

## بررسی آلودگی و مخاطره سلامت برخی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی محیط کنار جاده‌ای

سهیل سبحان اردکانی<sup>۱\*</sup>، نیره السادات حسینی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷

### چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین چالش و نگرانی مهم و مشترک محیط‌زیستی و بهداشت عمومی در سراسر جهان است. از این‌رو، این پژوهش با هدف ارزیابی آلودگی و مخاطره سلامت عناصر بالقوه سمی کبالت، مس، منگنز و نیکل در نمونه‌های خاک سطحی محیط کنار جاده‌ای در سال ۱۳۹۸ انجام یافت. بدین منظور، ۶۳ نمونه خاک سطحی (عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری) در طول ۷۰۰ متر از یک قطعه ۹ کیلومتری از جاده‌های گل‌تپه، رزن و کرمانشاه جمع‌آوری و پس از آماده‌سازی و هضم اسیدی نمونه‌های خاک در آزمایشگاه، محتوی عناصر در آن‌ها به روش طیف‌سنجی نوری پلاسما جفت شده القایی (ICP-OES) خوانده شد. بر اساس نتایج، بیشینه میانگین محتوی عناصر کبالت، منگنز و نیکل به ترتیب با ۱/۹۲، ۳۳۴ و ۲۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به ایستگاه رزن و بیشینه میانگین محتوی عنصر مس نیز با ۲۵/۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه (ایستگاه پرترافیک) و بیان‌گر تأثیر تراکم ترافیک بر آلودگی خاک بود. نتایج محاسبه شاخص EF نشان داد که غنی‌سازی (آلودگی) عناصر مس، منگنز و نیکل در ایستگاه‌های پرترافیک یعنی رزن و کرمانشاه "متوسط" تا "شدید" و میانگین مقادیر آن بزرگ‌تر از ۱/۵۰ و بیان‌گر تأثیر ورودی‌های انسانی به‌ویژه با منشأ ترافیک بوده است، در حالی‌که، در همه ایستگاه‌ها مقادیر شاخص برای عنصر کبالت بیان‌گر شرایط "غیر آلوده یا فاقد غنی‌شدگی" بود. همچنین، نتایج حاصل از ارزیابی خطر سلامتی نشان داد که "بلع" اصلی‌ترین مسیر قرار گرفتن کودکان و بزرگسالان در معرض خطر غیرسرطان‌زایی (HQ) خاک آلوده به فلزات سنگین بود. در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری مقادیر شاخص خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی (HI) عناصر مورد مطالعه در هر دو گروه کودک و بزرگسال بیان‌گر "خطر کم" بود. به‌علاوه، عنصر منگنز با میانگین ۸۲٪ از بیش‌ترین سهم در ایجاد خطر غیرسرطان‌زایی برای هر دو گروه کودک و بزرگسال برخوردار بود. از طرفی، خطر سرطان‌زایی (CR) کبالت و نیکل در هر دو گروه سنی غیرقابل توجه بود. نتایج این پژوهش بیان‌گر تأثیر فعالیت‌های ترافیکی بر آلودگی خاک حاشیه جاده به فلزات سنگین در ایستگاه‌های مورد مطالعه بود؛ از این‌رو، نسبت به پایش دوره‌ای منابع آلاینده خاک محیط کنار جاده به منظور حفظ سلامت محیط و انسان توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی فلزی، خاک سطحی، ترافیک، غنی‌شدگی، مخاطره سلامت

سبحان اردکانی س.، حسینی ن. س. ۱۴۰۲. بررسی آلودگی و مخاطره سلامت برخی عناصر بالقوه سمی در خاک سطحی محیط کنار جاده‌ای. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۱، شماره ۴، صفحه: ۱۱۲-۱۲۵.

۱- استاد گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران (مکاتبه کننده)

۲- دانش آموخته دکتری تخصصی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

\* پست الکترونیک: [s.sobhan@iauh.ac.ir](mailto:s.sobhan@iauh.ac.ir)

## مقدمه

آلودگی بوم‌سازگان به‌دنبال گسترش و پیشرفت فن‌آوری در دنیای صنعتی، روند رو به رشدی را طی کرده و سبب تشدید تهدیدات محیط‌زیستی و بهداشتی شده است. در این رابطه، آلاینده‌های سمی غیر زیست تخریب‌پذیر با پایداری و سمیت زیاد، نیم‌عمر زیستی طولانی و قابلیت تجمع و انباشت زیستی به‌لحاظ بوم‌شناختی و زیستی بسیار حایز اهمیت است (Rezaei Raja *et al.* 2016; Davodpour *et al.* 2019).

فلزات سنگین به‌عنوان گروهی از آلاینده‌های شیمیایی معدنی در زمره مهم‌ترین و خطرناک‌ترین آلاینده‌های محیطی به‌شمار می‌آیند که به‌واسطه فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی در زیست‌سپهر انتشار می‌یابند (Sobhanardakani, 2016; Gitipour *et al.* 2021).

افزون بر فعالیت‌های صنعتی، معدنی و کشاورزی، حمل و نقل جاده‌ای و فعالیت‌های مرتبط با آن به‌عنوان دومین منبع غیرنقطه‌ای انسان‌پدید آلودگی زیست‌بوم به فلزات سنگین محسوب می‌شوند. به‌طوری‌که، این آلاینده‌های فلزی با احداث، تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری جاده‌ها مرتبط بوده و عمدتاً ناشی از منابع احتراقی (سوخت خودرو) و غیر احتراقی (نشت سوخت و روان‌کننده‌ها، ذرات حاصل از فرسایش و استهلاک تایر، بدنه خودرو، اجزای موتور، لنت ترمز، کلاچ و سطح پوششی جاده) هستند (Yan *et al.* 2018; Hosseini *et al.* 2021). کبالت (Co)، مس (Cu) و نیکل (Ni) به‌سبب استفاده گسترده در اجزای موتور و پوشش بسیاری از قطعات مکانیکی خودرو نظیر لنت ترمز و لاستیک یعنی اجزایی که باید در برابر سایش مقاومت زیاد داشته باشند، و منگنز (Mn) به‌عنوان یک افزودنی سوخت در بنزین و گازوئیل از جمله رایج‌ترین آلاینده‌های فلزی مربوط به ترافیک محسوب می‌شوند (Tian *et al.* 2018; Devi *et al.* 2019; De Silva *et al.* 2021). این فلزات به‌عنوان عناصر ضروری در مقادیر اندک برای بقا و فرآیندهای زیستی جانداران لازم و بی‌خطر هستند، اما در شکل‌های خاص و یا مقادیر زیاد عوارض جبران‌ناپذیری را به‌دنبال دارند (Davodpour *et al.* 2019; Hosseini *et al.* 2020; Hosseini *et al.* 2022). در حالی‌که افزایش غلظت کبالت، آسیب بافتی، بیماری‌های قلبی و تنفسی، فیبروز و پنومونی بینابینی

را در پی خواهد داشت (Sobhanardakani, 2019); تجمع مقادیر زیاد مس در بدن می‌تواند منجر به تهوع، استفراغ، اسهال، ناراحتی‌های شدید مخاطی، صدمات وسیع مویرگی، اختلال در سیستم اعصاب مرکزی، افزایش کلسترول، کم‌خونی، صدمه به کبد، کلیه، معده، تغییرات در استخوان‌ها و حتی مرگ ناشی از مسمومیت شود (Sobhanardakani, 2016). افزایش بیش‌تر از حد منگنز در رژیم غذایی اثرات سمی شدیدی بر سیستم‌های مختلف بدن از جمله کبد، قلب، سیستم تنفسی، گوارشی و عصبی برجای می‌گذارد (Sobhanardakani, 2018). مسمومیت مزمن با نیکل و ترکیبات آن در غلظت‌های زیاد می‌تواند منجر به بروز انواع سرطان‌های خون، مغز، پروستات، استخوان، دستگاه تنفسی، عفونت‌های موضعی، التهاب، تأخیر در رشد، کاهش توانایی تولیدمثل، تداخل در جذب آهن و مرگ شود (Sobhanardakani, 2019).

انتشارات فلزی حاصل از ترافیک جاده‌ها تحت تأثیر شرایط محیطی (شرایط آب و هوایی از جمله میزان بارندگی و دما)، ترافیک (حجم ترافیک و سرعت وسایل نقلیه) و شرایط جاده (طول، عمر، شیب و نوع پوشش سطح جاده) بوده و عمدتاً از طریق فرورنشست‌های جوی مرطوب و خشک، گردوغبار، انتشار گاز و آبشویی در محیط‌های کنار جاده توزیع و منجر به آلودگی هوا، سپهر، آب و خاک حاشیه جاده می‌شوند (Hosseini *et al.* 2022; Hosseini *et al.* 2020). در این رابطه، آلودگی خاک به فلزات سنگین چالش و نگرانی مهم و مشترک محیط‌زیستی و بهداشت عمومی در سراسر جهان است، زیرا خاک به‌عنوان منبع و مخزن فلزات سنگین، نقش مهمی در انتشار و ذخیره‌سازی عناصر فلزی دارد. از طرفی، خاک بخشی ضروری از سیستم زیست-زمین-شیمیایی به‌شمار می‌آید و افزون بر این‌که عملکردی مهم در انتقال عناصر دارد، رابطه اجزای غیرزنده و زنده را حمایت و تولید غذا را حفظ می‌کند (Hosseini *et al.* 2021). افزون بر این، تجمع عناصر سمی در خاک نه تنها می‌تواند کیفیت خاک را کاهش دهد، بلکه می‌تواند به آلودگی 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

خاک کنار جاده‌ای کم و ناشی از فرآیندهای طبیعی بوده است. بهنام و همکاران (Behnam et al. 2018) نیز با ارزیابی آلودگی و تغییرات مکانی روی، مس و نیکل در خاک‌های مناطق خشک مسیر زایل-زاهدان نشان دادند که نمونه‌های خاک نسبت به عنصر نیکل بدون غنی‌شدگی بوده است. از طرفی، قنواتی و همکاران (Ghanavati et al. 2019) در ارزیابی خطرات بوم‌شناختی و بهداشتی برخی فلزات سنگین در خاک کنار جاده‌ای شهر اهواز گزارش کردند که خطر سرطان‌زایی (CR) عناصر آرسنیک، روی، سرب، کادمیوم، کروم، مس و نیکل در خاک کنار جاده‌ای در کودکان نسبت به بزرگسالان بیش‌تر بوده است. بنابراین، با توجه به نگرانی‌ها و مخاطرات محیط‌زیستی و بهداشتی مرتبط با آلاینده‌های فلزی در خاک و اهمیت و ضرورت ارزیابی آلودگی و خطرات عناصر بالقوه سمی از یک سو و از طرفی، نظر به این‌که مطالعات بسیار معدودی در خصوص ارزیابی آلودگی و مخاطره سلامت فلزات سنگین در خاک‌های سطحی حاشیه جاده‌های اصلی ایران انجام یافته است و داده‌های پایه در این خصوص در دسترس نیست؛ این پژوهش با هدف تعیین بار آلودگی و مخاطره سلامت عناصر کبالت، مس، منگنز و نیکل در نمونه‌های خاک سطحی محیط کنار جاده‌ای در سال ۱۳۹۸ انجام یافت.

## روش کار

### معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر همدان با وسعت تقریبی ۶۳ کیلومتر مربع و ۶۵۱۸۲۷ نفر جمعیت در ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متر از سطح دریا بین مدارهای ۴۸' ۳۴° عرض جغرافیایی شمالی و ۳۱' ۴۸° طول جغرافیایی شرقی در غرب ایران واقع شده است. میانگین دمای سالانه و بارندگی این شهر به ترتیب ۱۱/۳ درجه سلسیوس ۳۱۸ میلی‌متر گزارش شده است. شهر همدان به‌عنوان اولین قطب جمعیتی استان با برخورداری از زیرساخت‌ها و شبکه حمل و نقل جاده‌ای و راه‌های ارتباطی مهم، به نقطه تأکیدگاهی ثقل ارتباطات جاده‌ای غرب کشور تبدیل شده است که این موضوع می‌تواند به آلودگی خاک زیست‌بوم کنار جاده‌ای به فلزات سنگین منجر شود (Hosseini et al. 2021).

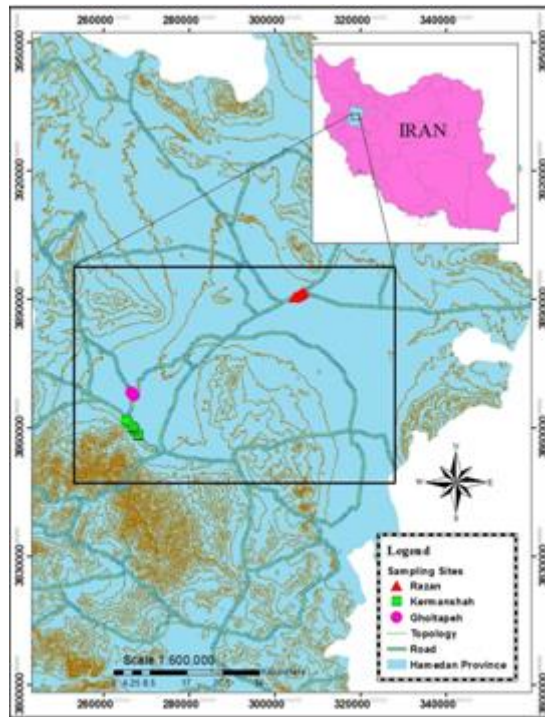
محسوب شود. به‌علاوه، تبادل آلاینده‌های خاک سطحی با هوا از طریق رسوب هواسپهری و تعلیق مجدد ذرات منجر به تأثیرات متقابل بین آلودگی خاک و هوا می‌شود. در این خصوص، خاک سطحی به‌عنوان شناساگر مناسبی از آلودگی فلزات سنگین ناشی از گرد و غبار هواسپهری یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سلامت انسان است که به‌طور مستقیم از طریق بلع خاک، استنشاق ذرات خاک (از طریق بینی و دهان) و تماس پوستی تهدیدی بهداشتی برای انسان به شمار می‌آید (Dietrich et al. 2019; Anwar et al. 2020; Jokar et al. 2022). بنابراین، ارزیابی آلودگی و تعیین خطرات مرتبط با عناصر فلزی در خاک حاشیه جاده برای حفظ سلامت بوم‌سازگان و انسان در سال‌های اخیر توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است (Yan et al. 2018; Devi et al. 2019; Forghani et al. 2019; Heidari et al. 2021; Wang et al. 2021; Fan et al. 2022).

امروزه، از شاخص‌های ارزیابی و تحلیل وضعیت آلودگی به‌منظور مدیریت محیط‌زیست، شناسایی و کاهش عوامل بالقوه مخاطره‌آمیز محیط‌زیستی، بوم‌شناختی و زیستی استفاده می‌شود (Fan et al. 2022; Habibi et al. 2022). 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 (Yan et al. 2018). ارزیابی خطر سلامت فلزات سنگین نیز ابزاری مفید برای شناخت مسیرهای احتمالی ورود آلاینده‌های فلزی به بدن و همچنین بررسی اثرات مضر (غیر سرطان‌زا و سرطان‌زا) مرتبط با فلزات بر سلامت انسان است (Sobhanardakani, 2018; Ehtemae et al. 2020). اگرچه تاکنون در خصوص ارزیابی آلودگی و خطرات سلامت 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 (Pardakhti et al. 2018) با ارزیابی شاخص‌های آلودگی و خطر بوم‌شناختی مربوط به فلزات سنگین در خاک‌های اطراف جاده‌های برون‌شهری ایران گزارش کردند که مقادیر عامل غنی‌شدگی (EF) عناصر مس، منگنز و نیکل

### نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، با در نظر گرفتن محدودیت منابع مالی در دسترس، سه جاده گلته، رزن و کرمانشاه از قدیمی‌ترین قطعات شبکه ارتباطات جاده‌ای استان همدان با میانگین حجم تردد روزانه تقریبی به ترتیب برابر با ۲۲۰۰، ۷۲۰۰ و ۱۵۰۰۰ وسیله نقلیه (Hosseini *et al.* 2021) به عنوان ایستگاه‌های نمونه‌برداری انتخاب شدند. سپس، با استفاده از فرمول تعیین حجم نمونه کوکران در مجموع ۶۳ نمونه خاک سطحی از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری در طول ۷۰۰ متر از یک قطعه ۹ کیلومتری هر جاده با ویژگی‌های مشابه (مانند پوشش جاده و میانگین سرعت وسایل نقلیه)، در

فاصل ۱۰۰ متر از یکدیگر و از هر دو طرف حاشیه جاده (۲-۰ متر از لبه جاده) با استفاده از بیلچه چوبی برداشت شدند (Hosseini *et al.* 2022). نمونه‌های خاک هر ایستگاه برای تهیه یک نمونه همگن، با یکدیگر مخلوط و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی زیپ‌دار ذخیره شده و پس از برچسب‌گذاری، برای مطالعات بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری نیز توسط دستگاه GPS گارمین مدل 32X ETRE ثبت شدند. موقعیت استقرار ایستگاه‌ها در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Figure 1. Map of sampling stations

### آماده‌سازی و تعیین محتوی عناصر در نمونه‌ها

در آزمایشگاه، به منظور تبخیر رطوبت اضافی، نمونه‌های خاک به مدت 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 مرک افزوده و پس از آن، محلول

حاصل به مدت ۱۰ دقیقه بر روی هیتر با دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. نمونه‌ها پس از تغییر رنگ از روی هیتر برداشته شده و سرد شدند. در مرحله بعد، طی دو مرحله متوالی، هر بار پنج میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرک به نمونه‌ها افزوده شد و محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه مجدداً رفلکس و روی هیتر با دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. سپس، دو

در این پژوهش، به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه خاک‌های حاشیه جاده و همچنین میزان تأثیر احتمالی فعالیت‌های انسان پدید بر محتوی فلزات سنگین خاک نسبت به محاسبه عامل غنی‌شدگی بر اساس رابطه ۱ اقدام شد (Yan et al. 2018; Habibi et al. 2022):

(۱)

$$EF = \frac{(C_m)_{\text{sample}}}{(C_m)_{\text{background}}}$$

در رابطه ۱،  $C_m$  و  $C_r$  به ترتیب بیان‌گر غلظت عنصر مورد نظر و عنصر مرجع در نمونه خاک هر دو بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم، sample و background نیز به ترتیب نشان‌دهنده محتوی عنصر مورد نظر و عنصر مرجع در خاک غیرآلوده یا پوسته زمین است. معمولاً عناصر آهن، آلومینیوم و لیتیم به سبب ویژگی‌های توزیع یکنواخت، تغلیظ به نسبت زیادتر 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 ۰/۵۰ تا ۱/۵۰ نشان دهنده آن است که عنصر مورد ارزیابی از فرآیندهای طبیعی یا مواد پوسته‌ای نشأت گرفته است، در حالی که، مقادیر بزرگ‌تر از ۱/۵۰ این شاخص نشان‌دهنده تأثیر عوامل انسانی بر محتوی عناصر است (Yan et al. 2018). جدول ۱ سطوح آلودگی و تفسیر آن‌ها را بر اساس مقادیر EF نشان می‌دهد (Turekian & Wedepohl, 1961).

میلی‌لیتر آب مقطر و سه میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰٪ مرک به محلول افزوده و محتویات به مدت دو تا پنج دقیقه روی هیتر با دمای ۷۵ سلسیوس 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 رفلکس، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و محلول‌ها با آب دوبار تقطیر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شدند (Sobhanardakani, 2019). 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 کبالت، مس، منگنز و نیکل به ترتیب در طول موج‌های ۲۲۸/۶۱۵، ۳۲۴/۷۵۴، ۲۵۷/۶۱۰ و ۲۳۱/۶۰۴ نانومتر خوانده شدند. تضمین و کنترل کیفیت (Quality Assurance/Quality Control) اندازه‌گیری‌ها نیز با استفاده از مرجع استاندارد خاک RTC, SQC-014 خریداری شده از شرکت سیگما-آلدریج اسپانیا انجام شد (Davodpour et al., 2019). بر این اساس، مقادیر حد تشخیص برای عناصر کبالت، مس، منگنز و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۱۴۱، ۰/۲۳۲، ۰/۰۹۳ و ۰/۰۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شدند. مقادیر محدودیت کمی عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز برای عناصر کبالت، مس، منگنز و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۴۲۲، ۰/۶۹۳، ۰/۲۷۹ و ۰/۲۷۷ به دست آمدند. نتایج حاصل از درصد بازبایی عناصر مورد مطالعه (بین ۹۳٪-۱۰۱) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای تعیین فلزات سنگین مورد مطالعه از اطمینان کافی و دقت مناسب برخوردار بوده است.

### ارزیابی آلودگی خاک

جدول ۱- طبقه‌بندی مقادیر عامل غنی‌شدگی (Turekian & Wedepohl, 1961)

Table 1. Classification of enrichment factor values (Turekian & Wedepohl, 1961)

Range	Pollution intensity
EF<1	No enrichment (NE)
1≤EF<3	Lowly enrichment (ME)
3≤EF<5	Moderate enrichment (MDE)
5≤EF<10	Moderate severe enrichment (MSE)
10≤EF<25	Severe enrichment (SE)
25≤EF<50	Very severe enrichment (VSE)
EF>50	Extremely severe enrichment (ESE)

ارزیابی خطر سلامت عناصر

در این پژوهش برای شناخت اثرات مضر فلزات بر سلامت انسان، از ارزیابی مخاطره سلامت به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی استفاده شد. در این راستا، برای ارزیابی احتمال خطرات غیرسرطانی و سرطان‌زا برای عموم مردم از طریق قرار گرفتن در معرض خاک آلوده، با استناد به روش ارایه شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (USEPA)، سه مسیر اصلی مواجهه یعنی بلع مستقیم، استنشاق (از طریق دهان و بینی) و جذب پوستی (روابط ۲ تا ۴) در نظر گرفته شدند. همچنین، جمعیت هدف به دو گروه کودک و بزرگسال تقسیم شدند (USEPA, 2002):

(۲)

$$ADD_{ing} = C_{soil} \times \frac{IngR_{soil} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (۳)$$

$$ADD_{inh} = C_{soil} \times \frac{InhR_{soil} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (۴)$$

$$ADD_{derma} = C_{soil} \times \frac{SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}$$

در روابط ۲ تا ۴:  $ADD_{ing}^1$ ،  $ADD_{inh}^2$  و  $ADD_{derma}^3$  به ترتیب مقدار میانگین جذب روزانه فلزات از طریق بلع مستقیم، استنشاق و تماس پوستی (میلی‌گرم در کیلوگرم در روز) را نشان می‌دهند.  $C_{soil}$  بیان‌گر محتوای عناصر در نمونه خاک سطحی (میلی‌گرم در کیلوگرم)،  $IngR^4$ ،  $InhR^5$  نیز به ترتیب بیان‌گر میزان مصرف ذرات خاک (میلی‌گرم در روز) و نرخ استنشاق ذرات خاک (مترمکعب در روز) هستند.  $EF^6$  نشان‌دهنده فرکانس قرار گرفتن در معرض (روز در سال)،  $ED^7$  بیان‌گر زمان قرار گرفتن در معرض خاک آلوده (سال)،  $BW^8$ ،  $AT^9$  و  $PEF^{10}$  به ترتیب نشان‌دهنده میانگین وزن بدن (کیلوگرم)، میانگین طول عمر (روز) و ضریب انتشار ذرات (مترمکعب در کیلوگرم)،  $SA^{11}$  بیان‌گر سطح

پوست در معرض خاک آلوده (سانتی‌متر مربع)،  $AF^{12}$  عامل چسبندگی پوست (میلی‌گرم در سانتی‌متر مربع) و  $ABS^{13}$  نیز عامل جذب پوستی است. مقادیر متناظر فاکتورهای مواجهه مورد استفاده برای محاسبه  $ADD$  فلزات از طریق مسیرهای سه‌گانه قرار گرفتن در معرض برای کودکان و بزرگسالان در جدول ۲ آورده شده است. در همین حال، ضریب خطر ( $HQ^{14}$ ) و شاخص خطر تجمعی ( $HI^{15}$ ) به ترتیب برای ارزیابی اثرات بالقوه غیر سرطانی یک مسیر واحد و تخمین خطر تجمعی غیر سرطانی از طریق کل مسیرهای مواجهه مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، برای ارزیابی اثرات سرطان‌زایی خاک‌های آلوده به فلزات، خطر سرطان‌زایی و خطر سرطان‌زایی کل ( $TCR^{16}$ ) با استفاده از روابط ۵ تا ۸ محاسبه شدند (Sobhanardakani, 2019; Ehtemae *et al.* 2020):

(۵)

$$HQ = \sum \frac{ADD}{RfD} \quad (۶)$$

$$HI = \sum HQ = HQ_{ing} + HQ_{inh} + HQ_{derm} \quad (۷)$$

$$CR = ADD \times CSF \quad (۸)$$

$TCR = \sum (ADD \times CSF_{ing}) + (ADD \times CSF_{inh}) + (ADD \times CSF_{derma})$   
در روابط ۵ تا ۸:  $ADD$  نشان‌دهنده میانگین مقدار جذب روزانه عناصر از طریق هر یک از مسیرهای احتمالی (میلی‌گرم در کیلوگرم در روز)،  $RfD^{17}$  و  $CSF^{18}$  به ترتیب بیان‌گر تخمینی از مقدار مرجع (میلی‌گرم در کیلوگرم در روز) یک عنصر خاص در جمعیت انسانی (هم برای کودکان و هم برای بزرگسالان) از طریق قرار گرفتن روزانه در معرض آلاینده و فاکتور شیب سرطان‌زایی برای عناصر مورد مطالعه (میلی‌گرم در کیلوگرم در روز) هستند. مقادیر  $RfD$  و  $CSF$  در جدول ۲ آورده شده‌اند. اگرچه مقادیر  $HQ / HI \leq 1$  نشان‌دهنده "خطر کم یا بدون خطر اثرات

- 1- Average Daily Dose of Ingestion
- 2- Average Daily Dose of Inhalation
- 3- Average Daily Dose of Dermal Contact
- 4- Ingestion Rate
- 5- Inhalation Rate
- 6- Exposure Frequency
- 7- Exposure Duration
- 8- Body Weight
- 9- Average Time
- 10- Particle Emission Factor
- 11- Exposed Skin Area

- 12- Soil Adherence Factor
- 13- Dermal Absorption Factor
- 14- Hazard Quotient
- 15- Hazard Index
- 16- Total Cancer Risks
- 17- Reference Doses
- 18- Carcinogenic Slope Factors

نظارتی زمانی است که  $1 \times 10^{-6} < CR \leq 1 \times 10^{-4}$  باشد. همچنین،  $CR \geq 1 \times 10^{-4}$  نشان‌دهنده خطر سرطان‌زایی غیرقابل قبول یا بالقوه بزرگ است.

غیر سرطان‌زا" است،  $HQ / HI > 1$  احتمال بروز اثرات نامطلوب و شدید غیر سرطان‌زا را نشان می‌دهد. در حالی که، مقدار  $CR < 1 \times 10^{-6}$  نشان می‌دهد که هیچ خطر قابل توجهی برای سلامتی وجود ندارد. خطر سرطان‌زایی قابل تحمل یا قابل قبول برای اهداف

جدول ۲- مقادیر متناظر فاکتورهای مواجهه، مرجع و فاکتور شیب برای ارزیابی خطر سلامت (غیر سرطان‌زا و سرطان‌زا) (USEPA, 2002)

Table 2. The corresponding values of exposure factors, reference doses and slope factors for health risk assessment (non-carcinogenic and carcinogenic risks) (USEPA, 2002)

Factor	Values					
	Children	Adult				
IngR (mg d <sup>-1</sup> )	100	200				
EF (d yr <sup>-1</sup> )	350	350				
ED (Yr)	6	24				
BW (Kg)	15	70				
AT (D) (non-carcinogenic)	ED × 365	ED × 365				
AT (D) (carcinogenic)	25550 (70 × 365)	25550 (70 × 365)				
SA (cm <sup>2</sup> )	2800	5700				
AF (mg cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	0.2	0.07				
ABF (No unit) (non-carcinogenic)	0.001	0.001				
ABF (No unit) (carcinogenic)	0.01	0.01				
InhR (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	7.63	12.8				
PEF (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	1.36 × 10 <sup>9</sup>	1.36 × 10 <sup>9</sup>				
Element	RfD <sub>ing</sub> (mg kg <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup> )			CSF (mg kg <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup> )		
	Ingestion	Inhalation	Dermal	Ingestion	Inhalation	Dermal
Co	2.00E-02	5.71E-06	1.60E-02	-	9.80E+00	-
Cu	4.00E-02	4.02E-02	1.20E-02	-	-	-
Mn	4.60E-02	1.43E-05	1.84E-03	-	-	-
Ni	2.00E-02	2.06E-02	5.40E-03	-	8.40E-01	-

نمونه‌برداری در جدول ۳ آورده شده است. با استناد به نتایج، بیشینه میانگین محتوی عناصر کبالت، مس و نیکل به ترتیب با ۱/۹۲، ۳۳۴ و ۲۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به ایستگاه رزن و بیشینه میانگین محتوی عنصر مس با ۲۵/۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه بود. از طرفی، میانگین محتوی عناصر در نمونه‌ها از روند نزولی منگنز < مس < نیکل < کبالت تبعیت کرد. نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه (جدول ۴) و دانکن نیز نشان داد که بین ایستگاه‌های گل‌تپه، رزن و کرمانشاه از حیث میانگین محتوی عناصر کبالت، مس، منگنز و نیکل در نمونه‌های خاک اختلاف معنی‌دار آماری ( $p < 0/05$ ) وجود داشته است. بیشینه میانگین محتوی عناصر در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه را می‌توان با حجم ترافیک بیش‌تر و کاربرد این فلزات در سوخت و قطعات خودرو مرتبط دانست. در

#### پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نسخه ۲۰ نرم‌افزار آماری SPSS در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام یافت. از آزمون‌های کلموگروف-اسمیرنوف<sup>۱</sup> و لون<sup>۲</sup> به ترتیب برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس‌ها و از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه<sup>۳</sup> و آزمون تعقیبی چند دامنه‌ای دانکن<sup>۴</sup> نیز برای مقایسه میانگین غلظت عناصر در نمونه‌های خاک بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری استفاده شد.

#### نتایج و بحث

آمار توصیفی مربوط به محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک حاشیه جاده‌ها به تفکیک ایستگاه

1- Kolmogorov-Smirnov

2- Leven Test

3- One-Way ANOVA

4- Duncan Multiple Range Test

مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، انوار و همکاران (Anwar *et al.* 2020) و لیو و همکاران (Liu *et al.* 2021) 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.

جدول ۳- آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی حاشیه جاده

Table 3. Descriptive statistics of concentration of analyzed elements in roadside soils

Road	Element (mg kg <sup>-1</sup> )			
	Co	Cu	Mn	Ni
G	1.28 <sup>b</sup>	12.8 <sup>c</sup>	216 <sup>c</sup>	15.9 <sup>c</sup>
R	1.92 <sup>a</sup>	18.5 <sup>b</sup>	334 <sup>a</sup>	22.2 <sup>a</sup>
K	1.55 <sup>ab</sup>	25.0 <sup>a</sup>	226 <sup>b</sup>	16.6 <sup>b</sup>
Min	0.98	10.16	213	15.5
Max	2.15	26.1	341	23.4
Average	1.58	18.7	259	18.2
CV (%)	21.5	28.4	21.9	16.6

G: جاده گلتپه؛ R: جاده رزن؛ K: جاده کرمانشاه؛ Min: کمینه محتوی عناصر در نمونه‌های خاک؛ Max: بیشینه محتوی عناصر در نمونه‌های خاک؛ CV: ضریب تغییرات عناصر در نمونه‌های خاک

حروف غیر مشترک (a, b, c و ...) در هر ستون، بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار آماری ( $p < 0.05$ ) میانگین محتوی عناصر مورد بررسی در نمونه‌های خاک بر اساس نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس یک‌طرفه و چند دامنه‌ای دانکن هستند.

G: Goltapeh Road; R: Razan Road; K: Kermanshah Road; Min: Minimum content of analyzed elements in the soil samples; Max: Maximum content of analyzed elements in the soil samples; ACV: The coefficient of variation of the analyzed elements

The letters (a, b, c) in each column show the considerable difference between the mean contents of analyzed elements in the soil samples based on the results of One-Way ANOVA and DMRT ( $p < 0.05$ )

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس میانگین غلظت عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک سطحی حاشیه جاده

Table 4. Results of analysis of variance of the average concentration of analyzed elements in roadside soils

Sources of variation	df	MS	F Value	Prob>F (sig)
Co	2	2.10	57.73	< 0.0001*
Cu	2	791.19	5055.87	< 0.0001*
Mn	2	89453.27	4475.54	< 0.0001*
Ni	2	253.04	2976.06	< 0.0001*

df: درجه آزادی؛ MS: میانگین مربعات؛ sig: سطح معنی‌داری

\* معنی‌داری در سطح ۰/۱ درصد

Df: degree of freedom; MS: the mean square; sig: significance level  
\*indicates level of significant difference of 0.1%

(Foti *et al.* 2017) و دیسیلوا و همکاران (De Silva *et al.* 2021) انتشارات ناشی از خوردگی قطعات وسایل نقلیه موتوری (لنت ترمز و تایر خودرو) و ساییدگی پوشش سطح جاده را منشأ احتمالی فلز نیکل در خاک کنار جاده معرفی کردند. با استناد به نتایج مندرج در شکل ۲، مقادیر محاسبه شده شاخص EF نشان داد که نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در ایستگاه گلتپه نسبت به عناصر منگنز (۱/۸۹) و نیکل (۱/۱۴) از نظر کیفی دارای سطح آلودگی کم (غناهی کم) و نسبت به عنصر مس (۳/۳۳) دارای سطح آلودگی متوسط (غناهی متوسط) بودند؛ در حالی که، نمونه‌های خاک مورد ارزیابی در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه نسبت به عناصر مس، منگنز و نیکل با مقادیر EF در دامنه ۸/۳۵-۲/۲۵ دارای آلودگی متوسط تا شدید بودند. در همین حال، عنصر

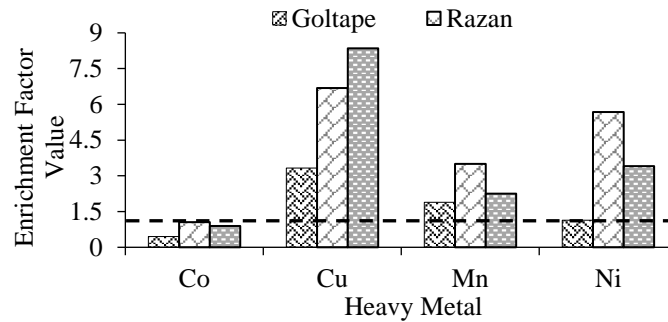
از طرفی، تیان و همکاران (Tian *et al.* 2018) و دوی و همکاران (Devi *et al.* 2019) سایش و خوردگی قطعات وسایل نقلیه موتوری نظیر تایرها و لنت ترمز و همچنین ساییدگی پوشش جاده (آسفالت) را به‌عنوان منابع عمده افزایش محتوی عناصر کبالت و مس در خاک حاشیه جاده‌ها معرفی کردند. همچنین، فرغانی و همکاران (Forghani *et al.* 2019) و وانگ و همکاران (Wang *et al.* 2021) نیز گزارش کردند که منگنز یکی از فلزات بسیار فراوان در پوسته زمین با میانگین محتوای ۹۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده و منشأ این عنصر در نمونه‌های خاک کنار جاده‌ای را می‌توان با ورودی‌های پوسته زمین و یا با خروجی اگزوز ناشی از کاربرد منگنز به‌عنوان افزودنی سوخت در بنزین و گازوئیل به شکل MMT مرتبط دانست. افزون بر این، فوتی و همکاران



سرطانی قابل توجه و جدی در کودکان و بزرگسالان برای هیچ یک از مسیرهای مواجهه با ذرات خاک آلوده به کبالت، مس، منگنز و نیکل مشاهده نشد. از طرفی، سطوح خطرات بهداشتی غیرسرطان‌زا برای عناصر ارزیابی شده از مسیرهای مختلف مواجهه برای کودکان و بزرگسالان به ترتیب کاهشی بلع < استنشاق > تماس پوستی بود. به طور کلی، بلع حدود ۹۶/۱٪ از کل شاخص خطر تجمعی و استنشاق (از طریق دهان و بینی) تنها حدود ۳/۸۶٪ از خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی برای کودکان را شامل شد. در حالی که، در مقایسه با بلع و استنشاق، اثر تماس پوستی اندک و فاقد خطر قابل توجه بود. برای بزرگسالان، سهم  $HQ_{inh}$ ،  $HQ_{ing}$  و  $HQ_{derm}$  در کل HI به ترتیب ۹۰/۰٪، ۹/۸۰٪ و ۰/۲۰٪ بود که با یافته‌های مطالعه‌های دیتریچ و همکاران (Dietrich et al. 2019) همخوانی داشت. در این رابطه می‌توان چنین اذعان داشت که بلع مسیر اصلی و مهم قرار گرفتن انسان (کودک و بزرگسال) در معرض فلزات بود که توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Soltani-Gerdefaramarzi et al. 2021). از سوی دیگر، سهم قرار گرفتن در معرض بلع برای کودکان بیش‌تر از بزرگسالان بود که با نتایج بسیاری از مطالعات مطابقت داشت، که نشان دادند برخی رفتارها یا عادات غیربهداشتی کودکان مانند قرار دادن دست یا اشیاء در دهان و مکیدن آن‌ها، خطر تهدید سلامتی را افزایش می‌دهد (Han et al. 2021). همچنین، روند نزولی میانگین میزان خطر غیر سرطان‌زایی فلزات برای هر دو گروه سنی به شرح منگنز < نیکل < مس < کبالت بود. با این حال، منگنز با ۸۲٪ از بیش‌ترین سهم HI برای هر دو گروه سنی کودک و بزرگسال برخوردار بود. در این خصوص می‌توان اذعان داشت که اثرات سم‌شناسی غیرسرطان‌زای احتمالی عمدتاً توسط عنصر منگنز هدایت می‌شود. البته باید توجه داشت که هرچند منگنز یک عنصر حیاتی و ضروری برای عملکردهای زیستی است، ولی قرار گرفتن در معرض مقادیر بیش‌تر از حد آن می‌تواند به تحریک پوستی، ناهنجاری‌های عصبی، گوارشی، کبدی، آسیب‌های بافت مخاطی دستگاه گوارش، اختلالات ریوی، سینوسی و قلبی عروقی منجر شد (Sobhanardakani, 2018).

کبالت با مقادیر EF در دامنه ۱/۲۴-۰/۶۲۰ هیچ‌کدام از سه ایستگاه نمونه‌برداری واجد غنی‌شدگی نبود. همچنین، روند نزولی میانگین مقادیر شاخص غنی‌شدگی برای فلزات به شرح مس < نیکل < منگنز < کبالت بود. از طرفی، مقادیر EF برای عناصر مس، منگنز و نیکل به‌ویژه در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه بزرگ‌تر از ۱/۵۰ بود که می‌تواند با منشا انسانی این عناصر به‌ویژه انتشارات آگزوزی و غیرآگزوزی مرتبط باشد. به‌علاوه، با استناد به مقادیر EF کوچک‌تر از ۱/۵۰ برای عنصر کبالت در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری، به‌نظر می‌رسد که این عنصر عمدتاً از فرآیندهای طبیعی (مواد پوسته‌ای) همچون فرسایش و تعلیق مجدد ذرات خاک نشأت گرفته است. در تأیید نتایج حاصل و در پژوهشی مشابه، اسکوربلیز (Skrynetska et al., 2019) غنی‌شدگی متوسط تا شدید برای عنصر مس در خاک حاشیه بزرگراه‌های ورشو (لهستان) را با فعالیت‌های ترافیکی مرتبط دانست. یان و همکاران (Yan et al., 2018) نیز با ارزیابی غنی‌سازی و شناسایی منابع فلزات کمیاب در خاک‌های کنار جاده در شانگهای چین اذعان داشتند که مقادیر شاخص EF برای عنصر مس بیان‌گر غنی‌شدگی متوسط تا شدید و سهم قابل توجه ترافیک بوده خاک‌های منطقه بوده و غنی‌شدگی عنصر کبالت نیز در طبقه کیفی غیرآلوده (بدون غنی‌شدگی) قرار داشته است. این در حالی است که، حیدری و همکاران (Heidari et al. 2021) با ارزیابی آلودگی و مخاطرات محیط‌زیستی و بهداشتی فلزات سنگین در گرد و غبار جاده‌ای جمع‌آوری شده از شهر بندرعباس و حومه آن نتیجه گرفتند که عنصر کبالت با مقادیر میانگین EF کوچک‌تر از ۱/۵۰، عمدتاً از فرآیندهای طبیعی نظیر مواد پوسته‌ای نشأت گرفته است. علاوه بر این، با استناد به میانگین مقادیر EF بزرگ‌تر از ۱/۵۰، سهم قابل توجه فعالیت‌های ترافیکی بر محتوی عنصر مس نیز مورد تأیید قرار گرفت.

نتایج محاسبه شاخص غیرسرطان‌زایی (HI و HQ) ناشی از قرار گرفتن در معرض عناصر بالقوه سمی از طریق بلع مستقیم، تنفس و یا تماس پوستی با ذرات خاک آلوده در نمونه‌های خاک در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس مقادیر محاسبه‌شده شاخص HQs، هیچ خطر غیر



شکل ۲- مقادیر شاخص EF عناصر کبالت، مس، منگنز و نیکل در نمونه‌های خاک به تفکیک ایستگاه نمونه‌برداری

Fig. 2. The EF values of Co, Cu, Mn and Ni in soil samples of the sampling sites

جدول ۵- نتایج ارزیابی خطر غیرسرطان‌زایی (HQ و HI) عناصر در نمونه‌های خاک سطحی کنار جاده‌ای

Table 5. Results of non-carcinogenic risk assessment (HQ and HI) of analyzed elements in the roadside soil samples

Sait	Receptor	Pathway	HQ				HI
			Co	Cu	Mn	Ni	
Goltapeh	Children	Ingestion	8.2 E-04	4.08 E-03	6.02 E-02	1.02 E-02	7.53 E-02
		Inhalation	8.07 E-05	1.14 E-07	5.45 E-03	2.77 E-07	5.53 E-03
		Dermal	2.38 E-15	1.19 E-14	3.53 E-12	8.81 E-14	8.81 E-14
		Total	9.01 E-04	4.08 E-03	6.57 E-02	1.02 E-02	8.09 E-02
	Adults	Ingestion	8.75 E-05	4.38 E-04	6.46 E-03	1.09 E-03	8.08 E-03
		Inhalation	2.89 E-05	4.08 E-08	1.97 E-03	9.91 E-08	2.26 E-04
		Dermal	3.13 E-16	4.25 E-15	4.71 E-13	1.18 E-14	4.83 E-13
		Total	1.16 E-04	4.38 E-04	8.43 E-03	1.09 E-03	1.01 E-02
Razan	Children	Ingestion	1.23 E-03	5.9 E-03	9.28 E-02	1.42 E-02	1.14 E-01
		Inhalation	1.24 E-04	1.65 E-07	8.39 E-03	3.88 E-07	8.51 E-03
		Dermal	3.13 E-15	4.62 E-14	5.43 E-12	1.23 E-13	5.55 E-12
		Total	1.35 E-03	5.9 E-03	1.01 E-01	1.42 E-02	1.22 E-01
	Adults	Ingestion	1.32 E-04	6.33 E-04	9.96 E-03	1.52 E-03	1.22 E-02
		Inhalation	4.36 E-05	5.95 E-08	3.03 E-03	1.39 E-07	3.07 E-03
		Dermal	4.38 E-16	4.92 E-15	7.28 E-13	1.64 E-14	7.44 E-13
		Total	1.36 E-04	6.33 E-04	1.3 E-02	1.52 E-03	1.53 E-02
Kermanshah	Children	Ingestion	9.9 E-04	7.98 E-03	6.28 E-02	1.06 E-02	8.24 E-02
		Inhalation	9.74 E-05	2.23 E-07	5.68 E-03	2.89 E-07	5.77 E-03
		Dermal	2.88 E-15	6.25 E-14	3.69 E-12	9.2 E-14	3.84 E-12
		Total	1.01 E-03	7.98 E-03	6.85 E-02	1.06 E-02	8.81 E-02
	Adults	Ingestion	1.06 E-04	8.58 E-04	6.74 E-03	1.14 E-03	8.84 E-03
		Inhalation	3.54 E-05	8.01 E-08	2.04 E-03	1.04 E-07	2.08 E-03
		Dermal	3.75 E-16	8.42 E-15	4.92 E-13	1.24 E-14	5.04 E-13
		Total	1.41 E-04	8.58 E-04	8.78 E-03	1.14 E-03	1.09 E-02

کبالت و نیکل برای هر دو گروه سنی نیز کوچک‌تر از  $10^{-6}$  و نشان‌دهنده عدم خطر سرطان‌زایی قابل‌توجه برای این فلزات در خاک‌های مورد مطالعه سه ایستگاه بود. در پژوهشی مشابه، قنواتی و همکاران (Ghanavati *et al.* 2019) نیز خطر سرطان‌زایی نیکل برای هر دو گروه سنی کودک و بزرگسال در خاک کنار جاده‌ای شهر اهواز را کوچک‌تر از  $10^{-6}$  و بیان‌گر بی‌خطر بودن این عنصر برای سلامت انسان گزارش کردند.

از آنجایی که مس و منگنز عناصر سرطان‌زا محسوب نمی‌شوند (Aminiyan *et al.* 2018)؛ از این‌رو، تخمین خطر سرطان‌زایی از مسیرهای مختلف مواجهه با کبالت و نیکل برای هر گروه سنی انجام شد (جدول ۶). همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است، از آنجا که مقادیر  $CR_{inh}$  همگی کمتر از استاندارد آستانه  $10^{-6}$  بودند، هیچ خطر سرطان‌زایی از طریق مسیر استنشاقی مشاهده نشد. از طرفی، مقادیر TCR عناصر

جدول ۶- نتایج ارزیابی خطر سرطان‌زایی (TCR و CR) عناصر در نمونه‌های خاک سطحی کنار جاده‌های

Table 6. Results of carcinogenic risk assessment (CR and TCR) of analyzed elements in the roadside soil samples

Site	Receptor	Element	CR <sub>ing</sub>	CR <sub>inh</sub>	CR <sub>derm</sub>	TCR	
Goltapeh	Children	Co	-	3.85 E-10	-	3.85 E-10	
		Ni	-	4.05 E-10	-	4.05 E-10	
		Total	-	7.53 E-10	-	7.53 E-10	
	Adult	Co	-	5.20 E-10	-	5.20 E-10	
		Ni	-	5.39 E-10	-	5.39 E-10	
		Total	-	1.06 E-09	-	1.06 E-09	
	Razan	Children	Co	-	5.64 E-10	-	5.64 E-10
			Ni	-	5.80 E-10	-	5.80 E-10
			Total	-	1.14 E-09	-	1.14 E-09
Adult		Co	-	7.53 E-10	-	7.53 E-10	
		Ni	-	7.49 E-10	-	7.49 E-10	
		Total	-	1.51 E-09	-	1.51 E-09	
Kermanshah	Children	Co	-	4.66 E-10	-	4.66 E-10	
		Ni	-	4.22 E-10	-	4.22 E-10	
		Total	-	8.88 E-10	-	8.88 E-10	
	Adult	Co	-	5.90 E-10	-	5.90 E-10	
		Ni	-	5.57 E-10	-	5.57 E-10	
		Total	-	1.15 E-09	-	1.15 E-09	

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش که با هدف ارزیابی بار آلودگی و مخاطره سلامت قرار گرفتن در معرض خاک سطحی کنار جاده‌ای آلوده به عناصر کبالت، مس، منگنز و نیکل انجام یافت، بیان‌گر آن بود که بیشینه محتوی عناصر به خاک‌های حاشیه جاده‌های با تراکم ترافیکی بیشتر (رزن و کرمانشاه) اختصاص داشت که 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 کبالت، سایر عناصر مورد مطالعه در ایستگاه‌های با حجم ترافیک زیاد از غنی‌شدگی متوسط و میانگین مقادیر شاخص بزرگ‌تر از ۱/۵۰ برخوردار بودند. در این خصوص، می‌توان اذعان داشت که منشا عناصر مس، منگنز و نیکل انسان‌پدید و عمدتاً ناشی از فعالیت‌های ترافیکی (انتشارات اگزوزی و غیر اگزوزی) بوده است؛ در حالی که، فرآیندهای طبیعی منبع عمده انتشار کبالت در ایستگاه‌های مورد مطالعه معرفی شدند. از سوی دیگر، مقادیر محاسبه شده شاخص خطر غیر سرطان‌زایی برای همه عناصر در هر دو گروه سنی کودک و بزرگسال بیان‌گر خطر کم یا فقدان خطر مواجهه با خاک آلوده بود و نشان داد که

اثرات غیر سرطان‌زا از روند کاهشی منگنز < نیکل < مس < کبالت تبعیت کرده است. همچنین، بلع اصلی‌ترین مسیر قرار گرفتن کودکان و بزرگسالان در معرض خاک آلوده به فلزات سنگین شناسایی شد. از طرفی، عناصر کبالت و نیکل در خاک سطحی فاقد خطر سرطان‌زایی قابل توجه برای هر دو گروه سنی بودند. نظر به این‌که منگنز با میانگین ۸۲٪ از بیش‌ترین سهم در خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی برای هر دو گروه کودک و بزرگسال برخوردار بود؛ از این‌رو، نسبت به شناسایی و کنترل منابع انتشار منگنز از جمله احتراق و نشت سوخت‌های فسیلی و پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک که از قابلیت تجمع انواع آلاینده‌های آلی و معدنی و به‌تبع آن ایجاد خطر برای سلامت انسان برخوردارند، توصیه می‌شود. در خاتمه، از آن‌جا که در اجرای این پژوهش با محدودیت‌های مالی و زمانی مواجه بودیم، بررسی آلودگی خاک به سایر عناصر سمی و برداشت نمونه از طول بیش‌تری از جاده‌های پر رفت و آمد در مطالعه‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

### سپاسگزاری

نویسندگان از حوزه معاونت محترم پژوهش و فن‌آوری دانشگاه برای فراهم کردن امکانات اجرای مطالعه، سپاسگزاری می‌کنند.

## References

- Aminiyan M.M., Baalousha M., and Aminiyan F.M. 2018. Evolution of human health risk based on EPA modeling for adults and children and pollution level of potentially toxic metals in Rafsanjan road dust: a case study in a semi-arid region, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20):19767-78.
- Anwar S., Naz A., Ashraf M.Y., and Malik A. 2020. Evaluation of inorganic contaminants emitted from automobiles and dynamics in soil, dust, and vegetations from major highways in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(26):32494-32508.
- Behnam V., Ahangar A., Rahmanian M., and Bameri A. 2018. Evaluation of contamination and spatial variations of Zn, Cu and Ni in arid-zone soils of the Route between Zabol and Zahedan. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(5):201-216. (In Persian)
- Davodpour R., Sobhanardakani S., Cheraghi M., Abdi N., and Lorestani B. 2019. Honeybees (*Apis mellifera* L.) as a potential bioindicator for detection of toxic and essential elements in the environment (Case study: Markazi Province, Iran). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 77(3):344-358.
- Devi U., Taki K., Shukla T., Sarma K.P., Hoque R.R., and Kumar M. 2019. 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. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(3):1387-1403.
- De Silva S., Ball A.S., Indrapala D. V., and Reichman S. M. 2021. Review of the interactions between vehicular emitted potentially toxic elements, roadside soils, and associated biota. *Chemosphere*, 263:128135.
- Dietrich M., Wolfe A., Burke M., and Krekeler M.P. 2019. The first pollution investigation of road sediment in Gary, Indiana: Anthropogenic metals and possible health implications for a socioeconomically disadvantaged area. *Environment International*, 128:175-192.
- Ehtemae N., Ghanavati N., Nazarpour A., Babaenejad T., and James Watts M. 2020. Assessment of potential ecological and human health risk of some selected heavy metals in street dusts in Ilam. *Journal of Water and Soil Science*, 23(4):183-197 (In Persian).
- Fan P., Lu X., Yu B., Fan X., Wang L., Lei K., Yang Y., Zuo L., and Rinklebe J. 2022. Spatial distribution, risk estimation and source apportionment of potentially toxic metal (loid) s in resuspended megacity street dust. *Environment International*, 160:107073.
- Forghani G., Kelm U., and Mazinani V. 2019. Spatial distribution and chemical partitioning of potentially toxic elements in soils around Khatoon-Abad Cu Smelter, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 196:66-80.
- Foti L., Dubs F., Gignoux J., Lata J.C., Lerch T.Z., Mathieu J., Nold F., Nunan N., Raynaud X., Abbadie L., and Barot S. 2017. Trace element concentrations along a gradient of urban pressure in forest and lawn soils of the Paris region (France). *Science of the Total Environment*, 598:938-948.
- Ghanavati N., Nazarpour A., and Babaenejad T. 2019. Assessment of the ecological and health risks of some heavy metals in roadside soils of Ahvaz, Iran. *Journal of School of Public Health and Institute of Public Health Research*, 16(4):373-390 (In Persian).
- Gitipour S., Akbarpour F., Baghdadi M., and Mehrdadi N. 2022. Influence of the organic acids on the heavy metals mobility and distribution in the contaminated soils. *Applied Soil Research*, 9(4):62-73 (In Persian)
- Habibi H., Sobhanardakani S., Cheraghi M., Lorestani B., and Kiani Sadr M. 2022. Analysis, sources and health risk assessment of trace elements in street dust collected from the city of Hamedan, west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15:168.
- Han Q., Liu Y., Feng X.X., Mao P., Sun A., Wang M., Wang M.Y., and Wang M.S. 2021. Pollution effect assessment of industrial activities on potentially toxic metal distribution in windowsill dust and surface soil in central China. *Science of The Total Environment*, 759:144023.
- Heidari M., Darijani T. and Alipour V., 2021. Heavy metal pollution of road dust in a city and its highly polluted suburb; quantitative source apportionment and source-specific ecological and health risk assessment. *Chemosphere*, 1(273):129656.
- Hosseini N.S., Sobhanardakani S., Cheraghi M., Lorestani B., and Merrikhpour, H. 2022. Expansive herbaceous species as bio-tools for elements detection in the vicinity of major roads

- of Hamedan, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(3):1611-1624.
- Hosseini N.S., and Sobhan Ardakani S. 2021. Evaluation of the Impact of Traffic Volume on Pollution and Potential Ecological Risk of Zn, Pb, and Ni in Suburban Roadside Soils in Hamedan, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, 35(2):119-134 (In Persian)
- Hosseini N.S., Sobhanardakani S., Cheraghi M., Lorestani B., and Merrikhpour H. 2021. Feasibility of using *Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba* for biomonitoring and bioremediation of heavy metals (Zn, Pb and Ni) in the roadside environments. *Iranian Journal of Health and Environment*, 13 (4):607-620
- Hosseini N.S., Sobhanardakani S., Cheraghi M., Lorestani B., and Merrikhpour H. 2020. Heavy metal concentrations in roadside plants (*Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba*) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(12):13301-13314.
- Jokar M., Hejaz M., Sarcheshmehpoor M., and Farahmand H. 2022. The effect of humic and fulvic acids on phytoremediation ability of copper and cadmium by ornamental castor bean. *Applied Soil Research*, 10(1):1-14 (In Persian)
- Liu H., Zhang Y., Yang J., Wang H., Li Y., Shi Y., Li D., Holm P.E., Ou Q., and Hu W. 2021. Quantitative source apportionment, risk assessment and distribution of heavy metals in agricultural soils from southern Shandong Peninsula of China. *Science of the Total Environment*, 767:144879.
- Pardakhti A., and Zahed F. 2018. Pollution indices and ecological risk assessment for heavy metals in side soils of interurban roads, Iran. *Journal of Environmental Science Studies*, 3(3):769-781 (In Persian)
- Rezaei Raja O., Sobhanardakani S., and Cheraghi M. 2016. Health risk assessment of citrus contaminated with heavy metals in Hamedan City, potential risk of Al and Cu. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 3(3):131-135.
- Skrynetska I., Karcz J., Barczyk G., Kandziora-Ciupa M., Ciepał R., and Nadgórska-Socha A. 2019. Using *Plantago major* and *Plantago lanceolata* in environmental pollution research in an urban area of Southern Poland. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(23):23359-23371.
- Sobhanardakani S. 2016. Evaluation of the water quality pollution indices for groundwater resources of Ghahavand Plain, Hamedan Province, western Iran. *Iranian Journal of Toxicology*, 10(3): 35-40.
- Sobhanardakani S. 2018. 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*, 25(28): 28086-28093.
- Sobhanardakani S. 2019. Ecological and human health risk assessment of heavy metals content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran. *Biological Trace Element Research*, 187(2):602-610.
- Soltani-Gerdefaramarzi S., Ghasemi M., and Gheysouri M. 2021. Pollution, human health risk assessment and spatial distribution of toxic metals in urban soil of Yazd City, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 43:3469-3484.
- Tian X., Zhang H., Zhao Y., Mehmood K., Wu X., Chang Z., Luo M., Liu X., Ijaz M., Javed M.T., and Zhou D. 2018. Transcriptome analysis reveals the molecular mechanism of hepatic metabolism disorder caused by chromium poisoning in chickens. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018; 25(16):15411-15421.
- Turekian K.K., and Wedepohl K.H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2):175-192.
- USEPA M. 2002. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites. *United States Environmental Protection Agency*, 12:1-187.
- Wang H.Z., Cai L.M., Wang Q.S., Hu G.C., and Chen L.G. 2021. 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*, 196:104930.
- Yan G., Mao L., Liu S., Mao Y., Ye H., Huang T., Li F., and Chen L. 2018. Enrichment and sources of trace metals in roadside soils in Shanghai, China: a case study of two urban/rural roads. *Science of the Total Environment*, 631:942-950.

## Investigating the Contamination Level and Health Risk of Potentially Toxic Elements in Surface Soil of the Roadside Environment

Soheil Sobhanardakani<sup>1\*</sup>, Nayereh Sadat Hosseini<sup>2</sup>

(Received: October, 2022

Accepted: April, 2022)

### Abstract

Soil contamination with heavy metals is an important, common environmental, public health challenge, and concern worldwide. Therefore, this study was conducted to evaluate the contamination level and health risk of potentially toxic elements (cobalt, copper, manganese and nickel) in the surface soil samples of the roadside environment of Hamedan in 2019. In so doing, 63 surface soil samples (0-15 cm) were collected along 700 m from a 9 km section of Goltepeh (G), Razan (R), and Kermanshah (K) roads. After acidic digestion of soil samples in the laboratory, the contents of elements were determined using ICP-OES. Based on the results obtained, the highest amounts of the analyzed elements ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) were found in the samples collected from the R site (1.92, 334 and 22.2 for Co, Mn, and Ni, respectively), and for Cu with  $25.0 \text{ mg kg}^{-1}$  it was related to K site, which indicating the effect of traffic density on soil pollution. The calculated values of EF showed that the enrichment (pollution) of Cu, Mn and Ni in the stations with high traffic (Razan and Kermanshah roads) was greater than 1.5, indicating the effect of human inputs especially with the traffic origin, while the EF values for the Co indicated "non-contaminated or no enrichment" conditions. Also, the results of the health risk assessment showed that "ingestion" was the main route of exposure of children and adults to the non-carcinogenic risk (HQ) of soil contaminated with heavy metals. In all sampling stations, the values of cumulative non-carcinogenic risk index (HI) of the studied elements in both child, and adult groups indicated "low risk". In addition, Mn with an average of 82% had the highest share in causing non-carcinogenic risk for both children and adults. On the other hand, the carcinogenic risk (CR) of Co and Ni was negligible for both children and adults. Since the results indicating the impact of traffic activities on the contamination of roadside soil with heavy metals. Therefore, periodic monitoring of the sources of soil contamination in the roadside environment is recommended for the environmental and human health aspects.

**Key words:** Metal Pollution, Surface Soil, Traffic, Enrichment, Health Risk

Sobhanardakani S. and Hosseini N.S. 2024. Investigating the contamination level and health risk of potentially toxic elements in surface soil of the roadside environment. *Applied Soil Research*, 11(4):112-125.

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

2.Former PhD Student, Department of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

\* Corresponding Author Email: [s\\_sobhan@iauh.ac.ir](mailto:s_sobhan@iauh.ac.ir)