ۷۰٪) در مقایسه با فرآیندهای طبیعی تأثیر قابل‌توجهی بر آلودگی عناصر در منطقه مورد مطالعه داشته و منابع ترافیکی منشأ عمده و اصلی آلودگی عناصر مورد ارزیابی در خاک شهری همدان بوده است. در این خصوص، نتایج مشابهی در مطالعات قبلی گزارش شده است (Guo et al., 2018; Xie et al., 2023; Saha et al., 2024). از طرفی، با استناد به نتایج مندرج در شکل ۵-ب می‌توان اذعان داشت که منابع ترافیکی به‌ترتیب با اختصاص ۵۳٪ و ۶۵٪ از سهم انتشار عناصر سرب و منگنز در خاک شهری همدان، منبع اصلی آلودگی عناصر مذکور در منطقه مورد مطالعه بوده است. این در حالی است که منابع صنعتی- زمین‌زایی به‌ترتیب با اختصاص ۵۳٪ و ۶۵٪ از سهم انتشار عناصر مس و نیکل در خاک شهری، منشأ عمده آلودگی این عناصر در شهر همدان بودند. در همین حال، انتشارات ناشی از احتراق سوخت فسیلی با اختصاص ۶۳٪ از سهم انتشار عنصر آرسنیک در خاک شهری همدان، منشأ اصلی آلودگی عنصر مذکور در منطقه مورد مطالعه بود.



شکل ۵- درصد سهم هر عامل (منبع) بر اساس مدل APCS/MLR (الف) و درصد سهم هر عامل (منبع) در انتشار عناصر آرسنیک، سرب، مس، منگنز و نیکل (ب) در خاک شهری همدان

Fig. 5- The percent of contribution for each factor (source) by APCS/MLR model (a) and species contribution of each factor (source) factors for As, Pb, Cu, Mn, and Ni (b) in urban soil of Hamedan

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف تعیین مقدار، ارزیابی آلودگی، شناسایی منشأ و کمی‌سازی سهم منابع آلودگی برخی عناصر بالقوه سمی در خاک شهری همدان انجام شد. بدین منظور، در مجموع ۱۶۲ نمونه خاک سطحی به‌روش تصادفی-طبقه‌ای از ۱۸ مکان نمونه‌برداری با کاربری‌های مختلف شهری شامل مسکونی، تجاری و صنعتی برداشت شد. نتایج نشان داد که ورودی‌های انسان‌پدید منشأ اصلی انتشار عناصر در منطقه مورد مطالعه بود. همچنین، منابع ترافیکی با برخورداری از بیش‌ترین سهم انتشار آلاینده‌های فلزی، به‌عنوان منبع عمده آلودگی عناصر مورد ارزیابی در خاک شهری همدان شناسایی شد. یافته‌ها به‌عنوان داده‌های مرجع اولیه، افزون بر این که می‌توانند مبنایی برای کنترل و مدیریت مؤثر و مناسب آلودگی خاک با عناصر بالقوه سمی در منطقه

مورد مطالعه محسوب شوند، لزوم توجه و ارائه تمهیدات و اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی برای کاهش مؤثر آلودگی انسان‌پدید به‌ویژه در کاربری با سطوح آلودگی زیاد را نیز تأیید می‌کنند. در این خصوص، نظر به این‌که منابع ترافیکی، منشا عمده آلودگی عناصر سمی خاک بود؛ لذا، بهینه‌سازی و بهبود سیاست‌ها و راهبردهای مدیریت و کنترل حمل‌ونقل شهری و برنامه‌ریزی برای ایجاد و توسعه حمل‌ونقل ریلی شهری (مترو) و مسیرهای ویژه برای حمل‌ونقل عمومی به‌عنوان راهکارهای اجرایی با هدف کاهش مؤثر آلودگی برای حفظ سلامت زیست‌بوم شهری و شهروندان مؤثر و ضروری خواهد بود. همچنین، نوسازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی با توصیه به استفاده از خودروهای برقی و ترغیب شهروندان در خصوص استفاده از وسایل نقلیه عمومی می‌تواند به‌عنوان اقدامات فوری و عملی مدنظر قرار گیرند. به‌علاوه، نسبت به پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک به‌ویژه در مناطقی با سطح آلودگی زیاد برای حفظ سلامت محیط و شهروندان توصیه می‌شود. در نهایت، از آن‌جا که اجرای این پژوهش با محدودیت‌های زمانی و منابع مالی مواجه بود، مطالعه سایر عناصر بالقوه سمی، شناسایی منشاء و کمی‌سازی سهم منابع آن‌ها و ارزیابی ریسک‌های بهداشتی و بوم‌شناختی مرتبط با عناصر پیشنهاد می‌شود.

منابع

- Adimalla, N., Chen, J. and Qian, H., 2020. Spatial characteristics of heavy metal contamination and potential human health risk assessment of urban soils: A case study from an urban region of South India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 194, 110406.
- Al-Swadi, H.A., Usman, A.R., Al-Farraj, A.S., Al-Wabel, M.I., Ahmad, M. and Al-Faraj, A., 2022. Sources, toxicity potential, and human health risk assessment of heavy metals-laden soil and dust of urban and suburban areas as affected by industrial and mining activities. *Scientific Reports*. 12(1), 8972.
- Bineshpour, M., Payandeh, K., Nazarpour, A. and Sabzalipour, S., 2021. Status, source, human health risk assessment of potential toxic elements (PTEs), and Pb isotope characteristics in urban surface soil, case study: Arak city, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*. 43, 4939-4958.
- 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, 97-117.
- 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, 19282-19293.
- Che, W., Zhang, Y., Lin, C., Fung, Y.H., Fung, J.C. and Lau, A.K., 2023. Impacts of pollution heterogeneity on population exposure in dense urban areas using ultra-fine resolution air quality data. *Journal of Environmental Sciences*. 125, 513-523.
- Chen, M. and Ma, L.Q., 2001. Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty Florida soils. *Soil science society of America Journal*. 65(2), 491-499.
- Cheng, Y.H., Jian, M.Y., Liu, K.T., Pipal, A.S. and Hsu, C.Y., 2023. Spatial distributions of PM10-bound metal elements in the central part of western Taiwan and their potential emission sources and the carcinogenic health risks. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(38), 88495-88507.
- Deliboran, A., Varol, M. and Aytap, H., 2024. Evaluation of ecological and health risks of trace elements in soils of olive orchards and apportionment of their sources using the APCS-MLR receptor model. *Environmental Geochemistry and Health*. 46(9), 320.
- Deng, S., Luo, S., Lin, Q., Shen, L., Gao, L., Zhang, W., Chen, J. and Li, C., 2024. Analysis of heavy metal and arsenic sources in mangrove surface sediments at Wulishan Port on Leizhou Peninsula, China, using the APCS-MLR model. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 283, 116788.
- Fallah, A., Modabberi, S., Sayyareh, A. and Tabakh Shabani, A.A., 2020. Assessment of heavy metal pollution in urban soil in Karaj (Iran). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*. 29(114), 231-240. (In Persian with English abstract)
- Goncharov, G., Soktoev, B., Farkhutdinov, I. and Matveenko, 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, 119216.
- Gopal, V., Krishnamurthy, R.R., Indhumathi, A., Sharon, B.T., Priya, T.D., Rathinavel, K., Bharath, K.M., Magesh, N.S. and Ayyamperumal, R., 2024. Geochemical evaluation, ecological and human health risk assessment of potentially toxic elements in urban soil, Southern India. *Environmental Research*. 248, 118413.
- Gujre, N., Mitra, S., Soni, A., Agnihotri, R., Rangan, L., Rene, E.R. and Sharma, M.P., 2021. Speciation, contamination, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils dumped with municipal solid wastes. *Chemosphere*. 262, 128013.
- Guo, G., Song, B., Xia, D., Yang, Z. and Wang, F., 2018. Metals and metalloids in PM10 in Nandan County, Guangxi, China, and the health risks posed. *Environmental Geochemistry and Health*. 40, 2071-2086.

- Habibi, H., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. and Kiani Sadr, M., 2021. Potential ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals in street dusts collected from industrial, commercial and residential areas of city of Hamedan in 2019 using the ecotoxicological criteria. *Journal of Environmental Health Engineering*. 8(2), 117-129. (In Persian with English abstract)
- Habibi, H., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Lorestani, B. and Sadr, M.K., 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(2), 168.
- Haghi, B., Cheraghi, M., Sobhanardakani, S., Lorestani, B. and Kiani Sadr, M., 2024. Assessment of potentially toxic elements (PTEs) in atmospheric dry deposition of Hamedan Metropolis, west of Iran: pollution status, spatiotemporal variation, health risk implications, and source identification. *Environmental Geochemistry and Health*. 46(7), 252.
- Han, J., Lee, S., Mammadov, Z., Kim, M., Mammadov, G. and Ro, H.M., 2021. Source apportionment and human health risk assessment of trace metals and metalloids in surface soils of the Mugan Plain, the Republic of Azerbaijan. *Environmental Pollution*. 290, 118058.
- 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, 100043.
- Hoshyari, E., Hassanzadeh, N., Keshavarzi, B., Jaafarzadeh, N. and Rezaei, M., 2023. Spatial distribution, source apportionment, and ecological risk assessment of elements (PTEs, REEs, and ENs) in the surface soil of shiraz city (Iran) under different land-use types. *Chemosphere*. 311, 137045.
- 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, 13301-13314.
- Hosseini, N.S. and 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), 119-134. (In Persian with English abstract)
- Hosseini, N.S. and Sobhanardakani, S., 2022. 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*. doi: 10.1080/03067319.2022.2135997.
- 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), 1611-1624.
- Hosseini, N.S. and Sobhan Ardakani, S., 2023a. 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), 197-214. (In Persian with English abstract)
- Hosseini, N.S. and Sobhan Ardakani, S., 2023b. Evaluation of bio-monitoring and remediation capacities of heavy metals (Co, Cr, and Mn) by some herbaceous species collected from roadside biotype. *Environmental Researches*, 13(26), 21-38. (In Persian with English abstract)
- Kong, S., Tang, J., Ouyang, F. and Chen, M., 2021. Research on the treatment of heavy metal pollution in urban soil based on biochar technology. *Environmental Technology & Innovation*. 23, 101670.
- Laha, T., Gupta, N., Pal, M., Koley, A., Mastro, R.E., Hoque, R.R. and Balachandran, S., 2024. Chemical speciation and health risk assessment of potentially toxic elements in playground soil of bell metal commercial town of Eastern India. *Environmental Geochemistry and Health*. 46(11), 453.
- Li, Y., Feng, D., Ji, M., Li, Z., Zhang, R. and Gu, C., 2022. The risk characteristics of heavy metals in urban soil of typical developed cities in China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 194(2), 132.
- Li, J., Liu, J.Z., Tai, X.S., Jiao, L., Zhang, M. and Zang, F., 2024. Pollution and source-specific risk analysis of potentially toxic metals in urban soils of an oasis-tourist city in northwest China. *Environmental Geochemistry and Health*. 46(2), 55.
- Liu, H., Ma, J., Taj, R., Xu, M., Lou, F., Liu, W., Xu, Y., Xu, J., Xu, Y. and Liu, D., 2024. Quantitative assessment of ecological risk from pollution source based on geostatistical analysis and APCS-MLR model. *Environmental Science and Pollution Research*. 31(24), 34953-34961.
- Mehr, M.R., Keshavarzi, B., Moore, F., Sharifi, R., Lahijanzadeh, A. and Kermani, M., 2017. Distribution, source identification and health risk assessment of soil heavy metals in urban areas of Isfahan province, Iran. *Journal of African Earth Sciences*. 132, 16-26.
- 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, 27-39.
- Mostafa, M.T., El-Nady, H., Gomaa, R.M., Abdelgawad, H.F., Abdelhafiz, M.A., Salman, S.A.E. and Khalifa, I.H., 2024. Urban geochemistry of heavy metals in road dust from Cairo megacity, Egypt: Enrichment, sources, contamination, and health risks. *Environmental Earth Sciences*. 83(1), 37.

- Pardakti, B., Pirkharrati, H. and Asad Zadeh, F., 2022. Assessing the health risk, pollution and source of some heavy metals in the soil around Zanjan, Iran. *Journal of Research in Environmental Health*. 8(3), 300-316. (In Persian with English abstract)
- Peng, Y. and Yu, G.I., 2024. Assessment of heavy metal pollution on agricultural land in Chengdu city under different anthropogenic pressures based on APCS-MLR modelling. *Ecological Indicators*. 165, 112183.
- Pilková, Z., Filová, L., Hiller, E. and Mihaljevič, M., 2024. Re-Interpretation of Metal (Loid) Concentrations in Urban Soils of Two Different Land Uses by Positive Matrix Factorisation. *Environmental Forensics*. <https://doi.org/10.1080/15275922.2024.2330021>
- 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, 122322.
- Sabzevari, E. and Sobhanardakani, S., 2018. Analysis of selected heavy metals in indoor dust collected from city of Khorramabad, Iran: A case study. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 10(3), 67382.
- Saedpanah, M., Ghorbani, F. and Amanoollahi, J., 2018. Source determination, contamination level and predicting of some inorganic contaminants concentration in the top soils of Sanandaj city. *Journal of Environmental Health Engineering*. 5 (3), 233-250. (In Persian with English abstract)
- Saha, P., Saikia, K.K., Kumar, M. and Handique, S., 2023. Assessment of health risk and pollution load for heavy and toxic metal contamination from leachate in soil and groundwater in the vicinity of dumping site in Mid-Brahmaputra Valley, India. *Total Environment Research Themes*. 8, 100076.
- Saha, A., Gupta, B.S., Patidar, S., Hernández-Martínez, J.L., Martín-Romero, F., Meza-Figueroa, 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, 119619.
- Sabet Aghlidi, P., Cheraghi, M., Lorestani, B., Sobhanardakani, S. and 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, 665-676.
- Saffari, M., Jafarian, A., Ganjavian, M. and Esmaeili, J., 2021. Investigation of heavy element pollution in surface soils (Study area: Shahrekord city). *Quaternary Journal of Iran*. 7(3), 1006-1023. (In Persian with English abstract)
- Selahvarzi, M., Sobhan Ardakani, S., Hemmasi, A.H., Taghavi, L. and Ghoddousi, J., 2023. Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface soils, the case of Khorramabad, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. doi: 10.1080/03067319.2023.2217749.
- Shen, L., Zeng, J., Guo, E., Cheng, Y., Li, L., Niu, C., Yuan, Y. and Ma, L., 2023. Source apportionment and risk assessment of heavy metals in urban soils from a central China city by using positive matrix factorization model coupled with Monte Carlo simulation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 37(1), 291-304.
- 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, 135859.
- Shi, T., He, L., Wang, R., Li, Z., Hu, Z. and Wu, G., 2023. Digital mapping of heavy metals in urban soils: A review and research challenges. *Catena*. 228, 107183.
- Shokri Ragheb, P. and Sobhan Ardakani, S., 2016. Analysis of Co, Cr and Mn concentrations in atmospheric dry deposition in Hamadan City. *Avicenna Journal of Clinical Medicine*. 23(2), 149-156. (In Persian with English abstract)
- Sobhanardakani, S., Ghoochian, M. and Taghavi, L., 2016. Assessment of heavy metal contamination in surface sediment of the Darreh-Morad Beyg River. *Iranian Journal of Health Sciences*. 4(3), 22-34.
- Sobhan Ardakani, S. and Hosseini, N.S., 2024. Investigating the contamination level and health risk of potentially toxic elements in surface soil of the roadside environment. *Applied Soil Research*. 11(4), 112-125. (In Persian with English abstract)
- Sultana, N., Eti, S.A., Hossain, M.L., Li, J. and Salam, M.A., 2024. Tracing and source fingerprinting of metals from the southern coastal sediments in Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research*. 31(19), 27846-27863.
- Taati, A., Salehi, M.H., Mohammadi, J. and Mohajer, R., 2023. Investigating the origin and potential ecological risk of heavy metals in different land-uses in West of Arak, Markazi Province. *Applied Soil Research*. 10(4), 120-135.
- Tardani, D., Vera, F., Álvarez-Amado, F., Tolorza, V., Lacassie, J.P., Jullian, D., Sepúlveda, C., Sánchez-Alfaro, P., Daniele, L. and Gutiérrez, L., 2023. Evaluating natural and anthropogenic inputs on the distribution of potentially toxic elements in urban soil of Valdivia, Chile. *Environmental Geochemistry and Health*. 45(11), 7841-7859.
- 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, 141697.

- Wang, S., Cai, L.M., Wen, H.H., Luo, J., Wang, Q.S. and Liu, X., 2019. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China. *Science of the Total Environment*. 655, 92-101.
- Wei, R., Meng, Z., Zerizghi, T., Luo, J. and Guo, Q., 2023. A comprehensive method of source apportionment and ecological risk assessment of soil heavy metals: A case study in Qingyuan city, China. *Science of the Total Environment*. 882, 163555.
- Xie, L., Li, P. and Mu, D., 2023. Spatial distribution, source apportionment and potential ecological risk assessment of trace metals in surface soils in the upstream region of the Guanzhong Basin, China. *Environmental Research*. 234, 116527.
- Yan, B., Li, X., Yang, J., Wang, M., Zhang, R. and Song, X., 2024. Assessment of health risks based on different populations and sources of heavy metals on agricultural lane in Tengzhou City by APCS-MLR models. *Environmental Geochemistry and Health*. 46(11), 443.
- Zheng, F., Guo, X., Tang, M., Zhu, D., Wang, H., Yang, X. and Chen, B., 2023. Variation in pollution status, sources, and risks of soil heavy metals in regions with different levels of urbanization. *Science of the Total Environment*. 866, 161355.

نسخه پیش از انتشار