



Ecological and health risk assessment of toxic elements in surface soils around Ardakan industrial areas

Abolfazl Arefi Ardakani¹ | Gholamreza Siyahati Ardakani² | Narjes Okati³ |
 Mohammad Hossein Sayadi⁴

1. Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran. E-mail: aboalfazl.arefiardakani@gmail.com

2. Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.. E-mail: rsiyahati@ardakan.ac.ir

3. Corresponding Author, Department of Environment , Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: narjesokati@uoz.ac.ir

4. Department of Environment, Faculty of Agriculture & Natural Sources, Birjand University, Birjand, Iran. E-mail: mh_sayadi@birjand.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 01 January 2023

Received in revised form 25

May 2023

Accepted 26 June 2023

Published online 23 September
2023

Keywords:

Hazard Quotient,

Potential Ecological Risk

Index,

Soil,

Toxic elements.

ABSTRACT

Soil contamination with toxic elements is a major environmental concern. The establishment of steel and pellet factories in the outskirts of Ardakan city has increased the possibility of various pollutants, especially toxic elements, in this area. The purpose of this research is to evaluate the level of contamination with toxic elements in the surface soils around the industrial areas of Ardakan using enrichment factors (EF), ecological risk potential (PERI) and health risk through the three routes of ingestion, inhalation and skin absorption. In this research, 12 topsoil samples were collected from 12 stations by systematic random method. The concentration of toxic elements Pb, As, Ni and Cd in the samples were measured using ICP-OES device. The average concentration of elements was found to be: Ni (46.75), Pb (36.16), As (9.25) and Cd (0.34) µg/g. The average enrichment factor (EF) for elements was Pb>Ni>Cd>As. Based on the potential ecological risk index (PERI), stations 9 and 11 showed moderate pollution and other stations showed low pollution. The results of health risk assessment based on the hazard quotient (HQ) were lower than one for all elements from three ways of ingestion, inhalation and skin absorption, which cannot indicate the possibility of non-carcinogenic risk potential. The risk of carcinogenesis for adults through ingestion, inhalation and skin absorption in all sampling stations for Pb was negligible; but for Ni and As from ingestion and skin absorption, and for Cd from ingestion, there was a risk of carcinogenesis.

Cite this article: Arefi Ardakani, A., Siyahati Ardakani, G., Okati, N., & Sayadi, M.S. (2023). Ecological and health risk assessment of toxic elements in surface soils around Ardakan industrial areas. *Journal of Natural Environment*, 76 (3), 447-461. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.353268.2512>



ارزیابی ریسک اکولوژیک و سلامت عناصر سمی در خاک‌های سطحی اطراف مناطق صنعتی اردکان

ابوالفضل عارفی اردکانی^۱ | غلامرضا سیاحتی اردکانی^۲ | نرجس اکاتی^۳ | محمد حسین صیادی^۴

۱. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان یزد. رایانامه: aboalfazl.arefiardakani@gmail.com

۲. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان یزد. رایانامه: rsiyahati@ardakan.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل. رایانامه: narjesokati@uoz.ac.ir

۴. گروه محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: mh_sayadi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	آلودگی خاک به عناصر سمی، نگرانی بزرگ محیط‌زیستی است. استقرار کارخانه‌های فولاد و گندله‌سازی در حاشیه شهر اردکان احتمال انتشار آلاینده‌های مختلف به‌ویژه فلزات سمی را در این منطقه افزایش داده است. هدف از این پژوهش، ارزیابی میزان آلودگی به عناصر سمی در خاک‌های سطحی اطراف مناطق صنعتی شهر اردکان با استفاده از فاکتورهای غنی‌شدگی (EF)، پتانسیل ریسک اکولوژیک (PERI) و ریسک سلامت از طریق سه مسیر بلع، تنفس و جذب پوستی بود. در این تحقیق ۱۲ نمونه خاک سطحی از ۱۲ ایستگاه به روش سیستماتیک تصادفی جمع‌آوری شد. غلظت عناصر سمی سرب، آرسنیک، نیکل و کادمیوم در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ICP-OES اندازه‌گیری شد. میانگین غلظت عناصر به‌ترتیب: نیکل (۴۶/۷۵)، سرب (۳۶/۱۶)، آرسنیک (۹/۲۵) و کادمیوم (۰/۳۴) میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. متوسط ضریب غنی‌شدگی (EF) برای عناصر به‌صورت الگوی $As < Cd < Ni < Pb$ بود. براساس شاخص پتانسیل خطر اکولوژیک (PERI)، ایستگاه‌های ۹ و ۱۱ آلودگی متوسط و سایر ایستگاه‌ها آلودگی کم را نشان دادند. نتایج ارزیابی ریسک سلامت براساس مقدار ضریب خطر (HQ) برای تمامی عناصر از سه طریق بلع، تنفس و جذب پوستی کم‌تر از یک به‌دست آمد که نمی‌تواند نشان‌دهنده احتمال وجود پتانسیل خطر غیرسرطان‌زایی باشد. ریسک سرطان‌زایی برای بزرگسالان از طریق بلع، تنفس و جذب پوستی در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری برای عنصر سرب در محدوده قابل چشم‌پوشی بود؛ اما برای عناصر نیکل و آرسنیک از مسیرهای بلع و جذب پوستی و در مورد کادمیوم از مسیر بلع، احتمال خطر برای سرطان‌زایی وجود داشت.
کلیدواژه‌ها: خاک، شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک، ضریب خطر، عناصر سمی.	

استناد: عارفی اردکانی، ابوالفضل؛ سیاحتی اردکانی، غلامرضا؛ اکاتی، نرجس؛ و صیادی، محمد حسین (۱۴۰۲). ارزیابی ریسک اکولوژیک و سلامت عناصر سمی در

خاک‌های سطحی اطراف مناطق صنعتی اردکان. محیط زیست طبیعی، ۷۶ (۳)، ۴۶۱-۴۴۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.353268.2512>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

در حال حاضر آلودگی‌های صنعتی به‌عنوان شاخص‌ترین عامل در تخریب محیط‌زیست محسوب می‌شود. تحقیقات زیادی نشان داده‌اند که آب، خاک و هوای مناطقی که تحت تأثیر فعالیت‌های صنعتی قرار دارند از آلودگی قابل ملاحظه‌ای برخوردارند. خاک در واقع حساس‌ترین و مهم‌ترین بخش حیاتی کره زمین است. خاک‌ها علاوه بر نقشی که در تداوم حیات ایفا می‌کنند در تکامل و حتی پیدایش حیات نیز اثرات عمده‌ای را به‌جای گذاشته‌اند و به‌عنوان منبعی مهم و بنیادی در تولید ثروت جامعه و در برنامه‌های توسعه و سلامت جامعه، نقش ایفا می‌کنند (Agyeman et al., 2021).

عناصر سمی به‌طور طبیعی در همه خاک‌ها به نسبت‌های متفاوت وجود دارند؛ ولی آلودگی خاک‌ها به‌دلیل فعالیت‌های صنعتی انسان در حال افزایش است. منابع اصلی انسان‌زاد عناصر سنگین فعالیت‌های صنعتی، معدن‌کاوی، کشاورزی، استخراج فلزات و پساب‌های شهری هستند که نسبت به منابع زمین‌زاد تحرک‌پذیری بسار بالایی دارند. فلزات سنگین به‌عنوان اجزای طبیعی تشکیل‌دهنده پوسته زمین، پایدار و غیرقابل تجزیه هستند؛ بنابراین تمایل به ترکیب شدن با اجزای خاک و انباشت در خاک و رسوب را دارند که این امر منجر به افزایش طول عمر آن‌ها در خاک می‌گردد. انباشت فلزات سنگین در اکوسیستم می‌تواند اثرات منفی محیط‌زیستی بالایی داشته باشد (Kumar et al., 2020). به‌طوری که آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA)، فلزات سمی از جمله سرب، کادمیوم، نیکل، آرسنیک، جیوه، کروم و مس را به‌عنوان فلزاتی با بیشترین اثر سمی بر روی اکوسیستم معرفی نموده است (USEPA, 2020). همچنین عناصر سنگین ترکیب‌هایی را با خاک تشکیل می‌دهند که جداسازی و پاک‌سازی آن‌ها هزینه‌هایی زیادی در بر دارد (Hu et al., 2019). قابلیت تجمع زیستی آن‌ها باعث شده است که به‌عنوان خطر جدی برای سلامت بشر مطرح باشند. انسان از سه مسیر بلع، تنفس و جذب پوستی با این فلزات در خاک مواجه است. این عناصر می‌توانند در بافت چربی، بافت عصبی و سیستم غدد درون‌ریز تجمع یابند و سبب اختلال در سیستم ایمنی بدن و متابولیسم سلولی و در نهایت باعث بروز بیماری‌های سرطانی و اختلالات عصبی و حرکتی در انسان شوند (Rodríguez-Eugenio et al., 2018). به‌همین دلیل آلودگی فلزات سنگین در سطح بین‌المللی همواره به‌عنوان یک مشکل محیط‌زیستی ویژه مطرح بوده است. با توجه به گزارش سازمان بهداشت جهانی، حدود یک چهارم از بیماری‌های انسان ناشی از میزان مواجهه با آلاینده‌های محیط زیستی هستند. در سه دهه گذشته نگرانی‌هایی در مورد اثرات محیط‌زیستی فعالیت‌های صنعتی بر سلامت مردم وجود داشته است. از آنجا که ارزیابی ریسک سلامت انسان، سرطان‌زایی فلزات سنگین موجود در خاک مناطق صنعتی را برای افراد بالغ و کودکان ثابت نموده است، بنابراین ضرورت دارد تا خاک پیرامون مناطق صنعتی، به‌ویژه از نظر فلزات سنگین پالایش شود (Mohammadi et al., 2019).

در زمینه آلودگی خاک و ارزیابی ریسک، محققان تحقیقات زیادی در ایران و سایر کشورهای جهان انجام داده‌اند. به‌عنوان مثال Ravankhah و همکاران (۲۰۱۶)، خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل را از نظر ریسک سلامت انسان به‌عناصر کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس در خاک سطحی مورد ارزیابی قرار دادند. براساس نتایج، بیشترین خطرات غیرسرطان‌زایی در هر دو گروه کودکان و بزرگسالان ناشی از سرب و کمترین آن نیز مربوط به فلز روی بود. ضمن اینکه خطر جمعی غیرسرطان‌زایی کل فلزات برای کودکان بالاتر از ۱۷ و برای بزرگسالان بالاتر از ۲ تعیین شد. همچنین در مطالعه Jamal و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی توزیع آلودگی و خطر بر سلامت فلزات سنگین در خاک‌های اطراف کارخانه‌های سرب و روی پرداخته شد. نتایج ضریب‌انباشتگی و فاکتور غنی‌شدگی حاکی از این بود که سرب و روی جزء آلاینده‌های مهم در منطقه هستند. از طرفی ارزیابی خطر بر سلامت انسان نیز نشان داد که عناصر سرب و کادمیوم از مهمترین آلاینده‌هایی هستند که خطرات سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی دارند. در این راستا، Moghtaderi و همکاران (۲۰۱۹)، پژوهشی در رابطه با ارزیابی شاخص‌های آلودگی، ریسک سلامت و شاخص ریسک اکولوژیک عناصر سمی در خاک‌های سطحی بخش مرکزی شهرستان بندرعباس انجام دادند. یافته‌ها بیانگر آن بود که کادمیوم، مس، سرب، آرسنیک و روی از نظر منشاء، بیشتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد قرار دارند و ریسک سرطان‌زایی در محدوده قابل تحمل برای سلامت انسان به‌دست آمد. Mohammadi و همکاران (۲۰۱۹) خاک سطحی اطراف مناطق صنعتی نیشابور را از نظر میزان آلودگی فلزات سنگین و ریسک سلامت انسان در خاک سطحی مورد ارزیابی قرار دادند. براساس شاخص‌های

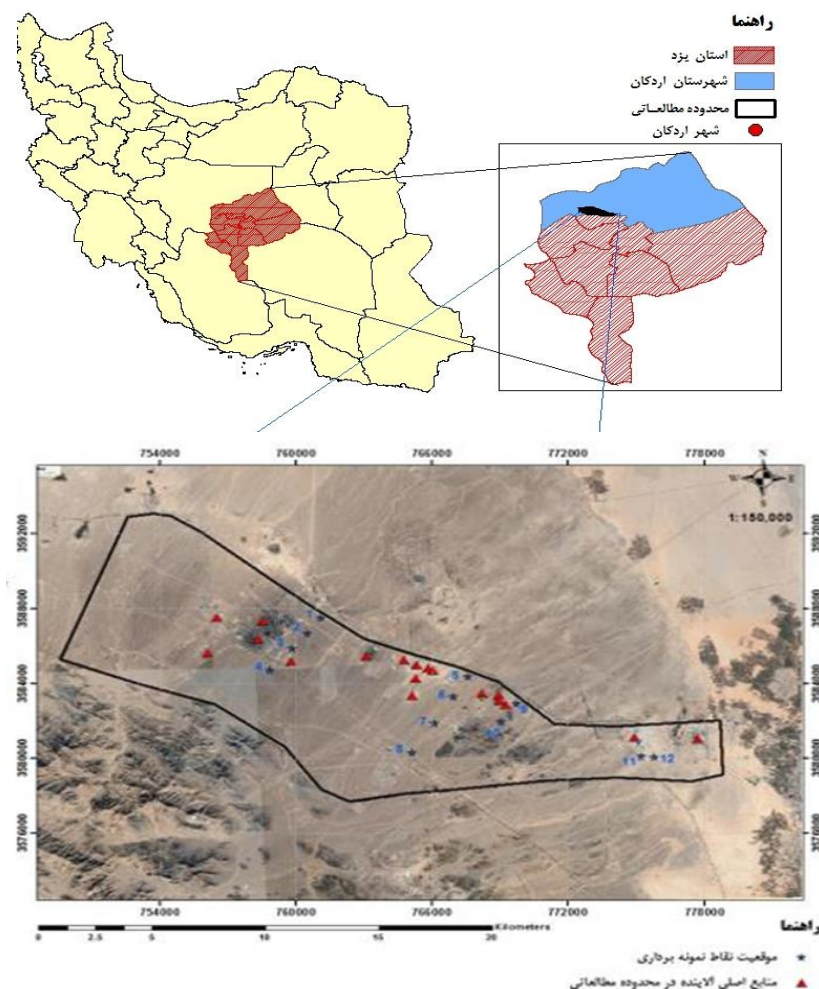
مورد نظر، میزان آلودگی خاک با فلزات سنگین در این منطقه به ترتیب $Cd < As < Ni < Cr < Pb$ بود. از نظر ریسک سلامت میزان، فلزات سنگین در خاک‌های سطحی این منطقه پتانسیل ریسک سرطان‌زا و غیر سرطان‌زا را برای افراد بالغ و کودکان نشان داد. همچنین، Taati و همکاران (۲۰۲۰) پژوهشی را با هدف ارزیابی سطح آلودگی، ریسک غیرسرطان‌زایی و سرطان‌زایی فلزات سنگین سرب، کادمیوم، مس، نیکل، روی و آرسنیک بر سلامت انسان در خاک‌های سطحی مناطق صنعتی اراک انجام دادند. مقادیر فاکتور غنی‌شدگی نمونه‌های خاک در مطالعه آن‌ها از بدون غنی‌شدگی تا غنی‌شدگی قابل توجه متغیر بود. خطر غیرسرطانی برای کودکان و بزرگسالان در مسیر بلع بیشتر از جذب پوستی بود. همچنین خطر سرطان‌زایی آرسنیک برای کودکان و بزرگسالان بالاتر از حد قابل قبول به دست آمد. همچنین Kumar و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی به ارزیابی ریسک اکولوژیک و محیط‌زیستی فلزات سمی در خاک‌های سطحی مناطق صنعتی شهر دورگاپور هند پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که غلظت فلزات سرب، کادمیوم، کروم، آهن، مس، نیکل و آهن بالاتر از غلظت طبیعی جهانی است و مناطق صنعتی منابع اصلی آلودگی فلزات خاک در منطقه مورد مطالعه هستند.

با توجه به این که در سال‌های اخیر صنایع مختلفی نظیر کارخانه‌ها گندله‌سازی، فولاد، شیشه، کاشی و سرامیک و غیره در شهرستان اردکان استقرار یافته‌اند، بنابراین ضروری است تا ضمن سنجش میزان عناصر سمی خاک‌های سطحی پیرامون این صنایع، وضعیت آلودگی خاک بررسی شود و ریسک سلامت ناشی از آن مورد ارزیابی قرار گیرد. از این‌رو هدف اصلی این تحقیق، بررسی آلودگی خاک سطحی اطراف مناطق صنعتی به فلزات سنگین از لحاظ ارزیابی ریسک اکولوژیک و سلامت انسان است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری: منطقه مورد مطالعه از لحاظ تقسیمات کشوری در استان یزد و در شهرستان اردکان قرار دارد. شهر اردکان با مساحت ۲۸۶۸ هکتار در طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی واقع شده است. محدوده مطالعاتی در شمال غربی شهر اردکان، با مساحت تقریبی ۲۰۰۰۰ هکتار و در بین طول‌های جغرافیایی ۵۳ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی واقع شده است. شکل ۱، موقعیت محدوده مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. انتخاب تعداد و موقعیت نمونه‌های خاک به روش سیستماتیک تصادفی بوده است. بر این اساس، منطقه مورد مطالعه به شبکه‌های $1/5 \times 1/5$ کیلومتر تقسیم‌بندی و محل تلاقی شبکه‌ها به عنوان موقعیت نقاط نمونه‌برداری انتخاب گردید و با حذف تعدادی از نقاط انتخابی که در مکان‌های غیرقابل دسترس (زمین محل استقرار صنایع، مناطق صعب‌العبور و مناطق نظامی) قرار گرفته بودند، با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب مکانی (GPS) به موقعیت ۱۲ نقطه مراجعه و نسبت به نمونه‌برداری اقدام شد (جدول ۱). در منطقه مطالعاتی با توجه به هدف اصلی این پژوهش، پس از شناسایی منابع آلاینده احتمالی، طی بازدید مقدماتی از مناطق صنعتی، نقاط نمونه‌برداری خاک مشخص و نقشه اولیه نمونه‌برداری تهیه شد.

جمع‌آوری و آنالیز نمونه‌ها: تعداد ۱۲ نمونه خاک از عمق ۵-۱۰ سانتی‌متری خاک منطقه مورد مطالعه تهیه و در کیسه‌های پلاستیکی در بسته جمع‌آوری گردید. برای برداشت هر نمونه نهایی، در هر ایستگاه از گوشه‌های مربع به فاصله ۲ متری، نمونه‌برداری شد که پس از مخلوط کردن چهار نمونه، یک نمونه معرف برای هر ایستگاه به وزن یک کیلوگرم به دست آمد. در آزمایشگاه ابتدا قطعات چوبی و فلزی، برگ درختان، شیشه و سایر مواد ناخواسته از نمونه‌ها جدا شدند و نمونه‌ها را از الک ۲ میلی‌متر، و پس از خرد کردن از الک ۶۳ میکرون عبور داده شدند، سپس نمونه‌ها به کیسه‌های ضخیم کوچک و بی‌رنگ منتقل و کدگذاری شدند. جهت هضم نمونه‌ها؛ به یک گرم از هر نمونه، مخلوطی شامل هیدروفلوریک اسید، پرکلریک اسید و نیتریک اسید اضافه شد و سپس در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون مدل Microwave حرارت داده شد. سپس محلول حاصل توسط کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف و با آب دو بار تقطیر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد (Davodpour et al., 2019). بعد از ساخت محلول مادر و استاندارد نمک عناصر مورد نظر، و کالیبره کردن دستگاه ICP-OES مدل ES-۷۱ غلظت عناصر سرب، آرسنیک، کادمیوم و نیکل در طول موج‌های مشخص توسط دستگاه در ۳ تکرار اندازه‌گیری شدند. کنترل کیفیت و درصد بازیابی با استفاده از مواد استاندارد (SRM) SQC-۰۰۱ ساخت شرکت سیگما آلد ریچ اسپانیا انجام شد (Lu et al., 2010).



شکل ۱. موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

جدول ۱. توصیف مکانی نقاط نمونه‌برداری خاک محدوده مطالعاتی و مختصات جغرافیایی آن‌ها

ایستگاه نمونه‌برداری	X	Y	توضیحات
۱	۷۶۱۰۹۰	۳۵۸۷۵۱۷	در محدوده کارخانه فولاد ارفع، گندله‌سازی
۲	۷۶۰۵۰۹	۳۵۸۶۶۹۹	در محدوده کارخانه فولاد ارفع، گندله‌سازی
۳	۷۵۹۸۲۱	۳۵۸۵۸۸۸	در محدوده کارخانه فولاد ارفع، گندله‌سازی، شرکت آهن اسفنجی
۴	۷۵۸۸۴۰	۳۵۸۴۷۳۲	در محدوده کارخانه گندله‌سازی، شرکت آهن اسفنجی، گود تخلیه ضایعات
۵	۷۶۷۵۷۵	۳۵۸۴۳۹۸	حداصل کارخانه‌های کاشی و کارخانه‌های فولاد
۶	۷۶۶۹۴۷	۳۵۸۳۳۰۸	حداصل کارخانه‌های کاشی و کارخانه‌های فولاد
۷	۷۶۶۰۸۹	۳۵۸۱۸۸۱	حداصل کارخانه‌های کاشی و کارخانه‌های فولاد
۸	۷۶۵۰۹۴	۳۵۸۰۳۳۲	حداصل کارخانه‌های کاشی و کارخانه‌های فولاد
۹	۷۶۹۷۰۶	۳۵۸۲۹۴۱	در محدوده کارخانه‌های فولاد
۱۰	۷۶۹۰۳۰	۳۵۸۱۹۶۱	در محدوده کارخانه‌های فولاد
۱۱	۷۷۵۲۳۸	۳۵۸۰۱۲۳	محدوده کارخانه شیشه
۱۲	۷۷۵۷۸۸	۳۵۸۰۰۷۷	حداصل کارخانه شیشه و شهرک صنعتی

محاسبه فاکتور غنی‌شدگی $(EF)^2$: ضریب غنی‌شدگی در تحلیل‌های محیط‌زیستی به‌عنوان یکی از عوامل مهم ارزیابی ریسک آلودگی خاک به عناصر سنگین شناخته می‌شود و برای تعیین شدت آلودگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این شاخص، نرمال‌سازی عنصر مورد نظر نسبت به یک عنصر مرجع که کمترین تغییر را در محیط دارد و تحت تأثیر آلودگی‌های انسانی قرار ندارد، انجام می‌گیرد (Redwan and Rammlmair, 2017). در مطالعه حاضر عنصر اسکاندیوم به‌عنوان عنصر مرجع در نظر گرفته شد. این

جدول ۲. رابطه شاخص درجه ریسک آلودگی

شاخص خطر اکولوژیک (PERI)	PERI < ۶۵	۶۵ ≤ PERI < ۱۳۰	۱۳۰ ≤ PERI < ۲۶۰	PERI ≥ ۲۶۰
خطر آلودگی	کم	متوسط	قابل توجه	زیاد

ضریب بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$EF = \frac{(C_n/C_{Ref}) Sample}{(B_n/B_{Ref}) Background} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن C_n : غلظت فلز هدف در نمونه خاک و C_{Ref} : غلظت فلز مرجع در نمونه خاک، B_n : غلظت فلز مورد نظر در ترکیب زمینه و B_{Ref} : غلظت فلز مرجع در ترکیب زمینه است. مقدار عامل غنی‌شدگی کمتر از ۱ به‌عنوان زمین‌زاد یا بدون غنی‌شدگی، بین ۱-۳ غنی‌شدگی کم، ۳-۵ غنی‌شدگی متوسط، ۵-۲۵ غنی‌شدگی زیاد و بالاتر از ۲۵ غنی‌شدگی بسیار بالا را نشان می‌دهد (Man et al., 2022).

شاخص پتانسیل خطر اکولوژیک^۳ (PERI): شاخص پتانسیل خطر اکولوژیک به‌منظور ارزیابی خطرات بالقوه بر محیط‌زیست از طریق غلظت فلزات در خاک بکار می‌رود که با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n C_f^i \times T_r^i \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن C_f^i : فاکتور آلودگی برای عنصر i و T_r^i : فاکتور سمیت بیولوژیکی عناصر مورد نظر است. E_r^i : پتانسیل خطر اکولوژیک هر عنصر و PERI: خطر اکولوژیک مجموع عناصر مورد مطالعه را نشان می‌دهد (Kowalska et al., 2016). براساس این شاخص، درجه ریسک آلودگی در چهار سطح رده‌بندی می‌شود که در جدول ۲ ارائه شده است:

ارزیابی ریسک بر سلامت انسان: در این مطالعه جهت ارزیابی ریسک بر سلامت انسان از مدل ارائه‌شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا استفاده شد که یک دستورالعمل جامع در این زمینه است (USEPA, 2001). ارزیابی ریسک سلامت از خاک‌های سطحی در مناطق شهری و صنعتی برای تعیین کمیت خطرات سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی فلزات سنگین برای انسان از سه مسیر بلع^۴، جذب پوستی^۵ و تنفس^۶ مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت برآورد اثرات غیرسرطان‌زا از مسیرهای مختلف مواجهه (مصرف، جذب پوستی و تنفس ذرات خاک) از ضریب خطر^۷ (HQ) استفاده می‌شود. اثرات غیرسرطانی از مسیرهای بلع (جذب گوارشی)، تنفس و جذب پوستی به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۳، ۴ و ۵ به‌دست می‌آید (USEPA, 2001; Hu et al., 2017):

$$CDI_{ing-nc} = \frac{C \times Ing R \times EF \times ED}{BW \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$CDI_{inh-nc} = \frac{C \times In R \times EF \times ED}{BW \times AT_{nc} \times PEF} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$CDI_{Dermal-nc} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS_d \times EF \times ED}{BW \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad \text{رابطه ۵}$$

برآورد اثرات سرطانی از مسیرهای بلع، تنفس و پوست به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۶، ۷ و ۸ به‌دست می‌آید (USEPA, 2001; Man et al., 2022):

$$CDI_{ing-ca} = \frac{C \times Ing R_{adj} \times EF}{AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad \text{رابطه ۶}$$

^۲Enrichment Factor

^۳Potential Ecological Risk Index

^۴Ingestion

^۵Dermal

^۶Inhalation

^۷Hazard Quotient

جدول ۳. تعاریف و مقادیر متغیرهای بکار رفته در رابطه‌های ارزیابی خطر سرطانی و غیرسرطانی

متغیر	واحد	مقدار		تعریف متغیر
		بزرگسالان	کودکان	
ABS _d	-	۰/۰۰۱ : برای همه فلزات و ۰/۰۳ : برای آرسنیک		فاکتور جذب پوستی (به‌ویژه شیمیایی)؛ که برای هر فلز جداگانه تعریف شده است
AF	mg/cm ²	۰/۷	۰/۲	فاکتور چسبندگی پوست برای گرد و غبار
AT _{nc}	day	ED × ۳۶۵	ED × ۳۶۵	زمان متوسط برای اثرات غیر سرطانی‌زایی
AT _{ca}	day	LT × ۳۶۵	-	زمان متوسط برای اثرات سرطانی‌زایی
BW	kg	۵۵/۹	۱۸/۷	وزن بدن
LT	yr	۷۱/۱۵	-	متوسط عمر
C	μg/g	مقادیر فلزات	مقادیر فلزات	غلظت فلز در خاک
FI	-	۰/۲	۰/۲	درصد جذب
ED	yr	۳۴	۳	دوره زمان مواجهه
EF	day/yr	۳۶۵	۳۶۵	تعداد مواجهه
Ing R	mg/d	۱۰۰	۱۵۱/۹	میزان بلع
Ing R _{adj}	mg	۱۱۳	-	میزان جذب خاک
In R _{air}	yr/kg/d	۲۰	۵	میزان تنفس
PEF	m ³ /kg	۱/۳۶×۱۰ ^۹	۱/۲×۱۰ ^۹	فاکتور انتشار ذرات
SA	m ²	۵۷۰۰	۲۸۰۰	سطحی از پوست که در تماس با خاک قرار می‌گیرد

جدول ۴. مقادیر RfD (mg/kg/day) فلزات با اثر غیر سرطانی‌زایی و CSF برای عناصر با خاصیت سرطانی‌زایی

پارامتر/عناصر	سرب	آرسنیک	نیکل	کادمیوم
(mg/kg/day) RfD _{Ing} ^۱	۳/۵×۱۰ ^{-۳}	۳×۱۰ ^{-۴}	۲×۱۰ ^{-۲}	۱×۱۰ ^{-۳}
(mg/kg/day) RfD _{Inh} ^۲	۳/۵۲×۱۰ ^{-۳}	۳/۰۱×۱۰ ^{-۴}	۲×۱۰ ^{-۲}	۱×۱۰ ^{-۳}
(mg/kg/day) RfD _{Derm} ^۳	۵/۲۵×۱۰ ^{-۴}	۱/۲۳×۱۰ ^{-۴}	۵/۴×۱۰ ^{-۳}	۵×۱۰ ^{-۵}
CSF _{Ing} ^۴	۸/۵۰×۱۰ ^{-۳}	۱/۵	۱/۷	۶/۱
CSF _{Inh} ^۵	۴/۲۰×۱۰ ^{-۲}	۱۵	۸/۴×۱۰ ^{-۱}	۶/۳
CSF _{Derm} ^۶	۸/۵۰×۱۰ ^{-۳}	۳/۶۶	۴/۲۵	۶/۱

$$CDI_{inh-ca} = \frac{C \times EF \times FI \times ED \times InR_a}{PEF \times BW \times AT_{ca}} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$CDI_{Dermal-ca} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS_d \times EF \times ED}{AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad \text{رابطه ۸}$$

برآورد ضریب خطر (HQ) با استفاده از رابطه ۹ به‌دست می‌آید (برای اثرات غیر سرطانی برای هر مسیر مواجهه جداگانه محاسبه می‌شود):

$$HQ = \frac{CDI_{nc}}{RfD} \quad \text{رابطه ۹}$$

اگر برای هر یک از آلاینده‌ها مقدار HQ کمتر از یک شود بدین معنی است که خطر قابل توجهی از نظر سمی بودن ندارد. نسبت‌های بیش از یک برای HQ می‌تواند نشان‌دهنده احتمال وجود پتانسیل خطر باشد. شاخص ریسک (HI) مجموع چند مسیر مواجهه با آلاینده است. اگر HI < ۱ باشد، نشان‌دهنده وجود خطر سرطانی‌زایی است. اگر HI > ۱ باشد، نشان می‌دهد احتمال خطر بالا است. محاسبه شاخص ریسک (HI) برای اثرات غیر سرطانی از مجموع ضریب‌های خطر در مسیرهای مختلف مواجهه با استفاده از رابطه ۱۰ به‌دست می‌آید (USEPA, 2001; Man et al., 2022). مقادیر متغیرها در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

$$HI = \sum HQ = HQ_{ing} + HQ_{inh} + HQ_{dermal} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

محاسبه خطرات سرطانی از طریق رابطه ۱۱ به دست می آید:

$$Risk = CDI_{ca} \times CSF$$

رابطه ۱۱

که در آن میانگین دوز مصرف روزانه برای ایجاد سرطان (CDI_{ca}) و CSF فاکتور شیب دهانی است که برای هر فلز به صورت جداگانه تعریف شده است. محاسبه ریسک کلی برای اثرات سرطانی از مجموع شاخص های خطر در مسیرهای مختلف مواجهه با استفاده از رابطه ۱۲ به دست می آید:

$$Total Risk = \sum Risk = Risk_{ing} + Risk_{inh} + Risk_{dermat}$$

رابطه ۱۲

که در آن $Risk_{ing}$: شاخص خطر از مسیر بلع، $Risk_{inh}$: شاخص خطر از مسیر تنفس و $Risk_{dermat}$: شاخص خطر از مسیر جذب پوستی است. خطر سرطان زایی به عنوان احتمال پیشرفت یک فرد در هر نوع سرطان در تمام طول عمر به علت مواجهه با انواع آلاینده ها در نظر گرفته می شود. اگر مقدار $CR < 1 \times 10^{-6}$ باشد خطر سرطان زایی برای سلامت خاک می تواند قابل چشم پوشی باشد و در صورتی که $CR > 1 \times 10^{-6}$ باشد نشان دهنده احتمال خطر زیاد برای ابتلا به سرطان در انسان وجود دارد (USEPA, 2001; Man et al., 2022).

آنالیزهای آماری: تحلیل های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد. نرمال بودن داده ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد و از آنجایی که داده ها دارای توزیع نرمال بودند، از آزمون همبستگی پیرسون جهت بررسی ارتباط عناصر مورد مطالعه استفاده شد. سطح معنی داری ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

یافته های پژوهش و بحث

غلظت عناصر سمی در خاک منطقه مورد مطالعه: میانگین غلظت های اندازه گیری شده عناصر در ایستگاه های مورد مطالعه در جدول ۵ و آماره های توصیفی مربوط به آن ها در جدول ۶ ارائه شده است. براساس نتایج، میانگین غلظت عناصر آرسنیک، کادمیوم، نیکل و سرب در ۱۲ نمونه خاک سطحی به ترتیب ۹/۲۵، ۰/۳۴، ۴۶/۷۵ و ۳۶/۱۶ میکروگرم بر گرم به دست آمد. بنابراین روند میانگین غلظت عناصر به صورت $Ni > Pb > As > Cd$ بود. همان طور که در جدول ۶ نشان داده شده است، بیشترین غلظت اندازه گیری شده مربوط به عنصر نیکل (۵۶ میکروگرم بر گرم) و در نقطه نمونه برداری واقع در ایستگاه ۴ در اطراف کارخانه گندله سازی، شرکت آهن اسفنجی و گود تخلیه ضایعات بود. کمترین غلظت اندازه گیری شده نیز مربوط به عنصر کادمیوم (۰/۳۲ میکروگرم بر گرم) بدست آمد که عموماً در نمونه های جمع آوری شده در ایستگاه دورتر از صنایع اندازه گیری شده بود. همچنین ضریب تغییرات برای نشان دادن میزان تغییرپذیری عناصر در خاک مورد استفاده قرار می گیرد. اگر میزان $CV \leq 20\%$ باشد (تغییرپذیری کم)، $20\% < CV \leq 50\%$ (تغییرپذیری متوسط)، $50\% < CV \leq 100\%$ (تغییرپذیری زیاد) و $CV \geq 100\%$ (تغییرپذیری خیلی زیاد) را مشخص می نماید (Eziz et al., 2018). بر این اساس، در این مطالعه کادمیوم، نیکل و سرب دارای تغییرپذیری کم و آرسنیک تغییرپذیری متوسط را نشان می دهد.

همچنین جهت تعیین درجه آلودگی باید غلظت های عناصر اندازه گیری شده در منطقه مورد بررسی با غلظت شان در منطقه غیر آلوده (شاهد) مقایسه شوند. این فلزات در منطقه شاهد باید به صورت طبیعی در منطقه وجود داشته باشند و به عنوان یک عامل آلوده کننده تلقی نشوند. در این شرایط می توان نمونه های مطالعه شده را با آن ها مقایسه نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که میانگین همه عناصر بالاتر از مقادیر زمینه است. همچنین میانگین غلظت سرب و کادمیوم، از میانگین غلظت این عناصر در پوسته زمین بالاتر بودند (جدول ۶). این افزایش غلظت در برخی عناصر از قبیل نیکل و سرب نزدیک به سه برابر غلظت زمینه نیز رسیده بود.

براساس نتایج به دست آمده می توان بیان داشت که خاک های منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر آلودگی های ناشی از صنایع مستقر در منطقه قرار دارند. بررسی نتایج نشان داد که میانگین غلظت عناصر سرب و کادمیوم در نمونه های خاک ایستگاه های نمونه برداری در مقایسه با پوسته بالایی و میانگین خاک های جهانی غیر آلوده بیشتر است. میانگین غلظت عناصر در خاک منطقه مورد مطالعه برای عنصر نیکل و آرسنیک پایین تر از میانگین غلظت این فلزات در پوسته زمین و برای عناصر کادمیوم و سرب بالاتر است. بالاتر

جدول ۵. میانگین غلظت عناصر مورد مطالعه در ایستگاه‌های نمونه برداری (میکروگرم بر گرم)

ایستگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
عنصر	As	Cd	Ni	Pb								
As	۴/۶	۷/۵	۶/۷	۸/۸	۱۳/۱	۶/۱	۱۱	۱۰/۵	۶/۸	۸	۱۳/۹	۱۱
Cd	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۳۴
Ni	۴۸	۰/۴۳	۴۹	۵۶	۴۴	۵۴	۴۸	۴۸	۴۸	۵۱	۳۴	۳۸
Pb	۴۵	۰/۴۳	۳۸	۳۷	۳۵	۳۳	۲۹	۳۱	۳۷	۳۸	۳۸	۳۳

جدول ۶. آماره‌های توصیفی غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه

مقادیر	As	Cd	Ni	Pb
حداکثر ($\mu\text{g/g}$)	۱۳/۹	۰/۳۹	۵۶	۴۵
حداقل ($\mu\text{g/g}$)	۶/۱	۰/۳۲	۳۴	۲۹
میانگین ($\mu\text{g/g}$)	۹/۲۵	۰/۳۴	۴۶/۷۵	۳۶/۱۶
غلظت زمینه ($\mu\text{g/g}$)	۶/۹۰	۰/۲۴	۲۰	۹
میانگین پوسته زمین ^۲ ($\mu\text{g/g}$)	۱۳	۰/۱۱	۸۰	۱۴
انحراف میانگین	۰/۷۴	۰/۰۰۶۱	۱/۱۸۰	۱/۳۳
انحراف معیار	۲/۵۹	۰/۰۲۱	۶/۲۴	۴/۶۱
ضریب تغییرات (CV%)	۲۸	۵/۸۳	۱۳/۳۴	۱۲/۷۴

^۱(Siyahati Ardakani et al., 2018)

(۱۹۹۷L., et a Pais)

جدول ۷. نتایج ضریب همبستگی پیرسون بین عناصر در منطقه مورد مطالعه

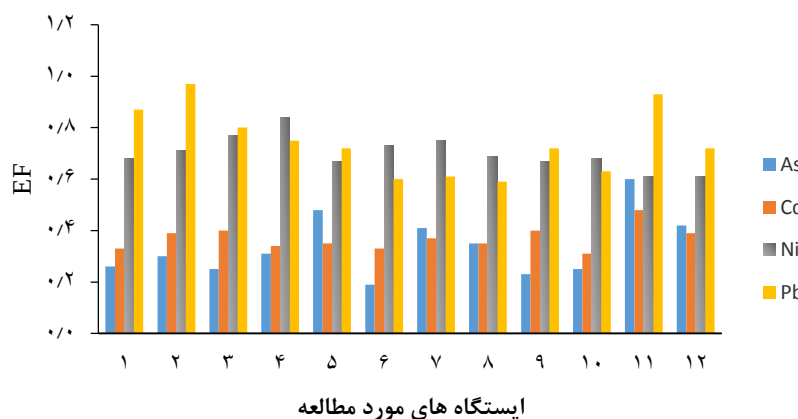
	Pb	As	Ni	Cd
Pb	۱			
As	-۰/۳۲۴	۱		
Ni	-۰/۱۱۹	-۰/۶۶۳*	۱	
Cd	۰/۰۱۴	-۰/۰۹۹	-۰/۲۸۸	۱

* معنی‌داری در سطح ۰/۰۵

بودن غلظت این فلزات می‌تواند نقش منابع انسانی یا مجتمع‌های فولاد را در آلودگی خاک منطقه مورد مطالعه را تأیید نماید. در این مطالعه غلظت سرب و کادمیوم بیشتر تحت تأثیر مجتمع‌های فولاد بوده و غلظت آرسنیک تحت تأثیر کارخانه‌های کاشی و شیشه بوده است. غلظت نیکل هم متأثر از منابع طبیعی و انسانی است (Sistani et al., 2017). مطالعات صورت گرفته توسط محققان دیگر هم بالا بودن غلظت عناصر کمیاب در خاک سطحی مناطقی که تحت تأثیر فعالیت‌های صنعتی و انسانی قرار دارند را نشان داده‌اند (Jiao e al., 2015; Moghtaderi et al., 2019). غلظت عناصر در ایستگاه‌های نمونه‌برداری اطراف صنایع فعال نشان از تأثیر صنایع بر آلودگی خاک سطحی دارد. در تحقیقی مشابه که در خاک‌های سطحی اطراف کارخانه فولاد خوزستان صورت گرفت حاکی از این بود که میزان آلودگی به فلزات سنگین در اطراف و پایین‌دست این کارخانه بیشتر از مناطق بالادست و با فاصله بیشتر است (Hormozinezhad et al., 2017). همچنین در مطالعه Sistani و همکاران (۲۰۱۷) میانگین غلظت‌های سرب و کادمیوم در خاک‌های اطراف صنایع فولاد کرمان بالاتر از میانگین پوسته زمین به‌دست آمد که نشان‌دهنده آلودگی خاک به این عناصر است. در پژوهش Man و همکاران (۲۰۲۲) توزیع فلزات اندازه‌گیری شده در خاک‌های سطحی شهر لینی چین به‌صورت الگوی $\text{Hg} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{V}$ به‌دست آمد. آن‌ها بیان نمودند که سطح آلودگی ناشی از این عناصر پایین است. از طرفی عناصر Cr، Ni، Pb و Zn از طریق منابع انسانی وارد خاک شده‌اند. آن‌ها با این وجود اقدامات کنترلی برای کاهش این عناصر خاک را ضروری دانستند. نتایج بررسی همبستگی بین عناصر در جدول ۷ ارائه شده است. تنها همبستگی معنی‌دار منفی بین نیکل و آرسنیک ($r = -۰/۶۶۳$ و $P = ۰/۰۰۱$) مشاهده شد. در مورد بقیه عناصر هیچ گونه ارتباط معنی‌دار از لحاظ

آماري وجود نداشت که می‌تواند بیانگر منبع انتشار متفاوت آن‌ها باشد. برخی محققان از آنالیز همبستگی پیرسون برای بررسی ارتباط بین عناصر و منشایابی استفاده نموده‌اند (Jiang et al., 2014; Jeao et al., 2015).

ضریب غنی‌شدگی (EF): ضریب غنی‌شدگی برای عناصر مورد بررسی در نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های مطالعاتی محاسبه شد (شکل ۲). آماره‌های توصیفی مربوط به این شاخص در جدول ۸ ارائه شده است. نتایج نشان داد که متوسط ضریب غنی‌شدگی محاسبه شده برای عناصر مورد مطالعه به صورت $As < Cd < Ni < Pb$ است. به عبارتی می‌توان عنوان نمود بالاترین میزان غنی‌شدگی خاک با فلزات براساس شاخص EF مربوط به سرب (۰/۹۷) و کمترین نیز مربوط به آرسنیک (۰/۱۹) است. براساس شاخص EF همه عناصر مورد مطالعه بدون غنی‌شدگی ($EF > 1$) هستند. اما بررسی نتایج ضریب غنی‌شدگی نشان داد که میزان غلظت عنصر سرب در نمونه‌های خاک ایستگاه ۲ (مربوط به فعالیت کارخانه‌های گندله‌سازی و فولاد ارفع) نزدیک به یک است و به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است. در همین راستا، مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با مطالعات Siyahati Ardakani و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان می‌دهد که غلظت سرب در سال ۱۴۰۰ نسبت به سال ۱۳۹۵ در این منطقه افزایش داشته است؛ اما در مورد سایر عناصر تغییر زیادی دیده نشد. Özkul و همکاران (۲۰۱۶) در خاک‌های اطراف نیروگاه حرارتی کوتاهی ترکیه مقدار EF را به ترتیب برای فلزات آرسنیک، کادمیم، کروم، مس، جیوه، نیکل و سرب ۳/۵، ۹۵/۳،



شکل ۲. ضریب غنی‌شدگی (EF) نمونه‌های خاک در ایستگاه‌های نمونه‌برداری نسبت به اسکندریوم

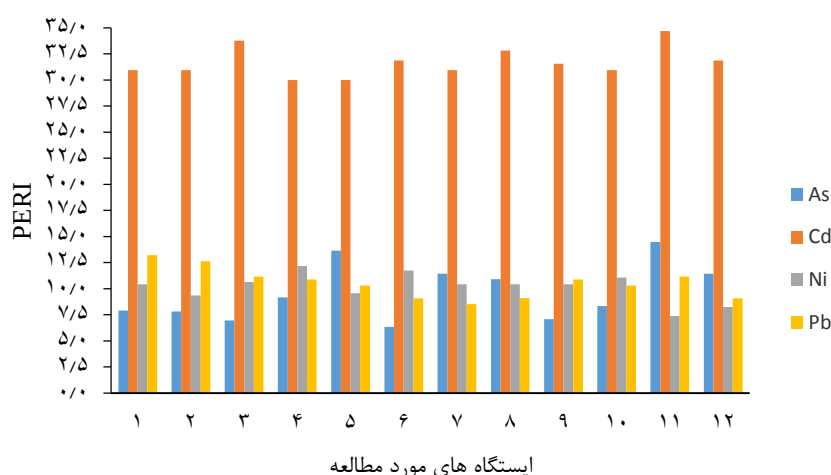
جدول ۸. آماره‌های توصیفی شاخص ضریب غنی‌شدگی عناصر مورد مطالعه

عناصر	As	Cd	Ni	Pb
مقادیر				
حداکثر	۰/۶۰	۰/۴۸	۰/۸۴	۰/۹۷
حداقل	۰/۱۹	۰/۳۱	۰/۶۱	۰/۵۹
میانگین	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۷۰	۰/۷۴

۱۷/۶، ۲/۲، ۶۴/۳، ۴۴/۵، ۱۱/۱ و ۴/۷ گزارش کردند که بیشترین EF مربوط به آرسنیک بود.

شاخص پتانسیل خطر اکولوژیک (PERI)

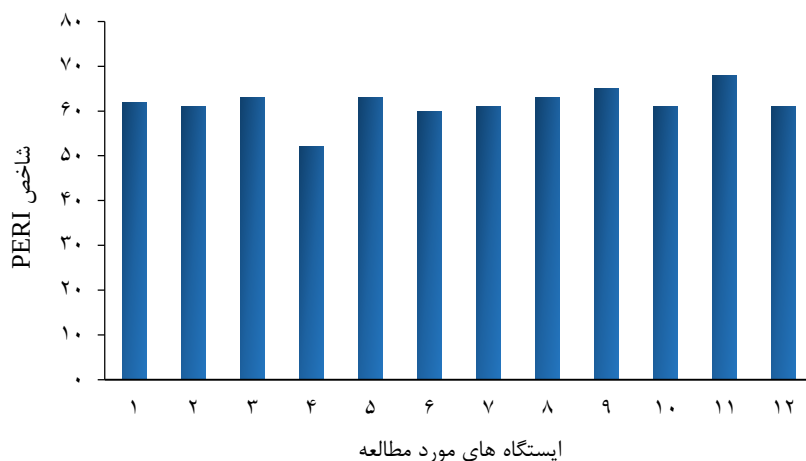
پتانسیل خطر اکولوژیک هر عنصر (E_i^I): نتایج محاسبه شاخص PERI عناصر مورد مطالعه به تفکیک ایستگاه‌های مطالعاتی در شکل ۳ ارائه شده است. در مورد تمام عناصر، خطر بالقوه اکولوژیک در تمام ایستگاه‌های اندازه‌گیری در رده ریسک کم قرار داشتند. به طور میانگین، بیشترین میزان محاسبه شده این شاخص برای هر عنصر به ترتیب متعلق به عناصر $As < Ni < Pb < Cd$ بود (جدول ۹). شاخص PERI برای ایستگاه ۹ و ۱۱، درجه ریسک آلودگی متوسط ($65 \leq PERI < 130$) و برای سایر ایستگاه‌ها درجه ریسک آلودگی کم ($PERI < 65$) را نشان داد (شکل ۴). در مطالعه و همکاران (۲۰۱۶) نیز شاخص پتانسیل خطر اکولوژیک (PERI) فقط برای ایستگاه ۹ (محدوده کارخانه فولاد) و ۱۱ (اطراف کارخانه شیشه) درجه ریسک آلودگی متوسط را نشان داد و برای سایر



شکل ۳. پتانسیل خطر اکولوژیک هر عنصر در ایستگاه‌های نمونه‌برداری

جدول ۹. آماره‌های توصیفی شاخص پتانسیل خطر اکولوژیک عناصر مورد مطالعه

عناصر	As	Cd	Ni	Pb
مقادیر				
حداکثر	۱۴/۴۷	۳۶/۵۶	۱۲/۱۷	۱۳/۲۳
حداقل	۶/۳۵	۳۰	۷/۳۹	۸/۵۲
میانگین	۹/۶۳	۳۲/۱۰	۱۰/۱۶	۱۰/۶۳



شکل ۴ - شاخص پتانسیل خطر اکولوژیک (PERI) در ایستگاه‌های نمونه‌برداری

ایستگاه‌ها درجه ریسک آلودگی کم به دست آمد.

ارزیابی ریسک سلامت

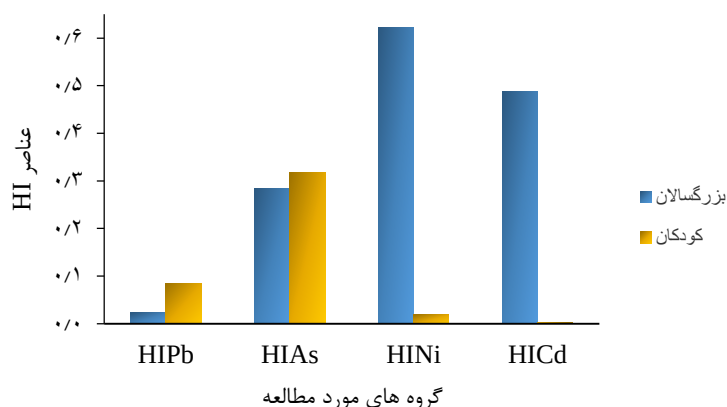
جذب روزانه فلزات (CDI) و ضریب خط (HQ): برای تخمین خطر سلامتی احتمالی ناشی از بلع، تنفس و جذب پوستی خاک برای انسان، مقادیر جذب روزانه فلزات و ضریب خطر برای عناصر کادمیم، نیکل، آرسنیک و سرب در نمونه‌های خاک ایستگاه‌های نمونه‌برداری محاسبه گردید. مقادیر جذب روزانه فلزات و خطر غیر سرطان‌زایی آن‌ها در هر یک از مسیرها برای هر دو گروه سنی برای نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه در جدول ۱۰ ارائه شده است. بیش‌ترین میانگین جذب روزانه عناصر در

جدول ۱۰. جذب روزانه فلزات (CDI) (mg/kg/day) و مقادیر HQ از مسیرهای بلع، تنفس و جذب پوستی برای بزرگسالان و کودکان

فلز	CDI _{Ing}		CDI _{Inh}		CDI _{Derm}		HQ _{Ing}		HQ _{Inh}		HQ _{Derm}	
	بزرگسال	کودک	بزرگسال	کودک	بزرگسال	کودک	بزرگسال	کودک	بزرگسال	کودک	بزرگسال	کودک
Pb	$6/46 \times 10^{-3}$	$2/9 \times 10^{-3}$	$9/51 \times 10^{-4}$	$7/11 \times 10^{-4}$	$2/58 \times 10^{-3}$	$1/08 \times 10^{-3}$	$0/184$	$0/083$	$2/70 \times 10^{-3}$	$2/02 \times 10^{-3}$	$0/004$	$0/002$
As	$1/65 \times 10^{-3}$	$7/51 \times 10^{-4}$	$2/44 \times 10^{-4}$	$5/52 \times 10^{-4}$	$4/82 \times 10^{-3}$	$8/31 \times 10^{-3}$	$0/055$	$0/050$	$8/11 \times 10^{-3}$	$1/8 \times 10^{-3}$	$0/330$	$0/067$
Ni	$8/36 \times 10^{-3}$	$3/7 \times 10^{-3}$	$1/32 \times 10^{-4}$	$9/19 \times 10^{-4}$	$3/33 \times 10^{-3}$	$1/4 \times 10^{-3}$	$0/004$	$0/018$	$6/14 \times 10^{-3}$	$4/59 \times 10^{-3}$	$0/617$	$0/000$
Cd	$6/13 \times 10^{-4}$	$2/78 \times 10^{-4}$	9×10^{-11}	$6/7 \times 10^{-11}$	$2/44 \times 10^{-3}$	$1/03 \times 10^{-4}$	6×10^{-3}	$0/002$	$9/01 \times 10^{-4}$	$6/73 \times 10^{-4}$	$0/488$	$0/002$

هر دو گروه سنی برای فلزات سرب و آرسنیک در مسیر بلع و کمترین میزان در مسیر تنفس بود. میزان جذب روزانه عناصر نیکل و کادمیم برای بزرگسالان در مسیر جذب پوستی بیش‌تر از تنفس و بلع، و برای کودکان در مسیر بلع بیش‌تر از جذب پوستی و تنفس بوده است که دلیل آن شاید به علت تمایل به خوردن مواد غیر غذایی یا مکیدن دست و انگشتان در کودکان است (Wei et al., 2015). مقادیر میانگین جذب روزانه تمامی فلزات و خطر غیر سرطان‌زایی آن‌ها در هر مسیر از خاک منطقه مورد مطالعه در جدول ۱۰ ارائه شده است.

محاسبه شاخص خطر (HI): برای محاسبه و تعیین مقدار شاخص خطر عناصر کادمیم، نیکل، آرسنیک و سرب از مجموع ضریب خطر (بلع، تنفس و جذب پوستی) استفاده شده است. مقادیر شاخص خطر برای نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است. بیشترین و کمترین میزان میانگین HI در کودکان به ترتیب مربوط به عناصر آرسنیک و کادمیم ($0/318$ و $0/002$) و بیشترین و کمترین مقدار میانگین HI در بزرگسالان به ترتیب در مورد نیکل و سرب ($0/622$ و $0/023$) به دست آمد.



شکل ۵. میانگین HI فلزات مورد مطالعه برای بزرگسالان و کودکان

جدول ۱۱. ارزیابی ریسک خطر سرطان‌زایی فلزات مورد مطالعه در خاک

ریسک کل	CR		CDI _{Derm-ca}		CDI _{Inh-ca}	CDI _{Ing-ca}	فلز
	Risk _{Derm}	Risk _{Inh}	Risk _{Ing}				
۹/۰۲×۱۰ ^{-۷}	۴/۱۳×۱۰ ^{-۷}	۲/۶۹×۱۰ ^{-۱۱}	۴/۸۸×۱۰ ^{-۷}	۴/۸۶×۱۰ ^{-۵}	۶/۴۱×۱۰ ^{-۱۰}	۵/۷۴×۱۰ ^{-۵}	<i>Pb</i>
۱/۱۲×۱۰ ^{-۳}	۱/۱×۱۰ ^{-۳}	۱/۱۲×۱۰ ^{-۸}	۱/۷۸×۱۰ ^{-۵}	۳/۰۲×۱۰ ^{-۴}	۷/۵۲×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۱۹×۱۰ ^{-۵}	<i>As</i>
۳/۹۳×۱۰ ^{-۴}	۲/۶۷×۱۰ ^{-۴}	۳/۹۳×۱۰ ^{-۹}	۱/۲۶×۱۰ ^{-۴}	۶/۲۹×۱۰ ^{-۵}	۴/۶۸×۱۰ ^{-۹}	۷/۴۲×۱۰ ^{-۵}	<i>Ni</i>
۳/۳۹×۱۰ ^{-۶}	۷/۵۵×۱۰ ^{-۸}	۹/۶۴×۱۰ ^{-۱۳}	۳/۳۱×۱۰ ^{-۶}	۴/۶۰×۱۰ ^{-۷}	۶/۰۷۸×۱۰ ^{-۱۲}	۵/۴۳×۱۰ ^{-۷}	<i>Cd</i>

نتایج به‌دست آمده برای بزرگسالان و کودکان نشان می‌دهد که برای تمامی فلزات سنگین مورد مطالعه مقدار $HI < 1$ می‌باشد که بیانگر این است که پتانسیل ایجاد اثرات خطر غیر سرطان‌زا وجود ندارد. در مطالعات دیگر (Zhaoyong et al., 2019; Taati et al., 2020) براساس ارزیابی خطر، مسیرهای بلع، جذب پوستی و تنفس به‌ترتیب بیشترین خطر را در مواجهه با فلزات سنگین داشتند. در تحقیقی که توسط Moghtaderi و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد، مقدار HI برای کودکان و بزرگسالان به‌صورت $Cr > As > Cd > Pb > Ni > Cu > Zn$ بود. برای بزرگسالان مقدار HI برای همه فلزات کمتر از یک به‌دست آمد. برای کودکان نیز مقدار HI برای فلزات As, Cr, Cd و Ni بزرگتر از یک محاسبه شد.

محاسبه ریسک سرطان‌زایی (CR)^۸: در این پژوهش مقدار ریسک سرطان‌زایی برای عناصر آرسنیک، کادمیوم، نیکل، سرب و کروم محاسبه شده است (جدول ۱۱). در ضمن ریسک سرطان‌زایی در طول زندگی یک فرد با متوسط عمر ۷۱/۱۵ سال و میانگین وزن ۷۰ کیلوگرم محاسبه شد. مقدار CR عنصر سرب برای بزرگسالان در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری از طریق بلع، تنفس و جذب پوستی در محدوده قابل چشم‌پوشی ($CR < 1 \times 10^{-6}$) است. مقادیر CR عناصر نیکل و آرسنیک در بزرگسالان در تمامی ایستگاه‌های نمونه‌برداری از مسیرهای بلع و جذب پوستی، احتمال خطر سرطان‌زایی برای انسان ($CR > 1 \times 10^{-6}$) را دارد و از طریق تنفس در محدوده قابل چشم‌پوشی است. مقادیر CR عنصر کادمیوم در بزرگسالان از مسیرهای تنفس و جذب پوستی در محدوده قابل چشم‌پوشی و از طریق بلع، خطر زیاد سرطان‌زایی در انسان را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه روند میانگین غلظت عناصر به‌صورت $Cd < As < Pb < Ni$ به‌دست آمد. بررسی غلظت میانگین عناصر در نمونه‌های خاک محدوده مورد مطالعه نشان داد که عنصر نیکل بیشترین مقدار را به‌خود اختصاص داد؛ در حالی که کادمیوم کم‌ترین میانگین غلظت را در بین عناصر انتخابی در خاک نشان داد. میانگین غلظت‌های اندازه‌گیری شده تمامی عناصر بیشتر از مقدار غلظت آن‌ها

^۸Cancer Risk

در خاک زمینه است. هر چند خاک‌های سطحی اطراف مناطق صنعتی شهر اردکان میزان غلظت عناصر سمی به گونه‌ای نیست که در حال حاضر برای سلامت گروه‌های مورد مطالعه خطری را نشان دهد، اما با توجه به روند رو به رشد صنایع در محدوده مورد مطالعاتی و استناد به این تحقیق، تداوم این شرایط در منطقه می‌تواند غلظت عناصر سمی را در خاک به سرعت افزایش داده و اثرات محیط‌زیستی جبران‌ناپذیری روی پوشش گیاهی منطقه، تشدید فرسایش بادی و افزایش غلظت مواد معلق حاوی عناصر سمی در پایین دست منطقه و به سمت شهر اردکان به دنبال داشته باشد که این امر موجب به خطر افتادن سلامت افراد می‌گردد. بدیهی است که برای گروه سنی کودکان نسبت به بزرگسالان ریسک خطر عناصر آرسنیک و سرب بالاتر است. بنابراین بهتر است از هم اکنون اقدامات پیشگیرانه مانند مدیریت مناسب‌تر پسماندهای واحدهای صنعتی موجود، کاهش گازهای وارد شده به محیط از طریق صنایع و بکارگیری روش‌های گیاه پالایی در محیط‌های آلوده‌تر در نظر گرفته شود. در پایان پیشنهاد می‌شود با توجه به اینکه سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا برای ارزیابی ریسک فلزات در خاک، پایش عناصر سمی را ضروری دانسته است، سنجش آلودگی و ارزیابی خطر بر سلامت دیگر عناصر مانند جیوه نیز در تحقیقات آتی مدنظر قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

مقاله زیر بخشی از نتایج پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته علوم و مهندسی محیط‌زیست دانشگاه اردکان می‌باشد. نویسندگان از کلیه کسانی که در انجام این پژوهش یاری رساندند، کمال تشکر را دارند.

References

- Agyeman, P.C., John, K., Kebonye, N.M., Borůvka, L., Vašát, R., Drábek, O., Němeček, K., 2021. Human health risk exposure and ecological risk assessment of potentially toxic element pollution in agricultural soils in the district of Frydek Mistek, Czech Republic: a sample location approach. *Environmental Sciences Europe* 33(1), 1-25.
- Davodpour, R., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Abdi, N., 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.
- Eziz, M., Mohammad, A., Mamut, A., Hini, G., 2018. A human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils of Yanqi Basin, Silk Road Economic Belt, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 24(5), 1352-1366.
- Hormozinezhad, F., Zarasavandi, A., Rastmanesh, F., 2017. Contamination assessment of heavy metals in the soils around Khouzestan Steel Company (KSC)(Ni, Mn, Pb, Fe, Zn, Cr). *Journal of Economic Geology* 8(2), 415-29.
- Hu, B.F., Wang, J.Y., Jin, B., Li, Y., Shi, Z., 2017. Assessment of the potential health risks of heavy metals in soils in a coastal industrial region of the Yangtze River Delta. *Environment Science and Pollution* 24, 19816-19826.
- Jamal, A., Delavar, M.A., Naderi, A., Nourieh, N., Medi, B., Mahvi, A.H., 2019. Distribution and health risk assessment of heavy metals in soil surrounding a lead and zinc smelting plant in Zanjan, Iran. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 25(4), 1018-33.
- Jiang, X., Lu, W., Zhao, H., Yang, Q., Yang, Z., 2014. Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy-metal pollution around coal gangue dump. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, 1599-610.
- Jiao, X., Teng, Y., Zhan, Y., Wu, J., Lin, X., 2015. Soil heavy metal pollution and risk assessment in Shenyang industrial district, Northeast China. *PloS One* 10(5), e0127736.
- Kowalska, J., Mazurek, R., Gąsiorek, M., Setlak, M., Zaleski, T., Waroszewski, J., 2016. Soil pollution indices conditioned by medieval metallurgical activity-A case study from Krakow (Poland). *Environmental Pollution* 218, 1023-1036.
- Kumar, K., Nayek, S., Gope, M., Kumar, A., Saha, A., 2020. Sources evaluation, ecological and health risk assessment of potential toxic metals (PTMs) in surface soils of an industrial area, India. *Environmental Geochemistry and Health* 42(12), 4159-4180.

- Lu, X., Wang, L., Li, L.Y., Lei, K., Huang, L., Kang, D., 2010. Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China. *Journal of Hazardous Materials* 173(1-3), 744-749.
- Man, Q., Xu, L., & Li, M., 2022. Source Identification and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil: A Case Study of Lintancang Plain, Northeast China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(16), 10259.
- Moghtaderi, T., Mahmoudi, S., Shakeri, A., Masihabadi, M.H., 2019. Contamination Evaluation, Health and Ecological risk index assessment of Potential Toxic Elements in the surface soils Case Study: Central Part of Bandar Abbas County. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 8(4), 51-66.
- Mohammadi, A., Zarei, A., Esmaeilzadeh, M., Taghavi, M., Yousefi, M., Yousefi, Z., Sedighi, F., Javan, S. 2019. Assessment of heavy metal pollution and human health risks assessment in soils around an industrial zone in Neyshabur, Iran. *Biological Trace Element Research* 195, 343-352
- Özkul, C., 2016. Heavy metal contamination in soils around the Tunçbilek thermal power plant (Kütahya, Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment* 188(5), 1-12.
- Pais, I., Jones, J.R., Benton, J., 1997. *The Handbook of Trace Elements*. Boca Raton, CRC Press, 240 p.
- Ravankhah, N., Mirzaei, R., Masoum, S., 2016. Human health risk assessment of heavy metals in surface soil. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences* 26(136), 109-120. (in Persian)
- Redwan, M., Rammlmair, D., 2017. Flood hazard assessment and heavy metal distributions around Um Gheig mine area, Eastern Desert, Egypt. *Journal of Geochemical Exploration* 173, 64-75.
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D., 2018. *Soil pollution: a hidden reality*. Italy, FAO, 2018.
- Sistani, N., Moeinaddini, M., Khorasani, N., Hamidian, A.H., Ali-Taleshi, M.S., R.A.Y., 2017. Heavy metal pollution in soils nearby Kerman steel industry: metal richness and degree of contamination assessment. *Iranian Journal of Health and Environment* 10, 75-86. (in Persian)
- Siyahati Ardakani, G., Mirsanjari, M., Azimzadeh, H., Solgi, E., 2018. The environmental assessment of some heavy metals in surface soil around pelletizing industries and Ardakan steel. *Iranian Journal of Health and Environment* 11(3), 449-464. (In Persian)
- Taati, A., Salehi, M.H., Mohammadi, J., Mohajer, R., 2020. Assessment of pollution level, non-carcinogenic and carcinogenic risk of heavy metals on human health in surface soils of Arak industrial areas, Iran. *Iranian Journal of Health and Environment* 13(2), 335-348. (in Persian)
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2020. *Integrated Risk Information System (IRIS)*, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- USEPA, 2001. *Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites*. Washington, DC, USA.
- Wei, X. Gao, B. Wang, P. Zhou, H., Lu, J., 2015. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China. *Ecotoxicology and environmental safety*. 112:186-192.
- Zhaoyong, Z., Mamat, A., Simayi, Z.J.E.S., Research, P., 2019. Pollution assessment and health risks evaluation of (metalloid) heavy metals in urban street dust of 58 cities in China. *Environmental Science and Pollution Research* 26(1), 126-140.

