



Risk assessment of toxic metals in the tailings dam associated with an iron ore processing plant

Seyed Mohammad Nazeri Bafqi¹ | Mehdi Elahi² | Soheila Rezaitabar³ | Hajar Abyar⁴

1. Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran. E-mail: s.m.nazeribafghi@stu.ardakan.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran. E-mail: m.elahi@ardakan.ac.ir

3. Yazd Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran. E-mail: s.rezaitabar@areeo.ac.ir

4. Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: hajar.abyar@gau.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 10 January 2026

Received in revised form 12 July 2026

Accepted 18 July 2026

Keywords:

Contamination factor,
Geo-accumulation Index,
Heavy metals,
Risk Index,
Solid waste.

ABSTRACT

This study was conducted to determine the concentrations of heavy metals in the tailings dam of an iron ore processing plant located in Central Iran and to evaluate their ecological and human health risks. A total of nine tailings samples were collected in autumn 2024 and combined into three composite samples for analysis. After acid digestion according to the USEPA protocol, concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), nickel (Ni), lead (Pb), and zinc (Zn) were determined using ICP-MS. Several contamination and risk indices, including the Contamination Factor (CF), Contamination Degree (CD), Geo-accumulation Index (I_{geo}), Ecological Risk Index (Eri), Potential Ecological Risk Index (RI), Hazard Index (HI), and Carcinogenic Risk (CR), were calculated. The mean concentrations ($\pm$ SD) of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn were (34.14 ± 3.14), (9.75 ± 7.18), (30.17 ± 6.81), (105 ± 25.91), (0.005 ± 0.002), (234.4 ± 124.9), (38.91 ± 12.46), and (84.38 ± 31.08) mg kg^{-1} , respectively. According to the Iranian Department of Environment standards and the I_{geo} index, most metals were within acceptable limits; however, cadmium showed elevated contamination levels and represented the primary ecological concern. The calculated CD and RI values were 44.1 and 1042.58, respectively, indicating a very high ecological risk category mainly driven by Cd accumulation. In contrast, the health risk assessment revealed that both HI and CR values remained within acceptable ranges, suggesting no significant adverse health effects for workers under current exposure conditions. Nevertheless, due to the limited number of samples, the findings should be interpreted as representative only of the sampled locations. Continuous environmental monitoring and appropriate management measures are therefore recommended to minimize potential long-term ecological impacts.

Cite this article: Nazeri Bafqi, S.M., Elahi, M., Rezaitabar, S., & Abyar, H. (2026). Risk assessment of toxic metals in the tailings dam associated with an iron ore processing plant. *Journal of Natural Environment*, 79 (3), 441-456.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.409055.2878>



Introduction

Mining activities generate large quantities of waste materials and tailings that are commonly stored in tailings dams. Because these materials may contain considerable concentrations of heavy metals and potentially toxic elements, they can act as long-term sources of contamination for soils, surface waters, and groundwater resources. The release of heavy metals through weathering, erosion, and chemical dissolution may pose risks to ecosystems and human health. Metals such as cadmium, arsenic, lead, and mercury are of particular concern due to their toxicity, persistence, and bioaccumulation potential. Although iron ore tailings generally differ from those of many metal mines, they may still contain significant concentrations of heavy metals. Therefore, assessing contamination levels and associated ecological and human health risks is essential for sustainable mine waste management. This study aimed to determine heavy metal concentrations in the tailings dam of an iron ore processing plant and to evaluate contamination status, ecological risk, and potential health impacts using commonly applied contamination and risk indices.

Material and Methods

The study was conducted at the tailings dam of an iron ore processing plant located in the Central Plateau of Iran. Sampling was carried out during autumn 2024. To minimize the influence of atmospheric deposition and surface contamination, samples were collected from a depth of 20 cm. Nine samples were collected from different locations within the tailings dam and combined into three composite samples. After drying, sieving, and acid digestion, concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), nickel (Ni), lead (Pb), and zinc (Zn) were measured using Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP–MS). Contamination levels were evaluated using the Contamination Factor (CF), Contamination Degree (CD), and Geo-accumulation Index (Igeo). Ecological risk was assessed through the Ecological Risk Factor (Eri) and Potential Ecological Risk Index (RI). Human health risks were evaluated according to the USEPA framework using the Hazard Index (HI) and Carcinogenic Risk (CR). Background concentrations used in the calculations were obtained from published scientific sources. Given the limited sample size, the study was descriptive in nature and no inferential statistical analyses were performed.

Results

The mean concentrations ($\pm$ SD) of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn were 34.14 ± 3.14 , 9.75 ± 7.18 , 30.17 ± 6.81 , 105 ± 25.91 , 0.005 ± 0.002 , 234.4 ± 124.9 , 38.91 ± 12.46 , and 84.38 ± 31.08 mg kg⁻¹, respectively. Nickel and copper exhibited the highest concentrations, whereas mercury showed the lowest concentration. Comparison with reference values indicated that most elements were within acceptable limits. However, cadmium exceeded its background concentration and represented the principal contributor to contamination. The CF results classified cadmium as exhibiting very high contamination, whereas the remaining metals ranged from low to moderate contamination levels. The calculated CD value was 44.1, indicating a high overall contamination level. Similarly, Igeo values suggested that most elements were uncontaminated to slightly contaminated, while cadmium displayed a notably higher contamination status. Ecological risk assessment revealed that cadmium was the dominant contributor to ecological risk. The RI value was calculated at 1042.58, placing the site within the category of very high ecological risk. Most of this risk was attributable to cadmium, while the contributions of the other metals were relatively minor. The human health risk assessment produced an HI value of 0.2228, which is below the threshold value of 1, indicating a low likelihood of significant non-carcinogenic effects for exposed individuals. The calculated carcinogenic risk (CR) was approximately 1.8×10^{-5} , falling within the acceptable range recommended by USEPA. Therefore, under the exposure scenarios considered, the investigated metals were not expected to pose significant carcinogenic or non-carcinogenic risks to workers or nearby populations.

Discussion and Conclusion

The findings indicate that, despite generally acceptable concentrations of most investigated metals, cadmium represents the primary environmental concern within the studied tailings dam. Its elevated CF and Eri values, together with its dominant contribution to RI, highlight its critical role in determining

the ecological condition of the site. This result is consistent with the high toxicity and environmental significance of cadmium reported in previous studies. The study also demonstrated that ecological risk and human health risk assessments may lead to different conclusions. While cadmium generated a very high ecological risk, the calculated HI and CR values remained within acceptable limits. This difference reflects the fact that human health risk assessments depend not only on contaminant concentrations but also on exposure pathways, duration of exposure, and toxicological parameters. Several limitations should be considered when interpreting the results. Only nine samples were collected and subsequently combined into three composite samples, limiting the ability to characterize spatial variability across the entire tailings dam. Consequently, the findings should be considered representative only of the sampled locations. In addition, important physicochemical properties, including pH, organic matter content, texture, and moisture, were not measured and may influence metal mobility and bioavailability. Despite these limitations, the study provides a useful preliminary assessment of heavy metal contamination in the investigated tailings dam and offers baseline information for future monitoring and management programs. Expanded sampling campaigns, measurement of key physicochemical parameters, and detailed geochemical investigations are recommended to improve understanding of metal distribution patterns and support more effective environmental risk management.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors. It should be noted that further details for this article are provided in the Supplementary Materials file.

Acknowledgements

This article is derived from part of a student thesis conducted with the support of Ardakan University and in cooperation with Central Iranian Iron Ore Company.

ارزیابی خطر فلزات سمی در سد باطله یک کارخانه فرآوری سنگ آهن

سید محمد ناظری بافقی^۱ | مهدی الهی^۲ | سهیلا رضائی تبار^۳ | هاجر آبیاری^۴

۱. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران. رایانامه: s.m.nazeribafghi@stu.ardakan.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران. رایانامه: m.elahi@ardakan.ac.ir

۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. رایانامه: s.rezaitabar@areeo.ac.ir

۴. گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: hajar.abyar@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف از پژوهش حاضر، تعیین غلظت فلزات سنگین در پسماند ذخیره شده در سد باطله یک کارخانه فرآوری سنگ آهن در فلات مرکزی ایران و ارزیابی خطر اکولوژیک و سلامت ناشی از آنها بود. بدین منظور، نمونه‌های پسماند از عمق ۲۰ سانتی متری سطح برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌ها مطابق با دستورالعمل USEPA، آماده سازی و هضم شدند و غلظت عناصر آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، جیوه، نیکل، سرب و روی با استفاده از دستگاه ICP-MS مورد سنجش قرار گرفت. به منظور ارزیابی وضعیت آلودگی و ریسک، از شاخص‌های فاکتور آلودگی (CF)، درجه آلودگی (CD)، شاخص زمین انباشت (Igeo)، پتانسیل خطر (Eri)، شاخص خطر اکولوژیک (RI)، شاخص خطر غیرسرطان زایی (HI) و خطر سرطان زایی (CR) استفاده شد. میانگین غلظت کل ($\pm$ انحراف معیار) عناصر آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، جیوه، نیکل، سرب و روی به ترتیب $34/14 \pm 3/14$ ، $9/75 \pm 7/18$ ، $30/17 \pm 6/81$ ، $105 \pm 25/91$ ، $0/005 \pm 0/002$ ، $234/4 \pm 124/9$ ، $38/91 \pm 12/46$ و $84/38 \pm 31/08$ میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد. نتایج نشان داد که براساس حدود مجاز سازمان حفاظت محیط زیست و شاخص Igeo، اغلب عناصر در محدوده بدون خطر قرار دارند، اما کادمیوم از نظر آلودگی و خطر اکولوژیک وضعیت نامطلوب تری دارد. مقدار شاخص‌های CD و RI به ترتیب $44/1$ و $1042/58$ محاسبه شد که بیانگر سطح آلودگی و خطر اکولوژیک بسیار بالا، عمدتاً ناشی از کادمیوم، است. در مقابل، نتایج ارزیابی ریسک سلامت نشان داد که مقادیر HI و CR در محدوده قابل قبول قرار داشته و در شرایط فعلی تهدید قابل توجهی برای کارکنان ایجاد نمی کند. با توجه به محدودیت تعداد نمونه‌ها، نتایج این پژوهش به نقاط نمونه برداری شده محدود بوده و توسعه برنامه‌های پایش مستمر برای کنترل مخاطرات احتمالی توصیه می شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷	
کلیدواژه‌ها:	
پسماند،	
شاخص خطر،	
شاخص زمین انباشت،	
فاکتور آلودگی،	
فلزات سنگین.	

استناد: ناظری بافقی، سید محمد؛ الهی، مهدی؛ رضائی تبار، سهیلا؛ و آبیاری، هاجر (۱۴۰۵). ارزیابی خطر فلزات سمی در سد باطله یک کارخانه فرآوری سنگ آهن.

محیط زیست طبیعی، ۷۹ (۳)، ۴۵۶-۴۴۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.409055.2878>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

صنایع معدنی مانند فرآوری سنگ آهن، با انتشار فلزات سنگین در محیط، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها هستند (U.S.EPA, 2000; Kravchenko *et al.*, 2025). این آلاینده‌ها عمدتاً از طریق پساب‌های کارخانه به سدهای باطله راه یافته و با نفوذ به خاک و آب‌های زیرزمینی، آلودگی گسترده‌ای ایجاد می‌کنند. وقوع حوادثی مانند شکست سد یا انباشت مداوم این مواد، می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست وارد کند (Kheirkhah and Amiri, 2020; Moosavirad *et al.*, 2022).

به‌منظور پایش این اثرات و ارزیابی خطر فلزات سنگین در خاک و پسماند، روش‌های مختلفی وجود دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- مقایسه غلظت عناصر با حدود مجاز تعیین شده (DOE, 2016)، ۲- بکارگیری شاخص‌های مختلف اکولوژیک مانند درجه آلودگی (CD)^۱، شاخص خطر اکولوژیک (RI)^۲ و شاخص زمین انباشت (I_{geo})^۳ (Turekian and Wedepohl, 1961; Muller, 1969; Hakanson, 1980) و ۳- ارزیابی ریسک سلامت کارگران و جوامع محلی در معرض ذرات ریز سدهای باطله، که ممکن است از طریق بلع ناخواسته، تماس پوستی یا استنشاق ذرات معلق، دوزهای خطرناکی از فلزات سمی را دریافت کنند که منجر به بروز بیماری‌های مزمن یا ریسک‌های سرطان‌زایی گردد (U.S.EPA, 2011; U.S.EPA, 2012). ارزیابی خطر اکولوژیک، احتمال تأثیر عوامل استرس‌زایی همچون مواد شیمیایی را بر محیط‌زیست بررسی می‌کند (U.S.EPA, 2025). این روش ابتدا برای فلزات سنگین در رسوبات آبی به‌کار گرفته شد (Hakanson, 1980) و سپس برای خاک، لجن و پسماند گسترش یافت (Tyła, 2020; Luo *et al.*, 2025). لازم به‌ذکر است برای محیط‌های معدنی، علاوه بر این ارزیابی، استفاده از مدل‌های ریسک سلامت انسان برای محاسبه شاخص‌هایی مانند خطر غیر سرطان‌زایی (HI)^۴ و خطر سرطان‌زایی (CR)^۵ نیز ضروری است تا تصویر کاملی از مخاطرات به‌دست آید.

تاکنون مطالعات متعددی در داخل و خارج از کشور به بررسی غلظت فلزات و ارزیابی خطر اکولوژیک و ارزیابی خطر سلامت در سدهای باطله پرداخته‌اند. در مطالعه‌ای که توسط Rezaipoorbaghdar و همکاران (۲۰۱۶) بر روی رسوبات انباشت شده در سد باطله معدن سنگ آهن چغارت انجام شد، غلظت عناصر آرسنیک ۲۷/۰۱۶، کادمیوم ۰/۲۷۵، کروم ۵۰/۰۸۹، مس ۳۴/۸۴ و سرب ۳۳/۹۰۹ ppm به‌دست آمد. براساس شاخص آلودگی (PI)^۶، عناصر آرسنیک، کبالت، آهن و وانادیوم به‌عنوان آلاینده‌های مهم رسوبات این مجموعه شناخته شدند. همچنین براساس شاخص آلودگی یکپارچه (IPI)^۷ و درجه آلودگی اصلاح‌شده (MC_d)^۸ میزان آلودگی این رسوبات در سطح متوسط تعیین شد. در تحقیقی که توسط Kargar و همکاران (۲۰۱۲)، در اطراف سد باطله معدن میدوک در استان کرمان انجام شد غلظت عناصر آرسنیک، کادمیوم، مس و مولیبدن در ۲۱ نمونه خاک سطحی بررسی شد. جهت ارزیابی میزان آلودگی از شاخص‌های مختلف شامل فاکتور غنی‌شدگی (EF)^۹، شاخص بار آلودگی (PLI)^{۱۰}، MC_d و شاخص I_{geo} استفاده شد. نتایج تحقیق آنها نیز نشان داد غلظت عناصر کادمیوم و مس در خاک‌های سطحی شمال شرق و جنوب غرب سد باطله به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. بررسی جهت باد غالب نشان داد که آلودگی خاک‌های جنوب غرب عمدتاً ناشی از گردوغبار باطله‌ها بوده، در حالی که آلودگی بخش شمال شرق عمدتاً مربوط به پراکندگی ذرات پس از انفجارهای معدنی می‌باشد. شاخص‌های مختلف آلودگی حاکی از غنی‌شدگی قابل‌توجه عناصر مورد مطالعه در مناطق یادشده بود. در پژوهشی دیگر که توسط Kashefghasemabadi و همکاران (۲۰۱۹) در حوضچه باطله معدن سنگ آهن چادرمو انجام شد؛ غلظت عناصری مانند Ti, Al, Fe, Cr, V, Pb, As, Sc, Zn, Cu, Co, Mn, Ca و Mo در ۲۰ نمونه خاک و یک گیاه خودرو به نام *Anabasis setifera* با استفاده از دستگاه ICP-MS اندازه‌گیری شد. از فاکتور غنی‌شدگی (EF) و فاکتور آلودگی (CF)^{۱۱} برای ارزیابی ریسک

^۱Contamination Degree^۲Risk Index^۳Geo-accumulation Index^۴Hazard Index^۵Carcinogenic Risk^۶Pollution Index^۷Integrated Pollution Index^۸Modified Contamination Degree^۹Enrichment Factor^{۱۰}Pollution Load Index^{۱۱}Contamination Factor

اکولوژیک استفاده شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد مقادیر CF در محدوده ۱ تا ۱/۱۲ نشان‌دهنده آلودگی متوسط خاک و مقادیر پتانسیل خطر (Eri)^{۱۲} در محدوده ۱ تا ۱۰ بیانگر ریسک اکولوژیک پایین عناصر در خاک بود. همچنین تحقیقات متعددی در خارج از کشور نیز به بررسی غلظت فلزات سنگین در سدهای باطله و ارزیابی خطر اکولوژیک این عناصر پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات Hatje و همکاران (۲۰۱۷)، Davila و همکاران (۲۰۲۰)، Young و همکاران (۲۰۲۱) و Sarathchandra و همکاران (۲۰۲۲) اشاره کرد. در مطالعه‌ای که Hassanzad و همکاران (۲۰۲۴)، به بررسی ارزیابی ریسک سلامت فلزات سنگین در پسماند سد باطله معدن مس سونگون پرداختند مقادیر HI حد واسط $9/45 \times 10^{-2}$ تا $3/75 \times 10^{-4}$ برای بزرگسالان به‌دست آمد. براساس مطالعه آنها بیشترین میزان HI مربوط به عنصر کادمیوم و کمترین میزان HI مربوط به آهن بود. Barcelos و همکاران (۲۰۲۰) نیز به ارزیابی ریسک سلامت ناشی از فلزات در یک سد باطله معدن طلا در برزیل پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مهم‌ترین عامل تهدید کننده سلامت، دو عنصر کادمیوم و آرسنیک است. همچنین Kan و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی ریسک سلامت فلزات در یک سد باطله معدن روی و مس در چین پرداختند. نتایج تحقیق آنها مشخص کرد که بلع، مسیر اصلی قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین در باطله‌های معادن است و کودکان بیشتر در معرض اثرات نامطلوب هستند. همچنین عناصر As و Pb خطرات غیرسرطانی بالا و As و Cu خطرات سرطان‌زایی غیرقابل‌قبولی را نشان دادند.

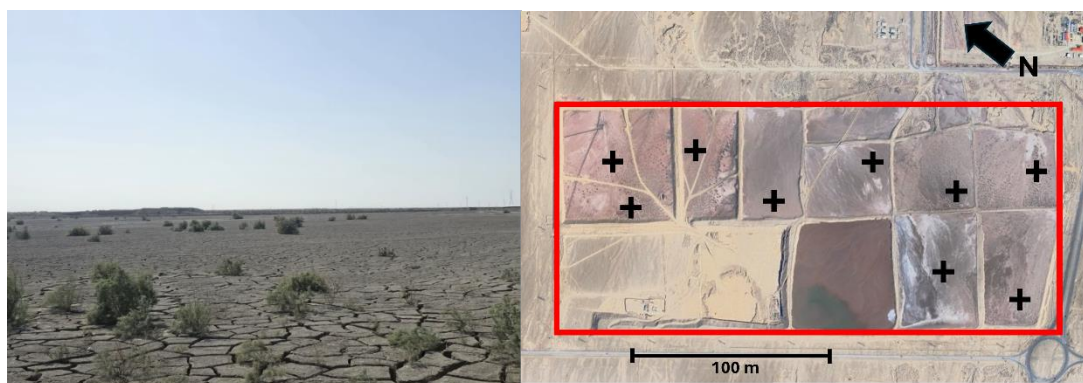
یکی از مهم‌ترین مجموعه‌های استخراج و فراوری سنگ آهن ایران، در فلات مرکزی مستقر است. در حین فراوری و تولید کنسانتره آهن، پساب غلیظی تولید شده که به سد باطله این مجموعه منتقل شده و ذرات آن به‌صورت پسماند در سد ته‌نشست می‌شود. از آنجا که تاکنون تحقیق جامعی در زمینه ارزیابی خطر فلزات سمی در پسماند ذخیره شده در سد باطله این مجموعه با در نظر گرفتن حدود مجاز سازمان حفاظت محیط‌زیست، ارزیابی خطر اکولوژیک و ارزیابی ریسک سلامت، انجام نشده است؛ بنابراین هدف تحقیق حاضر آن است که با اندازه‌گیری غلظت برخی فلزات سنگین و سمی شامل As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb و Zn در پسماند ذخیره شده در سد باطله این مجموعه و بکارگیری استانداردهای ملی و شاخص‌های بین‌المللی، خطر اکولوژیک و سلامتی این عناصر را مورد بررسی و ارزیابی قرار دهد.

روش‌شناسی پژوهش

مکان و زمان نمونه‌برداری: فلات مرکزی ایران با ذخایر غنی از آهن، یکی از منابع و معادن مهم این عنصر ارزشمند به‌شمار می‌آید. در این منطقه ابتدا سنگ آهن برداشت شده از پیت استخراج، به واحد خردایش و پس از ریز شدن به واحد فراوری منتقل می‌شود. کنسانتره تولید شده در واحد فراوری به کارخانه تولید گندله انتقال داده می‌شود. پساب خروجی از واحد فراوری به سد باطله منتقل شده و آب آن جدا شده و مجدد به کارخانه فراوری برگشت داده می‌شود. در نهایت پسماند باقیمانده که حاوی فلزات سنگین است، در سد باطله انباشت می‌شود. در تحقیق حاضر به‌منظور بررسی غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های پسماند انباشت شده در سد باطله، نمونه‌ها در پاییز ۱۴۰۳ از عمق ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک (به‌منظور حذف اثرات تداخلی ناشی از نهشته‌های جوی مطابق با دستورالعمل ISO 18400) توسط بیلچه برداشت شد و در مجموع ۹ نمونه که تشکیل سه نمونه ترکیبی را دادند، داخل کیسه زیپ‌دار پلاستیکی به‌منظور آماده‌سازی و آنالیز غلظت فلزات، به آزمایشگاه منتقل شدند. در شکل ۱ تصویری از سد باطله مورد مطالعه به‌همراه موقعیت نقاط نمونه‌برداری نمایش داده شده است.

آماده‌سازی نمونه و آنالیز دستگاهی: آماده‌سازی واکنشگرها و نمونه‌ها براساس دستورالعمل U.S. EPA ۲۰۰/۸ (۱۹۹۴) انجام گرفت که در بخش موارد تکمیلی (SM) با جزئیات ارائه شده است. غلظت کل ۸ عنصر شامل As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb و Zn با استفاده از دستگاه ICP-MS با شرایط ارائه شده در جدول SI اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که نحوه محاسبه غلظت فلزات نیز در بخش SM ارائه شده است.

¹²Ecological Risk Index



شکل ۱- تصویری از سد باطله و وضعیت پوشش گیاهی آن (سمت راست) و موقعیت نقاط نمونه برداری (سمت چپ)

Figure 1. View of the tailings dam and its vegetation cover (right), and the location of sampling points (left)

ارزیابی خطر با استفاده از حدود مجاز تعیین شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران: دفتر آب و خاک معاونت محیط زیست انسانی سازمان حفاظت محیط زیست، براساس قانون حفاظت از خاک، حدود مجازی را برای آلاینده های آلی و معدنی در نمونه های خاک و آلاینده های معدنی در نمونه های پسماند تخلیه شده به خاک برای کاربری های مختلف تعیین و تنظیم کرده است. چنانچه غلظت آلاینده در خاک بیش از استاندارد آلودگی باشد، ارزیابی خطر صورت گرفته تا در صورت لزوم اقدامات مدیریتی صورت پذیرد. در این دستورالعمل کاربری خاک به معنی نوع استفاده از خاک به عنوان بستری مناسب برای فعالیت های کشاورزی (کلیه زمین های کشاورزی و باغات)، منابع طبیعی (جنگل، مرتع و پارک/تفریحی)، صنعتی، معدنی و امور زیر بنای (تجاری) و خدماتی (مسکونی) است (DOE, 2016). در جدول S2 حدود مجاز آلودگی خاک مربوط به عناصر مورد بررسی در تحقیق حاضر براساس ضمیمه شماره ۱ دستورالعمل سازمان حفاظت محیط زیست ارائه شده است.

ارزیابی خطر اکولوژیک: به منظور ارزیابی خطر اکولوژیک فلزات سنگین در نمونه های خاک، شاخص های متنوعی وجود دارد که در تحقیق حاضر از سه شاخص اصلی درجه آلودگی (CD)، شاخص خطر اکولوژیک (RI) و شاخص زمین انباشت (I_{geo}) استفاده شد. نحوه محاسبه شاخص های مذکور در جدول S3 و S4 ارائه شده است (Hakanson, 1980).

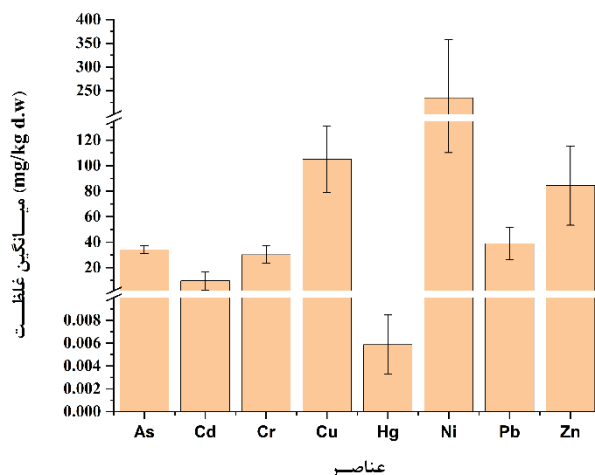
ارزیابی ریسک سلامت: به منظور ارزیابی ریسک سلامت، ابتدا افراد شاغل در محدوده معدن و کارخانه فرآوری به عنوان جامعه هدف انتخاب شدند. برای ارزیابی خطر غیر سرطان زایی (مثل بیماری های تنفسی، کلیوی و به عبارتی هر گونه بیماری جز سرطان) همه مسیرهای مواجهه انسانی یعنی بلع، تنفس و تماس پوستی با استفاده از دستورالعمل USEPA (۲۰۱۱ و ۲۰۱۲) در نظر گرفته شد و با استفاده از معادلات ۷ تا ۱۰ محاسبه گردید (جدول S5). براساس این دستورالعمل، اگر میزان HI (مجموع ضریب خطر (HQ)^{۱۳}) بیشتر از ۱ باشد احتمال خطر وجود دارد. همچنین برای ارزیابی خطر سرطان زایی از طریق فلزات سرطان زا از معادله ۱۱ (جدول S5) استفاده شد که مقدار قابل قبول معمولاً در محدوده 10^{-6} تا 10^{-4} در نظر گرفته می شود. برای مثال اگر ریسک سرطان زایی برای جامعه مورد بررسی، عدد 10^{-4} باشد بدان معناست که به ازای هر ده هزار نفر، خطر سرطان زایی برای ۱ نفر وجود دارد. اما اگر این عدد بیشتر از این شود، خطر سرطان زایی بسیار بالاست. لازم به ذکر است توضیحات و مقادیر پارامترهای مربوط به هر معادله در جداول S6-1 و S6-2 ارائه شده است.

آنالیز آماری و نمایش گرافیکی داده ها: با توجه به تعداد محدود نمونه ها، پژوهش حاضر دارای ماهیت توصیفی بوده و از آزمون های آماری استنباطی استفاده نشد. لازم به ذکر است که برای نمایش گرافیکی داده ها برنامه Origin نسخه ۲۰۲۴ مورد استفاده قرار گرفت.

یافته های پژوهش

میانگین غلظت کل فلزات ($\pm$ انحراف معیار آنها) مورد بررسی در نمونه های برداشت شده از سد باطله مجموعه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.

¹³Hazard Quotient



شکل ۲- میانگین غلظت فلزات مورد بررسی در پسماند سد باطله مجموعه مورد مطالعه

Figure 2. Mean concentrations of the investigated metals in the tailings dam waste of the study area

در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی خطر غلظت فلزات در پسماند ذخیره شده در سد باطله با استفاده از استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست، دو رویکرد در نظر گرفته شد. در رویکرد اول پسماند ذخیره شده در سد به عنوان نمونه خاک در نظر گرفته شد و با استاندارد آلایندهی خاک مقایسه گردید، در حالی که در رویکرد دوم پسماند ذخیره شده در سد باطله به عنوان منبع آلاینده قابل تخلیه به خاک لحاظ گردید و غلظت عناصر آن با استاندارد پسماند مورد مقایسه قرار گرفت.

مقایسه غلظت فلزات در نمونه های برداشت شده از سد باطله با حد مجاز تعیین شده این عناصر در نمونه های خاک با در نظر گرفتن استانداردهای حفاظت از محیط زیست (ستون آخر جدول S2) نشان داد غلظت عناصر آرسنیک، کادمیوم، نیکل و مس بیش از حد مجاز تعیین شده است. لازم به ذکر است به دلیل محدودیت تعداد نمونه ها، بررسی آماری این عناصر از نظر معنی داری، انجام نشد. در مورد عنصر کروم، حد مجازی برای غلظت کروم کل (Total Chrome) در خاک (با هدف حفاظت از محیط زیست) وجود نداشت اما برای گونه های مختلف کروم (۳ و ۶) حد مجاز تعیین شده است. از آنجا که در تحقیق حاضر فقط غلظت کل فلزات اندازه گیری شده است بنابراین امکان مقایسه غلظت کروم با حد مجاز با هدف حفظ محیط زیست وجود نداشت. براساس دستورالعمل سازمان حفاظت محیط زیست، چنانچه غلظت آلاینده در خاک بیش از حد مجاز آلایندهی خاک باشد، با استفاده از شاخص های کمی و کیفی خاک، ارزیابی خطر به عمل می آید و منطقه آلوده باید مدیریت شود. در این تحقیق نیز غلظت عناصری مانند آرسنیک، کادمیوم، نیکل و مس در سد باطله بیش از حد مجاز آنها در خاک بود بنابراین این عناصر برای ارزیابی خطر انتخاب شدند. به منظور ارزیابی خطر از استانداردهای ارائه شده در جدول S7 که برگرفته از راهنمای شماره ۲ دستورالعمل سازمان حفاظت محیط زیست برای کاربری تجاری (صنعتی، معدنی و زیربنایی) است، استفاده شد. در این جدول منظور از فاکتور پوشش، درصد خاک دارای پوشش (زنده و غیرزنده شامل پوشش گیاهی، آسفالت، سنگفرش و ...) است. براساس دستورالعمل مذکور، چنانچه ۰ تا ۲۵٪ خاک دارای پوشش باشد آن خاک دارای پوشش ضعیف است؛ ۲۵ تا ۵۰٪ نشان دهنده پوشش متوسط و بیش از ۵۰٪ بیانگر پوشش مناسب خاک است.

همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، درصد پوشش گیاهی در بخش های مختلف سد باطله متفاوت بوده و بعضی مناطق دارای پوشش بیشتر و بعضی مناطق دارای پوشش کمتر هستند. از آنجا که در این تحقیق، نقاط نمونه برداری به طور تصادفی انتخاب شدند، بنابراین به منظور ارزیابی، به طور کلی درصد پوشش، ضعیف (یعنی کمتر از ۲۵٪) در نظر گرفته شد. در تحقیق حاضر میانگین غلظت آرسنیک در نمونه های پسماند ۳۴/۴۱ میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد که براساس جدول S7، پسماند موجود در سد باطله در طبقه بدون خطر قرار می گیرد. البته باید توجه داشت این مقدار، میانگین کل نمونه ها است ضمن اینکه میانگین بعضی از نمونه های ترکیبی بیشتر از آستانه این طبقه بوده است و به طور کلی میانگین کل در لبه مرز این طبقه قرار دارد، بنابراین اقدامات پایشی و مدیریتی در بلند مدت مورد نیاز است. میانگین غلظت کادمیوم در نمونه های مورد مطالعه ۹/۷۵ میلی گرم بر کیلوگرم

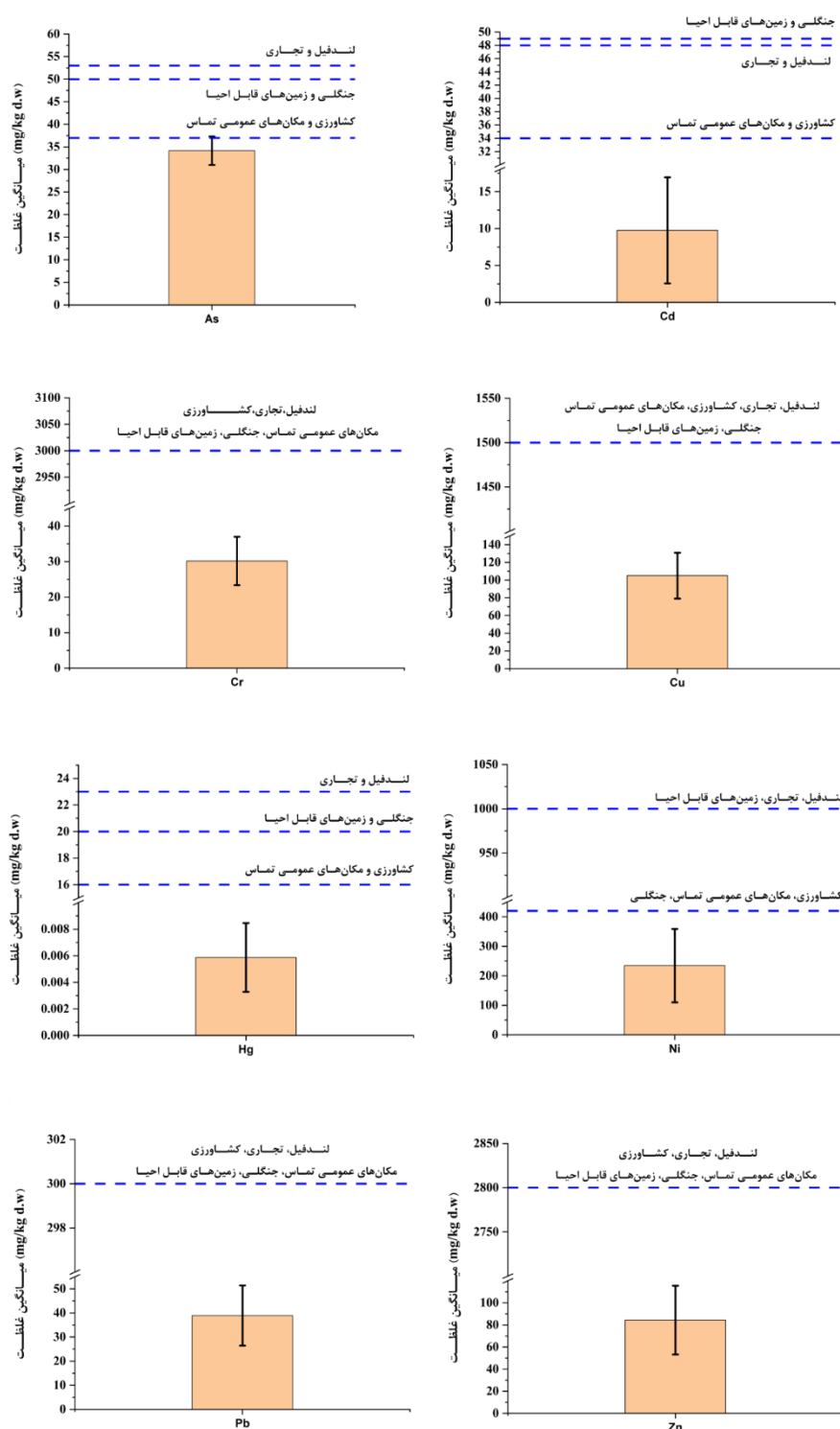
به دست آمد که با توجه به جدول ارزیابی خطر، پسماند سد باطله در طبقه "امکان وجود خطر" قرار می گیرد و در خصوص این عنصر نیز اقدامات پایشی و مدیریتی در بلند مدت مورد نیاز است. در تحقیق حاضر، میانگین غلظت مس ۱۰۵ و نیکل ۲۳۴/۴ میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد که با توجه به جدول ارزیابی خطر، پسماند موجود در سد باطله مجموعه مورد مطالعه از نظر غلظت این دو عنصر در دسته بدون خطر قرار می گیرد.

در رویکرد دوم، غلظت فلزات در پسماند ذخیره شده در سد باطله با حد مجاز منابع آلاینده قابل تخلیه به خاک با استفاده از راهنمای شماره ۱ دستورالعمل سازمان حفاظت محیط زیست (DOE, 2016) مقایسه گردید که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل، حدود مجاز غلظت عناصر در پسماند برای کاربری های مختلف به صورت خط مرجع خط چین نمایش داده شده است. نتایج این بخش نیز نشان داد که غلظت عناصر مورد مطالعه، کمتر از حد مجاز تعیین شده برای منابع آلاینده قابل تخلیه به منابع خاک است بنابراین تخلیه پساب و پسماند کارخانه فرآوری به سد باطله (سال ۱۴۰۳) از نظر غلظت این فلزات بلامانع است.

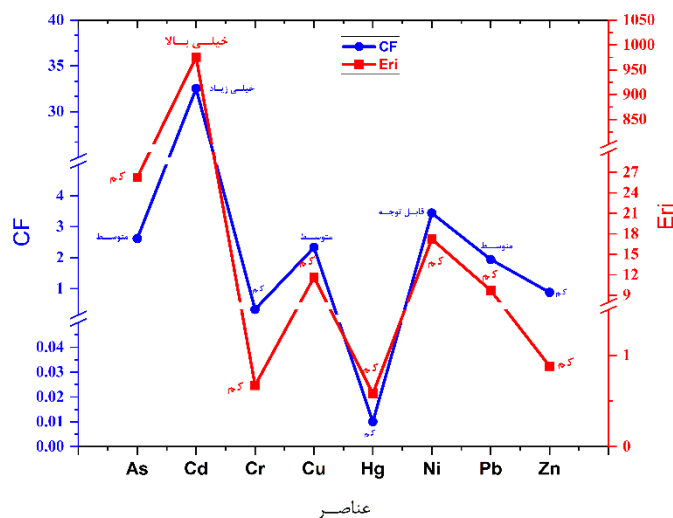
یکی دیگر از روش های ارزیابی آلودگی خاک، ارزیابی خطر اکولوژیک است. در تحقیق حاضر غلظت ۸ عنصر در پسماند سد باطله مورد بررسی و اندازه گیری قرار گرفته و شاخص های CD و RI با توجه به معادلات ۲ تا ۵ (جدول S3) محاسبه شدند. با در نظر گرفتن غلظت عناصر در نمونه های مورد بررسی، مقدار شاخص CD، ۴۴/۱ به دست آمد که براساس طبقه بندی این شاخص، نمونه های پسماند سد باطله مجموعه مورد مطالعه در طبقه با آلودگی خیلی بالا قرار می گیرند ($4n = 32 < 44$). لازم به ذکر است مهم ترین عنصر اثرگذار بر این شاخص عنصر کادمیوم بود. همچنین میزان شاخص خطر اکولوژیک (RI) به میزان ۱۰۴۲/۵۸ به دست آمد که براساس این شاخص نیز نمونه های پسماند سد باطله مجموعه مورد مطالعه در طبقه با آلودگی خیلی بالا قرار می گیرند زیرا مقدار به دست آمده بالاتر از حد این طبقه یعنی عدد ۳۲۰ بود. اثرگذارترین عنصر بر مقدار این شاخص نیز عنصر کادمیوم تعیین شد. در شکل ۴ مقادیر CF و Eri مربوط به هر عنصر (که در محاسبه CD و RI نقش داشته اند) نمایش داده شده است. همچنین با توجه به طبقه بندی آلودگی شاخص های مذکور، طبقه آلودگی هر عنصر در نمونه های مورد بررسی نیز ارائه شده است. همان گونه که در شکل مشخص است بیشترین خطر اکولوژیک مربوط به عنصر کادمیوم و کمترین آن مربوط به جیوه، روی و کروم است. همچنین نتایج محاسبه شاخص زمین انباشت (I_{geo}) در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس، مقادیر شاخص زمین انباشت عناصر روی، جیوه و کروم کمتر از صفر بوده که بیانگر آن است که نمونه های مورد مطالعه از نظر غلظت این عناصر در رده بدون آلودگی قرار می گیرند. در مورد عناصر سرب، مس و آرسنیک، میزان این شاخص کمتر از یک بوده که نشان دهنده رده بدون آلودگی تا آلودگی متوسط است. همچنین میزان شاخص زمین انباشت عنصر نیکل ۱/۲ بوده که نمونه های مورد بررسی از نظر غلظت این عنصر در رده آلودگی متوسط قرار می گیرند. مقدار شاخص I_{geo} عنصر کادمیوم ۴/۴۳ بوده که بر این اساس وضعیت آلودگی پسماند مورد بررسی در رده آلودگی بالا تا بسیار بالا قرار می گیرد.

نتایج حاصل از ارزیابی ریسک سلامت در سایت مورد مطالعه نشان داد که شاخص خطر غیرسرطانی (HI) برای مواجهات غیرسرطانی برابر با ۰/۲۲۲۸ است. از آنجا که این مقدار به طور قابل توجهی کمتر از حد آستانه تعیین شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا ($HI < 1$) می باشد، می توان نتیجه گرفت که در حال حاضر، خطر سیستمیک و غیرسرطانی حادی سلامت کارگران شاغل در این واحد معدنی را تهدید نمی کند. شکل ۶ نتایج مربوط به مقادیر HQ هر عنصر و میزان HI کل را نشان می دهد. همچنین در جدول S8 نحوه محاسبه HQ با استفاده از مقادیر جذب روزانه مزمن (CDI)^{۱۴} مسیرهای بلع، تماس پوستی و تنفس ارائه شده است.

¹⁴Chronic Daily Intake

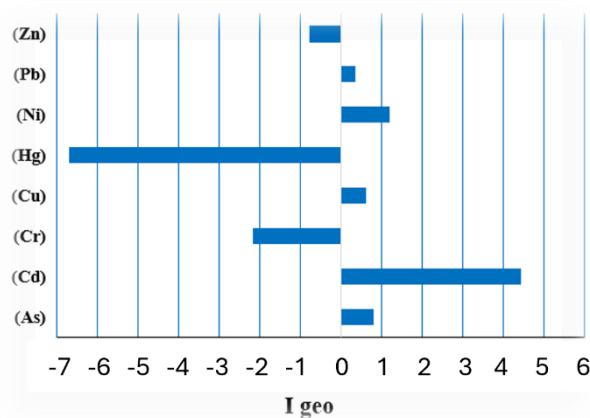


شکل ۳- مقایسه غلظت فلزات در سد باطله با حد مجاز تعیین شده برای فلزات در پسماند برای کاربری‌های مختلف
Figure 3. Comparison of metal concentrations in the tailings dam with the permissible limits established for waste materials under different land-use scenarios



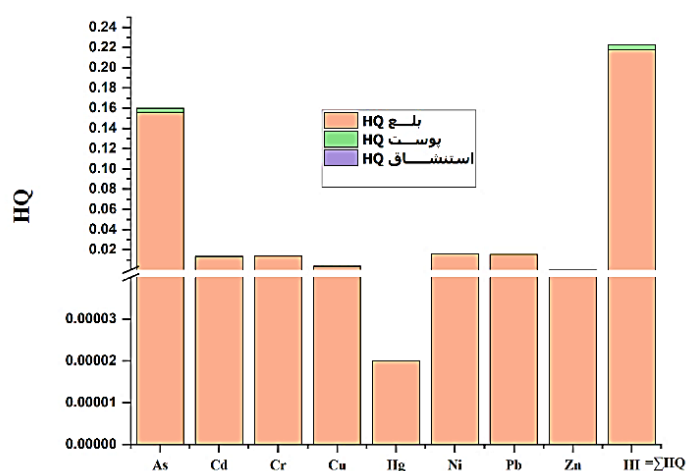
شکل ۴- مقادیر شاخص CF و Eri مربوط به غلظت فلزات در نمونه‌های سد باطله مجموعه مورد مطالعه

Figure 4. Values of the Contamination Factor (CF) and Ecological Risk Index (Eri) calculated for metal concentrations in tailings dam samples from the study area



شکل ۵- مقادیر شاخص Igeo مربوط به غلظت فلزات در نمونه‌های سد باطله مجموعه مورد مطالعه

Figure 5. Geo-accumulation Index (I_{geo}) values calculated for metal concentrations in tailings dam samples from the study area



شکل ۶- مقادیر HQ هر عنصر و میزان HI کل محاسبه شده

Figure 6. Hazard Quotient (HQ) values for individual metals and the total Hazard Index (HI) calculated for the investigated samples

همچنین براساس نتایج تحقیق حاضر، مجموع ریسک سرطان (CR) در حدود 10^{-5} تا 10^{-4} (۱/۸ نفر در ۱۰۰,۰۰۰ نفر) محاسبه شد که طبق استاندارد USEPA (10^{-6} تا 10^{-4})، این مقدار در محدوده قابل قبول قرار دارد.

بحث

براساس نتایج تحقیق حاضر غلظت عناصری مانند کروم، جیوه، سرب و روی در نقاط نمونه برداری پسماند سد باطله مجموعه مورد مطالعه، کمتر از حدود مجاز آلاینده‌ی خاک و همچنین کمتر از حدود مجاز این عناصر در پسماند با کاربری‌های مختلف (DOE, 2016) بود، اما عناصر آرسنیک، کادمیوم، مس و نیکل، بیشتر از حد مجاز آلاینده‌ی خاک به دست آمد. همچنین با در نظر گرفتن جدول ارزیابی خطر این فلزات برای کاربری تجاری، مشخص شد که فقط در مورد عنصر کادمیوم امکان خطر وجود دارد. نتایج ارزیابی خطر اکولوژیک نیز نشان داد که براساس شاخص‌های CD و RI، پسماند ذخیره شده در سد باطله مجموعه مورد مطالعه در طبقه بسیار آلوده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه شاخص‌های CD و RI به ترتیب با استفاده از مجموع مقادیر CF و Eri محاسبه می‌شوند و با در نظر گرفتن این نکته که بیشترین مقدار CF و Eri در بین عناصر مورد بررسی، مربوط به عنصر کادمیوم بوده است، بنابراین عنصر کادمیوم مهم‌ترین عامل اثر گذار بر کلیه این شاخص‌ها بوده که منجر به بالا بردن درجه آلودگی پسماند ذخیره شده در سد باطله شده است. لازم به ذکر است که به دلیل محدودیت نمونه‌ها، نتایج ارائه شده صرفاً بیانگر وضعیت نمونه‌های برداشت شده بوده و تعمیم مستقیم آنها به کل سد باطله با عدم قطعیت همراه است.

مقایسه غلظت عناصر در نمونه‌های برداشت شده از مجموعه مورد مطالعه با سایر مطالعات مشابه نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده در تحقیق حاضر با سایر تحقیقات همخوانی دارد. در خصوص غلظت کادمیوم به دست آمده در این تحقیق (میانگین $9/75$ میلی گرم بر کیلوگرم)، اگرچه Rezaipoorbagheadar و همکاران (2016) غلظت کادمیوم موجود در سد باطله سنگ آهن چغارت باقی را $0/24$ تا $0/3$ و با میانگین $0/275$ ppm گزارش کردند که مقدار آن نسبت به میزان به دست آمده از تحقیق حاضر کمتر است اما در تحقیقی دیگر که توسط Moradzadeh و همکاران (2019) در سد باطله معدن سرب-روی انگوران انجام شد دامنه غلظت کادمیوم بین $0/3$ تا $258/6$ میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد. در مطالعه‌ای که Adebimpe و Fatoye (2021) در یک باطله معدنی آهن در نیجریه انجام دادند مشخص شد که میانگین غلظت کادمیوم $1/3$ میلی گرم بر کیلوگرم می‌باشد. Zabowski و همکاران (2001) نیز غلظت برخی عناصر از جمله کادمیوم را در خاک‌های اطراف معادن طلا و آهن در چین بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد دامنه غلظت کادمیوم بین 4 تا 24 میلی گرم بر کیلوگرم (میکروگرم بر گرم) بود. همان گونه که اشاره شد در تحقیق حاضر سه نمونه ترکیبی برای بررسی وضعیت غلظت فلزات سنگین در پسماند سد باطله برداشت شد. چنانچه امکان برداشت تعداد نمونه بیشتری وجود داشت، با قطعیت بیشتری مقایسه نتایج تحقیقات مشابه صورت می‌گرفت. اما به طور کلی اختلاف غلظت عناصر در تحقیقات مختلف می‌تواند ناشی از تفاوت در نوع معدن، عمق و مکان نمونه برداری، روش هضم و دستگاه اندازه گیری و ویژگی‌های پسماند ذخیره شده در باطله (pH، بافت خاک و ...) باشد.

نتایج شاخص زمین انباشت در تحقیق حاضر نشان داد که پسماند ذخیره شده در سد باطله از نظر غلظت عنصر کادمیوم در طبقه آلودگی بالا تا بسیار بالا قرار دارد. نتایج بررسی شاخص زمین انباشت در معدن مس سونگون توسط Hassanzad و همکاران (2024) نشان داد که پسماند ذخیره شده در سد باطله این معدن، براساس غلظت کادمیوم در طبقه غیر آلوده، غلظت آرسنیک در طبقه آلودگی بالا و از نظر غلظت سایر عناصر (کبالت، کروم، مس، آهن، روی و سرب) در رده آلاینده‌ی بسیار بالا قرار دارد. همچنین Shayestefar و Rezaei (2011)، شاخص زمین انباشت را در رسوبات معدن مس سرچشمه منتهی به سد باطله بررسی کردند و نتایج تحقیق آنها نشان داد میزان این شاخص برای عناصر مورد بررسی به صورت $Zn > Cu > Fe > Mo > Pb > Mn > Cr$ بود. Moosavirad و Saffari (2024) نیز به بررسی شاخص زمین انباشت در نمونه‌های خاک سطحی اطراف معدن مس چهارگنبد پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد در میان عناصر مورد مطالعه (باریم، کبالت، مولیبدن، نیکل و وانادیوم)، میزان شاخص زمین انباشت دو عنصر نیکل و وانادیوم در رده آلودگی خفیف تا متوسط قرار داشت و میزان این شاخص برای سایر عناصر مورد بررسی در رده بدون آلودگی یا آلودگی کم قرار داشت.

ارزیابی ریسک سلامت کارگران شاغل در سایت مورد مطالعه و تحلیل تفکیکی مسیرهای مواجهه نشان داد که مسیر بلع با سهم بیش از ۹۷ درصدی، اصلی‌ترین مسیر ورود آلاینده‌ها به بدن است. این یافته با مطالعات مشابه در معادن فلزی همخوانی دارد و تأکید می‌کند که تماس دست به دهان و بلع ناخواسته ذرات غبار، ریسک بسیار بالاتری نسبت به جذب پوستی و استنشاقی دارد (Kan et al., 2021; Hassanzad et al., 2024). در میان عناصر مورد مطالعه، آرسنیک بیشترین میزان HI و جیوه کمترین مقدار را بخود اختصاص داده بود. در رابطه با ریسک سرطان‌زایی (CR)، مقدار به‌دست‌آمده $10^{-5} \times 1/84$ در محدوده ایمن و قابل قبول قرار داشت. در تحقیق حاضر عنصر آرسنیک به‌عنوان اصلی‌ترین عامل ریسک سرطان در این مطالعه شناسایی شد. Barcelo و همکاران (۲۰۲۰) نیز مهم‌ترین عناصر اثر گذار بر ریسک سرطان‌زایی را کادمیوم و آرسنیک شناسایی کردند. با توجه به اینکه ریسک محاسبه شده در تحقیق حاضر در محدوده مدیریت‌پذیر قرار دارد، نیاز به اقدامات اصلاحی فوری نیست، اما پایش دوره‌ای غلظت این عنصر در سد باطله و خون کارگران توصیه می‌شود. لازم به ذکر است مانند هر مدل ارزیابی ریسک، این مطالعه نیز با عدم قطعیت‌هایی روبه‌روست. استفاده از مقادیر پیش‌فرض USEPA برای پارامترهایی نظیر نرخ بلع و زمان مواجهه، و همچنین فرض جذب ۱۰۰ درصدی در مسیر گوارش، ممکن است منجر به بیش‌برآوردی^{۱۵} ریسک شده باشد. با این حال، این رویکرد محافظه‌کارانه برای تضمین سلامت کارگران و مدیریت ریسک در محیط‌های صنعتی ضروری است.

براساس نتایج این تحقیق، غلظت عنصر کادمیوم در مقایسه با سایر عناصر مورد بررسی بالاتر بوده و پتانسیل تهدید سلامتی برای محیط‌زیست را دارد. تاکنون روش‌های مدیریتی مختلفی (فیزیکی، شیمیایی و زیستی) به‌منظور کاهش و کنترل فلزات در خاک پیشنهاد شده است. در سال‌های اخیر، راهکارهایی مانند تثبیت در محل^{۱۶} فلزات و روش‌های زیستی^{۱۷} به‌عنوان مؤثرترین راه‌حل‌ها برای حذف فلزات (و شبه‌فلزات) از خاک مطرح شده‌اند (Liu et al., 2018; Dhaliwal et al., 2020). گیاه‌پالایی^{۱۸} به‌عنوان یک روش زیستی برای پاک‌سازی محیط‌زیست از آلاینده‌ها اشاره دارد که در آن گیاهان از طریق ایجاد رابطه همزیستی با میکروارگانیسم‌ها به پالایش خاک، به‌ویژه از فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی کمک می‌کنند (Raza et al., 2020). براساس گزارش Li و همکاران (۲۰۱۹)، تاکنون ۵۰۰ نوع (آرایه) گیاهی، به‌عنوان فراانباشگر^{۱۹} فلزات سنگین در دنیا شناخته شده‌اند. در گیاه‌پالایی کادمیوم، گیاهان این فلز سنگین را جذب و به بخش‌های قابل برداشت منتقل می‌کنند. از جمله راهکارهای مدیریتی دیگر در کنترل تحرک و انتشار فلزات در سد باطله مورد مطالعه حفظ pH پسماند ذخیره شده در محدوده خنثی یا بیشتر از ۶/۵ می‌باشد؛ چرا که در pH اسیدی، فلزات کاتیونی، محلول‌تر و در دسترس‌تر هستند، بنابراین افزایش pH باعث می‌شود دسترسی آنها برای گیاهان کمتر شده و در نتیجه احتمال ورود به زنجیره غذایی نیز کاهش یابد. لازم به ذکر است افزایش pH تأثیر متضادی بر عناصر آنیونی دارد. روش مدیریتی پیشنهادی دیگر، زه‌کشی خاک‌های مرطوب می‌باشد. زه‌کشی، تهویه خاک را بهبود بخشیده و باعث اکسید شدن فلزات می‌شود که در نتیجه حلالیت آنها کاهش می‌یابد. بنابراین، در شرایط هوادهی شده، دسترسی به این فلزات کمتر خواهد بود. اگرچه این موضوع در مورد کروم برعکس است، زیرا اشکال اکسیدشده کروم دسترسی بیشتری دارند. مواد آلی فعال در کاهش دسترسی کروم مؤثر خواهند بود (USDA, 2000). از راه‌حل‌های دیگر در ارتباط با مدیریت خاک‌های آلوده به فلزات می‌توان به روش‌های تثبیت و یا بازیافت و استحصال مجدد شیمیایی عناصر اشاره کرد (Chen et al., 2000; Giannis et al., 2009; Lin et al., 2017; Dong et al., 2023). البته به‌کارگیری این راهکارها منوط به اقتصادی و مقرون به‌صرفه بودن آنها است. لازم به ذکر است یکی از عوامل نشت و انتشار فلزات در محیط اطراف سدهای باطله، شکسته شدن سد به دلایل مختلف مانند حوادث طبیعی (سیل و زلزله) یا خطاهای انسانی در طراحی، احداث یا بهره‌برداری سد می‌باشد. از جمله اتفاقات شاخص آن در دنیا می‌توان به شکسته شدن سد باطله آهن در فاندائو برزیل (Davila et al., 2020) و یا هوبی چین (Zhuang et al., 2022) اشاره کرد. بنابراین نظارت مستمر و دقیق به‌منظور پایداری و آب‌بندی سد با استفاده از پوشش‌های چندلایه و یا ایجاد موانع هیدرولیکی برای کاهش جریان آب‌های زیر زمینی به‌سمت سد و در نهایت جلوگیری از آلودگی منابع آب و خاک منطقه بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Oboni and Oboni, 2020).

¹⁵Overestimation¹⁶In situ immobilization¹⁷Bioremediation¹⁸Phytoremediation¹⁹Hyperaccumulators

نتیجه گیری

با توجه به اینکه در تحقیق حاضر محدودیت‌هایی برای بررسی تعداد نمونه بیشتر وجود داشت؛ از این رو اولاً این مطالعه یک ارزیابی اولیه ارائه می‌دهد و نتایج باید با احتیاط تفسیر شوند و ثانیاً اولین تصمیم و اقدام مدیریتی مورد نیاز، نمونه‌برداری گسترده‌تر و سیستماتیک از بخش‌های مختلف سد باطله به منظور حصول اطمینان از وضعیت غلظت فلزات در پسماند ذخیره شده در سد باطله این مجموعه است. از دیگر محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به عدم اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی باطله‌ها از جمله pH، ماده آلی، بافت و رطوبت اشاره کرد. این عوامل می‌توانند بر تحرک، پایداری و دسترسی زیستی فلزات سنگین تأثیرگذار باشند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده همراه با سنجش غلظت فلزات، این پارامترها نیز مورد ارزیابی قرار گیرند. علاوه بر این، استفاده از مقادیر زمینه مرجع به جای نمونه زمینه محلی می‌تواند یکی از منابع عدم قطعیت در ارزیابی شاخص‌های آلودگی باشد و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، نمونه‌های زمینه محلی نیز برداشت و مورد استفاده قرار گیرند. پس از تعیین وضعیت آلودگی پسماند با درجه قطعیت بالا، اقدامات مدیریتی متناسب با میزان آلودگی و نقاط آلوده مورد نیاز است. نظارت پیوسته محیط‌زیستی و ارزیابی ریسک برای مجموعه‌های فعال صنعتی و معدنی همواره لازم و ضروری بوده است تا احتمال وقوع خطر به‌موقع پیش‌بینی شده و راهکارهای مناسب برای حفظ محیط‌زیست ارائه و اجرا گردد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه اردکان انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است. لازم به ذکر است اطلاعات تکمیلی این مقاله در فایل موارد تکمیلی (SM) ارائه شده است.

سپاسگزاری

مقاله حاضر برگرفته از بخشی از یک پایان‌نامه دانشجویی است که با حمایت دانشگاه اردکان و همکاری شرکت سنگ آهن مرکزی ایران انجام شده است.

References

- Adebimpe, R.A., Fatoye, A.O., 2021. Characterisation of tailings from Itakpe iron ore mine, Itakpe, Nigeria. *Sustainable Geoscience and Geotourism* 4, 1-8.
- Barcelos, D.A., Pontes, F.V., da Silva, F.A., Castro, D.C., Dos Anjos, N.O., Castilhos, Z.C., 2020. Gold mining tailing: Environmental availability of metals and human health risk assessment. *Journal of hazardous materials* 397, 122721.
- Chen, Z.S., Lee, G.J., Liu, J.C., 2000. The effects of chemical remediation treatments on the extractability and speciation of cadmium and lead in contaminated soils. *Chemosphere* 41(1-2), 235-242.
- Davila, R.B., Fontes, M.P.F., Pacheco, A.A., da Silva Ferreira, M., 2020. Heavy metals in iron ore tailings and floodplain soils affected by the Samarco dam collapse in Brazil. *Science of the Total Environment* 709, 136151.

- Dhaliwal, S.S., Singh, J., Taneja, P.K., Mandal, A., 2020. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 27(2), 1319-1333.
- DOE, 2016. Soil sources quality standards and it's guidelines. Available from <https://www.doe.ir/portal/file/?692345/1395-standards.pdf> (In Persian). (Accessed 17th December 2025).
- Dong, W., Wang, R., Li, H., Yang, X., Li, J., Wang, H., Jiang, C., Wang, Z., 2023. Effects of chelating agents addition on ryegrass extraction of cadmium and lead in artificially contaminated soil. *Water* 15(10), 1929.
- Giannis, A., Nikolaou, A., Pentari, D., Gidarakos, E., 2009. Chelating agent-assisted electrokinetic removal of cadmium, lead and copper from contaminated soils. *Environmental Pollution* 157(12), 3379-3386.
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research* 14(8), 975-1001.
- Hassanzad, S., Pirkharrati, H., Ahangari, M., Asadzadeh, F., 2024. Assessment of the potential environmental effects of newly deposited mine tailings from the Sungun Copper mine. *Iranian Journal of Health and Environment* 17(1), 139-162. (In Persian)
- Hatje, V., Pedreira, R.M., de Rezende, C.E., Schettini, C.A.F., de Souza, G.C., Marin, D.C., Hackspacher, P.C., 2017. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific Reports* 7(1), 10706.
- ISO 18400-102:2017 (Soil quality — Sampling — Part 102: Selection and application of sampling strategies). Available from <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/62843/7efc5e7cefb14f72837b9818c3130393/ISO-18400-102-2017.pdf>
- Kan, X., Dong, Y., Feng, L., Zhou, M., Hou, H., 2021. Contamination and health risk assessment of heavy metals in China's lead-zinc mine tailings: A meta-analysis. *Chemosphere* 267, 128909.
- Kargar, M., Khorasani, N.A., Karami, M., Rafiee, G.H., Naseh, R., 2012. An investigation on As, Cd, Mo and Cu contents of soils surrounding the Meyduk tailings dam. *Journal of Environmental Studies* 38(3), 89-92.
- Kashefghasemabadi, A., Karbassi, A., Tabatabaee, M., Dehabadi, A.M., 2019. Development of soil pollution risk index in the vicinity of a waste dam in Chadormalu iron ore mine. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16(12), 8485-8494.
- Kheirkhah, J. Amiri, M., 2020. Environmental Risk Assessment of Sungun Copper Mine Tailing Dam Using EFMEA Method. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 8(4), 173-189. (In Persian)
- Kravchenko, E., Minkina, T., Mandzhieva, S., Bauer, T., Lacynnik, E., Wong, M.H., Nazarenko, O., 2025. Ecological and health risk assessments of heavy metal contamination in soils surrounding a coal power plant. *Journal of Hazardous Materials* 484, 136751.
- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., Han, W., 2019. A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 28(4), 380-394.
- Lin, Z., Zhang, R., Huang, S., Wang, K., 2017. Impact of chemical leaching on permeability and cadmium removal from fine-grained soils. *Environmental Science and Pollution Research* 24(22), 18229-18239.
- Liu, L., Li, W., Song, W., Guo, M., 2018. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment* 633, 206-219.
- Luo, J., Feng, S., Ning, W., Liu, Q., Cao, M., 2025. Integrated source analysis and network ecological risk assessment of soil heavy metals in Qinghai-Tibet plateau pastoral regions. *Journal of Hazardous Materials* 490, 137780.
- Moosavirad, S.M., Saffari, M., 2024. Assessment of Pollution by Ba, Co, Mo, Ni, and Va in Surface Soils Surrounding the Tailings Dam of the Chahar Gonbad Copper Mine: An Analysis of Pollution Indices. *Journal of Urban Environmental Management* 2(4), 1-20. (In Persian)
- Moosavirad, S.M., Saffari, M., Hassani, M.J., Shakeri, M. Nazari, N., 2022. Assessment and quality monitoring of surface-groundwater water in Chahar Gonbad copper mining area, affected by tailings dam. *Journal of Natural Environment* 75(1), 104-118. (In Persian)
- Moradzadeh, A., Zare, M., Kamkar Rouhani, A., Doulati Aredehjani, F., 2019. Classification of environmental geochemical data using discriminant analysis and neural network in carbonate-sulfide waste dumps of lead and zinc mines. *Journal of Mining Engineering* 14(44), 25-12. (In Persian)

- Muller, G.J.G., 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal* 2, 108-118.
- Oboni, F., Oboni, C., 2020. Tailings dam management for the twenty-first century. Springer International Publishing, 278 p.
- Raza, A., Habib, M., Kakavand, S.N., Zahid, Z., Zahra, N., Sharif, R., Hasanuzzaman, M., 2020. Phytoremediation of cadmium: Physiological, biochemical, and molecular mechanisms. *Biology* 9(7), 177.
- Rezaipoorbaghedar, A., Vaghrfard, H., Azimzadeh, H., Gholami, H., Esmailpoor, Y., 2016. Using of the PI, IPI and Mcd indices for evaluating of contamination status of some metals in waste sediments caused by iron ore processing in Chogart Mineral Complex of Bafgh. *Journal of Arid Biome* 6(1), 1-13. (In Persian)
- Sarathchandra, S.S., Rengel, Z., Solaiman, Z.M., 2022. Remediation of heavy metal-contaminated iron ore tailings by applying compost and growing perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Chemosphere* 288, 132573.
- Shayestefar, M.R., Rezaei, A., 2011. Evaluation of Contamination Rate and Heavy Metals Distribution in the Sediments of Sarcheshmeh Copper Mine Using Geochemical Data and Statistical Studies, *Journal of Mining Engineering* 6(11), 25-34.
- Turekian, K.K., Wedepohl, K.H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin* 72(2), 175-192.
- Tyła, M. 2020. Identification of the chemical forms of heavy metals in municipal sewage sludge as a critical element of ecological risk assessment in terms of its agricultural or natural use. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(13), 4640.
- U.S.EPA, 1994. Method 200.8: Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasma-mass spectrometry (Revision 5.4). Available from https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/method_200-8_rev_5-4_1994.pdf. (Accessed 17th December 2025).
- U.S.EPA, 2000. EPA/600/R-99/111. Available from <https://semspub.epa.gov/work/03/2227185.pdf>. (Accessed 17th December 2025).
- U.S.EPA, 2011. Exposure Factors Handbook. Available from <https://www.epa.gov/expobox/exposure-factors-handbook-2011-edition>. (Accessed 17th December 2025).
- U.S.EPA, 2012. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Available from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=91003IJK.TXT>. (Accessed 17th December 2025).
- U.S.EPA, 2025. Available from <https://www.epa.gov/eco-research/ecological-risk-assessment>. (Accessed 17th December 2025).
- USDA, 2000. Soil Quality Institute 411 S. Available from <https://illinoisurbanmanual.org/wp-content/uploads/2018/05/soil.pdf>. (Accessed 17th December 2025).
- Young, G., Chen, Y., Yang, M., 2021. Concentrations, distribution, and risk assessment of heavy metals in the iron tailings of Yeshan National Mine Park in Nanjing, China. *Chemosphere* 271, 129546.
- Zabowski, D., Henry, C.L., Zheng, Z., Zhang, X., 2001. Mining impacts on trace metal content of water, soil, and stream sediments in the Hei River basin, China. *Water, Air, and Soil Pollution* 131(1), 261-273.
- Zhuang, Y., Jin, K., Cheng, Q., Xing, A., Luo, H., 2022. Experimental and numerical investigations of a catastrophic tailings dam break in Daye, Hubei, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 81(1), 9.