

Assessment of Heavy Metal Pollution and Ecological Risks in Saline Sediments of the Tashk-Jahanabad Lake Basin

Farid Foroughi¹  Abbas Sedghamiz² 

Received: 13-07-2025, Revised: 11-12-2025, Accepted: 18-12-2025, Published: 21-12-2025

<https://doi.org/10.22034.19.71.1>

Extended Abstract

Introduction

The increasing population growth and demand for agricultural products have led to the intensive exploitation of water and soil resources, as well as the widespread use of chemical pesticides and fertilizers. To increasing production, this trend has led to numerous environmental consequences, including the pollution of water and soil resources, particularly through the entry of heavy metals into ecosystems. Heavy metals pose a serious threat to human health, wildlife, and aquatic ecosystems. The origin of these metals can be natural or anthropogenic due to an increase in industrial activities and urbanization, the contribution of human resources to heavy metal pollution has increased significantly. Lake Tashk, as an ecologically valuable habitat, is under threat of pollution. The entry of contaminated wastewater into this lake, especially in the arid and semi-arid climatic conditions of the region, can lead to the gradual accumulation of heavy metals in the water, sediments, and salt of the lake. In addition, due to the consideration that the water of Tashk-Jahanabad Lake contains a high percentage of fine suspended particles and organic matter, the resulting residual salt layer upon complete evaporation of the water consists of a mixture of salt crystals, fine soil particles, and minor amounts of organic materials. The present research was conducted to evaluate the heavy metal concentration in the salt sediments along the shores of Lake Tashk. The study aims to help establish the current environmental condition and suggest management measures to minimize ecological risks.

Materials and methods

In this study, the aim was to investigate the level of heavy metal contamination in the salt sediments of the region. To monitor environmental pollution, surface salt sediment samples were collected from five stations located along the northern edge of Lake Tashk during the dry season in summer 2021. To account for spatial differences and improve accuracy, a composite sampling method was used. Three individual surface sediment samples, taken from a depth of 0–10 cm, were collected from each station within a 5-meter radius and carefully mixed to create one composite sample. The samples were cleaned of visible impurities, dried at 50 °C, gently ground, and passed through a 2 mm sieve. The resulting homogenized fraction was used as the analytical

1. Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Fars, Iran, Corresponding author: E-mail: foroughifarid@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Fars, Iran, E-mail: sedghamiz@shirazu.ac.ir

sample. Finally, the samples were prepared for heavy metal analysis through acid digestion, following the standard procedure of USEPA Method 3050B from 1996. Afterward, the samples were prepared for analysis. The concentration of heavy elements was measured using an atomic absorption spectrometer and lamps specific to each element. To analyze the contamination, several geochemical indices were used, including the geo-accumulation index (I_{geo}) to determine the level of sediment contamination relative to the background value, the contamination factor (CF) to measure the intensity of contamination of each element, and the total contamination degree (C_{deg}) to comprehensively analyze the pollution load in each sample. Additionally, the assessment of potential environmental risks was conducted using the Ecological Risk Index (RI) and the Ecological Risk Factor (Er).

Results and discussions

The concentration of heavy metals was determined in the samples, and various pollution indices were used to evaluate the environmental status of the region. The results showed that the average concentration of nickel (Ni), lead (Pb), iron (Fe), zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cd), and manganese (Mn) was equal to 17.89, 12.86, 9.24, 2.00, 1.59, 1.51 and 1.31 mg/kg, respectively. A comparison of these values with shale reference values indicated that the cadmium concentration was higher than the standard. The contamination coefficient indicators indicated that the Cd element had high contamination, while other elements had low contamination levels. In addition, the accumulation index for Cd showed contamination within the “unpolluted to moderately polluted” range, while the other elements were in the unpolluted range. The contamination degree of the average samples corresponded to moderate pollution. Also, the potential ecological risk factor values for the mean samples indicated that Cd was classified into the considerable risk class, whereas the other elements were classified as low-risk. The overall potential ecological risk index was also evaluated within the range of average pollution, indicating a significant level of ecological concern in the saline sediments surrounding the lake. Overall, it can be concluded that the Cd element is the most significant heavy metal pollutant in the area, while other elements are at lower levels.

Conclusion

The findings of this study showed that while most heavy metals in the saline sediments of Lake Tashk are present at low contamination levels, the elevated concentration of cadmium (Cd) increased the potential ecological risk to a moderate level. This underscores the need for continuous monitoring and effective management strategies to prevent further Cd accumulation and its potential adverse ecological impacts on the lake ecosystem. The results suggest that anthropogenic activities, particularly agricultural practices and runoff-associated pollutants, likely contribute to Cd enrichment within the geochemical processes governing saline sediment. Therefore, continuous monitoring, identifying pollution pathways, assessment of spatial and seasonal variations, evaluation of food-chain transfer potential, and developing nature-based remediation strategies for heavy metal attenuation, such as microbial bioremediation, is essential. Considering the climatic and geochemical similarities of Tashk, Bakhtegan, and Maharloo lakes, these findings provide a comparative basis for environmental risk management in comparable salt lake ecosystems. Overall, this study provides a valuable scientific foundation for future research and supports sustainable protection of the ecosystem and human health in the region.

Keywords: *Ecological Risk Assessment, Wetlands, Watershed, Pollution Indices, Potentially Toxic Elements (PTEs)*

Article Type: Research Article

Acknowledgments

We acknowledge the support of Grant number 98GRS1M1883, funded by the Research Council of Shiraz University, Shiraz, Iran.

Conflicts of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest related to the authorship, research, or publication of this article.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Authors' contribution

Farid Foroughi: Conceptualization, performing software analysis, controlling and writing, editing, and revising the manuscript. Abbas Sedghamiz: Guidance in reviewing and editing the article.

Citation: Foroughi F, Sedghamiz A, Assessment of Heavy Metal Pollution and Ecological Risks in Saline Sediments of the Tashk-Jahanabad Lake Basin. jwmseir 2025; 19(71): 18-34

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 69, PP No 71, PP 18

Publisher: Watershed Management Society of Iran

© Author(s)



ارزیابی آلودگی فلزات سنگین و خطرات زیستی رسوبات نمکی در حوضه دریاچه طشک-جهان آباد

فرید فروغی^۱ و عباس صدق آمیز^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲، تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

<https://doi.org/10.22034.19.71.1>

چکیده

فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی انسان همواره از مهم‌ترین عوامل آلوده‌سازی محیط‌زیست و برهم زدن تعادل بوم‌سازگان‌های آبی-خشکی به شمار می‌روند. در این میان، دریاچه‌ها و تالاب‌ها به‌عنوان زیست‌بوم‌هایی حساس، نقشی کلیدی در تأمین آب و پشتیبانی از بقای گونه‌های گیاهی و جانوری ایفا می‌کنند. پژوهش حاضر باهدف بررسی میزان فلزات سنگین در رسوبات نمکی دریاچه طشک و تحلیل شاخص‌های آلودگی و ریسک محیط‌زیستی آن در تابستان ۱۴۰۰ انجام گرفت. بدین منظور پنج ایستگاه نمونه‌برداری در اطراف دریاچه انتخاب شد و نمونه‌گیری از رسوبات نمکی در حاشیه‌ی شمالی دریاچه انجام گرفت. غلظت فلزات سنگین در نمونه‌ها مطابق روش استاندارد تعیین شد و شاخص‌های مختلف آلودگی برای ارزیابی وضعیت محیط‌زیستی منطقه به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که میانگین غلظت عناصر Cd , Cu , Zn , Fe , Pb , Ni و Mn به ترتیب برابر $۱۷/۸۹$ ، $۱۲/۸۶$ ، $۹/۲۴$ ، $۲/۰۰$ ، $۱/۵۹$ و $۱/۳۱$ میلی گرم بر کیلوگرم بوده است. مقایسه این مقادیر با مقادیر مرجع شیل حاکی از آن بود که غلظت کادمیوم بالاتر از حد استاندارد است. شاخص‌های ضریب آلودگی بیانگر آن بود که عنصر Cd دارای سطح آلودگی زیاد و سایر عناصر دارای سطح آلودگی کم هستند. علاوه بر این، شاخص زمین انباشتگی برای Cd ، آلودگی در محدوده «غیر آلوده تا آلودگی متوسط» و برای سایر عناصر در محدوده غیر آلوده را نشان داد. شاخص درجه آلودگی میانگین نمونه‌ها در کلاس آلودگی متوسط قرار گرفت. همچنین مقادیر عامل خطر بالقوه زیستی برای میانگین نمونه‌ها نشان داد که عنصر Cd در کلاس خطر قابل ملاحظه و سایر عناصر در کلاس خطر پایین طبقه‌بندی می‌شوند. شاخص خطر بالقوه زیستی کلی نیز در محدوده آلودگی متوسط ارزیابی شد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که از میان عناصر مورد بررسی، عنصر Cd مهم‌ترین آلاینده فلز سنگین در این منطقه محسوب می‌شود و سایر عناصر از نظر آلودگی در سطح پایینی قرار دارند.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی خطر زیستی، تالاب‌ها، حوضه آبریز، شاخص‌های آلودگی، عناصر بالقوه سمی.

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: فروغی فرید، صدق آمیز عباس. ارزیابی آلودگی فلزات سنگین و خطرات زیستی رسوبات نمکی در حوضه دریاچه طشک-جهان آباد. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۴۰۴؛ ۱۹(۷۱): ۱۸-۳۴

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۴۰۴، دوره ۱۹، شماره ۷۱، صفحه ۱۸-۳۴



© نویسندگان

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

۱- استادیار، بخش علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، * نویسنده مسئول: پست الکترونیک: foroughifarid@gmail.com

۲- استادیار، بخش علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، sedghamiz@shirazu.ac.ir

افزایش جمعیت در قرن اخیر و گسترش فعالیت‌های انسانی در بخش‌های کشاورزی و صنعت، سبب تخلیه پساب‌های آلوده به بوم‌سازگان‌های آبی خاکی شده و در نهایت آلودگی آن‌ها را در پی داشته است. فلزات سنگین موجود در این آلاینده‌ها به دلیل تجمع زیستی، سلامت بوم‌سازگان‌ها و انسان‌ها را تهدید می‌کنند، لذا شناسایی منابع انتشار و پایش مداوم آن‌ها برای مدیریت پایدار منابع طبیعی ضروری است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فلزات سنگین مانند Cr، Fe، Ni، Pb و Zn در رسوبات محیط‌های آبی و تالاب‌های نمکی می‌توانند تجمع یافته و تهدیدی برای بوم‌سازگان‌ها باشند [۲۹ و ۳۰]. بررسی سمیت این فلزات نیز نشان می‌دهد که آن‌ها می‌توانند اثرات زیان‌بار سیستمیک و زیستی داشته باشند [۳۳] و پایش آن‌ها به ارزیابی خطرات محیطی و سلامت بوم‌سازگان‌ها کمک فراوان می‌نماید [۳۱]. این فلزات می‌توانند منشأ طبیعی، مانند هوازدگی سنگ‌ها، فرسایش خاک و فعالیت‌های آتشفشانی، و یا منشأ انسان‌ساز نظیر تخلیه پساب‌های صنعتی، معدن‌کاوی، فاضلاب شهری و رواناب کشاورزی داشته باشند [۲۸ و ۴۰]. تجمع فلزات سنگین در رسوبات و ورود آن‌ها به زنجیره غذایی، اثرات محیط‌زیستی و سلامتی آن‌ها را تشدید می‌کند [۲۶]. از میان ۳۵ فلز سمی تهدیدکننده سلامت انسان، ۲۳ مورد جزو فلزات سنگین هستند [۲] که مهم‌ترین آن‌ها شامل جیوه، کادمیوم، نیکل، سرب، روی و مس می‌شوند [۱۶ و ۱۷]. این فلزات حتی در مقادیر کم در آب آشامیدنی می‌توانند به کبد، کلیه، سیستم عصبی و ایمنی آسیب جدی وارد کنند [۱۴ و ۴۱] و از جفت عبور کرده، رشد جنین را مختل نمایند [۲۷]. این فلزات حتی در غلظت‌های پایین نیز اثرات سمی مزمن بر اندام‌های حیاتی مانند کلیه، کبد و مغز دارند [۱۴]. تماس طولانی‌مدت با آن‌ها نه تنها منجر به آسیب DNA می‌شود [۱۵]، بلکه خطر ابتلا به سرطان، ناتوانی ذهنی، اختلالات عصبی و حسی، و جهش‌های ژنتیکی را افزایش می‌دهد [۲۸]. ذرات آلوده به فلزات سنگین می‌توانند با باد در مناطق خشک و بادخیز پخش شده و مخاطرات بهداشتی و محیط‌زیستی گسترده‌تری ایجاد کنند [۷]. مقادیر آستانه اثر^۱ (TEL) و سطح احتمالی اثر^۲ (PEL) فلزات سنگین در رسوبات و اثرات زیست‌سم‌شناختی مرتبط با آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. شاخص‌هایی مانند ریسک زیستی^۳ (RI)، بار آلودگی^۴ (PLI) و زمین‌انباشتگی^۵ (Igeo) که نخستین بار توسط هاکانسون (۱۹۸۰) معرفی شدند، مبنای روش‌شناختی بسیاری از پژوهش‌های داخلی و خارجی در زمینه ارزیابی آلودگی‌های محیط‌زیستی به شمار می‌روند [۱۲]. به عنوان نمونه، Moore و همکاران آلودگی فلزات سنگین

1. Threshold effect level
2. Probable effect level
3. Ecological Risk Index (RI)
4. Pollution Load Index
5. Geo-accumulation Index (Igeo)

در دریاچه مهارلو را با استفاده از شاخص‌های غنی‌شدگی^۶ (EF)، Igeo و CF بررسی کردند و نشان دادند که دریاچه به ویژه به فلزات Co، Pb و Cd آلوده است [۲۰]. شاکری و همکاران نیز در دریاچه بختگان غلظت بالای Ni، Cr، As و غنی‌شدگی Cd را گزارش کردند [۲۹]. بر اساس پژوهش Hatami manesh و همکاران، در آب و نمک دریاچه مهارلو غلظت قابل‌توجهی از فلزات سنگین شامل Cr، As، Pb، Cd، Hg گزارش شده است [۱۳]. Vahidipour و همکاران نشان دادند که غلظت عناصر Hg، Ni، Mo و Se در رسوبات تالاب‌های بختگان-طشک و میزان کل مواد محلول (TDS) در آب به‌طور محسوسی افزایش یافته است. آن‌ها منشأ آلودگی را ترکیبی از منابع زمین‌زاد و انسان‌زاد معرفی کردند [۳۷]. نقش‌افکن و همکاران غلظت فلزات در رسوبات دریاچه ارومیه را ارزیابی کرده و مشخص کردند که اغلب عناصر در محدوده غیرآلوده تا آلودگی متوسط قرار دارند، اما Cd و Bi در سطح آلودگی شدید طبقه‌بندی می‌شوند [۲۲]. پسندی و همکاران در یک تحقیقی از شاخص‌های CF، EF، PLI و Igeo برای تعیین میزان آلودگی فلزات سنگین در نمونه‌های شوره معدن کائولن راحت آباد استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که بر اساس شاخص زمین‌انباشتگی، نمونه‌های شوره، خیلی آلوده تا شدیداً آلوده نسبت به Cu، کمی آلوده به Co، غیر آلوده تا کمی آلوده به Ni و نسبت به سایر فلزات در رده غیر آلوده قرار دارند [۲۵]. پژوهش اکرامی در زمینه آلودگی فلزات سنگین در نمک دریاچه ارومیه، نشان‌دهنده سطح قابل‌توجهی از آلودگی به ویژه در مورد AS و Hg در برخی ایستگاه‌ها بود. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که آرسنیک و کروم به ترتیب با مقادیر CF برابر ۸/۴۴ و ۰/۱۵ بیشترین و کمترین میزان آلودگی را داشته‌اند. همچنین، شاخص PLI در برخی ایستگاه‌ها بیش از یک به دست آمد که نشان‌دهنده آلودگی بالا و وضعیت نامطلوب محیط‌زیستی این مناطق است [۹].

در همین راستا، Foroughi و Ebrahimipour غلظت فلزات در نمک دریاچه مهارلو و معدن کرسیا را بررسی کردند و دریافتند که نمک مهارلو خطری برای کودکان و بزرگسالان ندارد، اما مصرف نمک کرسیا نیازمند کنترل است [۱۱]. Foroughi و همکاران با روش‌های زمین‌آمار و ویژگی‌های خاک سامانه پخش سیلاب گریایگان را مطالعه کرده و نشان دادند که تغییرپذیری مکانی عناصر می‌تواند کیفیت منابع آب و خاک را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. بر این اساس، پایش مستمر این منابع در مناطق تحت فشار فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی حیاتی است [۱۰]. دریاچه‌های طشک و بختگان، و رودخانه‌های کر و سیوند از منابع مهم آب و زیستگاه‌های ارزشمند حیات‌وحش در استان فارس هستند. کاهش بارندگی، بهره‌برداری بی‌رویه و ورود آلاینده‌ها این منابع را تهدید می‌کند و مدیریت پایدار آن‌ها را ضروری ساخته است [۳۱ و ۳۲].

6. Enrichment Factor
7. Contamination Factor

بهره‌برداری از نمک دریاچه‌ها پیشینه‌ای طولانی دارد که به شش هزار سال پیش از میلاد بازمی‌گردد [۵]. با این حال، ورود پساب‌های آلوده، تجمع تدریجی آلاینده‌ها و تغییرات اقلیمی، خطر آلودگی رسوبات و زنجیره غذایی را افزایش داده است [۱۱ و ۱۶]. این آلودگی‌ها می‌تواند به ویژه در دریاچه‌های محصور و کم‌عمق، شدت بیشتری پیدا کند، زیرا تبخیر بالا و نبود جریان خروجی، موجب تجمع تدریجی آلاینده‌ها در رسوبات و آب می‌شود [۲۳]. این شرایط لزوم پایش مستمر کیفیت آب و رسوبات دریاچه‌های خشک و نیمه‌خشک ایران را آشکار می‌سازد [۱۱]. علاوه بر این، نفوذ آب‌شور حاوی عناصر سنگین از این دریاچه‌ها به لایه‌های آبدار نیز تهدید دیگری است که باید مورد توجه قرار گیرد [۳۶]. متأسفانه برخی افراد ناآگاهانه اقدام به برداشت رسوبات نمکی و استفاده از آن، به ویژه در دامداری‌ها، می‌کنند؛ درحالی‌که این نمک‌ها می‌توانند به شدت آلوده و خطرناک باشند و نیازمند کنترل جدی هستند. با توجه به ورود پساب‌های آلوده و مصرف گسترده کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها در اراضی پیرامون دریاچه طشک (واقع در

استان فارس)، احتمال آلودگی این دریاچه به فلزات سنگین وجود دارد [۳۱]. علاوه بر آن با توجه به این‌که آب دریاچه طشک دارای مقدار قابل‌توجهی مواد معلق ریزدانه و مواد آلی است، لایه نمکی باقی‌مانده از تبخیر کامل آب، ترکیبی از بلورهای نمک، ذرات ریز خاک و مواد آلی جزئی را دربر دارد. بنابراین در این پژوهش از اصطلاح رسوبات نمکی برای اشاره به این لایه تبخیری سطحی استفاده شد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف اندازه‌گیری میزان فلزات سنگین در رسوبات نمکی در حاشیه شمالی دریاچه طشک (واقع در استان فارس) طراحی و اجرا شد. این مطالعه با تمرکز بر شرایط کنونی دریاچه و تهدیدات ناشی از آلاینده‌های انسان‌ساخت، می‌تواند به شناسایی وضعیت موجود و ارائه راهکارهای مدیریتی برای کاهش مخاطرات محیط‌زیستی کمک کند.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه‌های طشک، بختگان و مهارلو به‌عنوان بخشی

جدول ۱- حدود آستانه اثر (TEL) و سطح احتمالی اثر (PEL) فلزات سنگین در رسوبات و اثرات زیست‌سم‌شناختی مرتبط با آن‌ها mg/kg [۶ و ۱۸]

Table 1. Threshold effect level (TEL) and probable effect level (PEL) of heavy metals in sediments and their associated ecotoxicological effects, mg/kg [6, 18]

Element	حد آستانه	حد محتمل	Main Ecotoxicological Effects	اثرات سمی محیط‌زیستی
عنصر	Effect Level (TEL)	Effect Level (PEL)		
Nickel نیکل	15.9	42.8	Toxicity to benthic organisms, disruption of enzymatic functions, reduced algal growth, and decreased microbial activity.	سمیت برای موجودات کف‌زی، اختلال در آنزیم‌ها، کاهش رشد جلبک‌ها و فعالیت میکروبی.
Iron آهن	47000	-		عنصر ضروری است؛ در غلظت‌های بالا سبب رسوب‌گذاری، کاهش اکسیژن محلول و استرس اکولوژیک می‌شود.
Zinc روی	123	315.0		It is an essential element; however, at high concentrations it causes precipitation, reduces dissolved oxygen, and induces ecological stress.
سرب Lead	35.0	91.3		سمیت برای بی‌مهرگان، مهار فعالیت آنزیم‌ها، تأثیر بر رشد و تولیدمثل موجودات آبی.
کادمیوم Cadmium	0.6	3.5		Toxic to invertebrates, inhibits enzymatic activity, and affects the growth and reproduction of aquatic organisms.
مس Copper	18.7	108.0		تجمع در بافت جانوران آبی، اختلال در سیستم عصبی، اثرات سرطان‌زایی در غلظت‌های بالا.
منگنز Manganese	850	-		Accumulates in the tissues of aquatic animals, disrupts the nervous system, and exhibits carcinogenic effects at high concentrations.
				تجمع زیستی بالا، اثرات سرطان‌زایی، آسیب به کلیه و استخوان، کاهش تنوع زیستی.
				High bioaccumulation potential, carcinogenic effects, kidney and bone damage, and reduced biodiversity.
				تداخل در متابولیسم سلولی، آسیب به آبشش ماهیان، اثر بر سنتز پروتئین و آنزیم‌ها.
				Interference with cellular metabolism, damage to fish gills, and impacts on protein and enzyme synthesis.
				عنصر کم‌نیاز؛ در غلظت بالا باعث سمیت برای گیاهان آبی، تغییر pH رسوب و فعالیت میکروبی می‌شود.
				A trace element; at high concentrations it becomes toxic to aquatic plants, alters sediment pH, and affects microbial activity.

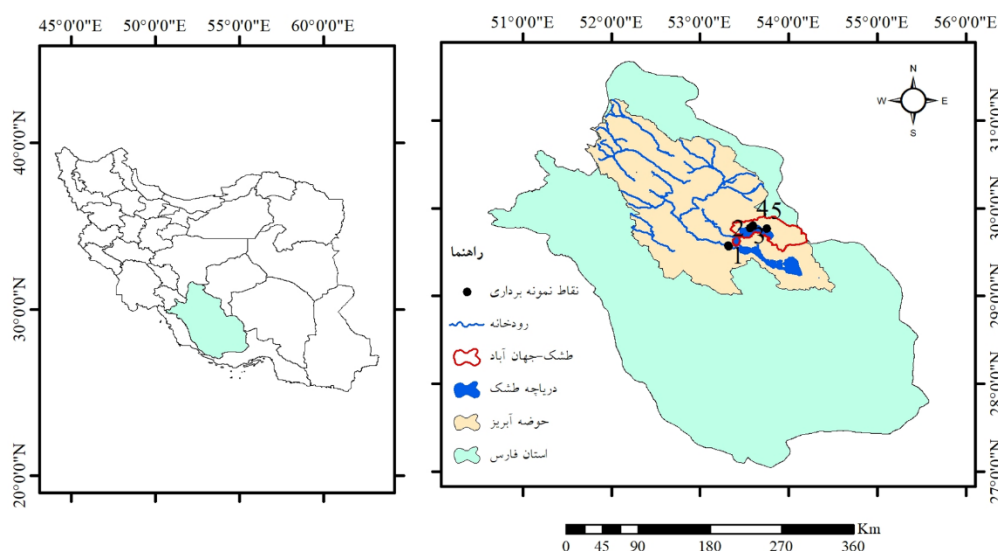
نگرانی‌ها را به دنبال داشته است [۳۱]. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق دشت طشک-جهان‌آباد با مساحت ۱۹۳۷ کیلومتر مربع است که در جنوب شرقی حوضه آبریز بختگان-مه‌ارلو قرار دارد. میانگین بارش سالانه این منطقه در حدود ۲۲۵ میلی‌متر، متوسط درجه حرارت آن ۱۷/۹ درجه سانتی‌گراد، میانگین رطوبت نسبی تقریباً ۳۸٪ و میزان تبخیر برابر ۲۹۳۳ میلی‌متر است [۲۴].

نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل داده‌ها

با توجه به این که آلاینده‌ها به تدریج در رسوبات دریاچه طشک انباشته شده و می‌توانند اثرات مخربی بر بوم‌سازگان آبی و جانداران وابسته به آن داشته باشند. بر این اساس نقطه پایش در این پژوهش، رسوبات نمکی حاشیه‌ی شمالی دریاچه طشک-جهان‌آباد در نظر گرفته شد. تعداد پنج ایستگاه نمونه‌برداری بر اساس پراکنش مکانی، ایمنی و سهولت دسترسی انتخاب شد. نمونه‌گیری از رسوبات نمکی دریاچه طشک در قسمت زیر حوضه طشک-جهان‌آباد انجام شد. این لایه حدود ۱۰ سانتی‌متر ضخامت داشت و مشاهده چشمی و بررسی بافت نمونه‌ها نشان داد که نمک تبخیری با اجزای خاکی و بقایای آلی مخلوط است و ماهیت کاملاً معدنی و خالص ندارد. به‌منظور پایش و بررسی آلودگی محیط‌زیستی نمونه‌گیری از حاشیه شمالی دریاچه طشک، در فصل خشک (تابستان ۱۴۰۰ شمسی) انجام شد تا رسوبات نمکی سطحی قابل دسترس باشند. به دلیل احتمال ناهمگونی ناحیه نمونه‌گیری و احتمال بروز خطا ناشی از تغییرات مکانی، نمونه‌برداری به روش مرکب انجام شد. انتخاب این روش باعث کاهش اثر تغییرات موضعی و افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج می‌شود. در این روش، از هر ایستگاه سه نمونه منفرد از رسوبات سطحی (عمق ۰-۱۰ سانتی‌متر) از نقاطی با فاصله کمتر از ۵ متر برداشت شد که پس از اختلاط کامل آن‌ها، یک نمونه مرکب

از حوضه آبریز فلات مرکزی ایران، در زمره حوضه‌های بسته به شمار می‌رود و بخش‌هایی از شمال، مرکز و جنوب شرقی استان فارس را در بر می‌گیرد. این حوضه با مساحت تقریبی ۳۱۴۵۰ کیلومتر مربع در جنوب ایران واقع شده و در شمال حوضه ساحلی مند جای گرفته است. شکل ۱ این حوضه آبریز را نشان می‌دهد. بلندترین نقطه این حوضه در بخش غربی آن با ارتفاع ۳۹۰۰ متر قرار دارد و کم‌ارتفاع‌ترین بخش آن در مجاورت دریاچه طشک با ارتفاع ۱۶۲۱ متر از سطح دریا مشاهده می‌شود. این حوضه از نظر اقلیمی بسیار متنوع است، به‌گونه‌ای که در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی آن دمای هوای گرمسیری با حداکثر دمای مطلق ۴۵ درجه سانتی‌گراد و در مناطق شمالی و شمال غربی آن دمای سردسیری با حداقل دمای مطلق منفی ۲۸ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. وجود سه سد مهم به نام‌های سیوند، ملاصدرا و درودزن در این حوضه، بر اهمیت آن در تأمین آب شرب و کشاورزی و همچنین تولید انرژی برق‌آبی افزوده است. رودخانه‌های کر و سیوند به‌عنوان اصلی‌ترین رودخانه‌های این حوضه، منابع حیاتی تأمین آب دریاچه را تشکیل می‌دهند.

رودخانه کُر از کوه‌های زاگرس مرکزی سرچشمه گرفته و پس از عبور از شهرهای مرودشت، سعادت‌شهر، خرامه، کوار و فسا، نهایتاً به دریاچه طشک می‌ریزد. این رودخانه تأمین‌کننده بخش مهمی از آب مورد استفاده کشاورزی، صنعت و شرب استان فارس است. در طول این مسیر، منابع مختلف آلاینده از جمله فاضلاب‌های صنعتی، رواناب کشاورزی حاوی کودها و سموم شیمیایی، و پساب دامداری‌ها به این رودخانه وارد می‌شوند. در طی سالیان گذشته ورود آلاینده‌های متعدد ناشی از کارخانه‌های صنعتی، فاضلاب‌های خانگی و صنعتی و رواناب‌های کشاورزی، رودخانه کُر را به منبعی غنی از نمک، مواد مغذی، آلی و فلزات تبدیل کرده و موجی از



شکل ۱- حوضه آبریز دریاچه‌های طشک-بختگان، زیرحوضه طشک-جهان‌آباد و ایستگاه‌های منتخب

Fig 1. The drainage basin of the Tashk-Bakhtegan Lakes, the Tashk-Jahanabad sub-basin, and the selected stations

حاصل شد. این نمونه مرکب برچسب گذاری شد و به عنوان نماینده شرایط میانگین آن ایستگاه در تحلیل های آزمایشگاهی استفاده شد. نمونه های جمع آوری شده بلافاصله در کیسه های پلی اتیلن تمیز نگه داری و در شرایط سرد به آزمایشگاه حمل شد. ناخالصی های قابل مشاهده مانند ریشه های گیاهی، تکه های مواد آلی و ذرات سنگریزه با استفاده از پنس غیرفلزی از نمونه ها حذف شدند. سپس نمونه ها در آون در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد خشک شدند. بعد از آن نمونه ها به صورت ملایم خرد شدند و از الک دو میلی متر عبور داده شدند. بخش عبوری پس از همگن سازی کامل به عنوان نمونه تحلیلی مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند هضم اسیدی نمونه ها بر اساس دستورالعمل استاندارد (USEPA Method 3050B (1996) انجام شد [۳۵].

برای تعیین غلظت فلزات سنگین در نمونه های رسوبات نمکی، از دستگاه جذب اتمی شعله ای (FAAS) استفاده شد. پس از حذف ناخالصی های قابل مشاهده و عبور از الک دو میلی متر، از هر نمونه مقدار پنج گرم با دقت ± 0.01 گرم توسط ترازوی آنالیتیکال وزن شد و به یک بشر شیشه ای تمیز (اسید شسته) ۱۰۰ میلی لیتری منتقل شد. سپس، ۳۰ میلی لیتر آب مقطر دوبار تقطیر ($EC < 1 \mu S/cm$) به آن افزوده و محلول به مدت ۳۰ دقیقه توسط هم زن مغناطیسی با سرعت متوسط هم زده شد تا انحلال کامل رسوبات نمکی حاصل شود. با توجه به ماهیت نمونه ها، پیش از هضم اسیدی، نمونه ها یکبار در آب مقطر حل شدند تا از تجمع نمک در دیواره بشر و ناهمگونی محلول جلوگیری شود.

پس از انحلال کامل، به محلول حاصل ۱۰ میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ ($(HNO_3) (70\%)$)، و پنج میلی لیتر اسید کلریدریک غلیظ ((37%)) (HCl) اضافه شد. محلول به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط برای پیش هضم باقی ماند و سپس روی هات پلیت با دمای ۱۰۰-۹۵ درجه سانتی گراد گرم شد تا حجم آن به حدود ۵-۷ میلی لیتر کاهش یابد. این مرحله با هدف آزادسازی کامل فلزات به صورت یونی انجام گرفت. پس از خنک شدن، محلول با آب مقطر شسته و حجم آن با آب مقطر تا خط نشانه در بالن ژوژه ۵۰ میلی لیتری تنظیم شد. سپس محلول از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ عبور داده شد تا ذرات معلق احتمالی حذف شوند. آنالیز فلزات با دستگاه جذب اتمی شعله ای مدل PG 990 انجام شد. برای هر عنصر، از لامپ کاند حفره ای اختصاصی و طول موج بهینه (به عنوان مثال ۲۸۳/۳ نانومتر برای سرب و ۲۲۸/۸ نانومتر برای کادمیوم) استفاده شد. شعله با ترکیب استیلن (C_2H_2) به عنوان سوخت و هوا به عنوان اکسیدکننده ایجاد شد. کالیبراسیون دستگاه با استفاده از محلول های استاندارد تهیه شده از محلول استاک (خلوص $\leq 99.9\%$) در غلظت های ۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ میلی گرم بر لیتر انجام گرفت. برای کنترل کیفیت، در هر سری آزمایش از یک نمونه بلانک (آب مقطر) و یک ماده مرجع استاندارد (SRM) مانند NIST SRM 1570a استفاده شد. تمامی

1. Flame Atomic Absorption Spectroscopy

نمونه ها به صورت سه تکرار اندازه گیری شدند و میانگین نتایج، پس از تصحیح بر اساس بلانک و منحنی کالیبراسیون، بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم (mg/kg) گزارش شد [۳۸ و ۳۹].

شاخص زمین انباشتگی (I_{geo})

شاخص زمین انباشتگی نخستین بار توسط مولر در سال ۱۹۶۹ معرفی شد و به عنوان یکی از روش های رایج برای تعیین میزان آلودگی رسوبات به فلزات سنگین استفاده می شود [۲۱]. بر این اساس مولر رسوبات و خاک ها را از منظر آلودگی به هفت طبقه تقسیم کرده که جزئیات آن در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار این شاخص از نسبت غلظت عنصر موردنظر در رسوب به غلظت زمینه همان عنصر (جدول ۳)، مطابق رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$I_{geo} = Ln \frac{C_n}{1.5B_n} \quad (1)$$

که در این آن C_n غلظت اندازه گیری شده فلز سنگین در نمونه رسوب، B_n به عنوان غلظت پس زمینه یا سطح پایه عنصر، و I_{geo} شاخص ژئوشیمیایی زمین انباشتگی جهت تحلیل آلودگی است.

ضریب آلودگی

برای ارزیابی آلودگی خاک یا رسوبات به عناصر سنگین، می توان از ضریب آلودگی استفاده کرد. این ضریب نسبت غلظت عنصر در نمونه به غلظت طبیعی آن را می سنجد و از رابطه (۲) محاسبه می شود [۱۲]:

$$CF_{metal} = \frac{C_{sample}}{C_{background}} \quad (2)$$

که در آن CF_{metal} ضریب آلودگی، C_{sample} غلظت عنصر موردنظر و $C_{background}$ غلظت زمینه طبیعی آن عنصر است. محدوده طبقه بندی این ضریب در جدول ۴ درج شده است.

درجه آلودگی^۲

درجه آلودگی با جمع ضرایب آلودگی تمامی عناصر آلاینده موجود در نمونه محاسبه می شود که از رابطه (۳) به دقت می آید [۱۱]:

$$C_{Deg} = \sum_{i=1}^n CF_i \quad (3)$$

دامنه تغییرات این شاخص نیز در جدول ۵ گزارش شده است.

ارزیابی خطر زیستی

برای ارزیابی خطر بالقوه ناشی از فلزات سنگین در رسوبات و خاک، از شاخص خطر زیستی بالقوه^۳ (شاخص کلی خطر زیستی) و عامل خطر زیستی بالقوه^۴ (E_p) بهره گرفته می شود [۱۴] که از رابطه (۴) و (۵) به صورت زیر محاسبه می شوند:

2. Degree of contamination

3. Potential Ecological Risk Index, RI

4. Potential ecological risk factor

جدول ۲- طبقه‌بندی سطح آلودگی رسوبات بر اساس شاخص زمین انباشتگی مولر [۲۱]

Table 2. Classification of sediment pollution levels based on the Muller geo-accumulation index [21]

I_{geo} class	I_{geo} Range	وضعیت آلودگی Pollution Status
0	$I_{geo} \leq 0$	غیر آلوده Unpolluted
1	$0 < I_{geo} < 1$	غیر آلوده تا آلودگی متوسط Unpolluted to moderately polluted
2	$1 < I_{geo} < 2$	آلودگی متوسط Moderately polluted
3	$2 < I_{geo} < 3$	آلودگی متوسط تا زیاد Moderately to strongly polluted
4	$3 < I_{geo} < 4$	آلودگی زیاد strongly polluted
5	$4 < I_{geo} < 5$	آلودگی زیاد تا به شدت آلوده Strongly to very strongly polluted
6	$5 < I_{geo}$	به شدت آلوده Extremely polluted

جدول ۳- میانگین مقادیر غلظت عناصر در شیل برای عناصر مورد ارزیابی، حسب قسمت در میلیون [۳۴]

Table 3. Average element concentration values in shale for the elements evaluated, in ppm [34]

Ni	Pb	Fe	Zn	Cu	Cd	Mn	عنصر Element
۴۵	۲۰	۴۷۲۰۰	۹۵	۴۵	۳	۸۵۰	میانگین شیل Average Shale

جدول ۴- مقادیر طبقه‌بندی سطح آلودگی بر اساس شاخص ضریب آلودگی [۱۱]

Table 4. Pollution level classification values based on the pollution coefficient index [11]

CF Range	محدوده تغییرات CF	درجه آلودگی Pollution Degree
$CF < 1$		آلودگی کم Low pollution
$1 \leq CF \leq 3$		آلودگی متوسط pollution Moderate
$3 \leq CF \leq 6$		آلودگی زیاد pollution High
$6 \leq CF$		آلودگی بسیار زیاد Very high pollution

جدول ۵- مقادیر طبقه‌بندی سطح آلودگی بر اساس شاخص درجه آلودگی، Cd [۱۱].

Table 5. Pollution level classification values based on the pollution degree index, Cd [11]

$24 \leq C_{Deg}$	$12 \leq C_{Deg} \leq 24$	$6 \leq C_{Deg} \leq 12$	$C_{Deg} \leq 6$	درجه آلودگی Pollution Degree
بسیار بالا	قابل توجه	متوسط	پایین	کیفیت Quality
Very high	Notable	Average	Low	

طبیعی عنصر و T_r^i عامل پاسخ سمیت عنصر است. برای عناصر Ni، Pb، Cu، Cd، Zn و Mn به ترتیب این فاکتور برابر پنج، پنج، سی، یک و یک است. محدوده‌های طبقه‌بندی این شاخص‌ها در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

$$E_r^i = T_r^i \frac{C_s^i}{C_b^i} \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (5)$$

در این معادلات، C_s^i غلظت عنصر در نمونه، C_b^i غلظت زمینه

جدول ۶- ارزیابی خطر زیستی فلزات سنگین
Table 6. Ecological risk assessment of heavy metals

خطر زیستی هر فلز ecological risk	خطر زیستی و محیط زیستی Ecological and environmental risk	RI	E_i^r
$E_i^r \leq 40$	خطر پایین Low Risk	$RI \leq 150$	
$40 \leq E_i^r \leq 80$	خطر متوسط Moderate Risk	$150 < RI \leq 300$	
$80 \leq E_i^r \leq 160$	خطر قابل ملاحظه Considrabable Risk	$RI \leq 600$	
$160 \leq E_i^r \leq 320$	خطر زیاد high Risk	$RI \geq 600$	
$E_i^r \geq 320$	خطر خیلی زیاد Very high risk		
	-		

نتایج

تحلیل‌های ارائه شده در این بخش بر اساس فلزاتی هست که در این تحقیق اندازه گیری شده است.

۱- غلظت فلزات سنگین

مقادیر غلظت فلزات سنگین موجود در نمونه‌های رسوبات نمکی دریاچه طشک بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم تعیین شد که نتایج آن در جدول ۷ گزارش شده است. نتایج نشان داد که در میان نمونه‌ها مورد بررسی، غلظت فلزات سنگین برای فلز Ni بین ۱۶۳۰۲ تا ۱۹/۰۸، برای فلز Pb بین ۱۲/۳۷۸ تا ۱۳/۱۷، برای فلز Fe بین ۸/۲۸۶ تا ۱۰/۵۹۶، برای فلز Zn بین ۱/۵۱۸ تا ۲/۷۶۶، برای فلز Cu بین ۱/۴۱ تا ۱/۸۴۸، برای فلز Cd بین ۱/۴۷۶ تا ۱/۶۰۸ و برای فلز Mn بین ۱/۲۷۲ تا ۱/۳۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود. همچنین میانگین خطای استاندارد برای فلز Ni برابر ۱۷/۸۹۲±۰/۲۰۳، برای فلز Pb برابر ۱۲/۸۶۳±۰/۰۶۰، برای فلز Fe برابر ۹/۲۴۶±۰/۱۸۷، برای فلز Zn برابر ۲/۰۳±۰/۱۰۴، برای فلز Cu برابر ۱/۵۹۷±۰/۰۳۸، برای فلز Cd برابر ۱/۵۱۹±۰/۰۱۱ و برای فلز Mn برابر ۱/۳۱۸±۰/۰۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود.

۲- شاخص های آلودگی

به منظور ارزیابی وضعیت آلودگی رسوبات نمکی دریاچه طشک، شاخص‌های محیط‌زیستی از قبیل شاخص زمین‌انباشتگی، ضریب آلودگی، درجه آلودگی، عامل خطر زیستی بالقوه و شاخص خطر زیستی بالقوه تعیین شدند. بر اساس رابطه ۱، شاخص زمین‌انباشتگی برای میانگین داده‌ها تعیین شد که نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است. به طور مشخص، مقدار شاخص زمین‌انباشتگی برای فلزات Ni، Cu، Pb، Mn، Zn و Fe به ترتیب برابر با ۱/۳-،

۰/۸-، ۳/۷-، ۶/۹-، ۴/۳- و ۸/۹- بوده که همگی متعلق به کلاس طبقه بندی صفر بودند و همگی در طبقه غیرآلوده قرار می‌گیرند. در مقابل، شاخص زمین‌انباشتگی فلز Cd برابر با ۱/۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده وضعیت غیرآلوده تا آلودگی متوسط است.

بر اساس رابطه ۲، مقادیر ضریب آلودگی برای میانگین داده‌ها محاسبه شد و نتایج آن در جدول ۹ گزارش شده است. همچنین طبقه‌بندی سطح آلودگی و ویژگی‌های ضریب آلودگی برای میانگین داده‌ها در همین جدول ارائه شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، ضریب آلودگی فلزات Ni، Cd، Pb، Cu، Mn، Zn و Fe به ترتیب برابر ۰/۴، ۵/۰۶، ۰/۶۴، ۰/۰۴، ۰/۰۱۶، ۰/۰۲۱۱ و ۰/۰۰۲ برآورد شد. بر این اساس کلاس آلودگی فلزات Ni، Cu، Pb، Mn، Zn و Fe آلودگی کم تعیین شد و در این طبقه قرار می‌گیرند. در مقابل، مقدار ضریب آلودگی فلز Cd برابر ۵/۰ به دست آمد که در کلاس آلودگی زیاد قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده سطح آلودگی زیاد منطقه برای این عنصر است.

به‌منظور تعیین شدت آلودگی کلی ناشی از فلزات سنگین در رسوبات نمکی دریاچه طشک، شاخص درجه آلودگی برای نمونه‌ها و میانگین آن‌ها محاسبه شد. نتایج این ارزیابی در جدول ۱۰ ارائه شده است. مقادیر درجه آلودگی برای نمونه‌ها بین ۵/۹۷ تا ۶/۴۹ در نوسان بود. بر اساس این شاخص، نمونه یک در رده آلودگی پایین و بقیه نمونه‌ها و میانگین نمونه‌ها در رده آلودگی متوسط بود. این نتایج بیانگر آن است که در مجموع، رسوبات نمکی منطقه دارای آلودگی متوسط هستند.

به‌منظور ارزیابی خطر زیستی مرتبط با فلزات سنگین در رسوبات نمکی دریاچه طشک، عامل خطر بالقوه زیستی E_i^r برای هر عنصر محاسبه شد. نتایج این محاسبات برای نمونه‌ها و همچنین میانگین آن‌ها در جدول ۱۱ ارائه شده است. بر اساس داده‌های جدول، مقادیر عامل خطر بالقوه زیستی برای Ni بین ۱/۸۱۱ تا ۲/۱۲ با میانگین ۱/۹۸۸، برای Cd بین ۱۴۷/۶ تا ۱۶۰/۸ با میانگین ۱۵۱/۹۲، برای Pb بین ۳/۰۹۵ تا ۳/۲۹۳ با میانگین ۳/۲۱۶، برای Cu بین ۰/۱۵۷ تا ۲/۰۵ با میانگین ۰/۱۷۷، برای Mn بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۲ با میانگین ۰/۰۰۲ و برای Zn بین ۰/۰۱۶ تا ۰/۰۲۹ با میانگین ۰/۰۲۱ متغیر بوده است. طبقه‌بندی سطح خطر بر اساس معیارهای هاکانسون، نشان داد که خطر زیستی Cd به‌طور برجسته‌ای در سطح خطر قابل ملاحظه قرار دارد [۱۴]. در مقابل خطر زیستی سایر فلزات مورد بررسی در محدوده خطر پایین قرار دارد. بنابراین، در میان فلزات بررسی‌شده، تنها Cd پتانسیل ایجاد تهدید زیستی قابل توجهی را دارد و سایر فلزات نقش چندانی در افزایش سطح خطر محیطی نداشته‌اند. حضور یکنواخت Cd در دسته خطر قابل ملاحظه در تمام نمونه‌ها، حاکی از وجود یک منبع پایدار آلودگی است که احتمالاً به دلیل وجود رواناب کشاورزی یا پساب‌های صنعتی در حوضه آبریز دریاچه است. مقادیر شاخص کلی خطر زیستی RI برای نمونه‌های مورد مطالعه محاسبه و در جدول ۱۲ ارائه شد. مقادیر RI بین ۱۵۲/۷ تا ۱۶۶/۴ با میانگین ۱۵۷/۳ بود.

جدول ۷- میانگین مقادیر غلظت فلزات سنگین در نمک دریاچه طشک، میلی گرم بر کیلوگرم

Table 7. Average heavy metal concentration values in Tashk Lake salt, mg/kg

کمیت	Parameter	Ni	Pb	Fe	Zn	Cu	Cd	Mn
بیشینه	Maximum	19.08	13.17	10.596	2.766	1.848	1.608	1.380
کمینه	Minimum	16.302	12.378	8.286	1.518	1.41	1.476	1.272
میانگین	Average	17.892	12.863	9.246	2.003	1.597	1.519	1.318
انحراف معیار	Standard deviation	1.017	0.3	0.933	0.521	0.19	0.056	0.024
خطای استاندارد	Standard error	0.203	0.06	0.187	0.104	0.038	0.011	0.008
دامنه	Domain	0.108	0.132	0.438	1.248	2.31	0.792	2.778

جدول ۸- مقادیر شاخص زمین انباشتگی مولر برای میانگین داده‌ها و میانگین شیل [۳۴]

Table 8. Mueller geo-accumulation index values for the data mean and the shale mean [34]

عنصر مورد بررسی							Target Element	
ویژگی	Property	Ni	Cd	Pb	Cu	Mn	Zn	Fe
شاخص مولر	Index Müller	-1.3	1.2	-0.8	-3.7	-6.9	-4.3	-8.9
کلاس شاخص	Index Class	0	1	0	0	0	0	0
کیفیت رسوب	Unpolluted	غیر آلوده	آلوده نشده تا آلودگی متوسط			غیر آلوده	غیر آلوده	غیر آلوده
Sediment Quality	Unpolluted	Unpolluted	Unpolluted to moderately polluted			Unpolluted	Unpolluted	Unpolluted

جدول ۹- مقادیر شاخص ضریب آلودگی برای میانگین داده‌ها

Table 9. Pollution coefficient index values for the data mean

عنصر مورد بررسی							Target Element
Fe	Zn	Mn	Cu	Pb	Cd	Ni	
0.0002	0.0211	0.0016	0.04	0.64	5.06	0.4	ضریب آلودگی Pollution
>1	>1	>1	>1	>1	6≤ ≤3	>1	coefficient کلاس شاخص
آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی کم	آلودگی زیاد	آلودگی کم	Index class ویژگی شاخص
Low Pollution	Low Pollution	Low Pollution	Low Pollution	Low Pollution	High Pollution	Low Pollution	Index feature

جدول ۱۰- مقادیر درجه آلودگی برای نمونه‌ها و میانگین آن‌ها

Table 10. Pollution degree values for samples and sample means

شماره نمونه	Smple No.	1	2	3	4	5	میانگین نمونه‌ها	Average samples
درجه آلودگی	Degree of pollution	5.97	6.23	6.06	6.06	6.49	6.16	
کیفیت	Quality	پایین	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	
		Low	Average	Average	Average	Average	Average	

جدول ۱۱ مقادیر عامل خطر بالقوه زیستی (E_i^1) برای نمونه‌های آزمایشی و میانگین آن‌ها
samples one to five and sample means Table 11. A. Potential ecological risk factor values for experimental

عنصر Element						شماره نمونه Sample No
Ni	Cd	Pb	Cu	Mn	Zn	
1.811	147.6	3.095	0.205	0.001	0.029	1
2.001	154.2	3.207	0.157	0.002	0.016	2
2.033	148.2	3.293	0.193	0.002	0.017	3
1.974	148.8	3.228	0.173	0.002	0.019	4
2.12	160.8	3.257	0.159	0.002	0.024	5
1.988	151.92	3.216	0.177	0.002	0.021	میانگین نمونه‌ها Average
خطر پایین Low risk	خطر قابل ملاحظه Considrabale risk	خطر پایین Low risk	خطر پایین Low risk	خطر پایین Low risk	خطر پایین Low risk	میزان آلودگی Pollution level

جدول ۱۲ مقادیر شاخص خطر بالقوه زیستی برای نمونه‌های آزمایشی و میانگین آن‌ها
Table 11. B: Potential Ecological Risk Index Values for Samples 1 to 5 and Sample Means

شماره نمونه Sample No	1	2	3	4	5	میانگین نمونه‌ها Average
RI	152.7	159.6	153.7	154.2	166.4	157.3
میزان آلودگی Pollution Level	خطر متوسط Average risk	خطر متوسط Average risk	خطر متوسط Average risk	خطر متوسط Average risk	خطر متوسط Average risk	خطر متوسط Average risk

ارزیابی آلودگی، نیکل دارای غلظتی بالاتر از حدود اثرات سمی بوده و کادمیوم نیز نسبت به مقدار پس‌زمینه در رسوبات دریاچه دچار غنی‌سازی شده است. منابع متداول نیکل شامل فعالیت‌های صنعتی نظیر آبکاری فلزات، تولید فولاد، صنایع باتری‌سازی و همچنین احتراق سوخت‌های فسیلی و فرسایش سنگ‌بستر گزارش شده‌اند [۴]. حضور این عنصر در سطح بالا می‌تواند هشدار جدی برای کیفیت محیطی دریاچه و سلامت انسان باشد، زیرا نیکل در غلظت‌های بالا اثرات سمی و سرطان‌زایی دارد. کمترین غلظت در میان عناصر بررسی‌شده مربوط به Mn با میانگین غلظت ۱/۳۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. منگنز یکی از عناصر ضروری برای موجودات زنده است و در فرآیندهای متابولیکی نقش کلیدی دارد. با این حال، غلظت پایین آن در نمونه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده فقدان منبع آلودگی عمده یا شرایط محیطی است که موجب کاهش تحرک و دسترسی زیستی این عنصر شده است. الگوی ترتیب غلظت میانگین فلزات سنگین در نمونه‌ها ($Mn < Cd < Cu < Zn < Fe < Pb < Ni$)، بیانگر آن است که عناصر Ni، Pb و Fe بیشترین سهم را در ترکیب فلزات سنگین نمونه‌های مطالعه‌شده دارند. حضور آهن و سرب پس از نیکل می‌تواند به منابع طبیعی (زمین‌شناسی منطقه و فرسایش سنگ‌بستر) و نیز منابع انسانی (صنایع و ورود آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و شهری) مرتبط باشد. در مقابل، غلظت فلزات Cu و Cd در سطوح پایین‌تری مشاهده شد که نشان‌دهنده منشأ آلودگی محدودتر برای این عناصر است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نیکل

بر اساس طبقه‌بندی هاکانسون، تمام نمونه‌ها در دسته خطر متوسط قرار گرفتند [۱۱]. این نتیجه نشان می‌دهد که اگرچه هیچ یک از فلزات به تنهایی خطر بالایی ایجاد نمی‌کنند، اما تجمع تأثیر فلزات، به ویژه کادمیوم، منجر به سطح متوسطی از خطر زیستی در کل سیستم شده است. نمونه ۵ با مقدار RI برابر ۱۶۶/۴ بالاترین و نمونه ۱ با مقدار ۱۵۲/۷ پایین‌ترین مقدار آن‌ها بود. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در غلظت فلزات یا شرایط محلی رسوبی (مانند pH، شوری، محتوای آلی) باشد. همچنین، توزیع نسبتاً یکنواخت RI در تمام نمونه‌ها نشان‌دهنده همگنی فضایی در آلودگی فلزات است.

بحث و نتیجه‌گیری

الگوی غلظت فلزات سنگین و منابع احتمالی

نتایج نشان داد میانگین غلظت عناصر سنگین به ترتیب برابر $Mn < Cd < Cu < Zn < Fe < Pb < Ni$ بوده است. در میان نمونه‌های مورد بررسی، بیشترین غلظت مربوط به فلز Ni، با میانگین ۱۷/۸۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین غلظت مربوط به Mn با میانگین غلظت ۱/۳۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. این الگو با مطالعات مشابه در رسوبات و نمک دریاچه‌های داخلی ایران هم‌خوانی دارد. برای مثال، Moore و همکاران [۲۰] در بررسی رسوبات دریاچه مهارلو و Shakeri و همکاران [۲۹] در مطالعه خود بر رسوبات دریاچه بختگان گزارش کردند که غلظت عناصر نیکل و کادمیوم در مقایسه با مقادیر پس‌زمینه در وضعیت آلودگی قابل‌توجه قرار دارد. بر اساس شاخص‌های

در بالاترین سطح غلظت مشاهده شد و مهم‌ترین عنصر آلاینده در محیط مورد مطالعه به شمار می‌آید و می‌تواند تهدید بالقوه‌ای برای سلامت بوم‌سازگان و انسان محسوب شود. درحالی‌که منگنز در پایین‌ترین سطح غلظت قرار دارد و خطر قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. الگوی کلی غلظت‌ها نشان‌دهنده اهمیت ویژه نیکل، آهن و سرب در مطالعات آینده و پایش‌های دوره‌ای است. پایش مستمر و دقیق غلظت نیکل به‌عنوان آلاینده غالب، بررسی منابع احتمالی ورود نیکل و سرب به محیط دریاچه (فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و زمین‌شناسی)، توجه به تغییرات فصلی و مکانی در غلظت عناصر جهت درک بهتر پویایی آلاینده‌ها و ارزیابی ریسک سلامت انسان ناشی از تماس مستقیم یا غیرمستقیم با نمک آلوده از مهم‌ترین اقدامات است که می‌بایست انجام شود. درحالی‌که فلزاتی مانند آهن و منگنز تمایل به رسوب‌گذاری و تشکیل ترکیبات پایدار غیرقابل جذب دارند، تحرک بالای کادمیوم در آب‌شور (ناشی از تشکیل کمپلکس‌های کلریدی) باعث می‌شود این فلز به راحتی در سرتاسر محیط پخش شده و در نهایت در خلال فرآیندهای تبخیر و تبلور، در بافت رسوبات نمکی انباشته شود [۸].

دامنه تغییرات و خطای استاندارد داده‌ها

اختلاف بین بیشترین و کمترین داده، دامنه تغییرات را تشکیل می‌دهد که شاخصی از پراکندگی داده‌ها است. نتایج نشان داد که نیکل (Ni) و آهن (Fe) به ترتیب با دامنه‌های ۲/۷۷۸ و ۲/۳۱ بیشترین پراکندگی را در بین نمونه‌ها دارند. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر منابع آلاینده نقطه‌ای یا تغییرات مکانی در ورودی این عناصر به دریاچه باشد (برای مثال تخلیه پساب‌های صنعتی یا فرسایش سنگ‌های بستر در برخی نقاط). در مقابل، منگنز (Mn) و کادمیوم (Cd) با دامنه‌های بسیار محدود ۰/۱۰۸ و ۰/۱۳۲ کمترین پراکندگی را نشان دادند. این یکنواختی توزیع می‌تواند ناشی از وجود منابع غیرنقطه‌ای و گسترده مانند ورودی‌های طبیعی ناشی از فرسایش خاک برای Mn یا پساب‌های کشاورزی پراکنده برای Cd باشد. خطای استاندارد شاخصی از دقت برآورد میانگین‌ها محسوب می‌شود. مقادیر خطای استاندارد برای تمامی فلزات پایین است (از ۰/۰۰۸ برای Mn تا ۰/۲۰۳ برای Ni) که نشان‌دهنده یکنواختی داده‌ها و پراکندگی کم آن‌ها حول میانگین است. پایین‌ترین خطای استاندارد مربوط به Mn و Cd است که با دامنه تغییرات بسیار کم آن‌ها همخوانی دارد. در مقابل، بالاترین مقدار خطای استاندارد مربوط به Ni و Fe است که بیشترین دامنه تغییرات را نیز داشته‌اند. این همبستگی نشان می‌دهد که تغییرپذیری مکانی این دو عنصر در دریاچه بیشتر از سایر فلزات بوده است.

تحلیل شاخص‌های آلودگی و خطر زیستی

بر اساس مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی، سطح آلودگی عنصر کادمیوم (Cd) در محدوده غیر آلوده تا آلودگی متوسط قرار گرفت و سایر عناصر در طبقه غیر آلوده ارزیابی شدند. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعه Mohammadi و همکاران در تالاب شادگان هم‌راستا

است، به‌طوری‌که در آن نیز ریسک محیط‌زیستی (ارزیابی ریسک به روش Risk Quotient (RQ) کادمیوم در رسوبات در سطح قابل توجهی گزارش شد [۱۹]. همچنین ضریب آلودگی برای Cd نشان‌دهنده آلودگی زیاد بود، درحالی‌که سایر عناصر از سطح آلودگی کم برخوردار بودند. مشابه این نتیجه در مطالعه Baygan و همکاران روی نمک دریاچه ارومیه نیز گزارش شده است [۳]. نتایج این پژوهش با یافته‌های Hatami manesh و همکاران در دریاچه مهارلو مشابه بود؛ به‌طوری‌که در آن نیز کادمیوم (Cd) همراه با سایر فلزات سنگین در آب و نمک ($Cr > As > Cd > Pb > Hg$) دریاچه گزارش شد [۱۳].

در این تحقیق درجه آلودگی میانگین نمونه‌ها در کلاس آلودگی پایین قرار گرفت. درجه آلودگی یک ابزار تلفیقی برای ارزیابی کیفیت رسوب بر اساس مجموع چندین آلاینده است. مقدار میانگین ۶/۱۶ که برای این شاخص به دست آمده، حاکی از آن است که اگرچه فلزات سنگین در ماتریکس رسوبات نمکی حضور دارند، اما شدت تجمع و تراکم ترکیبی فلزات سنگین به حدی نیست که شرایط آلودگی شدید یا نگران‌کننده‌ای ایجاد کند. این یافته را می‌توان به دو صورت تفسیر کرد. از یک سو، مقادیر مشاهده شده ممکن است صرفاً انعکاسی از غلظت زمینه و ژئوشیمی طبیعی منطقه باشد؛ به این معنا که ترکیب کانی‌شناختی سنگ‌بستر حوضه آبریز به‌طور طبیعی چنین مقادیری از این عناصر را در رسوبات دریاچه به جا گذاشته است. از سوی دیگر، نتایج می‌تواند نشان‌دهنده فشار انسانی کنترل‌شده باشد. به عبارتی دیگر منابع آلودگی انسانی نظیر پساب‌های صنعتی، رواناب کشاورزی و فاضلاب شهری که به دریاچه وارد می‌شوند، یا از حجم و غلظت کافی برای ایجاد آلودگی شدید برخوردار نیستند و یا اینکه سازوکارهای خودپالایی دریاچه از جمله ته‌نشینی، جذب سطحی و رقیق‌سازی تاکنون توانسته‌اند بار آلودگی ورودی را به‌طور مؤثری مدیریت کنند. با این حال، وجود کمی تغییرات بین نمونه‌ها از ۵/۹۷ تا ۶/۴۹ نشان‌دهنده وجود نواحی با احتمال کمی آلودگی بیشتر در محدوده نمونه‌برداری به ویژه در ناحیه نمونه ۵ است که می‌تواند ناشی از تغییر در بافت رسوب، نزدیکی به یک منبع نقطه‌ای جزئی، یا الگوهای هیدرودینامیک آب باشد. به‌طورکلی، رسوبات نمکی دریاچه از نظر ترکیبی فلزات سنگین موردبررسی در این پژوهش آلودگی شدیدی را نشان نمی‌دهند. این یک یافته مثبت برای سلامت بوم‌سازگان آبی و برنامه‌های مدیریتی است. اضافه می‌نماید که بهتر است که سایر فلزات سنگین نیز موردبررسی قرار گیرد.

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که Cd عامل اصلی خطر زیستی در محیط دریاچه طشک است. میانگین مقدار E_i^+ برای Cd برابر ۱۵۱/۹۲ بود که این فلز را در دسته خطر قابل‌ملاحظه قرار می‌دهد. فلز Pb در مرتبه بعدی خطر زیستی با سطح خطر پایین قرار دارد. این یافته با مطالعات پیشین در تالاب شادگان و

دریاچه ارومیه همخوانی دارد که Cd را در رسوبات آلوده و دارای ریسک زیستی قابل توجه [۲۲] و فلز Pb را در سطح خطر متوسط گزارش کرده‌اند [۲۲]. این نتیجه با یافته‌های Moore و همکاران در دریاچه مهارلو مطابقت دارد، به طوری که آن‌ها نیز گزارش کردند که کادمیوم در کنار سرب و کبالت از جمله فلزات با بالاترین ضرایب غنی‌شدگی، زمین‌انباشت و ضریب آلودگی است، که بیانگر نقش قابل توجه منابع انسان‌زاد در آلودگی این دریاچه است [۲۰]. بنابراین، کنترل و مدیریت ورودی‌های آلاینده به ویژه کادمیوم، برای حفاظت از سلامت بوم‌سازگان‌های تالابی ضرورت دارد و یافته‌های به دست آمده از دریاچه طشک می‌تواند به عنوان شاخصی برای پایش و مقایسه وضعیت زیستی سایر تالاب‌های کشور مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل، فلزات دیگر مانند Cu, Ni, Mn و Zn مقادیر E_i^r بسیار پایینی داشتند و در گروه خطر پایین قرار گرفتند که نشان‌دهنده تأثیر ناچیز آن‌ها بر خطر زیستی است. این یافته تا حدودی با مطالعه Moore و همکاران [۲۰] در دریاچه مهارلو در جنوب غرب ایران تا حدی همخوانی دارد؛ آن‌ها ضریب آلودگی پایین و ضریب غنی‌شدگی متوسط برای فلزات Cu, Ni, Zn و با منشأ ترکیبی از منابع طبیعی و انسان‌زاد گزارش کردند. نتایج به دست آمده با یافته‌های Amini و همکاران (۲۰۲۲) نیز همخوانی دارد. آن‌ها در بررسی رسوبات سطحی تالاب انزلی گزارش کردند که مقادیر عامل خطر بوم‌شناختی (E_i^r) برای فلزات کروم، سرب، روی، نیکل و آرسنیک کمتر از ۴۰ بوده و در سطح خطر پایین قرار دارد، در حالی که کادمیوم با دامنه مقادیر ۲۴/۴۸ تا ۱۵۵/۵۳ در محدوده خطر پایین تا قابل توجه نوسان داشته است [۱]. مقادیر پایین E_i^r در این تحقیق برای فلزات Cu, Ni, Mn می‌تواند بیانگر منشأ زمین‌زاد و طبیعی این فلزات در رسوبات نمکی در حاشیه شمالی دریاچه طشک باشد و احتمالاً نقش ورودی‌های صنعتی و انسان‌زاد در شکل‌گیری غلظت آن‌ها ناچیز است. با وجود حضور چندین فلز، پروفایل کلی خطر عمدتاً توسط Cd تعیین می‌شود. این امر بر اهمیت اولویت‌بندی پایش و مدیریت این فلز تأکید دارد. همچنین، یکنواختی مقادیر E_i^r برای Cd در تمام پنج نمونه، نشان‌دهنده آلودگی گسترده و احتمالاً ناشی از منابعی مانند رسوب‌گذاری، شستشوی خاک و منابع آلوده توسط بارش‌های جوی است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شاخص کلی خطر زیستی (شاخص خطر زیستی بالقوه) در تمام نمونه‌ها در دسته خطر متوسط قرار دارد، که حاکی از وجود یک سطح قابل توجه از نگرانی زیستی در رسوبات نمکی اطراف دریاچه است. نتایج به دست آمده با یافته‌های Amini و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد. آن‌ها شاخص خطر بوم‌شناختی کلی (RI) را بین ۳۷/۱۲ تا ۱۷۱/۵۴ گزارش کردند که نشانگر وضعیت خطر پایین تا متوسط در رسوبات تالاب است [۱]. در پژوهش حاضر نیز مشابه نتایج آنان، کادمیوم بیشترین سهم را در افزایش شاخص خطر بوم‌شناختی نشان می‌دهد. در این مطالعه، میانگین مقادیر RI برابر ۱۵۶/۲ بود، که نزدیک به میانگین مطالعه

Amini و همکاران [۱] است و با آن همخوانی دارد. این افزایش ممکن است به دلیل تفاوت در شرایط هیدرولوژیکی، نفوذ فاضلاب کشاورزی یا ترکیب زمین‌شناسی منطقه باشد. مهم‌ترین مؤثر در افزایش RI، مقادیر عامل خطر زیستی بالقوه فلز Cd با میانگین ۱۵۱/۹۲ است که نقش غالبی در خطر کلی دارد. نتایج به دست آمده با یافته‌های Amini و همکاران همخوانی دارد [۱]. آن‌ها در بررسی رسوبات سطحی تالاب انزلی شاخص خطر بوم‌شناختی کلی (RI) را بین ۳۷/۱۲ تا ۱۷۱/۵۴ گزارش کردند که نشانگر وضعیت خطر پایین تا متوسط در رسوبات تالاب است. در پژوهش حاضر نیز مشابه نتایج ایشان، کادمیوم بیشترین سهم را در افزایش شاخص خطر بوم‌شناختی نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که منابع آلودگی Cd در این منطقه احتمالاً انسانی هستند و لزوم کنترل این منابع را تأکید می‌کند. با این حال، اگرچه Cd سهم عمده‌ای در خطر کلی دارد، اما هیچ یک از نمونه‌ها در دسته خطر زیاد یا خیلی زیاد قرار نگرفته است. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه آلودگی وجود دارد، اما هنوز در مرحله کنترل‌پذیر است و اقدامات مدیریتی می‌تواند اثرات منفی آن را کاهش دهد.

بر اساس نتایج این پژوهش، شاخص کلی خطر اکولوژیک نشان‌دهنده وضعیت خطر متوسط رسوبات نمکی دریاچه طشک است که عمدتاً تحت تأثیر تجمع کادمیوم قرار دارد. اگرچه احتمال بروز اثرات سمی فوری بر موجودات زنده پایین است، اما پیامدهای بلندمدت ناشی از ورود کادمیوم به زنجیره غذایی و تأثیر آن بر سلامت انسان و حیوانات نگران‌کننده است. توزیع یکنواخت شاخص RI نیز بیانگر عدم وجود منبع موضعی و نقش منابع پراکنده‌ای چون رواناب کشاورزی، بارش‌های جوی یا آب‌های زیرزمینی آلوده است. این مطالعه با هدف بررسی غلظت و ارزیابی خطر زیستی فلزات سنگین در رسوبات نمکی دریاچه طشک انجام شد. نتایج نشان داد که از میان عناصر مورد بررسی، بیشتر عناصر در محدوده آلودگی پایین قرار دارند، با این حال غلظت بالاتر از حد طبیعی کادمیوم موجب شده شاخص خطر زیستی در محدوده «متوسط» قرار گیرد و لزوم توجه به مدیریت منابع آلاینده در این پهنه آبی را یادآور شود. تحقیق حاضر نقش فعالیت‌های انسانی، به ویژه کشاورزی و ورود آلاینده‌ها از طریق رواناب را در افزایش بار کادمیوم در چرخه ژئوشیمیایی رسوبات نمکی محتمل می‌داند و بر اهمیت پایش مستمر، شناسایی مسیرهای ورود آلاینده‌ها، بررسی تغییرات مکانی و فصلی، ارزیابی امکان انتقال به زنجیره غذایی و توسعه راهکارهای زیست‌پالایی بر پایه باکتری‌های بومی تأکید می‌کند. افزون بر این، با توجه به شباهت‌های اقلیمی، تبخیری و ژئوشیمیایی میان دریاچه‌های طشک، بختگان و مهارلو، نتایج این پژوهش می‌تواند به صورت تطبیقی در پایش و مدیریت آلودگی این بوم‌سازگان‌ها به کار گرفته شود و داده‌های پایه ارزشمندی برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و ارتقای سلامت محیط و انسان فراهم آورد.

نویسندگان از حمایت مادی و معنوی دانشگاه شیراز برای انجام این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

فرید فروغی: جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، انجام پژوهش، تجزیه و تحلیل داده‌ها، نگارش و انجام اصلاحات و اعمال نظرات در مقاله. عباس صدق‌آمیز: راهنمایی، بازبینی و ویرایش مقاله.

منابع

- Circulation, 121(21), 2331–2378. <https://doi.org/10.1161/cir.0b013e3181dbeecl>
6. Canadian Council of Ministers of the Environment. (2002). Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life. In Canadian environmental quality guidelines. <https://www.ccme.ca/en/resources/sediment.html>
7. Chen, B., Stein, A. F., Castell, N., Gonzalez-Castanedo, Y., De La Campa, A. S., & De La Rosa, J. D. (2016). Modeling and evaluation of urban pollution events of atmospheric heavy metals from a large Cu-smelter. *Science of the Total Environment*, 539, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.117>
8. Du Laing, G., De Vos, R., Vandecasteele, B., Lesage, E., Tack, F. M., & Verloo, M. G. (2008). Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77(4), 589-602. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.10.017>
9. Ekrami, J. (2023). Assessment of environmental impacts of salt extraction from Urmia Lake and heavy metal presence in sediments of lake. Unpublished master's thesis, Tabriz University of Medical Sciences, Faculty of Health. Tabriz, Iran.
10. Foroughi, F. Mokarem, M. and Ebrahimpour, R. 2019. Using geostatistical methods to study soil characteristics in the downstream lands of the Garbayegan flood spreading system (3rd National Conference on Hydrology of Iran, Tabriz). <https://civilica.com/doc/951089>
11. Foroughi, F., and Ebrahimpour, R. 2021. Heavy metals investigation and the potential risk assessment in the Salt of Maharloo Lake and Korsia mine. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(2): 361-377.
12. Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research*. 14 (8):975-1001.
13. Hatami Manesh, M., Mirzayi, M., Bandegani, M., Sadeghi, M., & Sabet, F. N. (2013). Determination of mercury, lead, arsenic, cadmium and chromium in salt and water of Maharloo Lake, Iran, in different seasons. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 23(108), 91-98.
14. Jaishankar, M. Tseten, T. Anbalagan, N. Mathew, B. B. and Beeregowda, K. N. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 7(2): 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>.
15. Järup, L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*. 68(1): 167-182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>.

1. Amini, Z., Anvaripour, R., Hatami-manesh, M., & Aazami, J. (2022). Evaluation of Toxicity Potential and Spatial Distribution of Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Anzali International Wetland Using GIS. *Advanced Environmental Sciences*, 20(4), 163-182. <http://dx.doi.org/10.48308/envs.2022.1192>
2. Argos, M. Kalra, T. Pierce, B. L. Chen, Y. Parvez, F. and Islam, T. 2011. A prospective study of arsenic exposure from drinking water and incidence of skin lesions in Bangladesh. *American Journal of Epidemiology*. 174(2):185-94. <https://doi.org/10.1093/aje/kwr062>
3. Baygan, A. Mogaddam, M. R. A. Lotfipour, F. & Nemati, M. 2022. Evaluation of heavy metals (Cd, Cr, Hg, Ni, As, and Pb) concentration in salt samples of Lake Urmia, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(7), 1672-1682. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1742890>
4. Begum, W., Rai, S., Banerjee, S., Bhattacharjee, S., Mondal, M. H., Bhattarai, A. and Saha, B. (2022). A comprehensive review on the sources, essentiality and toxicological profile of nickel. *RSC Advances*, 12(15), 9139-9153. <https://doi.org/10.1039/D2RA00333C>
5. Brook, R. D. Rajagopalan, S. Pope, C. A. Brook, J. R. Bhatnagar, A. Diez-Roux, A. V. and Kaufman, J. D. 2010. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association.

26. Sacmaci S. Kartal, S. Sacmaci , M. 2012. Determination of Cr (III), Fe (III), Ni (II), Pb (II) and Zn (II) ions by FAAS in environmental samples after separation and preconcentration by solvent extraction using a triketone reagent. *Environmental bulletin*. 21(6):1563-70.
27. Sanders, A. P. Claus Henn, B. and Wright, R. O. 2015. Perinatal and childhood exposure to cadmium, manganese, and metal mixtures and effects on cognition and behavior: A review of recent literature. *Current Environmental Health Reports*. 2(3): 284-294. <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0058-8>
28. Sarkar, B. 2002. Heavy metals in the environment. CRC press.
29. Shakeri, A. Afrasiabian, A. Rezaei, M. & Karimi, M. 2014. Assessment of trace elements contamination in surface sediments of the Bakhtegan lake, Iran. *Iranian Journal of Science*. 38(1): 76-85.
30. Shang, Z. Ren, J. Tao, L. and Wang, X. 2015. Assessment of heavy metals in surface sediments from Gansu section of Yellow River. China. *Environmental monitoring and assessment*. 187(3): 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4328-6>.
31. Sheykhi, V. and Samani, N. (2020). Assessment of water quality compartments in Kor River, IRAN. *Environmental Monitoring and Assessment*. 192(8): 532. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08464-2>
32. Siddique, M. A. and Aktar, M. 2012. Heavy metals in salt marsh sediments of porteresia bed along the Karnafully River coast, Chittagong. *Journal of Soil and Water Resesearch*. 7(3): 117-123. <https://doi.org/10.17221/7/2012-swr> .
33. Tchounwou, P. B. Yedjou, C. G. Patlolla, A. K. and Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: environmental toxicology*, 133-164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
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: 175-192. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:doteis\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:doteis]2.0.co;2)
35. U.S. Environmental Protection Agency. (1996). Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils (EPA Publication No. SW-846). <https://www.epa.gov/hw-sw846>
36. Vahidipour, M. Raeisi, E. and Van Der Zee, S. E. 2021. Active saltwater intrusion of shrinking Bakhtegan-Thask Lakes in South Iran threatens the freshwater resources of coastal aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 34: 100790. <https://doi.org/10.1016/j.jhrs.2021.100790>
16. Khaniki, G. Dehghani, M. H. Mahvi, A. H. and Nazmara, S. 2007. Determination of trace metal contaminants in edible salts in Tehran (Iran) by atomic absorption spectrophotometry. *Journal of Biological Sciences*. 7(3): 811-814. <https://doi.org/10.3923/jbs.2007.811.814>.
17. Lefebvre, D. D. and Edwards, C. 2010. Decontaminating heavy metals from water using photosynthetic microbes. In *Emerging Environmental Technologies, Volume II* (pp. 57-73). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3352-9_3
18. MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., & Berger, T. A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39(1), 20-31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>.
19. Mohammadi, S. A., Karimi Organi, F., Savari, A., Dashti, S., & Koushfar, A. (2023). Investigating the environmental risk of lead and cadmium heavy metals using the Ecofate model, case study: Shadgan wetland. *Journal of Natural Environment*, 75(Special Issue Coastal and Marine Environment), 64-76. <https://doi.org/10.22059/JNE.2023.351975.2500>.
20. Moore, F., Forghani, G., & Qishlaqi, A. (2009). Assessment of heavy metal contamination in water and surface sediments of the Maharlu Saline Lake, SW Iran. *Iranian Journal of Science*, 33(1), 43-55.
21. Muller, G. 1969. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River. *Geo journal*. 2: 108118.
22. Naghshafkan, F., Pirkharati, H., Farhadi, K., & Soltanlinejad, N. (2023). Evaluation of some heavy metals contamination around Urmia Lake and city by soil pollution indicators. *Environmental Resources Research*, 11(2), 271-282. <https://doi.org/10.22069/ijerr.2024.20569.1382>
23. Nriagu, J. O. and Pacyna, J. M. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*. 333(6169), 134-139. <https://doi.org/10.1038/333134a0>
24. Omidvar, K. and Behzadi Karimi, H. (2017). Spatial analysis of groundwater quality for drinking, agricultural, and industrial uses (Case study: Abadeh Tashk-Jahanabad plain). *Journal of Physical Geography*. 10(4): 19-44.
25. Pasandi, M., Pakzad, H. R., Mackizadeh, M. A., & Advaei, S. (2024). Concentration and enrichment of heavy metals in efflorescence secondary sulfate minerals and mine drainage of the Rahatabad kaolin mine, Isfahan province. *Advances in Applied Geology*, 14(2), 277-298. <https://doi.org/10.22055/AAG.2024.44510.2398>

40. Wu, Z. He, M. Lin, C. and Fan, Y. 2011. Distribution and speciation of four heavy metals (Cd, Cr, Mn, and Ni) in the surficial sediments from estuary in daliao river and yingkou bay. *Environmental Earth Sciences*. 63(1): 163-175. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0680-6>.

41. Xiaolong, W. Jingyi, H. Ligang, X. Qi. Z. 2010. Spatial and seasonal variations of the contamination within water body of the Grand Canal, China. *Environmental Pollution*. 158(5):1513-20. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.12.018>

[org/10.1016/j.ejrh.2021.100790](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100790)

37. Vahidipour, M., Raeisi, E., & van der Zee, S. E. (2022). Potentially toxic metals in sediments, lake water and groundwater of the Ramsar wetlands Bakhtegan–Tashk, South Iran: Distribution and source assessment. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102789. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102789>.

38. Welz, B. & Sperling, M. 2008. *Atomic Absorption Spectrometry*. 3rd ed., John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9783527611690>.

39. Willard, H. H., Merritt, L. L., Dean, J. A., & Settle, F. A. (1988). *Instrumental Methods of Analysis* (7th ed.). D. Van Nostrand Company. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(59\)80067-9](https://doi.org/10.1016/0039-9140(59)80067-9).