

Chemometric of potentially toxic elements in surface soils of Hamedan megacity

Nayereh Sadat Hosseini¹, and Soheil Sobhanardakani² *

1-PhD., Dept. of the Environment, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran. ns_hosseini@iau.ac.ir

2-Professor, Dept. of the Environment, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran. s_sobhan@iau.ac.ir

«Research Article»

Received: July 15, 2025, and Accepted: September 7, 2025

Abstract

Contamination of urban soil with toxic pollutants, as an important obstacle for sustainable development, is a challenge and common environmental and health concern of urban ecosystems all over the world. Therefore, this study was performed to evaluate the concentrations, spatial variations, pollution and toxicity of As, Cd, Cu, Ni, and Pb in the surface soil of Hamedan Megacity, in 2023. In so doing, a total of 108 urban surface soil samples (0-20 cm) were collected from 12 sampling sites with different land uses including industrial, commercial, and residential (4 sites of each land uses). After preparation and acid digestion of samples in the lab, concentrations of the tested elements were determined using Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). Also, contamination factor (CF), pollution load index (PLI), the mean Effect Range Median Quotient (mERM-Q) and the mean Probable Effect Level Quotient (mPEL-Q) indices were calculated. The results of the spatial variation of the element contents showed the impact of human activities, especially industrial origin and traffic. The results of calculating the CF represented that the contamination of As, Cd, Cu, Ni and Pb were "low" to "high". Also, the mean values of PLI with 1.0 displayed "moderate" contamination conditions in the study area. Besides, the mean values of mERM-Q and mPEL-Q of As, Cd, Cu, Ni and Pb indicated that the probable elemental toxicity of the soil samples was 21% and in the "moderate toxicity" category. Based on the results, it can be acknowledged that industrial and traffic activities as the main and primary origin of these elements had significantly contributed to their pollution in soil of city of Hamedan. In conclusion, regular monitoring of the content of toxic elements and ecological and health risk assessment of the contaminated urban surface soil with PTEs are recommended in order to maintain the health of the environment and citizens.

Keywords: Urban soil, Toxic pollutants, Pollution index, Environmental toxicity.

* - Corresponding author's email: s_sobhan@iau.ac.ir

Cite this article: Hosseini, N.S, Sobhanardakani, S. 2025. Chemometric of potentially toxic elements in surface soils of Hamedan megacity. Journal of Soil Research, 39 (2), pp.189-.204.



شیمی‌سنجی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی کلان‌شهر همدان

نیره‌سادات حسینی^۱ و سهیل سبحان اردکانی^{۲*} ^۱-دکتری تخصصی محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. ns_hosseini@iau.ac.ir^۲-استاد علوم محیط‌زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. s_sobhan@iau.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۴ و پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۶

چکیده

آلودگی خاک شهری به آلاینده‌های سمی به‌عنوان مانعی مهم برای توسعه پایدار بوده و چالش و نگرانی مشترک محیط‌زیستی و بهداشتی بوم‌سامانه‌های شهری در سراسر جهان است. از این‌رو، این پژوهش با هدف تعیین محتوی، تغییرات مکانی، آلودگی و سمیت عناصر بالقوه سمی (آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) خاک سطحی کلان‌شهر همدان در سال ۱۴۰۲ انجام یافت. به این منظور، در مجموع ۱۰۸ نمونه خاک سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متری) از ۱۲ مکان با کاربری‌های صنعتی، تجاری و مسکونی (۴ مکان نمونه‌برداری از هر کاربری) برداشت شد. پس از آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌ها در آزمایشگاه، محتوی عناصر در آن‌ها به‌روش طیف‌سنجی نوری پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) خوانده شد. مقادیر شاخص‌های فاکتور آلودگی (CF)، بار آلودگی (PLI)، میانگین ضریب متوسط حدود اثر (mERM-Q) و میانگین ضریب سطح احتمالی اثر (mPEL-Q) محاسبه گردید. تغییرات مکانی محتوی عناصر نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی به‌ویژه با منشأ صنعتی و ترافیک بر آلودگی خاک بود. محاسبه شاخص CF نشان داد که آلودگی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل از "کم" تا "زیاد" متغیر بود. همچنین، میانگین مقادیر شاخص بار آلودگی با ۱/۰، بیان‌گر شرایط آلودگی "متوسط" در منطقه مورد مطالعه بود. نتایج ارزیابی سمیت محیطی و زیستی نشان داد که در همه مناطق مقادیر شاخص‌های mERM-Q و mPEL-Q برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل با ۲۱٪ احتمال سمیت در طبقه "سمیت متوسط" قرار داشتند. با استناد به نتایج می‌توان اذعان داشت که فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی به‌عنوان منبع اصلی و عمده عناصر مورد مطالعه نقش مهمی در آلودگی خاک شهر همدان دارند. لذا، به‌منظور حفظ سلامت محیط و شهروندان نسبت به پایش دوره‌ای و منظم خاک سطحی شهری آورده به عناصر بالقوه سمی و ارزیابی ریسک بوم‌شناختی و سلامت مواجهه با عناصر به‌ویژه در مناطق با آلودگی زیاد توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خاک شهری، آلاینده‌های سمی، شاخص آلودگی، سمیت محیطی

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: s_sobhan@iau.ac.ir

استناد: حسینی، ن.س.، سبحان اردکانی، س. ۱۴۰۴. شیمی‌سنجی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی کلان‌شهر همدان. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک،

مقدمه

در قرن حاضر، انتشار فزاینده و مداوم انواع آلاینده‌ها در اجزای مختلف زیست‌بوم شهری به سبب توسعه سریع شهرنشینی، صنعتی، اقتصادی و افزایش تراکم جمعیت و گسترش کاربری‌ها منجر به ایجاد و تشدید آلودگی‌ها و افزایش نگرانی‌های محیط‌زیستی به‌ویژه در کلان‌شهرهای سراسر جهان شده است (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۳). در میان طیف وسیعی از آلاینده‌های محیطی، عناصر بالقوه سمی به سبب پایداری، سمیت و تجمع زیستی، چالش و نگرانی مهم و مشترک محیط‌زیستی، بهداشت عمومی و اقتصادی در مقیاس جهانی به‌شمار می‌آیند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۴). در این خصوص، آلودگی خاک شهری ناشی از عناصر بالقوه سمی به سبب بقا و دوام طولانی‌تر عناصر در قیاس با محیط آب و یا هوا، از اهمیت بیش‌تری برخوردار بوده و به سبب نقش مهم خاک در ثبات اقتصادی، اجتماعی و بوم‌شناختی، به‌عنوان مخاطره بالقوه بوم‌شناختی، سلامتی و مانعی مهم برای توسعه پایدار به یکی از مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین نگرانی‌ها و مشکلات محیط‌زیستی بوم‌سامانه‌های شهری تبدیل شده است (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۱؛ سینگ و همکاران، ۲۰۲۵). مخاطرات بالقوه زیستی و سلامتی مرتبط با آلاینده‌های فلزی رایج در خاک شهری نه‌تنها ناشی از عناصر غیرضروری همچون آرسنیک، سرب، کادمیم حتی در مقادیر بسیار اندک است، بلکه مترتب از مقادیر زیاد و یا شکل‌های خاص عناصر ضروری نظیر مس و نیکل نیز است (اوایامیجی و همکاران، ۲۰۲۴). اختلال در عملکرد ریه، کلیه، کبد، استخوان، سیستم عصبی و خون‌ساز، آسیب‌های پوستی، اثرات تراتوژنیک و افزایش بروز انواع مختلف سرطان از پیامدهای اصلی مواجهه با غلظت‌های بیش‌تر از حد مجاز این عناصر محسوب می‌شود (سبحان اردکانی و حسینی، ۱۴۰۲a؛ ین و همکاران، ۲۰۲۰). به‌طور کلی ورود و انباشت عناصر سمی در خاک شهری با منشاء طبیعی (هوازگی سنگ، فرسایش و سایر فرآیندهای زمین‌شناسی) و به‌طور عمده انسانی (فعالیت‌های صنعتی،

ترافیک و احتراق سوخت‌های فسیلی) نه‌تنها می‌تواند منجر به کاهش کیفیت خاک و آسیب مداوم به زیست‌بوم شهری شود، بلکه می‌تواند به‌واسطه تبادلات محیطی مستمر بین خاک و سایر اجزای مختلف محیط (تعلیق/بازتعلیق ذرات خاک سطحی، آبشویی و رسوب خشک/مرطوب هواسپهری) به آلودگی سایر ماتریس‌های محیطی (هوا، آب و گیاه) در زیست‌بوم شهری منجر شده و به‌طور بالقوه تهدیدی مضر و غیرمستقیم برای سلامت زیست‌مندان و انسان محسوب شود (حسینی و سبحان اردکانی، ۲۰۲۴؛ کانستانتینو و همکاران، ۲۰۲۴). به‌علاوه، قرار گرفتن در معرض مستقیم ذرات خاک سطحی آلوده از طریق استنشاق، بلع و تماس با پوست می‌تواند اثرات نامطلوب احتمالی عناصر فلزی بر سلامت شهروندان به‌ویژه برای کودکان را افزایش دهد (سبحان اردکانی و حسینی، ۱۴۰۲b؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۱۷). از این‌رو، خاک به‌عنوان شاخص مهم منبع و مخزن نهایی عناصر کمیاب و تنظیم‌کننده طبیعی انتقال عناصر به هوا، آب و گیاه ابزاری مهم و کارآمد در ارزیابی و تعیین آلودگی و مخاطرات بالقوه محیط‌زیستی آلاینده‌های فلزی در زیست‌بوم شهری محسوب می‌شود (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۰؛ سیدیگ و همکاران، ۲۰۲۵).

امروزه، تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهری به‌عنوان راهکار اقتصادی و مؤثر به‌منظور ارزیابی آلودگی بوم‌سازگان شهری در راستای حفظ کیفیت و سلامت آن مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است (گونچارو و همکاران، ۲۰۲۴). در این راستا، شاخص‌های فاکتور آلودگی (CF) و بار آلودگی (PLI) به‌طور گسترده‌ای در تعیین سطح آلودگی و برآوردی جامع از میزان آلودگی خاک به عناصر بالقوه سمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (ثابت‌اقلیدی و همکاران، ۲۰۲۰). از سوی دیگر، شاخص‌های میانگین ضریب متوسط حدود اثر (mERM-Q) و میانگین ضریب سطح احتمالی اثر (mPEL-Q) نیز ابزارهای کارآمد و مفید برای تعیین و برآورد سطح سمیت محیطی و زیستی احتمالی خاک به

به سبب توسعه شهری و برخورداری از زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل جاده‌ای و راه‌های ارتباطی مهم و همچنین افزایش حجم ترافیک درون شهری در معرض آلودگی محیط به ویژه از لحاظ محتوی عناصر بالقوه سمی قرار دارد (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰).

نمونه برداری از خاک سطحی

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، پس از انجام مطالعه‌های اولیه میدانی و به منظور تعیین محتوی، تغییرات مکانی و ارزیابی آلودگی و سمیت عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل، نسبت به نمونه برداری از خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی متری) به روش تصادفی-طبقه‌ای از ۱۲ مکان با کاربری‌های صنعتی (واجد صنایعی نظیر کارگاه‌های تولید محصولات پلاستیکی و چرمی، جوشکاری و آبکاری فلزات و تعمیرگاه‌ها و کارگاه‌های نقاشی خودرو)، تجاری (واجد بیشترین حجم ترافیک) و مسکونی (بیشترین سکونتگاه‌های شهری) در کلان‌شهر همدان (۴ مکان نمونه برداری از هر کاربری) اقدام شد. لازم به ذکر است که تعداد نمونه‌های خاک سطحی با لحاظ کردن محدودیت‌های مالی و زمانی پژوهش تعیین شدند. نمونه برداری در همه مکان‌ها با استفاده از بیلچه استیل در سه نوبت طی فصل تابستان ۱۴۰۲ انجام شد. به منظور ایجاد شرایط یکنواخت و کاهش عوامل مداخله‌گر احتمالی، نمونه برداری در همه مکان‌ها در یک روز کاری با سه تکرار انجام و برای تهیه یک نمونه همگن از هر منطقه، نمونه‌های خاک سطحی مجزای جمع‌آوری شده با یکدیگر مخلوط و در کیسه‌های پلی اتیلنی زیپ‌دار با برچسب معین ذخیره و برای پردازش‌های بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند (اوپادوای و همکاران، ۲۰۲۴). از این‌رو، تعداد کل نمونه‌های خاک سطحی در مجموع ۱۰۸ عدد (۳۶ نمونه کاربری صنعتی، ۳۶ نمونه کاربری تجاری و ۳۶ نمونه کاربری مسکونی) بود. مختصات جغرافیایی مکان‌های نمونه برداری نیز توسط دستگاه موقعیت‌یاب مکانی (GPS)

عناصر کمیاب به شمار می‌آیند (لیو و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، تعیین تغییرات مکانی محتوی عناصر بالقوه سمی خاک سطحی شهری افزون بر این‌که ابزار تشخیصی مناسب برای شناسایی و اولویت‌بندی مناطق با خطرات بالقوه ناشی از انباشت و آلودگی عناصر سمی محسوب می‌شود، برای درک، تجزیه و تحلیل و کنترل منابع آلودگی نیز حائز اهمیتی ویژه و به سزا است (پیلکوا و همکاران، ۲۰۲۴).

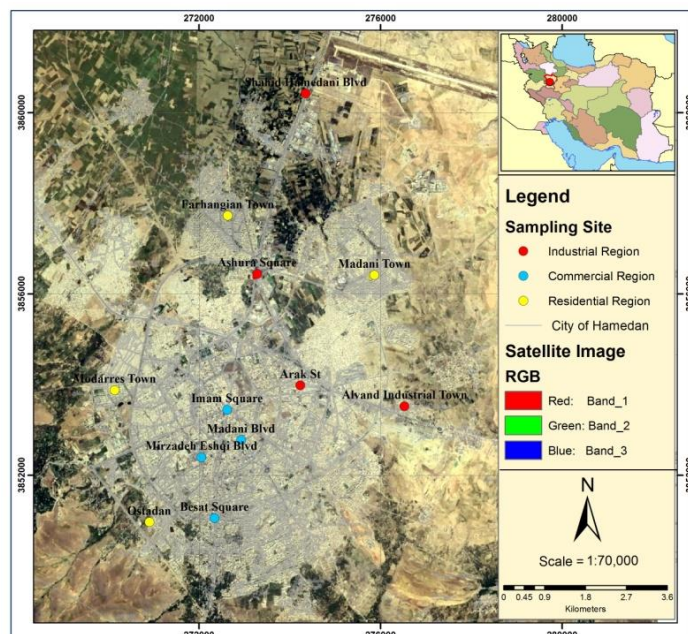
اگرچه، تاکنون مطالعه‌های متعددی در رابطه با ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی خاک سطحی شهری در شهرهای مختلف در سراسر دنیا انجام شده است (کای و همکاران، ۲۰۱۹؛ جهاننداری و همکاران، ۲۰۲۰؛ گونچارو و همکاران، ۲۰۲۴؛ گوپال و همکاران، ۲۰۲۴)؛ با این حال، در تعداد اندکی از آن‌ها نسبت به ارزیابی تغییرات مکانی آلودگی فلزی خاک شهری تحت تأثیر کاربری‌های عمده شهری اقدام شده است (بینش‌پور و همکاران، ۲۰۲۱؛ لی و همکاران، ۲۰۲۲). افزون بر این، نظر به توسعه فزاینده شهری، صنعتی، زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل شهری و افزایش حجم ترافیک درون شهری همدان از یک سو، و اثرات نامطلوب آلودگی احتمالی خاک سطحی شهری بر کیفیت محیط و سلامت شهروندان، این پژوهش با هدف تعیین محتوی، تغییرات مکانی، ارزیابی آلودگی و سمیت عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهر همدان در سال ۱۴۰۲ انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر همدان به عنوان مرکز استان همدان با وسعت تقریبی ۵۶ کیلومتر مربع و ۶۵۲۰۰۰ نفر جمعیت در ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متر از سطح دریا بین مدارهای ۳۴° ۴۷' تا ۳۶° ۴۹' درجه طول جغرافیایی شرقی و ۵۵° ۳۳' تا ۴۵° ۳۵' درجه عرض جغرافیایی شمالی، در غرب ایران واقع شده 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،

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



شکل ۱- نقشه موقعیت استقرار مکان‌های نمونه‌برداری

آماده‌سازی نمونه‌های خاک سطحی و تعیین محتوی عناصر در آن‌ها

در این پژوهش، برای آماده‌سازی نمونه‌ها و آنالیز دستگاهی آن‌ها از مواد شیمیایی و معرف‌هایی با درجه خلوص بالا خریداری شده از شرکت‌های مرک آلمان و سیگما-آلدریچ اسپانیا استفاده شد.

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 (حسینی و همکاران، ۲۰۲۲).

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 ۱۲ میلی‌لیتر از مخلوط اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک به هر بشر (۱:۳) اسید نیتریک ۶۵٪ به اسید هیدروکلریک ۳۰٪، محلول‌ها در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس، به مدت سه ساعت بازروانی (Reflux) 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 (حسینی و همکاران، ۲۰۲۲؛ لی و همکاران، ۲۰۲۵). 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، کادمیم، مس و نیکل در نمونه‌ها خوانده شد. تضمین و کنترل کیفیت (Control Quality Assurance/Quality) 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، کادمیم، مس و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۰۳۸، ۰/۰۲۰۴، ۰/۰۶۲ و ۰/۰۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و مقادیر محدودیت کمی عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۲۶۱، ۰/۱۱۷، ۰/۶۱۲، ۰/۱۷۹ و ۰/۱۵۶ به دست آمدند. نتایج حاصل از درصد بازیابی عناصر مورد مطالعه (بین ۹۰/۶-۹۹/۸٪) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای

در رابطه ۲، CF_i و n به‌ترتیب بیان‌گر فاکتور آلودگی برای هر عنصر و تعداد عناصر مورد بررسی هستند. جدول ۱ سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها برای شاخص PLI را نشان می‌دهد (تامپلسون و همکاران، ۱۹۸۰).

ارزیابی سمیت محیطی و زیستی احتمالی عناصر

در این پژوهش، به‌منظور تعیین و برآورد سمیت محیطی و زیستی احتمالی عناصر مورد مطالعه، شاخص‌های میانگین ضریب متوسط حدود اثر ($mERM-Q$) و میانگین ضریب سطح احتمالی اثر ($mPEL-Q$) عناصر با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه شدند (حق‌نظر و همکاران، ۲۰۲۱):

رابطه (۳)

$$mERM-Q = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ERM}}{n}$$

رابطه (۴)

$$mPEL-Q = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{PEL}}{n}$$

در روابط ۳ و ۴، C_i و n به‌ترتیب بیان‌گر غلظت هر عنصر مورد مطالعه بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم و تعداد عناصر مورد مطالعه؛ ERM و PEL نیز به‌ترتیب متوسط حدود اثر هر عنصر مورد مطالعه (برابر با ۷۰/۰، ۲۱۸، ۹/۶۰، ۲۷۰ و ۵۱/۶ به‌ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) و حدود احتمالی اثر غلظت هر عنصر مورد مطالعه (برابر با ۱۷/۰، ۱۱۰، ۴/۲۰، ۱۱۰ و ۴۳/۰ به‌ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) را نمایندگی می‌کنند (حق‌نظر و همکاران، ۲۰۲۱). طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر شاخص‌های $mERM-Q$ و $mPEL-Q$ در جدول ۱ آورده شده است (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۱).

تعیین محتوی عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه از دقت مناسب برخوردار بوده است. همچنین، pH نمونه‌های خاک در عصاره گل اشباع (۵:۱ خاک به آب) با استفاده از دستگاه pH متر (Jenway, UK, ۳۵۲۰) اندازه‌گیری شد (حسینی و سبحان اردکانی، ۱۴۰۲؛ گوجره و همکاران، ۲۰۲۱).

ارزیابی آلودگی خاک سطحی به عناصر بالقوه سمی

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی سطح آلودگی ناشی از هر یک از عناصر بالقوه سمی مورد مطالعه و همچنین برآورد جامعی از سطح آلودگی تجمعی عناصر در نمونه‌های خاک سطحی نسبت به محاسبه شاخص‌های CF و PLI به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ اقدام شد (تامپلسون و همکاران، ۱۹۸۰؛ کاغذچی و سلیمانی، ۲۰۲۳):

رابطه (۱)

$$CF = \frac{C_{sample}}{C_{background}}$$

در رابطه ۱، C_{sample} و $C_{background}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده محتوی عنصر مورد نظر در نمونه خاک سطحی و غلظت عنصر در پوسته زمین (برابر با ۲/۰، ۳۴/۲، ۰/۲۳۰، ۲۸/۳ و ۴۵/۷ به‌ترتیب برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) هر دو بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم هستند (عظیم‌زاده و خادمی، ۱۳۹۲). سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها بر اساس مقادیر CF در جدول ۱ آورده شده است (هاکسون، ۱۹۸۰).

رابطه (۲)

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{\frac{1}{n}}$$

شاخص فاکتور آلودگی (CF)		شاخص بار آلودگی (PLI)	
محدوده	طبقه توصیفی	محدوده	طبقه توصیفی
$CF < 1$	آلودگی کم	$PLI < 1$	آلودگی کم
$1 \leq CF < 3$	آلودگی متوسط	$1 \leq PLI < 2$	آلودگی متوسط
$3 \leq CF < 6$	آلودگی زیاد	$2 \leq PLI < 3$	آلودگی زیاد
$CF \geq 6$	آلودگی خیلی زیاد	$PLI \geq 3$	آلودگی خیلی زیاد
شاخص میانگین ضریب متوسط حدود اثر (mERM-Q)		شاخص میانگین ضریب سطح احتمالی اثر (mPEL-Q)	
محدوده	طبقه توصیفی	محدوده	طبقه توصیفی
$mERM-Q < 0.1$	۹٪ احتمال سمیت (کم)	$mPEL-Q < 0.1$	۹٪ احتمال سمیت (کم)
$0.1 \leq mERM-Q < 0.5$	۲۱٪ احتمال سمیت (متوسط)	$0.1 \leq mPEL-Q < 1/5$	۲۱٪ احتمال سمیت (متوسط)
$0.5 \leq mERM-Q < 1/5$	۴۹٪ احتمال سمیت (زیاد)	$1/5 \leq mPEL-Q < 2/3$	۴۹٪ احتمال سمیت (زیاد)
$mERM-Q \geq 1/5$	۷۶٪ احتمال سمیت (خیلی زیاد)	$mPEL-Q \geq 2/3$	۷۶٪ احتمال سمیت (خیلی زیاد)

پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۲۰ نرم‌افزار SPSS در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام یافت. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس‌ها به ترتیب از آزمون‌های شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) و لوین (Leven) استفاده شد. از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه (One-Way ANOVA) و آزمون تعقیبی چند دامنه‌ای دانکن (Duncan Multiple Range Test) نیز برای مقایسه میانگین محتوی عناصر بین کاربری‌های مختلف استفاده شد.

نتایج و بحث

آمار توصیفی مربوط به تعیین مقادیر عناصر

بالقوه سمی و pH در نمونه‌های خاک سطحی

بر اساس نتایج آزمون شاپیرو-ویلک، داده‌های مربوط به محتوی همه عناصر و مقادیر pH در نمونه‌های خاک سطحی با توجه به سطح معنی‌داری (p) بزرگ‌تر از ۰/۰۵، از توزیع نرمال برخوردار بودند.

آمار توصیفی مربوط به مقادیر تعیین‌شده عناصر بالقوه سمی و pH در نمونه‌های خاک سطحی در جدول ۲ آورده شده است. بر این اساس، محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در خاک سطحی به ترتیب در دامنه ۷/۷۱-۶/۱۹، ۳۳/۶-۸/۱۶، ۰/۱۷۸-۰/۳۵۶، ۰/۳۵۶-۱۷/۵ و ۳۶/۸-۱۶/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نیز نشان داد که بین کاربری‌های

مختلف از حیث میانگین محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در نمونه‌های خاک سطحی اختلاف معنی‌دار آماری ($p < 0.05$) وجود داشته است. بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم، مس و نیکل به ترتیب با ۶/۹۹، ۰/۳۰۴، ۳۲/۰ و ۲۴/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم همگی مربوط به نمونه‌های خاک سطحی جمع‌آوری شده از کاربری صنعتی بود. از طرفی، بیشینه میانگین محتوی عنصر سرب ۳۱/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به نمونه‌های خاک سطحی مناطق تجاری تعلق داشت. از سوی دیگر، میانگین محتوی عناصر (همه کاربری‌ها) در نمونه‌ها از روند نزولی مس < نیکل < سرب < آرسنیک < کادمیم تبعیت کرد. علاوه بر این، روند نزولی میانگین محتوی عناصر آرسنیک، کادمیم، مس و نیکل برای کاربری‌های مختلف به صورت صنعتی < تجاری < مسکونی بود. این در حالی است که میانگین محتوی عنصر سرب برای کاربری‌های مختلف از روند نزولی تجاری < صنعتی < مسکونی تبعیت کرد.

با استناد به یافته‌ها، محتوی متمایز عناصر خاک سطحی شهری از مناطق عملکردی مختلف افزون بر این‌که بیانگر تأثیر قابل توجه تفاوت و تنوع منشا انتشار عناصر ناشی از فعالیت‌های مختلف شهری است، نشان می‌دهد که انتشارات ناشی از فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی عوامل اصلی و عمده احتمالی افزایش محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در خاک منطقه مورد مطالعه بوده است. در مطالعات مشابه و در تایید نتایج حاصل، بینش‌پور و همکاران (۲۰۲۱) و کای و همکاران (۲۰۲۲)

نیز محتوی متمایز عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل به ترتیب در خاک شهری اراک (ایران) و هاندان (چین) را به طور عمده ناشی از کاربری‌های مختلف شهری و متأثر از انتشارات ترافیکی و صنعتی گزارش کردند. همچنین، دانگ و همکاران (۲۰۲۳) و هوشیاری و همکاران (۲۰۲۳) نیز با ارزیابی تغییرات مکانی محتوی عناصر سمی خاک سطحی در شهرهای بائوشان (چین) و شیراز (ایران) گزارش کردند که تنوع و تفاوت منابع انتشارات انسانی (مانند فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی) بر محتوی عناصر فلزی خاک سطحی شهری تأثیرگذار بوده است. به طور کلی، آرسنیک شاخص احتراق سوخت فسیلی و کادمیم، مس و نیکل نیز ردیاب‌های اصلی فعالیت‌های صنعتی محسوب می‌شوند. بنابراین، افزایش محتوی این عناصر در مناطق صنعتی را می‌توان با انتشارات ناشی از فعالیت صنایع مختلف به ویژه آبکاری و جوشکاری فلزات، محصولات چرمی، پلاستیکی، همچنین کارگاه‌های نقاشی و تعمیرات خودرو در منطقه مورد مطالعه مرتبط دانست. کای و همکاران (۲۰۱۹) و گونچارو و همکاران (۲۰۲۴) نیز با ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهرهای هوآلیا (چین) و یوفا (روسیه) گزارش کردند که بیش‌ترین غلظت عناصر آرسنیک، کادمیم، کروم، مس و نیکل مربوط به نمونه‌های خاک سطحی برداشت‌شده از مناطق صنعتی و ناشی از فعالیت‌های ذوب فلزات و ریخته‌گری، تولید کاغذ، پلاستیک، رنگدانه، نساجی و صنایع غذایی بوده است. از طرفی، انتشار سرب در محیط به عنوان ردیاب انتشارات ترافیکی به طور عمده ناشی از منابع غیر آگروز (نشت روان‌کننده‌ها و ذرات حاصل از استهلاک و فرسایش لنت ترمز و بدنه خودرو) است (سبحان اردکانی و حسینی، ۱۴۰۲b؛ لی و همکاران، ۲۰۲۴). از این رو، حجم زیاد ترافیک و انتشارات ناشی از منابع غیر آگروز را به احتمال زیاد می‌توان با افزایش محتوی سرب در مناطق تجاری مرتبط دانست. نتایج پژوهش آدیمالا و

همکاران (۲۰۲۰) نیز که با هدف ارزیابی آلودگی و خطر سلامتی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهرهای جدیمتلا و آلا (هند) انجام یافت، نشان داد که انتشارات مداوم ناشی از ترافیک (نشت روان‌کننده‌ها، سایش و خوردگی قطعات خودرو) منابع عمده افزایش محتوی روی و سرب در خاک سطحی مناطق مورد مطالعه بوده است. همچنین، وانگ و همکاران (۲۰۱۹) با ارزیابی آلودگی منشایابی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی شهرستان پونینگ (چین) و با استناد به تغییرات مکانی محتوی عناصر گزارش کردند که بیشینه محتوی عناصر روی و سرب مربوط به نمونه‌های خاک برداشت‌شده از مناطق دارای حجم زیاد ترافیک و به طور عمده مرتبط با انتشارات غیراحتراقی بوده است.

با استناد به نتایج سنجش مقادیر pH در نمونه‌های خاک سطحی (جدول ۲)، مقادیر pH خاک سطحی در دامنه ۸/۲۱-۸/۳۴ متغیر و نشان‌دهنده خاصیت قلیایی خاک در همه کاربری‌های مورد مطالعه بود. به طور کلی، pH از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی خاک است که به سبب تأثیر بر تحرک (حلالیت و فراهمی زیستی) عناصر بالقوه سمی، نقش مهمی در سرنوشت آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی خاک دارد. در این خصوص، pH قلیایی باعث افزایش احتباس عناصر در خاک می‌شود، این در حالی است که pH اسیدی تأثیر قابل توجهی بر تحرک عناصر دارد (نینا، ۲۰۱۹؛ حسینی و سبحان اردکانی، ۲۰۲۴). مطالعات انجام شده حاکی از آن است که اغلب عناصر در خاک با محدوده pH ۶/۰۰ تا ۹/۰۰ از تحرک و فراهمی زیستی اندک برخوردار هستند (برناردیو و همکاران، ۲۰۱۹). از این رو، می‌توان ادعا داشت که pH خاک سطحی شهری از مناطق عملکردی مختلف می‌تواند منجر به کاهش تحرک و دستیابی زیستی عناصر و در نهایت افزایش آلودگی خاک سطحی در منطقه مورد مطالعه شود.

جدول ۲- آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی شهر همدان

کاربری	عناصر (میلی گرم در کیلوگرم)	pH
--------	-----------------------------	----

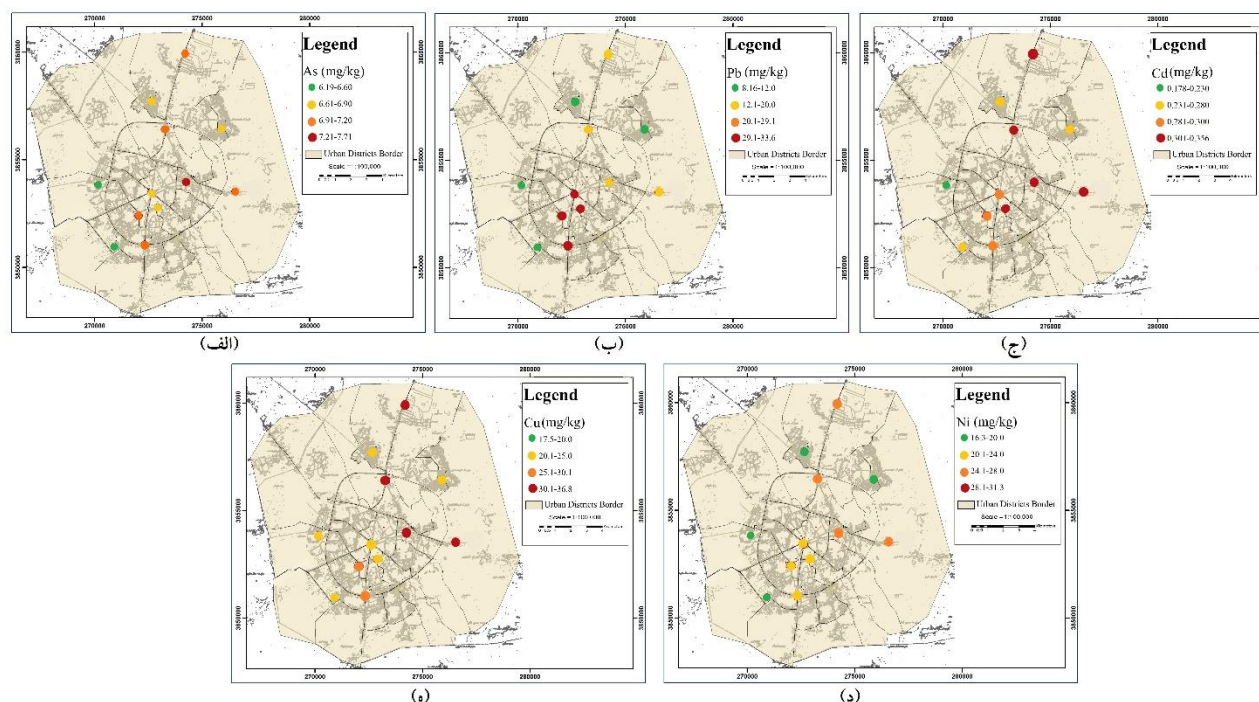
آرسنیک	سرب	کادمیم	مس	نیکل	
مسکونی	۶/۶۸ B	۹/۸۴ C	۰/۲۴۱ B	۲۱/۷ C	۱۸/۶ C
تجاری	۶/۸۰ B	۳۱/۳ A	۰/۲۹۷ A	۲۵/۵ B	۲۰/۴ B
صنعتی	۶/۹۹ A	۱۴/۶ B	۰/۳۰۴ A	۳۲/۰ A	۲۴/۹ A
کمینه	۶/۱۹	۸/۱۶	۰/۱۷۸	۱۷/۵	۱۶/۳
بیشینه	۷/۷۱	۳۳/۶	۰/۳۵۶	۳۶/۸	۳۱/۳
میانگین	۶/۸۲	۱۸/۶	۰/۲۸۰	۲۶/۴	۲۱/۳

مقادیر مشخص شده با حروف بزرگ غیرمشترک (A, B, C و ...) در هر ستون، بیانگر وجود تفاوت معنی دار آماری ($p < 0.05$) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی و مقادیر pH در کاربری های مختلف بر اساس نتایج آزمون های تحلیل واریانس یک طرفه و چند دامنه ای دانکن است.

نتایج بررسی تغییرات مکانی غلظت عناصر در نمونه های خاک سطحی

نتایج پراکنش مکانی محتوی عناصر در خاک سطحی (شکل ۲) نشان داد که الگوی مکانی عناصر آرسنیک، کادمیم، مس و نیکل مشابه و نقاط داغ غلظت عناصر (مناطق با بیشینه توزیع غلظت آرسنیک، کادمیم، مس و نیکل به ترتیب در دامنه ۷/۲۱-۷/۷۱، ۰/۳۰۱-۰/۳۵۶، ۳۶/۸-۳۰/۱ و ۳۱/۳-۲۸/۱) مربوط به کاربری صنعتی بوده است. در همین حال، بیشینه توزیع غلظت سرب خاک در دامنه ۲۹/۱-۳۳/۶ مربوط به مناطق تجاری بود. این موضوع افزون بر این که مؤید تاثیر فعالیت ها و کاربری های مختلف شهری بر توزیع مکانی عناصر مورد

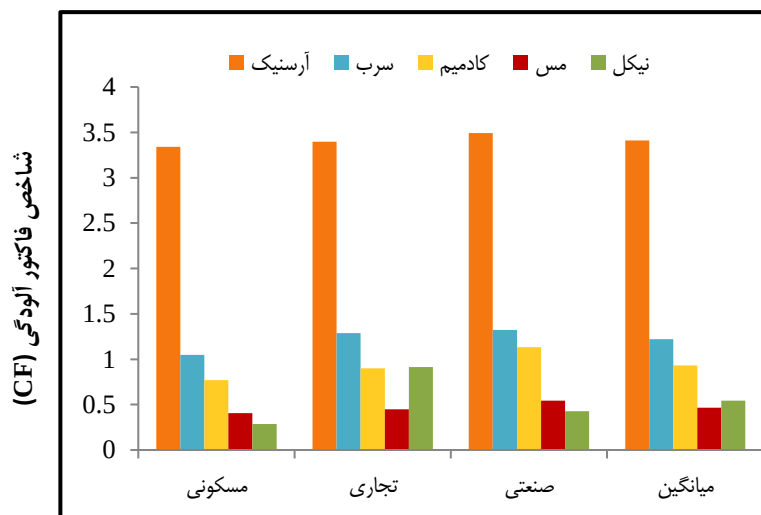
ارزیابی است، می تواند بیانگر منشا انسان پدید عناصر در منطقه مورد مطالعه باشد. از این رو، اقدامات نظارتی و کنترلی به منظور کاهش انتشار و آلودگی عناصر ضروری است. دات و همکاران (۲۰۲۳) و ایستانبلو و همکاران (۲۰۲۳) نیز با استناد به الگوی پراکنش آلودگی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز و نیکل در گردوغبار خیابانی هوشیمین واقع در ویتنام و سامسون واقع در ترکیه اذعان داشتند که نقاط داغ آلودگی عناصر مربوط به مناطق تجاری و صنعتی (کاربری هایی با فعالیت های شدید انسانی) بوده است (ایستانبلو و همکاران، ۲۰۲۳؛ دات و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ۲- پراکنش مکانی محتوی آرسنیک (الف)، سرب (ب)، کادمیم (ج)، نیکل (د) و مس (ه) در خاک سطحی همدان
نتایج محاسبه فاکتور آلودگی و شاخص بار آلودگی

برای عنصر کادمیم برابر با ۱/۲۲ و آلودگی "متوسط" خاک سطحی به این عنصر را نمایندگی کرد ($1 \leq CF < 3$). با این حال، میانگین مقادیر CF برای عناصر سرب، مس و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۵۴۳، ۰/۹۳۳ و ۰/۴۶۶ و بیانگر آلودگی "کم" خاک سطحی به این عناصر بود ($CF < 1$). همچنین، روند نزولی میانگین مقادیر شاخص فاکتور آلودگی برای عناصر به صورت آرسنیک < کادمیم < مس < سرب < نیکل حاصل شد.

با استناد به نتایج محاسبه شاخص فاکتور آلودگی (شکل ۳)، میانگین مقادیر شاخص CF برای مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی به ترتیب در دامنه‌های ۰/۲۳۸-۳/۸۱، ۳/۶۷-۰/۸۳۱ و ۳/۸۶-۰/۳۰۱ متغیر بوده و شرایط آلودگی "کم تا زیاد" خاک سطحی به عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در همه مکان‌ها را نشان می‌دهند. همچنین، میانگین مقادیر CF برای عنصر آرسنیک برابر با ۳/۴۱ و بیانگر آلودگی "زیاد" خاک سطحی به این عنصر بود ($3 \leq CF < 6$). از طرفی، میانگین مقادیر CF

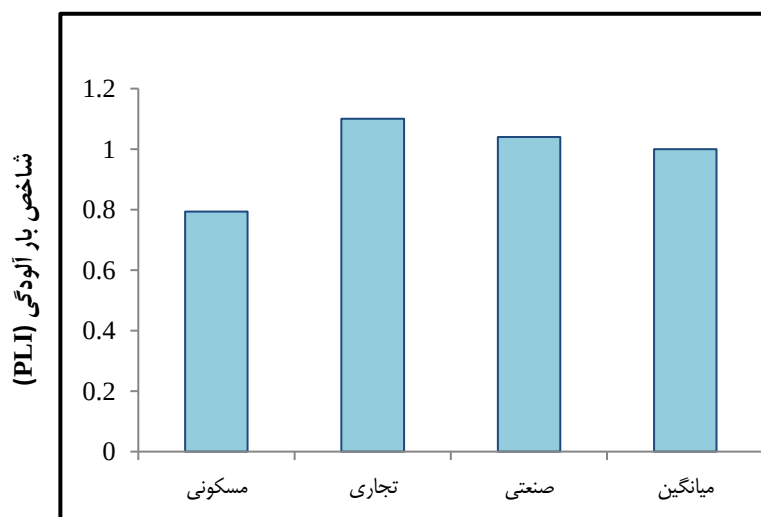


مکان نمونه برداری

شکل ۳- مقادیر شاخص CF عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در نمونه های خاک سطحی همدان به تفکیک مکان نمونه برداری

و صنعتی با میانگین مقادیر شاخص به ترتیب برابر با ۱/۱۰ و ۱/۰۴ آلودگی "متوسط" را نشان دادند ($1 \leq \text{PLI} < 2$). از طرفی، مقادیر میانگین شاخص PLI برابر با ۱/۰۰ و نشان دهنده سطح آلودگی "متوسط" خاک سطحی در منطقه مورد مطالعه بود.

نتایج محاسبه شاخص بار آلودگی عناصر مورد مطالعه در نمونه های خاک سطحی در شکل ۴ آورده شده است. با استناد به نتایج، مقادیر محاسبه شده شاخص PLI نمونه های خاک سطحی در کاربری مسکونی برابر با ۰/۷۹۳ و نشان دهنده آلودگی "کم" نمونه ها بود ($\text{PLI} < 1$). در همین حال، نمونه های خاک سطحی در کاربری های تجاری



مکان نمونه برداری

شکل ۴- مقادیر شاخص PLI عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در نمونه های خاک سطحی شهر همدان به تفکیک مکان نمونه برداری

با استناد به نتایج محاسبه فاکتور آلودگی می‌توان اذعان داشت که مقادیر CF عناصر مورد ارزیابی در خاک ارتباط مستقیم با محتوی عناصر در کاربری‌های مختلف دارد. همچنین، تغییرات مکانی مقادیر شاخص‌های آلودگی و بیشینه میانگین مقادیر CF و PLI در مناطق تجاری و صنعتی نشان داد که فعالیت‌های شهری به‌ویژه انتشارات ترافیکی و صنعتی به احتمال زیاد تأثیر قابل‌توجهی بر آلودگی عناصر بالقوه سمی به‌ویژه آرسنیک در خاک سطحی شهر همدان داشته است. در این خصوص، روی و همکاران (۲۰۲۳) نیز سطح آلودگی عناصر روی، سرب، کادمیم، کروم و مس در خاک سطحی شهر چنای، هند را "خیلی زیاد" و ناشی از فعالیت‌های انسان‌پدید (ترافیک و صنعت) گزارش کردند. از طرفی، لی و همکاران (۲۰۲۴) با ارزیابی آلودگی و منشایی عناصر بالقوه سمی در خاک‌های سطحی شهر واحه، چین، اذعان داشتند که افزایش آلودگی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم، کروم، مس و نیکل در مناطقی با فعالیت‌های انسانی شدید به‌طور عمده ناشی از انتشارات ترافیکی، صنعتی و احتراق سوخت فسیلی بوده است.

نتایج محاسبه سمیت محیطی و زیستی احتمالی عناصر

نتایج محاسبه مقادیر سمیت محیطی و زیستی احتمالی عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های خاک سطحی در جدول ۳ آورده شده است. میانگین مقادیر شاخص mERM-Q برای مناطق مسکونی، تجاری و صنعتی به‌ترتیب برابر با ۰/۱۲۱، ۰/۱۵۲ و ۰/۱۵۹ و بیان‌گر سمیت محیطی متوسط خاک سطحی در همه مکان‌های نمونه‌برداری (۱۰۰٪ نمونه‌ها) بود $mERM-Q \leq 0/500$ ($< 0/100$). در همین حال، میانگین مقادیر شاخص mERM-Q برابر با ۰/۱۴۴ و احتمال سمیت محیطی خاک سطحی به‌میزان ۲۱٪ در منطقه مورد مطالعه را نمایندگی کرد. از سوی دیگر، نمونه‌های خاک سطحی در کاربری‌های

مسکونی، تجاری و صنعتی با میانگین مقادیر شاخص mPEL-Q به‌ترتیب برابر با ۰/۲۳۴، ۰/۲۹۲ و ۰/۲۹۷ سمیت زیستی "متوسط" را نشان دادند ($0/500 \leq mPEL-Q < 0/100$). همچنین، مقادیر شاخص mPEL-Q برابر با ۰/۲۷۴ و بیان‌گر احتمال سمیت زیستی خاک سطحی به‌میزان ۲۱٪ در منطقه مورد مطالعه بود. یافته‌های به‌دست آمده، افزون بر این که نشان‌دهنده مخاطره محیط‌زیستی برای زیست‌مندان است، آلودگی خاک سطحی شهری به عناصر مورد ارزیابی را نیز تأیید کرده و احتمالاً می‌تواند حاکی از کاهش کیفیت خاک شهری در آینده باشد. حسینی و سبحان اردکانی (۱۴۰۱) نیز با ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های شهر همدان و با استناد به مقادیر میانگین mERM-Q و mPEL-Q گزارش کردند که سطح سمیت محیطی و زیستی برای عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل "متوسط" بوده است. از طرفی، لیو و همکاران (۲۰۲۳) با استناد به میانگین مقادیر شاخص mERM-Q در خاک سطحی یوننان (چین) احتمال سمیت محیطی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس را برابر با ۴۹٪ و در سطح "زیاد" گزارش کردند.

به‌طور کلی، نظر به بیشینه محتوی، آلودگی و سمیت عناصر مورد مطالعه در کاربری‌های صنعتی و تجاری، افزایش غلظت این عناصر در آینده می‌تواند به‌عنوان تهدید بالقوه مضر برای سلامت بوم‌سازگان و شهروندان منجر به بروز تهدیدات بوم‌شناختی و سلامتی شود. در این خصوص، احتمال افزایش جذب آلاینده‌های فلزی-شبه‌فلزی می‌تواند به‌طور مستقیم و از طریق بلع خاک، استنشاق ذرات خاک و تماس پوستی اثرات بالقوه مهم و نامطلوب بر سلامت ساکنان به‌ویژه کودکان برجای گذارد. از این‌رو، اقدامات کنترلی و تمهیدات مدیریتی به‌منظور کاهش انتشار و اثرات نامطلوب محیط‌زیستی-بهداشتی عناصر مورد مطالعه ضروری است.

جدول ۳- نتایج ارزیابی سمیت محیطی و زیستی (mERM-Q و mPEL-Q) عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی شهر همدان

شاخص	مسکونی	تجاری	صنعتی	میانگین
میانگین ضریب متوسط حدود اثر (mERM-Q)	۰/۱۲۱	۰/۱۵۲	۰/۱۵۹	۰/۱۴۴
میانگین ضریب سطح احتمالی اثر (mPEL-Q)	۰/۲۳۴	۰/۲۹۲	۰/۲۹۷	۰/۲۷۴

نتیجه گیری

در این پژوهش، محتوی، تغییرات مکانی، آلودگی و سمیت عناصر بالقوه سمی (آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل) خاک سطحی کلان شهر همدان ارزیابی شد. با استناد به نتایج حاصل، نمونه‌های خاک سطحی برداشت شده از کاربری‌های واجد فعالیت‌های انسانی شدید (تجاری و صنعتی)، از بیشینه محتوی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل برخوردار بودند که تاثیر منابع انسان‌پدید نظیر حمل‌ونقل، آبکاری و جوشکاری فلزات، تولید محصول‌های چرمی، پلاستیکی، همچنین کارگاه‌های نقاشی و تعمیرات خودرو در آلودگی خاک را تأیید می‌کند. از طرفی، نتایج محاسبه شاخص CF نشان داد که آلودگی عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل در منطقه مورد مطالعه در محدوده "کم" تا "زیاد" متغیر بوده و از روند کاهشی آرسنیک < کادمیم < مس < سرب < نیکل تبعیت کرده است. همچنین، میانگین مقادیر شاخص PLI نمونه‌های خاک سطحی نیز با ۱/۰۰، شرایط آلودگی "متوسط" در منطقه مورد مطالعه را نشان داد. به علاوه، مقادیر محاسبه شده شاخص‌های mERM-Q و mPEL-Q برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم، مس و نیکل سمیت محیطی و زیستی "متوسط" را نمایندگی کردند. یافته‌ها به

عنوان داده‌های مرجع اولیه، افزون بر این که می‌توانند مبنایی برای ارزیابی روندهای آتی و سرنوشت آلاینده‌های فلزی در خاک شهری محسوب شوند، لزوم توجه و ارائه تمهیدات و اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی برای کاهش سطح آلودگی انسان‌پدید به‌ویژه در کاربری با سطوح آلودگی زیاد را نیز تأیید می‌کنند. در این خصوص، بهینه‌سازی و بهبود سیاست‌ها و راهبردهای مدیریت و کنترل حمل‌ونقل شهری و زیرساخت‌های صنعتی برای کاهش آلودگی و حفظ سلامت زیست‌بوم شهری موثر خواهد بود. همچنین، نظر به این که عنصر آرسنیک از بیش‌ترین سطوح آلودگی برخوردار بود؛ لذا، نسبت به کنترل منابع انتشار این عنصر از جمله احتراق سوخت فسیلی و در همین حال پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک سطحی به‌ویژه در مناطقی با سطح آلودگی زیاد توصیه می‌شود. در نهایت، از آنجا که اجرای این پژوهش با محدودیت‌های زمانی و منابع مالی مواجه بود، مطالعه سایر عناصر بالقوه سمی و ارزیابی ریسک‌های بهداشتی و بوم‌شناختی آن‌ها می‌تواند برای حفظ سلامت شهروندان و زیست‌بوم شهری می‌تواند مفید واقع شود.

فهرست منابع

۱. حسینی، ن. و س. سبجان اردکانی. ۱۴۰۰. ارزیابی اثر حجم ترافیک بر آلودگی و خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر روی، سرب و نیکل در خاک‌های حاشیه برخی جاده‌های برون شهری همدان. *پژوهش‌های خاک*، (۲): ۱۱۹-۱۳۴.
۲. حسینی، ن. و س. سبجان اردکانی. ۱۴۰۱. ارزیابی آلودگی و خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های کلان‌شهر همدان. *فصلنامه مهندسی بهاد/شت محیط*، ۹(۳): ۳۴۹-۳۶۴.
۳. حسینی، ن. و س. سبجان اردکانی. ۱۴۰۲. ارزیابی محتوی و منشأ آلودگی فلزات سنگین در خاک سطحی حاشیه جاده: مطالعه موردی. *فصلنامه پژوهش در بهاد/شت محیط*، ۹(۲): ۱۹۷-۲۱۴.
۴. سبجان اردکانی، س. و ن. حسینی. ۱۴۰۲a. بررسی آلودگی و مخاطره سلامت برخی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی محیط کنار جاده‌ای. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۱۱(۴): ۱۱۲-۱۲۵.
۵. سبجان اردکانی، س. و ن. حسینی. ۱۴۰۲b. ارزیابی سمیت و خطر سلامت مرتبط با عناصر بالقوه سمی (روی، سرب، کادمیم و کروم) خاک حاشیه جاده ای شهر همدان. *محیط شناسی*، ۴۹(۱): ۷۱-۹۰.
۶. عظیم زاده، ب. و ح. خادمی. ۱۳۹۲. تخمین غلظت زمینه برای ارزیابی آلودگی برخی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی بخشی از استان مازندران. *آب و خاک*، ۲۷(۳): ۵۴۸-۵۵۹.
7. 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.
8. Bernardino, C. A., Mahler, C. F., Santelli, R. E., Freire, A. S., Braz, B. F. and Novo, L. A. 2019. Metal accumulation in roadside soils of Rio de Janeiro, Brazil: impact of traffic volume, road age, and urbanization level. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3): 156.
9. 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.
10. 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.
11. Cai A, Zhang, H., Zhao, Y., Wang, X., Wang, L. and Zhao, H. 2022. Quantitative source apportionment of heavy metals in atmospheric deposition of a typical heavily polluted city in Northern China: Comparison of PMF and UNMIX. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 950288.
12. Dat, N. D., Nguyen, V. T., Vo, T. D. H., Bui, X. T., Bui, M. H., Nguyen, L. S. P., Tran, A. T. K., Nguyen, T. T. A., Ju, Y. R. and Huynh, T. M. T. 2021. Contamination, source attribution, and potential health risks of heavy metals in street dust of a metropolitan area in Southern Vietnam. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36): 50405-50419.
13. Dong, C., Zhang, H., Yang, H., Wei, Z., Zhang, N. and Bao, L. 2023. Quantitative Source Apportionment of Potentially Toxic Elements in Baoshan Soils Employing Combined Receptor Models. *Toxics*, 11(3): 268.

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 (15): 119216.
15. Gopal, V., Krishnamurthy, R. R., Indhumathi, A., Sharon, B. T., Priya, T. D., Rathinavel, K., Manikanda Bharath, K., 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.
16. 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.
17. Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8): 975-1001.
18. Haghazadeh, H., Hudson-Edwards, K. A., Kumar, V., Pourakbar, M., Mahdavianpour, M. and Aghayani, E. 2021. Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere*, 285: 131446.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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): 5962–5985.
23. Istanbulu, S. N., Sevik, H., Isinkaralar, K. and Isinkaralar, O. 2023. Spatial distribution of heavy metal contamination in road dust samples from an urban environment in Samsun, Türkiye. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 110(4): 78.
24. Jahandari, A., Abbasnejad, A. and Jamasb, R. 2020. Concentration, likely sources, and ecological risk assessment of potentially toxic elements in urban soils of Shiraz City, SW Iran: a preliminary assessment. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 1-10.
25. Jiang, Y., Chao, S., Liu, J., Yang, Y., Chen, Y., Zhang, A. and Cao, H. 2017. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. *Chemosphere*, 168: 1658-1668.
26. Kaghazchi, M. E. and Soleimani, M. 2023. Changes in ecological and health risk assessment indices of potentially toxic elements associated with ambient air particulate matters (PM_{2.5}) in response to source, land use and temporal variation in Isfahan city, Iran. *Urban Climate*, 49: 101520.
27. Konstantinova, E., Minkina, T., Nevidomskaya, D., Lychagin, M., Bezberdaya, L., Burachevskaya, M., Rajput, V.D., Zamulina, I., Bauer, T. and Mandzhieva, S. 2024. Potentially toxic elements in urban soils of the coastal city of the Sea of

- Azov: Levels, sources, pollution and risk assessment. *Environmental Research*, 252: 119080.
28. Lee, J. I., Lee, C. H., Lee, C. G., Choi, N. C. and Park, S. J. 2025. Evaluating the potential of remediated dredged sediments as a growth medium for landscape plants: Effects of soil amendments and heavy metal uptake. *International Journal of Sediment Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2025.07.012>.
 29. Li, Y., Xu, Z., Ren, H., Wang, D., Wang, J., Wu, Z. and Cai, P. 2022. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in the Topsoil of Weifang City, East China. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 893938.
 30. 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): 1-20.
 31. Liu, X., Chi, H., Tan, Z., Yang, X., Sun, Y., Li, Z., Hu, K., Hao, F., Liu, Y., Yang, S., Deng, Q. and Wen, X. 2023. Heavy metals distribution characteristics, source analysis, and risk evaluation of soils around mines, quarries, and other special areas in a region of northwestern Yunnan, China. *Journal of Hazardous Materials*, 458: 132050.
 32. 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.
 33. Neina, D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019(1): 5794869.
 34. Oyebamiji, A. O., Olaolorun, O. A., Popoola, O. J. and Zafar, T. 2024. Assessment of heavy metal pollution in soils of Jebba Area, Nigeria: Concentrations, source analysis and implications for ecological and human health risks. *Science of the Total Environment*, 945: 173860.
 35. 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*, 25(6): 626–644.
 36. Roy, P. D., Sundar, S., Usha, T., Gowrappan, M., V, P. K., Periyasamy, R., Jonathan, M. P. and Chokkalingam, L. 2023. Pollution assessment with respect to five heavy metals in urban soils of the greater Chennai Region, southeast coast of India. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(2): 63.
 37. 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(2): 665-676.
 38. Siddig, M. M., Asabere, S. B., Al-Farraj, A. S., Brevik, E. C. and Sauer, D. 2025. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in anthropogenically-affected soils of Sudan: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17: 100601.
 39. Singh, M. P., Bhattacharyya, S., Chinu, K., Akter, R. and Marjo, C. E. 2025. Comprehensive chemical profiling of roadside soil and road dust of Delhi, India: Estimation of health risk and city fuel consumption. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 18: 100668.
 40. Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R. and Jeffrey, D. W. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer meeresuntersuchungen*, 33: 566-575.

41. 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.
42. 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.
43. Wang, Z., Lu, X., Yu, B., Yang, Y., Wang, L. and Lei, K. 2023. Ascertaining priority control pollution sources and target pollutants in toxic metal risk management of a medium-sized industrial city. *Science of the Total Environment*, 887: 164022.
44. Wang, P., Han, G., Hu, J., Zhang, Q., Tian, L., Wang, L., Liu, T., Ma, W., Li, J. and Zheng, H. 2024. Remarkable contamination characteristics, potential hazards and source apportionment of heavy metals in surface dust of kindergartens in a northern megacity of China. *Journal of Hazardous Materials*, 465: 133295.
45. Yin, J., Wu, X., Li, S., Li, C. and Guo, Z. 2020. Impact of environmental factors on gastric cancer: a review of the scientific evidence, human prevention and adaptation. *Journal of Environmental Sciences*, 89: 65-79.