



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

مقاله پژوهشی

ارزیابی آلودگی و سمیت محیطی عناصر بالقوه سمی در گردوغبار خیابانی شهر همدان، ایران

سیده شعله حسینی^۱، بهاره لرستانی^{۱*}، سهیل سبحان اردکانی^۱، مهرداد چراغی^۱، سحر رضایان^۲

۱- گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران
۲- گروه محیط‌زیست، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله:

زمینه و هدف: گردوغبار خیابانی به‌عنوان منبع و مخزن انواع آلاینده‌ها، شناساگر مناسبی برای ارزیابی آلودگی اتمسفر محسوب می‌شود. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی آلودگی و سمیت محیطی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس در گردوغبار خیابانی شهر همدان در سال ۱۴۰۲ انجام یافت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

روش بررسی: در مجموع ۱۰۸ نمونه گردوغبار خیابانی از ۱۲ مکان نمونه‌برداری منتخب با کاربری‌های مسکونی، تجاری و صنعتی طی سه فصل بهار، تابستان و پاییز با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌بندی شده برداشته شد و محتوی عناصر در آنها با روش ICP-OES خوانده شد. همچنین، مقادیر شاخص‌های IPI، PI، mERM-Q محاسبه شد.

واژگان کلیدی: عناصر بالقوه سمی، گردوغبار، تغییرات مکانی-زمانی، شاخص آلودگی، سمیت محیطی

یافته‌ها: بیشینه میانگین محتوی عناصر (mg/kg) گردوغبار برای آرسنیک، روی، کادمیم و مس به ترتیب برابر با ۵/۷۹، ۴۰۵، ۰/۷۵۸ و ۸۴/۸ مربوط به کاربری صنعتی و فصل پاییز و برای سرب نیز با ۱۱۰ مربوط به مناطق تجاری و فصل پاییز بود. نتایج محاسبه شاخص PI نشان داد که سطح آلودگی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس "متوسط" تا "خیلی زیاد" بوده است. میانگین مقادیر شاخص IPI نیز در دامنه ۲/۵۲ تا ۳/۹۰ متغیر و بیانگر شرایط آلودگی "زیاد" در همه مکان‌ها و فصول بود. از طرفی، مقادیر میانگین mERM-Q در نمونه‌های گردوغبار برابر با ۰/۲۹۹ و بیانگر ۲۱ درصد احتمال سمیت بود.

نتیجه‌گیری: تاثیر فعالیت‌های انسانی، تغییرات فصلی و نوسانات منابع انتشار بر آلودگی عناصر بالقوه سمی گردوغبار خیابانی شهر همدان قابل توجه بوده است؛ لذا، شناسایی و کنترل منابع انتشار عناصر به‌ویژه در مناطق با سطوح آلودگی بیشتر به‌منظور حفظ سلامت اکوسیستم شهری و شهروندان توصیه می‌شود.

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

Please cite this article as: Hosseini SSh, Lorestani B, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Rezaian S. Evaluation of pollution and environmental toxicity of potentially toxic elements in street dust of city of Hamedan, west of Iran. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;17(4):789-808.

مقدمه

در عصر حاضر، آلودگی اکوسیستم شهری به عناصر بالقوه سمی، به دنبال توسعه شهرها و فعالیت‌های صنعتی و گسترش ناوگان حمل‌ونقل، روند رو به رشدی را طی کرده و به معضل اساسی بهداشتی شهروندان در کلان‌شهرها تبدیل شده است. در این خصوص، آلودگی هوا مهم‌ترین چالشی است که بیشتر شهروندان در سراسر جهان با آن مواجه هستند (۱).

ذرات معلق اتمسفری به‌عنوان مخلوط جامد پیچیده‌ای از خاک، مواد زیستی، آلی و معدنی با منشاء طبیعی یا انسان‌زاد، یکی از اشکال آلودگی‌های اتمسفری و از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت هوا، اقلیم و سلامت اکوسیستم محسوب می‌شوند (۲، ۳). اگرچه، مهم‌ترین نگرانی در رابطه با ذرات ترسیب‌شونده، اثرات بالقوه سوء بر اکوسیستم‌های خشکی، آبی، گیاهان و تغییر در چرخه‌های زیست‌زمین-شیمیایی است؛ اما آلودگی آن به انواع آلاینده‌های آلی و معدنی به‌لحاظ سلامت انسان نیز بسیار حایز اهمیت است (۴، ۵). با استناد به گزارش موسسه بین‌المللی تحقیقات سرطان، ذرات معلق اتمسفری به‌طور کلی با بروز سرطان، به‌ویژه سرطان ریه مرتبط هستند (۶). در این خصوص، ذرات راسب‌شده بر سطح جاده‌ها، خیابان‌ها و پیاده‌روها در مناطق شهری، به‌عنوان گردوغبار خیابانی، به‌سبب تأثیرات متقابل بین آلودگی هوا و خاک و همچنین قابلیت ایجاد آلودگی ثانویه از طریق تعلیق مجدد ذرات، یکی از آلاینده‌های مهم و معضل بهداشت عمومی در اکوسیستم‌های شهری محسوب می‌شوند (۷، ۸). در میان آلاینده‌های مختلف متصل به ذرات گردوغبار خیابانی، عناصر بالقوه سمی با منشا طبیعی و عمدتاً انسانی، به‌سبب ماندگاری طولانی در محیط، غیرقابل تجزیه زیستی بودن، تجمع و انباشت زیستی و ایجاد اثرات سمیت حاد و مزمن، چالش و نگرانی مهم و مشترک محیط‌زیستی، اقتصادی و بهداشت عمومی در سراسر جهان به‌شمار می‌آیند (۹، ۱۰). افزایش غلظت و محتوی این آلاینده‌ها در ذرات معلق اتمسفری نه‌تنها می‌تواند کیفیت اکوسیستم را کاهش

دهد، بلکه به‌طور مستقیم و از طریق استنشاق، بلع و تماس پوستی و همچنین غیرمستقیم از طریق زنجیر غذایی تهدیدی بالقوه برای سلامت جانداران و انسان محسوب می‌شود (۱۱). در این خصوص، نه‌تنها عناصر غیرضروری مانند آرسنیک، سرب و کادمیم که نقش متابولیکی مفید شناخته شده در فرآیندهای زیستی ندارند، بلکه عناصر ضروری نظیر روی و مس نیز به‌لحاظ بوم‌شناختی و زیستی حائز اهمیت ویژه‌ای هستند (۱۲). اگرچه قرار گرفتن در معرض مقادیر بسیار کم آرسنیک، سرب و کادمیم می‌تواند به ناهنجاری‌های کروموزومی، سرطان، آلزایمر، آسیب و اختلال عملکرد قلب، طحال، کبد و کلیه منجر شود (۱۳، ۱۴)؛ غلظت‌های بیش از حد مجاز روی و مس نیز می‌تواند خطر ابتلا به دیابت و بیماری‌های قلبی-عروقی، کلیوی، کبدی و پوستی را افزایش دهد (۱۵، ۱۶).

امروزه، گردوغبار خیابانی به‌عنوان منبع، مخزن و حامل آلاینده‌های آلی و معدنی، شناساگر مناسبی از آلودگی عناصر بالقوه سمی اتمسفری در محیط‌زیست شهری محسوب می‌شوند (۱۷، ۱۸). از این‌رو، تعیین محتوی عناصر کمیاب در این ماتریس محیطی به‌عنوان روشی مؤثر و اقتصادی به‌منظور حفظ سلامت اکوسیستم و انسان در سال‌های اخیر توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است (۱۹-۲۳). در این راستا، مطالعه‌های متعددی نیز در رابطه با ارزیابی محتوی و آلودگی عناصر بالقوه سمی گردوغبار خیابانی در شهرهای مختلف ایران انجام شده است (۱۷، ۲۴-۲۸) با این حال، تعداد اندکی از مطالعات نسبت به ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی آلودگی فلزی گردوغبار اقدام کرده‌اند (۲۹-۳۱). افزون بر این، نظر به توسعه شهری، صنعتی و افزایش روزافزون ترافیک درون شهری در همدان از یک‌سو و اثرات نامطلوب آلودگی احتمالی گردوغبار بر سلامت شهروندان، این پژوهش با هدف ارزیابی آلودگی و سمیت محیطی عناصر بالقوه سمی در گردوغبار خیابانی شهر همدان در سال ۱۴۰۲ انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

شهر همدان با ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متر از سطح دریا بین مدارهای ۴۸° ۳۱' عرض جغرافیایی شمالی و ۴۸° ۳۱' طول جغرافیایی شرقی در غرب ایران واقع شده است. این شهر، به‌عنوان مرکز استان همدان با جمعیت تقریبی ۵۵۰۰۰۰ نفر، اولین قطب جمعیتی استان است. میانگین دمای سالانه و بارندگی این شهر به ترتیب برابر با ۱۱/۳ °C و ۳۱۸ mm ثبت شده است. همدان با برخورداری از زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل جاده‌ای و راه‌های ارتباطی مهم، رشد سریع شهرنشینی و توسعه صنعتی در معرض آلودگی محیط به‌ویژه از لحاظ محتوی عناصر بالقوه سمی قرار دارد (۳۲).

نمونه برداری از گردوغبار

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، پس از انجام مطالعه‌های کتابخانه‌ای و بررسی‌های اولیه میدانی و با هدف تعیین محتوی، ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی، آلودگی و همچنین سمیت زیستی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس، نسبت به نمونه‌برداری از گردوغبار خیابانی شهر همدان اقدام شد. بدین منظور، پس از طبقه‌بندی محدوده مورد مطالعه به سه کاربری عمده شامل مناطق مسکونی (بیشترین سکونت‌گاه‌های شهروندان)، تجاری (بیشترین حجم تردد روزانه وسایل نقلیه) و صنعتی (واجد صنایعی نظیر کارگاه‌های جوشکاری و آب‌کاری فلزات، تولید محصولات پلاستیکی و چرمی و کارگاه‌های تعمیر و نقاشی خودرو)، ۱۲ مکان (چهار مکان از هر کاربری) نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی و با پراکنش مناسب در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. لازم به‌ذکر است که تعداد نمونه‌های گردوغبار با لحاظ کردن محدودیت‌های زمانی و مالی تعیین شدند. برای بررسی عامل زمان، نمونه‌برداری در اواخر هر ماه (دوره ۳۰ روزه) از فصول بهار، تابستان و پاییز (فصول خشک) سال ۱۴۰۲ و در روزهای آفتابی فاقد بارندگی از ۱۲ مکان انجام یافت. به‌منظور ایجاد شرایط یکنواخت و کاهش عوامل مداخله‌گر

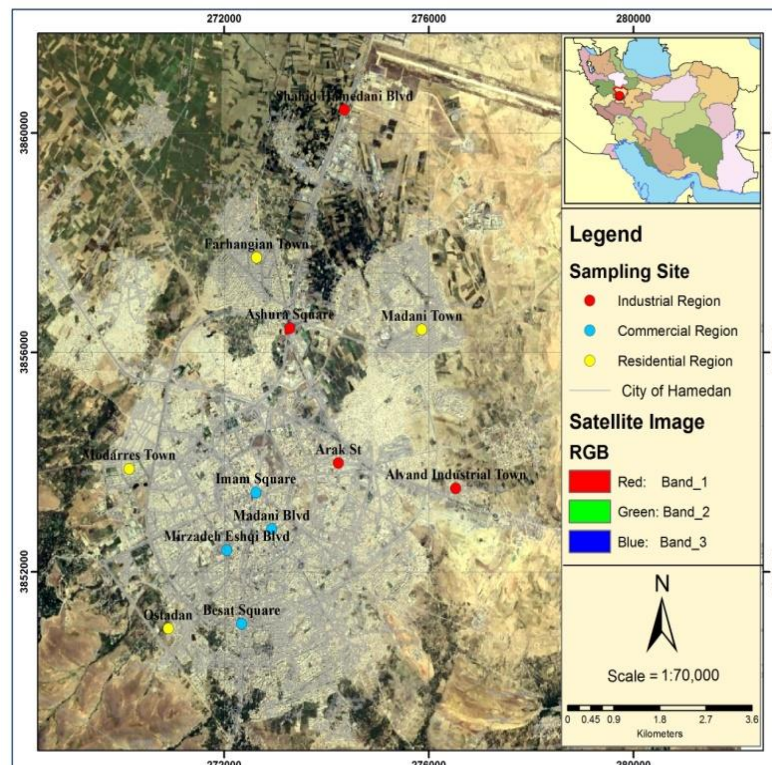
احتمالی، نمونه‌برداری در همه مکان‌ها به‌طور هم‌زمان (در یک روز کاری) با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی انجام شد. بدین صورت که از هر مکان حدود ۲۵۰ g گردوغبار همگن از سطح پیاده‌رو به‌شیوه جارویی و با استفاده از برس پلاستیکی برداشته شد. برای تهیه یک نمونه همگن از هر مکان نمونه‌برداری، پنج نمونه گردوغبار جمع‌آوری شده از هر مکان (مرکز و شعاع ۵ m از چهار طرف هر نقطه نمونه‌برداری) با یکدیگر مخلوط و به کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌دار واجد برچسب منتقل شدند (۲۶، ۳۳، ۳۴). از این‌رو، تعداد کل نمونه‌های گردوغبار در مجموع ۱۰۸ عدد (۳۶ نمونه فصل بهار، ۳۶ نمونه فصل تابستان و ۳۶ نمونه فصل پاییز) بود. در نهایت، نمونه‌ها برای انجام سایر مراحل آماده‌سازی به آزمایشگاه منتقل شدند (۳۵). موقعیت جغرافیایی مکان‌های نمونه‌برداری با استفاده از دستگاه GPS گارمین مدل 32X ETRE ثبت و موقعیت استقرار آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

آماده‌سازی نمونه‌های گردوغبار و تعیین محتوی عناصر در آنها

نمونه‌های گردوغبار پس از هوا خشک شدن در آزمایشگاه (به‌مدت هفت روز)، برای حذف ذرات بزرگ و بقایای آلی از الک ۰/۱۰۰ mm عبور داده شده و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی با برچسب معین در دمای ۴ °C نگهداری شدند (۱۹، ۲۰). به‌منظور تعیین غلظت کل عناصر در نمونه‌های گردوغبار، ۱ g از هر نمونه گردوغبار به بشر ۱۵۰ mL منتقل و ۵ mL اسید نیتريك غلیظ (مرک، آلمان) به هر بشر افزوده شد. پس از آن، محلول حاصل روی هیتر در دمای ۹۵ °C به‌مدت ۱۰ min بازروانی (Reflux) شد. پس از سرد شدن محلول‌ها، در دو مرحله متوالی هر بار ۵ mL اسید نیتريك غلیظ به نمونه‌ها افزوده و محلول حاصل به‌مدت ۳۰ min مجدداً روی هیتر با دمای ۹۵ °C بازروانی شد. سپس، ۲ mL آب مقطر و ۳ mL پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد (سیگما-آلدريج، اسپانیا) به محلول افزوده و محلول به‌مدت ۲-۳ min

اسپانیا انجام شد. همچنین، نرخ بازیابی (Recovery Rate) عناصر نیز برای اطمینان از دقت روش مورد استفاده برای تعیین محتوی عناصر مورد مطالعه محاسبه شد (۳۲). نتایج نشان داد که نرخ بازیابی عناصر از ۹۴/۴ تا ۹۹/۲ درصد متغیر بوده و از این رو، می توان اذعان داشت که روش مورد استفاده برای تعیین مقادیر عناصر مورد مطالعه از اطمینان کافی و دقت خوب برخوردار بوده است. همچنین، مقادیر حد تشخیص (Limit of Detection) برای عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس به ترتیب برابر ۰/۰۶۴، ۰/۰۶۲، ۰/۰۶۷، ۰/۰۷۶ mg/kg و مقادیر محدودیت کمی (Limits of Quantification) عناصر (mg/kg) آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس نیز به ترتیب برابر ۰/۲۱۸، ۰/۱۹۲، ۰/۱۷۷، ۰/۱۹۶ و ۰/۲۱۲ حاصل شد.

روی هیتر با دمای °C ۷۵ حرارت داده شد. در مرحله بعد، نمونه ها را از روی هیتر برداشته و پس از خنک شدن به هر یک از آن ها ۱۰ mL اسید کلریدریک غلیظ (مرک، آلمان) اضافه و بعد از ۱۵ min بازروانی، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۰ صاف و با آب دوبار تقطیر به حجم ۱۰۰ mL رسانده شد (۳۶). در نهایت، پس از ساخت محلول مادر (استوک) و استاندارد نمک عناصر و کالیبره کردن دستگاه ICP-OES مدل 710-ES ساخت شرکت Varian استرالیا، محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس به ترتیب در طول موج های ۱۸۸/۹۸۰، ۲۰۶/۲۰۰، ۲۲۰/۳۵۳، ۲۲۶/۵۰۲ و ۳۲۴/۷۵۴ nm خوانده شدند. تضمین و کنترل کیفیت (Quality Assurance/Quality Control) اندازه گیری ها با استفاده از مرجع استاندارد خاک (SQC-001) خریداری شده از شرکت سیگما-آلدریچ



شکل ۱- موقعیت ایستگاه های نمونه برداری

در معادله ۲:

PI_i و N به ترتیب نشان‌دهنده تعداد عناصر و شاخص آلودگی هر یک از عناصر مورد مطالعه هستند. طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر شاخص IPI در جدول ۱ آورده شده است (۳۷).

از طرفی، شاخص $mERM-Q$ به منظور تعیین و برآورد سمیت محیطی احتمالی ناشی از همه عناصر مورد مطالعه و با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد (۴۱):

$$mERM - Q = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (3)$$

در معادله ۳:

C_i بیانگر غلظت هر عنصر بر حسب mg/kg و n و ERM نیز به ترتیب نشان‌دهنده تعداد عناصر و متوسط حدود اثر هر عنصر مورد مطالعه (برابر با $۷۰/۰$ ، ۴۱۰ ، ۲۱۸ ، $۹/۶۰$ و ۲۷۰ به ترتیب برای عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس) هستند. طبقه‌بندی و تفسیر شاخص $mERM-Q$ در جدول ۱ آورده شده است (۴۲).

محاسبه مقادیر شاخص‌های آلودگی (PI)، شاخص آلودگی یکپارچه

(IPI) و شاخص سمیت محیطی احتمالی ($mERM-Q$)

در این پژوهش، برای ارزیابی سطح آلودگی ناشی از هر عنصر مورد مطالعه در نمونه‌های گردوغبار و از طرفی، آلودگی تجمعی ناشی از همه عناصر مورد مطالعه نسبت به محاسبه مقادیر شاخص‌های PI و IPI به ترتیب با استفاده از معادلات ۱ و ۲ اقدام شد (۳۷، ۳۸):

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

در معادله ۱:

$C_{background}$ و C_{sample} به ترتیب نشان‌دهنده محتوی عنصر مورد نظر در نمونه گردوغبار و غلظت عنصر در پوسته زمین (برابر با ۲، ۲/۴۰، ۲/۳۴، ۳۰/۰ و ۳/۲۸ به ترتیب برای عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس) هر دو بر حسب mg/kg هستند (۳۹). سطوح آلودگی و تفسیر آنها بر اساس مقادیر PI در جدول ۱ آورده شده است (۴۰).

$$IPI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n PI_i \quad (2)$$

جدول ۱- طبقه‌بندی مقادیر شاخص‌های PI ، IPI و $mERM-Q$

| شاخص آلودگی | | شاخص آلودگی یکپارچه | | شاخص میانگین ضریب متوسط حدود اثر | |
|-----------------|------------------|---------------------|--------------|----------------------------------|---------------------------------|
| ارزش | طبقه توصیفی | ارزش | طبقه توصیفی | ارزش | طبقه توصیفی |
| $PI < 1$ | آلودگی کم | $IPI < 1$ | آلودگی کم | $mERM-Q < 0.1$ | ۹ درصد احتمال سمیت (کم) |
| $1 \leq PI < 3$ | آلودگی متوسط | $1 \leq IPI < 2$ | آلودگی متوسط | $0.1 \leq mERM-Q < 0.5$ | ۲۱ درصد احتمال سمیت (متوسط) |
| $3 \leq PI < 6$ | آلودگی زیاد | $IPI \geq 2$ | آلودگی زیاد | $0.5 \leq mERM-Q < 1.5$ | ۴۹ درصد احتمال سمیت (زیاد) |
| $PI \geq 6$ | آلودگی خیلی زیاد | | | $mERM-Q \geq 1.5$ | ۷۶ درصد احتمال سمیت (خیلی زیاد) |

پاییز بود (میانگین سه کاربری). از سوی دیگر، میانگین محتوی عناصر (تمام کاربری‌ها و فصول) در نمونه‌ها از روند نزولی روی < سرب < مس < آرسنیک < کادمیم تبعیت کرد. علاوه بر این، روند نزولی میانگین محتوی عناصر آرسنیک، روی، کادمیم و مس برای کاربری‌های مختلف به صورت صنعتی < تجاری < مسکونی و برای عنصر سرب نیز به صورت تجاری < صنعتی < مسکونی بود. از طرفی، میانگین محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب و کادمیم برای فصول مختلف از روند نزولی پاییز < تابستان < بهار و برای عنصر مس از روند کاهشی پاییز < بهار < تابستان تبعیت کرد.

نتایج ارزیابی آلودگی و سمیت محیطی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های گردوغبار

نتایج ارزیابی شاخص آلودگی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های گردوغبار خیابانی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که میانگین مقادیر محاسبه شده PI در کاربری‌های مسکونی، تجاری و صنعتی به ترتیب در دامنه ۱/۵۲-۶/۷۴، ۱/۸۹-۶/۸۵ و ۲/۳۵-۹/۰۱ و برای فصول بهار، تابستان و پاییز نیز به ترتیب در دامنه ۱/۶۶-۶/۸۲، ۷/۴۰-۱/۷۷ و ۲/۳۲-۸/۳۷ متغیر بوده و شرایط آلودگی متوسط تا خیلی زیاد گردوغبار به عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس در همه فصول و مکان‌های نمونه برداری را نشان می‌دهد. همچنین، میانگین مقادیر PI برای عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم و مس به ترتیب برابر با ۱/۹۲، ۲/۳۸، ۲/۶۷ و ۲/۴۷ و بیانگر آلودگی متوسط گردوغبار به این عناصر بود. با این حال، میانگین مقادیر PI برای عنصر روی برابر با ۷/۵۳ و نشان‌دهنده آلودگی خیلی زیاد گردوغبار به این عنصر بود. از طرفی، روند نزولی میانگین مقادیر شاخص آلودگی برای عناصر به شرح روی < کادمیم < مس < سرب < آرسنیک بود.

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۱۹ بسته آماری برای علوم اجتماعی (Statistical Package for Social Science: SPSS) انجام یافت. بدین صورت که برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و فرض برابری واریانس‌ها به ترتیب از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov: K-S) و لوین (Levene Test) استفاده شد. برای مقایسه میانگین غلظت عناصر بین مکان‌ها و همچنین زمان‌های مختلف نمونه برداری از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک طرفه (One-way ANOVA) و آزمون چند دامنه‌ای دانکن (Duncan Multiple Range Test) در سطح معنی داری ۰/۰۵ استفاده شد.

یافته‌ها

آمار توصیفی مربوط به تعیین مقادیر عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های گردوغبار

آمار توصیفی مربوط به محتوی عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های گردوغبار در جدول ۲ آورده شده است. نتایج مندرج در جدول ۲ بیانگر آن است که محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس در گردوغبار خیابانی به ترتیب در دامنه ۲/۴۵-۵/۷۹ mg/kg، ۰/۵۱۹-۰/۷۵۸ mg/kg، ۵۳/۲-۱۱۰ kg، ۲۳۴-۴۰۵ mg/kg و ۵۲/۹-۸۴/۸ mg/kg متغیر بوده است. بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، روی، کادمیم و مس به ترتیب برابر با ۴/۶۳، ۳۵۹، ۰/۶۸۵ و ۷۷/۹ mg/kg و همگی مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از مکان‌های صنعتی بود (میانگین سه فصل نمونه برداری). از طرفی، بیشینه میانگین محتوی عنصر سرب با ۹۰/۶ mg/kg به نمونه‌های برداشت شده از مناطق تجاری تعلق داشت. همچنین، بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس به ترتیب برابر با ۴/۶۴، ۳۳۶، ۹۷/۹، ۰/۶۵۵ و ۷۵/۲ mg/kg و همگی مربوط به نمونه‌های گردوغبار فصل

جدول ۲- آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های گردوغبار شهر همدان (mg/kg)

| عنصر | کاربری | فصل نمونه‌برداری | | | میانگین محتوی سه فصل |
|--------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | بهار (۳۶ نمونه) | تابستان (۳۶ نمونه) | پاییز (۳۶ نمونه) | |
| آرسنیک | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۲/۴۵ ± ۱/۸۵ ^{Bb} | ۲/۷۴ ± ۰/۳۵ ^{Bab} | ۳/۹۰ ± ۰/۶۳ ^{Ba} | ۲/۹۹ ± ۱/۴۰ ^C |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۳/۴۸ ± ۰/۹۰ ^{ABa} | ۳/۶۲ ± ۰/۸۱ ^{Aa} | ۴/۲۳ ± ۰/۷۹ ^{Ba} | ۳/۷۵ ± ۰/۹۰ ^B |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۴/۰۱ ± ۰/۷۰ ^{Ab} | ۴/۲۸ ± ۰/۷۹ ^{Ab} | ۵/۷۹ ± ۰/۵۳ ^{Aa} | ۴/۶۳ ± ۱/۰۱ ^A |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۳/۳۲ ± ۱/۳۷ ^b | ۳/۵۵ ± ۱/۱۳ ^b | ۴/۶۴ ± ۱/۰۵ ^a | ۳/۷۹ ± ۱/۲۹ |
| روی | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۲۵۲ ± ۵۰/۶ ^{Ba} | ۲۵۲ ± ۳۶/۱ ^{Ca} | ۳۰۸ ± ۹۳/۶ ^{Ba} | ۲۶۸ ± ۶۴/۳ ^B |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۲۳۴ ± ۲۹/۲ ^{Bb} | ۲۹۵ ± ۳۳/۷ ^{Ba} | ۲۹۶ ± ۷۴/۵ ^{Ba} | ۲۷۸ ± ۵۳/۹ ^{AB} |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۳۳۶ ± ۶۵/۳ ^{Ab} | ۳۴۴ ± ۴۴/۵ ^{Ab} | ۴۰۵ ± ۴۶/۶ ^{Aa} | ۳۵۹ ± ۵۷/۹ ^A |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۲۷۴ ± ۶۶/۱ ^b | ۲۹۷ ± ۵۳/۴ ^b | ۳۳۶ ± ۸۶/۷ ^a | ۳۰۲ ± ۷۱/۲ |
| سرب | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۵۳/۲ ± ۶/۹۲ ^{Bb} | ۶۲/۹ ± ۱۰/۷ ^{Bb} | ۷۴/۸ ± ۱۳/۵ ^{Ba} | ۶۳/۵ ± ۱۳/۲ ^B |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۷۵/۲ ± ۱۱/۶ ^{Ac} | ۸۷/۶ ± ۱۰/۹ ^{Ab} | ۱۱۰ ± ۱۵/۰ ^{Aa} | ۹۰/۶ ± ۱۸/۳ ^A |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۷۱/۱ ± ۱۵/۸ ^{Ac} | ۸۸/۹ ± ۱۲/۲ ^{Ab} | ۱۰۸ ± ۱۳/۸ ^{Aa} | ۸۹/۳ ± ۱۹/۴ ^A |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۶۶/۵ ± ۱۵/۱ ^c | ۷۹/۸ ± ۱۶/۴ ^b | ۹۷/۹ ± ۲۱/۴ ^a | ۸۱/۲ ± ۲۱/۱ |
| کادمیم | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۰/۵۱۹ ± ۰/۱۳۵ ^{Aa} | ۰/۵۲۷ ± ۰/۱۳۹ ^{Ba} | ۰/۵۸۸ ± ۰/۱۰۱ ^{Ba} | ۰/۵۴۲ ± ۰/۱۲۷ ^B |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۰/۵۴۴ ± ۰/۱۰۱ ^{Ab} | ۰/۷۱۰ ± ۰/۱۹۸ ^{Aa} | ۰/۵۸۱ ± ۰/۱۳۵ ^{Bab} | ۰/۶۲۶ ± ۰/۱۷۱ ^A |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۰/۶۲۵ ± ۰/۱۶۶ ^{Ab} | ۰/۶۴۹ ± ۰/۱۱۹ ^{ABb} | ۰/۷۵۸ ± ۰/۱۴۴ ^{Aa} | ۰/۶۸۵ ± ۰/۱۵۴ ^A |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۰/۵۶۲ ± ۰/۱۳۹ ^b | ۰/۶۲۹ ± ۰/۱۶۹ ^{ab} | ۰/۶۵۵ ± ۰/۱۵۹ ^a | ۰/۶۷۱ ± ۰/۱۶۱ |
| مس | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۶۷/۸ ± ۵/۷۲ ^{Bab} | ۵۸/۴ ± ۱۰/۸ ^{Bb} | ۷۳/۲ ± ۱۳/۸ ^{ABa} | ۶۵/۳ ± ۱۲/۱ ^B |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۷۷/۸ ± ۱۲/۹ ^{Aa} | ۵۲/۹ ± ۷/۹۹ ^{Bb} | ۶۷/۶ ± ۱۵/۴ ^{ABa} | ۶۴/۲ ± ۱۵/۷ ^B |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۶۶/۷ ± ۹/۱۵ ^{ABb} | ۸۰/۹ ± ۸/۹۴ ^{Aa} | ۸۴/۸ ± ۱۲/۲ ^{Aa} | ۷۷/۹ ± ۱۲/۲ ^A |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۷۰/۷ ± ۱۰/۶ ^{ab} | ۶۴/۱ ± ۱۵/۳ ^b | ۷۵/۲ ± ۱۳/۷ ^a | ۶۹/۲ ± ۱۴/۷ |

مقادیر مشخص شده با حروف کوچک غیرمشترک (a, b, c و ...) در هر ردیف، بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0/05$) بین میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در فصول مختلف، و مقادیر مشخص شده با حروف بزرگ غیرمشترک (A, B, C و ...) در هر ستون نیز بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ($p < 0/05$) بین میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در کاربری‌های مختلف بر اساس نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه و چند دامنه‌ای دانکن است.

جدول ۳- مقادیر شاخص PI عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس در نمونه‌های گردوغبار خیابانی به تفکیک فصل و مکان نمونه‌برداری

| عصر | کاربری | فصل نمونه‌برداری | | | میانگین محتوی سه فصل (۱۰۸ نمونه) |
|--------|------------------------------|------------------|--------------------|------------------|----------------------------------|
| | | بهار (۳۶ نمونه) | تابستان (۳۶ نمونه) | پاییز (۳۶ نمونه) | |
| آرسنیک | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۱/۲۳ | ۱/۳۷ | ۱/۹۵ | ۱/۵۲ |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۱/۷۴ | ۱/۸۱ | ۲/۱۱ | ۱/۸۹ |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۲/۰۱ | ۲/۱۴ | ۲/۸۶ | ۲/۳۵ |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۱/۶۶ | ۱/۷۷ | ۲/۳۲ | ۱/۹۲ |
| روی | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۶/۲۷ | ۶/۲۸ | ۷/۶۷ | ۶/۷۴ |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۵/۸۴ | ۷/۳۵ | ۷/۳۶ | ۶/۸۵ |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۸/۳۶ | ۸/۵۷ | ۱۰/۰۱ | ۹/۰۱ |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۶/۸۲ | ۷/۴۰ | ۸/۳۷ | ۷/۵۳ |
| سرب | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۱/۵۵ | ۱/۸۴ | ۲/۱۹ | ۱/۸۶ |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۲/۲۰ | ۲/۵۶ | ۳/۲۳ | ۲/۶۶ |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۲/۰۸ | ۲/۶۰ | ۳/۱۶ | ۲/۶۱ |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۱/۹۴ | ۲/۳۳ | ۲/۸۶ | ۲/۳۸ |
| کادمیم | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۲/۲۵ | ۲/۲۹ | ۲/۵۵ | ۲/۳۷ |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۲/۳۶ | ۳/۰۹ | ۲/۵۳ | ۲/۶۶ |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۲/۷۲ | ۲/۸۲ | ۳/۴۷ | ۳/۰۰ |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۲/۴۴ | ۲/۷۳ | ۲/۸۵ | ۲/۶۷ |
| مس | مسکونی (۱۲ نمونه) | ۲/۳۹ | ۲/۰۶ | ۲/۵۹ | ۲/۳۵ |
| | تجاری (۱۲ نمونه) | ۲/۷۴ | ۱/۸۷ | ۲/۳۹ | ۲/۳۴ |
| | صنعتی (۱۲ نمونه) | ۲/۳۶ | ۲/۸۶ | ۲/۹۹ | ۲/۷۴ |
| | میانگین کاربری‌ها (۳۶ نمونه) | ۲/۵۰ | ۲/۲۶ | ۲/۶۶ | ۲/۴۷ |

نتایج ارزیابی آلودگی تجمعی و سمیت محیطی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های گردوغبار در جدول ۴ آورده شده است. بر این اساس، مقادیر محاسبه شده شاخص IPI در کاربری‌های مختلف در دامنه ۲/۶۸-۳/۵۴ و در فصول مختلف نیز در دامنه ۲/۸۷-۳/۳۵ متغیر و بیانگر سطح آلودگی "زیاد" گردوغبار در همه فصول و مکان‌های مورد مطالعه به عناصر مورد مطالعه بود. به علاوه، مقادیر میانگین شاخص IPI برابر با ۳/۰۸، سطح آلودگی "زیاد" گردوغبار در منطقه مورد مطالعه را نمایندگی می‌کند. از طرفی، مقادیر mERM-Q در کاربری‌های مسکونی، تجاری و صنعتی به ترتیب در دامنه ۰/۲۹۶-۰/۲۳۹، ۰/۳۲۰-۰/۲۶۲ و ۰/۳۹۳-۰/۳۰۳ و برای فصول بهار، تابستان و پاییز به ترتیب در دامنه ۰/۲۳۹-۰/۲۳۵، ۰/۲۴۲-۰/۳۹۳ و ۰/۲۹۶-۰/۳۹۳ متغیر، و بیانگر سمیت زیستی متوسط گردوغبار آلوده در همه فصول و مکان‌های نمونه‌برداری بود. بیشینه میانگین مقادیر mERM-Q برابر با ۰/۳۴۳ مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از مکان‌ها با کاربری صنعتی بود (میانگین سه فصل نمونه‌برداری). همچنین، بیشینه میانگین مقادیر mERM-Q برابر با ۰/۳۳۶ مربوط به نمونه‌های گردوغبار فصل پاییز بود (میانگین سه کاربری). از سوی دیگر، میانگین کل مقادیر mERM-Q برابر با ۰/۲۹۹ و احتمال سمیت گردوغبار به میزان ۲۱ درصد را نشان می‌دهد.

نتایج ارزیابی آلودگی تجمعی و سمیت محیطی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های گردوغبار در جدول ۴ آورده شده است. بر این اساس، مقادیر محاسبه شده شاخص IPI در کاربری‌های مختلف در دامنه ۲/۶۸-۳/۵۴ و در فصول مختلف نیز در دامنه ۲/۸۷-۳/۳۵ متغیر و بیانگر سطح آلودگی "زیاد" گردوغبار در همه فصول و مکان‌های مورد مطالعه به عناصر مورد مطالعه بود. به علاوه، مقادیر میانگین شاخص IPI برابر با ۳/۰۸، سطح آلودگی "زیاد" گردوغبار در منطقه مورد مطالعه را نمایندگی می‌کند. از طرفی، مقادیر mERM-Q در کاربری‌های مسکونی، تجاری و صنعتی به ترتیب در دامنه ۰/۲۹۶-۰/۲۳۹، ۰/۳۲۰-۰/۲۶۲ و ۰/۳۹۳-۰/۳۰۳ و برای فصول بهار، تابستان و پاییز به ترتیب در دامنه ۰/۲۳۹-۰/۲۳۵، ۰/۲۴۲-۰/۳۹۳ و ۰/۲۹۶-۰/۳۹۳ متغیر، و بیانگر سمیت زیستی متوسط گردوغبار آلوده در همه فصول و مکان‌های نمونه‌برداری بود. بیشینه میانگین مقادیر mERM-Q برابر با ۰/۳۴۳ مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از مکان‌ها با کاربری صنعتی بود (میانگین سه فصل نمونه‌برداری). همچنین، بیشینه میانگین مقادیر mERM-Q برابر با ۰/۳۳۶ مربوط به نمونه‌های گردوغبار فصل پاییز بود (میانگین سه کاربری). از سوی دیگر، میانگین کل مقادیر mERM-Q برابر با ۰/۲۹۹ و احتمال سمیت گردوغبار به میزان ۲۱ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های IPI و mERM-Q عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس در نمونه‌های گردوغبار خیابانی به تفکیک فصل و مکان نمونه‌برداری

| کاربری | IPI | | | | mERM-Q | | | |
|-------------------|------|---------|-------|----------------|--------|---------|-------|----------------|
| | بهار | تابستان | پاییز | میانگین سه فصل | بهار | تابستان | پاییز | میانگین سه فصل |
| مسکونی | ۲/۵۲ | ۲/۵۶ | ۲/۹۵ | ۲/۶۸ | ۰/۲۳۹ | ۰/۲۴۲ | ۰/۲۹۶ | ۰/۲۵۹ |
| تجاری | ۲/۸۰ | ۳/۰۹ | ۳/۱۹ | ۳/۰۳ | ۰/۲۶۲ | ۰/۲۸۹ | ۰/۳۲۰ | ۰/۲۹۰ |
| صنعتی | ۳/۲۸ | ۳/۴۴ | ۳/۹۰ | ۳/۵۴ | ۰/۳۰۳ | ۰/۳۳۵ | ۰/۳۹۳ | ۰/۳۴۳ |
| میانگین سه کاربری | ۲/۸۷ | ۳/۰۳ | ۳/۳۵ | ۳/۰۸ | ۰/۲۷۴ | ۰/۲۸۹ | ۰/۳۳۶ | ۰/۲۹۹ |

نتایج پردازش آماری داده‌ها
نتایج آزمون آماری K-S نشان داد با توجه به سطح معنی‌داری (p) بزرگ‌تر از ۰/۰۵، همه داده‌های مربوط به مقادیر محتوی عناصر در نمونه‌های گردوغبار از توزیع نرمال برخوردار بوده‌اند (جدول ۵).

جدول ۵- مقادیر سطح معنی‌داری مربوط به بررسی نرمالیتی توزیع داده‌ها

| آرسنیک | روی | سرب | کادمیم | مس |
|--------|-------|-------|--------|-------|
| ۰/۵۷۰ | ۰/۶۵۰ | ۰/۹۶۸ | ۰/۷۲۳ | ۰/۹۱۶ |

نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (جدول ۲ و ۶) نیز نشان داد که بین فصول و مکان‌های نمونه‌برداری از حیث میانگین محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس در نمونه‌های گردوغبار خیابانی اختلاف معنی‌دار آماری وجود داشته است ($p < 0.05$).

جدول ۶- مقایسه فصول و مکان‌های نمونه‌برداری از حیث میانگین محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس در نمونه‌های گردوغبار خیابانی

| کاربری/فصل | آرسنیک | | روی | | سرب | | کادمیم | | مس | |
|------------|--------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|--------|---------------|-------|---------------|
| | آماره | سطح معنی‌داری | آماره | سطح معنی‌داری | آماره | سطح معنی‌داری | آماره | سطح معنی‌داری | آماره | سطح معنی‌داری |
| مسکونی | ۲/۸۱ | ۰/۰۴۰ | ۲/۳۸ | ۰/۰۳۵ | ۸/۱۹ | ۰/۰۰۲ | ۰/۷۳۲ | ۰/۰۴۳ | ۴/۹۴ | ۰/۰۱۶ |
| تجاری | ۱/۸۶ | ۰/۰۰۸ | ۴/۶۳ | ۰/۰۱۹ | ۱۷/۱ | ۰/۰۰۰ | ۳/۰۴ | ۰/۰۴۶ | ۱۰/۹ | ۰/۰۰۰ |
| صنعتی | ۱۵/۳ | ۰/۰۰۰ | ۴/۴۴ | ۰/۰۲۲ | ۱۴/۵ | ۰/۰۰۰ | ۳/۶۷ | ۰/۰۴۰ | ۷/۴۳ | ۰/۰۰۳ |
| میانگین | ۱۵/۳ | ۰/۰۰۰ | ۲۰/۲ | ۰/۰۰۰ | ۲۲/۲ | ۰/۰۰۰ | ۶/۲۷ | ۰/۰۰۳ | ۹/۰۸ | ۰/۰۰۰ |
| بهار | ۳/۱۹ | ۰/۰۱۱ | ۹/۱۶ | ۰/۰۰۱ | ۷/۵۹ | ۰/۰۰۳ | ۱/۳۰ | ۰/۰۳۳ | ۳/۱۴ | ۰/۰۴۴ |
| تابستان | ۷/۷۴ | ۰/۰۰۲ | ۱۷/۳ | ۰/۰۰۰ | ۲۰/۳ | ۰/۰۰۰ | ۴/۳۳ | ۰/۰۲۱ | ۳۰/۵ | ۰/۰۰۰ |
| پاییز | ۱۸/۶ | ۰/۰۰۰ | ۵/۲۱ | ۰/۰۱۵ | ۱۶/۱ | ۰/۰۰۰ | ۷/۳۷ | ۰/۰۰۴ | ۴/۱۹ | ۰/۰۳۷ |
| میانگین | ۸/۸۱ | ۰/۰۰۰ | ۵/۱۵ | ۰/۰۰۸ | ۱۹/۲ | ۰/۰۰۰ | ۲/۲۱ | ۰/۰۱۶ | ۴/۷۳ | ۰/۰۱۱ |

بحث

گردوغبار خیابانی به‌عنوان منبع، مخزن و حامل عناصر کمیاب و همچنین ترکیبات آلی ابزار محیطی اقتصادی و مناسب برای سنجش آلودگی اکوسیستم شهری به‌شمار می‌آید. نتایج پژوهش نشان داد که بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، روی، کادمیم و مس در نمونه‌های گردوغبار همگی مربوط به نمونه‌های جمع‌آوری شده از کاربری صنعتی و بیشینه میانگین محتوی عنصر سرب مربوط به نمونه‌های برداشت‌شده از مناطق تجاری بود. در این خصوص، بیشینه محتوی عناصر در مکان‌های صنعتی و تجاری در مقایسه با کاربری مسکونی را می‌توان با حجم بالای فعالیت‌های انسانی و انتشار مداوم آلاینده‌های فلزی از منابع ثابت و متحرک مرتبط دانست. در مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، Xu و همکاران (۲۰۱۵)، Ugulu و همکاران (۲۰۱۹)، El-Khatib و همکاران (۲۰۲۰) و Roy و همکاران (۲۰۲۰) بیشترین محتوی عناصر بالقوه سمی را در نمونه‌های گردوغبار برداشت شده از مناطق صنعتی و تجاری گزارش کردند (۴۳-۴۶).

ثابت شده است که آرسنیک، شاخص احتراق سوخت‌های فسیلی و کادمیم و مس نیز شاخص‌های اصلی فعالیت‌های صنعتی (به‌ویژه فرآوری و آب‌کاری فلزات) به‌شمار می‌آیند (۴۷، ۴۸). همچنین، انتشارات ترافیکی (منابع احتراقی و غیراحتراقی) از دیگر منابع مهم عناصر آرسنیک، کادمیم و مس در اکوسیستم شهری محسوب می‌شوند (۴۹، ۵۰). از طرفی، فلز روی به‌طور عمده از فعالیت‌های صنعتی، ترافیکی و انتشارات ناشی از احتراق سوخت فسیلی نشأت می‌گیرد (۵۱، ۵۲). بنابراین، افزایش محتوی عناصر آرسنیک، روی، کادمیم و مس در مناطق صنعتی مورد مطالعه را می‌توان با توسعه صنایع مختلف به‌ویژه جوشکاری و آب‌کاری فلزات، تولید محصولات پلاستیکی، چرمی و همچنین فعالیت کارگاه‌های تعمیر و نقاشی خودرو مرتبط دانست. Cai و همکاران (۲۰۲۲) و Patel و همکاران (۲۰۲۳) نیز بیشترین غلظت عناصر روی، کادمیم و مس در گردوغبار هاندان (چین) و دهلی (هند) را در نمونه‌های برداشت

شده از مناطق صنعتی گزارش کرده و آن‌را با فعالیت‌های ذوب فلزات و ریخته‌گری، تولید رنگدانه، نساجی، محصولات چرمی، پلاستیک و صنایع غذایی مرتبط دانستند (۵۳، ۵۴). از طرفی، انتشار سرب در محیط به‌عنوان شاخص فعالیت‌های ترافیکی، به‌طور عمده با منابع غیر احتراقی (ذرات حاصل از استهلاک و فرسایش بدنه خودرو، لنت ترمز و نش‌ت روان‌کننده‌ها) مرتبط دانسته شده است (۵۵، ۵۶). از این‌رو، بیشینه محتوی سرب در نمونه‌های گردوغبار جمع‌آوری شده از مناطق تجاری را می‌توان با حجم زیاد ترافیک در این کاربری مرتبط دانست. نتایج پژوهش Gholizadeh و همکاران (۲۰۱۹) و Gopal و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان داد که انتشارات مداوم ناشی از ترافیک (نش‌ت روان‌کننده‌ها، سایش و خوردگی قطعات خودرو) منبع عمده افزایش محتوی عنصر سرب در گردوغبار مناطقی با حجم ترافیک زیاد بوده است (۵۷، ۵۸). افزون بر این، نتایج سنجش میانگین محتوی عناصر در فصول مختلف نشان داد که بیشینه میانگین محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس به‌ترتیب برابر با ۴/۶۴، ۳۳۶، ۹۷/۹، ۰/۶۵۵ و ۷۵/۲ mg/kg و همگی به نمونه‌های فصل پاییز تعلق داشت (میانگین از سه کاربری). در این خصوص، بیشینه محتوی عناصر در نمونه‌های برداشت شده فصل پاییز در مقایسه با سایر فصول را می‌توان با کاهش دمای هوا و افزایش مصرف سوخت فسیلی (به‌ویژه گرمایش ساختمانی) از یک‌سو و از طرفی، افزایش قابل‌توجه حجم ترافیک هم‌زمان با شروع سال تحصیلی در فصل پاییز مرتبط دانست. Ali-Taleshi و همکاران (۲۰۲۲) و Ariapak و همکاران (۲۰۲۲) نیز بیشینه محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس را در نمونه‌های گردوغبار فصل پاییز گزارش و آن‌را با افزایش مصرف سوخت فسیلی و حجم ترافیک مرتبط دانستند (۹، ۵۹). همچنین Arhami و همکاران (۲۰۱۷)، Wang و همکاران (۲۰۲۰) و Kermani و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش کردند که تغییرات در ویژگی‌های آب و هوایی (مانند دما) و از سویی، فعالیت‌ها و انتشارات انسانی (مانند نوسانات فصلی حمل و نقل و فعالیت‌های صنعتی) بر

محتوی عناصر فلزی گردوغبار خیابانی تاثیرگذار بوده است (۶۰-۶۲).

شاخص‌های PI و IPI ابزارهایی مفید برای تعیین سطح آلودگی و برآوردی جامع از میزان آلودگی گردوغبار به عناصر کمیاب هستند (۶۳، ۶۴). مقادیر محاسبه شده شاخص PI بیانگر آلودگی "متوسط" تا "زیاد" گردوغبار به عناصر آرسنیک، سرب، کادمیم و مس در همه کاربری‌ها و فصول مورد مطالعه بود (جدول ۳). این در حالی است که مقادیر شاخص PI برای عنصر روی، آلودگی "خیلی زیاد" گردوغبار در همه کاربری‌ها و فصول مورد مطالعه را نشان داد. این موضوع را می‌توان با میانگین غلظت زیاد روی مرتبط دانست و نشان می‌دهد که منابع انسان‌پدید احتمالاً مهمترین عامل در بروز این وضعیت هستند. از طرفی، بیشینه میانگین مقادیر PI برای عناصر آرسنیک، روی، کادمیم و مس به ترتیب با ۲/۸۹، ۱۰/۱، ۳/۴۷ و ۲/۹۹ مربوط به مناطق صنعتی و فصل پاییز بود. از سوی دیگر، بیشینه میانگین مقادیر PI برای عنصر سرب با ۳/۲۴ مربوط به کاربری تجاری و فصل پاییز بود. علاوه بر این، مقادیر محاسبه شده شاخص IPI بیانگر آلودگی "زیاد" گردوغبار به عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس در همه کاربری‌ها و فصول مورد مطالعه بود. همچنین، بیشینه میانگین مقدار IPI با ۳/۹۰ نیز مربوط به کاربری صنعتی و فصل پاییز بود. لذا، می‌توان ادعان داشت که فعالیت‌های شهری، تغییرات فصلی و نوسانات منابع انتشار به احتمال زیاد تأثیر قابل‌توجهی بر آلودگی گردوغبار خیابانی شهر همدان با عناصر بالقوه سمی داشته است. در این خصوص، Li و همکاران (۲۰۲۱)، Men و همکاران (۲۰۲۱)، و Yu و همکاران (۲۰۲۳) نیز افزایش آلودگی فلزی گردوغبار خیابانی در کاربری‌های تجاری و صنعتی و فصول سرد را با فعالیت‌های انسانی و به‌ویژه انتشارات ترافیکی و احتراق سوخت فسیلی مرتبط دانستند (۳۰، ۶۵، ۶۶).

شاخص تلفیقی mERM-Q ابزار مفیدی برای تعیین سطح سمیت و مخاطرات بالقوه محیط‌زیستی آلودگی عناصر بالقوه

سمی در ماتریس‌های مختلف محیطی از جمله گردوغبار است (۴۲). نتایج این پژوهش نشان داد که مقادیر mERM-Q برای هر سه فصل در کاربری‌های مسکونی، تجاری و صنعتی در محدوده ۰/۳۹۳-۰/۲۳۹ متغیر بود (جدول ۴). همچنین، میانگین مقادیر mERM-Q برابر با ۰/۲۹۹ و سطح سمیت متوسط (۲۱ درصد احتمال سمیت) در کل منطقه مورد مطالعه (میانگین همه کاربری‌ها و فصول) را نشان داد. چنین یافته‌ای افزون بر این که بیانگر مخاطره محیطی برای زیست‌مندان است، آلودگی گردوغبار خیابانی به عناصر مورد مطالعه را نیز تایید کرده و احتمالاً حاکی از کاهش کیفیت اتمسفر در آینده است. در این خصوص، Hosseinniaee و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که میانگین مقادیر شاخص mERM-Q عناصر سرب، کادمیم و کروم در نمونه‌های خاک معدن سرب و روی زنجان نشان‌دهنده سمی بودن متوسط تا زیاد (۲۱ تا ۴۹ درصد) خاک بوده است (۶۷). همچنین، Hosseini و همکار (۲۰۲۲) با ارزیابی آلودگی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های شهر همدان، با استناد به میانگین مقادیر محاسبه شده mERM-Q، سطح سمیت محیطی عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل را "کم" گزارش کردند (۴۱). از طرفی، Liu و همکاران (۲۰۲۳) با ارزیابی مخاطره محیطی عناصر کمیاب خاک سطحی یوننان (چین) و با استناد به مقادیر محاسبه شده mERM-Q، احتمال سمیت عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس را برابر با ۴۹ درصد و در سطح "زیاد" گزارش کردند (۶۸).

نتیجه‌گیری

گردوغبار خیابانی، یک شاخص محیطی اقتصادی و مفید برای سنجش آلودگی عناصر بالقوه سمی در اکوسیستم شهری محسوب می‌شود. بررسی نتایج مربوط به نمونه‌های گردوغبار نشان داد که کاربری‌ها با فعالیت‌های انسانی فشرده (صنعتی و تجاری)، از بیشینه محتوی عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس برخوردار بوده است که خود نشان‌دهنده تأثیر

و زیرساخت‌های فرآیند صنعتی‌سازی به کاهش آلودگی در آینده کمک می‌کند. همچنین، با توجه به اثرات عناصر بالقوه سمی بر سلامت اکوسیستم شهری و شهروندان، پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های گردوغبار خیابانی و همچنین کنترل منابع انتشار آلاینده‌ها توصیه می‌شوند. در نهایت، نظر به برخی کاستی‌های این پژوهش نظیر عدم تعیین منشا انتشار عناصر و مطالعه تعداد محدودی از آلاینده‌های فلزی، شناسایی و منشاء‌یابی آلودگی عناصر به‌منظور کنترل موثر آلودگی، مطالعه سایر عناصر بالقوه سمی و ارزیابی خطرهای محیط‌زیستی و بهداشتی آنها توصیه می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

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

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از رساله دکتری تخصصی علوم و مهندسی محیط‌زیست با عنوان "شیمی‌سنجی عناصر بالقوه سمی در گردوغبار خیابانی؛ تعیین محتوی، منشاء‌یابی، تغییرات فصلی، ارزیابی آلودگی و سمیت عناصر (مورد مطالعه: کلان شهر همدان)" و با کد ۱۷۱۸۴۸۱۰۰۶۲۶۵۶۲۲۸۴۰۲۷۱۶۲۷۹۸۷۴۶ است.

فعالیت‌های عمده شهری همچون حمل‌ونقل شهری، فعالیت‌های جوشکاری و آب‌کاری فلزات، تولید محصولات پلاستیکی و چرمی و کارگاه‌های تعمیر و نقاشی خودرو بر آلودگی گردوغبار به عناصر بالقوه سمی است. همچنین، بیشینه محتوی همه عناصر مورد مطالعه مربوط به نمونه‌های فصل پاییزی بود که به‌نظر می‌رسد با افزایش ترافیک و مصرف سوخت‌های فسیلی به‌سبب شروع سال تحصیلی و کاهش دما مرتبط باشد. از سوی دیگر، مقادیر شاخص PI در نمونه‌های گردوغبار، سطح آلودگی "متوسط" تا "خیلی زیاد" برای عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیم و مس را نشان داد. میانگین مقدار شاخص IPI نمونه‌های گردوغبار نیز با ۳/۰۸، شرایط آلودگی "زیاد" در منطقه مورد مطالعه را نشان داد. از طرفی، میانگین مقادیر شاخص mERM-Q نیز ۲۱ درصد احتمال سمیت گردوغبار خیابانی به عناصر کمیاب را نشان داد. یافته‌ها افزون بر این که مؤید تاثیر کاربری‌ها، تغییرات فصلی و نوسانات منابع انتشار بر آلودگی عناصر بالقوه سمی گردوغبار خیابانی شهر همدان بود، احتمالاً می‌تواند حاکی از کاهش کیفیت اتمسفر در آینده نیز باشد. از این‌رو، با هدف کاهش سطح آلودگی انسان‌پدید و حفظ سلامت اکوسیستم به‌ویژه در مناطق و فصولی با سطح آلودگی زیاد، تمهیدات پیشگیرانه و اصلاحی باید مدنظر قرار گیرند. در این خصوص، تلاش برای جلوگیری از تشکیل گردوغبار در منبع بسیار مهم است. افزون بر این، بهبود و بهینه‌سازی سیاست‌ها و راهبردهای مدیریت حمل‌ونقل شهری، شهرسازی

References

1. Deng W, Hao G, Liu W. Source-specific risks apportionment and critical sources identification of potentially harmful elements in urban road dust combining positive matrix factorization model with multiple attribute decision making method. *Ecological Indicators*. 2022;144:109449.
2. Kabir MH, Kormoker T, Islam MS, Khan R, Shammi RS, Tusher TR, et al. Potentially toxic elements in street dust from an urban city of a developing country: ecological and probabilistic health risks assessment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(40):57126-48.
3. Teran K, Žibret G, Fanetti M. Impact of urbanization and steel mill emissions on elemental composition of street dust and corresponding particle characterization. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;384:120963.
4. Hou S, Zheng N, Tang L, Ji X, Li Y, Hua X. Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of human exposure to Cu, Zn, Cd and Pb pollution in urban street dust across China between 2009 and 2018. *Environment International*. 2019;128:430-7.
5. Huang C, Zhang L, Meng J, Yu Y, Qi J, Shen P, et al. Characteristics, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in urban road dust of the Pearl River Delta, South China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022;236:113490.
6. Mishra A, Pervez S, Verma M, Candeias C, Pervez YF, Dugga P, et al. Chemical fractionation of particulate-bound metal (loid) s to evaluate their bioavailability, sources and associated cancer risk in India. *Science of the Total Environment*. 2023;857:159516.
7. Jan FA, Saleem S, Faisal S, Hussain I, Rauf A, Ullah N. Road dust as a useful tool for the assessment of pollution characteristics and health risks due to heavy metals: a case study from District Charsadda, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:1-13.
8. Padoan E, Romè C, Ajmone Marsan F. Bioaccessibility and size distribution of metals in road dust and roadside soils along a peri-urban transect. *Science of the Total Environment*. 2017;601:89-98.
9. Ariapak S, Jalalian A, Honarjoo N. Source identification, seasonal and spatial variations of airborne dust trace elements pollution in Tehran, the capital of Iran. *Urban Climate*. 2022;42:101049.
10. Sobhanardakani S. Human health risk assessment of potentially toxic heavy metals in the atmospheric dust of city of Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(28):28086-93.
11. Khodadadi N, Amini A, Dehbandi R. Contamination, probabilistic health risk assessment and quantitative source apportionment of potentially

- toxic metals (PTMs) in street dust of a highly developed city in north of Iran. *Environmental Research*. 2022;210:112962.
12. Han Q, Wang M, Cao J, Gui C, Liu Y, He X, et al. Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban parks and schools of Jiaozuo, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020;191:110157.
 13. Omid AH, Cheraghi M, Lorestani B, Sobhanardakani S, Jafari A. Biochar obtained from cinnamon and cannabis as effective adsorbents for removal of lead ions from water. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26:27905-14.
 14. Sobhanardakani S. Ecological and human health risk assessment of heavy metal content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran. *Biological Trace Element Research* 2019;187:602-10.
 15. Akar S, Lorestani B, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Moradi O. Surveying the efficiency of *Platanus orientalis* bark as biosorbent for Ni and Cr (VI) removal from plating wastewater as a real sample. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019;191:1-19.
 16. Li J, Li KM, Jiao L, Zang F, Li X, Yang YQ, et al. Contamination, ecological-health risks, and sources of potentially toxic elements in road-dust sediments and soils of the largest urban riverfront scenic park in China. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023;45(11):8169-86.
 17. Naraki H, Keshavarzi B, Zarei M, Moore F, Abbasi S, Kelly FJ, et al. Urban street dust in the Middle East oldest oil refinery zone: Oxidative potential, source apportionment, and health risk assessment of potentially toxic elements. *Chemosphere*. 2021;268:128825.
 18. Yang Y, Lu X, Yu B, Wang Z, Wang L, Lei K, et al. Exploring the environmental risks and seasonal variations of potentially toxic elements (PTEs) in fine road dust in resource-based cities based on Monte Carlo simulation, geo-detector and random forest model. *Journal of Hazardous Materials*. 2024:134708.
 19. Ivaneev A, Brzhezinskiy A, Karandashev V, Ermolin M, Fedotov P. Assessment of sources, environmental, ecological, and health risks of potentially toxic elements in urban dust of Moscow megacity, Russia. *Chemosphere*. 2023;321:138142.
 20. Rahman MS, Khan M, Jolly Y, Kabir J, Akter S, Salam A. Assessing risk to human health for heavy metal contamination through street dust in the Southeast Asian Megacity: Dhaka, Bangladesh. *Science of the Total Environment*. 2019;660:1610-22.
 21. Roy S, Gupta SK, Prakash J, Habib G, Baudh K, Nasr M. Ecological and human health risk assessment of heavy metal contamination in road dust in the National Capital Territory (NCT) of Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;30(12):20511-20522.

- Research. 2019;26:30413-25.
22. Vlasov D, Kosheleva N, Kasimov N. Spatial distribution and sources of potentially toxic elements in road dust and its PM10 fraction of Moscow megacity. *Science of the Total Environment*. 2021;761:143267.
23. Zhang J, Gu H, Chen S, Ai W, Dang Y, Ai S, et al. Assessment of heavy metal pollution and preschool children health risk in urban street dusts from different functional areas in a typical industrial and mining city, NW China. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023;45(10):7199-214.
24. Fouladi Fard R, Jafari A, Kamarahie B, Karimi M, Ghaderpoori M, Karami M, et al. Health risk assessment of heavy metals in the dust street of Mehran city, as a busy city in religious times, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31:49601-14.
25. Kamani H, Mirzaei N, Ghaderpoori M, Bazrafshan E, Rezaei S, Mahvi AH. Concentration and ecological risk of heavy metal in street dusts of Eslamshahr, Iran. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2018;24(4):961-70.
26. Malakootian M, Mohammadi A, Nasiri A, Oliveri Conti G, Faraji M. Correlation between heavy metal concentration and oxidative potential of street dust. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2022;15:731-8.
27. Mihankhah T, Saeedi M, Karbassi A. A comparative study of elemental pollution and health risk assessment in urban dust of different land-uses in Tehran's urban area. *Chemosphere*. 2020;241:124984.
28. Shojaee Barjoe S, Azizi M, Khaledi A, Kouhkan M, Soltani M, Farokhi H. Street dust-bound metal (loid) s in industrial areas of Iran: Moran's spatial autocorrelation distribution, eco-toxicological risk assessment, uncertainty and sensitivity analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023;20(8):8509-36.
29. Bourliva A, Kantiranis N, Papadopoulou L, Aidona E, Christophoridis C, Kollias P, et al. Seasonal and spatial variations of magnetic susceptibility and potentially toxic elements (PTEs) in road dusts of Thessaloniki city, Greece: A one-year monitoring period. *Science of the Total Environment*. 2018;639:417-27.
30. Men C, Liu R, Wang Q, Miao Y, Wang Y, Jiao L, et al. Spatial-temporal characteristics, source-specific variation and uncertainty analysis of health risks associated with heavy metals in road dust in Beijing, China. *Environmental Pollution*. 2021;278:116866.
31. Škrbić BD, Buljovčić M, Jovanović G, Antić I. Seasonal, spatial variations and risk assessment of heavy elements in street dust from Novi Sad, Serbia. *Chemosphere*. 2018;205:452-62.
32. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Heavy metal

- concentrations in roadside plants (*Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba*) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:13301-14.
33. Abbasi S, Keshavarzi B, Moore F, Hopke PK, Kelly FJ, Dominguez AO. Elemental and magnetic analyses, source identification, and oxidative potential of airborne, passive, and street dust particles in Asaluyeh County, Iran. *Science of the Total Environment*. 2020;707:136132.
34. Nargis A, Habib A, Islam MN, Chen K, Sarker MSI, Al Razee A, et al. Source identification, contamination status and health risk assessment of heavy metals from road dusts in Dhaka, Bangladesh. *Journal of Environmental Sciences*. 2022;121:159-74.
35. Men C, Liu R, Wang Q, Guo L, Shen Z. The impact of seasonal varied human activity on characteristics and sources of heavy metals in metropolitan road dusts. *The Science of the Total Environment*. 2018;637:844-54.
36. Khalid N, Hussain M, Young HS, Ashraf M, Hameed M, Ahmad R. Lead concentrations in soils and some wild plant species along two busy roads in Pakistan. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2018;100:250-8.
37. Hamzenejhad R. Quantitative assessment of soil heavy metals pollution. *Applied Soil Research*. 2020;8(2):37-52 (in Persian)
38. Hosseini NS, Sobhan Ardakani S. Evaluation of the impact of traffic volume on pollution and potential ecological risk of Zn, Pb, and Ni in suburban roadside soils in Hamedan, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*. 2021;35(2):119-34 (in Persian).
39. Bhuiyan MAH, Karmaker SC, Bodrud Doza M, Rakib MA, Saha BB. Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods. *Chemosphere*. 2021;263:128339.
40. Yin F, Meng W, Liu L, Feng K, Yin C. Spatial distribution and associated risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil surrounding the Ganhe Industrial Park in Qinghai province, China. *Land*. 2023;12(6):1172.
41. Hosseini NS, Sobhanardakani S. Pollution and potential ecological risk assessment of Pb, Cd, Cr and Ni in surface soils along some roads of city of Hamedan. *Journal of Environmental Health Engineering*. 2022a;9(3):349-64 (in Persian)
42. Hagh Nazar H, Hudson Edwards KA, Kumar V, Pourakbar M, Mahdavianpour M, Aghayani E. Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere*. 2021;285:131446.
43. El Khatib AA, Barakat NA, Youssef NA,

- Samir NA. Bioaccumulation of heavy metals air pollutants by urban trees. *International Journal of Phytoremediation*. 2020;22(2):210-22.
44. Roy A, Bhattacharya T, Kumari M. Air pollution tolerance, metal accumulation and dust capturing capacity of common tropical trees in commercial and industrial sites. *Science of the Total Environment*. 2020;722:137622.
45. Ugulu I, Unver MC, Dogan Y. Potentially toxic metal accumulation and human health risk from consuming wild *Urtica urens* sold on the open markets of Izmir. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2019;4(1):36.
46. Xu X, Lu X, Han X, Zhao N. Ecological and health risk assessment of metal in resuspended particles of urban street dust from an industrial city in China. *Current Science*. 2015:72-9.
47. Men C, Liu R, Wang Q, Guo L, Miao Y, Shen Z. 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*. 2019;652:27-39.
48. Sabet Aghlidi P, Cheraghi M, Lorestani B, Sobhanardakani S, Merrikhpour H. Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, case study: South of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2020;18:665-76.
49. Hosseini NS, Sobhan Ardakani S. 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*. 2023;9(2):197-214 (in Persian).
50. Hosseini NS, Sobhanardakani S. Concentration, sources, potential ecological and human health risks assessment of trace elements in roadside soil in Hamedan metropolitan, west of Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2024;104(17):5962-85.
51. Bozkurt Z, O Gaga E, Taşpınar F, Arı A, Pekey B, Pekey H, et al. Atmospheric ambient trace element concentrations of PM10 at urban and sub-urban sites: source apportionment and health risk estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018;190:1-17.
52. Sobhan Ardakani S, Maanijou M, Asadi H. Investigation of Pb, Cd, Cu and Mg concentrations in groundwater resources of Razan Plain. *Avicenna Journal of Clinical Medicine*. 2015;21(4):319-29 (in Persian).
53. Cai A, Zhang H, Zhao Y, Wang X, Wang L, Zhao H. 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*. 2022;10:950288.
54. Patel K, Chaurasia M, Rao KS. Heavy metal accumulation in leaves of selected plant species in urban areas of Delhi. *Environmental Science and*

- Pollution Research. 2023;30(10):27622-35.
55. Li J, Liu JZ, Tai XS, Jiao L, Zhang M, Zang F. 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*. 2024;46(2):1-20.
56. Sabzevari E, Sobhanardakani S. Analysis of selected heavy metals in indoor dust collected from city of Khorramabad, Iran: A case study. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 2018;10(3).
57. Gholizadeh A, Taghavi M, Moslem A, Neshat AA, Najafi ML, Alahabadi A, et al. Ecological and health risk assessment of exposure to atmospheric heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;184:109622.
58. Gopal V, Krishnamurthy R, Indhumathi A, Sharon BT, Priya TD, Rathinavel K, et al. Geochemical evaluation, ecological and human health risk assessment of potentially toxic elements in urban soil, southern India. *Environmental Research*. 2024;118413.
59. Ali Taleshi MS, Feiznia S, Masiol M. Seasonal and spatial variations of atmospheric depositions-bound elements over Tehran megacity, Iran: Pollution levels, PMF-based source apportionment and risks assessment. *Urban Climate*. 2022;42:101113.
60. Arhami M, Hosseini V, Shahne MZ, Bigdeli M, Lai A, Schauer JJ. Seasonal trends, chemical speciation and source apportionment of fine PM in Tehran. *Atmospheric Environment*. 2017;153:70-82.
61. Kermani M, Asadgol Z, Gholami M, Jafari AJ, Shahsavani A, Goodarzi B, et al. Occurrence, spatial distribution, seasonal variations, potential sources, and inhalation-based health risk assessment of organic/inorganic pollutants in ambient air of Tehran. *Environmental Geochemistry and Health*. 2021;43:1983-2006.
62. Wang X, Liu E, Lin Q, Liu L, Yuan H, Li Z. Occurrence, sources and health risks of toxic metal (loid) s in road dust from a mega city (Nanjing) in China. *Environmental Pollution*. 2020;263:114518.
63. Hosseini N, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Expansive herbaceous species as bio-tools for elements detection in the vicinity of major roads of Hamedan, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19(3):1611-24
64. Mohebian M, Sobhanardakani S, Taghavi L, Ghoddousi J. Analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in the surface soils collected from various land uses around Shazand Oil Refinery Complex, Arak, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:1-16.
65. Li Y, Zhou S, Jia Z, Liu K, Wang G. Temporal and spatial distributions and sources of heavy metals in atmospheric deposition in western Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*. 2021;284:117465.
66. Yu B, Lu X, Wang L, Liang T, Fan X, Yang

- Y, et al. Potentially toxic elements in surface fine dust of residence communities in valley industrial cities. *Environmental Pollution*. 2023;327:121523.
67. Hosseinniaee S, Jafary M, Tavili A, Zare S. Geochemical and ecological assessment of some heavy metals in the soil around the lead and zinc mine in northwestern of Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2021;14(1):159-72 (in Persian).
68. Liu X, Chi H, Tan Z, Yang X, Sun Y, Li Z, et al. 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*. 2023;458:132050.



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

Original Article



Evaluation of pollution and environmental toxicity of potentially toxic elements in street dust of city of Hamedan, west of Iran

Seyedeh Sholeh Hosseini¹, Bahareh Lorestani^{1*}, Soheil Sobhanardakani¹, Mehrdad Cheraghi¹, Sahar Rezaian²

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

2- Department of the Environment, Faculty of Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 10 September 2024

Revised: 30 November 2024

Accepted: 04 December 2024

Published: 08 March 2025

Keywords: Metal pollutants, Dust, Spatiotemporal variations, Pollution index, Environmental toxicity

***Corresponding Author:**

lorestanib@iauh.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: Street dust, as both a source and sink of pollutants, is considered a reliable indicator for assessing atmospheric pollution. Therefore, this study aimed to evaluate the pollution levels and environmental toxicity of arsenic (As), zinc (Zn), lead (Pb), cadmium (Cd), and copper (Cu) in street dust in the city of Hamedan in 2023.

Materials and Methods: A total of 108 street dust samples were collected from 12 sampling sites, including residential, commercial, and industrial regions, during the spring, summer, and fall seasons. The concentrations of the analyzed elements were determined using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). Additionally, pollution indices (PI), integrated pollution index (IPI), and mean effects range median quotient (mERM-Q) were calculated.

Results: The highest average concentrations of the analyzed elements in street dust were observed in the industrial regions and the fall season for As (5.79 mg/kg), Zn (405 mg/kg), Cd (0.758 mg/kg), and Cu (84.8 mg/kg). For Pb, the highest average concentration (110 mg/kg) was found in commercial regions during the fall season. PI values indicated pollution levels for As, Zn, Pb, Cd, and Cu ranging from "moderate" to "very high." The average IPI values varied between 2.52 and 3.90, reflecting "high" pollution conditions across all sampling sites and seasons. Furthermore, the average mERM-Q values suggested a 21% probability of elemental toxicity in the analyzed street dust samples.

Conclusion: The findings highlight the influence of human activities, seasonal variations, and emission source fluctuations on street dust pollution. To mitigate pollution, it is recommended to identify and control the release sources of these elements, particularly in regions with higher pollution levels.

Please cite this article as: Hosseini SSh, Lorestani B, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Rezaian S. Evaluation of pollution and environmental toxicity of potentially toxic elements in street dust of city of Hamedan, west of Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2025;17(4):789-808.

