

Assessment of Level and Source Identification of Heavy Metals in Roadside Surface Soil: A Case Study

N.S. Hosseini

PhD, Dept. of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

S. Sobhanardakani

* Professor, Dept. of the Environment, College of Basic Sciences, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran; s_sobhan@iauh.ac.ir

Received:2023/03/16

Accepted: 2023/05/31

Document Type: Research article

ABSTRACT

Background and purpose: Road transportation is one of the primary sources of metal pollution, making roadside ecosystems particularly vulnerable to heavy metal contamination. Therefore, this study aims to analyze and identify the sources of Zn, Pb, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, and Ni in the surface soils along selected roads in Hamedan Township in 2019.

Materials and Methods: A total of 63 surface soil samples were collected along a 700 m stretch of Goltepe (G), Razan (R), and Kermanshah (K) roads in Hamedan Province. After soil sample preparation, the elemental contents were determined using ICP-OES. The enrichment contamination severity index (CSI) was also calculated. All statistical analyses were performed using SPSS software.

Results: The highest concentrations of all the analyzed elements were found in the samples collected from the R site, with concentrations of 122, 0.320, 1.92, 17.3, 334, and 22.2 mg/kg for Zn, Cd, Co, Cr, Mn, and Ni, respectively. The K site had the highest concentrations of Pb and Cu, with 26.4 and 25.0 mg/kg, respectively, indicating the influence of traffic volume. The CSI values indicated that the soil quality in the studied sites was within acceptable limits. Furthermore, the results of multivariate statistical analyses (PCC, PCA, and HCA) suggested that Mn in roadside soils is likely caused by soil raw materials and exhaust emissions, whereas the emissions of Zn, Pb, Cd, Co, Cr, Cu, and Ni originated primarily from non-exhaust sources such as brake and tire wear, engine emissions, and lubricating oil.

Conclusion: The findings indicate the impact of traffic activities on soil contamination with heavy metals in the study areas. Therefore, regular and periodic monitoring of soil samples is recommended to control the emission sources of pollutants, ensuring the health of ecosystems and humans.

Keywords: Heavy metal pollution, Multivariate analysis, Road, Traffic, Pollution intensity

► **Citation:** Hosseini NS, Sobhanardakani S. Assessment of level and source identification of heavy metals in the surface soil of the roadside: A case study. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Summer 2023; 9(2): 197-214.

ارزیابی محتوی و منشأ آلودگی فلزات سنگین در خاک سطحی حاشیه جاده: مطالعه موردی

نیره سادات حسینی

دکتری تخصصی محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

سهیل سبحان اردکانی

* استاد، گروه محیط‌زیست، دانشکده علوم پایه، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. (نویسنده مسئول):

s_sobhan@iauh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

زمینه و هدف: حمل و نقل جاده‌ای، یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین منابع آلودگی فلزی است که بوم‌سازگان حاشیه جاده را به مناطقی آلوده تبدیل کرده است. از این رو، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی آلودگی و منشأیابی عناصر روی، سرب، کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های همدان در سال ۱۳۹۸ انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه توصیفی-مقطعی، ۶۳ نمونه خاک سطحی در طول ۷۰۰ متر از یک قطعه ۹ کیلومتری از جاده‌های مواصلاتی گلتهپه، رزن و کرمانشاه در استان همدان جمع‌آوری و پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، محتوی عناصر در آن‌ها به روش طیف‌سنجی نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) خوانده شد. همچنین، نسبت به محاسبه شاخص شدت آلودگی (CSI) نیز اقدام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۰ انجام گرفت.

یافته‌ها: بیشینه میانگین محتوی عناصر روی، کادمیم، کبالت، کروم، منگنز و نیکل به ترتیب با ۱۲۲، ۰/۳۲۰، ۱/۹۲، ۱۷/۳، ۳۳۴ و ۲۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به ایستگاه رزن و بیشینه میانگین محتوی عناصر سرب و مس به ترتیب با ۲۶/۴ و ۲۵/۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه (ایستگاه‌های پر ترافیک) و بیان‌گر تأثیر تراکم ترافیک بود. نتایج محاسبه شاخص CSI بیان‌گر کیفیت قابل قبول خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه بود. همچنین، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌های آماری چندمتغیره (PCA، PCC و HCA) نشان داد که منگنز در خاک‌های کنار جاده احتمالاً از مواد اولیه خاک و انتشارات آگزوزی نشأت گرفته است، در حالی که انتشار روی، سرب، کادمیم، کبالت، کروم، مس و نیکل عمدتاً به منابع غیرآگزوزی (مانند فرسودگی ترمزها، لاستیک‌ها، موتورها و روغن روان‌کننده) مربوط بود.

نتیجه‌گیری: با توجه به اثبات تأثیر فعالیت‌های ترافیکی بر آلودگی فلزات سنگین خاک کناره جاده‌ای، پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک برای کنترل منابع به‌منظور حفظ سلامت بوم‌سازگان و انسان توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آلودگی فلزی، تحلیل چندمتغیره، ترافیک، جاده، شاخص شدت آلودگی

◀ **استناد:** حسینی ن، سبحان اردکانی س. ارزیابی محتوی و منشأ آلودگی فلزات سنگین در خاک سطحی حاشیه جاده: مطالعه موردی. فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط. تابستان ۱۴۰۲؛ ۹(۲): ۱۹۷-۲۱۴.

توسعه شبکه‌های ارتباطی جاده‌ای به سبب افزایش نیاز جوامع به جابه‌جایی و استفاده از وسایل نقلیه ناشی از رشد جمعیت، ترافیک جاده‌ای و فعالیت‌های مرتبط با آن، به یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین منابع آلودگی و عامل مهمی در تشدید تهدیدات محیط‌زیستی تبدیل شده است. سطوح مختلف آلودگی بوم‌سازگان کنار جاده‌ای، به‌عنوان یک نگرانی مشترک و مهم بهداشت عمومی، با احداث، تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری جاده‌ها مرتبط بوده و عمدتاً ناشی از انتشارات مرتبط با ترافیک (منابع احتراقی و غیراحتراقی) است (۱-۴).

دی‌اکسید کربن، اکسیدهای گوگرد و نیتروژن، ذرات معلق، ترکیبات آلی فرار و فلزات سنگین از جمله آلاینده‌های آلی و معدنی حاصل از ترافیک است که به شکل گاز یا ذرات از منابع احتراقی (سوخت خودرو) و غیراحتراقی (نشت روان‌کننده‌ها و سوخت، سایش تایر، خوردگی و استهلاک بدنه خودرو، اجزای موتور، کلاچ، باطری، لنت ترمز و پوشش سطح جاده) انتشار می‌یابند (۵، ۶). در این میان، فلزات سنگین به سبب پایداری در محیط و سمیت، در زمره خطرناک‌ترین گروه از آلاینده‌های شیمیایی معدنی غیرزیست‌تخریب‌پذیر مرتبط با ترافیک جاده‌ای به‌شمار می‌آیند که با توجه به نیم‌عمر زیستی طولانی و برخورداری از قابلیت تجمع و انباشت زیستی به‌لحاظ بوم‌شناختی و زیستی نیز بسیار حائز اهمیت هستند (۷-۹). سرب (Pb)، روی (Zn)، کادمیم (Cd)، کبالت (Co)، کروم (Cr)، مس (Cu)، منگنز (Mn) و نیکل (Ni)، به‌عنوان اجزای تشکیل‌دهنده پوسته زمین، رایج‌ترین آلاینده‌های فلزی مربوط به ترافیک محسوب می‌شوند (۶، ۱۰). روی، کبالت، کروم، مس، منگنز و نیکل به‌عنوان عناصر ضروری شناخته می‌شوند که قرار گرفتن در معرض غلظت‌های بیش‌تر از حد مجاز آن‌ها می‌تواند خطر ابتلاء به پیش‌دیابت، دیابت، بیماری‌های قلبی - عروقی، تصلب شرایین و انواع سرطان را افزایش دهد. از طرفی، سرب و کادمیم به‌عنوان عناصر غیرضروری، نوروکسین‌های قدرتمندی هستند که قرار گرفتن انسان در معرض آن‌ها، حتی در

مقادیر بسیار کم، می‌تواند منجر به بیماری آلزایمر، ناهنجاری‌های کروموزومی، سرطان، آسیب و اختلال عملکرد طحال و کبد شود (۱۱-۱۸).

اگرچه آلاینده‌های فلزی به‌واسطه فرآیندهای طبیعی نیز در زیست‌سپهر انتشار می‌یابند، اما حمل‌ونقل جاده‌ای، به‌عنوان دومین منبع غیرنقطه‌ای انسان‌پدید آلودگی فلزات سنگین، بوم‌سازگان کنار جاده‌ای را به مناطق حساس فلزی تبدیل کرده است (۱۹، ۲۰). انتشار آلاینده‌های فلزی حاصل از ترافیک جاده‌ها تحت تأثیر شرایط محیطی یعنی شرایط آب‌وهوایی از جمله میزان بارندگی و دما، ترافیک شامل حجم ترافیک و سرعت وسایل نقلیه و طول عمر، شیب و نوع پوشش سطح جاده بوده و این آلاینده‌ها عمدتاً از طریق فرورنشست‌های جوی مرطوب و خشک، گردوغبار، انتشار گاز و آبشویی در محیط‌های کنار جاده توزیع و منجر به آلودگی فلزات سنگین در محیط حاشیه جاده (هواسپهر، آب و خاک) می‌شوند (۶، ۲۱، ۲۲). در این خصوص، 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 این که عملکردی مهم در انتقال عناصر دارد، رابطه اجزای غیرزنده و زنده را حمایت و تولید غذا را حفظ می‌کند (۳، ۲۳-۲۷). 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 هوا (از طریق تعلیق مجدد ذرات خاک) نیز منجر شده و به‌طور غیرمستقیم (از طریق زنجیر غذایی) و یا به‌طور مستقیم (از طریق استنشاق، بلع و تماس پوستی) سلامت انسان را نیز تهدید کند (۲۸-۳۰). 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. از سوی دیگر، برای درک، تجزیه و تحلیل، کنترل و مدیریت آلودگی ناشی از فلزات سنگین، شناسایی منابع عناصر فلزی در خاک ضروری است (۳، ۲۰، ۳۱-۳۴).

علی‌رغم آن‌که در دهه‌های اخیر مطالعات متعددی در خصوص تعیین غلظت، ارزیابی آلودگی و شناسایی منبع فلزات سنگین در خاک کنار جاده انجام شده است؛ با این حال، تعداد پژوهش‌های مشابه انجام یافته در ایران اندک است. محمدی و همکاران با بررسی الگوی پراکنش فلزات سنگین در خاک‌های سطحی کنار جاده‌ای در اطراف آزادراه رشت- قزوین گزارش کردند که تغییرات عبور و مرور خودروها، از عوامل مهم و تأثیرگذار بر تجمع غلظت فلزات سنگین در خاک‌های سطحی کنار جاده‌ای منطقه مورد مطالعه بوده است. از طرفی، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آزمون مؤلفه‌های اصلی نشان داد که منابع انتشار عناصر کبالت، کروم، مس و نیکل یکسان و ناشی از فرسودگی و خوردگی قطعات آبکاری شده بدنه خودروها، فرسایش تایرها و لنت ترمز و نشت روغن‌های روان‌کننده بوده؛ در حالی که پارگی و ساییدگی رزین تایرها، فرسودگی حفاظ کنار جاده‌ها و تابلوهای راهنمایی و رانندگی، بنزین سرب‌دار و وزنه‌های سربی بالانس چرخ خودروها، منشأ انتشار روی و سرب معرفی شد (۳۵). قنواتی و همکاران نیز در ارزیابی خطر بوم‌شناختی و بهداشتی برخی فلزات سنگین در خاک کنار جاده‌ای شهر اهواز، با استناد به نتایج آزمون همبستگی پیرسون که بیان‌گر وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین میانگین غلظت تجمع یافته عناصر روی و سرب و نیکل در نمونه‌های خاک بود، منابع ورود این عناصر به خاک پیرامون جاده را مشترک و احتمالاً با فعالیت‌های ترافیکی (انتشارات آگزوزی و غیر آگزوزی) مرتبط دانستند (۳۶).

بنابراین، با توجه به نگرانی‌ها و مخاطرات محیط‌زیستی و بهداشتی مترتب با آلاینده‌های فلزی در خاک و اهمیت و ضرورت ارزیابی آلودگی و منشأیابی عناصر بالقوه سمی از یک‌سو و از طرفی، نظر به این‌که مطالعات بسیار معدودی در خصوص ارزیابی آلودگی و منشأیابی فلزات سنگین در امتداد جاده‌های اصلی ایران

انجام گرفته است و داده‌های پایه در این خصوص در دسترس نیست؛ مطالعه حاضر با هدف ارزیابی آلودگی و منشأیابی عناصر روی، سرب، کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز و نیکل در خاک سطحی حاشیه برخی جاده‌های همدان در سال ۱۳۹۸ انجام گرفت.

روش کار

معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر همدان با ارتفاع حدود ۱۸۵۰ متر از سطح دریا بین عرض جغرافیایی سی و چهار درجه و چهل و هشت دقیقه شمالی و طول جغرافیایی چهل و هشت درجه و سی و یک دقیقه شرقی در غرب ایران واقع شده است. میانگین دمای سالانه و بارندگی آن به ترتیب ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد و ۳۱۸ میلی‌متر برآورد شده است. این کلان‌شهر با ۲۸۳۱ کیلومترمربع وسعت و ۶۵۱۸۲۷ نفر جمعیت، اولین قطب جمعیتی استان همدان محسوب می‌شود. از طرفی، توسعه و گسترش فزاینده زیرساخت‌ها و شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای و وجود راه‌های ارتباطی مهم در این کلان‌شهر، همدان را به نقطه تأکیدگاهی ثقل ارتباطات جاده‌ای غرب کشور تبدیل نموده است که می‌تواند به آلودگی فلزات سنگین زیست‌بوم کنار جاده‌ای منجر شود (۲۲، ۳۷).

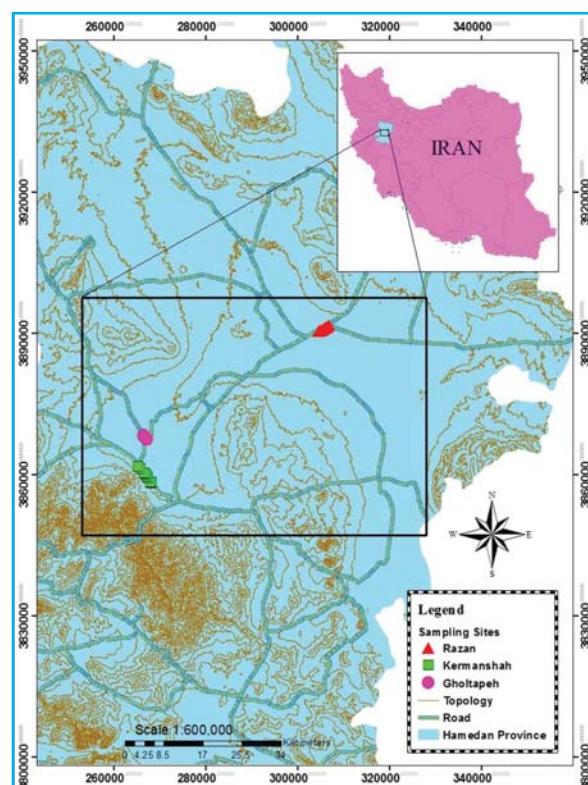
نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش توصیفی-مقطعی، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به منابع مالی در اختیار، سه جاده مواصلاتی گلپه، رزن و کرمانشاه از قدیمی‌ترین قطعات شبکه ارتباطات جاده‌ای استان همدان و با میانگین حجم تردد روزانه به ترتیب برابر با ۲۱۴۷، ۷۱۲۱ و ۱۴۷۹۹ وسیله نقلیه، به‌عنوان ایستگاه‌های نمونه‌برداری انتخاب شدند. سپس، با استفاده از فرمول تعیین حجم نمونه کوکران، در مجموع ۶۳ نمونه خاک سطحی از عمق ۰-۱۵ 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 و در اواخر خرداد ماه برداشت شد (۲۲).

به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های pH متر (Jenway. UK، ۳۵۲۰) و EC متر (Jenway. UK، ۴۵۲۰) اندازه‌گیری شد (۳۹). کربن آلی (OC)^۲ نمونه‌های خاک نیز به روش والکلی و بلک تعیین شد (۴۰). به منظور تعیین محتوی فلزات سنگین در نمونه‌های مورد مطالعه، به ۱ گرم از هر نمونه خاک، ۵ 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 و سرد شدند. در گام بعد، طی دو مرحله متوالی هر بار ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ مرک را به نمونه‌ها افزوده و محلول حاصل به مدت ۳۰ دقیقه مجدداً رفلاکس و روی هیتر با دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. پس از آن، ۲ میلی‌لیتر آب مقطر و ۳ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰٪ مرک به محلول افزوده و محتویات به مدت ۲-۵ 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 رفلاکس، عصاره حاصل با کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و محلول‌ها با آب دوبار تقطیر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شدند (۷). در نهایت، پس از ساخت محلول مادر^۳ و استاندارد نمک عناصر و واسنجی (تنظیم کردن) دستگاه طیف‌سنجی نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES)^۴ مدل 710-ES ساخت شرکت واریان^۵ استرالیا، محتوی عناصر روی، سرب، کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز و نیکل به ترتیب در طول موج‌های ۲۰۶/۲۰۰، ۲۲۰/۳۵۳، ۲۲۶/۵۰۲، ۲۲۸/۶۱۵، ۲۶۷/۷۱۶، ۳۲۴/۷۵۴ و ۲۵۷/۶۱۰ نانومتر خوانده شد. تضمین و کنترل کیفیت^۶ اندازه‌گیری‌ها با استفاده از مرجع استاندارد خاک RTC، SQC-014 خریداری شده از شرکت سیگما-آلدریج اسپانیا انجام شد. بر این اساس، مقادیر حد تشخیص برای عناصر روی، سرب، کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز و نیکل به ترتیب برابر

2. Organic Carbon
3. Stock
4. Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer
5. Varian
6. Quality Assurance/Quality Control (QA/QC)

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 توسط دستگاه GPS گارمین مدل 32X ETRE ثبت شد که موقعیت استقرار آن‌ها در شکل ۱ آورده شده است (۴).



شکل ۱. موقعیت استقرار ایستگاه‌های نمونه‌برداری

تعیین برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک 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 ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. درصد ذرات معدنی اولیه خاک (شن، سیلت و رس) خاک بر پایه قانون استوکس (جداسازی ذرات بر اساس چگالی) و به روش هیدرومتری تعیین شد (۳۸). pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC)^۱ نمونه‌های خاک در عصاره گل اشباع (۱:۵ آب به خاک)

1. Electrical Conductivity

و "خاک با شدت آلودگی بسیار کم"، در محدوده ۱/۵-۱/۰ بیان‌گر "خاک با شدت آلودگی کم" و در محدوده ۲/۰-۱/۵ نیز نشان‌دهنده "خاک با شدت آلودگی کم تا متوسط" هستند. این در حالی است که مقادیر شاخص شدت آلودگی بین ۲/۵-۲/۰ "خاک با شدت آلودگی متوسط" را توصیف می‌کند. از طرفی، مقادیر شاخص شدت آلودگی در محدوده ۳/۰-۲/۵ و ۳/۰-۴/۰ به ترتیب نشان‌دهنده «خاک با شدت آلودگی متوسط تا زیاد» و «خاک با شدت آلودگی زیاد» هستند. به علاوه، مقادیر شاخص شدت آلودگی در محدوده ۵/۰-۴/۰ «خاک با شدت آلودگی بسیار زیاد» و مقادیر بزرگ‌تر از ۵/۰ نیز "خاک با شدت آلودگی فوق‌العاده زیاد" را توصیف می‌کنند.

پردازش آماری داده‌ها

پردازش آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، ورژن ۲۰ در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام گرفت؛ بدین‌صورت که نرمال بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس‌ها به ترتیب توسط آزمون‌های کلموگروف-اسمیرنوف^۶ و لوین^۷ بررسی شدند. به منظور مقایسه میانگین غلظت عناصر در نمونه‌های خاک بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری از آزمون تحلیل واریانس بین آزمودنی یک‌طرفه^۸ و سپس آزمون تعقیبی چند دامنه‌ای دانکن^۹ و برای تعیین همبستگی بین میانگین محتوی عناصر با برخی ویژگی‌های خاک از آزمون همبستگی پیرسون (PCC)^{۱۰} استفاده شد. برای شناسایی رابطه بین عناصر در نمونه‌های خاک کنار جاده و منابع بالقوه احتمالی آن‌ها از روش آماری تحلیل چندمتغیره^{۱۱} شامل همبستگی پیرسون، تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA)^{۱۲} استفاده شد.

با ۰/۰۷۶، ۰/۰۱۷، ۰/۰۲۳، ۰/۱۴۱، ۰/۱۲۹، ۰/۲۳۲، ۰/۰۹۳ و ۰/۰۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. مقادیر محدودیت کمی عناصر (میلی‌گرم در کیلوگرم) نیز برای روی، سرب، کادمیم، کبالت، کروم، مس، منگنز و نیکل به ترتیب برابر با ۰/۲۲۶، ۰/۰۵۱، ۰/۰۷۳، ۰/۴۲۲، ۰/۳۸۵، ۰/۶۹۳، ۰/۲۷۹ و ۰/۲۷۷ به دست آمد. نتایج حاصل از درصد بازیابی عناصر مورد مطالعه (بین ۹۳/۶-۱۰۱٪) نیز نشان داد که روش مورد استفاده برای تعیین فلزات سنگین مورد مطالعه از اطمینان کافی و دقت مناسب برخوردار بوده است.

ارزیابی آلودگی

در این پژوهش، به منظور ارزیابی آلودگی فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه خاک‌های حاشیه جاده و همچنین تعیین حد سمیت زیاد که سبب ایجاد اثرات نامطلوب در محیط خاک می‌شود، شاخص شدت آلودگی (CSI) با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد (۴۱):

$$CSI = \sum_{i=1}^n W_i \left[\left(\frac{C_i}{ERL_i} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{C_i}{ERM_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$W_i = \frac{Lf_i \times Ev}{\sum_{i=1}^n (Lf_i \times Ev)} \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲، C_i بیان‌گر غلظت هر عنصر برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم، ERL_i^2 و ERM_i^2 نیز به ترتیب بیان‌گر محدوده اثرات کم عناصر برابر با ۱۵۰، ۴۶/۷، ۱/۲۰، ۸۱/۰، ۳۴/۰ و ۲۰/۹ به ترتیب برای عناصر روی، سرب، کادمیم، کروم، مس و نیکل و محدوده اثرات میانه عناصر برابر با ۴۱۰، ۲۱۸، ۹/۶۰، ۳۷۰، ۲۷۰ و ۵۱/۶ به ترتیب برای همین عناصر، W_i نشان‌دهنده وزن محاسبه شده هر عنصر و Lf_i و Ev نیز به ترتیب بار عاملی هر عنصر و مقدار ویژه^۴ حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۵ است. مقادیر شاخص شدت آلودگی کوچک‌تر از ۰/۵۰ و در محدوده ۱-۰/۵۰ به ترتیب نشان‌دهنده «خاک غیرآلوده»

6. Kolmogorov-Smirnov

7. Leven

8. One-Way ANOVA

9. Duncan Multiple Range Test

10. Pearson Correlation Coefficient

11. Multivariate analysis

12. Hierarchical Cluster Analysis

1. Contamination Severity Index

2. Effect Range Low

3. Effect Range Median

4. Eigenvalue

5. Principal Component Analysis

یافته‌ها

آمار توصیفی مربوط به تعیین مقادیر فلزات سنگین و

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

آمار توصیفی مربوط به محتوی عناصر مورد ارزیابی و ویژگی‌های مهم فیزیکوشیمیایی نمونه‌های خاک به تفکیک ایستگاه نمونه‌برداری در جدول ۱ آورده شده است. با استناد به نتایج، بیشینه میانگین محتوی عناصر روی، کادمیم، کبالت، کروم، منگنز و نیکل به ترتیب با ۱۲۲، ۰/۳۲۰، ۱/۹۲، ۱۷/۳، ۳۳۴ و ۲۲/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به ایستگاه رزن و بیشینه میانگین محتوی عناصر سرب و مس به ترتیب با ۲۶/۴ و ۲۵/۰

میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه بود. از طرفی، میانگین محتوی عناصر در نمونه‌ها از روند نزولی منگنز < روی < مس < نیکل < سرب < کروم < کبالت < کادمیم تبعیت کرد. از طرفی، مقادیر pH خاک سطحی در دامنه ۸/۰۳ تا ۸/۷۲ متغیر و نشان‌دهنده خاصیت قلیایی خاک در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه بود. محتوی ماده آلی خاک (درصد) نیز در محدوده ۱/۱۱ تا ۱/۸۶ متغیر بود. همچنین، بر اساس ترکیب دانه‌سنجی، نمونه‌های خاک در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه با غلبه ذرات رس در رده خاک ریزدانه با بافت رسی قرار داشتند.

جدول ۱. آمار توصیفی محتوی عناصر مورد مطالعه و برخی پارامترهای فیزیکوشیمیایی در نمونه‌های خاک سطحی حاشیه جاده

ایستگاه	عنصر / پارامتر										
	روی	سرب	کادمیم	کبالت	کروم	مس	منگنز	نیکل	pH	ماده آلی (%)	طبقه بافت خاک
گلپه	۳۷/۷a	۳/۲۲a	۰/۱۸۰a	۱/۲۸a	۱۲/۰a	۱۲/۸a	۲۱۷a	۱۵/۹a	۸/۲۹a	۱/۵۳b	رسی
رزن	۱۲۲c	۱۵/۴b	۰/۳۲۰c	۱/۹۲c	۱۷/۳c	۱۸/۵b	۳۳۴c	۲۲/۲c	۸/۶۳a	۱/۷۴b	رسی
کرمانشاه	۸۶/۷b	۲۶/۴c	۰/۲۹۰b	۱/۵۵bc	۱۵/۶b	۲۵/۰c	۲۲۶b	۱۶/۶b	۸/۴۵a	۱/۲۳a	رسی
کمین	۳۶/۳	۳/۰۳	۰/۱۶۰	۰/۹۵۰	۱۰/۰۳	۱۲/۲	۲۱۲	۱۵/۸	۸/۰۳	۱/۱۱	-
بیشینه	۱۲۵	۲۶/۶	۰/۴۳۰	۲/۰۶	۲۰/۱۰	۲۵/۵	۳۴۱	۲۲/۴	۸/۷۲	۱/۸۶	-
میانگین	۶۲/۳	۱۵/۱	۰/۲۶۰	۱/۵۸	۱۵/۰	۱۸/۷	۲۵۹	۱۸/۲	۸/۴۶	۱/۵۰	رسی
انحراف معیار	۲۷/۹	۱۰/۰	۰/۰۶۰	۰/۳۴۰	۰/۷۸۰	۵/۳۳	۵۶/۷	۳/۰۲	۰/۱۹	۰/۱۴	-
ضریب تغییرات (%)	۴۴/۹	۶۷/۰	۲۳/۴	۲۱/۵	۵/۲۱	۲۸/۴	۲۱/۹	۱۶/۶	۰/۰۲	۰/۰۹	-

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

قابل توجه از فعالیت‌های انسانی بود. در همین حال، درصد ضریب تغییرات عناصر روی، کادمیم، کبالت، مس و منگنز در دامنه تغییرپذیری متوسط و سرب در دامنه تغییرات زیاد و منعکس‌کننده توزیع ناهمگون آن‌ها در محیط به سبب فعالیت‌های انسانی به‌ویژه ترافیک بود. 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 به ترتیب مربوط به عناصر منگنز، روی و سرب بود (جدول ۱).

ضریب تغییرات (CV)²، میزان نسبی تغییرپذیری بار آلاینده‌ها در محیط‌زیست را نشان داده و در صورتی که کم‌تر از ۲۰ باشد، بیان‌گر «تغییرپذیری کم»، در محدوده ۲۰-۵۰ نشان‌دهنده «تغییرپذیری متوسط»، در محدوده ۵۰-۱۰۰ نشان‌دهنده «تغییرپذیری زیاد» و بیش‌تر از ۱۰۰ بیان‌گر «تغییرپذیری خیلی زیاد» است (۴۲). بر اساس نتایج، مقادیر ضریب تغییرات برای عناصر کروم و نیکل در محدوده تغییرات کم و بیان‌گر توزیع همگن این عناصر در ایستگاه‌های نمونه‌برداری بدون اثرپذیری

1. Granulometr

2. Coefficient of Variation

نتایج ارزیابی همبستگی بین محتوی عناصر در نمونه‌های خاک با حجم ترافیک و برخی ویژگی‌های خاک

ضریب (I) به ترتیب برابر با ۰/۴۸۳، ۰/۹۹۰ و ۰/۹۹۰، درصد ماده آلی با عناصر منگنز و نیکل با I به ترتیب برابر با ۰/۶۹۰ و ۰/۷۹۰ و درصد سیلت با عناصر روی، کروم، منگنز و نیکل با I به ترتیب برابر با ۰/۶۹۰، ۰/۸۶۰، ۰/۹۴۰ و ۰/۹۶۰ مثبت (مستقیم) و معنی‌دار بود. در حالی که همبستگی بین درصد شن با عناصر روی، کادمیم، کبالت، کروم و منگنز با I به ترتیب برابر با ۰/۷۹۰، ۰/۶۳۰، ۰/۷۲۰، ۰/۹۰۰ و ۰/۹۷۰ منفی (معکوس) و معنی‌دار بود.

نتایج ارزیابی همبستگی بین محتوی عناصر در نمونه‌های خاک حاشیه جاده‌های مورد مطالعه با حجم ترافیک و برخی ویژگی‌های خاک (جدول ۲) نشان داد که محتوی عناصر در نمونه‌های خاک به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تراکم ترافیک بوده است ($p < 0/05$). از طرفی، مقدار ماده آلی، شن و سیلت نیز به‌طور قابل توجهی محتوی عناصر را تحت تأثیر قرار داد ($p < 0/05$). همبستگی بین حجم ترافیک با عناصر روی، سرب و مس با

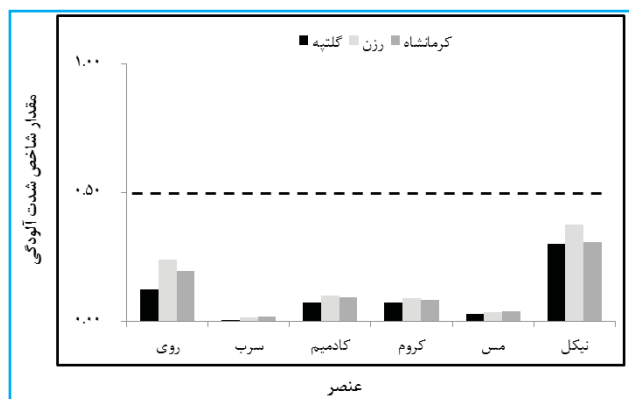
جدول ۲. ماتریس همبستگی بین اثر حجم ترافیک و برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک با محتوی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک

عوامل مورد ارزیابی	عناصر						
	روی	سرب	کادمیم	کبالت	کروم	مس	منگنز
حجم ترافیک	۰/۴۸۳*	۰/۹۹۰**	۰/۶۶۰	-۰/۳۷۰	۰/۹۷۰	۰/۹۹۰**	۰/۰۶۰
pH	۰/۳۴۰	۰/۳۹۰	۰/۱۵۷	-۰/۴۶۳	-۰/۱۴۴	-۰/۴۸۰	۰/۳۴۰
ماده آلی	۰/۳۰۰	-۰/۴۷۰	۰/۰۸۰	-۰/۱۴۰	۰/۶۶۰	-۰/۴۹۰	۰/۶۹۰*
شن	-۰/۷۹۰*	-۰/۰۲۰	-۰/۶۳۰*	-۰/۷۲۰**	-۰/۹۰۰**	۰/۰۵۰	-۰/۹۷۰**
سیلت	۰/۶۹۰*	-۰/۱۳۰	۰/۵۲۰	-۰/۵۳۰	۰/۸۶۰**	-۰/۱۹۰	۰/۹۴۰**
رس	۰/۱۹۰	۰/۱۹۰	۰/۱۹۰	۰/۳۹۰	۰/۱۶۰	۰/۱۹۰	۰/۱۵۰

** و * به ترتیب معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ و ۰/۰۵ را نمایش می‌دهند.

نتایج ارزیابی آلودگی خاک

بسیار کم خاک به این عناصر بود.



نمودار ۱. مقادیر شاخص شدت آلودگی عناصر روی، سرب، کادمیم، کروم، مس و نیکل در نمونه‌های خاک به تفکیک ایستگاه نمونه‌برداری

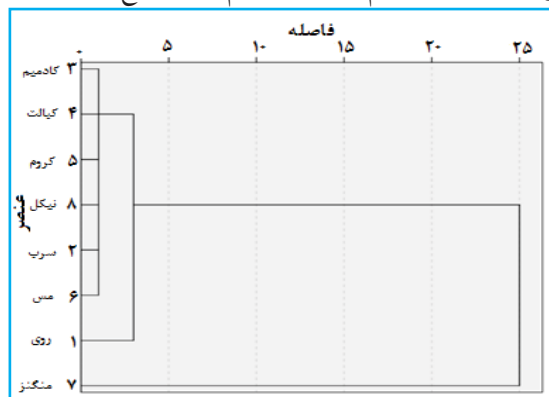
نتایج محاسبه شاخص شدت آلودگی عناصر مورد مطالعه در نمونه‌های خاک در نمودار ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل عدم وجود محتوای محدوده اثرات کم و محدوده اثرات میانه برای عناصر کبالت و منگنز، شاخص شدت آلودگی برای این فلزات محاسبه نشد. با استناد به نتایج، مقادیر شاخص شدت آلودگی محاسبه شده برای عناصر روی، سرب، کادمیم، کروم، مس و نیکل در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری، کوچک‌تر از ۰/۵۰ و بیانگر عدم آلودگی خاک به این عناصر بود. از طرفی، مقادیر شاخص شدت آلودگی جمعیتی مرتبط با همه فلزات مورد ارزیابی در ایستگاه‌های گلتهپه، رزن و کرمانشاه به ترتیب برابر با ۰/۶۰۶، ۰/۸۵۴ و ۰/۷۴۱ و همگی کوچک‌تر از ۱ و بیانگر شدت آلودگی

اختصاص داد.

جدول ۳. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای فلزات سنگین در خاک‌های کنار جاده سه بزرگراه مورد مطالعه

عناصر	ماتریس عاملی چرخیده شده		
	مؤلفه اول (PC1)	مؤلفه دوم (PC2)	مؤلفه سوم (PC3)
روی	۰/۷۷۰	۰/۶۴۰	۰/۰۸۰
سرب	۰/۰۸۰	۰/۹۹۰	۰/۰۳۰
کادمیم	۰/۶۱۰	۰/۷۷۰	۰/۱۸۰
کبالت	-۰/۳۸۰	۰/۱۲۰	۰/۹۹۰
کروم	۰/۶۱۰	۰/۴۴۰	۰/۶۰۰
مس	۰/۱۳۰	۰/۹۳۰	۰/۳۴۰
منگنز	۰/۹۸۰	۰/۱۷۰	-۰/۰۲۰
نیکل	۰/۹۹۰	۰/۰۴۰	۰/۰۸۰
مقدار ویژه	۵/۱۷	۱/۷۰	۱/۰۹
درصد واریانس	۴۱/۳	۳۸/۶	۱۹/۶
درصد تجمعی	۴۱/۳	۷۹/۹	۹۹/۵

نتایج حاصل از آزمون تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، بر اساس روش وارد^۱ و فاصله اقلیدسی^۲، در نمودار ۲ نشان داده شده است. بر این اساس، دو خوشه به دست آمد. فلزات در اولین خوشه شامل کادمیم، کبالت، کروم، نیکل، سرب، مس و روی بودند. خوشه دوم فقط منگنز را شامل می‌شد. ارتباط نزدیک فلزات در هر خوشه نشان می‌دهد که آن‌ها دارای منابع مشابه هستند، در حالی که فاصله زیاد بین فلزات در دندروگرام نشان‌دهنده عدم تشابه منابع است.



نمودار ۲. دندروگرام تحلیل خوشه‌ای محتوی فلزات سنگین در خاک‌های کنار جاده

نتایج منشأیابی فلزات سنگین

نتایج روش آماری تحلیل چندمتغیره برای شناسایی و تعیین منشأ احتمالی فلزات سنگین در خاک‌های کنار جاده در جدول ۳ و نمودار ۲ آورده شده است. ماتریس همبستگی پیرسون دومتغیره نشان داد که روی به طور معنی‌دار و مثبت با کادمیم ($r=0/960$, $p<0/01$)، کروم ($r=0/860$, $p<0/01$)، منگنز ($r=0/910$, $p<0/01$)، نیکل و نیکل ($r=0/750$, $p<0/05$) همبستگی داشت. سرب همبستگی مثبت و معنی‌داری را با کادمیم ($r=0/780$, $p<0/05$) و مس ($r=0/990$, $p<0/05$) نشان داد. علاوه بر این، کادمیم همبستگی مثبت و معنی‌دار با کروم ($r=0/790$, $p<0/05$)، مس ($r=0/730$, $p<0/05$) و منگنز ($r=0/690$, $p<0/05$) داشت. کروم نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار با منگنز ($r=0/970$, $p<0/01$) و نیکل ($r=0/930$, $p<0/01$) نشان داد. منگنز و نیکل نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری با هم داشتند ($r=0/980$, $p<0/01$). همبستگی مثبت معنی‌دار و قوی بین این فلزات به وضوح نشان می‌دهد که این عناصر از منابع مشترک و مشابه نشأت گرفته‌اند.

در این پژوهش، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی به عنوان رویکردی برای کاهش مجموعه‌ای از داده‌های خام به تعدادی از مؤلفه‌های اصلی برای بررسی ارتباط بین متغیرها و تعیین منشأ فلزات مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی شامل مؤلفه‌ها (بارهای عاملی) و مقادیر ویژه، در جدول ۳ به طور خلاصه آورده شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل، سه مؤلفه اصلی شناسایی شدند که سهم تجمعی آن‌ها ۹۹/۵٪ از کل واریانس‌ها بود.

اولین مؤلفه اصلی (PC1)، ۴۱/۳٪ از کل واریانس را با بارهای مثبت معنی‌دار عناصر نیکل (۰/۹۹۰)، منگنز (۰/۹۸۰)، روی (۰/۷۷۰) و کروم (۰/۶۱۰) به خود اختصاص داد. دومین مؤلفه (PC2)، ۳۸/۶٪ از کل تنوع را به خود اختصاص داد و به طور مثبت و معنی‌داری با سرب (۰/۹۹۰)، مس (۰/۹۳۰) و کادمیم (۰/۷۷۰) مرتبط بود. مؤلفه سوم (PC3) نیز ۱۹/۶٪ از کل واریانس را با بار مثبت و معنی‌دار عنصر کبالت (۰/۹۹۰) به خود

1. Ward
2. Euclidean distance

نتایج پردازش آماری داده‌ها

نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف بیان‌گر آن بود که داده‌های مربوط به مقادیر ماده آلی، درصد ذرات معدنی اولیه و محتوی همه عناصر در نمونه‌های خاک از توزیع نرمال برخوردار بودند. نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه نیز نشان داد که بین ایستگاه‌های گلتپه، رزن و کرمانشاه از حیث میانگین محتوی ماده آلی، شن، سیلت و عناصر روی، سرب، کادمیوم، کبالت، کروم، مس، منگنز و نیکل در نمونه‌های خاک اختلاف آماری معنی‌دار ($P < 0/05$) وجود داشت.

بحث

pH از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی خاک است که بر ظرفیت تبادل کاتیونی، فراهمی زیستی مواد مغذی و ساختار خاک تأثیرگذار است. در مطالعه حاضر، مقادیر pH خاک سطحی در دامنه ۸/۰۳ تا ۸/۷۲ متغیر و بیان‌گر خاصیت قلیایی خاک در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه بود. خاک قلیایی در حاشیه جاده را می‌توان با فعالیت‌های ترافیکی به‌ویژه ساییدگی سطح جاده مرتبط دانست که با نتایج مطالعات کوچر و همکاران و ورکننتین و همکاران مطابقت داشت (۴۳، ۴۴). همچنین، رادمسکا و فروزنسکی (۴۵) با ارزیابی آلودگی خاک حاشیه بزرگراه‌های لهستان و همچنین، اسکرینتسکا و همکاران (۴۶) در بررسی آلودگی محیط‌زیستی منطقه شهری جنوب لهستان گزارش کردند که ترافیک می‌تواند منجر به افزایش مقادیر pH در خاک مجاور جاده شود. از طرفی، برناردیو و همکاران نیز با ارزیابی آلودگی خاک کنار جاده‌ای ریودوژانیروی برزیل اظهار داشتند که انتقال ذرات سایشی از سطح جاده به خاک حاشیه جاده می‌تواند در طول زمان منجر به افزایش سطوح pH خاک و تغییر آن به سمت مقادیر خنثی یا حتی قلیایی شود (۴۷). از سوی دیگر، ثابت شده است که تحرک (انحلال‌پذیری، انتقال و فراهمی زیستی) فلزات در محیط خاک به شدت تحت تأثیر pH است (۷، ۴۸). در حالی که سطح pH قلیایی خاک باعث افزایش احتباس فلز می‌شود، pH اسیدی

تأثیر مثبتی بر تحرک عنصر دارد. بر اساس مطالعات انجام شده، اکثر فلزات سنگین در خاک دارای سطح pH زیاد (حدود ۶-۹) نامحلول، بدون تحرک و غیرقابل دسترس هستند (۴۳، ۴۹، ۵۰). بنابراین، تمام خاک‌های کنار جاده‌ای مورد مطالعه با میانگین مقدار pH برابر با ۸/۴۶ می‌توانند باعث عدم تحرک و کاهش قابلیت دسترسی زیستی فلز و در نهایت سبب انباشت عناصر و آلودگی بیش‌تر خاک شوند.

مواد آلی به سبب اثرات سازنده بر خصوصیات فیزیکی (افزایش پایداری خاکدانه‌ها)، شیمیایی (افزایش ظرفیت نگهداری عنصری) و زیستی (افزایش زیست توده میکروبی) خاک، نقش مهمی در سلامت و کیفیت خاک دارند (۵۱، ۵۲). بر اساس نتایج سنجش ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک (جدول ۱)، بیشینه محتوای ماده آلی با ۱/۷۴٪ مربوط به نمونه خاک جمع‌آوری شده از ایستگاه رزن بود. از طرفی، محتوای مواد آلی در نمونه خاک‌های ایستگاه گلتپه و رزن به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ایستگاه کرمانشاه بود. هرچند، محتوای بیش‌تر ماده آلی در ایستگاه‌های گلتپه و رزن می‌تواند با دلایل مختلفی مرتبط باشد، اما منبع اصلی و اولیه، پوشش گیاهی قابل توجه و تجزیه مواد گیاهی در ایستگاه‌های مذکور است که توانسته مقداری کربن آلی به خاک اضافه کند. در تحقیقات مشابه، خالقی و همکاران نیز وجود مقادیر قابل توجه مواد آلی در حاشیه بزرگراه اراک-قم را با وجود مواد گیاهی و به‌ویژه خار و خاشاک مرتبط دانستند (۵۳).

مطالعات انجام شده حاکی از آن است که بافت خاک بر سرنوشت آلاینده‌ها در خاک تأثیرگذار است (۳۸، ۵۴). در مطالعه حاضر بر اساس نتایج حاصل از تعیین درصد ذرات معدنی اولیه خاک (درصد شن، سیلت و رس)، بیشینه مقدار شن با ۴۰٪ مربوط به نمونه خاک‌های برداشت شده از ایستگاه‌های گلتپه و کرمانشاه و بیشینه میانگین مقادیر سیلت و رس به ترتیب با ۳۵٪ و ۵۵٪ مربوط به خاک حاشیه جاده رزن و کرمانشاه بود. از طرفی، بافت خاک با غلبه ذرات رس در همه ایستگاه‌ها در رده بافت رسی بود. خاک‌هایی با چنین بافتی به سبب وجود منافذ بیش‌تر و ذرات

واکنش پذیری بیش تر ذرات ریز خاک که به تسریع تجمع و انباشت فلزات در آن‌ها منجر می‌شود، مرتبط دانست (۵۹). از سوی دیگر، ضرایب همبستگی منفی و معنی‌دار بین شن با روی، کادمیم، کبالت، کروم و منگنز (به ترتیب با ضریب برابر با $0/790$ ، $0/630$ ، $0/720$ ، $0/900$ و $0/970$) و همچنین روابط مثبت و معنی‌دار بین درصد سیلت با عناصر روی، کروم، منگنز و نیکل (به ترتیب با ضریب برابر با $0/690$ ، $0/860$ ، $0/940$ و $0/960$) و درصد ماده آلی با عناصر منگنز و نیکل (به ترتیب با ضریب برابر با $0/690$ و $0/790$) بیان‌گر تأثیرگذاری اندازه ذرات و محتوی ماده آلی خاک بر غلظت فلزات سنگین خاک بود. در این خصوص می‌توان ادعان داشت که وجود مقادیر قابل توجه شن در خاک می‌تواند به ایجاد منافذ بزرگ در بافت خاک و به تبع آن افزایش قابلیت آبخویی و تحرک فلزات سنگین در خاک منجر شود که کاهش محتوی فلزات سنگین در لایه‌های سطحی خاک را به دنبال خواهد داشت. از این رو، حرکت فلزات سنگین در خاک‌های واجد منافذ بزرگ را می‌توان با حرکت رسوبات کلوئیدی، ذرات رس و مواد آلی در محلول خاک و انتقال فلزات سنگین متصل به این ذرات مرتبط دانست (۶۰). افزون بر این، همبستگی مثبت بین درصد سیلت و محتوی ماده آلی با محتوی عناصر را می‌توان با سطوح ویژه بسیار بالا و همچنین بار الکتریکی منفی این ذرات (افزایش مکان‌های جذب) که به افزایش تثبیت کاتیون‌های فلزی و به تبع آن کاهش تحرک و آبخویی و همچنین افزایش غلظت آن‌ها در لایه سطحی خاک منجر می‌شود (۶۱)، مرتبط دانست. لذا، میانگین تقریبی سیلت (17%) در نمونه‌های خاک سطحی می‌تواند تا حدود زیادی توجیه‌کننده همبستگی مثبت بین درصد سیلت و میانگین مقادیر عناصر مورد مطالعه باشد.

ضریب تغییرات به‌عنوان ابزاری کمی برای بیان تأثیر عوامل خارجی (به‌ویژه انسانی) بر محتوی فلزات سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد (۴۲). در بررسی درصد تغییرات محتوی فلزات سنگین در نمونه‌های خاک کنار جاده‌ای، بیش‌ترین میزان تغییرپذیری به ترتیب مربوط به عناصر سرب (67%)، روی ($44/9\%$) و مس

باردار خاک رس شرایط تثبیت فلزات را فراهم می‌کنند (۹، ۵۵). خاک به‌عنوان منبع و مخزن فلزات سنگین، شاخص مناسب و مفیدی برای سنجش آلودگی آلاینده‌های فلزی در بوم‌سازگان به‌شمار می‌آید. با استناد به نتایج سنجش محتوی عناصر، بیشینه میانگین محتوی عناصر روی، کادمیم، کبالت، کروم، منگنز و نیکل به ترتیب با 122 ، $0/320$ ، $1/92$ ، $17/3$ ، 334 و $22/2$ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به ایستگاه رزن (تراکم ترافیک متوسط) و بیشینه میانگین محتوی عناصر سرب و مس به ترتیب با $26/4$ و $25/0$ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به خاک حاشیه جاده کرمانشاه (تراکم ترافیک زیاد) و به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ایستگاه گلته‌په بود ($p < 0/050$). در این خصوص، بیشینه میانگین محتوی عناصر در ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه را می‌توان با تراکم ترافیک بیش‌تر مرتبط دانست. ضرایب همبستگی مثبت بین فلزات (به‌ویژه روی، سرب و مس) و تراکم ترافیک نیز مؤید این مطلب بود (جدول ۲). در تحقیقات مشابه بونانو، گالا و شهاتا، خالد و همکاران و لیو و همکاران نیز بیشینه محتوی عناصر را در امتداد جاده‌هایی با تراکم زیاد ترافیک گزارش کردند (۱۹، ۳۳، ۵۶، ۵۷). از سوی دیگر، غلظت عناصر روی، کادمیم، کبالت، کروم، منگنز و نیکل در ایستگاه رزن (تراکم ترافیک متوسط) به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از ایستگاه کرمانشاه (تراکم ترافیک زیاد) بود ($p < 0/050$) که این موضوع را می‌توان با بیشینه میانگین مقادیر سیلت و ماده آلی و کمینه میانگین مقدار شن در ایستگاه رزن مرتبط دانست. از این رو، می‌توان ادعان داشت که به‌سبب قابلیت سیلت و ماده آلی در افزایش تثبیت، کاهش تحرک و نرخ آبخویی فلزات سنگین، مقادیر بیش‌تری از عناصر روی، کادمیم، کبالت، کروم، منگنز و نیکل در ایستگاه رزن در مقایسه با نمونه خاک ایستگاه کرمانشاه انباشته شده است. نتایج مطالعه گوان و همکاران، یان و همکاران و خالقی و همکاران نیز نشان داد که تجمع و انباشت فلزات سنگین در خاک تحت تأثیر خواص خاک مانند اندازه ذرات و ماده آلی قرار می‌گیرد (۱، ۵۳، ۵۸). از طرفی، افزایش غلظت فلزات سنگین با کاهش اندازه ذرات را می‌توان با

(۲۸/۴٪) بود. در این خصوص، می‌توان ادعان داشت که محتوی این عناصر به‌طور قابل توجهی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری متفاوت بوده و احتمالاً بیش‌ترین تأثیرپذیری را از فعالیت‌های انسانی و به‌ویژه ترافیک داشته‌اند. از طرفی، عنصر کروم با کم‌ترین مقدار ضریب تغییرات (۲۱/۵٪)، 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 پژوهش مشابه، کرپنوا و همکاران 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 (۶۲). افزون بر این، در مطالعه فان و همکاران، 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 بود (۳۴).

شاخص شدت آلودگی از جمله ابزارهای مفید و مناسب برای ارزیابی و تعیین سطح آلاینده‌های فلزی خاک است (۴۱، ۶۳). نتایج محاسبه شاخص شدت آلودگی (نمودار ۱) بیان‌گر آن بود که نمونه‌های خاک مورد ارزیابی از نظر کیفی در طبقه «خاک با شدت آلودگی بسیار کم» بوده‌اند. از طرفی، مقادیر شاخص شدت آلودگی در نمونه‌های خاک سطحی ایستگاه‌های رزن و کرمانشاه به‌نسبت بزرگ‌تر از ایستگاه گلته‌په بود که این موضوع را می‌توان با تراکم ترافیکی زیاد 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 و جانکاسکی و همکاران نیز بیش‌ترین نرخ آلودگی را در خاک سطحی جاده‌هایی با حجم ترافیکی زیاد گزارش کردند (۶۴، ۶۵).

ضرایب همبستگی، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی به‌طور گسترده و با موفقیت در

گروه‌بندی فلزات سنگین و شناسایی منبع آن‌ها در خاک استفاده شده است. در این خصوص، همبستگی زیاد و مثبت نشان‌دهنده منشأ مشابه و عامل کنترل‌کننده مشترک این فلزات در نظر گرفته شده است (۵۸، ۶۶). نتایج آزمون همبستگی پیرسون بیان‌گر همبستگی مثبت و معنی‌دار بین میانگین غلظت تجمع‌یافته عناصر روی با کادمیم، کروم، نیکل و منگنز، همچنین سرب با کادمیم و مس، عنصر کادمیم با کروم، مس و منگنز، از طرفی کروم با منگنز و نیکل و همچنین منگنز با نیکل بود. در این خصوص، می‌توان منابع ورود این عناصر به خاک پیرامون جاده را مشترک و احتمالاً با فعالیت‌های ترافیکی (انتشارات آگزوزی و غیر آگزوزی) مرتبط دانست. در مطالعات مشابه و در تأیید نتایج حاصل، انوار و همکاران نیز پس از ارزیابی آلاینده‌های غیرآلی منتشر شده از اتومبیل در خاک و گردوغبار حاشیه بزرگراه‌های اصلی پاکستان با استناد به ضرایب همبستگی پیرسون گزارش کردند که منابع انتشار عناصر روی و سرب یکسان و ناشی از منابع آگزوزی و غیرآگزوزی بوده است (۶۷). رویکرد تحلیل مؤلفه‌های اصلی نیز برای ارزیابی روابط بین فلزات مورد مطالعه با جزئیات بیش‌تر و شناسایی دقیق منابع آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج خروجی تحلیل مؤلفه‌های اصلی، بیان‌گر استخراج سه مؤلفه اصلی اول، دوم و سوم با واریانس مقدار ویژه به‌ترتیب برابر با ۴۱/۳٪، ۳۸/۶٪ و ۱۹/۶٪ بود که در مجموع ۹۹/۵٪ از واریانس کل تشکیل داده و هر ۸ عنصر مورد مطالعه را شامل می‌شدند. در اولین مؤلفه اصلی، بارهای عاملی قابل توجه برای فلزات مربوط عناصر نیکل (۰/۹۹۰)، منگنز (۰/۹۸۰)، روی (۰/۷۷۰) و کروم (۰/۶۱۰) مشاهده شد. نیکل و کروم افزون بر این که در آسفالت یافت می‌شوند، برای پوشش برخی قطعات مکانیکی خودرو (نظیر لنت ترمز و لاستیک) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (۶۴، ۶۸-۷۱). بنابراین، به احتمال زیاد این فلزات از خوردگی روکش کروم/نیکل قطعات وسایل نقلیه موتوری و همچنین از ساییدگی پوشش سطح جاده ناشی می‌شوند. منگنز سهم قابل قبولی از ورودی‌های پوسته زمین و آگزوز خودرو دارد، زیرا یکی از فلزات بسیار

ترافیک، احتمالاً مس از سیستم ترمز خودرو و محتوای این عنصر در لاستیک‌ها نشأت گرفته است. به‌طور مشابه، گزارش شده است که سایش ترمز و لاستیک، منبع اصلی مس در خاک‌های کنار جاده است (۱، ۲۸). قابل ذکر است که وحدت منابع توسط ضرایب همبستگی مثبت و زیاد بین این فلزات تأیید می‌شود (جدول ۳). بر این اساس، مؤلفه دوم ممکن است به انتشارات غیرآگزوز حاصل از ترافیک مرتبط باشد. در مؤلفه سوم، بار عاملی قابل توجه فقط مربوط به عنصر کبالت (۰/۹۹۰) بود. آلیاژ کبالت به‌طور گسترده در اجزای موتور و بسیاری از اجزای مکانیکی (قطعاتی که مقاومت زیاد در برابر سایش لازم است) استفاده می‌شود. آسفالت همچنین حاوی غلظت قابل توجهی از کبالت است. از این رو، خوردگی آلیاژ کبالت مورد استفاده در اجزای خودرو (مواد هوازدگی قطعات آبرکاری شده با کبالت و پوشش‌ها)، سایش تآییر و سطح جاده ممکن است منشأ احتمالی این عنصر در خاک کنار جاده باشد (۸۳). با این حال، منابع طبیعی همچنان باید سهم عمده‌ای از این عنصر در خاک‌های کنار جاده‌ای داشته باشند، زیرا محتوای کبالت در نمونه‌ها کم‌تر از خاک زمینه (برابر با ۱۵/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. از این رو، مؤلفه سوم ممکن است به منابع پوسته و غیرآگزوز مربوط باشد. تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی به‌عنوان معیار شباهت برای تأیید نتایج و ارزیابی شباهت‌های منبع فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های خاک مورد استفاده قرار گرفت. ارتباط نزدیک فلزات در هر خوشه نشان‌دهنده منبع مشابه عناصر است، در حالی که فاصله زیاد بین فلزات در دندروگرام، نشان‌دهنده عدم تشابه منابع تولید و انتشار عناصر در محیط است (۶۲). نتایج به‌طور کلی با نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی مطابقت داشتند. فلزات در اولین خوشه شامل کادمیم، کبالت، کروم، نیکل، سرب، مس و روی بودند که نشان‌دهنده منابع غیرآگزوز و پوسته آن‌ها در خاک‌های کنار جاده است که با نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نیز تأیید شد. خوشه دوم فقط منگنز را شامل می‌شد که طبق نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی این عنصر بیش‌تر از پوسته و منابع آگزوز نشأت گرفته بود. به‌طور کلی، در میان ۸ فلز مورد بررسی،

فراوان در پوسته زمین است (با میانگین محتوای ۹۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) و در حال حاضر به‌عنوان افزودنی سوخت در بنزین و گازوئیل (به شکل متیل سیکلوپنتادینیل منگنز تری‌کربونیل (MMT) (جایگزین سرب (به شکل تترااتیل‌سرب (TEL) شده است (۷۲). روی فراوان‌ترین و مهم‌ترین فلز در تآییر (با میانگین غلظت ۱۷۷۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) و روان‌کننده‌ها (با میانگین غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) است (۱، ۷۳). از این رو، عمدتاً از نشت روان‌کننده‌ها، روغن موتور و همچنین فرسایش تآییر خودرو نشأت می‌گیرد (۷۴). بر اساس آنچه بیان شد، اولین مؤلفه اصلی را می‌توان با ترکیبی از انتشارات مربوط به ترافیک (آگزوز و غیر آگزوز) و ورودی پوسته (منابع طبیعی) مرتبط دانست. دومین مؤلفه اصلی، شامل بارهای عاملی قابل توجه برای عناصر سرب (۰/۹۹۰)، مس (۰/۹۳۰) و کادمیم (۰/۷۷۰) بود. غلظت سرب در خاک کنار جاده‌ها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر حجم ترافیک قرار گرفته است. این مشاهدات نشان می‌دهد که استفاده از سرب به‌عنوان یک افزودنی ضدسایش برای روغن‌های موتور و نشت روان‌کننده‌ها می‌تواند به انتشار سرب در خاک‌های کنار جاده کمک کند. علاوه بر این، سایش ترمز خودرو ممکن است یکی دیگر از منشأهای احتمالی سرب در محیط کنار جاده باشد، زیرا این عنصر به‌طور گسترده به‌عنوان یک افزودنی اصطکاکی در مواد ترمز استفاده می‌شود (۲۸، ۷۵، ۷۶). در همین حال، سرب انباشته شده مربوط به آگزوز نیز می‌تواند در خاک کنار جاده مجدداً معلق شود (۷۷-۷۹). کادمیم عنصر مهمی است که در روان‌کننده‌ها، لاستیک‌ها و لنت‌های ترمز موجود است (۷۲، ۸۰). بنابراین، انتشارات ناشی از روان‌کننده‌ها، سایش لنت‌های ترمز و تآییر خودرو ممکن است منشأ احتمالی این فلز در خاک کنار جاده باشد؛ همان‌طور که در مطالعات مشابه گزارش شده است (۸۱، ۸۲). مس نیز به‌طور گسترده در لنت ترمز و سایر قطعات مکانیکی خودرو (اجزایی که به تنظیم انتقال حرارت نیاز دارند) استفاده می‌شود (۷۶). با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار بین این فلز و حجم

1. Methylcyclopentadienyl manganese tricarbonyl
2. Tetraethyllead

و انتشارات غیراگزوزی (نشت سوخت و روان کننده‌ها، ذرات حاصل از فرسایش و استهلاک بدنه خودرو، اجزای موتور، لنت ترمز، کلاچ و سطح جاده) را می‌توان به‌عنوان منبع اصلی آلاینده‌های فلزی در نظر گرفت. با توجه به اثرات محیط‌زیستی و بهداشتی فلزات سنگین بر بوم‌سازگان و انسان، پایش منظم و دوره‌ای نمونه‌های خاک و همچنین مدیریت و کنترل منابع انتشار آلاینده‌ها به‌منظور حفظ سلامت محیط و انسان توصیه می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین، هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پژوهش مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان با کد ۱۷۱۳۰۶۰۷۹۸۱۰۰۲. بدین‌وسیله از تمام افرادی که ما را در انجام این طرح یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

فقط عنصر منگنز از منابع اگزوز وسایل نقلیه منشأ می‌گیرد. با این حال، نباید از نقش منابع غیراگزوز (مانند نشت روغن روان کننده، سایش لاستیک، لنت ترمز و ساییدگی جاده) در تخلیه عناصر به محیط کنار جاده با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق غافل شد. مطالعات مشابه نیز نشان داد که منابع غیراگزوز مقدار قابل توجهی از انتشارات آلاینده‌های فلزی مرتبط با ترافیک را تشکیل می‌دهند (۳۵، ۶۹، ۸۲).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که نمونه‌های خاک حاشیه جاده‌هایی 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 که همبستگی مثبت و معنی‌دار بین محتوی فلزات (به‌ویژه روی، سرب و مس) و تراکم ترافیک نیز مؤید این موضوع بود. همچنین، نتایج منشأیابی عناصر نشان داد که آلودگی فلزات در خاک‌های کنار جاده به احتمال زیاد منشأ ترافیکی داشته

References

1. Yan G, Mao L, Liu S, Mao Y, Ye H, Huang T, et al. 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*. 2018;631:942-50.
2. Aricak B, Cetin M, Erdem R, Sevik H, Cometen H. The change of some heavy metal concentrations in Scotch pine (*Pinus sylvestris*) depending on traffic density, organelle and washing. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019;17(3):6723-34.
3. Hosseini NS, Sobhan Ardakani S. Evaluation of the impact of traffic volume on pollution and potential ecological risk of Zn, Pb, and Ni in suburban roadside soils in Hamedan, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*. 2021;35(2):119-34 (In Persian).
4. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. 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*. 2021;13(4):607-20 (In Persian).
5. 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 Services Research*. 2016;12(2):208-13 (In Persian).
6. Hosseini NS, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Heavy metal concentrations in roadside plants (*Achillea wilhelmsii* and *Cardaria draba*) and soils along some highways in Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research* 2020;27(12):13301-14.
7. Davodpour R, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Abdi N, Lorestani B. 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*. 2019;77(3):344-58.
8. Obiri-Nyarko F, Duah AA, Karikari AY, Agyekum WA, Manu E, Tagoe R. Assessment of heavy metal contamination in soils at the Kpone landfill site, Ghana: Implication for ecological and health risk assessment. *Chemosphere*. 2021;282:131007.
9. 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.
10. Mohammad Moradi B, Sobhanardakani S, Cheraghi M. Ecological risk of heavy metals in surface soils of urban parks. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2018;10(4):429-42 (In Persian).
 11. Cheraghi M, Sobhanardakani S, Zandipak R, Lorestani B, Merrikhpour H. Removal of Pb (II) from aqueous solutions using waste tea leaves. *Iranian Journal of Toxicology*. 2015;9(28):1247-53.
 12. Sobhan Ardakani S, Maanijou M, Asadi H. Investigation of Pb, Cd, Cu and Mg concentrations in groundwater resources of Razan Plain. *Avicenna Journal of Clinical Medicine (Scientific Journal of Hamadan University of Medical Sciences)*. 2015;21(4):319-29.
 13. Sobhanardakani S. Evaluation of the water quality pollution indices for groundwater resources of Ghahavand plain, Hamadan province, western Iran. *Iranian Journal of Toxicology*. 2016;10(3):35-40.
 14. Sobhanardakani S, Tizhosh M. Determination of Zn, Pb, Cd and Cu contents in raw milk from Khorram-Abad dairies. *Journal of Food Hygiene*. 2016;6(2):43-50 (In Persian).
 15. Sobhanardakani S. Potential health risk assessment of heavy metals via consumption of caviar of Persian sturgeon. *Marine Pollution Bulletin*. 2017;123(1-2):34-8.
 16. 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.
 17. Sobhanardakani S. Ecological and human health risk assessment of heavy metal content of atmospheric dry deposition, a case study: Kermanshah, Iran. *Biological Trace Element Research*. 2019;187(2):602-10.
 18. Sanchez KA, Foster M, Nieuwenhuijsen MJ, May AD, Ramani T, Zietsman J, et al. Urban policy interventions to reduce traffic emissions and traffic-related air pollution: Protocol for a systematic evidence map. *Environment International*. 2020;142:105826.
 19. Khalid N, Noman A, Aqeel M, Masood A, Tufail A. Phytoremediation potential of *Xanthium strumarium* for heavy metals contaminated soils at roadsides. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019;16(4):2091-100.
 20. An S, Liu N, Li X, Zeng S, Wang X, Wang D. Understanding heavy metal accumulation in roadside soils along major roads in the Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*. 2022;802:149865.
 21. Nikolaeva O, Rozanova M, Karpukhin M. Distribution of traffic-related contaminants in urban topsoils across a highway in Moscow. *Journal of Soils and Sediments*. 2017;17(4):1045-53.
 22. Hosseini N, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Merrikhpour H. Expansive herbaceous species as bio-tools for elements detection in the vicinity of major roads of Hamedan, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022;19(3):1611-24.
 23. Antoniadis V, Shaheen SM, Levizou E, Shahid M, Niazi NK, Vithanage M, 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. *Environment International*. 2019;127:819-47.
 24. Sadeghdoust F, Ghanavati N, Nazarpour A, Babaenejad T, Watts MJ. Hazard, ecological, and human health risk assessment of heavy metals in street dust in Dezfoul, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020;13(17):1-14.
 25. Hernandez Gonzalez LM, Rivera VA, Phillips CB, Haug LA, Hatch SL, Yeager LE, 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. *Journal of Soils and Sediments*. 2019;19(11):3817-31.
 26. Qin C, Yuan X, Xiong T, Tan YZ, Wang H. Physicochemical properties, metal availability and bacterial community structure in heavy metal-polluted soil remediated by montmorillonite-based amendments. *Chemosphere*. 2020;261:128010.
 27. 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. *Environmental Geochemistry and Health* 2021;43(9):3469-84.
 28. Roy S, Gupta SK, Prakash J, Habib G, Baudh K, Nasr M. Ecological and human health risk assessment of heavy metal contamination in road dust in the National Capital Territory (NCT) of Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26(29):30413-25.
 29. Baharmastian B, Sobhanardakani S, Jameh Bozorgi S. Study on heavy metals content (Fe, Pb and Cd) in atmospheric precipitation collected from the high traffic intensity regions of city of Hamedan. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2020;22(9):141-51 (In Persian).
 30. Ranjbaran S, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Sadr MK. Ecological and human health risks assessment of some polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface soils of central and southern parts of city of Tehran, Iran.

- Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2021;19(2):1491-503.
31. Timofeev I, Kosheleva N, Kasimov N. Health risk assessment based on the contents of potentially toxic elements in urban soils of Darkhan, Mongolia. *Journal of Environmental Management*. 2019;242:279-89.
 32. Liu P, Hu W, Tian K, Huang B, Zhao Y, Wang X, 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. *Environment International*. 2020;137:105519.
 33. Liu H, Zhang Y, Yang J, Wang H, Li Y, Shi Y, et al. Quantitative source apportionment, risk assessment and distribution of heavy metals in agricultural soils from southern Shandong Peninsula of China. *Science of the Total Environment*. 2021;767:144879.
 34. Fan P, Lu X, Yu B, Fan X, Wang L, Lei K, et al. Spatial distribution, risk estimation and source apportionment of potentially toxic metal (loid) s in resuspended megacity street dust. *Environment International*. 2022;160:107073.
 35. Mohamadi M, Ghasemi R, Naeimi M. Distribution pattern of heavy metals in roadside Topsoils around the Rasht-Qazvin freeway. *Journal of Health*. 2018;9(3):249-58 (In Persian).
 36. Ghanavati N, Nazarpour A, Babaenejad T. 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*. 2019;16(4):373-90 (In Persian).
 37. Sobhanardakani S. Human health risk assessment of potentially toxic heavy metals in the atmospheric dust of city of Hamedan, west of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(28):28086-93.
 38. Yavari M, Mohammadi MH, Shahbazi K. Comparison of some methods for measuring primary soil particle size distribution and introducing appropriate times for the four-reading method for determining soil texture. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 2021;51(12):2999-3015 (In Persian).
 39. Gujre N, Mitra S, Soni A, Agnihotri R, Rangan L, Rene ER, et al. Speciation, contamination, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils dumped with municipal solid wastes. *Chemosphere*. 2021;262:128013.
 40. Walkley A, Black IA. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 1934;37(1):29-38.
 41. Pejman A, Bidhendi GN, Ardestani M, Saeedi M, Baghvand A. A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study. *Ecological Indicators*. 2015;58:365-73.
 42. Bhuiyan MAH, Karmaker SC, Bodrud-Doza M, Rakib MA, Saha BB. Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods. *Chemosphere*. 2021;263:128339.
 43. Kocher B, Wessolek G, Stoffregen H. Water and heavy metal transport in roadside soils. *Pedosphere*. 2005;15(6):746-53.
 44. Werkenthin M, Kluge B, Wessolek G. Metals in European roadside soils and soil solution—A review. *Environmental Pollution*. 2014;189:98-110.
 45. Radziemska M, Fronczyk J. Level and contamination assessment of soil along an expressway in an ecologically valuable area in Central Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015;12(10):13372-87.
 46. Skrynetska I, Karcz J, Barczyk G, Kandziora-Ciupa M, Ciepał R, Nadgórska-Socha A. Using *Plantago major* and *Plantago lanceolata* in environmental pollution research in an urban area of Southern Poland. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26(23):23359-71.
 47. Bernardino CA, Mahler CF, Santelli RE, Freire AS, Braz BF, Novo LA. Metal accumulation in roadside soils of Rio de Janeiro, Brazil: impact of traffic volume, road age, and urbanization level. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019;191(3):1-14.
 48. Chibuiké GU, Obiora SC. Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods. *Applied and Environmental Soil Science*. 2014;2014:1-13.
 49. Porteous A. *Hazardous Waste Management Handbook*. Butterworths. 1985; 305 P.
 50. Neina D. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science*. 2019;2019:1-10.
 51. Nazmi L, Hashemimajd K. Effect of different organic amendments on chemical properties of different soils. *Iranian Journal of Soil Research*. 2013;27(3):335-48 (In Persian).
 52. Liu Z, Rong Q, Zhou W, Liang G. Effects of inorganic and organic amendment on soil chemical properties, enzyme activities, microbial community and soil quality in yellow clayey soil. *PLOS ONE*. 2017;12(3):e0172767.
 53. Khaleghi S, Safadoust A, Kolahchi Z. Pollution status of some heavy metals in an agricultural land along Arak-Qom

- highway. Iranian Journal of Soil Research. 2019;33(3):387-400 (In Persian).
54. Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 2005;124(1-2):3-22.
 55. Gupta N, Yadav KK, Kumar V, Kumar S, Chadd RP, Kumar A. Trace elements in soil-vegetables interface: translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration-a review. *Science of the Total Environment*. 2019;651:2927-42.
 56. Bonanno G. Comparative performance of trace element bioaccumulation and biomonitoring in the plant species *Typha domingensis*, *Phragmites australis* and *Arundo donax*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2013;97:124-30.
 57. Galal TM, Shehata HS. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological Indicators*. 2015;48:244-51.
 58. Guan Z-H, Li XG, Wang L. Heavy metal enrichment in roadside soils in the eastern Tibetan Plateau. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(8):7625-37.
 59. Ajmone-Marsan F, Biasioli M, Kralj T, Grčman H, Davidson CM, Hursthouse AS, et al. Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities. *Environmental Pollution*. 2008;152(1):73-81.
 60. Wong J, Li K, Zhou L, Selvam A. The sorption of Cd and Zn by different soils in the presence of dissolved organic matter from sludge. *Geoderma*. 2007;137(3-4):310-7.
 61. Achiba WB, Gabteni N, Lakhdar A, Du Laing G, Verloo M, Jedidi N, et al. Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2009;130(3-4):156-63.
 62. Krupnova TG, Rakova OV, Gavrilkina SV, Antoshkina EG, Baranov EO, Yakimova ON. Road dust trace elements contamination, sources, dispersed composition, and human health risk in Chelyabinsk, Russia. *Chemosphere*. 2020;261:127799.
 63. Hagh Nazar H, Hudson-Edwards KA, Kumar V, Pourakbar M, Mahdavianpour M, Aghayani E. Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere*. 2021;285:131446.
 64. Tian X, Zhang H, Zhao Y, Mehmood K, Wu X, Chang Z, et al. Transcriptome analysis reveals the molecular mechanism of hepatic metabolism disorder caused by chromium poisoning in chickens. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(16):15411-21.
 65. Jankowski K, Malinowska E, Ciepela GA, Jankowska J, Wiśniewska-Kadžajan B, Sosnowski J. Lead and cadmium content in grass growing near an expressway. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2019;76(1):66-75.
 66. Mohammadi SM, Lorestani B, Sobhan Ardakani S, Cheraghi M, Tayebi L. 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. *Environmental Sciences*. 2021;19(3):1-22 (In Persian).
 67. Anwar S, Naz A, Ashraf MY, Malik A. Evaluation of inorganic contaminants emitted from automobiles and dynamics in soil, dust, and vegetations from major highways in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(26):32494-508.
 68. Lu X, Wang L, Lei K, Huang J, Zhai Y. Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;161(2-3):1058-62.
 69. Devi U, Taki K, Shukla T, Sarma KP, Hoque RR, Kumar M. 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*. 2019;41(3):1387-403.
 70. Sabzevari E, Sobhanardakani S. Analysis of selected heavy metals in indoor dust collected from city of Khorramabad, Iran: A case study. *Jundishapur Journal of Health Sciences*. 2018;10(3): e67382.
 71. Mohebian M, Sobhanardakani S, Taghavi L, Ghoddousi J. Analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in the surface soils collected from various land uses around Shazand Oil Refinery Complex, Arak, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14(19):2019.
 72. 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.
 73. Jin Y, O'Connor D, Ok YS, Tsang DC, Liu A, Hou D. Assessment of sources of heavy metals in soil and dust at children's playgrounds in Beijing using GIS and multivariate statistical analysis. *Environment International*. 2019;124:320-8.
 74. Habibi H, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Lorestani B, Sadr MK. 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*. 2022;15(2):168.

75. Sobhanardakani S, Ghoochian M, Taghavi L. Assessment of heavy metal contamination in surface sediment of the Darreh-Morad Beyg River. *Iranian Journal of Health Sciences*. 2016;4(3):22-34.
76. Bourliva A, Kantiranis N, Papadopoulou L, Aidona E, Christophoridis C, Kollias P, et al. Seasonal and spatial variations of magnetic susceptibility and potentially toxic elements (PTEs) in road dusts of Thessaloniki city, Greece: A one-year monitoring period. *Science of the Total Environment*. 2018;639:417-27.
77. Forghani G, Kelm U, Mazinani V. Spatial distribution and chemical partitioning of potentially toxic elements in soils around Khatoon-Abad Cu Smelter, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*. 2019;196:66-80.
78. Sobhanardakani S. Non-carcinogenic risk assessment of heavy metals through exposure to the household dust (Case study: City of Khorramabad, Iran). *Annals of Medical and Health Science Research*. 2018;16(4): e86594.
79. Ramírez O, de la Campa AMS, Amato F, Moreno T, Silva LF, Jesús D. Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Science of the Total Environment*. 2019;652:434-46.
80. Men C, Liu R, Xu F, Wang Q, Guo L, Shen Z. Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China. *Science of the Total Environment*. 2018;612:138-47.
81. Foti L, Dubs F, Gignoux J, Lata J-C, Lerch TZ, Mathieu J, et al. Trace element concentrations along a gradient of urban pressure in forest and lawn soils of the Paris region (France). *Science of the Total Environment*. 2017;598:938-48.
82. Mohammadi Galangash M, Ghasemi Zolpirani R, Naimi Joubani M. Evaluation of roadside soils pollution with heavy metals (Pb, Ni, Cu, Zn) in the Rasht-Qazvin old road (Guilan province). *Iranian Journal of Health and Environment*. 2020;13(3):409-20 (In Persian).
83. Kumar R, Kumar V, Sharma A, Singh N, Kumar R, Katnoria JK, et al. Assessment of pollution in roadside soils by using multivariate statistical techniques and contamination indices. *SN Applied Sciences*. 2019;1:842.