Research Article

Agricultural Engineering., 49(2) (2026) 279- 295

ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/AGEN.2026.52581.1818

ISSN (E): 2588-5944

Assessment of Heavy Metal Concentrations and Pollution Indices in Surface Agricultural Soils of Selected Areas of Isfahan Province, Iran

Sh. Jorkesh Varnoosfaderani [1], M.H. Salehi [2]* and R. Mohajer [3]

1.Ph.D. Student, Department of Soil Science and Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2. Professor, Department of Soil Science and Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
3. Assistant Professor, Department of Agriculture, Payam Noor University, Tehran, Iran

Received: 08 July 2026 Accepted: 10 September 2026 *Corresponding Author: salehi@sku.ac.ir

Abstract

Introduction: Heavy metal contamination is one of the major forms of soil pollution and is of particular concern in agricultural areas surrounding large cities. The accumulation of heavy metals in soils and plants can pose significant risks to ecosystems and human health. Therefore, accurate information on the concentrations and potential sources of heavy metals in agricultural soils is essential. This study aimed to assess the contamination of agricultural soils in selected areas of Isfahan Province, Iran, by heavy metals, including cadmium (Cd), lead (Pb), copper (Cu), nickel (Ni), zinc (Zn), arsenic (As), and iron (Fe).

Materials and Methods: A total of 90 surface soil samples were collected from agricultural lands in Khomeini Shahr, Isfahan, Falavarjan, Lenjan, and Ardestan counties. The samples were transferred to the laboratory in polyethylene bags, air-dried, and passed through a 2-mm sieve. The soil samples were then extracted using 4 M nitric acid, and the concentrations of heavy metals were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Descriptive statistical parameters, including the mean, minimum, maximum, skewness, and kurtosis, were calculated using SPSS software. The Kolmogorov–Smirnov test was used to assess data normality. Because the data were not normally distributed, Spearman's correlation analysis was used to evaluate the relationships among the studied elements. Statistical significance was set at $p < 0.05$. The degree of heavy metal contamination was assessed using the enrichment factor (EF), geoaccumulation index (Igeo), and ecological risk index (RI).

Results and Discussion: The mean concentrations of Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, As, and Fe in the soil samples across the study area were 1.28, 34.09, 20.57, 59.29, 88.41, 27.77, and 31,511.39 mg kg^{-1}, respectively. The overall order of metal concentrations was Fe > Zn > Ni > Pb > As > Cu > Cd. Significant positive correlations were observed among all the studied elements except Fe, which may indicate common sources for these elements. The mean concentrations of Pb, Zn, and Cd in the soils of Isfahan were significantly higher than those in the other study areas, which may be attributed to the presence of the Bama lead-zinc mine and a cement factory, as well as higher traffic density. Ardestan showed higher As concentrations and contamination levels than the other study areas, which may be related to the geological characteristics of the area. The enrichment factor indicated significant to very high enrichment of Cd, Pb, and Zn in the soils of the study area. According to the geoaccumulation index, Cd and As showed moderate to strong contamination across the study area. In Isfahan, Pb and Zn exhibited moderate to strong contamination based on the Igeo values. The ecological risk index indicated that Cd had the highest potential ecological risk among the

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

studied elements across the study area and individual cities, suggesting a considerable influence of anthropogenic activities on Cd accumulation.
Conclusion: The entry of heavy metals into the human body through the consumption of agricultural products and livestock products, inhalation of contaminated dust, and dermal contact can have adverse toxic effects, particularly as these elements accumulate in the body over time. Therefore, further investigations into the concentrations of these metals, particularly As, in airborne dust, plants, livestock, and human populations are recommended.

***Keywords*: Heavy metals, Agricultural Soil, Enrichment Factor, Geoaccumulation Index, Ecological Risk Index**

مقاله پژوهشی

ارزیابی غلظت و شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در خاک سطحی اراضی کشاورزی برخی مناطق استان اصفهان

شهربانو جورکش ورنوسفادرانی[۱]، محمدحسن صالحی[۲]* و رضا مهاجر[۳]

۱-دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۲- استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۳- استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷

پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۰۶/۱۹

کلمات کلیدی:
فلزات سنگین،
خاک،
فاکتور غنی‌شدگی،
زمین انباشتگی،
شاخص ریسک اکولوژیکی

* عهده‌دار مکاتبات

Email: salehi@sku.ac.ir

چکیده

یکی از مشکلات آلودگی خاک، فلزات سنگین است. هدف از این مطالعه، بررسی آلودگی خاک‌های برخی از اراضی کشاورزی استان اصفهان به فلزات سنگین کادمیم، سرب، مس، نیکل، روی، آرسنیک و آهن است. به همین منظور ۹۰ نمونه از خاک سطحی اراضی کشاورزی مناطقی از شهرستان‌های خمینی‌شهر (۲۰)، اصفهان (۱۶)، فلاورجان (۱۹)، لنجان (۱۹) و اردستان (۱۶) برداشت و بعد از آماده‌سازی با اسید نیتریک ۴ مولار عصاره گیری شد. غلظت فلزات سنگین توسط دستگاه ICP-MASS تعیین شد. میانگین غلظت کل فلزات کادمیم، سرب، مس، نیکل، روی، آرسنیک و آهن در نمونه‌های خاک استان اصفهان (کل منطقه) به ترتیب ۱/۲۸، ۳۴/۰۹، ۲۰/۵۷، ۵۹/۲۹، ۸۸/۴۱، ۲۷/۷۷ و۳۱۵۱۱/۳۹ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. ضریب همبستگی مثبت معنی‌داری بین تمام عناصر به‌جز آهن وجود داشت که ممکن است ناشی از منبع مشترک این عناصر باشد. میانگین سرب، روی و کادمیم در شهرستان اصفهان با سه شهرستان تفاوت معنی‌داری دارد که می‌تواند ناشی از وجود معدن سرب و روی باما و کارخانه سیمان و همچنین ترافیک بیشتر وسایل نقلیه باشد. همچنین شهرستان اردستان ازنظر آرسنیک نسبت به دیگر شهرستان‌ها آلودگی بالاتری نشان داد، احتمالاً این عنصر می‌تواند منشأ زمین‌شناسی در این منطقه داشته باشد. مقادیر فاکتور غنی‌شدگی نشان داد که خاک‌های منطقه برای عناصر کادمیم (۱۶/۶۴ تا ۳۴/۸۰)، سرب (۲/۹۲ تا ۱۳/۰۶) و آرسنیک (۱۶/۰۹ تا ۲۴۷/۲۸) غنی‌شدگی قابل‌توجه تا زیاد دارند. با توجه به نتایج زمین انباشتگی مشخص شد که عناصر کادمیم و آرسنیک در کل منطقه آلودگی متوسط تا شدید دارند. همچنین در شهرستان اصفهان نتایج شاخص زمین

انباشتگی نشان داد که عناصر سرب و روی دارای آلودگی متوسط تا شدید می‌باشند. شاخص ریسک اکولوژیکی در کل منطقه (۱۹۲/۰۰) و شهرستان‌ها برای عنصر کادمیم بالاتر بود که نشان می‌دهد این عنصر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی است. این یافته‌ها بر ضرورت پایش مستمر فلزات سنگین در خاک و توجه هم‌زمان به منابع انسان‌زاد و طبیعی در مدیریت آلودگی مناطق موردمطالعه تأکید دارد.

مقدمه

در سال‌های اخیر، روند شهرنشینی و گسترش فعالیت‌های انسانی موجب افزایش ورود آلاینده‌ها به محیط‌زیست شده است. در میان این آلاینده‌ها، فلزات سنگین به دلیل پایداری و قابلیت تجمع در محیط، اهمیت ویژه‌ای دارند و می‌توانند در خاک و سایر اجزای محیط‌زیست تجمع یابند. فلزات سنگین از طریق فرایندهای طبیعی مانند هوازدگی مواد مادری وارد محیط می‌شوند، اما فعالیت‌های انسانی ازجمله استخراج و فرآوری مواد معدنی، ذوب و فعالیت‌های صنعتی، حمل‌ونقل و فعالیت‌های کشاورزی نیز می‌توانند موجب افزایش غلظت آن‌ها در خاک شوند (Hou et al., 2020، Qin et al.,2021 و et al., Wan2024). فلزات سنگین می‌توانند در محیط تجمع یافته و بسته به نوع عنصر، غلظت و مدت مواجهه و مسیر ورود به بدن، آثار نامطلوبی بر موجودات زنده و سلامت انسان داشته باشند. مواجهه با این عناصر می‌تواند موجب اختلال در فرایندهای فیزیولوژیک و عملکرد اندام‌های مختلف شود و برخی از فلزات نیز به دلیل سمیت بالا می‌توانند پیامدهای نامطلوبی برای سلامت ایجاد کنند (Qin et al.,2021 و Angon et al., 2024).

خاک به‌عنوان یکی از مخازن مهم فلزات سنگین در محیط‌زیست عمل می‌کند و ورود این عناصر از منابع طبیعی و انسان‌زاد می‌تواند موجب تجمع آن‌ها در خاک شود. در خاک‌های کشاورزی، منابعی مانند رسوب جوی، آبیاری با فاضلاب، استفاده از کودهای معدنی و دامی، کاربرد آفت‌کش‌ها و فعالیت‌های صنعتی و معدنی از مهم‌ترین مسیرهای ورود فلزات سنگین به خاک محسوب می‌شوند (Hou et al., 2020، Qin et al.,2021 و Wan et al., 2024). تجمع فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی می‌تواند بر کیفیت خاک، رشد و عملکرد گیاهان و درنهایت ایمنی محصولات کشاورزی اثرگذار باشد. برخی از این عناصر قابلیت جذب توسط گیاه و انتقال به بخش‌های خوراکی را دارند و از این طریق می‌توانند وارد زنجیره غذایی شوند. بنابراین، آلودگی خاک‌های کشاورزی نه‌تنها یک مسئله زیست‌محیطی، بلکه موضوعی مرتبط با امنیت غذایی و سلامت انسان نیز محسوب می‌شود (Houet al., 2020، Angon et al., 2024 و Wen et al., 2020). از سوی دیگر، ویژگی‌های خاک می‌توانند بر رفتار، تحرک و انتقال فلزات سنگین تأثیر بگذارند. عواملی مانند ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، کانی‌شناسی و شرایط محیطی می‌توانند میزان نگهداشت و فراهمی فلزات را تغییر داده و درنتیجه بر جذب و تجمع آن‌ها در گیاهان اثرگذار باشند (Houet al., 2020 و Wen et al., 2020).

گردوغبار و رسوبات جوی نیز می‌توانند در انتقال فلزات سنگین به سطح خاک نقش داشته باشند. این ذرات ممکن است فلزات حاصل از فعالیت‌های صنعتی، ترافیک و احتراق سوخت‌های فسیلی را با خود حمل کرده و پس از رسوب، به یکی از مسیرهای ورود این عناصر به خاک تبدیل شوند. اهمیت این مسیر به‌ویژه در اراضی کشاورزی واقع در مجاورت مناطق شهری و صنعتی بیشتر است (Hou et al., 2020 و Qin et al.,2021). با توجه به نگرانی‌های موجود درباره تجمع فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی و امکان انتقال برخی از این عناصر به گیاه و زنجیره غذایی، تعیین غلظت فلزات سنگین در خاک و ارزیابی وضعیت آلودگی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، بررسی الگوی پراکنش فلزات و شناسایی منابع

احتمالی آن‌ها می‌تواند در شناخت وضعیت آلودگی خاک و مدیریت خطرات زیست‌محیطی مرتبط با آن مؤثر باشد (Wan2024 ، Ren et al., 2024 و Wen et al., 2020).

برخی فلزات سنگین مانند مس، روی و منگنز برای فعالیت‌های متابولیکی حیوانات و گیاهان در برخی غلظت‌ها ضروری هستند، اما برخی دیگر مانند کروم و نیکل حتی در غلظت‌های پایین برای گیاهان، حیوانات و انسان‌ها سمی هستند. بنابراین، تجمع بیش‌ازحد فلزات سنگین در خاک و گیاهان خطراتی را برای سلامت انسان به همراه دارد (Yılmaz et al., 2006، Khan et al., 2008، Ramirez-Andreotta et al., 2013a، Wang et al., 2015 و Özkul , 2016). آلودگی فلزات سنگین در خاک کشاورزی خسارات زیادی به بار می‌آورد .ازیک‌طرف، تجمع فلزات سنگین در خاک کشاورزی می‌تواند منجر به از دست دادن عناصر غذایی خاک و تخریب عملکرد خاک شود که بر عملکرد و کیفیت محصولات زراعی تأثیر می‌گذارد (Chiroma, 2014). از سوی دیگر، فلزات سنگین به دلیل سمیت بالا در آستانه غلظت پایین و زمان ماندگاری طولانی، فراهمی زیستی پایدار و تجمع متعاقب آن در خاک کشاورزی، از طریق زنجیره غذایی در درازمدت سلامت انسان را به خطر می‌اندازد (Arslan, 2001 و Apeagyei et al., 2011). تجمع زیستی فلزات سنگین در بخش‌های خوراکی محصولات غذایی، منبع مهمی از آلاینده‌ها در زنجیره غذایی انسان است، زیرا سبزیجات فلزات را از خاک، هوا و آب جذب می‌کنند (Hector et al., 2011 و Chiroma et al., 2014). بررسی آلودگی می‌تواند بر اساس شاخص‌های آلودگی اطلاعاتی را از منابع آلودگی فلزات سنگین به ما بدهد.

اوزکول (Özkul. 2016) بامطالعه‌ای که بر روی خاک‌های اطراف نیروگاه حرارتی در ترکیه انجام داد بیان کرد که شاخص زمین انباشتگی برای کروم نشان می‌دهد که از غیر آلوده تا به‌شدت آلوده است .میزان آلودگی نمونه‌های خاک برای سرب و روی از درجه غیر آلوده به میزان آلودگی متوسط تغییر می‌کند. نمونه‌های خاک به فلزات کادمیوم و مس آلوده نبودند. فاکتورهای غنی‌سازی آرسنیک، کروم، جیوه و نیکل در بیشتر مکان‌های نمونه‌برداری نشان‌دهنده غنی‌سازی قابل‌توجه تا بسیار زیاد است. در مطالعه‌ای که اکبری مراد و همکاران (Akbari Morad et al. 2025) روی خاک‌های همدان به‌منظور ارزیابی توزیع مکانی و خطرات زیستی فلزات سنگین انجام دادند به این نتیجه رسیدند که میانگین همه عناصر به‌جز سرب بالاتر از غلظت‌های پس‌زمینه مربوطه در ایران بوده است که نشان‌دهنده منابع احتمالی انسانی این عناصر است. همچنین بیان کردند که مقدار میانگین ریسک اکولوژیک برابر با ۱۴۱ بوده است که نشان‌دهنده خطر اکولوژیکی قابل‌توجه در منطقه موردبررسی است. جورکش و همکاران (Jorkesh et al.. 2013) در مطالعه‌ای که بر روی بررسی پراکنش مکانی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه لنجانات اصفهان انجام دادند به این نتیجه رسیدند که غلظت کادمیم در خاک‌های این منطقه بالاتر از حد مجاز می‌باشد. تجزیه‌وتحلیل نقشه‌ها نشان داد که آلودگی منطقه به کادمیم احتمالاً بیش‌تر تحت کنترل فعالیت‌های صنعتی موجود در منطقه می‌باشد. همچنین معدن‌کاوی سرب و روی می‌تواند خطر آلودگی خاک‌های منطقه به سرب را افزایش دهد. مهاجر و همکاران (Mohajer et al.. 2012) در مطالعه‌ای که بر روی سرب و کادمیم در خاک‌های کشاورزی و غیر کشاورزی منطقه لنجانات اصفهان انجام دادند به این نتیجه رسیدند که میانگین غلظت سرب و کادمیم به ترتیب بیش از ۱۶ و ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده است. غلظت کل کادمیم در بیشتر نمونه‌ها از آستانه پیشنهادی سوئیس (۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) فراتر بوده است اما میانگین غلظت سرب در خاک کمتر از آستانه ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تعیین‌شده توسط دفتر فدرال محیط‌زیست، جنگل و فضای سبز سوئیس بوده است.

ارزیابی غلظت فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی و محصولات زراعی به‌منظور به حداقل رساندن مشکلات بهداشت عمومی ناشی از مصرف محصولات غذایی آلوده موردنیاز است. نیاز است درک بهتری از غلظت فلزات سنگین در محصولات

زراعی و خاک‌های کشاورزی و همچنین خطر احتمالی سلامتی آن‌ها به دست آید. اصفهان یکی از شهرهای درحال‌توسعه و پرجمعیت ایران است که یکی از شهرهای پرترافیک محسوب می‌شود و همچنین دارای صنایع بزرگی چون ذوب‌آهن، فولاد مبارکه، سیمان سپاهان، سیمان اصفهان و معدن سرب و روی باما است. اهداف این تحقیق ارزیابی غلظت فلزات سنگین است که برخی مانند آرسنیک کمتر موردتوجه قرارگرفته است. این مطالعه در اراضی کشاورزی مناطق صنعتی و مناطق غیر صنعتی (اردستان) انجام‌شده است تا دیدگاه بهتری برای شناسایی منابع احتمالی این عناصر در اختیار قرار دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی موردمطالعه حدفاصل عرض‌های جغرافیایی "۳۲°۲۱'۵۴/۲ تا "۳۲°۴۴'۱۶/۹ شمالی و طول‌های جغرافیایی "۵۱°۲۵'۰۹/۵ تا "۵۱°۳۶'۱۷/۳ شرقی در اصفهان قرار دارد (شکل ۱) و شامل شهرستان‌های اصفهان، خمینی‌شهر، فلاورجان، لنجان و اردستان است.

نمونه‌برداری خاک به‌صورت تصادفی از عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری انجام گرفت، درمجموع ۹۰ نمونه‌ی خاک سطحی در اواخر فصل تابستان و در فصل پاییز برداشت شد. همه نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلن قرار داده و به آزمایشگاه منتقل شدند. ابتدا نمونه‌های خاک هوا خشک شد، سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. عناصر سنگین نمونه‌های خاک با اسید نیتریک ۴ مولار عصاره گیری شد (Ramirez-Andreotta et al., 2013b). مقدار این عناصر شامل آهن، سرب، نیکل، مس، کادمیم، آرسنیک و روی در عصاره با استفاده از دستگاه ICP-MASS تعیین گردید.

پارامترهای آمار توصیفی شامل میانگین، حداکثر، حداقل، چولگی و کشیدگی غلظت فلزات سنگین موردمطالعه توسط نرم‌افزار SPSS تعیین گردید. برای تست نرمال بودن از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف استفاده شد و ازآنجایی‌که داده‌ها به‌صورت نرمال توزیع نشده بودند، برای تعیین ارتباط بین عناصر کمیاب، آنالیز همبستگی اسپیرمن انجام شد. سطح معنی‌داری $p<0.05$ در نظر گرفته شد. برای ارزیابی سطح آلودگی فلزات سنگین در خاک‌ها از روش‌های مختلف مانند ضریب غنی‌سازی (EF)، شاخص انباشتگی زمین (Igeo) و شاخص ریسک اکولوژیک (RI) استفاده می‌شود.

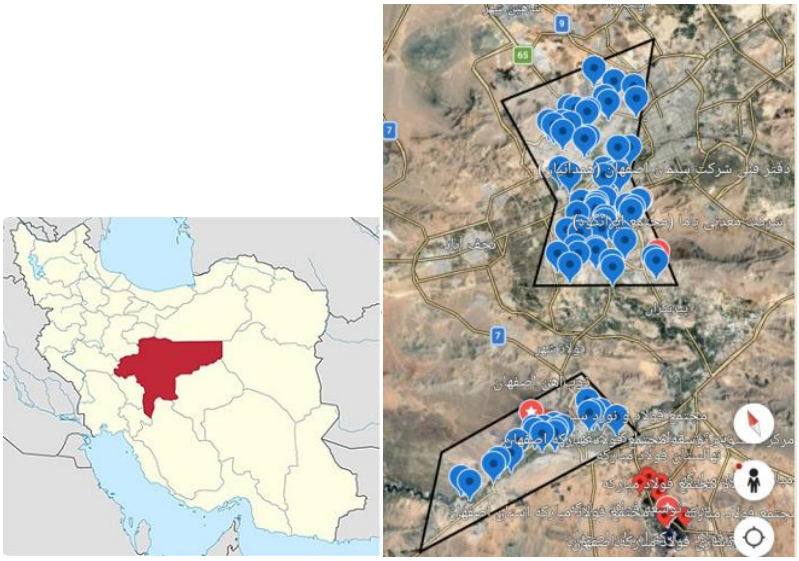


Figure (1) Location of the study area and sampling points

ضریب غنی‌سازی (Enrichment factor):

ضریب غنی‌سازی (EF) درجه آلودگی فلزات سنگین را در یک منطقه خاص با توجه به تغییر نسبت نمونه به مقدار زمینه (غلظت زمینه مورداستفاده در محاسبه فاکتور غنی‌شدگی (EF) بر اساس مقادیر متوسط فراوانی عناصر در پوسته قاره‌ای، مطابق با تیلور (۱۹۶۴)، در نظر گرفته شد (Taylor., 1964). استفاده از این مقادیر به‌عنوان یک مرجع ژئوشیمیایی، امکان ارزیابی میزان غنی‌شدگی عناصر اندازه‌گیری‌شده را بر مبنای یک مقدار مرجع یکسان در تمامی مناطق موردمطالعه فراهم می‌کند. بنابراین، مقادیر گزارش‌شده توسط تیلور به‌عنوان مقادیر مرجع زمینه در محاسبات EF این پژوهش استفاده شدند.) نشان می‌دهد که برای قضاوت در مورد انسانی یا طبیعی بودن منشأ فلزات استفاده می‌شود و از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$EF = \frac{(Cn/Cref)sample}{(Bn/Bref)background} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، C_n غلظت عنصر در نمونه موردمطالعه و C_{ref} غلظت عنصر مرجع در نمونه موردمطالعه، که معمولاً از آهن و آلومینیوم که کمترین سطح آلودگی انسانی را دارند استفاده می‌شوند. و B_n و B_{ref} به ترتیب غلظت عنصر موردنظر و مرجع در زمینه (خاک یا پوسته زمین) می‌باشند. EF را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد: EF < 2 غنی‌سازی حداقل ، EF 2-5غنی‌سازی متوسط، EF 5-20غنی‌سازی قابل‌توجه، EF 20-40 غنی‌سازی بسیار بالا است، و EF > 40 غنی‌سازی فوق‌العاده بالا دارد (Silva et al., 2017). EF نزدیک به ۱ نشان‌دهنده این است که فلزات از منابع طبیعی منشأ گرفته‌اند. درحالی‌که EF بین ۱ تا ۱۰ نشان‌دهنده این است که فلزات از منابع طبیعی و تا حدودی منابع انسانی منشأ گرفته‌اند و EF بیشتر از ۱۰ نشان می‌دهد که منشأ فلزات از منابع غیرطبیعی و انسانی است (Waisberg et al., 2003).

شاخص انباشتگی زمین (Geo-accumulation index):

Igeo همان‌طور که توسط مولر (Muller. 1969) توصیف‌شده است برای تخمین غنی‌سازی غلظت فلزات بالاتر از سطح زمینه یا غلظت پایه است. Igeo یک رویکرد کمی برای اندازه‌گیری آلودگی فلزات سنگین در رسوبات یا خاک است. Igeo با فرمول ۲ بیان می‌شود:

$$I_{geo} = \log_2\left[\frac{C_n}{1.5B_n}\right] \qquad (۲)$$

در این رابطه C_n غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در نمونه‌های خاک و B_n غلظت زمینه‌ای ژئوشیمیایی همان عنصر است. از ضریب ۱/۵، ضریب تصحیح تأثیر لیتوژنیکی مقدار غلظت زمینه است. ضریب ۱/۵ برای به حداقل رساندن تأثیر نوسانات احتمالی در مقدار زمینه است. این ضریب با تفکیک نوسانات طبیعی موجود در غلظت یک ماده معین در محیط، تغییرات حتی اندک ناشی از اثرات انسان پدید را نمایان می‌سازد (Muller, 1969). با توجه به این معادله ۷ رده برای آلودگی در نظر گرفته می‌شود: کاملاً غیر آلوده (Igeo≤0)، غیر آلوده تا آلودگی متوسط (0< Igeo<1)، آلودگی متوسط (1<Igeo <2)، آلودگی متوسط تا شدید (2< Igeo<3)، آلودگی شدید (3< Igeo<4)، آلودگی شدید تا بسیار شدید (4< Igeo<5) و آلودگی بسیار شدید (Igeo≥5).

شاخص ریسک اکولوژیک (RI):

شاخص ریسک اکولوژیک در ابتدا توسط هاکینسون (Hakanson. 1980) برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در گردوغبار جوی پیشنهاد شد. از آن برای ارزیابی خطرات بالقوه زیستی برای اکوسیستم ناشی از شش فلز سنگین استفاده شد. این شاخص بر اساس معادلات (۳، ۴ و ۵) محاسبه می‌شود:

$$RI = \sum_{i=1}^{m} Er \qquad (۳)$$

$$Er = Tr \times Cf \qquad (۴)$$

$$Cf = C_s/C_n \qquad (۵)$$

که در آن C_s غلظت فلز سنگین موردنظر در نمونه ، C_n غلظت زمینه فلز سنگین موردنظر، C_f میزان آلودگی نمونه به فلز موردنظر، E_r فاکتور ریسک اکولوژیکی بالقوه برای یک فلز، T_r فاکتور سمیت فلز موردنظر که مقدار آن برای Cd، As، Cu، Pb، Ni و Zn به ترتیب ۳۰، ۱۰، ۵، ۵، ۵ و ۱ تعیین‌شده است و RI نشانه ریسک اکولوژیک بالقوه برای مجموع فلزات هستند که بدین‌صورت طبقه‌بندی می‌شود:

ریسک اکولوژیک پایین (RI<150)، ریسک اکولوژیک متوسط (150≤ RI<300)، ریسک اکولوژیک قابل‌توجه (300≤ RI<600)، ریسک اکولوژیک خیلی بالا (RI≥600).

نتایج و بحث

جدول ۱ آمار توصیفی غلظت کل فلزات سنگین را در نمونه‌های خاک کل منطقه، شهرستان خمینی‌شهر، اصفهان، فلاورجان، زرین‌شهر و اردستان نشان می‌دهد. دامنه غلظت کل فلزات در نمونه‌های خاک کل منطقه (۰/۴۲ تا ۳/۶۷ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) برای فلز کادمیم، ۹/۲۱ تا ۱۷۲/۲۵ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) برای فلز سرب، ۵/۵۴ تا ۴۱/۷۳ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) برای فلز مس، ۲۳/۵۵ تا ۱۱۱/۱۳ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) برای فلز نیکل، ۷/۳۱ تا ۴۶۹/۴۵ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) برای فلز آرسنیک، ۱۲۶۱۷/۰۶ تا ۵۲۷۳۴/۵۰ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) برای فلز آهن و ۲۶/۰۵ تا ۵۴۱/۱۶ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) برای فلز روی) است. نتایج غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک کل منطقه این‌گونه است: Fe>Zn> Ni >Pb>As>Cu>Cd . با مقایسه کردن میانگین غلظت کل فلزات سنگین در نمونه‌های خاک کل منطقه با مقادیر متوسط این فلزات در پوسته زمین، مشاهده می‌شود که غلظت کادمیم، سرب، مس، نیکل، آرسنیک و روی به ترتیب ۱۲/۸، ۲/۷۲، ۰/۳۷، ۰/۷۹، ۱۵/۴۳ و ۱/۲۶ برابر بیشتر است. این نشان می‌دهد که منطقه موردمطالعه تقریباً دارای سطح بالایی از آلودگی این فلزات سنگین است.

در خاک‌های نمونه‌برداری شده درکل منطقه به ترتیب برای فلزات سرب، نیکل و آرسنیک حدود (۲/۲۵، ۱/۱۲ و ۸/۹۹) درصد نمونه‌ها غلظت بالاتر از غلظت استاندارد کشور ایران و به ترتیب برای فلزات کادمیم، سرب، مس، نیکل، آرسنیک، روی و آهن حدود (۷۲/۲۸، ۴/۴۹، ۱/۱۲، ۶۶/۲۹ و ۹/۴۵، ۳/۳۷ و ۵/۶۱) درصد نمونه‌ها غلظت بالاتر از غلظت استاندارد کشور سوئیس و حدود (۱۰۰، ۱۰۰، ۳/۳۷، ۸۸/۷۶ ، ۷۱، ۹۳/۲۵ و ۳۵) درصد نمونه‌ها غلظت بالاتر از غلظت استاندارد متوسط جهانی دارند.

Table (1) Statistical summary of total heavy metal concentrations in the study area, Swiss and Iranian standards, and the average of the Earth's crust (mg/kg)

Fe	Zn	As	Ni	Cu	Pb	Cd		
52734.50	541.16	469.45	111.13	41.73	172.25	3.67	Maximum	
12617.06	26.05	7.31	23.55	5.54	9.21	0.42	Minimum	
31511.59	88.41	27.77	59.29	20.57	34.09	1.28	Mean	The entire region
9182.17	66.81	52.69	17.00	5.19	21.78	0.65	Std. deviation	
29.13	75.56	189.73	28.67	25.23	63.89	50.78	C.V.	
30983.40	122.81	25.64	87.07	26.94	57.23	2.91	Maximum	
14139.78	40.08	15.08	35.49	9.17	24.00	0.83	Minimum	
23165.55	80.28	19.83	65.39	19.63	36.57	1.50	Mean	Khomeinishahr (20)
4354.08	18.63	2.60	13.74	4.68	8.24	0.61	Std. deviation	
18.79	23.21	13.11	21.01	23.84	22.53	40.68	C.V.	
38516.35	541.16	29.86	111.13	30.45	172.25	3.67	Maximum	
19589.21	68.08	18.21	43.57	12.40	28.40	1.09	Minimum	
29016.62	149.25	22.87	66.99	22.66	50.17	1.86	Mean	Isfahan (16)
4754.64	139.32	3.60	16.81	4.65	40.93	0.76	Std. deviation	
16.38	93.34	15.74	25.09	20.52	81.58	40.86	C.V.	
36710.66	139.65	20.81	83.08	41.73	59.92	2.06	Maximum	
12617.06	26.05	14.09	23.55	5.54	18.86	0.82	Minimum	
31357.81	83.99	18.56	70.35	20.10	39.63	1.48	Mean	Falavarjan (19)
5939.20	23.73	2.09	15.29	7.47	9.64	0.39	Std. deviation	
18.94	28.25	11.26	21.73	37.16	24.32	26.35	C.V.	
52734.50	66.78	13.09	44.48	27.24	16.95	0.81	Maximum	
31843.10	36.30	7.31	25.32	11.19	9.21	0.42	Minimum	
45094.82	55.31	10.54	38.94	18.90	13.04	0.61	Mean	Lenjan (19)
6434.56	8.29	1.56	5.39	4.56	2.14	0.12	Std. deviation	
14.26	14.98	14.80	13.84	24.12	16.41	19.67	C.V.	
33955.16	96.64	469.45	67.14	25.25	40.92	1.51	Maximum	
21926.29	63.42	10.11	43.98	17.61	25.92	0.53	Minimum	
28290.27	81.92	77.11	54.72	22.34	33.26	0.95	Mean	Ardestan (16)
3640.78	9.46	119.07	6.91	2.02	4.53	0.28	Std. deviation	
12.870.20	11.55	154.41	12.63	9.04	13.61	29.47	C.V.	
50000.00	70.00	1.80	75.00	55.00	12.50	0.20	Earth's crust	
	500.00	40.00	110.00	200.00	75.00	5.00	Iranian Standard	
50000.00	150.00		50.00	40.00	50.00	0.80	Swiss Standard	
	50.00		40.00	30.00	10.00	0.06	Global average	

نتایج غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک شهرستان‌های خمینی‌شهر، اصفهان و فلاورجان به‌صورت Fe>Zn>Ni>Pb>As>Cu>Cd، شهرستان لنجان به‌صورت Fe>Zn>Ni>Cu>Pb>As>Cd و شهرستان اردستان به‌صورت Fe>Zn>As>Ni>Pb>Cu>Cd بود.

با توجه به غلظت استاندارد کشور ایران به نظر می‌رسد شهرستان‌های اصفهان و اردستان ازنظر غلظت فلزات سنگین موردمطالعه آلوده‌تر باشد ولی بر اساس استاندارد جهانی و کشور سوئیس تمام شهرستان‌های موردمطالعه ازنظر غلظت این فلزات آلودگی دارند. سرب، کادمیم و روی عناصری هستند که اغلب با منابع انسانی مرتبط هستند (Sutherland, 2000، Rodriguez Martin et al., 2006 و Apeagyei et al., 2011). کادمیم بیشتر در محیط‌های طبیعی در ارتباط با شکل‌های سنگ معدن سرب و روی وجود دارد. همچنین کادمیم می‌تواند ناشی از کودهای فسفاته و غبارات اتمسفری باشد. سرب و روی در شهرستان اصفهان غلظت بیشتری از خود نشان می‌دهند. در این منطقه معدن سرب و روی و کارخانه سیمان قرار دارد و در معرض ترافیک سنگین وسایل نقلیه روزانه از بزرگراه قرار دارند. سرب و روی می‌توانند از طریق منابع مختلف، ازجمله فعالیت‌های معدنی و صنعتی و انتشار مرتبط با تردد وسایل نقلیه، وارد خاک شوند (Sutherland, 2000، Díaz Rizo et al., 2011 و Guan et al., 2018).

با توجه به اینکه داده‌ای در مورد غلظت آرسنیک در خاک‌های استان اصفهان در دسترس نیست، در این مطالعه به بررسی این عنصر پرداخته شد و نتایج نشان داد که غلظت این عنصر در تمام شهرستان‌های موردمطالعه بالاتر از استاندارد متوسط جهانی و سوئیس می‌باشد. همچنین آرسنیک در شهرستان اردستان آلودگی بالاتری نسبت به شهرستان‌های دیگر داشت درصورتی‌که این شهرستان غیر صنعتی می‌باشد، احتمالاً این عنصر می‌تواند منشأ زمین‌شناسی در این منطقه داشته باشد. مهم‌ترین سازندهای آرسنیک دار اردستان، واحدهای آذرین-آتشفشانی و سنگ‌های سولفیدی (مثل آرسنوپیریت و پیریت) هستند که در زون ایران مرکزی رخنمون دارند و هنگام هوازدگی، آرسنیک را وارد خاک می‌کنند. غلظت بالای آرسنیک در اردستان معمولاً از سنگ‌ها و کانی‌های آرسنیک دار موجود در واحدهای آذرین-آتشفشانی و دگرگونی زون ایران مرکزی ناشی می‌شود. بر اساس داده‌های نقشه‌های زمین‌شناسی اردستان (۱:۱۰۰،۰۰۰) که واحدهای آذرین، رسوبی و دگرگونی منطقه را نشان می‌دهند، حضور سنگ‌های آذرین قدیمی و کانی‌های سولفیدی محتمل‌ترین منشأ آرسنیک است.

در مطالعه اتابکی و لطفی (Atabaki and Lotfi. 2017) بر روی خاک‌های مناطق مختلف اصفهان نتایج نشان داد که غلظت فلزات سرب و کادمیم در خاک‌های منطقه نسبت به میانگین استاندارد جهانی بالاتر و غلظت فلزات روی و مس نسبت به میانگین استاندارد جهانی پایین‌تر است. همچنین در مطالعه خسروی و همکاران (Khosravi et al.. 2014) بر روی خاک‌های برخی اراضی استان اصفهان نتایج میزان سرب در خاک را بالاتر از حد مجاز (میزان مجاز سرب در خاک ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نشان می‌دهد. میزان بالای سرب می‌تواند به علت محل استقرار صنایع در این مکان‌ها باشد.

ضریب تغییرات برای نشان دادن تغییرپذیری غلظت عناصر کمیاب خاک استفاده می‌شود. CV ≤ 20% (تغییرپذیری کم)، 20%<CV≤50% (تغییرات متوسط)، 50%<CV≤100% (تغییرپذیری بالا) و CV بالای 100٪ (تغییرپذیری خیلی بالا) در نظر گرفته می‌شود (Eziz et al., 2018). CV عناصر کمیاب به ترتیب آرسنیک (۸۹/۷۳٪) > روی (۷۵/۵۶٪) > سرب (۶۳/۸۹٪) > کادمیم (۵۰/۷۸٪) > آهن (۲۹/۱۳٪)> نیکل (۲۸/۶۷ ٪)> مس (۲۵/۲۳٪) کاهش یافت. مقادیر بالای ضریب تغییرات (CV) این عناصر می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر عوامل بیرونی، ازجمله فعالیت‌های انسانی، فعالیت‌های معدنی و رسوب اتمسفری، بر پراکنش و تغییرپذیری غلظت آن‌ها در منطقه باشد (Tume, 2019).

ضریب همبستگی اسپیرمن بین فلزات سنگین موردمطالعه در خاک‌های نمونه‌برداری شده در کل منطقه در جدول ۲ ارائه‌شده است. ضریب همبستگی مثبت معنی‌داری بین تمام عناصر به‌جز آهن وجود دارد که ممکن است از یک منبع مشترک باشد، اما

ضریب همبستگی ($r = 0.782$ $(p < 0.01)$) بین روی و سرب، همچنین بین کادمیم، سرب، روی و نیکل ($r = 0.737$ $p < 0.01$) بالاتر است، که می‌تواند تا حدودی یکسان بودن منبع آلاینده برای این فلزات را توجیه کند. فعالیت معدن سرب و روی باما و همچنین کارخانه سیمان و ذوب‌آهن احتمالاً باعث ایجاد آلودگی در منطقه موردمطالعه می‌شوند و با توجه به ضریب همبستگی مثبت بین کادمیم، سرب، نیکل و روی و همچنین بین سرب، نیکل، آرسنیک و روی این عناصر احتمالاً تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و همچنین کودهای شیمیایی مورداستفاده در اراضی کشاورزی می‌باشند.

لی و همکاران (Li et al. 2023) در مطالعه‌ای که بر روی آلودگی فلزات سنگین خاک در یک کلان‌شهر در چین انجام دادند یک همبستگی مثبت معنادار بین Cr-Ni، Cr-Cu و Cr-Pb وجود دارد که نشان می‌دهد منابع این فلزات سنگین ممکن است یکسان یا مشابه باشند. همچنین بیان کردند که ضریب همبستگی برای Zn-Pb، ۰/۵۳۳ بود که نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین روی و سرب و احتمال وجود منابع مشترک برای این دو عنصر است.

با توجه به نتایج جدول ۳ میانگین برخی عناصر در شهرستان‌های مختلف تفاوت معنی‌داری نشان می‌دهد. بدین‌صورت که میانگین سرب، روی و کادمیم در شهرستان اصفهان با سه شهرستان دیگر تفاوت معنی‌داری دارد. منشأ این عنصر در خاک‌های این شهرستان می‌تواند وجود معدن سرب و روی باما و کارخانه سیمان و همچنین ترافیک وسایل نقلیه باشد. همچنین میانگین عنصر آهن در شهرستان‌های لنجان و خمینی‌شهر با بقیه شهرستان‌ها تفاوت معنی‌داری دارد. منشأ این عنصر در شهرستان لنجان می‌تواند وجود کارخانه ذوب‌آهن در این منطقه باشد.

Table (2) Spearman correlation coefficients of heavy metals in soils of the study area

Zn	Fe	As	Ni	Cu	Pb	Cd	
						1	Cd
					1	0.879**	Pb
				1	0.447**	0.408**	Cu
			1	0.420**	0.872**	0.799**	Ni
		1	0.538**	0.419**	0.733**	0.666**	As
	1	-0.412**	-0.076	0.255*	-0.197	-0.259*	Fe
1	-0.106	0.583**	0.737**	0.519**	0.782**	0.724**	Zn

Table (3) Comparison of average heavy metals in soils of the 5 studied cities

Zn	Fe	As	Ni	Cu	Pb	Cd	
0.001**	0.001**	0.853	0.706	0.080	0.030**	0.030**	Khomeinishahr - Isfahan
0.000**	0.849	0.935	0.221	0.775	0.605	0.855	Khomeini Shahr - Falavarjan
0.000**	0.203	0.553	0.000**	0.654	0.000**	0.000**	Khomeini Shahr - Lenjan
0.005**	0.937	0.001**	0.015**	0.124	0.599	0.001**	Khomeini Shahr - Ardestan
0.188	0.002**	0.795	0.432	0.143	0.095	0.021**	Isfahan - Falavarjan
0.000**	0.000**	0.457	0.000**	0.032**	0.000**	0.000**	Isfahan - Lenjan
0.698	0.003**	0.003**	0.008**	0.859	0.012**	0.000**	Isfahan - Ardestan
0.000**	0.150	0.613	0.000**	0.469	0.000**	0.000**	Falavarjan - Lenjan
0.091	0.922	0.001**	0.001**	0.208	0.319	0.002**	Falavarjan - Ardestan
0.000**	0.209	0.000**	0.000**	0.054	0.002	0.051	Lenjan - Ardestan

مقادیر شاخص زمین انباشتگی عناصر کادمیم، سرب، مس، نیکل، آرسنیک، روی و آهن در جدول ۴ آمده است. شاخص زمین انباشتگی برای عنصر کادمیم در کل منطقه بین ۰/۴۸ تا ۳/۶۱ که نشان می‌دهد منطقه موردمطالعه در محدوده آلودگی متوسط تا آلودگی شدید و آلودگی بسیار شدید است. تمام شهرستان‌های موردمطالعه ازنظر این عنصر آلوده هستند. شاخص زمین انباشتگی برای عنصر سرب در کل منطقه بین ۱/۰۲- تا ۳/۲۰ که نشان می‌دهد منطقه موردمطالعه در محدوده غیر آلوده تا آلودگی شدید است. با توجه به نتایج بیشترین آلودگی در شهرستان اصفهان است. شاخص زمین انباشتگی برای عنصر آرسنیک در کل منطقه بین ۱/۴۴ تا ۷/۴۴ که نشان می‌دهد منطقه موردمطالعه در محدوده آلودگی متوسط تا بسیار شدید است. با توجه به نتایج بیشترین آلودگی در شهرستان اردستان است.

همچنین شاخص زمین انباشتگی برای عناصر مس و نیکل در محدوده غیر آلوده و برای عنصر روی در کل منطقه بین ۲/۰۰- تا ۲/۳۶ که نشان می‌دهد منطقه موردمطالعه در محدوده غیر آلوده تا آلودگی متوسط و آلودگی شدید است و با توجه به نتایج بیشترین حد آلودگی این عنصر در شهرستان اصفهان است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۵ فاکتور غنی‌شدگی برای عنصر کادمیم بین ۱۶/۶۴ تا ۳۴/۸۰، برای عنصر سرب بین ۲/۹۲ تا ۱۳/۰۶، برای عنصر آرسنیک بین ۱۶/۰۹ تا ۲۴۷/۲۸، برای عنصر روی بین ۱/۴۷ تا ۷/۳۳ و برای عنصر نیکل بین ۱/۲۴ تا ۱/۴۰ تغییر می‌کند. با توجه به تقسیم‌بندی وانگ و همکاران (Wang et al. 2015) خاک‌های این منطقه غنی‌شدگی متوسط تا فوق‌العاده بالا دارند، منشأ این عناصر می‌تواند غالباً منابع انسان‌زاد (معدن کاری در اصفهان و فعالیت‌های صنعتی) باشد. بیشترین آلودگی در شهرستان اصفهان برای عناصر کادمیم، سرب، روی و آرسنیک دیده می‌شود که احتمالاً به خاطر وجود معدن سرب و روی و کارخانه سیمان است. همچنین بیشترین آلودگی برای عنصر آرسنیک در شهرستان اردستان دیده می‌شود، که احتمالاً منشأ زمین‌شناسی دارد.

Table (4) Geoaccumulation index values in the entire region and the studied counties

Zn	As	Ni	Cu	Pb	Cd			Index
-0.25	3.36	-0.91	-2.00	0.86	2.09	Mean	The entire region	
-2.00	1.44	-2.25	-3.83	-1.02	0.48	Minimum		
2.36	7.44	-0.01	-1.00	3.20	3.61	Maximum		
-0.39	2.87	-0.78	-2.06	0.96	2.32	Mean		
-1.39	2.48	-1.69	-3.18	0.36	1.47	Minimum		
0.23	3.24	-0.38	-1.59	1.61	3.28	Maximum	Khomeinishahr	
0.51	3.08	-0.76	-1.90	1.41	2.63	Mean		
-0.62	2.75	-1.36	-2.74	0.59	0.18	Minimum	Isfahan	
2.36	3.46	-0.01	-1.43	3.20	3.61	Maximum		
-0.32	2.78	-0.69	-2.06	1.07	2.30	Mean	Falavarjan	
-2.00	2.38	-2.25	-3.83	0.01	1.45	Minimum		
0.41	2.95	-0.43	-0.97	1.67	2.78	Maximum		
-0.91	1.96	-1.51	-2.12	-0.53	1.03	Mean		
-1.56	1.44	-2.18	-2.94	-0.03	0.48	Minimum		
-0.64	2.27	-1.36	-1.60	-0.15	1.43	Maximum	Lenjan	
-0.36	4.83	-1.03	-1.90	0.82	1.66	Mean		
-0.74	1.90	-1.36	-2.25	0.46	0.81	Minimum	Ardestan	
-0.12	7.44	-0.74	-1.70	1.12	2.33	Maximum		

Table (5) Enrichment factor values in the entire region and the studied counties

Zn	As	Ni	Cu	Pb	Cd			Index
2.00	24.48	1.25	0.59	4.33	20.31	Mean	The entire region	
1.47	16.09	1.24	0.39	2.92	16.64	Minimum		
7.33	247.28	1.40	0.72	13.06	34.80	Maximum		
2.47	37.12	1.87	0.77	6.79	32.37	Mean		
2.02	26.43	1.52	0.59	6.31	29.35	Minimum		
2.83	59.64	2.06	0.79	7.38	46.96	Maximum	Khomeinishahr	
3.67	21.89	1.54	0.71	6.91	32.05	Mean		
2.48	21.50	1.48	0.57	5.80	27.82	Minimum	Isfahan	
10.04	25.82	1.92	0.72	17.89	47.64	Maximum		
1.91	16.44	1.49	0.58	5.98	23.60	Mean	Falavarjan	
1.47	16.03	1.24	0.39	5.05	25.50	Minimum		
2.71	16.74	1.51	1.03	6.52	28.06	Maximum		
0.87	6.49	0.57	0.38	1.16	6.76	Mean		
0.81	6.38	0.39	0.32	1.16	6.59	Minimum		
0.90	6.89	0.71	0.47	1.28	7.68	Maximum	Lenjan	
1.56	75.71	1.32	0.72	4.73	16.79	Mean		
1.26	12.81	1.29	0.62	4.70	12.08	Minimum	Ardestan	
1.91	384.04	1.34	0.82	4.82	22.23	Maximum		

در مطالعه‌ای که طاعتی و همکاران (Taati et al. 2020) بر روی خاک‌های سطحی منطقه صنعتی اراک انجام دادند مس و نیکل فاکتور غنی‌شدگی کمتر از ۱/۵ دارند که نشان می‌دهد منشأ احتمالی آن‌ها زمین‌شناسی است. در حال که سرب، روی، کادمیم و آرسنیک، فاکتور غنی‌شدگی بیشتر از ۱/۵ دارند که این فلزات می‌توانند به فعالیت‌های انسانی نسبت داده شوند. همچنین بیان کردند که شاخص زمین انباشتگی برای مس، نیکل و روی دارای سطح غیر آلوده، سرب غیر آلوده تا آلودگی متوسط، کادمیم آلودگی متوسط و آرسنیک آلودگی متوسط تا شدید دارند.

تومانیان و همکاران (Toomanian et al. 2022) در مطالعه‌ای که بر روی غلظت فلزات سنگین گردوغبار و خاک سطحی کوهدشت استان لرستان انجام دادند به این نتیجه رسیدند که ضریب غنی‌سازی سالانه کادمیوم (۳۳/۹) و روی (۲۴/۶) بسیار بالا، نیکل (۱۱/۳) قابل‌توجه، سرب (۶/۴) متوسط، منگنز (۱) و مس (۰/۸۲) کم بود. بر اساس مقادیر ضریب غنی‌سازی، به نظر می‌رسد کادمیوم، روی و نیکل منشأ انسانی دارند، سرب هم منشأ انسانی و هم منشأ طبیعی دارد و مس و منگنز فقط منشأ طبیعی دارند.

جدول ۶ تأثیر اکولوژیکی آلودگی عناصر سنگین را در خاک نشان می‌دهد. شاخص ریسک اکولوژیک (RI) در کل منطقه، خمینی‌شهر، اصفهان، فلاورجان، زاینده‌رود و اردستان به ترتیب ۳۶۷/۰۰، ۳۵۷/۰۹، ۴۳۴/۷۹، ۳۴۸/۶۷، ۱۵۹/۸۹ و ۵۹۱/۰۴ است که با توجه به این شاخص شهرستان زاینده‌رود دارای ریسک اکولوژیک متوسط، شهرستان های خمینی‌شهر، فلاورجان، اصفهان و اردستان دارای ریسک اکولوژیک قابل‌توجه هستند.

Table (6) Average coefficient of potential environmental risk (E_r) and potential ecological risk (RI) in the entire region and the studied counties

RI	Zn	As	Ni	Cu	Pb	Cd	E_r index
367.00	1.26	154.28	3.95	1.87	13.64	192.00	Whole region
357.09	1.15	110.17	4.36	1.78	14.63	225.00	Khomeinishahr
434.79	2.13	127.06	4.47	2.06	20.07	279.00	Isfahan
348.67	1.19	103.11	4.69	1.83	15.85	222.00	Falavarjan
159.89	0.79	58.56	2.60	1.72	5.22	091.50	Lenjan
591.04	1.17	428.39	3.65	2.03	13.30	142.50	Ardestan

در میان عناصر موردمطالعه بالاترین ریسک اکولوژیکی در کل منطقه و تمام شهرستان‌های موردمطالعه مربوط به عنصر کادمیم می‌باشد. افشاری و همکاران (Afshari et al. 2015) در مطالعه‌ای که بر روی خاک‌های مرکزی استان زنجان انجام دادند، با توجه به مقادیر ریسک اکولوژیک بالقوه هر یک از عناصر، بیان کردند که آهن، منگنز، کروم، کبالت و نیکل دارای کمترین میزان ریسک اکولوژیک هستند و احتمالاً این عناصر بیشتر تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی و زمین‌شناختی منطقه قرار دارند؛ درحالی‌که سرب، روی و کادمیم ریسک اکولوژیک بیشتری نشان دادند و احتمالاً تحت تأثیر بیشتری از فعالیت‌های انسانی در منطقه قرارگرفته‌اند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های موردمطالعه در شهرستان‌های مختلف، یکسان نیست و شدت و الگوی آلودگی با ویژگی‌های محیطی و منابع بالقوه انتشار در هر منطقه ارتباط دارد. در میان شهرستان‌های موردمطالعه، اصفهان ازنظر سرب و روی وضعیت نامطلوب‌تری نشان داد که می‌تواند با حضور منابع معدنی و صنعتی و شدت بالای تردد وسایل نقلیه در این منطقه مرتبط باشد. در مقابل، غلظت بالای آرسنیک در اردستان، باوجود قرارگیری این شهرستان در گروه مناطق غیر صنعتی، اهمیت نقش عوامل زمین‌شناختی و منابع طبیعی را در کنترل کیفیت خاک نشان می‌دهد. بنابراین، بالا بودن غلظت فلزات در خاک را نمی‌توان صرفاً به فعالیت‌های صنعتی نسبت داد و در ارزیابی آلودگی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و شرایط منطقه نیز باید موردتوجه قرار گیرند.

نتایج شاخص‌های زمین انباشتگی و فاکتور غنی‌شدگی نیز نشان دادند که کادمیم، آرسنیک و سرب از مهم‌ترین عناصر نیازمند توجه در مناطق موردمطالعه هستند و در برخی شهرستان‌ها سهم منابع انسان‌زاد در افزایش غلظت این عناصر قابل‌توجه است. همچنین، نتایج ارزیابی ریسک اکولوژیک نشان داد که شدت خطر در شهرستان‌ها متفاوت بوده و اصفهان و اردستان در وضعیت ریسک اکولوژیک بسیار بالا قرار دارند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مدیریت آلودگی خاک در منطقه نباید بر یک منبع یا یک شهرستان متمرکز شود، بلکه لازم است برای هر منطقه بر اساس نوع و منشأ غالب آلاینده، راهبرد مدیریتی متناسب در نظر گرفته شود. ازنظر کاربردی، پایش دوره‌ای فلزات پرخطر، به‌ویژه آرسنیک، کادمیم و سرب، در خاک‌های کشاورزی و مناطق پیرامون کانون‌های صنعتی و معدنی می‌تواند برای شناسایی زودهنگام مناطق پرخطر و جلوگیری از گسترش آلودگی ضروری باشد. با توجه به‌احتمال انتقال این عناصر از خاک به محصولات کشاورزی و درنهایت ورود آن‌ها به زنجیره غذایی، بررسی هم‌زمان خاک، گیاهان و سایر اجزای زنجیره غذایی در مطالعات آینده می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی کمک کند. همچنین، در مناطقی مانند اردستان که غلظت آرسنیک بالا بوده است، بررسی دقیق‌تر منشأ زمین‌شناختی و قابلیت انتقال و جذب این عنصر می‌تواند مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی پایش و مدیریت آلودگی باشد.

باوجود بررسی غلظت فلزات سنگین، ارزیابی وضعیت آلودگی و بررسی ویژگی‌های خاک در مناطق موردمطالعه، این پژوهش با برخی محدودیت‌ها همراه بود. در بخش کنترل کیفیت آزمایشگاهی، تعیین مستقل درصد بازیابی عناصر در اختیار پژوهش حاضر نبود و زیست‌فراهمی عناصر نیز بررسی نشد؛ ازاین‌رو، نتایج بر اساس غلظت کل عناصر و شاخص‌های مورداستفاده در ارزیابی آلودگی و خطر تفسیر شدند. همچنین، با توجه به تفاوت تعداد نمونه‌ها در شهرستان‌های مختلف، مقایسه بین مناطق عمدتاً بر اساس الگوی غلظت‌های مشاهده‌شده انجام شد و از تعمیم مستقیم نتایج به کل شهرستان‌ها بااحتیاط استفاده شد.

با توجه به این محدودیت‌ها، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، تعیین درصد بازیابی به‌صورت کامل‌تر انجام شود و در کنار غلظت کل فلزات، زیست‌فراهمی و کسرهای شیمیایی عناصر نیز موردبررسی قرار گیرد. همچنین، افزایش و متعادل‌سازی تعداد نمونه‌ها در مناطق مختلف می‌تواند امکان مقایسه آماری دقیق‌تر بین شهرستان‌ها را فراهم کند. بررسی جامع‌تر مسیرهای مواجهه و ارزیابی ریسک سلامت انسان با استفاده از داده‌های دقیق‌تر مواجهه می‌تواند به شناخت بهتر پیامدهای احتمالی آلودگی فلزات در مناطق موردمطالعه کمک کند.

References

Afshari, A., Khademi, H., & Hojati, S. (2016). Assessment of heavy metals pollution risk in soils of central Zanjan province based on pollution indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(6), 21-40. [in Persian with English Abstract].

Angon, P. B., Islam, M. S., KC, S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., & Suchi, S. A. (2024). Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. Heliyon, 10(7), e28357. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357.

Apeagyei, E., Bank, M.S., & Spengler, J.D. (2011). Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts. *Atmospheric Environment*, 45, 2310–2323. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.015.

Atabaki, M.R., & Lotfi, A. (2018). Investigation of heavy metal soil concentration (Pb, Cd, Zn and Cu) in different areas of Isfahan in 1396. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*, 4 (1), 21-30. [in Persian with English Abstract].

Chiroma, T. M,, Ebewele, R. O., & Hymore, F. K. (2014). Comparative assessment of heavy metal levels in soil, vegetables and urban grey wastewater used for irrigation in Yola and Kano, Nigeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3 (2), 01-09.

Díaz Rizo, O., Castillo, F.E., López, J.O.A., Merlo, M.H., & Echeverrı, R.F. (2011). Assessment of heavy metal pollution in urban soils of Havana city, Cuba. *Bull Environ Contam Toxicol*, 87, 414–419. https://doi.org/10.1007/s00128-011-0378-9.

Guan, Q., Wang, F., Xu, C., Pan, N., Lin, J., Zhao, R., Yang, Y., & Luo, H. (2018). Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: A case study in Hexi Corridor, northwest China. *Chemosphere*, 193, 189–197. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.151.

Granero, S., & Domingo, J. L. (2002). Levels of metals in soils of Alcala´ de Henares, Spain: human health risks. *Environment International*, 28, 159-64. https://doi.org/10.1016/s0160-4120(02)00024-7.

Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14 (8), 975-1001. https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8

Hector, F.M., Oscar, R. M., Enrique, M. S., Ma-Del, O.B., Ana, L.B. (2011). Heavy metals in agricultural soils and irrigation waste water of Mixquiahuala, Hidalgo, Mexico. *African Journal of Agricultural Research*, 6 (24), 5505-5511.

Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A. D., Alessi, D. S., Luo, J., Tsang, D. C. W., Sparks, D. L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. Nature Reviews Earth & Environment, 1(7), 366–381. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y.

Jorkesh, S. H., Salehi, M. H., & Esfandiarpour, I. (2014). Comparison of The Spatial Variability of Magnetic Susceptibility and some of Heavy metals in Soils of Lenjanat Region, Isfahan. *Journal of Water and Soil*, 28(3), 575-586. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26557. [in Persian with English Abstract].

Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y. M., Huang, Y. Z., Zhu, Y. G. (2008). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food-crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 152: 686--692. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.056.

Khosravi, E., Houdaji, M., & Etemadifar, M. (2014). The Relationship of Concentrations of Lead and Zinc and Multiple Sclerosis in Isfahan Province, Iran. *Journal Isfahan Med Sch*, 32(275), 160-169. [in Persian with English Abstract].

Li, D., Lu, Q., Cai, L., Chen, L., & Wang, H. (2023). Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Urban Parks at a Megacity of Central China. *Toxics*, 11, 257. https://doi.org/10.3390/toxics11030257

Mohajer, R., Salehi, M . H., Mohammadi, J., Emami, M. H., & Azarm, T. (2012) The status of lead and cadmium in soils of high prevalenct gastrointestinal cancer region of Isfahan. *Journal of Research in Medical Sciences*. 210-214.

Muller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2, 108–118.

Nriagu, J.O. (1996). A history of Global metal pollution. *Science*, 272, 223–224. https://doi.org/10.1126/science.272.5259.223

Özkul, C. (2016). Heavy metal contamination in soils around the Tunçbilek Thermal Power Plant (Kütahya, Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(5), 284. https://doi.org/10.1007/s10661-016-5295-2.

Qin, G., Niu, Z., Yu, J., Li, Z., Ma, J., & Xiang, P. (2021). Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology. Chemosphere, 267, 129205. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129205.

Ramirez-Andreotta, M.D., Brusseau, M. L., Artiola, J. F., & Maier, R.M. (2013a). A greenhouse and field-based study to determine the accumulation of arsenic in common homegrown vegetables grown in mining-affected soils. *Science Total Environment*, 443, 299--306. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.095.

Ramirez-Andreotta, M. D., Brusseau, M. L., Beamer, P., & Maier, R. M. (2013b). Home gardening near a mining site in an arsenic-endemic region of Arizona: assessing arsenic exposure dose and risk via ingestion of home garden vegetables, Soils, and Water. *Science Total Environment*, 454/455, 373-382.

Ren, S., Song, C., Ye, S., Cheng, C., & Gao, P. (2022). The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: A meta-analysis. Science of the Total Environment, 806, 150322. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150322.

Rodriguez Martin, J. A., Lopez Arias, M., & GrauCorbi, J. M. (2006). Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geoestatistical methods to study spatial variations. *Journal of Environmental Pollution*, 14, 1001-1012. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.045.

Silva, F. L.B.V.L.B.V., do Nascimento, C.W.A., Araújo, P.R.M., da Silva, F.L.B.V.L.B.V., & Lima, L.H.V., 2017. Soil contamination by metals with high ecological risk in urban and rural areas. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 14, 553–562. https://doi.org/10.1007/s13762-016-1170-5.

Sutherland, R.A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39, 611–627. https://doi.org/10.1007/s002540050473.

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 Environmen*, 13 (2) :335-348. [in Persian with English Abstract].

Taylor, S. R. (1964). Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. Geochimica et Cosmochimica Acta, 28(8), 1273–1285. https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90129-2.

Toomanian, N., Alipour, H., Jalalian, A., Honarjoo, N. & Sarmadian, F. (2022). Evaluation of Heavy Metal Dust Pollution and their Origin in the Atmosphere of Kuhdasht, Lorestan Province. *Journal of Water and Soil Science*, 25(4), 147-162.

Tume, P., González, E., Reyes, F., Fuentes, J.P., Roca, N., Bech, J., Medina, G., Pablo, J., Roca, N., Bech, J., Medina, G., Fuentes, J.P., Roca, N., Bech, J., & Medina, G. (2019). Sources analysis and health risk assessment of trace elements in urban soils of Hualpen, Chile. *Catena*, 175, 304–316.

Waisberg, M. Joseph, P., Hale, B., & Beyersmann, D. (2003). Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. *Toxicol.* 192, 95-117. https://doi.org/10.1016/ S0300-483X(03)00305-6.

Wan, Y., Liu, J., Zhuang, Z., Wang, Q., & Li, H. (2024). Heavy metals in agricultural soils: Sources, influencing factors, and remediation strategies. Toxics, 12(1), 63. https://doi.org/10.3390/toxics12010063.

Wang, H., & Lu, S., 2011. Spatial distribution, source identification and affecting factors of heavy metals contamination in urban–suburban soils of Lishui city, China. *Environmental Earth Sciences* , 64 (7), 1921–1929. https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2021121505.

Wang, R., Zou, X., Cheng, H., Wu, X., Zhang, C. & Kang, L. (2015). Spatial distribution and source apportionment of atmospheric dust fall at Beijing during spring of 2008–2009. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 3547-3557. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3583-3.

Wen, M., Ma, Z., Gingerich, D. B., Zhao, X., & Zhao, D. (2022). Heavy metals in agricultural soil in China: A systematic review and meta-analysis. Eco-Environment & Health, 1(4), 219–228. https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.10.004.

Yasar, U., Ozyigit, I. I., & Serin, M. (2010). Judas tree (Cercissiliquastrum L. subsp.siliquastrum) as a possible bio-monitor for Cr, Fe and Ni in Istanbul (Turkey). *Romanian Biotechnological Letters*, 15 (1), 4979-4989.

Yılmaz, R., Sakcali, S., Yarci, C., Aksoy, A., & Ozturk, M. (2006). Use of aesculushippocastanum L. as a bio-monitor of heavy metal pollution. *Pakistan Journal of Botany*, 38 (5), 1519-1527.