

Assessment of heavy metal pollution (Iron, Zinc, Copper, Cadmium, Lead, and Mercury) in the sediments of the Khersan 3 dam reservoir using geochemical indicators

Sharareh Khodami¹; Tahereh Eskandari²; Hassan Nasrollahzadeh Saravi²; Behzad Rahnama²; Mehdi Khoshnamvand^{2*}; Maryam Rezaei²; Horieh Younesipour²

1. Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

*2. Department of Ecology, Caspian Sea Ecology Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran

*Email Address: mehdi.khoshnam@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
<p>Article Type: Research Paper</p> <p>Article History:</p> <p>Received Date: 2025/12/24</p> <p>Revised Date: 2026/02/12</p> <p>Accepted Date: 2026/02/24</p> <p>Published Date: 2026/04/16</p> <p>Keywords: Heavy metals, Dam reservoir sediments, Geochemical indicators, Cumulative loading, Khersan 3 dam.</p>	<p>Reservoir sediments, as a key component of aquatic ecosystems, play an important role in the accumulation, transport, and release of pollutants and can reflect both historical and current contamination levels. Among inorganic pollutants, heavy metals are of particular concern due to their chemical persistence, high toxicity, and bioaccumulation potential. The aim of this study was to assess heavy metal contamination levels and identify their natural and anthropogenic sources in the sediments of the Khersan 3 Dam reservoir using geochemical indices. Surface sediment samples were collected during the autumn and winter of 2023 and the spring and summer of 2024. Subsequently, the concentrations of iron (Fe), zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cd), lead (Pb), and mercury (Hg) were determined for both total concentrations (labile and residual fractions) and anthropogenic concentrations (labile fraction). To evaluate the degree and status of contamination, the Müller geoaccumulation index (I_{geo}), contamination factor (CF), and pollution load index (PLI) were calculated. The results indicated that iron, zinc, and copper were predominantly of lithogenic origin, with their I_{geo} and CF values falling within the unpolluted range. Lead exhibited an unpolluted to moderately polluted status, suggesting a combination of natural sources and limited anthropogenic inputs. In contrast, cadmium was identified as the most critical contaminant, with I_{geo} values ranging from moderately to heavily polluted and CF values exceeding 1 in all seasons, likely reflecting the influence of anthropogenic activities, particularly agricultural practices and the use of phosphate fertilizers. Mercury was mainly detected in the labile fraction and was primarily of anthropogenic origin. PLI values were below 1 in all seasons, indicating an overall unpolluted condition of the sediments in terms of cumulative heavy metal loading.</p>
<p>Cite this article:</p>	<p>Sharareh Khodami , Tahereh Eskandari , Hassan Nasrollahzadeh Saravi , Behzad Rahnama, Mehdi Khoshnamvand , Maryam Rezaei , Horieh Younesipour(2026) Assessment of heavy metal pollution (Iron, Zinc, Copper, Cadmium, Lead, and Mercury) in the sediments of the Khersan 3 dam reservoir using geochemical indicators, Journal of Environmental Sciences Studies, 10(4) , Pages 10992 – 11001.</p>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Reservoir sediments are key components of aquatic ecosystems due to their capacity to accumulate, store, and potentially remobilize pollutants. Among inorganic contaminants, heavy metals are of particular concern because of their persistence, non-biodegradability, toxicity, and tendency to bioaccumulate through aquatic food webs. After entering aquatic systems, heavy metals bind to fine particles and organic matter, eventually settling into bottom sediments where they may remain for extended periods. However, environmental fluctuations such as changes in pH, redox conditions, and hydrodynamics can trigger their release into the overlying water, posing ecological and human health risks. Large dam reservoirs, especially those influenced by both natural geological inputs and human activities, are highly vulnerable to heavy metal accumulation. Therefore, assessing metal concentrations, contamination intensity, and distinguishing lithogenic from anthropogenic sources is essential for environmental monitoring and sustainable management.

Materials and Methods

This study evaluated the level, intensity, and origin of heavy metal contamination in sediments of the Khersan 3 Dam reservoir in southwestern Iran using geochemical indices. Seasonal sediment sampling was conducted during autumn and winter 2023 and spring and summer 2024. Surface sediments (0–5 cm) were collected using a grab sampler and transported to the laboratory under cooled conditions. Samples were freeze-dried, homogenized, and sieved (<63 μm). Sequential extraction based on Tessier's procedure was applied to separate anthropogenic (labile) fractions from total (labile + residual) concentrations. Total digestion was carried out using nitric acid. Iron (Fe), zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cd), and lead (Pb) were measured using flame atomic absorption spectrometry, while mercury (Hg) was analyzed by cold vapor atomic absorption. To evaluate contamination, the Müller geoaccumulation index (I_{geo}), contamination factor (CF), and pollution load index (PLI) were calculated using accepted background values. These indices were applied to both total and labile concentrations to better assess contamination intensity and identify dominant pollution sources.

Results and Discussion

Iron, zinc, and copper showed low concentrations in the labile fraction, and their I_{geo} and CF values classified them as unpolluted, indicating predominantly lithogenic origins governed mainly by geological processes and natural weathering. Seasonal variations were minor and mostly hydrological. Lead showed an unpolluted to moderately polluted status, suggesting mixed origins; although natural background inputs dominate, limited anthropogenic contributions, likely from agricultural runoff or atmospheric deposition, may exist. Cadmium was identified as the most critical contaminant. Elevated I_{geo} values indicated moderate to heavy contamination, while CF values greater than unity in all seasons confirmed anthropogenic enrichment. A considerable fraction of cadmium occurred in the labile form, highlighting its bioavailability and potential ecological risk. Agricultural activities, particularly phosphate fertilizer application, appear to be the primary source. Mercury, although present in relatively low concentrations, was mainly detected in the labile fraction, indicating dominant anthropogenic influence, possibly linked to combustion processes, waste disposal, or diffuse environmental sources. Despite these element-specific concerns, PLI values remained below 1 in all seasons, suggesting that sediments are not critically polluted from a cumulative perspective. However, reliance solely on PLI may underestimate localized or element-specific risks, particularly for cadmium.

Conclusion

Overall, sediments of the Khersan 3 Dam reservoir are classified as unpolluted when evaluated cumulatively. However, metal-specific assessments reveal important concerns. Iron, zinc, and copper are mainly lithogenic and environmentally non-critical, whereas cadmium represents a significant anthropogenic contaminant with high ecological risk potential, and mercury also reflects human influence despite its lower levels. These findings highlight the necessity of using multiple geochemical indices simultaneously rather than relying solely on cumulative indicators. Continuous monitoring, improved agricultural management, and control of anthropogenic discharges are essential to prevent future deterioration of sediment quality and to ensure sustainable environmental management of the Khersan 3 Dam reservoir.

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین (آهن، روی، مس، کادمیم، سرب و جیوه) در رسوبات مخزن سد خرسان ۳ با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی

شراره خدای^۱، طاهره اسکندری^۲، حسن نصراله زاده ساروی^۲، بهزاد رهنما^۲، مهدی خوشناموند^{۲*}، مریم رضائی^۲، حوریه یونسی پور^۲

۱- مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۲- گروه اکولوژی، پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: mehdi.khoshtnam@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۷</p> <p>کلید واژه ها: فلزات سنگین، رسوبات مخزن سد، شاخص‌های ژئوشیمیایی، بارگذاری تجمعی، سد خرسان ۳.</p>	<p>رسوبات مخازن سدها به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی اکوسیستم‌های آبی، نقش مهمی در تجمع، انتقال و آزادسازی آلاینده‌ها ایفا می‌کنند و می‌توانند بازتاب‌دهنده تاریخچه و وضعیت فعلی آلودگی باشند. در میان آلاینده‌های معدنی، فلزات سنگین به دلیل پایداری شیمیایی، سمیت بالا و قابلیت تجمع زیستی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. هدف از این پژوهش، ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات سنگین و تعیین منشأ طبیعی و انسان‌زاد آن‌ها در رسوبات مخزن سد در حال احداث خرسان ۳ با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی است. نمونه‌برداری از رسوبات سطحی طی فصول پاییز و زمستان ۱۴۰۲ و بهار و تابستان ۱۴۰۳ انجام شد. سپس، غلظت فلزات آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu)، کادمیم (Cd)، سرب (Pb) و جیوه (Hg) در دو بخش غلظت کل (بخش ناپایدار و پایدار) و غلظت منابع انسانی (بخش ناپایدار) اندازه‌گیری گردید. به‌منظور ارزیابی شدت و وضعیت آلودگی، شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر (Igeo)، فاکتور آلودگی (CF) و شاخص بارگذاری آلودگی (PLI) محاسبه شدند. نتایج نشان داد که فلزات آهن، روی و مس عمدتاً دارای منشأ زمین‌زاد بوده و مقادیر Igeo و CF آن‌ها در محدوده غیرآلوده قرار دارد. سرب نیز وضعیت غیرآلوده تا نسبتاً آلوده را نشان داد که بیانگر ترکیبی از منابع طبیعی و ورودی‌های محدود انسانی است. در مقابل، کادمیم به‌عنوان مهم‌ترین عنصر آلاینده شناسایی شد؛ به‌طوری‌که مقادیر Igeo آن در محدوده آلودگی متوسط تا به شدت آلوده و CF بالاتر از ۱ در تمامی فصول مشاهده گردید که این موضوع احتمالاً نقش فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه کشاورزی و مصرف کودهای فسفاته، را تأیید می‌کند. جیوه عمدتاً در بخش ناپایدار و با منشأ انسان‌زاد مشاهده شد. مقادیر PLI در تمامی فصول کمتر از ۱ بود که نشان‌دهنده وضعیت کلی غیرآلوده رسوبات از نظر بارگذاری تجمعی فلزات سنگین مورد مطالعه است.</p>

منابع آب شیرین یکی از سرمایه‌های حیاتی بشر برای شرب، کشاورزی، صنعت و تولید انرژی به‌شمار می‌روند. در قرن اخیر، افزایش جمعیت و توسعه فعالیت‌های اقتصادی سبب فشار بیش از پیش بر این منابع شده و موضوع کیفیت آب را به یک چالش جدی جهانی تبدیل کرده است. در این میان، رودخانه‌ها و مخازن سدها به‌عنوان منابع راهبردی، در معرض ورود طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها قرار دارند که می‌توانند ساختار و کارکرد اکوسیستم‌های آبی را تغییر دهند. رسوبات کف نیز نقش کلیدی در چرخه آلاینده‌ها دارند و نه تنها تاریخچه آلودگی را بازتاب می‌دهند، بلکه می‌توانند در شرایط تغییر محیطی منبع ثانویه ورود دوباره آلاینده‌ها به آب باشند. فلزات سنگین از مهم‌ترین آلاینده‌های معدنی محیط‌زیست هستند که به دلیل پایداری شیمیایی، غیرقابل تجزیه بودن و قابلیت تجمع زیستی، اهمیت ویژه‌ای در مطالعات آلودگی دارند. برخلاف بسیاری از ترکیبات آلی که قابلیت تخریب بیولوژیک دارند، فلزات سنگین در محیط باقی می‌مانند و اثرات بلندمدت دارند. در بدن موجودات زنده نیز این عناصر می‌توانند در بافت‌ها انباشته شوند و از طریق زنجیره غذایی به انسان منتقل گردند. به‌عنوان مثال، کادمیوم عمدتاً بر کلیه و استخوان اثر می‌گذارد، سرب موجب اختلالات عصبی و خونی می‌شود، و جیوه آسیب جدی به سیستم عصبی مرکزی وارد می‌کند. رسوبات به‌عنوان یک مخزن برای آلاینده‌ها شناخته می‌شوند. بسیاری از فلزات سنگین پس از ورود به آب، در رسوبات انباشته می‌شوند و طی زمان غلظت آن‌ها در فاز جامد افزایش می‌یابد. این انباشت باعث می‌شود که رسوبات نه تنها شاخص خوبی برای ارزیابی آلودگی گذشته باشند، بلکه در صورت تغییر شرایط محیطی (مانند کاهش pH، بی‌هوایی شدن، یا افزایش فعالیت میکروبی) مجدداً به ستون آب آزاد شوند. از این رو، بررسی رسوبات از اهمیت بیشتری نسبت به آب برخوردار است، زیرا می‌تواند هم منشأ آلودگی و هم پتانسیل رهاسازی در آینده را مشخص نماید. برای کمی‌سازی وضعیت آلودگی فلزات در رسوبات، شاخص‌های متعددی به کار می‌رود. شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر^۱ (Igeo) با مقایسه غلظت مشاهده‌شده با مقدار زمینه‌ای، شدت آلودگی هر فلز را تعیین می‌کند. فاکتور آلودگی^۲ (CF) که توسط Hakanson (1980) معرفی شد، شدت آلودگی هر عنصر را ارزیابی می‌کند. شاخص بارگذاری آلودگی^۳ (PLI) نیز توسط Tomlinson et al. (1980) ارائه شد، معیاری برای بیان وضعیت کلی آلودگی در یک ایستگاه نمونه‌برداری است. استفاده همزمان از این شاخص‌ها تصویر جامعی از وضعیت کیفی رسوبات فراهم می‌کند. سد خرسان ۳ یک سد بتنی دوقوسی در حال احداث بر روی رودخانه خرسان در شهرستان لردگان، استان چهارمحال و بختیاری است. ساختگاه این سد (محور طلایه) در بخش بالادست رودخانه خرسان، در دامنه شمال شرقی رشته‌کوه‌های چین‌خورده زاگرس و در جنوب غرب ایران واقع شده و از نظر جغرافیایی در طول شرقی ۲۵°، ۵۸'، ۵۰° و عرض شمالی ۳۱°، ۱۴'، ۵۰°، در محدوده روستاهای طلایه و آتشگاه و در فاصله‌ای حدود ۵۰ کیلومتری از شهر لردگان قرار دارد. این سد با ارتفاع ۱۹۵ متر و حجم مخزن ۱۱۸۵ میلیون مترمکعب، یکی از بزرگ‌ترین پروژه‌های نیروگاه برق آبی کشور به‌شمار می‌رود، هدف اصلی آن شامل؛ استحصال، تنظیم و انتقال آب برای مصارف کشاورزی و صنعتی است. علاوه بر اهمیت فنی و اقتصادی، این سد از منظر زیست‌محیطی نیز دارای جایگاه ویژه‌ای است. حوضه آبریز سد خرسان ۳ از نظر منابع طبیعی و انسانی دارای تنوع قابل توجهی است که می‌تواند بر کیفیت آب و رسوبات مخزن تأثیرگذار باشد. از نظر منابع طبیعی، این حوضه تحت تأثیر سازندهای زمین‌شناسی آهکی، شیلی و ماری، فرایندهای هوازدگی و فرسایش، پوشش گیاهی مرتعی و جنگلی و رژیم هیدرولوژیکی فصلی قرار دارد که نقش مهمی در تأمین رسوبات و عناصر زمین‌زاد ایفا می‌کنند. در مقابل، منابع انسانی شامل فعالیت‌های کشاورزی، دامداری، سکونت‌گاه‌های روستایی، راه‌های ارتباطی و بهره‌برداری‌های محدود معدنی در بخش‌هایی از حوضه است که می‌توانند از طریق رواناب‌های سطحی، پساب‌ها و مصرف کودها و سموم شیمیایی، موجب ورود آلاینده‌ها به سیستم رودخانه‌ای شوند. برهم‌کنش این عوامل طبیعی و انسانی، الگوی انتقال، تجمع و توزیع فلزات سنگین در رسوبات مخزن را کنترل کرده و ضرورت توجه همزمان به هر دو منبع در ارزیابی‌های زیست‌محیطی این حوضه را نشان می‌دهد. با وجود این، تاکنون پژوهش جامعی در زمینه ارزیابی کیفیت رسوبات مخزن سد خرسان ۳ با تمرکز بر تفکیک فلزات سنگین به بخش‌های مرتبط با سهم منابع انسانی (ناپایدار) و سهم کل (سهم ناپایدار + سهم زمین‌شناسی) و محاسبه شاخص‌های آلودگی انجام نشده است. لذا، برای نخستین بار در این حوضه، تفکیک کمی سهم منابع زمین‌زاد و انسان‌زاد بر اساس ترکیب استخراج شیمیایی پی‌درپی و شاخص‌های ژئوشیمیایی استاندارد انجام شده است. برخلاف مطالعات متداول که عمدتاً به گزارش غلظت کل فلزات محدود می‌شوند، در این تحقیق با تمرکز بر بخش‌های زیست‌دسترس و بالقوه پرخطر، امکان تفسیر دقیق‌تر ریسک‌های اکولوژیکی فراهم گردیده است. همچنین، پایش نظام‌مند فصلی طی چهار فصل متوالی، الگوی پویای انتقال، تجمع و بازتحرك پذیری فلزات را تحت تأثیر نوسانات هیدرولوژیکی و اقلیمی منطقه آشکار ساخته

¹ Müller Geoaccumulation Index

² Contamination Factor

³ Pollution Load Index

• تعیین شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر I_{geo} (Müller Geoaccumulation Index)

شاخص تجمع زمینی مولر (I_{geo}) روشی استاندارد در ژئوشیمی زیست‌محیطی است که برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در رسوبات و خاک‌ها به کار می‌رود. این شاخص نخستین بار توسط مولر در سال ۱۹۶۹ معرفی شد و هدف آن مقایسه غلظت فعلی یک عنصر با مقدار زمینه‌ای آن (پیش از صنعتی شدن) است تا درجه آلودگی محیط تعیین شود. این روش بر پایه رابطه ۱ استوار است:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (1)$$

که در آن C_n : غلظت فلز سنگین در نمونه و B_n : غلظت همان فلز در پوسته زمین (آهن = 47200 ، روی = 95 ، مس = 45 ، کادمیم = 0.3 ، سرب = 20 و جیوه = 0.4 میلی گرم بر کیلوگرم) و یا غلظت اولیه قبل از صنعتی شدن در رسوبات می‌باشد. ضریب $1/5$ بمنظور تصحیح غلظت اولیه رسوبات بدلیل تاثیر عوامل زمین‌شناسی (لیتوژنیک) اعمال شده است. شاخص I_{geo} به هفت کلاس تقسیم می‌شود که هر کدام نشان‌دهنده سطح خاصی از آلودگی هستند (جدول شماره ۱).

جدول ۱. طبقه بندی کیفیت رسوبات بر اساس شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر (۱۹۶۹)

وضعیت آلودگی	کلاس آلودگی	مقادیر I_{geo}
غیر آلوده	۰	≤ 0
غیر آلوده تا آلودگی متوسط	۱	$0-1$
آلودگی متوسط	۲	$1-2$
آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد	۳	$2-3$
آلودگی زیاد	۴	$3-4$
آلودگی زیاد تا به شدت آلوده	۵	$4-5$
به شدت آلوده	۶	> 5

• فاکتور آلودگی (Contamination Factor; CF)

این شاخص بر اساس نسبت غلظت فلز مورد نظر در نمونه رسوب (C_m) به غلظت زمینه‌ای (آهن = 47200 ، روی = 95 ، مس = 45 ، کادمیم = 0.3 ، سرب = 20 و جیوه = 0.4 میلی گرم بر کیلوگرم) همان فلز (C_b) تعریف می‌شود.

$$CF = \frac{C_m}{C_b} \quad (2)$$

اگر $C_b < C_m$ بیشتر باشد آن فلز می‌تواند باعث آلودگی گردد و اگر کمتر باشد فلز مورد نظر سبب آلودگی نمی‌گردد.

• شاخص بارگذاری آلودگی (Pollution Load Index; PLI)

این شاخص برای بیان وضعیت کلی آلودگی در هر ایستگاه به کار می‌رود (رابطه ۳) و بر اساس میانگین هندسی فاکتورهای آلودگی محاسبه می‌شود.

$$PLI = \sqrt[n]{(CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)} \quad (3)$$

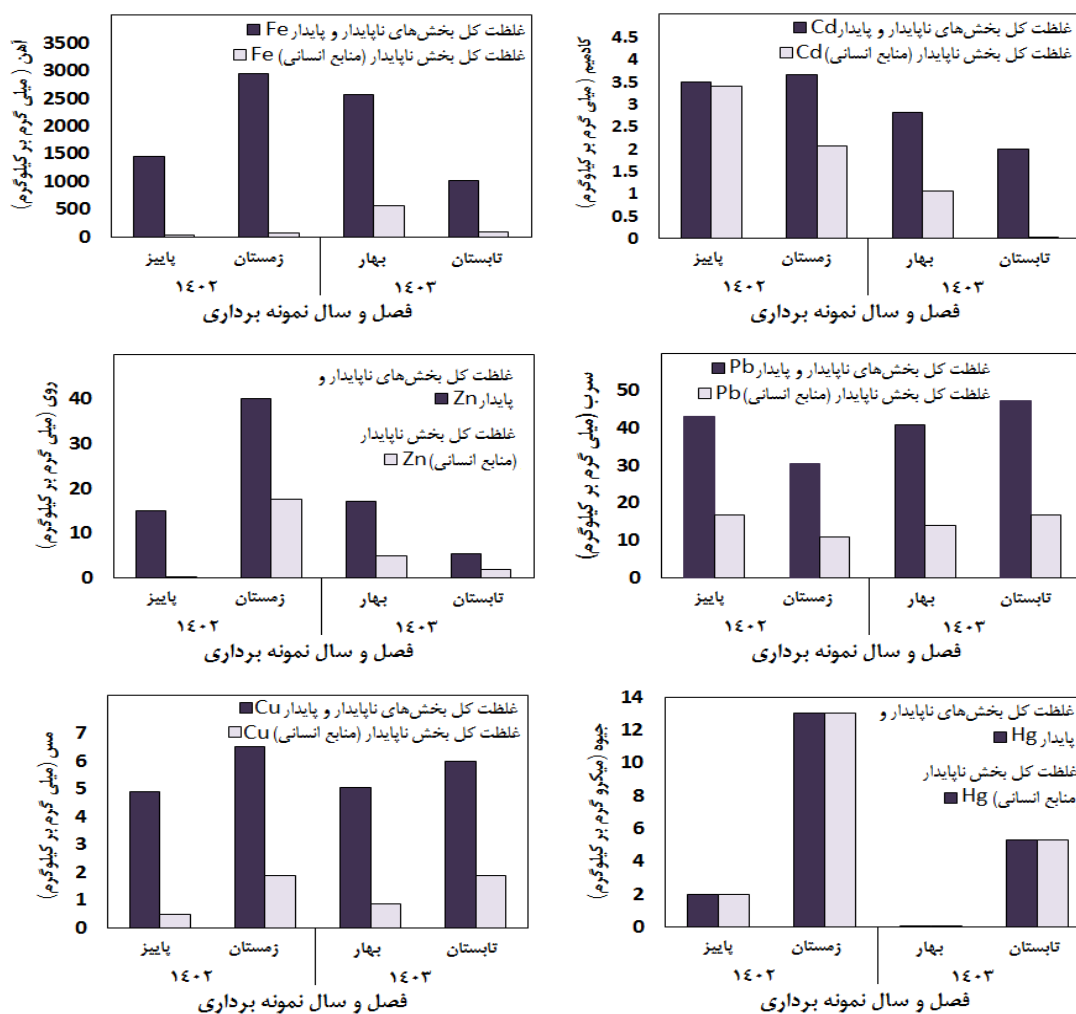
n = تعداد فلز

اگر $PLI < 1$ باشد، رسوب غیرآلوده است. اگر $PLI = 1$ باشد، آنگاه در حد پس‌زمینه است. و نهایتاً $PLI > 1$ نشان‌دهنده رسوب آلوده است.

۳- نتایج

• سنجش فلزات سنگین در رسوبات

نتایج آنالیز میانگین غلظت کل (بخش ناپایدار و پایدار) و غلظت بخش ناپایدار فلزات سنگین شامل آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu)، کادمیم (Cd)، سرب (Pb) و جیوه (Hg) در رسوبات مخزن سد خراسان ۳ به صورت فصلی، طی سال های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ در شکل ۲ ارائه شده اند. نتایج نشان داد که فلز آهن در فصل زمستان ۱۴۰۲ بیشترین غلظت کل را داشته، و سهم بخش ناپایدار آن در تمامی فصول بسیار کم بوده است. این الگو احتمالاً بیانگر منشأ عمدتاً لیتولوژیک (زمین زاد) آهن در رسوبات مخزن است. مطالعات جهانی نیز تأیید کرده اند که توزیع آهن معمولاً تحت تأثیر منابع فعالیت های زمین شناسی و فرآیندهای فرسایشی است. همچنین شواهد منطقه ای در ایران نشان داده اند که آهن کمتر تحت تأثیر عوامل انسانی قرار می گیرد و منشأ طبیعی آن غالب است. نتایج ارزیابی های صورت گرفته بروی فلزات روی و مس نشان دادند که همانند فلز آهن، غلظت های مس و روی نیز عمدتاً طبیعی بودند. مس و روی می توانند از کاربرد آفت کش ها، کودها و همچنین پساب های کشاورزی و شهری وارد محیط های آبی شوند. فلز سرب کل به ترتیب در تابستان و زمستان بیشترین و کمترین مقدار را داشت، و منشأ آن عمدتاً طبیعی بود. سرب یکی از فلزات شناخته شده با منشأ های شهری، جاده ای و ترافیکی است و رواناب سطحی به طور مؤثری آن را به رسوبات وارد می کند. مطالعات منطقه ای در ایران نیز وجود سرب ناشی از فعالیت های انسانی را تایید کرده اند. کادمیم رفتاری کاملاً فصلی نشان داد؛ بیشترین سهم بخش ناپایدار در فصول پاییز و زمستان مشاهده شد که می تواند ناشی از مصرف کودهای فسفاته کشاورزی باشد. مطالعات مرور جهانی به طور گسترده نشان داده اند که کودهای فسفاته مهم ترین منبع ورود کادمیم به خاک و رسوبات هستند. جیوه تنها فلزی بود که کاملاً در بخش ناپایدار (منشأ انسانی) مشاهده شد و در زمستان بیشترین مقدار را داشت. جیوه معمولاً از منابع ناشی از فعالیت های صنعتی نظیر احتراق سوخت های فسیلی، پسماندها و فعالیت های کشاورزی/شهری وارد محیط می شود و الگوی آن نشانگر حساسیت بالای این فلز به فعالیت های انسانی است. مطالعات جهانی نیز تأیید کرده اند که جیوه در محیط های آبی بیشترین ارتباط را با فعالیت های انسانی دارد.



شکل ۲. میانگین غلظت کل (بخش ناپایدار و پایدار) و غلظت بخش ناپایدار متناسب به منابع انسانی فلزات سنگین در رسوبات مخزن سد خراسان ۳ به تفکیک فصل، در سال های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳

• شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر I_{geo}

بر اساس نتایج I_{geo} ، وضعیت آلودگی فلزات سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه عموماً در محدوده غیر آلوده تا کم‌آلوده قرار دارد (جدول ۲). مقادیر I_{geo} برای فلزات روی، مس، آهن و جیوه در تمامی فصول منفی ($I_{geo} < 0$) به دست آمد که نشان‌دهنده غالب بودن منشأ زمین‌زاد و طبیعی این عناصر و عدم تجمع قابل‌توجه آن‌ها در رسوبات است. مقادیر بسیار منفی I_{geo} به‌ویژه برای جیوه بیانگر نبود ورودی مؤثر انسانی و یا عدم تمایل این فلز به تجمع در فازهای زیست‌دسترس رسوب در منطقه مورد بررسی است. در مقابل، کادمیم رفتاری متمایز از سایر فلزات نشان داد؛ به‌طوری‌که مقادیر I_{geo} این فلز در غلظت کل رسوبات در محدوده آلودگی زیاد تا به شدت آلوده (کلاس‌های ۴ و ۵) و در بخش ناپایدار (منابع انسانی) در محدوده آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد (کلاس‌های ۲ و ۳) قرار گرفت. این نتایج حاکی از تجمع قابل‌توجه کادمیم و نقش برجسته فعالیت‌های انسانی در ورود این فلز به سیستم رسوبی است. حضور کادمیم در بخش ناپایدار رسوبات نشان‌دهنده پتانسیل بالای زیست‌دسترس‌پذیری و ریسک اکولوژیکی بالقوه این فلز در اکوسیستم آبی منطقه است. فلز سرب نیز مقادیر I_{geo} نزدیک به صفر یا کمی منفی را نشان داد که بیانگر وضعیت غیر آلوده تا آلودگی متوسط است. این وضعیت می‌تواند ناشی از ترکیبی از منابع طبیعی و ورودی‌های محدود انسانی باشد، با این حال سهم منابع انسانی سرب در مقایسه با کادمیم به‌مراتب کمتر ارزیابی می‌شود.

جدول ۲. مقادیر I_{geo} فلزات سنگین برای غلظت کل (بخش ناپایدار و پایدار) و غلظت بخش ناپایدار متناسب به منابع انسانی در رسوبات مخزن سد خرسان ۳ به تفکیک فصل، در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳

فصل و سال	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Fe
پاییز ۱۴۰۲	-۸/۲۲	۰/۵۱	۴/۵۴	-۲/۹۳	-۳/۲۴	-۵/۶۱
زمستان ۱۴۰۲	-۵/۵۲	۰/۰۲	۴/۶۰	-۲/۵۲	-۱/۸۳	-۴/۵۹
بهار ۱۴۰۳	-۱۸/۱۹	۰/۴۴	۴/۲۲	-۲/۸۸	-۳/۰۶	-۴/۷۸
تابستان ۱۴۰۳	-۶/۸۱	۰/۶۵	۳/۷۳	-۲/۶۴	-۴/۷۲	-۶/۱۳
پاییز ۱۴۰۲	-۸/۲۲	-۰/۸۳	۲/۹۱	-۷/۱۳	-۹/۲۷	-۱۱/۳۶
زمستان ۱۴۰۲	-۵/۵۲	-۱/۴۶	۲/۱۹	-۵/۱۵	-۳/۰۱	-۹/۹۹
بهار ۱۴۰۳	-۱۸/۱۹	-۱/۱۱	۱/۲۳	-۶/۲۹	-۴/۸۴	-۶/۹۷
تابستان ۱۴۰۳	-۶/۸۱	-۰/۸۴	-۷/۸۱	-۵/۱۸	-۶/۳۰	-۹/۵۵

• فاکتور آلودگی (CF)، و شاخص بارگذاری آلودگی (PLI)

نتایج فاکتور آلودگی فلزات سنگین در رسوبات حوضه سد خرسان ۳ طی سال‌های ۱۴۰۲-۱۴۰۳ نشان می‌دهد که الگوی آلودگی به‌طور عمده تحت تأثیر کادمیم و در مرتبه بعد سرب قرار دارد. بر اساس طبقه‌بندی Hakanson، کادمیم و سرب در تمامی فصول دارای مقادیر $CF < 1$ بودند (جدول ۳)، که دارای آلودگی اندک در مقابل، فلزات مس، روی و آهن در تمامی فصول دارای CF کمتر از ۱ بوده و نشان‌دهنده عدم آلودگی و غالب بودن منشأ زمین‌زاد آن‌ها هستند، در حالی که فلز جیوه با مقادیر بسیار پایین، بیانگر عدم یا کم بودن منابع آلاینده فعال در منطقه است. به‌طور کلی، نتایج CF حاکی از آن است که آلودگی کادمیم و سرب رسوبات حوضه سد خرسان ۳ ماهیتی انسان‌زاد داشته و مدیریت و کنترل منابع ورودی آنها برای کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی و اکولوژیکی منطقه امری ضروری است.

جدول ۳. مقادیر فاکتور آلودگی و شاخص بارگذاری آلودگی فلزات سنگین در رسوبات حوضه سد خرسان ۳ به تفکیک فصل، در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳

فصل و سال	شاخص بارگذاری آلودگی (PLI)					
	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Fe
پاییز ۱۴۰۲	۰/۳۵	۲/۱۵	۱۱/۶۶	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۰۳
زمستان ۱۴۰۲	۰/۵۰	۱/۵۲	۱۲/۱۶	۰/۱۴	۰/۴۲	۰/۰۶
بهار ۱۴۰۳	۰/۰۰	۲/۰۴	۹/۳۶	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۰۵
تابستان ۱۴۰۳	۰/۲۶	۲/۳۶	۶/۶۶	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۲

نتایج شاخص بارگذاری آلودگی در رسوبات حوضه سد خرسان ۳ طی سال‌های ۱۴۰۲-۱۴۰۳ (جدول ۳) نشان می‌دهد که مقادیر این شاخص در تمامی فصول کمتر از عدد ۱ بوده است، که بر اساس طبقه‌بندی Tomlinson et al. (1980) بیانگر وضعیت غیرآلوده رسوبات از منظر بارگذاری تجمعی فلزات سنگین است. با این حال، بیشترین مقدار PLI در زمستان ۱۴۰۲ مشاهده شد که می‌تواند به افزایش ورودی رواناب‌های سطحی، تمرکز آلاینده‌ها در شرایط هیدرولوژیکی خاص و افزایش سهم منابع انسان‌زاد در این فصل مرتبط باشد. مقادیر پایین‌تر PLI در پاییز، بهار و تابستان نشان‌دهنده غالب بودن شرایط نزدیک به پس‌زمینه برای اغلب فلزات است. این در حالی است که شاخص‌های تک‌عنصری مانند CF، به‌ویژه برای کادمیوم، سطوح بالایی از آلودگی را نشان می‌دهند؛ موضوعی که بیانگر آن است که شاخص PLI به دلیل ماهیت میانگین هندسی، اثر آلودگی شدید یک عنصر منفرد را تعدیل می‌کند. بنابراین، استفاده هم‌زمان از PLI و شاخص‌های تک‌فلزی نظیر CF و Igeo برای ارائه تصویری جامع‌تر از وضعیت آلودگی رسوبات و ارزیابی دقیق‌تر ریسک‌های زیست‌محیطی در حوضه سد خرسان ۳ ضروری است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که رسوبات مخزن سد خرسان ۳ از نظر آلودگی به فلزات سنگین در محدوده غیرآلوده قرار دارند. این وضعیت بیانگر آن است که در مقیاس تجمعی، مخزن سد خرسان ۳ در حال حاضر با آلودگی فلزات سنگین مواجه نیست. با این حال، بررسی شاخص‌های تک‌فلزی تصویر دقیق‌تری از وضعیت آلودگی ارائه داد. فلزات آهن، روی و مس عمدتاً دارای منشأ زمین‌زاد بوده و مقادیر شاخص تجمع ژئوشیمیایی (Igeo) و فاکتور آلودگی (CF) آن‌ها در محدوده غیرآلوده قرار گرفت که نشان‌دهنده نقش غالب فرآیندهای طبیعی و زمین‌شناسی منطقه در کنترل غلظت این عناصر است. در مقابل، کادمیوم به‌عنوان مهم‌ترین عنصر آلاینده در رسوبات مخزن سد خرسان ۳ شناسایی شد. مقادیر بالای Igeo و CF برای این فلز در تمامی فصول، به‌ویژه در پاییز و زمستان، حاکی از تجمع قابل‌توجه و نقش برجسته منابع انسان‌زاد، به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی و مصرف کودهای فسفاته است. حضور کادمیوم در بخش ناپایدار رسوبات نشان‌دهنده زیست‌دسترسی‌پذیری بالاتر و پتانسیل بروز ریسک‌های اکولوژیکی در صورت تغییر شرایط محیطی است. سرب وضعیت غیرآلوده تا نسبتاً آلوده را نشان داد و جیوه اگرچه غلظت پایینی داشت، اما عمدتاً با منشأ انسان‌زاد مشاهده شد که حساسیت این عنصر به فعالیت‌های انسانی را تأیید می‌کند. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اتکا به شاخص‌های تجمعی به‌تنهایی می‌تواند شدت آلودگی عناصر خاص را پنهان کند؛ از این‌رو استفاده هم‌زمان از شاخص‌های تجمعی و تک‌عنصری برای ارزیابی دقیق وضعیت آلودگی ضروری است. پایش مستمر رسوبات، مدیریت منابع ورودی انسان‌زاد و کنترل فعالیت‌های کشاورزی در حوضه آبریز سد خرسان ۳ می‌تواند نقش مؤثری در پیشگیری از افزایش آلودگی و حفظ پایداری زیست‌محیطی این مخزن ایفا کند. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک مبنای علمی معتبر برای مدیریت پایدار منابع آب و رسوبات در حوضه سد خرسان ۳ در حال احداث مورد استفاده قرار گیرد. اطلاعات حاصل از تفکیک منشأ طبیعی و انسان‌زاد فلزات سنگین، امکان شناسایی دقیق منابع آلاینده و اولویت‌بندی اقدامات کنترلی را برای مدیران و سیاست‌گذاران محیط‌زیستی فراهم می‌سازد. همچنین، داده‌های پایه به‌دست‌آمده از این مطالعه می‌تواند در طراحی برنامه‌های پایش بلندمدت، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های توسعه‌ای، و تدوین دستورالعمل‌های بهره‌برداری ایمن از مخزن سد به‌کار رود. از سوی دیگر، نتایج مربوط به زیست‌دسترسی‌پذیری فلزات، به‌ویژه کادمیوم و جیوه، قابلیت استفاده در ارزیابی ریسک اکولوژیکی، مدیریت شیلات و حفاظت از سلامت جوامع محلی را داراست. افزون بر این، چارچوب روش‌شناختی ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان الگویی قابل‌تعمیم برای مطالعات مشابه در سایر سدها و حوضه‌های آبریز کشور مورد استفاده قرار گیرد و در ارتقای نظام پایش و مدیریت آلودگی‌های رسوبی نقش مؤثری ایفا نماید.

منابع

- Ali, H., et al. 2019. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation, Journal of Chemistry, Vol. 2019, P. 1-14.
- Alloway, B. J. 2013. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.), Springer. DOI: 10.1007/978-94-007-4470-7
- Dadkhah Tehrani, M., et al. 2023. Evaluation of water quality of Chalus River based on IRWQIsc and NSFQI water quality index, Journal of Environmental Sciences Studies, Vol. 8, P. 7064-7072. (In Persian).

- Fallahizadeh, S., et al. 2025. Health risk assessment of heavy metals in drinking water reservoirs of Yasuj, Iran using Monte Carlo simulation and sensitivity analysis, *Journal of Food Composition and Analysis*, Vol. 148, P. 1-12.
- Fang, K., et al. 2025. Spatial distribution, source identification, and risk assessment of heavy metals in sediments of the Yellow River basin, China, *Applied Sciences*, Vol. 15, P. 1-19.
- Fathian, M. M., et al. 2026. Comprehensive assessment of pollution indicators in agricultural soils around the Zayandeh Rood River in Isfahan, *Journal of Environmental Sciences Studies*, Vol. 10, P. 10836-10847. (In Persian).
- Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach, *Water Research*, Vol. 14, P. 975–1001.
- Horowitz, H. M., et al. 2014. Historical mercury releases from commercial products: Global environmental implications, *Environmental Science and Technology*, Vol. 48, P. 10242–10250.
- Huber, M., et al. 2016. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning, *Science of the Total Environment*, Vol. 541, P. 895–919.
- Khoshnamvand, M., et al. 2018. Assessment of mercury accumulation and magnification in a freshwater food chain: Sediment, benthos and benthivorous fish, *Iranian Journal of Toxicology*, Vol. 12, P. 17–22.
- Kubier, A., et al. 2019. Cadmium in soils and groundwater: A review, *Applied Geochemistry*, Vol. 108, Article 104388.
- Mansouri Moghadam, S., et al. 2024. Level of heavy metals and environmental pollution index in Ahvaz, Southwest Iran, *Scientific Reports*, Vol. 14, P.1–12.
- Müller, G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River, *GeoJournal*, Vol. 2, P. 108–118.
- Obrist, D., et al. 2018. A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use, *Ambio*, Vol. 47, P. 116–140.
- Sharafi, S., et al. 2023. Effects of heavy metal emitted by important industries of Shazand city on the surrounding environment, *Journal of Environmental Sciences Studies*, Vol. 8, P. 6399-6411. (In Persian).
- Suthar, S., et al. 2009. Assessment of metals in water and sediments of Hindon River, India: Impact of industrial and urban discharges, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 171, P. 1088–1095.
- Tchounwou, P. B., et al. 2012. Heavy metal toxicity and the environment, *Experimental Supplementum*, Vol. 101, P. 133–164.
- Tessier, A., et al. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Analytical Chemistry*, Vol. 51, P. 844–851.
- Tomlinson, D. L., et al. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index, *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, Vol. 33, P. 566–575.
- 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*, Vol. 72, P. 175–192.
- Walling, D. E. 2006. Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, Vol. 79, P. 192–216.
- Zarshenas, R., et al. 2016. Assessment of resistance and non-resistance fractions of heavy metals concentration (Fe, Mn, Cr, Ni) in surface sediments from the southern of Caspian Sea of two stations (Tonekabon and Amirabad), *Iranian Scientific Fisheries Journal*, Vol. 25, P. 201-206. (In Persian).
- Zheng, L., et al. 2019. Major lithogenic contributions to the distribution and budget of iron in the North Pacific Ocean, *Scientific Reports*, Vol. 9, P. 1–9.