

Ecological risk assessment of lead and cadmium in Zayandeh-Rud River sediments

Mosoumeh Koohi

Ph.D student in Environmental Science and Engineering Department, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Atefeh Chamani

*Associate Professor in Environmental Science and Engineering Department, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran. a.chamani@khuif.ac.ir

Received: 2022/11/21

Accepted: 2023/02/14

Document Type: Research article

ABSTRACT

Background and purpose: The Zayandeh-Rud River is the sole permanent river in the central plateau of Iran. This river has been extensively exposed to sewage and effluent discharge from various point and non-point sources of pollution. Consequently, the sediment quality of the Zayandeh-Rud River was investigated.

Materials and Methods: Sediment sampling was conducted in triplicates at six stations along the Zayandeh-Rud River during the spring, summer, autumn, and winter of 2019-2020. The concentrations of lead and cadmium were then determined. Subsequently, the bioaccumulation factor, Müller's geochemical index, contamination factor, contamination degree, modified contamination degree, potential ecological risk index, and pollution load index were calculated.

Results: The results indicated that the mean concentrations of cadmium in spring, summer, autumn, and winter were 1.18, 1.13, 1.08, and 0.54 mg/kg, respectively. Additionally, the mean concentration of lead was 26.13, 23.04, 23.96, and 11.17 mg/kg, respectively. The ecological risk assessment index revealed that the region was at a moderate ecological risk during spring, summer, and autumn, while during winter, it was at a low ecological risk.

Conclusion: A comparison between the mean metal concentrations and the Canadian sediment quality standard values for fresh waters demonstrated that the lead concentration in sediments is lower than the standard value, whereas cadmium exceeds the standard value. These results highlight the pollution status of the river, which is the primary source of freshwater in the central plateau of Iran. Moreover, this study can serve as a basis for implementing policies to mitigate the accumulation of heavy metals in aquatic ecosystems.

Keywords: Cadmium, Ecological risk, Lead, Sediment, Zayandeh-Rud River

Citation: Koohi M, Chamani A. Ecological risk assessment of lead and cadmium in Zayandeh-Rud River sediments. *Journal of Research in Environmental Health*. 2023; 9(1):50-65.

ارزیابی ریسک اکولوژیک ناشی از فلزات سرب و کادمیوم در رسوبات رودخانه زاینده‌رود

چکیده

زمینه و هدف: زاینده‌رود، تنها رودخانه دائمی فلات مرکزی ایران است. این رودخانه در معرض تخلیه گسترده فاضلاب و پساب از چندین منبع آلودگی نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای قرار گرفته است. بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف بررسی کیفیت رسوب رودخانه زاینده‌رود انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه نمونه‌برداری از رسوبات در ۳ تکرار در ۶ ایستگاه در حاشیه رودخانه زاینده‌رود در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان سال ۱۳۹۹ انجام شد. سپس غلظت سرب و کادمیوم تعیین شد. در نهایت، فاکتور تجمع زیستی، شاخص ژئوشیمیایی مولر، فاکتور آلودگی، درجه آلودگی، درجه آلودگی اصلاح شده، شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه و شاخص بار آلودگی فلزات سنگین محاسبه شد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج، میانگین غلظت کادمیوم در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱/۱۸، ۱/۱۳، ۱/۰۸ و ۰/۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و میانگین غلظت سرب به ترتیب ۲۶/۱۳، ۲۳/۰۴، ۲۳/۹۶ و ۱۱/۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی در فصل بهار، تابستان و پاییز، منطقه را در معرض خطر اکولوژیکی متوسط و در فصل زمستان، منطقه را در معرض خطر اکولوژیکی کم ارزیابی کرد.

نتیجه‌گیری: در مقایسه میانگین غلظت فلزات با مقادیر استاندارد کیفیت رسوب کانادا برای آب‌های شیرین، میزان سرب موجود در رسوبات از میزان استاندارد کمتر بود، اما کادمیوم بیش از میزان استاندارد بود. یافته‌های این پژوهش، وضعیت بحرانی رودخانه را به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب شیرین در فلات مرکزی ایران نشان می‌دهد. علاوه بر این، این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای اجرای سیاست‌هایی در جهت کاهش تجمع فلزات سنگین در محیط‌های آبی باشد.

کلیدواژه‌ها: رسوب، رودخانه زاینده‌رود، ریسک اکولوژیک، سرب، کادمیوم

معصومه کوهی

دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

عاطفه چمنی

* دانشیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران. (نویسنده مسئول):

a.chamani@khuisf.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

نوع مقاله: پژوهشی

◀ استناد: کوهی م، چمنی ع. ارزیابی ریسک اکولوژیک ناشی از فلزات سرب و کادمیوم در رسوبات رودخانه زاینده‌رود. فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط. بهار ۱۴۰۲؛ ۹(۱): (۶۵-۵۰).

برخلاف ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب، شاخص قابل اعتمادتری برای ارزیابی سطح آلودگی آب هستند. از منظر ژئوشیمی محیطی، رسوبات مهم‌ترین بخش لیتوسفر هستند که به‌عنوان محل نهایی تجمع عناصر بالقوه سمی در محیط آبی عمل می‌کنند (۱۴).

آلودگی رسوبات به فلزات سنگین، نگرانی و توجه علمی بسیاری از کشورهای در حال توسعه جهان مانند ایران را به خود جلب کرده است (۱۵). فلزات سنگین مختلفی شناخته شده‌اند که می‌توانند بر سلامت انسان تأثیر بگذارند و باعث بروز انواع مشکلات شوند (۱۶). کادمیوم و سرب، جزء ۱۰ فلز سنگین سمی هستند که از نظر سلامت عمومی مورد توجه سازمان بهداشت جهانی قرار دارند (۱۷). فلزات سنگینی مانند کادمیوم و سرب احتمالاً خطرناک‌ترین عناصر موجود در محیط هستند (۱۸) که حتی در مقادیر بسیار کم نیز سمی هستند و با افزایش غلظت خود، سمیت بیشتری ایجاد می‌کنند (۱۹).

سرب و کادمیوم برای جانوران آبی بسیار سمی هستند و بعد از ورود به زنجیره غذایی، باعث ناهنجاری‌های مختلفی در انسان می‌شوند (۲۰). همچنین برهمکنش کادمیوم و سرب می‌تواند بر رشد فیزیولوژیکی تأثیر بگذارد (۲۱). سرب از طریق باتری‌ها، مهمات، لحیم‌کاری، لوله‌ها، رنگ‌های ساخته شده از سرب، انتشار وسایل نقلیه، حشره‌کش‌ها و آلیاژها وارد محیط‌زیست می‌شود (۲۲) و در علائم فیزیولوژیکی متعددی مانند سمی شدن کلیه، فشار خون بالا و آسیب به DNA از طریق غیرفعال‌سازی جزئی آنزیم‌ها نقش دارد (۲۰). کادمیوم یک آلاینده مهم و رایج در محیط است. قرار گرفتن در معرض کادمیوم باعث بیماری‌های مختلفی مانند تحلیل استخوان، پوکی استخوان و اختلال عملکرد کلیه می‌شود (۲۳).

بررسی فلزات سنگین می‌تواند برای ارزیابی تأثیرات انسانی، صنعتی و خطرات ناشی از تخلیه زباله در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد (۲۴). بنابراین، اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در اکوسیستم رودخانه مهم می‌باشد.

زاینده‌رود تنها رودخانه دائمی فلات مرکزی ایران است که در توسعه کشاورزی، تأمین آب بخش صنعت و تمام فعالیت‌های اقتصادی منطقه نقش بسیار مهمی دارد، لذا حفظ کیفیت آب آن بسیار حائز اهمیت است. فاضلاب صنایع، تصفیه‌خانه‌ها و

تغییرات محیطی در سرتاسر جهان، به شدت مقادیر فلزات سنگین را افزایش داده است (۱). روند رو به رشد صنعتی شدن و شهرنشینی، آلودگی فلزات سنگین را به یک مشکل جدی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه تبدیل کرده است (۲). فلزات سنگین در محیط‌های آبی در نتیجه فرآیندهای هوازدگی سنگ‌های طبیعی وجود دارند. این فلزات علاوه بر منشأ طبیعی، از منابع انسانی نیز نشأت می‌گیرند. از آنجایی که فلزات سنگین طبیعی در مقادیر بسیار کم وجود دارند، برای انسان و محیط‌زیست مضر نیستند (۳). مطالعات نشان می‌دهد که چرخه طبیعی بیوژئوشیمیایی فلزات سنگین، توسط فعالیت‌های انسانی مختل شده است (۴).

امروزه حضور فلزات سنگین در محیط‌های آبی عمدتاً مربوط به فعالیت‌های انسانی می‌باشد (۵). رسوبات رودخانه‌ای به شدت مستعد آلودگی به فلزات سنگین هستند (۶) و ممکن است اثرات سمی روی موجودات آبی داشته باشند (۷). تجمع فلزات سنگین در بافت‌های مختلف آبزیان در اکوسیستم‌های آبی آلوده متفاوت است و به عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های بوم‌شناختی، سوخت‌وساز بدن و عوامل دیگری از قبیل شوری، سطح آلودگی آب، غذا و رسوب بستگی دارد. انسان نیز از طریق مصرف ماهی و سایر آبزیان، فلزات سنگین را جذب می‌کند که این فرآیند منجر به بروز اثرات حاد و مزمن در انسان می‌شود (۸).

افزایش سرعت شهرنشینی منجر به افزایش تنش بر رودخانه‌ها از جمله تأثیر بر کیفیت آب (۹)، فرآیندهای یوتروفیکاسیون و رشد بیش از حد گیاهان (۱۰)، سیل (۱۰) و آلودگی رسوبات به فلزات سنگین (۱۱) شده است. به‌طور کلی، نتایج بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که غلظت فلزات سنگین را می‌توان بر اساس ویژگی‌های کاربری زمین به شرح زیر رتبه‌بندی کرد: منطقه صنعتی < منطقه شهری < منطقه کشاورزی < مزارع طبیعی (۱۲).

فلزات سنگین حلالیت کمی در آب دارند و به‌راحتی جذب رسوبات می‌شوند. همچنین رسوبات ظرفیت بالایی برای حفظ آلاینده‌ها دارند؛ به‌طوری‌که تقریباً بیش از ۹۹٪ از آلاینده‌ها در طول چرخه هیدرولوژیکی در رسوبات یافت می‌شود، در حالی که کمتر از ۱٪ باقی‌مانده در آب حل می‌شود (۱۳). از این‌رو رسوبات،

مطالعه حاضر با هدف بررسی غلظت سرب و کادمیوم در رسوبات سطحی زاینده‌رود، مقایسه غلظت سرب و کادمیوم حاصل در رسوبات با استانداردهای جهانی و ارزیابی سطح آلودگی و خطر زیست‌محیطی فلزات سنگین با محاسبه شاخص‌های آلودگی مانند فاکتور تجمع زیستی، شاخص ژئوشیمیایی مولر (I_{geo})^۱، فاکتور آلودگی (CF)^۲، درجه آلودگی (Cd)^۳، درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)^۴، شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (RI)^۵ و شاخص بار آلودگی (PLI)^۶ انجام شد.

روش کار

منطقه مورد مطالعه

زاینده‌رود با طول نزدیک به ۴۵۰ کیلومتر (۲۸)، مهم‌ترین رودخانه نیمه‌خشک مرکزی ایران در حوضه زاینده‌رود (مساحت ۴۱۵۰۰ کیلومترمربع) است (۲۹). این رودخانه که از رشته‌کوه‌های زاگرس شروع شده و به تالاب بین‌المللی گاوخونی در حدود ۱۴۰ کیلومتری شرق شهر اصفهان ختم می‌شود (۳۰)، آب شیرین را برای مقاصد شهری، صنعتی و کشاورزی تأمین می‌کند (۳۱). این رودخانه در معرض تخلیه گسترده فاضلاب و پساب، از چندین منابع آلودگی نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای قرار دارد (۳۲).

رواناب‌های شهری و کشاورزی را می‌توان از علل آلودگی این رودخانه به فلزات سنگین دانست. با توجه به روند سریع رشد جمعیت و به تبع آن توسعه مراکز شهری و صنعتی در اطراف زاینده‌رود، بررسی وضعیت آلودگی این رودخانه بسیار مهم می‌باشد. تاکنون بررسی‌های مختلفی بر روی آلودگی رودخانه زاینده‌رود توسط فلزات سنگین صورت گرفته است. صنایع و همکاران در بررسی فلزات سنگین رودخانه زاینده‌رود به این نتیجه رسیدند که میزان کادمیوم از حد استانداردهای جهانی بالاتر است (۳). مطالعه قروه و همکاران نیز نشان داد که میزان کادمیوم در رسوبات زاینده‌رود نگران‌کننده است (۲۵). در مطالعه طباطبائی و ذهب صنیعی، غلظت فلزات سنگین روی، آهن، نیکل و مس در آب رودخانه زاینده‌رود اندازه‌گیری شد. نتایج آن‌ها نقاط بحرانی رودخانه را از نظر غلظت فلزات سنگین مشخص کرد (۲۶). نتایج مطالعه میرزایی و سوگلی که به بررسی غلظت فلزات سنگین (کادمیوم، مس، منگنز، نیکل، سرب و روی) در رسوبات رودخانه زاینده‌رود پرداختند، حاکی از میزان بالای غلظت کادمیوم به دلیل صنایع آبکاری و فعالیت‌های کشاورزی در ایستگاه‌های بالادست بود (۲۷).



شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه‌برداری از رسوبات در منطقه مورد مطالعه

⁴ Modified contamination degree

⁵ Potential ecological risk index

⁶ Pollution load index

¹ Geoaccumulation index

² Contamination factor

³ Contamination degree

روش نمونه برداری و آنالیز شیمیایی

از دریاچه سد زاینده رود تا تالاب بین المللی گاوخونی، ۶ ایستگاه نمونه برداری به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شد که ۳ ایستگاه باغ بهادران، پل زمان خان و سد زاینده رود در قسمت بالادست شهر اصفهان و ۳ ایستگاه شریف آباد، تصفیه خانه ورزنه و شاخ کنار در پایین دست اصفهان واقع شده اند. در هر ایستگاه با ۳ تکرار، نمونه برداری از رسوب انجام شد. نمونه برداری در ۴ فصل به صورت ۱ بار نمونه برداری در نیمه هر فصل در سال ۱۳۹۹ انجام گرفت؛ بدین ترتیب در هر فصل ۱۸ نمونه و در کل ۷۲ نمونه برداشت گردید. مشخصات منطقه و مختصات جغرافیایی هر ایستگاه توسط دستگاه GPS تعیین و ثبت گردید.

جهت تعیین فلزات، مقدار ۵ گرم از هر نمونه در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شد. سپس نمونه ها به داخل ارلن منتقل و ۲۰ میلی متر محلول اسید نیتریک مرک ۶۵٪ و ۵ میلی لیتر آب اکسیژنه به آن اضافه گردید. به منظور مخلوط شدن بهتر، نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت زیر هود قرار گرفت و محلول شفاف پس از سرد شدن، آماده فیلتر کردن شد. پس از خنک شدن ظرف، محلول آماده سازی شده در بالن ژوژه ۲۵ میلی لیتری با آب مقطر تقطیر شده و با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف شده و به حجم ۲۵ میلی لیتر رسانده شد (۳۳). غلظت سرب و کادمیوم موجود در هر نمونه با استفاده از دستگاه جذب اتمی شعله گرافیتی مدل Furnace AAS Model 670G اندازه گیری شد. علاوه بر این غلظت فلز سرب و کادمیوم در نمونه شاهد اندازه گیری و از مقادیر به دست آمده برای نمونه ها کسر گردید. ریکواری نتایج بین ۹۶-۱۰۰٪ به دست آمد؛ بدین ترتیب که سه نمونه آلوده شده^۱ در سه سطح آلودگی مختلف در ۳ روز متوالی مورد هضم قرار گرفته و درصد ریکواری محاسبه شد. سپس غلظت نهایی سرب و کادمیوم در هر نمونه از طریق معادله ۱ محاسبه گردید:

$$M = CV/W$$

C: غلظت به دست آمده از دستگاه

V: حجم نهایی نمونه (۲۵ میلی لیتر در این مطالعه)

¹ Spike

W: مقدار ماده خشک مصرف شده بر حسب گرم

M: غلظت نهایی نمونه بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم

شاخص های ارزیابی ریسک

در مطالعات زیست محیطی، زمانی که توزیع عناصر در محیط، حاصل ترکیبی از فعالیت انسانی و طبیعی باشند، روند تغییرات با استفاده از شاخص های آلودگی مورد مطالعه قرار می گیرد. به منظور تعیین میزان آلودگی رسوب به فلزات سنگین در یک منطقه، باید میزان غلظت عناصر در آن منطقه با یک استاندارد شناخته شده مقایسه شود (۳۴).

شاخص زمین انباشت مولر (I_{geo})

I_{geo} یک شاخص جهانی پذیرفته شده برای بررسی آلودگی فلزات در بخش های خاک و رسوب است (۲). شاخص زمین انباشتی که توسط مولر تعریف شده است (۳۴)، شاخصی است که می تواند درجه آلودگی خاک را تعیین کند و از معادله ۲ محاسبه می شود:

معادله ۲:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right]$$

این شاخص به منظور تعیین آلودگی رسوبات به فلزات سنگین و مقایسه غلظت فعلی با غلظت های قبل از صنعتی شدن مورد استفاده قرار می گیرد. این شاخص، آلودگی رسوبات به عناصر سنگین را در ۷ کلاس (غیر آلوده ($I_{geo} > 0$))، غیر آلوده تا آلودگی متوسط ($1 < I_{geo} \leq 0$))، آلودگی متوسط ($2 < I_{geo} \leq 1$))، آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد ($3 < I_{geo} \leq 2$))، آلودگی زیاد ($4 < I_{geo} \leq 3$))، آلودگی بسیار شدید ($5 < I_{geo} \leq 4$)) و آلودگی بسیار شدید ($I_{geo} \leq 5$) مورد ارزیابی قرار می دهد.

I_{geo}: شاخص تجمع ژئوشیمیایی یا شاخص شدت آلودگی

C_n: غلظت ماده آلاینده در رسوبات

B_n: غلظت اولیه ماده آلاینده در پوسته زمین (غلظت زمینه) که برای سرب ۱۴/۸ و برای کادمیوم ۰/۱ می باشد (۳۵).

ضریب ۱/۵ نیز به منظور تصحیح غلظت اولیه رسوبات به دلیل تأثیر عوامل زمینی اعمال شده است.

آلودگی بالا ($4 \leq mcd < 8$)، درجه آلودگی بسیار بالا ($8 \leq mcd < 16$)، درجه آلودگی به شدت بالا ($16 \leq mcd < 32$) و درجه آلودگی مافوق زیاد ($mcd \geq 32$) مورد ارزیابی قرار داد. معادله ۵:

$$mC_d = \frac{C_d}{n}$$

شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی (RI)

شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی در ابتدا توسط هاکنسون برای ارزیابی درجه آلودگی فلزات سنگین در خاک ابداع شد (۳۷). این شاخص، حساسیت جوامع مختلف بیولوژیکی خاک را نسبت به سمیت فلزات سنگین می‌سنجد (۳۸). شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی، همانند درجه آلودگی، برابر مجموع ضرایب ریسک است (معادله ۶):

$$RI = \sum_{i=1}^n E_R^i$$

در این رابطه، E_R^i شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی و n تعداد انواع فلز سنگین است. شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی از طریق معادله ۷ به دست می‌آید. معادله ۷:

$$E_R^i = T_R^i \times \frac{M_x^i}{M_b^i}$$

E_R^i شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی، M_x^i غلظت اندازه‌گیری شده هر فلز، M_b^i مقدار غلظت زمینه یا طبیعی هر فلز و T_R^i فاکتور پاسخ سمیت هر فلز (۵ برای سرب و ۳۰ برای کادمیوم) (۳۹) می‌باشد. شاخص خطر اکولوژیکی را می‌توان در ۴ طبقه ریسک اکولوژیکی کم ($RI < 150$)، ریسک اکولوژیکی متوسط ($150 \leq RI < 300$)، ریسک اکولوژیکی قابل توجه ($300 \leq RI < 600$) و ریسک اکولوژیکی بسیار زیاد ($RI \geq 600$) بررسی کرد.

شاخص بار آلودگی (PLI)

به منظور ارزیابی هم‌زمان وضعیت کلی آلودگی رسوب به تمامی عناصر آلاینده اندازه‌گیری شده، شاخص بار آلودگی فلزات سنگین محاسبه شد. این شاخص، نشان می‌دهد که یک نمونه تا چه میزانی از غلظت عناصر موجود در محیط طبیعی تجاوز کرده و شاخصی از میزان سمیت نمونه را ارائه می‌دهد (۴۰). معادله ۸ روش محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد:

شاخص فاکتور آلودگی (CF)

جهت تعیین آلودگی خاک به فلزات سنگین از شاخص فاکتور آلودگی استفاده گردید. بر اساس این فاکتور می‌توان مقدار فلزات سنگین را نسبت به مقدار طبیعی آن سنجید و میزان آلودگی خاک را تعیین کرد. فاکتور آلودگی طبق معادله ۳ برای سرب و کادمیوم محاسبه شد: معادله ۳:

$$CF_{metal} = C_{metal} / C_{background}$$

در این رابطه CF_{metal} ، نسبت غلظت هر فلز (C_{metal}) به مقدار غلظت زمینه آن ($C_{background}$) می‌باشد. غلظت ماده زمینه، میانگین جهانی غلظت عناصر موجود در پوسته زمین می‌باشد (۳۶). در این مطالعه جهت ارزیابی آلودگی فلزات سنگین از طبقه‌بندی هاکنسون استفاده شد که به صورت: آلودگی کم ($CF < 1$)، آلودگی متوسط ($1 \leq CF < 3$)، آلودگی زیاد ($3 \leq CF < 6$)، آلودگی بسیار زیاد ($CF \geq 6$) می‌باشد (۳۷).

شاخص درجه آلودگی (C_d)

مجموع فاکتورهای آلودگی آلاینده‌های مورد مطالعه، درجه کلی آلودگی رسوب را بیان می‌کند که به آن درجه آلودگی هاکنسون گفته می‌شود (۳۷). درجه آلودگی طبق معادله ۴ برای سرب و کادمیوم محاسبه شد: معادله ۴:

$$C_d = \sum_{i=1}^n CF_i$$

در این رابطه n تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه و CF فاکتور آلودگی هر فلز می‌باشد. این شاخص، آلودگی رسوبات به عناصر سنگین را در ۴ کلاس درجه آلودگی کم ($C_d < 6$)، درجه آلودگی متوسط ($6 \leq C_d < 12$) و درجه آلودگی قابل توجه ($12 \leq C_d < 6$) مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

شاخص اصلاح شده درجه آلودگی (mC_d)

به دلیل وجود محدودیت‌هایی که در شاخص درجه آلودگی ارائه شده بود، شاخص اصلاح شده درجه آلودگی توسط ابراهیم و پارکر مطرح گردید (۳۵). این شاخص از تقسیم شاخص درجه آلودگی به تعداد فلزات مورد اندازه‌گیری (n) به دست می‌آید. درجه‌بندی سطح آلودگی بر مبنای mC_d را می‌توان در ۷ کلاس (درجه آلودگی بسیار کم ($mcd < 1/5$)، درجه آلودگی کم ($1/5 \leq mcd < 2$)، درجه آلودگی متوسط ($2 \leq mcd < 4$)، درجه

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n}$$

که در آن، PLI شاخص بار آلودگی فلزات سنگین مورد مطالعه، CF فاکتور آلودگی هر یک از عناصر فلزی و n تعداد فلزات سنگین اندازه‌گیری شده می‌باشند. مقادیر PLI کمتر از ۱ نشان می‌دهد که غلظت عناصر نزدیک به سطح زمینه است و مقادیر بیشتر از ۱ بیان‌گر گسترش آلودگی می‌باشند. شاید مهم‌ترین شاخص‌های آلودگی مفید و جهانی، شاخص زمین‌انباشت مولر باشد، اما شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی، پیچیده‌ترین شاخص مورد استفاده در این زمینه است (۴۱). در نظر گرفتن چنین شاخص‌های متنوعی به ارزیابی بهتر شرایط رودخانه از نظر آلودگی فلزات سنگین کمک شایانی می‌کند.

آنالیزهای آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، ورژن ۲۴ انجام شد. برای آزمون نرمالیته داده‌ها از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و برای مقایسه با میانگین از آزمون تی تست استفاده گردید. همچنین جهت مقایسه غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب بین ایستگاه‌ها و فصول مورد مطالعه به ترتیب از آزمون آنووا و ولش استفاده شد.

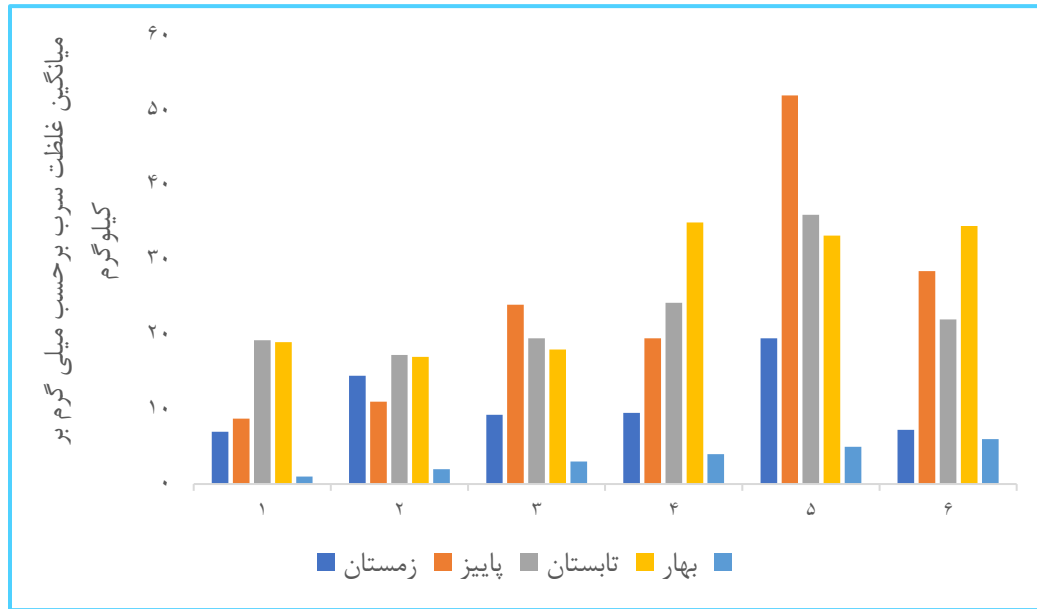
یافته‌ها

تعیین غلظت فلزات سنگین در رسوبات

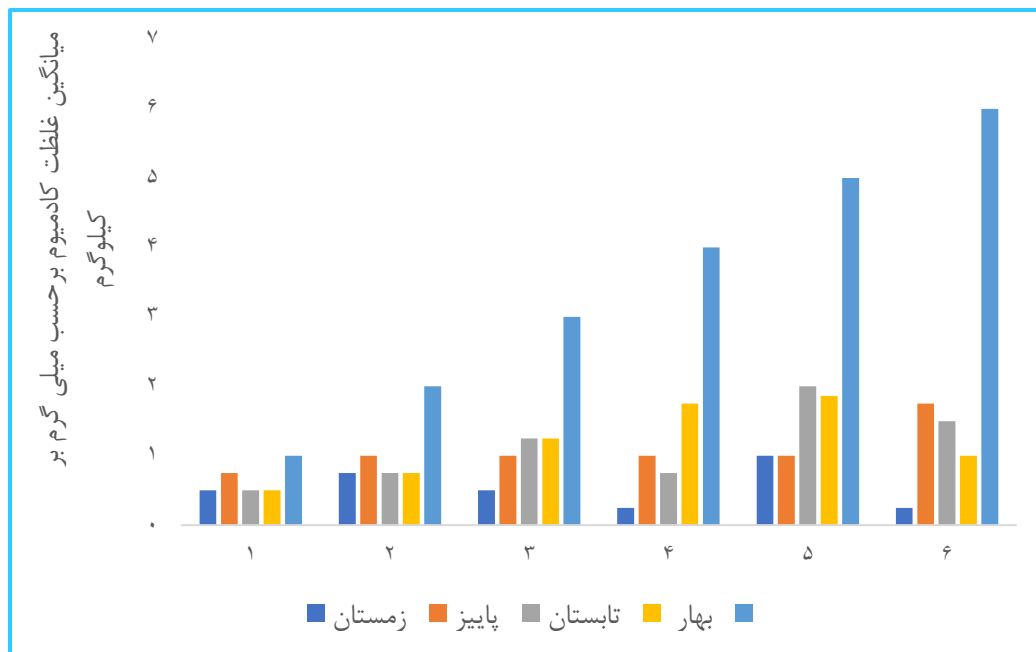
نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در رسوبات ایستگاه‌های مختلف و فصول مختلف در نمودارهای ۱ و ۲ ارائه شده است. میانگین غلظت کادمیوم در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱/۱۸، ۱/۱۳، ۱/۰۸ و ۰/۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و میانگین غلظت سرب در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۲۶/۱۳، ۲۳/۰۴، ۲۳/۹۶ و ۱۱/۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. بر اساس نتایج آزمون کولموگروف اسمیرنوف، داده‌های غلظت سرب و کادمیوم از توزیع نرمال برخوردار بودند ($p > 0.05$). بر همین اساس، برای مقایسه غلظت سرب و کادمیوم با میزان استاندارد کیفیت رسوب کانادا از آزمون تی تست استفاده شد. میانگین غلظت سرب در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۲۶/۱۳، ۲۳/۰۴، ۲۳/۹۶ و ۱۱/۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (نمودار ۱). میانگین غلظت سرب در منطقه مورد

مطالعه در چارفصل، ۲۱/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که بر اساس نتایج آزمون تی تست، به‌طور معنی‌داری از استاندارد کیفیت رسوب کانادا برای آب‌های شیرین (۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) کمتر بود ($p = 0.000$). میانگین غلظت کادمیوم در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱/۱۸، ۱/۱۳، ۱/۰۸ و ۰/۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که در مقایسه با میزان استاندارد کیفیت رسوب کانادا، سطح تقریباً بالایی از کادمیوم را در تمام فصول به‌جز زمستان نشان می‌داد (نمودار ۲). میانگین غلظت کادمیوم در منطقه مورد مطالعه در چهارفصل، ۰/۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که بر اساس نتایج آزمون تی تست، به‌طور معنی‌داری از میزان استاندارد کیفیت رسوب کانادا برای آب‌های شیرین (۰/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) بیشتر بود ($p = 0.001$).

بر اساس نتایج آزمون نرمالیته، داده‌های غلظت سرب و کادمیوم بین فصول و ایستگاه‌های مختلف، از توزیع نرمال برخوردار بودند، اما بر اساس نتایج آزمون لوین، داده‌های فصول مختلف دارای همگنی واریانس بودند، اما بین داده‌های ایستگاه‌های مختلف، همگنی واریانس تأیید نشد. در این شرایط باید برای مقایسه میانگین بین فصول از آنووا و برای مقایسه میانگین بین ایستگاه‌ها از آماره Welch استفاده کرد. بر اساس نتایج، اختلاف معناداری بین میانگین غلظت سرب و کادمیوم در بین ایستگاه‌های مختلف وجود نداشت. بر اساس نتایج آزمون آنووا، اختلاف معناداری بین میانگین غلظت سرب ($F_{value} = 0.070, p = 2/750$) و کادمیوم ($F_{value} = 0.080, p = 2/609$) در بین فصول مختلف وجود نداشت. همچنین بر اساس نتایج آماره Welch، اختلاف معناداری بین میانگین غلظت سرب ($p = 0.211$)، میانگین غلظت کادمیوم ($Statistic = 1/848, p = 3/075$) و کادمیوم ($Statistic = 0.077, p = 3/075$) در بین ایستگاه‌های مختلف وجود نداشت.



نمودار ۱. میانگین غلظت سرب برحسب میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک در چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان



نمودار ۲. میانگین غلظت کادمیوم برحسب میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک در چهار فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان

آلودگی متوسط بود. بر اساس نتایج فاکتور آلودگی، در فصل بهار، تابستان و پاییز، سرب در کلاس آلودگی متوسط و در فصل زمستان در کلاس آلودگی پایین قرار داشت، در حالی که کادمیوم تنها در فصل بهار دارای آلودگی کم بود و در فصل تابستان و پاییز دارای کلاس آلودگی زیاد و در زمستان دارای کلاس آلودگی متوسط بود. شاخص‌های درجه آلودگی و درجه آلودگی اصلاح شده، در بهار و زمستان، منطقه را در طبقه آلودگی پایین و در تابستان و پاییز در طبقه آلودگی متوسط قرار می‌دهند. در نهایت، شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی در فصل بهار، تابستان و پاییز، منطقه را در معرض خطر اکولوژیکی متوسط و در فصل زمستان، منطقه را در معرض خطر اکولوژیکی کم می‌داند. شاخص بار آلودگی در فصل تابستان، پاییز و زمستان نشان‌دهنده گسترش آلودگی در منطقه بود و در فصل بهار، میزان آلودگی کاهش یافته و منطقه را فاقد آلودگی ارزیابی می‌کند (جداول ۱ و ۲).

با توجه به نتایج آزمون همبستگی پیرسون، بین داده‌های سرب و کادمیوم در کل چهار فصل ($I=0/640, p=0/22$)، و همچنین بین ایستگاه‌ها ($I=0/486, p=0/019$) و فصول مختلف ($I=0/547, p=0/007$) همبستگی معنی‌دار در سطح ۹۹٪ وجود داشت که نشان‌دهنده برهمکنش این دو فلز در حضور یکدیگر است.

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین

به‌منظور درک بهتر وضعیت آلودگی رسوبات رودخانه زاینده‌رود، شاخص‌های ارزیابی ریسک برای فلزات سنگین سرب و کادمیوم مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص مولر برای فلز سرب در فصل بهار و تابستان در کلاس غیرآلوده تا آلودگی متوسط و در فصل پاییز و زمستان در کلاس غیرآلوده قرار گرفت، در صورتی که نتایج این شاخص برای فلز کادمیوم در تمام فصل‌ها بیانگر

جدول ۱. میانگین شاخص‌های محاسبه شده در هر ایستگاه در رسوب رودخانه زاینده‌رود در فصل بهار و تابستان

بهار										
ایستگاه	I _{geo}		CF				E _r			
	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	mCd	Cd	Pb	Cd
۱	۰/۱۴	-	۱/۳۶	۱/۳۶	۱/۴۵	۰/۷۳	۶/۷۹	۷۵	۸۱/۷۹	۰/۰۷
۲	-	۰/۳	۱/۲۱	۱/۲۱	۱/۳۰	۰/۶۵	۶/۰۷	۱۱۲/۵	۱۱۸/۵۷	۰/۰۵
۳	-	۰/۲۲	۱/۲۹	۱/۲۹	۱/۳۸	۰/۶۹	۶/۴۳	۱۸۷/۵	۱۹۳/۹۳	۰/۰۶
۴	۰/۷۴	۲/۵۴	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۶۸	۱/۳۴	۱۲/۵۰	۲۶۲/۵	۲۷۵	۰/۲۲
۵	۰/۶۶	۲/۶۳	۲/۳۸	۲/۳۸	۲/۵۴	۱/۲۷	۱۱/۸۸	۲۷۹	۲۹۰/۸۸	۰/۲۰
۶	۰/۷۲	۱/۷۴	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۶۴	۱/۳۲	۱۲/۳۲	۱۵۰	۱۶۲/۳۲	۰/۲۲
تابستان										
۱	-	۰/۱۳	۱/۳۸	۱/۳۸	۲/۵۰	۱/۹۴	۶/۸۸	۷۵	۸۱/۸۸	۱/۷۲
۲	-	۰/۲۸	۱/۲۳	۱/۲۳	۳/۷۵	۲/۴۹	۶/۱۶	۱۱۲/۵	۱۱۸/۶۶	۲/۳۱
۳	-	۰/۱۱	۱/۳۹	۱/۳۹	۶/۲۵	۳/۸۲	۶/۹۶	۱۸۷/۵	۱۹۴/۴۶	۴/۳۵
۴	۰/۲۱	۱/۳۲	۳/۷۵	۱/۷۳	۵/۴۸	۲/۷۴	۸/۶۶	۱۱۲/۵	۱۲۱/۱۶	۳/۲۵
۵	۰/۷۸	۲/۷۴	۱۰	۲/۵۷	۱۲/۵۷	۶/۲۹	۱۲/۸۶	۳۰۰	۳۱۲/۸۶	۱۲/۸۶
۶	-	۰/۰۷	۱/۵۷	۱/۵۷	۷/۵۰	۴/۵۴	۷/۸۶	۲۲۵	۲۳۲/۸۶	۵/۸۹

جدول ۲. میانگین شاخص‌های محاسبه شده در هر ایستگاه در رسوب رودخانه زاینده‌رود در فصل پاییز و زمستان

ایستگاه	پاییز									
	E _r					CF			I _{geo}	
	PLI	RI	Cd	Pb	mCd	Cd	Pb	Cd	Pb	
۱	۱/۱۷	۱۱۵/۶۳	۱۱۲/۵۰	۳/۱۳	۲/۱۹	۴/۳۸	۳/۷۵	۰/۶۳	۱/۳۲	-۱/۲۶
۲	۱/۹۶	۱۵۳/۹۳	۱۵۰	۳/۹۳	۲/۸۹	۵/۷۹	۵	۰/۷۹	۱/۷۴	-۰/۹۳
۳	۴/۲۹	۱۵۸/۵۷	۱۵۰	۸/۵۷	۳/۳۶	۶/۷۱	۵	۱/۷۱	۱/۷۴	۰/۱۹
۴	۳/۴۸	۱۵۶/۹۶	۱۵۰	۶/۹۶	۳/۲۰	۶/۳۹	۵	۱/۳۹	۱/۷۴	-۰/۱۱
۵	۹/۲۹	۱۶۸/۵۷	۱۵۰	۱۸/۵۷	۴/۳۶	۸/۷۱	۵	۳/۷۱	۱/۷۴	۱/۳۱
۶	۸/۹۱	۲۷۲/۶۸	۲۶۲/۵۰	۱۰/۱۸	۵/۳۹	۱۰/۷۹	۸/۷۵	۲/۰۴	۲/۵۴	۰/۴۴
زمستان										
۱	۰/۶۳	۷۷/۵۰	۷۵	۲/۵۰	۱/۵۰	۳	۲/۵۰	۰/۵۰	۰/۷۴	-۱/۵۸
۲	۱/۹۴	۱۱۷/۶۸	۱۱۲/۵۰	۵/۱۸	۲/۳۹	۴/۷۹	۳/۷۵	۱/۰۴	۱/۳۲	-۰/۵۳
۳	۰/۸۳	۷۸/۳۰	۷۵	۳/۳۰	۱/۵۸	۳/۱۶	۲/۵۰	۰/۶۶	۰/۷۴	-۱/۱۸
۴	۰/۴۲	۴۰/۸۹	۳۷/۵۰	۳/۳۹	۰/۹۶	۱/۹۳	۱/۲۵	۰/۶۸	-۰/۲۶	-۱/۱۴
۵	۳/۴۸	۱۵۶/۹۶	۱۵۰	۶/۹۶	۳/۲۰	۶/۳۹	۵	۱/۳۹	۱/۷۴	-۰/۱۱
۶	۰/۳۲	۴۰/۰۹	۳۷/۵۰	۲/۵۹	۰/۸۸	۱/۷۷	۱/۲۵	۰/۵۲	-۰/۲۶	-۱/۵۳

بحث

نتایج آن‌ها، میانگین غلظت آرسنیک، کروم، مس، نیکل و روی در رسوبات و آرسنیک در نمونه‌های آب بالاتر از مقدار پس‌زمینه و مقادیر استاندارد بود (۴۶). در مطالعه سلام و همکاران، آلودگی فلزات سنگین سرب، روی، کادمیوم، مس و آهن در رسوبات سطحی، در ۱۵ ایستگاه در رودخانه پراک مالزی بررسی شد. بر اساس فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشت، کادمیوم غالب‌ترین آلاینده در منطقه مورد مطالعه بود (۴۷). در مطالعه هی و همکاران، هیچ‌گونه آلودگی روی، مس، نیکل، سرب، کروم، جیوه و کادمیوم در نمونه‌های رسوب سطحی رودخانه یانگ تسه در چین وجود نداشت (۴۸). چتی و پیلائی، مقادیر آلودگی بسیار بالایی را برای سرب در هر دو رودخانه آفریقای جنوبی (Sezela و Palmiet) نشان دادند (۴۹). در مطالعه کسر و همکاران، میانگین غلظت کروم، مس، آهن، منگنز، نیکل، سرب و روی در رسوبات دریاچه کارا (ترکیه)، کمتر از مقادیر خطر آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده بود (۵۰). نتایج مقایسه مطالعه حاضر با سایر مطالعات مشابه در ایران و جهان در جدول ۳ آمده است.

با توجه به اهمیت آثار تخریبی فلزات سنگین در تهدید حیات زیستی موجودات ساکن محیط آبی، بررسی وضعیت کیفیت رسوبات، همواره دارای اهمیت زیست‌محیطی می‌باشد. آنالیز رسوبات، نقش مهمی در ارزیابی شرایط آلودگی اکوسیستم‌های آبی دارا می‌باشد (۲۷). در مقایسه میانگین غلظت فلزات در مطالعه حاضر، میزان سرب موجود در رسوبات از استاندارد کیفیت رسوب کانادا کمتر بود، در حالی که میزان کادمیوم بیش از استاندارد بود که با نتایج مطالعه صنایع و همکاران در آب رودخانه زاینده‌رود و همچنین پژوهش قروه و همکاران کاملاً مطابقت داشت (۳، ۲۵). در این مطالعه میانگین غلظت کادمیوم به مراتب بیشتر از یافته‌های مطالعات انجام شده در نقاط مختلف ایران مانند تالاب انزلی (۴۲)، دریاچه مهارلو (۴۳)، زرشوران (۴۴) و تالاب آلاگل (۴۵) بود. شاکری و همکاران، خطر اکولوژیکی و سلامتی آرسنیک، کروم، مس، نیکل، سرب و روی را در ۲۲ رسوب سطحی، ۳ نمونه آب و ۸ نمونه ماهی (بافت ماهیچه و کبد) رودخانه خیاو (ایران) بررسی کردند. بر اساس

جدول ۳. مقایسه نتایج با سایر مطالعات مشابه

منبع	کادمیوم	سرب	موقعیت
(۵۱)	۳/۴	۲۰/۵	مخازن کوچک در جنوب لهستان
(۴۲)	۰/۲۳	۲۳/۳۶	تالاب انزلی شمال ایران
(۴۶)	-	۱۳/۳۵	رودخانه خیاو، استان اردبیل
(۴۳)	۰/۲۹	۷/۴۲	دریاچه شور مهارلو
(۵۲)	۰/۴۸	۲۶/۹	تالاب‌های پو دلنا، ایتالیا
(۵۳)	۶/۷۵	۸۵/۴	رودخانه تایهو، چین
(۵۴)	۳/۸	۱۱/۱	سواحل تامیل نادو، هند
(۵۰)	-	۱۵/۷۵	دریاچه کارا، ترکیه
(۵۵)	۳/۰۱	۶۴/۴۸	جزیره کیش، خلیج فارس
(۵۶)	۱/۲۵	۲۶/۳۴	تالاب گندمان
(۵۷)	-	۴/۹۷	رودخانه قره آقاج، شیراز
(۴۵)	۰/۰۲	۲/۱	تالاب آلاگل، مازندران
	۰/۹۸	۲۱/۰۷	رودخانه زاینده‌رود
(۵۸)	۰/۶	۳۵	استاندارد کیفیت رسوب کانادا

است. از آن جایی که در اطراف ایستگاه ورزنه، کاربری کشاورزی به نسبت بالاست؛ مصرف آفت‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها باعث بالا رفتن میزان سرب در منطقه خواهند شد. علاوه بر این، قرار گرفتن تصفیه‌خانه فاضلاب در مجاورت این ایستگاه مزید بر علت خواهد شد.

طبق بررسی‌های میدانی به‌عمل آمده، رودخانه توسط اراضی گسترده کشاورزی احاطه شده است. وجود زمین‌های کشاورزی در مسیر این رودخانه باعث شده که مقادیر قابل ملاحظه‌ای زهاب کشاورزی وارد رودخانه شود. از این‌رو به‌نظر می‌رسد مصرف آفت‌کش‌ها و کودهای کشاورزی، اصلی‌ترین عامل آلودگی رودخانه زاینده‌رود به فلزات سنگین به‌خصوص کادمیوم باشد. کودهای فسفوره در ایران بیشتر به‌صورت فسفات آمونیوم استفاده می‌شوند که دارای فلزات سنگین از جمله کادمیوم هستند. با مصرف این نوع کودها، کادمیوم در خاک انباشته شده، به وسیله گیاه جذب و وارد زنجیره غذایی انسان می‌گردد (۵۶). از دیگر عوامل آلودگی رسوبات رودخانه به کادمیوم، استفاده از کودهای دامی در زمین‌های کشاورزی می‌باشد. مطالعات نشان داده است که استفاده طولانی‌مدت از کودهای مخلوط (۳۰٪ کودهای دامی و ۷۰٪ کودهای فسفاته) و یا استفاده کامل از کودهای دامی بدون

بر اساس شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی، بیش‌ترین میزان خطر متعلق به ایستگاه ۵ در فصل تابستان و کمترین میزان خطر متعلق به فصل زمستان بود. یکی از عوامل مؤثر بر غلظت فلزات سنگین در بستر، مواد آلی و معلق موجود در آب است. در فصل زمستان بر اثر وزش بادهای بارش و جریانات آبی، تلاطم آب‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش تلاطم آبی و افزایش بار مواد معلق رسوبی، جذب فلزات از آب توسط ذرات معلق افزایش می‌یابد. در تابستان که منطقه با کاهش رواناب‌های ورودی و جریانات آبی مواجه می‌گردد، مواد آلی و معلق حاوی فلزات در بستر رودخانه ته‌نشست می‌یابد و غلظت فلزات سنگین تجمع‌یافته در مواد معلق و مواد آلی رسوب بستر به حداکثر خود رسیده و نسبت به فصل زمستان افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد (۲۷). علاوه بر این، در اثر تبخیر آب‌های سطحی، فلزات محلول ممکن است به داخل رسوبات نفوذ کرده و غلظت آن‌ها افزایش یابد.

در مطالعه حاضر، میزان سرب در همه ایستگاه‌ها و فصول، کمتر از حد استاندارد بود، اما به‌طور کلی، غلظت آن در ایستگاه ۵ در فصل تابستان بیشتر بود. ایستگاه ۵ متعلق به ورزنه می‌باشد که میزان جریان آب حتی در دوران‌های ترسالی در این منطقه کمتر است؛ از این‌رو غلظت فلزات سنگین در این ایستگاه افزایش یافته

قابل توجهی خطر آلودگی زنجیره غذایی به فلزات سنگین را افزایش می‌داد. خشک شدن تدریجی تالاب گاوخونی به‌عنوان مخزن نهایی آلاینده‌ها در منطقه، نشان‌دهنده ایجاد قریب‌الوقوع گردوغبار جوی خطرناک آلوده به فلزات سنگین است. پیش‌بینی می‌شود که با خشک شدن کامل و تبدیل تالاب گاوخونی به منبع گردوغبار، غلظت فلزات سنگین در گردوغبار ۲-۳ برابر سطوح فعلی افزایش می‌یابد. این یافته‌ها زنگ خطری را در مورد وضعیت زاینده‌رود به‌عنوان تنها رودخانه دائمی در فلات مرکزی ایران که آب شیرین سه استان مرکزی خشک ایران را تأمین می‌کند، به صدا در می‌آورد.

نتیجه‌گیری

غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در این مطالعه به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر مطالعات انجام شده در اکوسیستم‌های آبی ایران و سایر نقاط جهان بود. میانگین غلظت سرب در رسوبات کمتر از حد استاندارد رسوب کانادا و میانگین غلظت کادمیوم در رسوبات به‌طور معنی‌داری بالاتر از استاندارد کیفیت رسوب کانادا بود. یافته‌های این پژوهش، وضعیت بحرانی رودخانه را به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب شیرین در فلات مرکزی ایران نشان می‌دهد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از رساله مقطع دکتری با کد ۱۶۲۲۶۷۹۸۶ می‌باشد که با حمایت گروه علوم و مهندسی محیط زیست دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) صورت گرفت. بدین‌وسیله از تمام افرادی که ما را در انجام این پژوهش یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

کودهای معدنی، خطر آلودگی به کادمیوم را تا ۵۵٪ افزایش می‌دهد (۵۹).

کادمیوم نه تنها هیچ نقشی در حیات موجودات زنده ندارد، بلکه غلظت‌های سمی آن می‌تواند باعث نقص جنین، ایجاد جهش و سرطان‌زایی در اندام‌های زیستی پرندگان شود (۶۰). آلودگی رسوبات به کادمیوم، سبب تسهیل ورود آن توسط زنجیره غذایی به بدن پرندگان و انباشته شدن در اعضای بدن آن‌ها می‌شود که در نهایت از طریق مادر به تخم انتقال پیدا می‌کند. از دیگر تأثیرات منفی کادمیوم موجود در رسوبات، می‌توان به تأثیر بر فراوانی و تراکم جاندارانی که رسوب را به‌عنوان بهترین زیستگاه خود انتخاب کرده‌اند (۱۵) و نیز تأثیر بر ویژگی‌های ریختی و فیزیولوژی رشد (۲۱) جانداران اشاره کرد.

بر اساس جلالیان و همکاران، گردوغبار اتمسفر ناشی از این منطقه دارای سطح کادمیوم بالایی است که غلظت بالای کادمیوم در خاک و رسوبات تالاب را تأیید می‌کند (۶۱). در گذشته، تمام مواد شیمیایی و معدنی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی، خانگی و صنعتی و رسوبات ناشی از فرسایش خاک سطحی از طریق جریان‌های سطحی و زیرزمینی به کانال رودخانه منتقل می‌شدند و رسوبات رودخانه را به ذخیره‌گاه اصلی مواد آلی و فلزات سنگین تبدیل کرده‌اند.

ایستگاه ۱ دریاچه سد زاینده‌رود است که پیش‌بینی می‌شود به‌دلیل جلوگیری از تخلیه پساب و فاضلاب، نسبت به سایر ایستگاه‌ها بار آلودگی کمتری داشته باشد. میانگین غلظت سرب در این ایستگاه کمتر از مقدار استاندارد زمینه بود، اما میانگین غلظت کادمیوم کمی فراتر از حد استاندارد بود و باید مطالعات دقیق‌تری برای بررسی منابع کادمیوم انجام شود. خطر اکولوژیکی بالقوه (RI) این منطقه را در درجه خطر اکولوژیکی پایین قرار می‌دهد.

افزایش قابل‌توجهی در سطح آلاینده‌های رودخانه و خطر اکولوژیکی در پایین‌دست شهر اصفهان مشاهده شد که در آن هرگونه برداشت آب برای اهداف کشاورزی و دامداری به‌طور

References

1. Lee M-H, Cho K, Shah AP, Biswas P. Nanostructured sorbents for capture of Cadmium species in combustion environments. *Environmental science & technology*. 2005;39(21):8481-9.
2. Islam MS, Ahmed MK, Raknuzzaman M, Habibullah-Al-Mamun M, Islam MK. Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological indicators*. 2015;48:282-91.
3. Sanayei Y, Ismail N, Talebi S. Determination of heavy metals in Zayandeh rood river, isfahan-Iran. *World Applied Sciences Journal*. 2009;6(9):1209-14.
4. Haghazadeh H, Johannesson KH, González-Pinzón R, Pourakbar M, Aghayani E, Rajabi A, et al. Groundwater geochemistry, quality, and pollution of the largest lake basin in the middle east: Comparison of pmf and PCA-mlr receptor models and application of the source-oriented hhra approach. *Chemosphere*. 2022;288:132489.
5. Jiang Y, Gui H, Chen C, Wang C, Zhang Y, Huang Y, et al. The characteristics and source analysis of heavy metals in the sediment of water area of urban scenic: A case study of the Delta park in Suzhou city, Anhui province, China. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2021;30(3).
6. Liber Y, Mourier B, Marchand P, Bichon E, Perrodin Y, Bedell J-P. Past and recent state of sediment contamination by persistent organic pollutants (POPs) in the Rhône river: Overview of ecotoxicological implications. *Science of the Total Environment*. 2019;646:1037-46.
7. Yi Y-J, Sun J, Tang C-H, Zhang S-H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment in the upper reach of the Yangtze river. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23(11):11002-13.
8. Dadkhah P, Chamani A, Mortazavi S. The risk assessment of lead, cadmium and zinc in the two edible fish species (*Carcharhinus limbatus*) and (*Epinephelus coioides*) of Persian Gulf in 2016. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. 2018;4(2):85-93. (Persian)
9. Kuriata-Potasznik A, Szymczyk S, Skwierawski A. Influence of cascading river-lake systems on the dynamics of nutrient circulation in catchment areas. *Water*. 2020;12(4):1144.
10. Jaskuła J, Sojka M. Assessing spectral indices for detecting vegetative overgrowth of reservoirs. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019; 28(6).
11. Jaskuła J, Sojka M. Assessment of spatial distribution of sediment contamination with heavy metals in the two biggest rivers in Poland. *Catena*. 2022;211:105959.
12. Arfaeinia H, Dobaradaran S, Moradi M, Pasalari H, Mehrizi EA, Taghizadeh F, et al. The effect of land use configurations on concentration, spatial distribution, and ecological risk of heavy metals in coastal sediments of northern part along the Persian Gulf. *Science of the Total Environment*. 2019;653:783-91.
13. Salomons W, Stigliani WM. Biogeochemistry of pollutants in soils and sediments: Risk assessment of delayed and non-linear responses: Springer Science & Business Media; 2012.
14. Smedley PL, Kinniburgh DG. A review of the source, behaviour and distribution of Arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*. 2002;17(5):517-68.
15. Nafchi MA, Chamani A. Physicochemical factors and heavy metal pollution, affecting the population abundance of *Coenobita scaevola*. *Marine Pollution Bulletin*. 2019;149:110494.
16. Romero F, Armienta M, Carrillo-Chavez A. Arsenic sorption by carbonate-rich aquifer material, a control on arsenic mobility at Zimapán, Mexico. *Archives of environmental contamination and toxicology*. 2004;47(1):1-13.
17. Ojo OM. Heavy metal concentration in selected river tributaries in an urban settlement

- in akure, nigeria. British Journal of Environmental Sciences. 2022;10(1):25-31.
18. Xue S, Shi L, Wu C, Wu H, Qin Y, Pan W, et al. Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human hepg2 and keratinocyte cell-lines. Environmental research. 2017;156:23-30.
 19. Has-Schön E, Bogut I, Vuković R, Galović D, Bogut A, Horvatić J. Distribution and age-related bioaccumulation of Lead (Pb), Mercury (Hg), Cadmium (Cd), and Arsenic (As) in tissues of common Carp (*Cyprinus carpio*) and european catfish (*Sylurus glanis*) from the buško blato reservoir (bosnia and herzegovina). Chemosphere. 2015;135:289-96.
 20. Renieri EA, Safenkova IV, Alegakis AK, Slutskaia ES, Kokaraki V, Kentouri M, et al. Cadmium, lead and mercury in muscle tissue of Gilthead seabream and seabass: Risk evaluation for consumers. Food and chemical toxicology. 2019;124:439-49.
 21. Nourouzi MM, Chamani A, Shirani M, Malekpouri P, Chuah AL. Effect of Cd and Pb pollutions on physiological growth: Wavelet neural network (WNN) as a new approach on age determination of *Coenobita scaevola*. Bulletin of environmental contamination and toxicology. 2018;101(3):320-5.
 22. Nezat CA, Hatch SA, Uecker T. Heavy metal content in urban residential and park soils: A case study in Spokane, Washington, USA. Applied Geochemistry. 2017;78:186-93.
 23. Eftekhari MH, Mazloomi SM, Akbarzadeh M, Ranjbar M. Content of toxic and essential metals in recrystallized and washed table salt in Shiraz, Iran. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2014;12(1):1-5.
 24. Prasad S, Saluja R, Joshi V, Garg J. Heavy metal pollution in surface water of the upper ganga river, india: Human health risk assessment. Environmental Monitoring and Assessment. 2020;192(11):1-15.
 25. Ghorveh A, Solhi M, Mohammadi HG, Vazan S. Investigation the concentration of heavy metals in the sediment of zayandehrood river bed. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research. 2015;3(1):75-81.
 26. Tabatabai J, ZahabSaniee A, editors. Evaluation of heavy metals concentration and alteration of them in zayandehroud river. International Seminar on clean water; 2010.
 27. Mirzaei M, Solgi E. Evaluation of heavy metals concentration (cadmium, copper, manganese, nickel, lead and zinc) in sediments of zayandehrood river. Journal of Research in Environmental Health. 2016;1(4):251-65. (persian)
 28. Nabinejad A. Aquatic birds' serology in zayndeh rood river for ndv and aiv. Iranian Journal of Allergy, Asthma & Immunology. 2018;17. (Persian)
 29. Babaei H, Araghinejad S, Hoorfar A. Developing a new method for spatial assessment of drought vulnerability (case study: Zayandeh-rood river basin in Iran). Water and Environment Journal. 2013;27(1):50-7.
 30. Mollazadeh N, Moattar F, Karbassi A, Khorasani N. Distribution of metals, chemical partitioning, pollution and origins in riverbed sediment. World Applied Sciences Journal. 2013;21(5):674-80.
 31. Hajian NM, Rahsepar AR. Investigation of effect of city of isfahan and effluent from Isfahan wastewater treatment plant on some of Zayandeh rood river water quality parameters. 2011;6(5):828-821. (Persian).
 32. Behmanesh M, Chamani A, Chavoshi E. Occurrence, abundance and characteristics of microplastics in the sediments of the Zayandeh-Rud river. Environment and Interdisciplinary Development. 2022;7(76):65-79. (Persian)
 33. Association APH. Standard methods for the examination of water and wastewater: American Public Health Association.; 1926.
 34. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the rhine river. Geojournal. 1969;2:108-18.

35. Abraham G, Parker R. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, Newzealand. Environmental monitoring and assessment. 2008;136(1-3):227-38.
36. Azimzadeh B, Khademi H. Estimation of background concentration of selected heavy metals for pollution assessment of surface soils of Mazandaran province, Iran. 2013.
37. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. Water research. 1980;14(8):975-1001.
38. Barkett MO, Akün E. Heavy metal contents of contaminated soils and ecological risk assessment in abandoned copper mine harbor in Yedidalga, Northern Cyprus. Environmental Earth Sciences. 2018;77(10):1-14.
39. Jafarabadi AR, Bakhtiyari AR, Toosi AS, Jadot C. Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments and coastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian Gulf, Iran. Chemosphere. 2017;185:1090-111.
40. Dankoub Z, Ayoubi S, Khademi H, Sheng-Gao L. Spatial distribution of magnetic properties and selected heavy metals in calcareous soils as affected by land use in the Isfahan region, central Iran. Pedosphere. 2012;22(1):33-47.
41. Kowalska JB, Mazurek R, Gąsiorek M, Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—a review. Environmental geochemistry and health. 2018;40(6):2395-420.
42. Shariati S, Pourbabaee A, Alikhani H, Rezaei K. Investigation of heavy metal contamination in the surface sediments of Anzali wetland in North of Iran. Pollution. 2019;5(1):211-24.
43. Moore F, Amini Birami F, Keshavarzi B, Kamali M. Potentially toxic elements contamination in sediment, surface and pore water of maharlu saline lake, South-West Iran. Geopersia. 2019;9(1):111-124.
44. Mousavi S, Mokhtari MA, Khosravi Y, Rafiee A, Hoseinzade R. Investigation of environmental pollution in stream sediments for heavy metals at Zarshuran-aghdarreh area (north of Takab, Iran). Journal of Water and Soil Science. 2018;22(2).
45. Yousefi Z, Zafarzadeh A, Mohammadpour Tahamtan R, Shokrzadeh M, Fouladian A, Khair Abadi V. Contamination assessment and zoning of heavy metals in water and sediment of Alagol wetland, iran 2017. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 2019;29(177):180-94. (Persian)
46. Shakeri A, Fard MS, Mehrabi B, Mehr MR. Occurrence, origin and health risk of arsenic and potentially toxic elements (PTEs) in sediments and fish tissues from the geothermal area of the Khiav river, Ardebil province (NW Iran). Journal of Geochemical Exploration. 2020;208:106347.
47. Salam MA, Paul SC, Shaari FI, Rak AE, Ahmad RB, Kadir WR. Geostatistical distribution and contamination status of heavy metals in the sediment of perak river, Malaysia. Hydrology. 2019;6(2):30.
48. He Z, Li F, Dominech S, Wen X, Yang S. Heavy metals of surface sediments in the changjiang (yangtze river) estuary: Distribution, speciation and environmental risks. Journal of Geochemical Exploration. 2019;198:18-28.
49. Chetty S, Pillay L. Assessing the influence of human activities on river health: A case for two south african rivers with differing pollutant sources. Environmental monitoring and assessment. 2019;191(3):1-11.
50. Keser G, Topak Y, Sevgiler Y. Concentrations of some heavy metal and macroelements in sediment, water, macrophyte species, and leech (*Hirudo sulukii* n. Sp.) from the Kara lake, Adiyaman, Turkey. Environmental monitoring and assessment. 2020;192(2):1-12.
51. Michalec B, Cupak A. Assessment of quality of water and sediments in small reservoirs in southern poland-a case study. Environmental Engineering Research. 2022;27(2).
52. Zonta R, Cassin D, Pini R, Dominik J. Assessment of heavy metal and as contamination in the surface sediments of po

- delta lagoons (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2019;225:106235.
53. Bo L, Wang D, Li T, Li Y, Zhang G, Wang C, et al. Accumulation and risk assessment of heavy metals in water, sediments, and aquatic organisms in rural rivers in the Taihu lake region, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015; 22(9): 6721-6731.
54. Ravisankar R, Harikrishnan N, Chandrasekaran A, Gandhi MS, Alagarsamy R. Data on heavy metal and magnetic relationships in coastal sediments from south east coast of Tamilnadu, India. *Data in brief*. 2018;16:392-400.
55. Aghabozorgi M, Chamani A. The concentration of lead and cadmium in the Hermit crab (*Coenobita scaevola*) and sediments of kish island. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2020;22(5):15-25. (Persian)
56. Cheraghali K, Chamani A. The concentration of Lead, Cadmium, Zinc and Copper in sediments of Ganduman wetland with geochemical indices. *Journal of Wetland Ecobiology*. 2020;12(4):57-70. (Persian).
57. Shahradian H, Chamani A, Zamanpoore M, Jalalizand A. Heavy metal pollution in surface sediments of Ghareh-Aghaj river, one of the longest perennial rivers in Iran. *Environmental Earth Sciences*. 2021;80(3):91.
58. Environment CCoMot. Canadian environmental quality guidelines: Canadian Council of Ministers of the Environment; 2002.
59. Zhuang Z, Mu H-y, Fu P-n, Wan Y-n, Yu Y, Wang Q, et al. Accumulation of potentially toxic elements in agricultural soil and scenario analysis of Cadmium inputs by fertilization: A case study in Quzhou county. *Journal of Environmental Management*. 2020;269:110797.
60. Burger J, Gochfeld M. Heavy metal and selenium concentrations in black skimmers (*Rynchops niger*): Gender differences. *Archives of environmental contamination and toxicology*. 1992;23(4):431-4.
61. Jalalian A. Environmental impact of drying on Gavkhuni International Wetland. Research Project for Department of Environmental Protection, Isfahan Province. 2018. (Persian).