FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 10, Number 4, Winter (2026)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Comprehensive assessment of pollution indicators in agricultural soils around the Zayandeh Rood River in Isfahan

Mohammad Mehdi Fathian[1], Nasrin Gharahi[2]*, Ali Jafari[2], Mohsen Bahmani[3]

1. Master's degree student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
*2. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
3. Department of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

*Email Address: na_gharahi@yahoo.co.uk, nasrin.gharahi@nres.sku.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2025/10/15
Revised Date:
2025/11/24
Accepted Date:
2025/11/30
Published Date:
2026/01/28

Keywords:
Pollution,
heavy metals,
enrichment factor,
ecological risk,
pollution factor

ABSTRACT

Soil contamination with heavy metals is a significant environmental concern due to its potential to enter the food chain through plant uptake or infiltrate surface and groundwater, thereby posing risks to human and ecological health. These metals are stable and can accumulate in soil by binding with organic and inorganic matter, eventually entering the human body via ingestion, inhalation, or dermal contact. This study aimed to investigate the concentration of heavy metals in 108 soil samples collected from agricultural lands along the Zayandeh Rud River in Isfahan, Iran. The study area comprised agricultural fields adjacent to the Zayandeh Rud River in the Sajzi and Gavkhoni plains. Soil samples were collected from at least 108 points downstream of these agricultural lands. Data analysis was performed using Excel and SPSS, and soil pollution was evaluated through environmental indices including the enrichment factor (EF), geoaccumulation index (Igeo), pollution coefficient (CF), and ecological risk index (RI). Results indicated that the average geoaccumulation index for the five analyzed metals was 0.126, classifying the soils as uncontaminated. The mean ecological risk index was 13.925, suggesting a low ecological risk, while the mean pollution coefficient was 2.0235, indicating a moderate pollution level. The average enrichment factor was 2.242, highlighting a need for further investigation. Overall, heavy metal contamination in the studied soils was generally not of serious concern. Despite the absence of severe contamination, neglecting proper soil and water management or other pollution sources, such as agricultural pesticides, could lead to future environmental challenges. Therefore, the promotion of sustainable agricultural practices alongside regular monitoring is critical to safeguard soil health, maintain production resources, and ensure long-term food security. This study provides a valuable reference for future research on soil contamination management in agricultural regions.

Cite this article: Mohammad Mehdi Fathian , Nasrin Gharahi , Ali Jafari , Mohsen Bahmani (2026). Comprehensive assessment of pollution indicators in agricultural soils around the Zayandeh Rood River in Isfahan**,** Journal of Environmental Sciences Studies, 10(4), Pages 10836-10847.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Heavy metals in soil are known as a very important pollutant and can be absorbed by plants and enter the food chain or by entering surface and underground water resources, they endanger the health and life of living organisms. Heavy metals are stable and accumulated in nature and if combined with organic and inorganic soil materials, they can enter the food chain. Then they penetrate the human body through food. Heavy metals can be absorbed into the human body through inhalation, skin contact, or direct ingestion. This study aimed to investigate the concentration of heavy metals in 108 soil samples from agricultural lands around the Zayandeh Rud River in Isfahan.

Materials and methods

The study area includes agricultural areas adjacent to the Zayandeh Rud River in Isfahan in the Sajzi and Gavkhoni foothill plains. Soil sampling was carried out from at least 108 points of river sediments in the downstream area of agricultural lands in the Sajzi-Gavkhoni-Kuhpayeh plains. The results of the experiment and comparison of the results of the element analysis were analyzed using Excel and SPSS software. One of the common methods for quantifying soil pollution is the use of environmental indices. In this study, soil pollution was evaluated using pollution indices including: enrichment factor, geoaccumulation index, pollution factor and ecological risk.

Results and discussion

The average geochemical index for 5 metals was measured as 0.126, which is in class 1, i.e. non-polluted. The average ecological risk index for 5 metals measured was calculated as 13.925. Which is less than 40 and indicates low ecological risk. The average pollution coefficient index for 5 metals measured was calculated as 2.0235. Which indicates medium pollution coefficient index. The average enrichment coefficient index for 5 metals measured was calculated as 2.242. The results showed that in all the samples studied, the level of heavy metal contamination in agricultural soils around the river is not in most cases of a serious concern. Except for the enrichment factor, which requires further measures and investigations. Continued monitoring of soil quality as well as assessment of the environmental impacts of agricultural and industrial activities in this area seems essential to preserve the ecosystem and soil health. This study can serve as a basis for future research in the field of soil contamination management in agricultural areas. Interpretation of the results of environmental indicators showed that continuous monitoring and monitoring of changes in the concentration of these elements in the studied soils is essential to preserve production resources and achieve food security.

Conclusion

Overall, the concerning nature of these results, coupled with the limitations of the data, suggests that neglecting other sources of pollution – such as contamination from organic matter and pesticides used in agriculture – could lead to further problems. Furthermore, the absence of severe heavy metal contamination should not result in neglecting optimal soil and water management in the region. Ultimately, although heavy metal contamination is not currently a major concern, continued monitoring and the promotion of sustainable agricultural practices remain essential to prevent future environmental issues.

مجله مطالعات علوم محیط زیست
جلد ۱۰ , شماره ۴
Journal Homepage:www.jess.ir
شاپای چاپی: 2588-6851 شاپای الکترونیکی: 2645-520X

FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

ارزیابی جامع شاخص‌های آلودگی در خاک‌های کشاورزی اطراف رودخانه زاینده رود در اصفهان

محمدمهدی فتحیان[۱]، نسرین قرهی[۲*]، علی جعفری[۲]، محسن بهمنی[۳]

۱–دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
*۲– دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
۳– دانشیار گروه مهندسی صنایع مبلمان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
*ایمیل نویسنده مسئول: na_gharahi@yahoo.co.uk, nasrin.gharahi@nres.sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۷/۲۳
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۴/۰۹/۰۳
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۹/۰۹
تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۱۱/۰۸

کلید واژه ها:
آلودگی، فلزات‌سنگین، شاخص زیست محیطی، فاکتور غنی‌شدگی، خطر اکولوژیکی، فاکتور آلودگی

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی غلظت فلزات‌سنگین روی، مس، کادمیوم، نیکل و سرب در خاک زمین‌های کشاورزی اطراف رودخانه زاینده‌رود در اصفهان انجام شد. منطقه مورد مطالعه شامل محدوده‌های کشاورزی همجوار رودخانه زاینده رود در اصفهان و رسوبات رودخانه زاینده رود در محدوده دشت کوهپایه سجزی و گاوخونی است. نمونه برداری خاک حداقل از ۱۰۸ نقطه از رسوبات رودخانه در منطقه پایین دست زمین‌های کشاورزی در محدوده دشت کوهپایه–سجزی–گاوخونی انجام گرفت. در این پژوهش به ارزیابی آلودگی خاک با استفاده از شاخص‌های آلودگی شامل: فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی، فاکتورآلودگی و خطر اکولوژیکی پرداخته شد. میانگین شاخص ژئوشیمیایی برای پنج فلز ۰/۱۲۶ اندازه‌گیری شدکه در کلاس یک یعنی غیر آلوده قرار دارد. میانگین شاخص خطر اکولوژیکی برای پنج فلز اندازه‌گیری شده ۱۳/۹۲۵ محاسبه شد. که کمتر از ۴۰ است و خطر اکولوژیکی کم را نشان می‌دهد. میانگین شاخص ضریب آلودگی برای پنج فلز اندازه‌گیری شده ۲/۰۲۳۵ محاسبه شد که ضریب‌آلودگی متوسط را نشان می‌دهد. میانگین شاخص ضریب غنی‌شدگی برای پنج فلز اندازه‌گیری شده ۲/۲۴۲ محاسبه شد. نتایج نشان داد که سطح آلودگی فلزات‌سنگین در خاک‌های کشاورزی در اطراف رودخانه در بیشتر موارد در اندازه‌ای نیست که نگرانی جدی ایجاد کند. ادامه پایش کیفیت خاک و همچنین ارزیابی اثرات زیست محیطی فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در این منطقه برای حفظ محیط و سلامت خاک ضروری به نظر می‌رسد. این مطالعه می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحقیقات آینده در زمینه مدیریت آلودگی خاک در نواحی کشاورزی عمل کند.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2025.553403.2415

۱-مقدمه

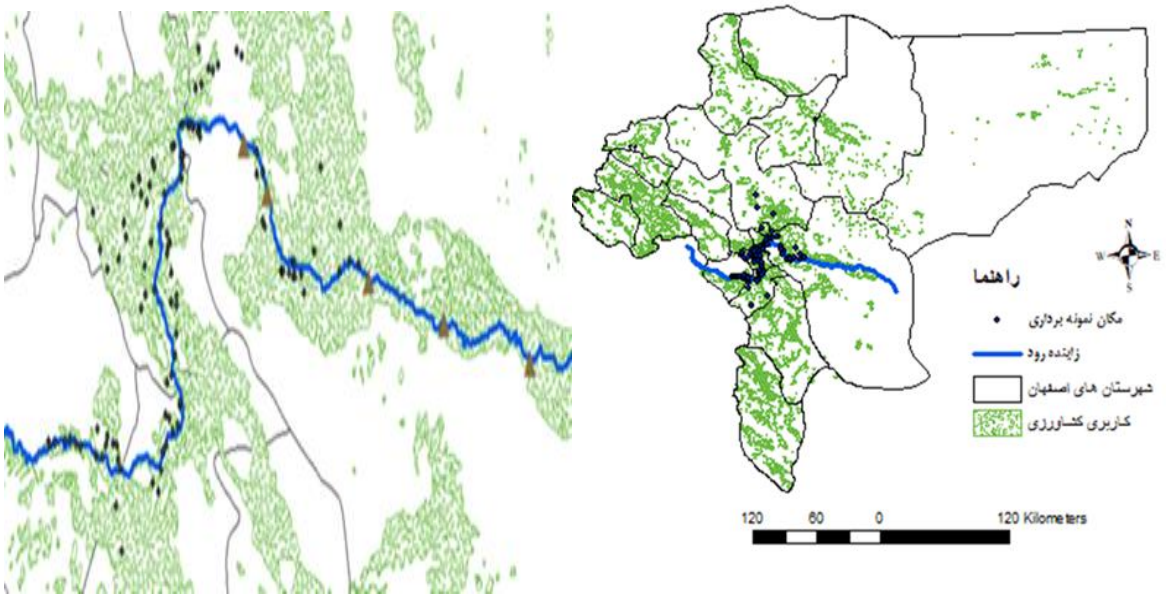
خاک جزء ضروری اکوسیستم زمین و مخزن فلزات‌سنگین است. همچنین به‌عنوان مجرایی برای پراکندگی و ورود فلزات‌سنگین به محیط‌زیست آب و موجودات زنده می‌باشد (Qin et al, 2021; Rajendran et al, 2022). منشا عناصرسنگین در خاک به دو صورت طبیعی یا انسانی است. آتشفشان، هوازدگی موادمعدنی و فرسایش، منابع طبیعی ورود این عناصر به خاک می‌باشد. به طور مثال؛ سنگ‌های آتشفشانی در سطح زمین زمانی که مورد هوازدگی قرار می‌گیرند. به عنوان یک منبع برای ورود عناصرسنگین تبدیل می‌شوند (Toth et al, 2016). دیگر فعالیت‌هایی مانند کشاورزی و صنعتی نیز منشا ورود عناصرسنگین به خاک هستند (Sun et al, 2013) . از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های خاک، فلزات‌سنگین، باران‌های اسیدی و مواد آلی هستند. که از این بین، فلزات‌سنگین به دلیل ویژگی‌های آلایندگی‌شان در خاک مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند (Brannon and Patrick, 1987). آلودگی فلزات‌سنگین با فعالیت‌های انسانی از قبیل معدنکاوی، صنایع فلزی و شیمیایی، وسایل نقلیه فرسوده و غیره در ارتباط است (Igwe and Abia, 2006). ظرفیت خاک برای نگهداری فلزات در صورتی که فلزات‌سنگین در خاک تجمع پیدا کنند؛ کاهش پیدا میکند. در نتیجه فلزات تجمع پیدا کرده وارد محصول می‌شود و زیست دسترس پذیری افزایش می‌یابد (Sun et al, 2013). تجمع فلزات‌سنگین از طریق برهم زدن فعالیت‌های ریزجانداران خاک، اکوسیستم خاک را به خطر میاندازد. امروزه آلودگی فلزات‌سنگین به طور گسترده‌ای بر روی کره زمین گسترش یافته است و باعث ایجاد خطرات جدی برای سلامتی انسان شده است (Taati et al, 2020). در میان فلزات‌سنگین کادمیوم، کروم، جیوه، منگنز، سرب، بیسموت، قلع، تلوریم، تنگستن و روی باعث ایجاد مشکل در کره زمین می‌شوند. و یکسری عناصر مانند برلیوم، کادمیوم، مس، جیوه، نیکل، سرب، سلنیم، وانادیم و روی بالاترین خطر را برای محیط‌زیست دارا می‌باشند (Dabiri, 2003). در دراز مدت انباشت عناصرسنگین موجب کاهش کیفیت خاک و در نهایت باعث تخریب زمین‌های کشاورزی می‌شود (Amini et al, 2006). به منظور ارزیابی محیط‌زیستی خاک‌های سطحی منطقه مورد مطالعه، غلظت هر یک از این فلزات نسبت به غلظت عناصر در دامنه طبیعی سنجیده می‌شود که می‌توان معیار مناسبی از ارزیابی میزان دخالت فعالیت‌های انسانی تلقی گردد (Zio et al, 2004). اطلاع از شکل و مقدار فلزات‌سنگین موجود در خاک می‌تواند باعث شود مدیریتی مناسبی برای کاهش فلزهای سنگین در خاک اتخاذ شود (Yari et al, 2016). اولین مرحله در ارزیابی آلودگی، تعیین آلودگی فلزات‌سنگین در مناطق مشکوک می‌باشد. در مرحله بعد می‌توان به ارزیابی و تحلیل وضعیت آلودگی منطقه مورد مطالعه با بهره‌گیری از شاخص‌های آلودگی مانند: فاکتور آلودگی (Cf)، شاخص ژئوشیمیایی مولر (Igeo)، ضریب غنی‌شدگی (EF)، ضریب آلودگی (Cf)، شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه برای آلودگی فلز واحد (Er)، پرداخت. این شاخص‌ها قادر هستند وضعیت آلودگی منطقه را از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار بدهند و اطلاعات مفید و کارآمد ارائه کنند (Lio et al, 2014). به منظور ایجاد تعادل و کاهش اثرات منفی فلزات سنگین در خاک، دو استراتژی مؤثر وجود دارد: ۱) روش‌های تصفیه، اصلاح، پایش و بهسازی خاک که از طریق روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌توانند به کاهش غلظت این فلزات منجر شوند. روش‌های فیزیکی شامل جداسازی و استخراج فلزات از خاک است، در حالی که روش‌های شیمیایی می‌توانند شامل استفاده از مواد شیمیایی برای تثبیت یا حذف فلزات باشند. همچنین، روش‌های بیولوژیکی مانند استفاده از گیاهان برای جذب فلزات می‌توانند به عنوان یک راهکار سبز و پایدار در نظر گرفته شوند. ۲) روش‌های مبتنی بر مدیریت و کنترل منابع آلودگی، شامل شناسایی و مدیریت منابع اصلی آلودگی، مانند فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، می‌توانند به کاهش ورود فلزات‌سنگین به خاک کمک کنند. این روش‌ها، شامل اجرای مقررات سختگیرانه‌تر برای صنایع، استفاده از تکنولوژی‌های پاک و پایدار و آموزش ترویجی کشاورزان در مورد استفاده بهینه از کودها و سموم است. همچنین، ایجاد مناطق حفاظتی و استفاده از پوشش‌های گیاهی می‌تواند به کاهش فرسایش خاک و جلوگیری از ورود آلودگی به خاک‌های سالم و غیر آلوده کمک کنند (Mousavi et al, 2024). در حال حاضر از رویکردها و روش‌های مختلفی برای ارزیابی میزان آلودگی خاک به عناصرسنگین استفاده می‌شود. متداول‌ترین موارد مورد استفاده استانداردهای کیفیت خاک مقادیر حدی مربوط به محتوای یک عنصر معین و شاخص‌های ژئوشیمیایی هستند؛ زیرا تعیین غلظت این عناصر در خاک به تنهایی نشان دهنده میزان آلودگی و اثرات مخرب آن نخواهد بود (Wieczorek and Agnieszka, 2022; Nomas and Al-Shamma, 2023) شاخص‌های آلودگی برای تعیین میزان آلودگی خاک با فلزات‌سنگین و خطرات محیطی احتمالی حیاتی هستند. به دلیل سمیت بالای فلزات سنگین شناسایی منابع و درک تغییرپذیری مکانی آنها از محاسبه شاخص‌های آلودگی استفاده می‌شود (Adnan et al, 2022) . در عصر حاضر، آلودگی خاک به وسیله فلزات سنگین به عنوان یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی مطرح شده است. فلزات سنگینی چون سرب، جیوه، کادمیوم و نیکل به دلیل فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و شهری به سرعت در محیط‌زیست پراکنده شده و به تجمع درون خاک‌ها منجر می‌شوند. این تجمع نه تنها کیفیت خاک را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند بر سلامت گیاهان و جانوران تاثیر منفی بگذارد. از آنجا که فلزات‌سنگین دارای ویژگی‌های پایداری بالا هستند، از خاک به راحتی حذف نمی‌شوند و ممکن است برای سال‌ها در خاک باقی بمانند، که

چالش‌های بسیاری را برای مدیریت محیطزیست و سلامت عمومی ایجاد می‌کند. در تحقیقات مربوط به اثرات فلزات‌سنگین بر محیطزیست، استفاده از روش‌های تحلیل دقیق و استانداردهای علمی حائز اهمیت است. نمونه‌برداری مناسب از خاک‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها به کمک تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس می‌تواند کمک کند تا غلظت فلزات‌سنگین به دقت اندازه‌گیری و ارزیابی شود. علاوه بر این، محاسبه شاخص‌های آلودگی، نظیر شاخص آلودگی خاک و شاخص غنای فلزات‌سنگین، می‌تواند به محققان کمک کند تا میزان آلودگی خاک را تعیین و به مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از تجمع فلزات‌سنگین پی ببرند. با توجه به حجم بالای پژوهش‌های انجام شده در زمینه فلزات‌سنگین، در این پژوهش به بررسی دقیق‌تر اثرات فلزات‌سنگین بر خاک و محیطزیست و ارزیابی آلودگی خاک در خاک‌های کشاورزی اطراف رودخانه زاینده رود، اصفهان با استفاده از شاخص‌های زیست‌محیطی پرداخته شد. در این پژوهش، با استفاده از روش‌های تحلیلی دقیق و شاخص‌های آلودگی، اثرات فلزات سنگین بر خاک و محیط زیست مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به روند سریع افزایش و تجمع فلزات‌سنگین در خاک به دلیل فعالیت‌های انسانی در قرن اخیر، ارزیابی اثرات فلزات‌سنگین و حفاظت از خاک، یک چالش مهم زیست محیطی است.

۲-روش انجام تحقیق

موقعیت منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه شامل محدوده‌های کشاورزی همجوار رودخانه زاینده رود در اصفهان و رسوبات رودخانه زاینده رود در محدوده دشت کوهپایه سجزی و گاوخونی است (شکل۱).



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه در استان اصفهان و موقعیت نقاط نمونه برداری در اطراف رودخانه زاینده‌رود

استان اصفهان با ظرفیت تولید کشاورزی با سطح زیر کشت آبی سالیانه ۲۶۲۵۷۷ هکتار، دیم سالیانه ۳۰۵۳۱ ، باغات ۵۸۵۴۲ هکتار، ۵/۶ میلیون هکتار مرتع و حدود ۱۰۰ هزار هکتار جنگل، یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی در ایران محسوب می‌شود (اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان اصفهان). در این تحقیق تعداد ۱۰۸ نمونه خاک از عمق ۵–۳۰ سانتی‌متری برداشت شد. سعی شد نمونه‌های لازم برای تعیین زمینه از مکان‌هایی برداشت شود که تحت تأثیرکاربری کشاورزی بوده، و از نظر پراکندگی محدوده مطالعاتی را پوشش دهند. در جدول۱ ویژگی‌های نمونه‌برداری نقاط نمونه‌برداری منطقه آورده شده است.بیشتر زمین‌های کشاورزی محدوده مطالعاتی در اطراف رودخانه زاینده‌رود قرار دارند و این زمین‌ها طی سال چندین بار زیر کشت می‌روند. محصولات کشاورزی اطراف رودخانه شامل انواع سبزیجات مانند پیاز، شلغم، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، کاهو، کلم و انواع سبزی‌خوراکی، همچنین گندم، جو و برنج می‌باشند. ایستگاه‌های نمونه‌برداری خاک در زمین‌های مجاور رودخانه، با توجه به مقدار کود و سموم مصرفی در شهرستان، و همچنین زمین‌های آبیاری شده با پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، مانند تصفیه‌خانه جنوبی اصفهان و تصفیه‌خانه مبارکه انتخاب شدند. در مجموع، تعداد ۱۰۸ نمونه خاک کشاورزی از عمق ۵ تا ۳۰ سانتی‌متری در محدوده مطالعاتی در بهار سال ۱۴۰۰ برداشت شد. و آماده‌سازی نمونه‌ها طبق جدول ۱ انجام شد. نتایج آزمایش و مقایسه نتایج حاصل از تجزیه عناصر با استفاده از نرم افزار اکسل وSPSS مورد تحلیل قرار گرفت. و تمام نمونه‌ها به روش 2-ICP-MS در آزمایشگاه ACME کانادا تجزیه شدند.

جدول ۱- شرایط انتخاب، نمونه‌برداری، آماده‌سازی و تجزیه نمونه‌ها

عنوان	شرح
پراکندگی	در نمونه‌برداری سعی شد که منطقه مطالعاتی کاملا پوشش داده شود. نمونه‌ها از مکان‌هایی که به طور مستقیم تحت تأثیر آلودگی انسان‌زاد نبود، برداشت شد
خاک‌شناسی	نمونه‌برداری به گونه‌ای انجام شد که انواع خاک‌های منطقه را پوشش دهد
عمق	نمونه‌ها از عمق ۵ تا ۳۰سانتی‌متری از سطح زمین برداشت شد
وسیله نمونه‌برداری	تمام نمونه‌ها با بیلچه فولادی ضد زنگ و بی‌رنگ برداشت شدند
ذخیره نمونه	تمام نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی ضخیم و دور از نور مستقیم، جریان هوا و آب نگهداری شدند
آماده‌سازی	از غربال فولادی ضد زنگ ۶۳ میکرون برای آماده‌سازی تمام نمونه‌ها استفاده شد
تجزیه	تمام نمونه‌ها به روش 2-ICP-MS در آزمایشگاه تجزیه شدند

شاخص‌های آلودگی

الف) شاخص ژئوشیمیایی مولر(Igeo)

این شاخص برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ توسط مولر بیان گردید. از این شاخص برای اندازه‌گیری و تعریف سطح آلودگی رسوبات از طریق مقایسه غلظت کنونی عنصر با میزان آن، قبل از ورود فعالیت‌های صنعتی به منطقه، استفاده می‌شود (Karimi and Gassempoorshirazi, 2012).

$$Igeo = \log_2 \left[\frac{cn}{1.5Bn}\right]$$ رابطه (۱)

cn =غلظت عنصر مورد مطالعه در نمونه خاک یا رسوب

Bn =غلظت عنصر مورد مطالعه در مقدار زمینه (متوسط شیل جهانی) و ضریب ۱/۵ برای حذف تاثیر سنگ‌شناسی است.

این شاخص درجه آلودگی به فلزات دارای پتانسیل آلایندگی را در ۷ کلاس، بر اساس مقادیر کمی تعیین شده، ارزیابی می‌کند

ب)ضریب غنی‌شدگی(EF)

ضریب غنی‌شدگی(EF)، سطح آلودگی فلزات در خاک را نشان می‌دهد و شاخصی برای ارزیابی میزان تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آلودگی خاک توسط فلزات دارای پتانسیل آلایندگی و جداسازی منابع طبیعی و انسانی این فلزات است. ضریب غنی‌شدگی (EF) بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود (Al-Heydari et al, 2010).

$$EF = \frac{\frac{cx}{R}sample}{\frac{cx}{R}refrence}$$ رابطه (۲)

در رابطه، Cx غلظت فلز مربوطه و R غلظت فلز مبنا است. عبارت Sample به مقادیر خاکی هر یک از متغیرهای موجود اشاره دارد و عبارت Reference نیز به مقادیر متناظر این متغیرها در خاک‌های غیرآلوده اشاره دارد. این غلظت‌ها بر اساس غلظت عنصر مرجع که میتواند آلومینیوم یا آهن باشد، نرمال می‌شوند (Chen *et al*, 2016). با استفاده از این ضریب می‌توان منشاء ورود عناصر(انسان‌زاد یا زمین زاد) را نیز مشخص نمود. فاکتور غنی شدگی نشان میدهد که غلظت یک عنصر نسبت به مقدار طبیعی آن در پوسته، سنگ بستر و

خاک چه میزان افزایش داشته است. به عبارت‌دیگراین ضریب بیانگر شدت تاثیرعوامل خارجی و انسان‌زاد است (Karimi and Gassempooshirazi, 2012). مقادیر بین ۰/۵ تا ۱/۵ نشان‌دهنده آن است که عنصر مورد ارزیابی از فرآیندهای طبیعی یا مواد پوسته‌ای نشات گرفته است. در حالی که، مقادیر بزرگتر از ۱/۵ این شاخص بیانگر تأثیر عوامل انسانی بر غلظت عناصر است.

ج) ضریب آلودگی (Cf)

به منظور بیان آلودگی محیط به یک عنصر خاص میتوان از ضریب آلودگی استفاده کرد(Sarikhani et al, 2017).

رابطه (۳)
$$c_f = \frac{c_o}{c_n}$$

c_f =ضریب آلودگی، c_o=غلظت فلزدر نمونه موردبررسی، c_n = غلظت فلز در شیل میانگین به عنوان مرجع می‌باشد. بر اساس این فاکتور می‌توان غلظت فلزات را نسبت به غلظت زمینه خود سنجید و میزان آلودگی خاک را تعیین کرد (Hakanson, 1980). بر اساس این شاخص، خاک‌ها از نظر درجه آلودگی به فلزات دارای پتانسیل آلایندگی به چهار کلاس تقسیم‌بندی می‌شوند.

د) شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه برای آلودگی فلز واحد(Er)

شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه برای آلودگی فلز واحد (Er) یک شاخص کمی است که برای ارزیابی خطر اکولوژیکی یک فلز سنگین واحد در خاک استفاده می‌شود. این شاخص با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۴)
$$Er = Tr * Cf$$

که در آن:

Tr ضریب پاسخ برای سمیت فلز سنگین واحد است.

Cf عامل آلودگی است که با استفاده از فرمول Cf محاسبه می شود:

مقدار Er به شرح زیر تفسیر می شود:

Er<۴۰ خطر اکولوژیکی کم

۴۰ ≤ Er < ۸۰ خطر اکولوژیکی متوسط پایین

۸۰ ≤ Er < ۱۶۰ خطر اکولوژیکی متوسط بالا

۱۶۰ ≤ Er < ۳۲۰ خطر اکولوژیکی بالا

Er ≥ ۳۲۰ خطر اکولوژیکی بسیار بالا

شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه برای آلودگی فلز واحد یک ابزار مفید برای شناسایی و اولویت‌بندی سایت‌های بالقوه آلودگی است. همچنین می‌توان از آن برای ردیابی اثربخشی اقدامات پاکسازی استفاده کرد.

۳-نتایج

خاک‌های نمونه‌برداری شده از زمین‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه از سه دیدگاه مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. اولین دیدگاه شامل ویژگی‌های فیزیکی می‌باشد که در آن به توزیع اندازه ذرات یا بافت خاک پرداخته شد. در دومین دیدگاه، ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها مورد توجه قرار گرفت که به تعیین غلظت عناصر اصلی و جزئی در خاک‌های کشاورزی اختصاص داشت. سومین دیدگاه به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی رایج مربوط می‌شود که شامل تعیین pH خاک، هدایت الکتریکی(EC) ، ظرفیت تبادل کاتیونی(CEC) ، مقدار ژیپس ($CaSO_4$)، مقدار کربنات کلسیم ($CaCO_3$) و مواد آلی (OM) در خاک بود. این بررسی‌ها به درک بهتر وضعیت خاک‌های کشاورزی کمک می‌کند. میانگین، میانه، کمینه، بیشینه، انحراف معیار و ضریب تغییرات پارامترهای فیزیکوشیمیایی رایج در خاک‌های کشاورزی، به طور خلاصه در جدول۲ ارائه شده است. در جدول ۲ آمار توصیفی خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک سطحی منطقه موردمطالعه آورده شده است .یکی از کلیدی‌ترین عوامل کنترل‌کننده پراکنش فلزات سنگینpH خاک است (Sherene, 2010). باتوجه به نتایج به دست آمده خاک‌های منطقه مورد مطالعه با دامنه تغییرات از ۳۹ /۷ تا۸/۶۲ و میانگین ۸/۰۲ در محدوده خاک‌های کمی قلیایی تا قلیایی قرار دارند. انحراف معیار داده‌ها کم است که نشان می‌دهد مقادیر pH در نمونه‌های مختلف از میانگین کمی پراکنده هستند. مقدار EC در این خاک‌ها در دامنهٔ ۲۶۱ تا ۱۳۹۰۰میکروموس بر سانتی‌متر قرار دارد که نشان‌دهنده خاک‌های غیر شور تا شور در این منطقه است. باتوجه به داده‌ها، انحراف معیار نسبتاً پایین است و نشان می‌دهد که داده‌ها در حول میانگین آن به صورت یکنواخت پخش شده‌اند. مقدار ماده آلی نمونه‌ها در دامنه ۰/۹۷ تا۶/۶۷ و میانگین آن ۱/۶۱است که نشان دهنده آلودگی پایین خاک به فاضلاب صنعتی، رواناب کشاورزی یا فاضلاب تصفیه نشده می‌باشد. میزان ماده آلی در نمونه‌های خاک موردمطالعه در حد متوسط تا خوب قرار دارد. با توجه به مقدار انحراف معیار ۱/۰۸ مشخص است که داده‌ها از میانگین به صورت یکنواخت پخش شده‌اند. به طورکلی میزان ماده آلی تأثیرپذیری زیادی از مدیریت اراضی دارد. باتوجه به مسئله افزودن فاضلاب‌های شهری در اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه، این اراضی از نظر کربن آلی در وضعیت مناسبی قرار دارند.

مواد آلی خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک است که به طور قابل توجهی می‌تواند جذب و یا حلالیت فلزات سنگین را بسته به اسیدیته خاک و نوع ماده آلی تغییر دهد (Mousavi et al, 2022). در منطقه موردمطالعه، مقدار آهک با پراکندگی نسبتاً بالا همراه است. آهک موجود در این خاک‌ها در دامنه ۲۱/۵ تا ۴۵/۴ و با میانگین ۳۴/۶ درصد در دسته خاک‌های با آهک زیاد قرار گرفته‌اند. خاک‌های رسی آهکی و شنی آهکی به دلیل pH قلیایی نسبت به خاک اسیدی ظرفیت بیشتری برای غیر متحرک‌سازی و تثبیت فلزات‌سنگین در شکل‌های غیرقابل دسترس دارند. به‌طورکلی میزان فلز قابل جذب در خاک رسی آهکی کمتر از خاک‌های شنی آهکی بوده و در خاک‌های شنی آهکی کمتر از خاک‌های اسیدی است (Emadi and Bahmanyar, 2017).

جدول ۲- آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه

متغیر	میانگین	میانه	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات
pH آب	۸/۰۲	۸/۰۳	۷/۳۹	۸/۶۲	۰/۲۷	۰/۰۳۳۷
pH ($CaCl_2$)	۷/۸۸	۷/۹	۷/۳۸	۸/۴۵	۰/۲۰۹	۰/۰۲۶۵
EC (µs/cm)	۲۱۷۰	۱۶۰۰	۲۶۱	۱۳۹۰۰	۲۲۵۰	۱/۰۳
% OM	۲/۷۷	۲/۶۶	۰/۹۷۳	۶/۶۲	۱/۰۸	۰/۳۹
% OC	۱/۲	۱/۱۶	۰/۴۲۳	۲/۸۸	۰/۴۶۹	۰/۳۹
% TOC	۱/۶۱	۱/۵۴	۰/۵۶۵	۳/۸۴	۰/۶۲۶	۰/۳۹
$CaCO_3$ %	۳۴/۶	۳۵/۳	۲۱/۵	۴۵/۴	۵/۲۴	۰/۱۵۲
ژیپس (meq/100g)	۱۶۵	۳۵	۷/۸	۲۸۴۰	۴۶۲	۲/۷۹
CEC (meq/100g)	۱۷/۸	۲۰/۵	۱/۶۳	۳۴/۳	۶/۶۳	۰/۳۷۳
شن %	۳۱	۲۷/۱	۳/۷	۷۹/۶	۱۷/۵	۰/۵۶۶
رس %	۲۵/۷	۲۶/۸	۵/۲	۵۱/۸	۹/۱۵	۰/۳۵۷
سیلت %	۴۳/۴	۴۵/۲	۱۵/۲	۶۲/۷	۱۲	۰/۲۷۶

غلظت سرب طبق جدول ۳ در نمونه‌های بررسی شده بین ۰/۳۸ تا ۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم با میانگین ۰/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم است. حداکثر استاندارد سرب در خاک‌های جهان ، ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، و در ایران نیز ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است. پس می‌توان گفت خاک منطقه مورد مطالعه آلودگی سرب وجود ندارد. مقدار طبیعی سرب در خاک به ترکیبات مواد مادری بستگی دارد. و همچنین منابع انسانی ورود سرب به خاک شامل باتری‌ها، منابع فلزات، رنگ‌های قدیمی با پایه سرب و هرزآب فاضلاب‌ها است (Salminen *et al*, 2005). غلظت روی در نمونه‌های بررسی شده بین ۹۶۳/۵ تا ۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم با میانگین ۱۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیراست. حداکثر استاندارد روی در خاک‌های جهان، برابر با ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و در ایران ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت خاک منطقه به روی آلوده نیست. غلظت فلزسنگین نیکل در نمونه‌های بررسی شده بین ۹۴/۸ تا ۵۲/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم با میانگین ۶۶/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شده است. استاندارد مجاز نیکل در خاک‌های جهان برابر با ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. بنابراین، حداکثر مقدار نیکل در نمونه‌های خاک، نسبت به حد استانداردهای ذکر شده بیشتر است. آلودگی خاک به مس بیشتر ناشی از مواد شیمیایی کشاورزی (قارچ کش‌ها) یا رسوبات حاصل از فعالیت‌های صنعتی است (Kabata-pendias and Pendias, 2001). مقادیر مس در خاک مورد مطالعه بین ۹۷/۸ تا ۲۴/۱ بررسی شده است. همچنین، آستانه هشدار این فلز در ایران طبق جدول ۴، آلودگی خاک به این عنصر را نشان می‌دهد. غلظت کادمیوم در نمونه‌های بررسی شده بین ۲/۲۹ تا ۰/۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم با میانگین ۰/۳۶ میلی گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری شده است. میانگین غلظت این فلز در خاک‌های جهانی ۳ میلی‌گرم در کیلوگرم و در ایران ۳/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم است. بنابراین، حداکثر مقدار کادمیوم در نمونه خاک نسبت به حد استاندارد کمتر است.

جدول ۳- آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین خاک منطقه پژوهش (mg/kg)

عناصر مقادیر	روی	نیکل	مس	کادمیوم	سرب
حداقل	۵۵	۵۲/۲	۲۴/۱	۲/۲۹	۰/۰۵
حداکثر	۹۶۳	۹۴/۸	۹۷/۸	۰/۲۲	۰/۳۸
میانگین	۱۰۳	۶۶/۵	۳۵/۷	۰/۳۶	۰/۱۲
میانه	۹۰	۶۸/۰	۳۳/۲	۰/۳۲	۰/۱۱
انحراف استاندارد	۸۷/۹۶۳	۸/۹۰۸	۱۰/۴۶۸	۰/۲۰۷	۰/۰۵۳
ضریب تغییرات	۰/۸۵۶	۰/۱۳۳	۰/۲۹۳	۰/۵۴۹	۰/۴۶۸
چولگی	۹/۰۲۱	۰/۶۵۹	۲/۸۱۷	۷/۷۴۶	۲/۵۳۰
کشیدگی	۸۸/۴۵۹	۰/۶۰۱	۱۱/۹۴۶	۷۱/۳۵۵	۹/۰۷۷

مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) برای هریک از فلزات سنگین در جدول ۴ آورده شده است. مقادیر فاکتور زمین‌انباشتگی در بین فلزات سنگین متغیر می‌باشد. میانگین شاخص زمین انباشتگی(Igeo) برای فلزات‌سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های خاک به ترتیب نیکل>مس>روی>سرب>کادمیوم است. بیشترین میانگین شاخص زمین انباشتگی به فلز نیکل (۱/۲۹۸) و کمترین میانگین به فلز کادمیوم (۰/۶۳۹-) اختصاص یافته است.در منطقه مورد مطالعه سطح آلودگی هر یک از فلزات‌سنگین بر اساس میانگین اندازه‌گیری شده به این شرح می‌باشد: سرب و کادمیوم در سطح غیرآلوده، روی و مس غیرآلوده تا کمی آلوده، نیکل در سطح کمی آلوده قرار دارند. مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین ضریب آلودگی (CF) برای هر یک از فلزات‌سنگین در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که میانگین ضریب‌آلودگی برای فلزات‌سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های خاک به صورت: نیکل>مس>روی>سرب>کادمیوم می‌باشد. که بیشترین مقدار ضریب آلودگی برای فلز نیکل و کمترین میانگین ضریب‌آلودگی به فلز کادمیوم اختصاص یافت. سطح آلودگی هر یک از فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه بر اساس میانگین این فاکتور بدین شرح است که کادمیوم، سرب، مس و روی دارای آلودگی متوسط $CF<3$ و نیکل دارای آلودگی زیاد می‌باشد

جدول۴- نتایج آماری شاخص زمین انباشتگی (Igeo) فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

مقادیر Igeo	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
روی	۳/۴۸۶	-۰/۶۴۱	۰/۱۴۶	۰/۴۸۶	۳/۳۱۹
نیکل	۱/۸۱۹	۰/۹۵۹	۱/۲۹۸	۰/۱۸۹	۰/۱۴۵
سرب	۳/۱۶۳	-۱/۶۸۲	-۰/۶۲۶	۰/۷۷۴	-۱/۲۳۶
مس	۱/۹۵۶	-۰/۰۶۶	۰/۴۵۵	۰/۳۴۴	۰/۷۵۶
کادمیوم	۲/۰۸۴	-۱/۲۹۵	-۰/۶۳۹	۰/۴۳۳	-۰/۶۷۷

۴-نتیجه‌گیری

مقایسه میانگین غلظت شاخص‌های آلودگی اندازه‌گیری شده همه فلزات سنگین با مقادیر زمینه (مقدار غلظت در پوسته زمین) نشان داد که میانگین غلظت همه آنها به جز شاخص ضریب غنی‌شدگی در نمونه‌های خاک کشاورزی اطراف رودخانه کمتر از مقدار زمینه است. میانگین شاخص Igeo برای ۵ فلز اندازه‌گیری شده ۰/۱۲۶ است که در کلاس ۱ یعنی غیر آلوده قرار دارد. میانگین شاخص Er برای ۵ فلز اندازه‌گیری شده ۱۳/۹۲۵ محاسبه شد. که کمتر از ۴۰ است و خطر اکولوژیکی کم را نشان می‌دهد. میانگین شاخص Cf برای ۵ فلز اندازه‌گیری شده ۲/۰۲۳۵ محاسبه شد. که طبق شاخص ضریب‌آلودگی متوسط را نشان میدهد. میانگین شاخص Ef برای ۵ فلز اندازه‌گیری شده ۲/۲۴۲ است.در پژوهش حاضر بیشترین غنی‌شدگی خاک با فلزات بر اساس شاخصEF ، به فلز سرب>کادمیوم>روی و کمترین نیز به فلز مس مربوط می‌شود. شاخص EF بین ۰/۵ تا ۲ به دلیل وجود منشا زمین‌زاد و مقادیر بیشتر از ۲، تاثیر فعالیت‌های انسازاد است . (Hernandez et al, 2003)بر اساس نتایج به‌دست آمده، فلزات روی، کادمیوم و سرب غنای کمی داشتند و سایر عناصر بدون غنا بودند Kumar .و همکاران (۱۹۹۵) بیان کردند که کادمیم ممکن است متاثر از کنترل سنگ شناختی و منابع انسانی قرار گیرند، حتی اگر از مقادیر آستانه هشدار در خاک تجاوز نکنند Wuana .و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که آلودگی سرب و روی ممکن است به علت تاثیر فعالیت‌های انسانی موضعی ناشی از ترافیک یا تاثیر سنگ شناختی در خاک باشد. همچنین باران اسیدی و در نتیجه اسیدی شدن خاک‌ها و آب‌های سطحی باعث افزایش تحرک ژئوشیمیایی کادمیوم می‌شود. استفاده از نهاده‌های کشاورزی مانند کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، لجن‌فاضلاب، دفع زباله‌های صنعتی غلظت کل کادمیوم در خاک‌ها را افزایش می‌دهند (Wuana and Okieimen, 2011). Bao و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی که به بررسی میزان، الگو و تأثیر آلودگی خاک به فلزات سنگین در چین پرداختند، نشان داده شده که منابع اصلی آلودگی شامل فعالیت‌های انسانی مانند صنعت، کشاورزی و حمل‌ونقل می‌باشند. به‌علاوه، توزیع فضایی آلودگی در این کشور به شدت به عوامل طبیعی و انسانی وابسته است. این تحقیق تأکید می‌کند که با توجه به گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، نیاز به نظارت دقیق و برنامه‌ریزی استراتژیک برای کاهش آلودگی ضروری است. همچنین، ارزیابی الگوهای آلودگی می‌تواند به شناسایی نقاط بحرانی و توسعه راهکارهای مؤثر برای مدیریت آلودگی خاک کمک کند. استفاده از روش‌های پایدار و بهینه در کشاورزی و صنایع نیز می‌تواند به کاهش این آلودگی‌ها و حفاظت از محیط زیست کمک نماید. به‌طور کلی، ضریب تغییرات فلزات‌سنگین کمتر از ۵۰ درصد به دست آمد، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات فلزات سنگین در منطقه همگن و یکنواخت بوده است که نشان‌دهنده محدود بودن عوامل دخیل در تغییرات آن‌ها است. بیشترین میانگین هندسی غلظت کل فلزات سنگین مربوط به نیکل ۶۶/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود درحالی‌که کمترین مقدار آن برای سرب ۰/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد. غلظت فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه از حد مجاز ارائه شده توسط سازمان محیط زیست کشور کمتر بود (Department of Environment, 2012). Azimzadeh و Khadem (2013) در بررسی آلودگی خاک‌های استان مازندران با استفاده از فاکتور آلودگی، به این نتیجه دست یافتند که اغلب نمونه‌های بررسی‌شده از نظر آلودگی به فلزات سنگین مانند Pb، Cd، Cu و Zn دارای کلاس آلودگی متوسط هستند. نتایج پژوهش Barzin و همکاران (۲۰۱۵) در مورد خاک‌های استان همدان نیز نشان‌دهنده وضعیت مشابهی بود. همچنین، پژوهش Rahmani و Khan Mohammadi (2020) درباره تأثیر کارخانه سیمان سپاهان بر آلودگی فلزات‌سنگین در خاک‌های منطقه دیزیچه اصفهان نشان داد که فرونشست‌های اتمسفری ناشی از فعالیت این کارخانه می‌تواند عاملی کلیدی برای آلودگی فلزات سنگین، به‌ویژه Pb و Cd در منطقه باشد. Liu و همکاران (Liu et al, 2005) با محاسبه مقدار شاخص بار آلودگی و فاکتور آلودگی و غنی‌شدگی در پنج فلز Cr، Cu، Zn و Pb به نتایجی دست‌یافتند که نشان‌دهنده روند افزایشی غلظت هر فلز در خاک در مقایسه با سطوح زمینه بود. همچنین، شاخص فاکتور آلودگی نشان می‌دهد که آلودگی فلزات در ۲۰ سال گذشته افزایش یافته است و مقادیر شاخص بار آلودگی نیز تجمع فلزات را در این بازه زمانی تایید می‌کند. Khodakarami و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیق خود به بررسی غلظت ۱۴ فلز سنگین در کاربری‌های مختلف در بخشی از استان همدان پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که عامل اصلی مؤثر بر افزایش غلظت عناصر کروم، مس، نیکل و روی در منطقه، ساختار زمین‌شناسی است. با این حال، مصرف غیر اصولی کود در زمین‌های کشاورزی که به دلیل وجود فلزات سنگین در ساختار شیمیایی کودهای اوره، فسفات و پتاس ایجاد می‌شود، نیز می‌تواند به افزایش غلظت این فلزات در خاک منجر گردد. این مطالعات و پژوهش حاضر به‌خوبی نشان‌دهنده پیچیدگی و تنوع عوامل مؤثر بر آلودگی خاک‌های کشاورزی در مناطق مختلف ایران و جهان می‌باشد و ضرورت پیگیری تحقیقات بیشتر و اقدام‌های مدیریتی مؤثر برای کنترل آلودگی را نمایان می‌سازد. آلودگی خاک‌های کشاورزی در اصفهان موضوعی پیچیده است که بر اثر چندین عامل به وجود آمده، اما نتایج تحقیقاتی نشان می‌دهد که آلودگی به فلزات سنگین در این منطقه به میزان زیادی وجود ندارد. با وجود اینکه استفاده از سموم شیمیایی و کودهای شیمیایی در کشاورزی به تبعیت از نیازهای کشاورزان در اصفهان رایج است، بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطح فلزات سنگین در خاک، چندان بالاتر از حد مجاز نیست و در بسیاری از موارد، به استانداردهای قابل قبول نزدیک‌تر است. با این حال، نگران‌کننده بودن نتایج به همراه محدودیت‌هایی که این اطلاعات دارند، نشان‌دهنده این است که بی‌توجهی به دیگر منابع آلودگی، مانند آلودگی ناشی از مواد آلی و سموم مورد استفاده در کشاورزی، می‌تواند مشکلات دیگری را به وجود بیاورد. همچنین عدم وجود آلودگی شدید به فلزات سنگین نباید منجر به غفلت از مدیریت بهینه خاک و آب در این منطقه شود. در نهایت، هرچند

آلودگی به فلزات سنگین نگرانی چندانی ایجاد نکرده است، اما استمرار نظارت و ارتقاء روش‌های کشاورزی پایدار هنوز هم ضروری است تا از بروز مشکلات زیست‌محیطی در آینده جلوگیری شود. از منظر مدیریتی و سیاست‌گذاری، این نتایج تأکید می‌کند که فقدان آلودگی شدید به فلزات سنگین نباید منجر به کاهش حساسیت نسبت به مدیریت پایدار خاک شود. در این زمینه چند پیشنهاد قابل طرح است:

- تقویت پایش منظم کیفیت خاک در سطوح محلی و منطقه‌ای برای شناسایی تغییرات تدریجی و پیشگیری از تجمع تدریجی آلاینده‌ها.
- بهینه‌سازی الگوی مصرف کود و سم از طریق آموزش کشاورزان، ترویج مصرف هدفمند و کاهش اتکای بی‌رویه به نهاده‌های شیمیایی.
- گسترش استفاده از نهاده‌های کم‌خطرتر مانند کودهای آلی، زیستی و روش‌های کنترل بیولوژیک آفات.
- اصلاح الگوهای آبیاری و مدیریت آب مزرعه با هدف کاهش ورود ترکیبات شیمیایی به خاک و جلوگیری از شست‌وشوی آلاینده‌ها به منابع آبی.

تدوین سیاست‌های تشویقی برای کشاورزان جهت حرکت به‌سوی کشاورزی پایدار، از جمله ارائه یارانه برای نهاده‌های کم‌خطر و حمایت از فناوری‌های نوین. در مجموع هرچند نتایج نشان می‌دهد که آلودگی فلزات سنگین در اصفهان در سطح نگران‌کننده نیست، اما اتخاذ رویکردهای مدیریتی فعالانه و اجرای سیاست‌های پیشگیرانه برای حفظ پایداری خاک و جلوگیری از بروز مشکلات زیست‌محیطی در آینده کاملاً ضروری است.

منابع

- Adnan, M., Xiao, B., Xiao, P., Zhao, P., Li, R., and Bibi, S., 2022. Research Progress on Heavy Metals Pollution in the Soil of Smelting Sites in China. Science of the MDPI, 10 (231), 2-30.
- Al-Heydari, M. J., Hassan, F., Alkubaisey, A., and Douabul, A., 2010. The Geoaccumulation Index of Some Heavy Metals in Al-Hawizeh Marsh, Iraq. Journal of Chemistry, 7(1), 157-162.
- Azimzadeh, B., and Khademi, H., 2013. Estimating background concentrations for assessing the contamination of some heavy metals in surface soils of a part of Mazandaran province. Water and Soil, 27(3), 548-559. In Persian with English abstract
- Amini, M., Afyuni, M., and Khademi, H., 2006. Modeling the mass balance of Cd and Pb in agricultural lands of Isfahan. Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources, 4, 77-89. In Persian with English abstract
- Bao, Z., Sha, J., Li, X., and Sodango, H. T., 2018. Review of the Spatial Distribution, Source and Extent of Heavy Metal Pollution of Soil in China: Impacts and Mitigation Approaches. Journal of Health and Pollution, 8 (17), 53-70.
- Barzin, M., Kheirabadi, H., and Afyuni, M., 2015. An Investigation into Pollution of Selected Heavy Metals of Surface Soils in Hamadan Province Using Pollution Index. Water and Soil Science, 19 (72), 69-80. In Persian with English abstract
- Brannon, J. M., and Patrick, W. H., 1987. Fixation, transformation, and mobilization in sediments. Environmental Science and Technology, 21(5), 450-459.
- Chen, W. Q., Shi, Y. L., Wu, S. L., and Zhu, Y. G., 2016. Anthropogenic arsenic cycles: A research framework and features. J. Clean. Prod, 139, 328-336.
- Dabiri, M., 2003. Environmental pollution (air-water-soil-sound). Etehad publication, pp. 300.
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. Water Research, 14, 975-1001.
- Hernandez, L., Probst, A., Probst, J. L., and Ulrich, E., 2003. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. Science of the Total Environment, 312(1-3), 195-219.
- Igwe, J., and Abia, A. A., 2006. A bioseparation process for removing heavy metals from waste water using biosorbents. African Journal of Biotechnology, 5(11), 1167-1179.
- Kabata-Pendias, A., and Pendias, H., 2001. Trace elements in soils and plants, third ed. CRC Press, Boca Raton, London, New York.
- Karimi, M., and Gassem pooshirazi, M. R., 2012. Geochemical Distribution and Pollution rate of heavy metals (Pb, Zn, Ni, Cr and As) in Kor River sediment (south of Marvdasht). Journal of Geotechnical Geology (Applied Geology), 8(2), 133-145. In Persian with English abstract
- Khodakarami, L., Soffianian, A., Mirghafari, N., Afyuni, M., and Golshahi, A., 2012. Concentration Zoning of Chromium, Cobalt and Nickel in the Soils of Three Sub-Basins of the Hamadan Province Using GIS Technology and the Geostatistics. Water and Soil Science, 15 (58), 243-254. In Persian with English abstract
- Kumar, P. N., Dushenkov, V., Motto, H., and Raskin, I., 1995. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. Environmental Science and Technol., 29(5), 1232-1238.

- Liu, G., Yu, Y., Hou, J., Xue, W., Liu, X., Liu, Y., et al., 2014. An ecological risk assessment of heavy metal pollution of the agricultural ecosystem near a lead-acid battery factory. Ecological Indicators, 47, 210-218.
- Mousavi, S. M., Brodie, G., Payghamzadeh, K., Raiesi, T., and Srivastava, A. K., 2022. Lead Bioavailability in the Environment: Its Exposure and Effects. Journal of Advances in Environmental Health Research, 10(1), 1-14. In Persian with English abstract
- Mousavi, S. M., Raiesi, T., Sedaghat, A., and Srivastava, A. K., 2024. Potentially Toxic Metals: Their Effects on the Soil-Human Health Continuum. Journal of Advances in Environmental Health Research, 12(2), 86-101. In Persian with English abstract
- Nomas, A. H., and Al-Shamma, A., 2023. Water quality evaluation of the Main Drain in Dhi-Qar Governorate, south Iraq. Al-Qadisiyah Journal of Pure Science, 28(1), DOI: 10.29350/2411-3514.1016.
- 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.
- Rahmani, H., and Khan Mohammadi, Z., 2019. Investigation of the effect of Sepahan Cement Factory on heavy metal pollution in soils of Dizicheh region of Isfahan. Iranian Soil and Water Research, 51(7), 1701-1709. In Persian with English abstract
- Salminen, R., Batista, M., Bidovec, M., Demetriades, A., DeVivo, B., DeVos, W., Duris, M., and Tarvainen, T., 2005. FOREGS Geochemical Atlas of Europe, Part 1: Background Information, Geochemical Atlas of Europe Part 2 Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, EuroGeoSurveys, pp. 525.
- Sarikhani, S., Ghassemi Dehnavi, A., Moradpour, A., and Amiri, M., 2017. Study of Soil Pollution with Heavy Metals from Leakage of Petroleum Hydrocarbons at Kermanshah Refinery. Journal of Environment and Water Engineering, 3(2), 157-169.
- Sherene, T., 2010. Mobility and transport of heavy metals in polluted soil environment. Biological Forum—An International Journal, 2(2), 112-121.
- Sun, C., Liu, J., Wang, Y., Sun, L., and Yu, H., 2013. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China. Chemosphere, 92, 517–523.
- Taati, A., Salehi, M. H., Mohammadi, J., Mohajer, R., and Díez, S., 2020. Pollution assessment and spatial distribution of trace elements in soils of Arak industrial area, Iran: Implications for human health. Environmental Research, 187, 1-9.
- Wuana, R. A., and Okieimen, F. E., 2011. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. Journal of International Scholarly Research Network Ecology, 20, 402-647.
- Wieczorek, J., and Agnieszka, B., 2022. Pollution indices and biotests as useful tools for the evaluation of the degree of soil contamination by trace elements. Journal of Soils and Sediments, 22(2), 1-18.