

ارزیابی آلودگی و خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های کلان‌شهر همدان

نیره السادات حسینی^۱، سهیل سبحان اردکانی^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته دکتری تخصصی گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران
^۲ دکترای تخصصی علوم محیط‌زیست، استاد گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۳۱

چکیده

زمینه و هدف: حمل و نقل جاده‌ای یکی از منابع اصلی آلودگی فلزی است که می‌تواند خاک‌های کنار جاده را تحت تأثیر قرار دهد. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی آلودگی و خطر سمیت بالقوه عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های کلان‌شهر همدان در سال ۱۳۹۸ انجام یافت.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه توصیفی-مقطعی، پس از جمع‌آوری ۶۳ نمونه خاک سطحی در طول ۷۰۰ متر از یک قطعه ۹ کیلومتری از جاده‌های گل‌تپه، رزن و کرمانشاه و سپس آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌ها در آزمایشگاه، محتوی عناصر در نمونه‌های خاک به‌روش طیف‌سنجی نوری پلاسمای جفت شده القایی (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry: ICP-OES) خوانده شد. همچنین، نسبت به محاسبه شاخص‌های غنی‌شدگی (EF)، سمیت محیطی (mERM-Q)، خطر بوم‌شناختی (mPEL-Q) و خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمعی (RI) نیز اقدام شد. پردازش آماری نتایج نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام یافت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیشینه میانگین مقادیر عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در نمونه‌های خاک با ۲۶/۴، ۰/۳۲۰، ۱۷/۳ و ۲۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب مربوط به ایستگاه‌های کرمانشاه، رزن، رزن و ایستگاه‌های با ترافیک زیاد) و بیان‌گر تأثیر حجم ترافیک بود. نتایج محاسبه شاخص EF نشان داد که غنی‌سازی (آلودگی) عناصر سرب، کروم و نیکل در ایستگاه‌های با حجم ترافیک زیاد (رزن و کرمانشاه) با میانگین مقادیر بزرگ‌تر از ۱/۵، "متوسط" تا "شدید" بود که بیان‌گر تأثیر ورودی‌های انسانی به‌ویژه با منشأ ترافیک است، در حالی که، در همه ایستگاه‌ها مقادیر شاخص برای عنصر کادمیم بیان‌گر شرایط "غیر آلوده یا فاقد غنی‌شدگی" بود. همچنین، میانگین مقادیر شاخص‌های mERM-Q و mPEL-Q عناصر در نمونه‌های خاک بیان‌گر ۲۱٪ احتمال سمیت بود. از طرفی، نتایج محاسبه شاخص خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی احتمالی (Er) بیان‌گر "خطر بوم‌شناختی کم" برای همه عناصر و روند کاهشی میانگین عامل خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی احتمالی نیز به‌صورت کادمیم < نیکل < سرب < کروم حاصل شد. از سوی دیگر، میانگین مقدار شاخص RI برابر با ۳۱/۹ و بیان‌گر "مخاطره بوم‌شناختی کم" در ایستگاه‌های مورد مطالعه بود.

نتیجه‌گیری: هر چند که میانگین مقادیر شاخص RI نشان‌دهنده کیفیت قابل قبول خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه و عدم بروز مخاطره بوم‌شناختی بود، اما عنصر کادمیم با ۸۲/۴٪ از بیش‌ترین سهم در ایجاد مخاطره بوم‌شناختی برخوردار بود. از این‌رو، نسبت به شناسایی و کنترل منابع انتشار این عنصر در زیست‌بوم حاشیه جاده توصیه می‌شود. از طرفی، پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک با قابلیت ایجاد خطر برای سلامت بوم‌سازگان به‌منظور مدیریت و حفاظت خاک ضروری است.

کلمات کلیدی: آلودگی خاک، خطرپذیری بالقوه، سمیت، غنی‌شدگی، ترافیک

مقدمه

فلزات سنگین به عنوان گروهی از آلاینده‌های شیمیایی معدنی غیر زیست تخریب پذیر به واسطه فرایندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی در زیست‌سپهر انتشار یافته و به سبب پایداری در محیط، سمیت، نیم عمر زیستی طولانی و برخورداری از قابلیت تجمع و انباشت زیستی به یک چالش و نگرانی مهم و مشترک محیط زیستی، اقتصادی و بهداشت عمومی در سراسر جهان تبدیل شده است.^{۵-۱}

در قرن حاضر، حمل و نقل جاده‌ای و فعالیت‌های مرتبط با آن یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین منابع آلودگی محیط به فلزات سنگین به شمار می‌آید که بوم‌سازگان کنار جاده‌ای را به مناطق حساس فلزی تبدیل کرده است.^{۶-۹} این آلاینده‌های فلزی عمدتاً ناشی از منابع احتراقی (سوخت خودرو) و غیر احتراقی (نشت سوخت و روان کننده‌ها، ذرات حاصل از فرسایش و استهلاک بدنه خودرو، اجزای موتور، لنت ترمز، کلاچ و سطح جاده) بوده و رایج‌ترین آن‌ها سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، کروم (Cr) و نیکل (Ni) است.^{۱۰-۱۲} کروم و نیکل به عنوان عناصر ضروری شناخته می‌شوند که قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بیش‌تر از حد مجاز آن‌ها می‌تواند خطر ابتلا به پیش‌دیابت، دیابت، بیماری‌های قلبی عروقی و آترواسکلروز را افزایش دهد. از سوی دیگر، سرب و کادمیم نیز به عنوان عناصر غیر ضروری، نوروکسین‌های قدرتمندی هستند که قرار گرفتن انسان در معرض آن‌ها، حتی در مقادیر بسیار کم، می‌تواند به ابتلا به آلزایمر، ناهنجاری‌های کروموزومی، سرطان، آسیب و اختلال عملکرد طحال و کبد منجر شود.^{۱۳-۱۷}

انتشارات فلزی حاصل از ترافیک جاده‌ها عمدتاً از طریق رسوبات جوی مرطوب و خشک، گردوغبار، انتشار گاز و شستشو در محیط‌های کنار جاده توزیع می‌شوند و بسته به شرایط محیطی، جریان ترافیک و شرایط جاده می‌تواند منجر به آلودگی فلزات سنگین در محیط حاشیه جاده (هواسپهر،

آب و خاک) شوند.^{۱۸، ۱۹} در این رابطه، آلودگی خاک، از سایر اجزای زیست‌سپهر یعنی هوا و آب مهم‌تر است، زیرا خاک به سبب پویایی کم‌تر در مقایسه با هوا و آب، از قابلیت انباشت مقادیر بیش‌تری از فلزات سنگین برخوردار است.^{۲۰، ۲۱} از طرفی، با توجه به این‌که خاک هم منبع و هم مخزن فلزات سنگین است، نقش مهمی در ذخیره‌سازی و حمل و نقل عناصر فلزی دارد.^{۲۲} افزون بر این، خاک بخشی ضروری از بوم‌سامانه‌های کنار جاده‌ای است که چرخه‌های زیست-زمین-شیمیایی را حفظ و از رشد گیاه حمایت می‌کند.^{۲۳-۲۵} از سوی دیگر، فلزات سنگین موجود در خاک نه تنها می‌توانند کیفیت خاک را کاهش دهند، بلکه می‌توانند به آلودگی هوا (از طریق تعلیق مجدد ذرات خاک)، آب (از طریق باران یا رواناب سطحی به‌ویژه در فصل بارندگی) و افزایش جذب بالقوه فلزات توسط گیاهان منجر شده و به‌طور بالقوه تهدیدی مضر و غیرمستقیم برای حیوانات و انسان از طریق زنجیر غذایی محسوب شوند. به علاوه، عناصر موجود در خاک سطحی می‌توانند از طریق بلع مستقیم خاک، استنشاق ذرات خاک (از طریق بینی و دهان) و تماس پوستی سلامت انسان را تهدید کنند.^{۲۶، ۲۷} بنابراین، ارزیابی و تعیین خطرات مرتبط با عناصر فلزی در خاک حاشیه جاده برای حفظ سلامت بوم‌سازگان و زیست‌مندان در سال‌های اخیر توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است.^{۲۸-۳۱}

امروزه، از شاخص‌های ارزیابی و تحلیل وضعیت آلودگی خطر بوم‌شناختی و سمیت به‌منظور مدیریت محیط‌زیست، شناسایی و کاهش عوامل بالقوه مخاطره‌آمیز محیط‌زیستی، بوم‌شناختی و زیستی استفاده می‌شود.^{۳۰، ۳۲} در این خصوص، شاخص غنی‌شدگی به‌عنوان معیاری از میزان تجمع فلزات در محیط، یکی از ابزارهای مفید و مناسب برای درک تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آلاینده‌های فلزی محیط و تشخیص سهم آن‌ها از منابع طبیعی و انسانی است.^{۳۳، ۳۴} ارزیابی سمیت و خطر بالقوه آلودگی فلزات سنگین نیز ابزارهای تشخیصی

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر همدان با ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متر از سطح دریا بین مدارهای ۳۴° ۴۸' عرض جغرافیایی شمالی و ۴۸° ۳۱' طول جغرافیایی شرقی در غرب ایران واقع شده است. این شهر با وسعتی معادل ۵۶ کیلومتر مربع، بیش‌تر از ۵۵۰۰۰۰ نفر جمعیت ساکن دارد و میانگین دمای سالانه و بارندگی آن به‌ترتیب ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد و ۳۱۷/۷ میلی‌متر برآورد شده است.^{۳۸}

نمونه‌برداری

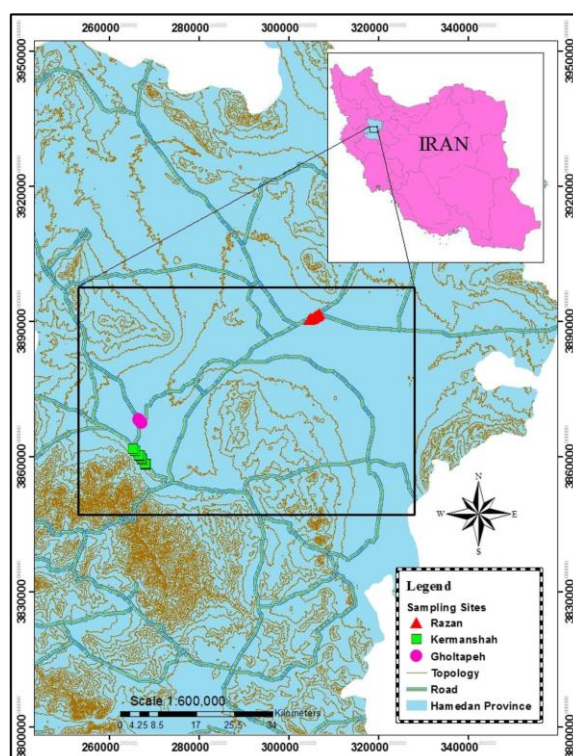
در این پژوهش توصیفی-مقطعی، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به حمایت مالی، سه جاده از قدیمی‌ترین قطعات شبکه ارتباطات جاده‌ای استان همدان با میانگین حجم تردد متفاوت (جدول ۱) به‌عنوان ایستگاه‌های نمونه‌برداری انتخاب شدند. سپس، با استفاده از فرمول تعیین حجم نمونه کوکران در مجموع ۶۳ نمونه خاک سطحی (۱۵-۰ سانتی‌متری) در طول ۷۰۰ متر از یک قطعه ۹ کیلومتری هر جاده با ویژگی‌های مشابه (مانند پوشش جاده و میانگین سرعت)، در فواصل ۱۰۰ متر از یکدیگر و از هر دو طرف حاشیه جاده (۰-۲ متر از لبه جاده) با استفاده از بیلچه چوبی برداشت شد.^{۱۹} مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری توسط دستگاه GPS گارمین مدل ETREX 32X ثبت شد که موقعیت استقرار آن‌ها در شکل ۱ آورده شده است. نمونه‌های خاک هر ایستگاه برای تهیه یک نمونه همگن، با یکدیگر مخلوط و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌دار ذخیره شده و پس از برچسب گذاری، برای مطالعات بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند.^{۳۹}

مفید برای بررسی احتمال سمیت عناصر فلزی و همچنین شناسایی و اولویت‌بندی مدیریت مناطق با خطرات احتمالی و بالقوه ناشی از آلودگی خاک به‌واسطه تجمع فلزات سنگین است.^{۳۴} اگرچه تاکنون در خصوص ارزیابی آلودگی و خطرات عناصر بالقوه سمی در خاک حاشیه جاده مطالعاتی در سرتاسر جهان انجام شده است؛ با این حال، تعداد پژوهش‌های مشابه انجام یافته در ایران اندک است. برای نمونه، پرداختی و زاهد (۲۰۱۸)^{۳۵} مقادیر شاخص EF متوسط تا شدید را برای عنصر سرب در خاک حاشیه بزرگراه‌های تهران-ایوانکی و تهران-ساوه را بر اثر فعالیت‌های ترافیکی گزارش کردند. از طرفی، نتایج بیان‌گر خطرات کم و متوسط بوم‌شناختی عناصر سرب، کادمیم و نیکل در بیش‌تر ایستگاه‌ها و خطر خیلی زیاد و قابل ملاحظه بوم‌شناختی در برخی ایستگاه‌های ابتدایی و انتهایی محورها بود. بهنام و همکاران (۲۰۱۸)^{۳۶} نیز گزارش کردند که خاک‌های مناطق خشک مسیر زابل-زاهدان نسبت به عنصر نیکل بدون غنی‌شدگی بوده است. همچنین، قنوتی و همکاران (۲۰۱۹)^{۳۷} نیز خطر بوم‌شناختی عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک کنار جاده‌ای شهر اهواز را در محدوده کم تا قابل ملاحظه گزارش کردند.

بنابراین، با توجه به نگرانی‌ها و مخاطرات محیط‌زیستی و بهداشتی مترتب با آلاینده‌های فلزی در خاک و اهمیت و ضرورت ارزیابی آلودگی و خطرات عناصر بالقوه سمی از یک‌سو و از طرفی نظر به توسعه و گسترش فزاینده زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل جاده‌ای و وجود راه‌های ارتباطی مهم در کلان‌شهر همدان به‌عنوان نقطه تأکیدگاهی ثقل ارتباطات جاده‌ای غرب کشور، این پژوهش با هدف ارزیابی آلودگی، سمیت و خطر بالقوه عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های کلان‌شهر همدان در سال ۱۳۹۸ انجام یافت.

جدول ۱: میانگین حجم تردد (وسیله نقلیه در روز) در جاده‌های مورد مطالعه^{۱۲}

جاده	نوع وسیله نقلیه	گلتپه	رزن	کرمانشاه
سبک	۱۶۴۳	۳۳۶۱	۱۱۱۲۷	
کامیونت و مینی‌بوس	۲۱۹	۱۰۶۹	۱۳۴۰	
کامیون کم‌تر از ۱۰ تن	۱۳۷	۶۵۷	۶۸۴	
اتوبوس	۱۴۳	۶۷۷	۶۳۸	
تریلرهای کشنده	۲۷۳	۱۲۵۶	۱۰۰۸	
تعداد کل وسیله نقلیه در روز	۲۱۴۷	۷۱۲۱	۱۴۷۹۹	



شکل ۱. موقعیت استقرار مکان‌های نمونه‌برداری

آماده‌سازی و تعیین محتوی عناصر در نمونه‌ها

در آزمایشگاه، به‌منظور تبخیر رطوبت اضافی، نمونه‌های خاک به‌مدت ۷۲ ساعت هوا خشک شدند. سپس، برای حذف ذرات بزرگ و بقایای آلی، نمونه‌ها از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. به منظور عصاره‌گیری از نمونه‌ها، به یک گرم از هر نمونه خاک، پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرکب افزوده

و پس از آن، محلول حاصل به‌مدت ۱۰ دقیقه بر روی هیتز با دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. نمونه‌ها پس از تغییر رنگ از روی هیتز برداشته شده و سرد شدند. در گام بعد، طی دو مرحله متوالی هر بار پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرکب را به نمونه‌ها افزوده و محلول حاصل به‌مدت ۳۰ دقیقه مجدداً رفلاکس و روی هیتز با دمای ۹۵ درجه

ارزیابی آلودگی

در این پژوهش، به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه خاک‌های حاشیه جاده و همچنین میزان تأثیر احتمالی فعالیت‌های انسان‌زاد بر محتوی فلزات سنگین خاک نسبت به محاسبه شاخص غنی‌شدگی بر اساس رابطه ۱ اقدام شد ^{۴۲-۴۴}:

$$EF = \frac{\left(\frac{C_m}{C_r}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{C_m}{C_r}\right)_{\text{background}}} \quad (1)$$

در رابطه ۱، C_m و C_r به ترتیب بیان‌گر غلظت عنصر مورد نظر و غلظت عنصر مرجع هر دو بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم، s و b نیز به ترتیب نشان‌دهنده محتوی عناصر در نمونه و در پس‌زمینه (خاک غیر آلوده یا پوسته زمین) است ^{۴۲}. معمولاً عناصر آهن، آلومینیوم و لیتیم به سبب ویژگی‌های توزیع یکنواخت، تغلیظ به نسبت بالاتر در پوسته و تأثیرپذیری کم‌تر از فعالیت‌های انسانی به عنوان عنصر مرجع برای نرمال‌سازی محاسبه فاکتور غنی‌شدگی در مطالعات مدنظر قرار می‌گیرند. در این مطالعه، عنصر آهن با مقدار زمینه برابر با ۴۷۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به عنوان عنصر مرجع در نظر گرفته شد. مقادیر EF بین ۰/۵ تا ۱/۵ نشان دهنده آن است که عنصر مورد ارزیابی از فرآیندهای طبیعی یا مواد پوسته‌ای نشأت گرفته است، در حالی که، مقادیر بزرگ‌تر از ۱/۵ این شاخص نشان‌دهنده تأثیر عوامل انسانی بر محتوی عناصر

سانتی‌گراد حرارت داده شد. پس از آن، دو میلی‌لیتر آب مقطر و سه میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰٪ مرک به محلول افزوده و محتویات به مدت دو تا پنج دقیقه روی هیتز با دمای ۷۵ سانتی‌گراد حرارت داده شدند. پس از خنک شدن نمونه‌ها، به هر یک از آن‌ها ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک غلیظ مرک افزوده شد و بعد از ۱۵ دقیقه رفلاکس، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و محلول‌ها با آب دوبار تقطیر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شدند ^{۴۰،۴۱}. 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 سرب، کادمیم، کروم و نیکل به ترتیب در طول موج‌های ۲۲۰/۳۵۳، ۲۲۶/۵۰۲، ۲۶۷/۷۱۶، ۲۳۱/۶۰۴ و نانومتر خوانده شد. تضمین و کنترل کیفیت (Quality Assurance/Quality Control) اندازه‌گیری‌ها با استفاده از مرجع استاندارد خاک RTC, SQC-014 خریداری شده از شرکت سیگما-آلد ریچ اسپانیا انجام شد ^{۴۱}. بر این اساس، مقادیر حد تشخیص برای عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۰۱۷، ۰/۰۲۳، ۰/۱۲۹ و ۰/۰۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. مقادیر محدودیت کمی عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز برای سرب برابر با ۰/۰۵۰، برای کادمیم برابر با ۰/۰۷۳، برای کروم برابر با ۰/۳۸۵ و برای نیکل نیز برابر با ۰/۲۷۷ به دست آمد. نتایج حاصل از درصد بازیابی عناصر مورد مطالعه (بین ۹۴-۱۰۱٪) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای تعیین فلزات سنگین مورد مطالعه از اطمینان کافی و دقت مناسب برخوردار بوده است.

است ^{۴۴،۴۵}. جدول ۲ سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها را بر اساس مقادیر EF نشان می‌دهد ^{۴۶}.

ارزیابی سمیت

برای تعیین و برآورد سمیت محیطی و از طرفی سمیت زیستی احتمالی هر عنصر، به ترتیب شاخص میانگین ضریب متوسط حدود اثر (mERM-Q) و میانگین ضریب سطح احتمالی اثر (mPEL-Q) با استفاده از روابط ۲ و ۳ محاسبه شد ^{۴۷،۴۸}:

ارزیابی خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی

به‌منظور برآوردی جامع از خطرات بالقوه محیط‌زیستی فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌ها، ضریب خطر بالقوه بوم‌شناختی هر عنصر (Er) و از طرفی شاخص خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمعی عناصر (RI) با استفاده از روابط ۴ تا ۵ محاسبه شدند ۴۸، ۴۰:

$$ER_i = Tr_i \left(\frac{C_s^i}{C_b^i} \right) \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n ER_i \quad (5)$$

$$mERM - Q = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (2)$$

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

در روابط ۲ و ۳: C_i ، بیان‌گر غلظت هر عنصر بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم، n نشان‌دهنده تعداد عناصر مورد مطالعه، ERM و PEL نیز به‌ترتیب بیان‌گر متوسط حدود اثر (برابر با ۲۱۸، ۹/۶۰، ۳۷۰ و ۵۱/۶ به‌ترتیب برای عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل) و حدود احتمالی اثر غلظت عناصر (برابر با ۱۱۰، ۴/۲۰، ۱۶۰ و ۴۳/۰ به‌ترتیب برای عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل) است. طبقه‌بندی و تفسیر شاخص‌های mERM-Q و mPEL-Q در جدول ۲ آورده شده است ۳۴.

جدول ۲: طبقه‌بندی مقادیر شاخص غنی‌شدگی، میانگین ضریب متوسط حدود اثر، میانگین ضریب سطح احتمالی اثر،

ضریب خطر بالقوه بوم‌شناختی و خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی تجمعی عناصر

شاخص غنی‌شدگی		شاخص میانگین ضریب متوسط حدود اثر		شاخص میانگین ضریب سطح احتمالی اثر	
محدوده	طبقه توصیفی	محدوده	طبقه توصیفی	محدوده	طبقه توصیفی
$EF < 1$	بدون غنی‌شدگی	$mERM - Q < 0.1$	۹٪ احتمال سمیت (کم)	$mPEL - Q < 0.1$	۹٪ احتمال سمیت (کم)
$EF < 3$	غنی‌شدگی کم	$0.1 \leq mERM - Q < 0.5$	۲۱٪ احتمال سمیت (متوسط)	$0.1 \leq mPEL - Q < 0.5$	۲۱٪ احتمال سمیت (متوسط)
$3 \leq EF < 5$	غنی‌شدگی متوسط	$0.5 \leq mERM - Q < 1.0$	۴۹٪ احتمال سمیت (زیاد)	$0.5 \leq mPEL - Q < 1.0$	۴۹٪ احتمال سمیت (زیاد)
$5 \leq EF < 10$	غنی‌شدگی زیاد	$mERM - Q \geq 1.0$	۷۶٪ احتمال سمیت (خیلی زیاد)	$mPEL - Q \geq 1.0$	۷۶٪ احتمال سمیت (خیلی زیاد)
$10 \leq EF < 25$	غنی‌شدگی شدید				
$25 \leq EF < 50$	غنی‌شدگی خیلی شدید				
$EF \geq 50$	غنی‌شدگی فوق‌العاده شدید				
شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی		شاخص خطر بالقوه بوم‌شناختی تجمعی			
محدوده	طبقه توصیفی (خطر هر عنصر)	محدوده	طبقه توصیفی (خطر مجموع عناصر)		
$Er < 40$	خطر کم	$RI < 150$	خطر کم		
$40 \leq Er < 80$	خطر متوسط	$150 \leq RI < 300$	خطر متوسط		
$80 \leq Er < 160$	خطر زیاد	$300 \leq RI < 600$	خطر شدید		
$160 \leq Er < 320$	خطر شدید	$RI \geq 600$	خطر خیلی شدید		
$Er \geq 320$	خطر خیلی شدید				

در روابط ۴ تا ۵: C_b , C_s , Er به‌ترتیب نشان‌دهنده شاخص آلودگی هر عنصر، غلظت عنصر در نمونه خاک بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم، غلظت زمینه همان عنصر (بر اساس میانگین غلظت در پوسته یا شیل) بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم و ضریب واکنش سمیت هر عنصر برای سرب برابر با ۵، برای کادمیم برابر با ۳۰، برای کروم برابر با ۲ و برای نیکل برابر با ۵ است. طبقه‌بندی و تفسیر مقادیر Er و RI در جدول ۲ آورده شده است.^{۲۲}

پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۲۰ نرم‌افزار SPSS در سطح معنی‌داری ۰/۰۵۰ انجام یافت. از آزمون‌های کلموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) و لون (Leven) به‌ترتیب برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس‌ها و از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه (One-Way ANOVA) و آزمون تعقیبی چند دامنه‌ای دانکن (Duncan Multiple Range Test) برای مقایسه میانگین غلظت عناصر در نمونه‌های خاک بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری استفاده شد.

یافته‌ها

آمار توصیفی مربوط به محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک حاشیه جاده‌ها به تفکیک ایستگاه نمونه‌برداری در جدول ۳ آورده شده است. با استناد به نتایج، بیشینه میانگین محتوی عناصر کادمیم، کروم و نیکل به‌ترتیب با ۰/۳۲۰، ۱۷/۳ و ۲۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به ایستگاه رزن و بیشینه میانگین محتوی عنصر سرب با ۲۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه بود. از طرفی، میانگین محتوی عناصر در نمونه‌ها از روند نزولی نیکل < سرب < کروم < کادمیم تبعیت کرد.

ضریب تغییرات (CV)، میزان نسبی تغییرپذیری غلظت‌های یک فلز در نمونه‌های خاک حاشیه جاده را نشان داده و در صورتی‌که $CV < 20$ باشد، بیان‌گر تغییرات کم، $20 \leq CV < 50$ نشان‌دهنده تغییرات متوسط، $50 \leq CV < 100$ بیان‌گر تغییرات خیلی زیاد است.^{۳۳} بر اساس نتایج، مقادیر ضرایب تغییرات برای عناصر کروم و نیکل در محدوده تغییرپذیری کم و نشان‌دهنده توزیع همگن این فلزات در ایستگاه‌های نمونه‌برداری بدون اثرپذیری قابل توجه از فعالیت‌های انسانی بوده است. در همین حال، درصد ضریب تغییرات عناصر کادمیم و سرب به‌ترتیب در محدوده متوسط و زیاد و بیان‌گر توزیع ناهمگون آن‌ها در محیط به سبب فعالیت‌های انسانی به‌ویژه ترافیک است. به‌علاوه، مقادیر زیاد انحراف معیار نشان‌دهنده گستره تغییرات وسیع غلظت‌های عنصری در نمونه‌های مورد مطالعه است. با توجه به نتایج حاصل، بیش‌ترین مقدار انحراف معیار مربوط به فلز سرب بود (جدول ۳).

با استناد به نتایج مندرج در شکل ۲، مقادیر EF محاسبه شده برای کروم در ایستگاه‌های گلپه و کرمانشاه و برای نیکل و سرب در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه بزرگ‌تر از ۱/۵ و نشان‌دهنده تأثیر ورودی‌های انسانی به‌ویژه با منشأ ترافیک بود؛ در همین حال، مقادیر EF محاسبه شده برای عنصر کادمیم در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری، کروم در ایستگاه رزن و نیکل و سرب در ایستگاه گلپه کوچک‌تر از ۱/۵ و نشان‌دهنده نشأت گرفتن آن‌ها از فرایندهای طبیعی (مواد پوسته‌ای) بوده است. از سوی دیگر، مقادیر شاخص EF بیان‌گر غنی‌سازی (آلودگی) متوسط تا شدید برای عنصر کروم در ایستگاه کرمانشاه و برای عناصر نیکل و سرب در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه بود؛ این در حالی است که عنصر کادمیم فاقد غنی‌شدگی (آلودگی) در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه (گلپه، رزن و کرمانشاه) بود. از طرفی، روند نزولی

میانگین مقادیر شاخص غنی شدگی برای عناصر به شرح سرب < کروم < نیکل < کادمیم بود.

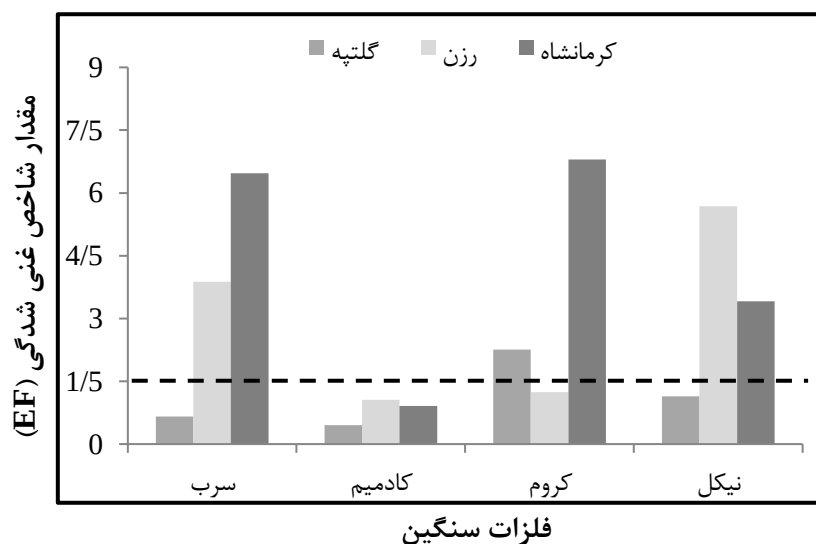
نتایج محاسبه شاخص های mERM-Q و mPEL-Q عناصر مورد مطالعه در نمونه های خاک در جدول ۴ آورده شده است. بررسی مقادیر این شاخص ها نشان داد که میزان احتمال سمیت خاک در نمونه های خاک سطحی جمع آوری شده از ایستگاه گلته نسبت به عناصر مورد مطالعه به ترتیب با

مقادیر mERM-Q و mPEL-Q برابر با ۰/۰۹۰ و ۰/۱۲۰ در محدوده کم (احتمال ۹٪ سمیت) بوده است. از طرفی، مقادیر mERM-Q و mPEL-Q نمونه های خاک در ایستگاه رزن به ترتیب برابر با ۰/۱۵۰ و ۰/۵۳۰ و در ایستگاه کرمانشاه نیز هر دو برابر با ۰/۱۳۰ و نشان دهنده سمیت متوسط (احتمال ۲۱٪ سمیت) بود.

جدول ۳: آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه های خاک سطحی حاشیه جاده

ایستگاه	سرب	کادمیم	کروم	نیکل
گلته	۳/۲۲a	۰/۱۸۰a	۱۲/۰a	۱۵/۹a
رزن	۱۵/۴b	۰/۳۲۰c	۱۷/۳c	۲۲/۲C
کرمانشاه	۲۶/۴c	۰/۲۹۰b	۱۵/۶b	۱۶/۶ b
کمینه	۳/۰۳	۰/۱۶۰	۱۰/۰	۱۵/۵
بیشینه	۲۶/۶	۰/۴۳۰	۲۰/۱	۲۳/۴
میانه	۱۶/۲	۰/۲۳۰	۱۰/۳	۱۵/۷
میانگین	۱۵/۱	۰/۲۶۰	۱۵/۰	۱۸/۲
انحراف معیار	۱۰/۰	۰/۰۶۰	۰/۷۸۰	۳/۰۲
ضریب تغییرات (%)	۶۷/۰	۲۳/۴	۵/۲۱	۱۶/۶

حروف غیر مشترک (a, b, c و ...) در هر ستون، بیانگر وجود تفاوت معنی دار آماری ($p < 0.05$) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در نمونه های خاک بر اساس نتایج آزمون های تحلیل واریانس یک طرفه و چند دامنه ای دانکن است.



شکل ۲: مقادیر شاخص EF عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در نمونه های خاک به تفکیک ایستگاه نمونه برداری

جدول ۴: نتایج ارزیابی سمیت محیطی و زیستی احتمالی عناصر در نمونه‌های خاک

ایستگاه	mERM-Q	mPEL-Q	طبقه توصیفی	مقدار	طبقه توصیفی
گلته	۰/۰۹۰	کم (۹٪ احتمال سمیت)	متوسط (۲۱٪ احتمال سمیت)	۰/۱۲۰	مقدار
رزن	۰/۱۵۰	متوسط (۲۱٪ احتمال سمیت)	متوسط (۲۱٪ احتمال سمیت)	۰/۵۳۰	مقدار
کرمانشاه	۰/۱۳۰	متوسط (۲۱٪ احتمال سمیت)	متوسط (۲۱٪ احتمال سمیت)	۰/۱۳۰	مقدار
میانگین	۰/۱۲۰	متوسط (۲۱٪ احتمال سمیت)	متوسط (۲۱٪ احتمال سمیت)	۰/۱۸۰	مقدار

جدول ۵: نتایج ارزیابی مخاطره بوم‌شناختی عناصر در نمونه‌های خاک کنار جاده‌ای همدان

ایستگاه	Er				RI	خطر بوم شناختی
	سرب	کادمیم	کروم	نیکل		
گلته	۰/۴۵۰	۱۸/۰	۱/۱۶	۱/۹۵	۲۱/۶	کم
رزن	۲/۱۰	۳۱/۸	۱/۶۶	۲/۶۵	۳۸/۲	کم
کرمانشاه	۳/۶۰	۲۹/۱	۱/۵۰	۱/۷۵	۳۵/۹	کم
میانگین	۲/۰۵	۲۶/۳	۱/۴۴	۲/۱۲	۳۱/۹	کم

بحث

خاک به‌عنوان منبع و مخزن فلزات سنگین شاخص مناسب و مفیدی برای سنجش آلودگی آلاینده‌های فلزی در بوم‌سازگان به‌شمار می‌آید. نتایج این پژوهش که با هدف ارزیابی آلودگی، سمیت و خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های کلان‌شهر همدان انجام یافت، نشان داد که بیشینه میانگین محتوی عناصر کادمیم، کروم و نیکل به‌ترتیب با ۰/۳۲۰، ۱۷/۳ و ۲۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به نمونه خاک‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه رزن با میانگین حجم ترافیک روزانه ۷۱۲۱ خودرو و بیشینه میانگین محتوی عنصر سرب به‌ترتیب با ۲۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه با میانگین حجم ترافیک روزانه ۱۴۷۹۹ خودرو و برای همه عناصر مورد ارزیابی به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ایستگاه گلته با میانگین حجم ترافیک روزانه ۲۴۱۷ خودرو بود. در این خصوص، بیشینه میانگین محتوی عناصر در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه را می‌توان با حجم ترافیک بیش‌تر

نتایج محاسبه شاخص خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی عناصر مورد ارزیابی در نمونه‌های خاک حاشیه جاده (جدول ۵) نشان داد که میانگین مقادیر شاخص Er برای عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل به‌ترتیب برابر با ۲/۰۵، ۲۶/۳، ۱/۴۴ و ۲/۱۲ با ترتیب کاهشی کادمیم < نیکل < سرب < کروم و دارای قابلیت خطرزایی بوم‌شناختی کم بوده است. از طرفی، میانگین مقدار شاخص RI برابر با ۳۱/۹ و بیان‌گر مخاطره بوم‌شناختی اندک بود.

همچنین، بر اساس نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف داده‌های مربوط به محتوی همه عناصر در نمونه‌های خاک از توزیع نرمال برخوردار بود. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نیز نشان داد که بین ایستگاه‌های گلته، رزن و کرمانشاه از حیث میانگین محتوی عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در نمونه‌های خاک اختلاف معنی‌دار آماری ($p < ۰/۰۵$) وجود داشته است.

و کاربرد این فلزات در سوخت و قطعات خودرو مرتبط دانست. در مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، بونانو (۲۰۱۳)^{۴۹}، گالا و شهاتا (۲۰۱۵)^{۵۰}، خالید و همکاران (۲۰۱۹)^۷ و لیو و همکاران (۲۰۲۱)^{۳۰} نیز با ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در خاک حاشیه جاده، بیشترین غلظت عناصر را در نمونه‌های خاک برداشت شده از امتداد بزرگراه‌هایی با حجم بالای ترافیک گزارش کردند. از طرفی، لو و همکاران (۲۰۰۹)^{۵۱}، تیان و همکاران (۲۰۱۸)^{۵۲} و دوی و همکاران (۲۰۱۹)^{۵۳} سایش و خوردگی قطعات وسایل نقلیه موتوری نظیر تایرها و لنت ترمز و همچنین ساییدگی پوشش جاده (آسفالت) را به‌عنوان منابع عمده افزایش محتوی عناصر کروم و نیکل در خاک حاشیه جاده‌ها معرفی کردند. همچنین لو و همکاران (۲۰۱۰)^{۵۴}، زانونی و همکاران (۲۰۱۶)^{۵۵}، برلیوا و همکاران (۲۰۱۸)^{۵۶}، روی و همکاران (۲۰۱۹)^{۲۶}، فرغانی و همکاران (۲۰۱۹)^{۵۷}، رامیرز و همکاران (۲۰۱۹)^{۵۸} و وانگ و همکاران (۲۰۲۱)^{۵۹} نیز گزارش کردند که منشأ عنصر سرب در نمونه‌های خاک کنار جاده‌ای عمدتاً ناشی از احتراق یا نشت بنزین و روان‌کننده‌ها، سایش و خوردگی لنت ترمز و رنگ‌های جاده بوده است. افزون بر این، فوتی و همکاران (۲۰۱۷)^{۶۰}، من و همکاران (۲۰۱۸)^{۶۱} و دیسیلوا و همکاران (۲۰۲۱)^{۶۲} انتشارات ناشی از روغن موتور، سایش لنت ترمز و تایر خودرو را منشأ احتمالی فلز کادمیم در خاک کنار جاده معرفی کردند.

همان‌طور که اشاره شد، ضریب تغییرات ابزاری کمی برای بیان تأثیر عوامل خارجی (به‌ویژه انسانی) بر محتوی فلزات سنگین است. نتایج بررسی درصد تغییرات محتوی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک کنار جاده‌ای نشان داد که بیشترین میزان تغییرپذیری مربوط به عنصر سرب (۶۷٪) بوده است. در این رابطه، می‌توان اذعان داشت که محتوی این عنصر به‌طور قابل توجهی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری متفاوت بوده و احتمالاً بیشترین تأثیرپذیری را از فعالیت‌های انسانی به‌ویژه

ترافیک داشته است. از طرفی، عنصر کروم با کمترین مقدار ضریب تغییرات (۵/۲۱٪)، از محتوی تقریباً ثابتی در کل ایستگاه‌های نمونه‌برداری برخوردار بوده است. لذا، تغییرپذیری اندک کروم در مقایسه با سایر عناصر، می‌تواند بیان‌گر کمینه تأثیر عوامل انسانی بر محتوی آن در نمونه خاک‌های مورد مطالعه باشد. در پژوهش‌های مشابه، کرپنوا و همکاران (۲۰۲۰)^۸ با مطالعه نمونه‌های خاک کنار جاده‌ای چلیابینسک در روسیه گزارش کردند که عناصر کادمیم (۱۰۰٪) و سرب (۵۴٪) با برخورداری از بیشترین ضریب تغییرات در مقایسه با سایرین، بیشینه تأثیرپذیری را از عوامل خارجی به‌ویژه ترافیک داشته‌اند. افزون بر این، یافته‌های مطالعه فان و همکاران (۲۰۲۲)^{۳۱} نشان داد که کمترین ضریب تغییرات عناصر در نمونه‌های خاک حاشیه جاده شیان در چین بدون تأثیر قابل توجه عوامل خارجی به‌ترتیب با ۱۹/۶٪ و ۱۹/۷٪ مربوط به عناصر کروم و نیکل بوده است.

شاخص غنی‌شدگی ابزار مفید و مناسبی برای درک تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آلاینده‌های فلزی خاک و تشخیص سهم آن‌ها از منابع طبیعی و انسانی است^{۳۳}. مقادیر محاسبه شده شاخص (شکل ۲) نشان داد که نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در ایستگاه گلته نسبت به عنصر سرب (۰/۶۶۰) از نظر کیفی غیرآلوده (بدون غنی‌شدگی) و نسبت به عناصر کروم (۲/۲۶) و نیکل (۱/۱۴) دارای سطح آلودگی کم (غنا۱ کم) بود؛ در حالی‌که، نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه نسبت به عناصر کروم، نیکل و سرب با مقادیر EF در دامنه ۶/۸۰-۱/۲۴ دارای آلودگی متوسط تا شدید بودند. در همین حال، عنصر کادمیم با مقادیر EF در دامنه ۱/۰۶-۰/۶۲۰ در کل ایستگاه‌های نمونه‌برداری فاقد غنی‌شدگی بود. از طرفی، مقادیر EF برای عناصر سرب، نیکل و کروم به‌ویژه در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه بزرگ‌تر از ۱/۵ بود که می‌تواند با منشأ انسانی این عناصر به‌ویژه انتشارت اگزوزی و غیراگزوزی مرتبط باشد. همچنین، با استناد به مقادیر EF کوچک‌تر از ۱/۵

برای عنصر کادمیم در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری، به نظر می‌رسد که منشأ این عنصر عمدتاً ناشی از فرآیندهای طبیعی (مواد پوسته‌ای) همچون فرسایش و تعلیق مجدد ذرات خاک بوده است. در تأیید نتایج حاصل، یان و همکاران (۲۰۱۸)^۶ با ارزیابی غنی‌سازی و شناسایی منابع فلزات کمیاب در خاک‌های کنار جاده در شانگهای چین اذعان داشتند که مقادیر شاخص EF برای عناصر سرب و کروم بیان‌گر غنی‌شدگی متوسط تا شدید و سهم قابل‌توجه ترافیک بوده است. در پژوهشی دیگر، پرداختی و زاهد (۲۰۱۸)^{۳۵} غنی‌شدگی متوسط تا شدید برای عنصر سرب در خاک حاشیه بزرگراه‌های تهران-ایوانکی و تهران-ساوه را با فعالیت‌های ترافیکی مرتبط دانستند. لیو و همکاران (۲۰۲۱)^{۳۰} نیز با ارزیابی و شناسایی عناصر شاخص در خاک جاده‌های شهر هوآن‌ان (چین) نتیجه گرفتند خاک‌های منطقه، از حیث غنی‌شدگی عناصر سرب و کروم در طبقه کیفی آلودگی شدید تا متوسط قرار داشته است. به علاوه، با استناد به میانگین مقادیر EF بزرگ‌تر از ۱/۵، سهم قابل‌توجه فعالیت‌های ترافیکی بر محتوی این عناصر نیز مورد تأیید قرار گرفت. از طرفی، حبیبی و همکاران (۲۰۲۲)^{۴۴} با تجزیه و تحلیل، منابع و ارزیابی خطرات سلامت عناصر کمیاب در گرد و غبار خیابانی جمع‌آوری شده از شهر همدان، غرب ایران نتیجه گرفتند که عناصر آرسنیک و کادمیم با مقادیر میانگین EF کم‌تر از ۱/۵ عمدتاً از فرآیندهای طبیعی نظیر مواد پوسته‌ای نشأت گرفته است.

شاخص‌های تلفیقی از جمله mERM-Q و mPEL-Q ابزارهایی مناسب برای تعیین سطح و برآورد سمیت و خطرات بالقوه محیط‌زیستی آلودگی فلزات سنگین در خاک است که آلودگی خاک را بر اساس تمامی عناصر مورد مطالعه ارزیابی می‌کنند^{۳۴}. نتایج حاصل از بررسی احتمال سمیت (-mERM-Q و mPEL-Q) فلزات سنگین در خاک‌های کنار جاده‌ای همدان بیان‌گر آن بود که احتمال سمی بودن نمونه‌های خاک سطحی در ایستگاه گلپه (به ترتیب با مقادیر mERM-Q و

mPEL-Q برابر با ۰/۰۹۰ و ۰/۱۲۰) به عناصر مورد مطالعه، اندک (احتمال ۹٪ سمیت) است. از طرفی، نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در ایستگاه‌های با ترافیک زیاد (رزن و کرمانشاه) به ترتیب با مقادیر شاخص mERM-Q و mPEL-Q در دامنه ۰/۰-۱۳۰/۱۵۰ و ۰/۵۳۰-۰/۱۳۰ دارای احتمال سمیت متوسط (احتمال ۲۱٪ سمیت) بود. حق‌نظر و همکاران (۲۰۲۱)^{۳۴} نیز پس از ارزیابی آلودگی عناصر آرسنیک، کادمیم، کروم، مس، منگنز، نیکل، سرب و روی در رسوبات سطحی رودخانه بهمنشیر با استناد به مقادیر شاخص‌های mERM-Q و mPEL-Q گزارش کردند که همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری دارای احتمال سمیت متوسط (۲۱٪) بوده است. همچنین، حسین‌نایی و همکاران (۲۰۲۱)^{۳۳} گزارش کردند که مقادیر شاخص mERM-Q عناصر سرب، کادمیم و کروم در نمونه‌های خاک معدن سرب و روی زنجان در شمال غرب ایران نشان‌دهنده سمی بودن متوسط تا زیاد (۲۱٪ تا ۴۹٪) خاک بوده است.

نتایج محاسبه شاخص Er فلزات مورد ارزیابی در نمونه‌های خاک نشان داد که کمینه و بیشینه مقادیر شاخص Er با ۰/۴۵۰ و ۳۱/۸ به ترتیب مربوط به عنصر سرب نمونه‌های برداشت شده از ایستگاه گلپه و فلز کادمیم نمونه‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه رزن بوده است (جدول ۵). از طرفی، میانگین مقادیر شاخص RI همه عناصر در نمونه‌های خاک با ۳۱/۹، بیان‌گر خطر بوم‌شناختی اندک عناصر در نمونه‌ها بود. با استناد به مقادیر شاخص RI، همه نمونه‌ها (۱۰۰٪) دارای شاخص کم‌تر از ۱۵۰ بوده و عناصر نیکل و کادمیم با ۶/۶۴٪ و ۸۲/۴٪ به ترتیب از کم‌ترین و بیش‌ترین سهم در ایجاد خطر بوم‌شناختی برخوردار بوده‌اند. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که کادمیم نگران‌کننده‌ترین آلاینده فلزی در خاک‌های کنار جاده‌ای کلان‌شهر همدان است که باید به دقت در نظر گرفته شوند^{۶۰} و لذا، باید نسبت به کنترل منابع احتمالی انتشار آن در محیط‌های جاده‌ای (از جمله احتراق و

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش که با هدف ارزیابی آلودگی، سمیت و خطر بالقوه بوم‌شناختی عناصر سرب، کادمیم، کروم و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های کلان‌شهر همدان انجام یافت، بیان‌گر آن بود که خاک‌های حاشیه بزرگراه‌های با تراکم ترافیکی بیش‌تر (رزن و کرمانشاه)، از بیشینه محتوی عناصر برخوردار بوده و این نشان‌دهنده آن است که افزایش حجم ترافیک به‌طور اجتناب‌ناپذیری با آلودگی خاک به فلزات سنگین مرتبط بوده است. از طرفی، نتایج محاسبه شاخص EF در نمونه‌های خاک نشان داد که به استثنای کادمیم، سایر عناصر مورد مطالعه در ایستگاه‌های با حجم ترافیک زیاد از غنی‌شدگی متوسط و میانگین مقادیر شاخص بزرگ‌تر از ۱/۵ برخوردار بودند. در این خصوص، می‌توان اذعان داشت که منشا سرب، کروم و نیکل انسان‌زاد بوده و عمدتاً ناشی از فعالیت‌های ترافیکی (انتشارات اگزوزی و غیر اگزوزی) است؛ در حالی‌که، فرایندهای طبیعی منبع عمده انتشار کادمیم در ایستگاه‌های مورد مطالعه شناخته شدند. همچنین، میانگین مقادیر شاخص‌های سمیت محیطی و خطر بوم‌شناختی عناصر در نمونه‌های خاک به‌ترتیب با ۰/۱۲۰ و ۰/۱۸۰، نشان‌دهنده احتمال ۲۱٪ سمیت خاک بود. این موضوع افزون بر این‌که بیان‌گر خطرآفرین بودن مناطق مورد مطالعه برای زیست‌مندان است، آلودگی خاک را نیز تایید کرده و می‌تواند از کاهش کیفیت خاک در آینده حکایت کند. از سوی دیگر، نتایج محاسبه شاخص Er بیان‌گر خطر بوم‌شناختی "کم" برای همه عناصر و روند کاهشی میانگین عامل خطرپذیری بالقوه بوم‌شناختی احتمالی به‌صورت کادمیم < نیکل < سرب < کروم بود. میانگین مقادیر محاسبه شده شاخص RI نیز نشان داد که مخاطره بوم‌شناختی تجمعی عناصر در نمونه‌های خاک در محدوده کم بود. نظریه این‌که کادمیم با ضریب تغییرات برابر با ۲۳/۴ پس از سرب بیش‌ترین تأثیرپذیری را از فعالیت‌های ترافیکی داشت، و از طرفی این عنصر با ۸۲/۴٪ از

نشت سوخت، روان‌کننده‌ها، سایش سایش لنت‌های ترمز و پوشش‌های لاستیکی) به منظور تدوین راهبردهای مدیریتی مؤثرتر اقدام گردد. محمدی گلنگش و همکاران (۲۰۱۸)^{۶۴} میانگین ارزش شاخص RI عناصر وانادیم، روی، نیکل، کروم، مس، کبالت و سرب در نمونه‌های خاک سطحی اطراف آزادراه رشت- را برابر با ۲۴/۷ و در طبقه خطر بوم‌شناختی اندک گزارش کردند. از طرفی، کومار و همکاران (۲۰۱۹)^{۶۵} میانگین مقدار شاخص RI عناصر سرب و کروم خاک‌های حاشیه جاده جالاندهار، پنجاب را برابر با ۰/۱۰ و در طبقه خطر بوم‌شناختی اندک گزارش کردند. صادق‌دوست و همکاران (۲۰۲۰)^{۶۶} نیز مقادیر شاخص RI عناصر سرب، کروم و نیکل در گردوغبار خیابانی شهر دزفول را در طبقه خطر بوم‌شناختی اندک گزارش کردند. در حالی‌که، آن‌ها مقدار شاخص Er برای عنصر کادمیم را با ۵۹ در طبقه خطر بوم‌شناختی متوسط گزارش کردند. علاوه بر این، حبیبی و همکاران (۲۰۲۱)^{۳۲} اذعان داشتند که مقادیر شاخص RI عناصر آرسنیک، سرب، روی، کادمیم، مس، کروم و نیکل در گردوغبار خیابانی شهر همدان در طبقه خطر بوم‌شناختی اندک قرار داشته و عنصر کادمیم با ۳۸/۲٪ بیش‌ترین سهم را در ایجاد مخاطره بوم‌شناختی داشته است.

به‌طور کلی، مقادیر شاخص‌های مورد ارزیابی عناصر در نمونه‌های خاک سطحی ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه به نسبت بزرگ‌تر از ایستگاه گلپه بود که این موضوع را می‌توان با فعالیت‌های ترافیکی شدید در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه مرتبط دانست. در واقع، ترافیک سنگین از طریق انتقال مواد معدنی، سبب انتشار فلزات در محیط و به‌تبع آن تجمع بیش‌تر عناصر در خاک کنار جاده‌ای ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه شده است. تیان و همکاران (۲۰۱۸)^{۵۲} و جانکاسکی و همکاران (۲۰۱۹)^{۶۷} نیز بیش‌ترین نرخ آلودگی را در خاک سطحی جاده‌هایی با تراکم ترافیکی زیاد گزارش کردند.

آلودگی خاک به سایر عناصر سمی و برداشت نمونه از طول بیش‌تری از جاده‌های پر رفت و آمد در مطالعه‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان از حوزه معاونت پژوهش و فن‌آوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان برای فراهم کردن امکانات اجرای مطالعه، سپاسگزاری می‌کنند.

References

1. Sobhanardakani S. Evaluation of the water quality pollution indices for groundwater resources of Ghahavand plain, Hamadan province, western Iran. Iran J of Toxicol 2016;10(3): 35-40.
2. Hazratzadeh S, Sobhanardakani S. Assessment of Zn, Pb, Cd, and Cu contamination in surface soils of urban parks in city of Hamedan. Iran J of Soil Res 2018;32(3): 417-30 (In Persian).
3. Sobhanardakani S. Non-carcinogenic risk assessment of heavy metals through exposure to the household dust (Case study: City of Khorramabad, Iran). Ann Med Health Sci Res 2018;16(4).
4. Obiri-Nyarko F, Duah AA, Karikari AY, et al. Assessment of heavy metal contamination in soils at the Kpone landfill site, Ghana: Implication for ecological and health risk assessment. Chemosphere 2021;282: 131007.
5. Nag R, O'Rourke SM, Cummins E. A GIS study to rank Irish agricultural lands with background and anthropogenic concentrations of metal (loid) s in soil. Chemosphere 2022;286: 131928.
6. Yan G, Mao L, Liu S, et al. Enrichment and sources of trace metals in roadside soils in Shanghai, China: a case study of two urban/rural roads. Sci Total Environ 2018;631: 942-50.
7. Khalid N, Noman A, Aqeel M, et al. Phytoremediation potential of Xanthium strumarium for heavy metals contaminated soils at roadsides. Int J Sci Environ Technol 2019;16(4): 2091-100.
8. Krupnova TG, Rakova OV, Gavrilkina SV, et al. Road dust trace elements contamination, sources, dispersed composition, and human health risk in Chelyabinsk, Russia. Chemosphere 2020;261: 127799.
9. An S, Liu N, Li X, et al. Understanding heavy metal accumulation in roadside soils along major roads in the Tibet Plateau. Sci Total Environ 2022;802: 149865.
10. Farzan M, Sobhanardakani S. Analysis of Fe, Pb, and Cd content of surface runoff in regions with high traffic intensity in Hamedan, Iran, in 2014. Health System Res 2016;12(2): 208-13 (In Persian).
11. Moradi B, Sobhanardakani S, Cheraghi M. Ecological risk of heavy metals in surface soils of urban parks. Iran J of Health and Environ 2018;10(4): 429-42 (In Persian).
12. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Heavy metal concentrations in roadside plants (*Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba*) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. Environ Sci Pollut Res 2020;27(12): 13301-14.
13. Sobhanardakani S, Tizhosh M. Determination of Zn, Pb, Cd and Cu contents in raw milk from Khorram-Abad dairies. J of Food Hygiene 2016;6(2 (22)): 43-50.
14. Sobhanardakani S. Potential health risk assessment of heavy metals via consumption of caviar of Persian sturgeon. Mar Pollut Bull 2017;123(1-2): 34-8.
15. Sobhan Ardakani S. Assessment of Pb and Ni contamination in the topsoil of ring roads' green spaces in the city of Hamadan. Pollution 2018;4(1): 43-51.
16. Grau-Perez M, Zhao J, Pierce B, et al. Urinary metals and leukocyte telomere length in American Indian communities: the strong heart and the strong heart family study. Environ Pollut 2019;246: 311-8.
17. Sanchez KA, Foster M, Nieuwenhuijsen MJ, et al. Urban policy interventions to reduce traffic emissions and traffic-related air pollution: Protocol for a systematic evidence map. Environ Int 2020;142: 105826.
18. Nikolaeva O, Rozanova M, Karpukhin M. Distribution of traffic-related contaminants in urban topsoils across a highway in Moscow. J Soils Sediments 2017;17(4): 1045-53.
19. Hosseini N, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Expansive herbaceous species as bio-tools for elements

- detection in the vicinity of major roads of Hamedan, Iran. *Int J Sci Environ Technol* 2022;19(3): 1611-24.
20. Antoniadis V, Shaheen SM, Levizou E, et al. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment?-A review. *Environ int* 2019;127: 819-47.
 21. 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. *Iran J of Soil Res* 2021;35(2): 119-34 (In Persian).
 22. Sabet Aghlidi P, Cheraghi M, Lorestani B, et al. Analysis, spatial distribution and ecological risk assessment of arsenic and some heavy metals of agricultural soils, case study: South of Iran. *J Environ Health Sci Eng* 2020;18(2): 665-76.
 23. Hernandez Gonzalez LM, Rivera VA, Phillips CB, et al. Characterization of soil profiles and elemental concentrations reveals deposition of heavy metals and phosphorus in a Chicago-area nature preserve, Gensburg Markham Prairie. *J Soils Sediments* 2019;19(11): 3817-31.
 24. Qin C, Yuan X, Xiong T, et al. Physicochemical properties, metal availability and bacterial community structure in heavy metal-polluted soil remediated by montmorillonite-based amendments. *Chemosphere* 2020;261: 128010.
 25. Soltani-Gerdefaramarzi S, Ghasemi M, Gheysouri M. Pollution, human health risk assessment and spatial distribution of toxic metals in urban soil of Yazd City, Iran. *Environ Geochem Health* 2021;43(9): 3469-84.
 26. Roy S, Gupta SK, Prakash J, et al. Ecological and human health risk assessment of heavy metal contamination in road dust in the National Capital Territory (NCT) of Delhi, India. *Environ Sci Pollut Res* 2019;26(29): 30413-25.
 27. Ranjbaran S, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Ecological and human health risks assessment of some polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface soils of central and southern parts of city of Tehran, Iran. *J Environ Health Sci Eng* 2021;19(2): 1491-503.
 28. Timofeev I, Kosheleva N, Kasimov N. Health risk assessment based on the contents of potentially toxic elements in urban soils of Darkhan, Mongolia. *J Environ Manag* 2019;242: 279-89.
 29. Liu P, Hu W, Tian K, et al. Accumulation and ecological risk of heavy metals in soils along the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea: A comparative study of China and South Korea. *Environ Int* 2020;137: 105519.
 30. Liu H, Zhang Y, Yang J, et al. Quantitative source apportionment, risk assessment and distribution of heavy metals in agricultural soils from southern Shandong Peninsula of China. *Sci Total Environ* 2021;767: 144879.
 31. Fan P, Lu X, Yu B, et al. Spatial distribution, risk estimation and source apportionment of potentially toxic metal (loid)s in resuspended megacity street dust. *Environ Int* 2022;160: 107073.
 32. Habibi H, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Potential Ecological Risk Assessment of Arsenic and Some Heavy Metals in Street Dusts Collected from Industrial, Commercial and Residential Areas of City of Hamedan in 2019 Using the Ecotoxicological Criteria. *J Environ Health Sci Eng* 2021;8(2): 1-13 (In Persian).
 33. Bhuiyan MAH, Karmaker SC, Bodrud-Doza M, et al. 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.
 34. Haghazadeh H, Hudson-Edwards KA, Kumar V, et al. Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere* 2021;285: 131446.
 35. Pardakhti A, Zahed F. Pollution Indices and Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in Side Soils of Interurban Roads, Iran. *J Environ Sci Studies* 2018;3(3): 769-81 (In Persian).
 36. Behnam V, Gholam Ali Zadeh Ahangar A, Rahmanian M, Bameri A. Evaluation of contamination and spatial variations of Zn, Cu and Ni in arid-zone soils of the Route between Zabol and Zahedan. *J Water Soil Conserv* 2018;25(5): 201-16 (In Persian).
 37. Ghanavati N, Nazarpour A, Babaenejad T. Assessment of the Ecological and Health Risks of Some Heavy Metals in Roadside Soils of Ahvaz, Iran. *Sci J School of Public Health and Institute of Public Health Res* 2019;16(4): 373-90 (In Persian).
 38. Sobhanardakani S. Human health risk assessment of potentially toxic heavy metals in the atmospheric dust of city of Hamedan, west of Iran. *Environ Sci Pollut Res* 2018;25(28): 28086-93.
 39. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Feasibility of using *Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba* for biomonitoring and bioremediation of heavy metals (Zn, Pb and Ni) in the roadside environments. *Iran J Health Environ* 2021;13(4): 607-20 (In Persian).
 40. Sobhanardakani S. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Atmospheric Dry Deposition in Hamedan City. *J Kermanshah University Med Sci* 2018;22(1).
 41. Davodpour R, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Honeybees (*Apis mellifera* L.) as a potential bioindicator for detection of toxic and essential elements in the environment (case study: Markazi Province, Iran). *Arch Environ Contam Toxicol* 2019;77(3): 344-58.
 42. Fry K, Gillings M, Isley C, et al. Trace element contamination of soil and dust by a New Caledonian

- ferronickel smelter: Dispersal, enrichment, and human health risk. *Environ Pollut* 2021;288: 117593.
43. 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. *Arab J Geosci* 2021;14(19): 1-16.
44. Habibi H, Sobhanardakani S, Cheraghi M, et al. Analysis, sources and health risk assessment of trace elements in street dust collected from the city of Hamedan, west of Iran. *Arab J Geosci* 2022;15(2): 1-17.
45. Mohammadi SM, Lorestani B, Sobhan Ardakani S, et al. Source identification and ecological risk assessment of some heavy metals in surface soils collected from the vicinity of Arad-Kouh processing and disposal complex, Tehran, Iran. *Environ Sci* 2021;19(3): 1-22 (In Persian).
46. Gujre N, Mitra S, Soni A, et al. Speciation, contamination, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils dumped with municipal solid wastes. *Chemosphere* 2021;262: 128013.
47. Jafarabadi AR, Bakhtiyari AR, Toosi AS, Jadot C. Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments and coastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian Gulf, Iran. *Chemosphere* 2017;185: 1090-111.
48. Ramazanov E, Lee SH, Lee W. Stochastic risk assessment of urban soils contaminated by heavy metals in Kazakhstan. *Sci Total Environ* 2021;750: 141535.
49. Bonanno G. Comparative performance of trace element bioaccumulation and biomonitoring in the plant species *Typha domingensis*, *Phragmites australis* and *Arundo donax*. *Ecotoxicol Environ Saf* 2013;97: 124-30.
50. Galal TM, Shehata HS. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecol Indic* 2015;48: 244-51.
51. Lu X, Wang L, Lei K, et al. Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China. *J Hazard Mater* 2009;161(2-3): 1058-62.
52. Tian X, Zhang H, Zhao Y, et al. Transcriptome analysis reveals the molecular mechanism of hepatic metabolism disorder caused by chromium poisoning in chickens. *Environ Sci Pollut Res* 2018;25(16): 15411-21.
53. Devi U, Taki K, Shukla T, et al. Microzonation, ecological risk and attributes of metals in highway road dust traversing through the Kaziranga National Park, Northeast India: implication for confining metal pollution in the national forest. *Environ Geochem Health* 2019;41(3): 1387-403.
54. Lu X, Wang L, Li LY, et al. Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China. *J Hazard Mater* 2010;173(1-3): 744-9.
55. Zannoni D, Valotto G, Visin F, Rampazzo G. Sources and distribution of tracer elements in road dust: the Venice mainland case of study. *J Geochem Explor* 2016;166: 64-72.
56. Bourliva A, Kantiranis N, Papadopoulou L, 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. *Sci Total Environ* 2018;639: 417-27.
57. Forghani G, Kelm U, Mazinani V. Spatial distribution and chemical partitioning of potentially toxic elements in soils around Khatoon-Abad Cu Smelter, SE Iran. *J Geochem Explor* 2019;196: 66-80.
58. Ramírez O, de la Campa AMS, Amato F, et al. Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Sci Total Environ* 2019;652: 434-46.
59. Wang H-Z, Cai L-M, Wang Q-S, et al. A comprehensive exploration of risk assessment and source quantification of potentially toxic elements in road dust: A case study from a large Cu smelter in central China. *Catena* 2021;196: 104930.
60. Foti L, Dubs F, Gignoux J, et al. Trace element concentrations along a gradient of urban pressure in forest and lawn soils of the Paris region (France). *Sci Total Environ* 2017;598: 938-48.
61. Men C, Liu R, Xu F, et al. Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China. *Sci Total Environ* 2018;612: 138-47.
62. De Silva S, Ball AS, Indrapala DV, Reichman SM. Review of the interactions between vehicular emitted potentially toxic elements, roadside soils, and associated biota. *Chemosphere* 2021;263: 128135.
63. 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. *Iran J Health Environ* 2021;14(1): 159-72 (In Persian).
64. Mohamadi M, Ghasemi R, Naeimi M. Distribution pattern of heavy metals in roadside Topsoils around the Rasht-Qazvin freeway. *J Health* 2018;9(3): 249-58 (In Persian).
65. Kumar R, Kumar V, Sharma A, et al. Assessment of pollution in roadside soils by using multivariate statistical techniques and contamination indices. *SN Appl Sci* 2019;1(8): 1-11.
66. Sadeghdoust F, Ghanavati N, Nazarpour A, et al. Hazard, ecological, and human health risk assessment of heavy metals in street dust in Dezful, Iran. *Arab J Geosci* 2020;13(17): 1-14.
67. Jankowski K, Malinowska E, Ciepiela GA, et al. Lead and cadmium content in grass growing near an expressway. *Arch Environ Contam Toxicol* 2019;76(1): 66-75.

Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Pb, Cd, Cr and Ni in Surface Soils Along some Roads of City of Hamedan

Nayerreh Sadat Hosseini¹, Soheil Sobhanardakani^{2*}

¹ Ph.D. in Environmental Science, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

² Ph.D. in Environmental Science, Professor in Environmental Science, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

*Email: s_sobhan@iauh.ac.ir

Received: 28 June 2022 ; Accepted: 22 July 2022

ABSTRACT

Background & Objective: The road traffic has become one of the main sources of metal pollution and could affect roadside soils. Therefore, this study was conducted to assess the pollution and toxicity potential of Pb, Cd, Cr and Ni in surface soils along some roads of city of Hamedan in 2019.

Materials & Methods: In this descriptive cross-sectional study, a total of 63 surface soil samples were collected along 700 m of a 9 km section of Goltepe, Razan and Kermanshah roads. After samples preparation, Pb, Cd, Cr and Ni contents were determined using ICP-OES. The enrichment factor (EF), mean effect range-median quotient (mERM-Q), mean probable effect level quotient (mPEL-Q) and cumulative potential ecological risk (RI) indices were also calculated. Also, all statistical analyses of the obtained data were performed using SPSS software.

Results: The results showed that the maximum mean contents of Pb, Cd, Cr and Ni in the soil samples with 26.4, 0.320, 17.3 and 22.2 mg/kg, respectively, were found to be in Kermanshah, Razan, Razan and Kermanshah sampling sites (i.e. the sites with high vehicle traffic), indicating the effect of traffic volume. The mean EF values of Pb, Cr and Ni were higher than 1.50, showed that soil samples could be classified as 'moderate' to 'severe' category in the sampling sites with high traffic volume (i.e. Razan and Kermanshah) which represents the effect of traffic emissions on the soil contamination, while for all the sampling sites the mean EF values for Cd indicated that soil samples could be classified as 'non-contaminated' or 'no enrichment' matrices. Also, the mean values of mERM-Q and mPEL-Q of analyzed elements indicated that the elemental probability toxicity of soil samples was 21%. On the other hand, the values of Er showed a 'low ecological risk' of all analyzed elements. Also, the average values of potential ecological risk factor increase in the following descending order: Cd > Ni > Pb > Cr. Besides, the average value of RI with 31.9 indicating that the analyzed elements in all the sampling sites were classified as 'low ecological risk'.

Conclusion: Although the average values of RI were shown the acceptable soil quality in all the sampling sites, Cd with 82.4% of the mean values of RI showed significant potential to occurrence the ecological risk; therefore, source identification and especially source control of this toxic element with potentially adverse effects on humans and also environmental health is recommended.

Keywords: Soil contamination, Potential risk, Toxicity, Enrichment factor, Traffic