

Evaluation of Heavy Metals (Fe,Pb,Cd,Cr,Ni,V,Zn and Cu) Pollution in the Sediments of the Hoor Al-Azim Wetland Using Pollution Indices

Roozbeh Mirza^{1*}; Mazaher Moeinaddini²; Mohsen Mahfouzi³

- *1. Faculty of Oceanography and Marine sciences, Khorramshahr University, Khuzestan, Iran
2. Departments of Environmental Science, Natural Resource Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran
3. Bureau of Habitats and Protected Areas Affairs, Deputy of Natural Environment and Biodiversity, Environmental Protection Organization, Tehran, Iran.

*Email Address: R.mirza@kmsu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper Article History: Received Date: 2026/06/29 Revised Date: 2026/08/05 Accepted Date: 2026/08/26 Published Date: 2026/08/26 Keywords: Hoor Al-Azim Wetland, Heavy metals, Geoaccumulation Index, Combination Pollution Index, Sediment Quality Guidelines.	Aquatic ecosystems and surface water resources, including rivers, lakes, and wetlands, are among the most valuable ecological habitats and are continuously exposed to pollutants derived from anthropogenic activities. The Hoor Al-Azim Wetland, one of Iran's most important international wetlands, has experienced increasing environmental stress in recent years due to the expansion of oil extraction activities, industrial infrastructure development, and reduced water inflow. Among environmental pollutants, heavy metals are considered one of the most significant threats to this ecosystem because of their persistence, toxicity, and high potential for bioaccumulation. This study aimed to assess the contamination status of surface sediments in the Hoor Al-Azim Wetland by heavy metals and evaluate sediment quality using pollution indices and Sediment Quality Guidelines (SQGs). For this purpose, twenty-seven surface sediment samples (0–5 cm depth) were collected. Following sample preparation and acid digestion, the concentrations of Fe, Cu, Zn, Ni, V, Pb, Cd, and Cr were determined using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). The results indicated that the concentrations of the analyzed metals ranged from 0.26 to 106.49 mg kg⁻¹ dry weight. Based on the Müller Geo-accumulation Index (I_{geo}) and the Combination Pollution Index (CPI), sediment contamination was generally classified as low to moderate. Furthermore, comparison of the measured metal concentrations with Sediment Quality Guidelines (SQGs) indicated that nickel and chromium exhibited the highest ecological risk potential among the investigated metals and may adversely affect benthic organisms inhabiting the wetland. Overall, the findings highlight the need for continuous monitoring and effective management to protect this valuable wetland ecosystem.
Cite this article:	Roozbeh Mirza, Mazaher Moeinaddini, Mohsen Mahfouzi (2026) Evaluation of Heavy Metals (Fe,Pb,Cd,Cr,Ni,V,Zn and Cu) Pollution in the Sediments of the Hoor Al-Azim Wetland Using Pollution Indices, Journal of Environmental Sciences Studies, 11(2), Pages 11202-11214.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Wetlands are highly productive ecosystems that provide essential ecological services but are increasingly threatened by urbanization, industrialization, agriculture, and population growth, which increase pollutant inputs into aquatic environments. The Hoor Al-Azim Wetland, the largest permanent freshwater wetland in southwestern Iran, has undergone significant ecological degradation due to oil exploration, infrastructure development, drought, upstream dam construction, and reduced water inflow. Heavy metals are persistent and toxic contaminants that accumulate in sediments, making sediment quality assessment crucial for environmental monitoring. Therefore, this study investigated the spatial distribution of selected heavy metals in surface sediments of the Hoor Al-Azim Wetland and evaluated their contamination status using internationally recognized sediment pollution indices.

Materials and Methods

A total of 27 sampling stations were selected throughout the Hoor Al-Azim Wetland to provide representative spatial coverage of the study area while considering ecological importance and potential pollution sources. Surface sediment samples (0–5 cm depth) were collected using standard sediment sampling procedures. Sediment samples were acid digested and analyzed for concentrations of Fe, Cu, Zn, Ni, V, Pb, Cd, and Cr using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). Quality assurance and quality control procedures included the analysis of blank samples and certified reference materials. Pollution assessment was conducted using several sediment quality assessment approaches, including comparison with international Sediment Quality Guidelines (SQGs), the Geoaccumulation Index (Igeo), and the Combination Pollution Index (CPI). Statistical analyses were performed using one-way ANOVA to evaluate spatial differences among sampling stations at a significance level of $P < 0.05$.

Results and Discussion

Heavy metal concentrations showed significant spatial variation among sampling stations ($P < 0.05$), with mean values ranging from 0.26 to 106.49 mg kg⁻¹ dry weight. Average concentrations of cadmium, lead, and nickel exceeded their corresponding global sediment and crustal background values, indicating anthropogenic enrichment. The highest metal concentrations were observed at Stations 2 and 19, located near oil drilling and production facilities, suggesting that petroleum-related activities are the primary source of contamination. Comparison with Sediment Quality Guidelines identified nickel and chromium as the metals posing the greatest ecological risk to benthic organisms. The Geoaccumulation Index classified sediments as unpolluted to moderately polluted (Igeo: -2.81 to 2.11), while the Combination Pollution Index indicated polluted conditions only at Stations 2, 3, 10, and 19 (CPI > 1), with the remaining stations classified as unpolluted.

Conclusions

This study assessed heavy metal contamination in the surface sediments of the Hoor Al-Azim Wetland. The results indicate that oil exploration, drilling activities, industrial wastewater, and related infrastructure are the main sources of localized contamination. While most sediment showed low contamination levels, Stations 2 and 19 exhibited elevated concentrations of nickel, vanadium, chromium, and lead. Pollution indices classified the sediments as unpolluted to moderately polluted, with nickel and chromium posing the greatest ecological risk to benthic organisms. These findings highlight the need for continuous environmental monitoring, stricter industrial management, and effective conservation strategies to protect the ecological integrity of the wetland.



FANPAYA

Knowledge Based Company

ارزیابی وضعیت آلودگی رسوبات تالاب هورالعظیم به فلزات سنگین (آهن، سرب، کادمیوم، کروم، نیکل، وانادیوم، روی و مس) با استفاده از شاخص های آلودگی

روزبه میرزا^{۱*}، مظاهر معین الدینی^۲، محسن محفوظی^۳

^{۱*} - دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

^۲ - گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳ - کارشناس دفتر زیستگاه ها و امور مناطق، معاونت محیط طبیعی و تنوع زیستی، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: R.mirza@kmsu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
اکوسیستم های آبی و منابع آب های سطحی، شامل رودخانه ها، دریاچه ها و تالاب ها، از ارزشمندترین زیستگاه های اکولوژیکی هستند که به طور مداوم در معرض آلاینده های ناشی از فعالیت های انسان زاد قرار دارند. تالاب هورالعظیم، به عنوان یکی از مهم ترین تالاب های بین المللی ایران، در سال های اخیر به دلیل گسترش فعالیت های استخراج نفت، توسعه زیرساخت های صنعتی و کاهش جریان های ورودی آب، با تنش های محیط زیستی فزاینده ای مواجه شده است. در میان آلاینده های محیط زیستی، فلزات سنگین به دلیل پایداری، سمیت و قابلیت بالای تجمع زیستی، از مهم ترین تهدیدها برای این اکوسیستم محسوب می شوند. هدف از این پژوهش، ارزیابی وضعیت آلودگی رسوبات سطحی تالاب هورالعظیم به فلزات سنگین و بررسی کیفیت رسوبات با استفاده از شاخص های آلودگی و دستورالعمل های کیفیت رسوب (SQGs) بود. بدین منظور، ۲۷ نمونه رسوب سطحی (عمق ۰ تا ۵ سانتی متر) جمع آوری شد. پس از آماده سازی نمونه ها و هضم اسیدی، غلظت عناصر آهن، مس، روی، نیکل، وانادیوم، سرب، کادمیوم و کروم با استفاده از دستگاه طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که غلظت فلزات مورد بررسی در محدوده ۰/۲۶ تا ۱۰۶/۴۹ میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک قرار دارد. براساس شاخص تجمع زمینی مولر (Igeo) و شاخص ترکیبی آلودگی (CPI) وضعیت آلودگی رسوبات به طور کلی در کلاس کم تا متوسط قرار گرفت. همچنین، مقایسه غلظت فلزات با دستورالعمل های کیفیت رسوب (SQGs) نشان داد که نیکل و کروم، در مقایسه با سایر فلزات، دارای بیشترین پتانسیل خطر اکولوژیکی بوده و ممکن است اثرات نامطلوبی بر موجودات کفزی (بنتیک) تالاب داشته باشند. در مجموع، یافته های این پژوهش بر ضرورت پایش مستمر محیط زیستی، کنترل مؤثر منابع آلاینده و اجرای راهبردهای مدیریتی مناسب به منظور حفاظت از این اکوسیستم ارزشمند تأکید می کند.	نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۴ کلید واژه ها: تالاب هورالعظیم، فلزات سنگین، شاخص تجمع زمینی، شاخص ترکیبی مولر، آلودگی، راهنمای کیفیت رسوب.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2026.589137.2467

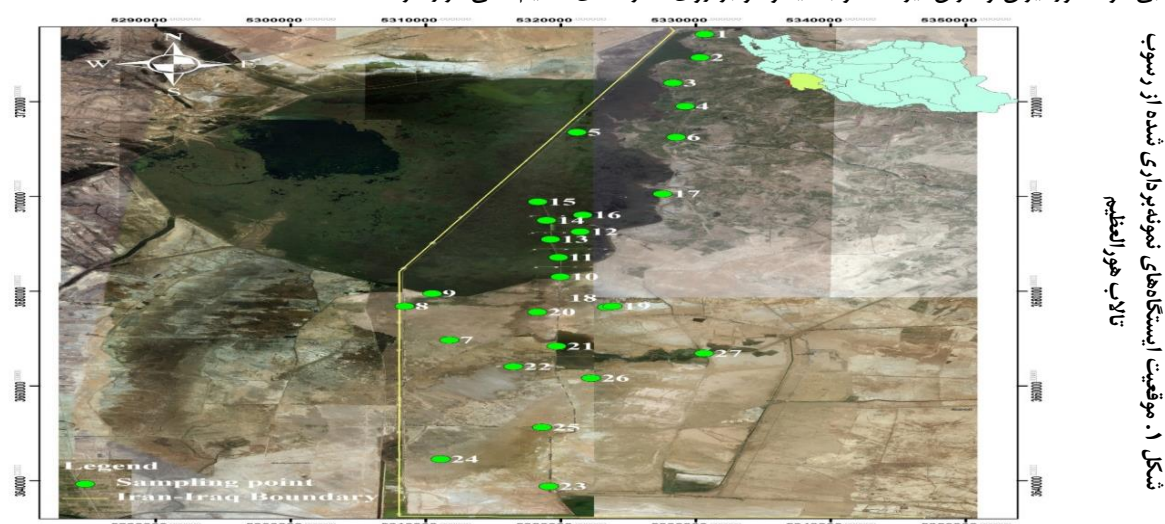
۱-مقدمه

رشد سریع جمعیت، توسعه شهرنشینی، گسترش صنایع و تشدید فعالیت‌های کشاورزی طی دهه‌های اخیر، فشار قابل توجهی بر منابع آب و اکوسیستم‌های آبی وارد کرده است. افزایش حجم فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی در کنار ورود مستقیم یا غیرمستقیم آن‌ها به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها، موجب تجمع طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های شیمیایی در این محیط‌ها شده است. در میان آلاینده‌های مختلف، فلزات سنگین به دلیل سمیت بالا، پایداری، تجزیه‌ناپذیری، قابلیت تجمع زیستی و بزرگ‌نمایی زیستی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌های آبی شناخته می‌شوند (Li et al., 2022; Wu et al., 2022). تالاب‌ها از ارزشمندترین اکوسیستم‌های جهان محسوب می‌شوند و علاوه بر حفاظت از تنوع زیستی، در تنظیم چرخه هیدرولوژیکی، تصفیه طبیعی آب، ذخیره کربن، کنترل سیلاب، تغذیه آب‌های زیرزمینی و حفظ پایداری خدمات اکوسیستمی نقش اساسی دارند. با این وجود، توسعه ناپایدار، تغییر کاربری اراضی، گسترش فعالیت‌های صنعتی، کاهش حبابه‌های محیط‌زیستی و تغییرات اقلیمی، موجب افزایش فشارهای انسانی بر این زیست‌بوم‌های ارزشمند شده است (Hu et al., 2017). تالاب هورالعظیم بزرگ‌ترین تالاب آب‌شیرین دائمی با خدمات اکوسیستمی منحصر به فرد است که امتداد مرز ایران و عراق واقع شده است. حدود دوسوم مساحت این تالاب در خاک عراق قرار دارد و با نام هورالهویزه شناخته می‌شود و یک‌سوم باقی‌مانده در ایران واقع شده است (Mirzaei et al., 2010; Fuladavand and Sayyad, 2015). ایجاد تاسیسات نفتی، حفاری چاه‌های نفت، اجرای طرح توسعه میدان نفتی آزادگان و آتش‌سوزی‌های اخیر در کنار کاهش جریان آب ورودی به دلیل احداث سد‌های بالادست و خشکسالی‌های پی‌درپی، همگی از جمله مهم‌ترین مخاطرات و تهدیدات جدی محیط‌زیستی به شمار می‌روند که امروزه این اکوسیستم ارزشمند را تحت تأثیر قرار داده و آن را با چالش‌های گسترده‌ای مواجه ساخته‌اند. اکوسیستم‌های آبی به‌عنوان مقصد نهایی بسیاری از آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی، مقادیر قابل توجهی از فلزات سنگین، هیدروکربن‌های نفتی، ترکیبات آلی پایدار، آفت‌کش‌ها و سایر آلاینده‌های شیمیایی را دریافت می‌کنند. بخش عمده‌ای از این آلاینده‌ها پس از ورود به محیط آبی، به ذرات معلق متصل شده و در نهایت در رسوبات ته‌نشین می‌شوند. از این رو، رسوبات به‌عنوان مخزن اصلی تجمع فلزات سنگین شناخته شده و اطلاعات ارزشمندی درباره سابقه و شدت آلودگی محیط ارائه می‌دهند (Li et al., 2022; Mao et al., 2022). اگرچه رسوبات می‌توانند به‌عنوان یک مخزن نهایی برای کاهش غلظت فلزات در ستون آب عمل کنند، اما تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی نظیر pH، پتانسیل اکسایش-کاهش و مقدار ماده آلی می‌تواند سبب آزادسازی مجدد فلزات و افزایش قابلیت دسترسی زیستی آن‌ها شود. این فرآیند، خطر انتقال فلزات به زنجیره غذایی، تجمع در بافت موجودات آبی و در نهایت تهدید سلامت انسان را افزایش می‌دهد (Pan et al., 2022). با توجه به تمرکز روزافزون تحقیقات جهانی بر اثرات تجمع فلزات سنگین در رسوبات اکوسیستم‌های تالابی تحت فشار فعالیت‌های انسانی، بررسی این آلاینده‌ها اهمیت ویژه‌ای یافته است. تالاب هورالعظیم به دلیل ارزش‌های اکولوژیکی بالا و قرار گرفتن در معرض توسعه فعالیت‌های نفتی، گسترش کشاورزی و ورود آلاینده‌های مختلف از حوضه آبریز، شرایط حساس و آسیب‌پذیری را تجربه می‌کند. در چنین شرایطی، تحلیل وضعیت آلودگی رسوبات این تالاب می‌تواند اطلاعات پایه و قابل اتکایی را در اختیار برنامه‌ریزان محیط‌زیست قرار دهد و این امر به بهبود تصمیم‌گیری‌های مرتبط با حفاظت، مدیریت و توسعه پایدار و در نهایت احیای این اکوسیستم ارزشمند کمک کند.

۲-روش انجام تحقیق

• محدوده مورد مطالعه

تالاب هورالعظیم در غرب خوزستان و در انتهای رودخانه کرخه، بین دو کشور ایران و عراق، در موقعیت جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. تالاب هورالعظیم در واقع قسمت ایرانی تالاب بزرگ بین‌النهرین می‌باشد و مرز آبی دو کشور ایران و عراق نیز محسوب می‌شود و بر روی سفره‌های عظیم نفتی قرار گرفته است.



• انتخاب نقاط نمونه برداری

پس از انجام بازدیدهای میدانی و بررسی ویژگی‌های مختلف تالاب از جمله الگوی پراکنش مکانی، شرایط هیدرولوژیکی، میزان دسترسی به بخش‌های مختلف و نزدیکی به منابع آلاینده شهری و صنعتی نظیر فعالیت‌های نفتی و ورودی رودخانه‌ها، همچنین با در نظر گرفتن اهمیت اکولوژیکی منطقه، در نهایت ۲۷ ایستگاه نمونه‌برداری گردیدند. مختصات جغرافیایی تمامی ایستگاه‌ها با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت و به‌منظور اطمینان از صحت موقعیت مکانی، با تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزار Google Earth مورد بررسی و کنترل قرار گرفت. موقعیت مکانی ایستگاه‌های نمونه‌برداری و اطلاعات مربوط به هر ایستگاه در شکل و جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های نمونه برداری

نام ایستگاه	کد نمونه	X	Y
شاخه عیب‌آوی	H۱	۷۷۳۳۳۲	۳۵۱۹۵۰۵
چذابه	H۲	۷۷۳۱۴۶	۳۵۱۵۳۳۰
سahندی	H۳	۷۷۱۵۵۹	۳۵۱۰۷۳۰
سابله	H۴	۷۷۲۴۴۵	۳۵۰۶۵۷۸
جاده امام رضا	H۵	۷۶۵۷۲۵	۳۵۰۱۷۴۲
نیسان	H۶	۷۷۲۰۲۴	۳۵۰۱۰۲۴
کلاستر یاران شمالی	H۷	۷۵۸۵۹۶	۳۴۶۴۲۴۹
محل دپوی حفاری یاران شمالی	H۸	۷۵۵۶۱۸	۳۴۷۰۲۷۸
جاده شط‌علی	H۹	۷۵۷۳۰۱	۳۴۷۲۵۷۰
انتهای جاده اکتشافی	H۱۰	۷۶۵۳۲۸	۳۴۷۵۸۰۲
بین پد ۴ و ۹ جاده اکتشافی	H۱۱	۷۶۵۱۳۸	۳۴۷۹۲۸۹
بین پد ۱۱ و ۱۲	H۱۲	۷۶۶۳۸۷	۳۴۸۳۹۳۰
حدفاصل پد ۹ به ۱۲ جاده اکتشافی	H۱۳	۷۶۴۵۵۵	۳۴۸۲۵۰۸
آزادگان ۳ پد ۱	H۱۴	۷۶۴۲۱۲	۳۴۸۵۸۹۹
پد ۱۶ (اطراف burnpit)	H۱۵	۷۶۳۵۷۳	۳۴۸۹۲۲۴
پد ۱۷ - آزادگان شمالی	H۱۶	۷۶۶۴۶۹	۳۴۸۶۹۲۹
مسیر باکری به سید عرب	H۱۷	۷۷۱۴۲۴	۳۴۹۰۸۴۳
شرق تالاب - دپوی حفاری	H۱۸	۷۶۸۴۳۴	۳۴۷۰۴۳۷
شرق تالاب - دپوی حفاری	H۱۹	۷۶۸۷۷۰	۳۴۷۰۵۹۳
پد ۱۱	H۲۰	۷۶۴۰۴۳	۳۴۶۹۴۱۹
زهکش اقبال - آزادگان جنوبی	H۲۱	۷۶۵۴۱۶	۳۴۶۳۳۲۶
پد ۳۳ - آزادگان جنوبی	H۲۲	۷۶۲۷۷۳	۳۴۵۹۶۰۷
زهکش سلمانه (نیشکر دهخدا)	H۲۳	۷۶۵۵۵۱	۳۴۳۸۰۷۴
سیل‌بند یاران جنوبی	H۲۴	۷۵۸۵۶۸	۳۴۴۲۸۲۶
بخش شمالی حوضچه شماره ۵	H۲۵	۷۶۴۸۶۵	۳۴۴۸۷۱۴
چاه آزادگان ۵	H۲۶	۷۶۷۷۴۸	۳۴۵۷۶۴۲
ورودی زهکش اقبال به تالاب	H۲۷	۷۷۴۷۹۳	۳۴۶۲۲۷۷

• روش نمونه برداری و آنالیز شیمیایی

به منظور ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات سنگین در رسوبات تالاب هورالعظیم، پس از تعیین ایستگاه‌های نمونه برداری، عملیات نمونه برداری از رسوبات سطحی در پاییز سال ۱۳۹۸ انجام شد. در مجموع، ۲۷ ایستگاه نمونه برداری انتخاب و در هر ایستگاه سه نمونه تکراری از رسوبات سطحی (عمق ۰ تا ۵ سانتی متر) با استفاده از گرب و ونوین^۱ با سطح مقطع ۱۰۰۰ سانتی متر مربع جمع‌آوری گردید. پس از برداشت نمونه‌ها، لایه سطحی رسوبات با استفاده از کاردک یا بیلچه پلی‌اتیلنی (غیرفلزی) که از قبل اسیدشویی شده بود، جدا و بقایای گیاهی، قطعات درشت سنگ، و سایر مواد خارجی از نمونه‌ها حذف شدند (Li et al., 2022). سپس نمونه‌های رسوب پس از انتقال به آزمایشگاه، در دمای ۵۰ تا ۵۵ درجه سانتی گراد به مدت ۷۲ ساعت در آون خشک شدند تا وزن ثابت حاصل شود. نمونه‌های خشک شده با استفاده از هاون آسیاب و از الک با قطر منافذ ۶۳ میکرومتر عبور داده شدند و تا زمان انجام آنالیزهای شیمیایی در ظروف پلی‌اتیلنی در بسته و در یخچال (دمای ۴ درجه سانتی گراد) نگهداری شدند. استفاده از بخش ریزدانه رسوبات ($<63 \mu m$) سطح ویژه بالا و ظرفیت بیشتر در جذب فلزات سنگین، به عنوان روش استاندارد در مطالعات آلودگی رسوبات توصیه شده است (Kachoueian et al., 2024). به منظور تعیین غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب، از روش هضم اسیدی^۲ استفاده شد. در ابتدا، نمونه‌های رسوب به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به طور کامل حذف شود. سپس حدود ۱ گرم از هر نمونه خشک و همگن با دقت ۰۰۰/۱۰ گرم توزین و در ظروف تفلونی مخصوص هضم قرار گرفت. به منظور استخراج فلزات، نمونه‌ها با مخلوطی از اسید نیتریک (۶۹٪) و اسید پرکلریک (۶۰٪) با نسبت حجمی ۴:۱ به مدت ۴ ساعت تحت فرایند هضم اسیدی قرار گرفتند (USEPA, 2007). جهت سنجش غلظت فلزات سنگین (آهن، سرب، کادمیوم، نیکل، کروم، وانادیوم، مس و روی) نمونه‌ها از دستگاه آنالیز پلاسما جفت شده القایی مجهز به طیف‌سنج جرمی (ICP-MS) مدل HP-4500 استفاده گردید.

• صحت و کنترل سنجش فلزات (QA/QC)^۳

به منظور اطمینان از صحت، دقت داده‌های به دست آمده از مراحل هضم نمونه‌ها و تعیین غلظت فلزات سنگین، برنامه کنترل و تضمین کیفیت در تمامی مراحل آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌ها اجرا شد. برای ارزیابی آلودگی احتمالی ناشی از مواد شیمیایی، ظروف آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده، در هر سری آنالیز یک نمونه شاهد تهیه و هم‌زمان با نمونه‌های اصلی تحت تمامی مراحل هضم و آماده‌سازی قرار گرفت. نمونه شاهد شامل تمامی معرف‌های شیمیایی مورد استفاده در فرایند هضم و آب دیونیزه بود، اما فاقد نمونه رسوب بود. پیش از اندازه‌گیری نمونه‌های اصلی، دستگاه ICP-MS با استفاده از نمونه شاهد و محلول‌های استاندارد کالیبره شد. در انتها داده‌های حاصل از نمونه‌های اصلی با داده‌های حاصل از آنالیز نمونه‌های مرجع مقایسه و داده‌های حاصل از نمونه‌های اصلی تصحیح گردید.

• تعیین و محاسبه شاخص‌های وضعیت کیفیت رسوب

• شاخص تجمع زمینی مولر^۴ (Igeo)

برای تعیین میزان آلودگی عناصر در رسوبات، از شاخص ژئوشیمیایی مولر (Muller) که در سال ۱۹۷۹ معرفی شد، استفاده می‌شود. این شاخص یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی میزان تجمع فلزات سنگین در رسوبات نسبت به مقادیر زمینه‌ای و طبیعی منطقه به شمار می‌رود. بر اساس این روش، درجه آلودگی رسوبات در هفت طبقه مختلف و بر مبنای میزان انباشت عناصر محاسبه و طبقه‌بندی می‌گردد (جدول ۲). این شاخص بر پایه رابطه ۱ است:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 B_n} \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در شاخص ژئوانباشتگی (C_n) بیانگر غلظت اندازه‌گیری شده هر فلز در نمونه رسوب و (B_n) نشان‌دهنده غلظت زمینه ژئوشیمیایی همان فلز در رسوبات طبیعی یا شرایط پیش از تأثیر فعالیت‌های انسانی است. در این شاخص، ضریب ۱/۵ به منظور جبران تغییرات طبیعی ناشی از ناهمگنی لیتولوژیکی، فرایندهای زمین‌شناسی و نوسانات طبیعی غلظت عناصر در رسوبات به کار می‌رود (Muller, 1969).

¹ Van Veen Grab

² Wet Acid Digestion

³ Quality Assurance / Quality Control

⁴ Geoaccumulation index

• شاخص ترکیبی آلودگی (CPI)

به منظور ارزیابی وضعیت کلی آلودگی رسوبات به فلزات سنگین، از شاخص ترکیبی آلودگی^۱ (CPI) استفاده شد. محاسبه این شاخص در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله نخست، ضریب آلودگی^۲ (CF) برای هر فلز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن (C^i) غلظت اندازه‌گیری شده فلز i در نمونه رسوب و (C_n^i) غلظت زمینه همان فلز در رسوبات طبیعی یا شرایط پیش از صنعتی شدن است. در مرحله دوم، شاخص ترکیبی آلودگی با استفاده از میانگین ضرایب آلودگی تمامی فلزات مورد بررسی و بر اساس رابطه (۳) محاسبه شد:

$$CPI = \sum_{i=1}^m \frac{C_f^i}{m} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن m بیانگر تعداد فلزات سنگین مورد مطالعه است. در این شاخص، مقدار CPI از میانگین ضرایب آلودگی فلزات مختلف به دست می‌آید و تصویری کلی از وضعیت آلودگی رسوبات ارائه می‌دهد؛ به گونه‌ای که مقادیر شاخص CPI کمتر از ۱ بیانگر شرایط غیرآلوده بودن رسوبات است، در حالی که مقادیر برابر یا بزرگ‌تر از ۱ نشان‌دهنده وجود آلودگی ناشی از فلزات سنگین در رسوبات مورد بررسی می‌باشد.

جدول ۲. طبقه‌بندی شدت آلودگی رسوبات بر مبنای شاخص ژئوشیمیایی مولر (Muller, 1969)

درجه آلودگی	مقادیر (Igeo)	کلاس (Class)
غیر آلوده	کمتر از ۰	۰
آلودگی حداقل تا متوسط	۰ تا ۱	۱
آلودگی متوسط	۱ تا ۲	۲
آلودگی متوسط تا شدید	۲ تا ۳	۳
آلودگی شدید	۳ تا ۴	۴
آلودگی شدید تا بسیار شدید	۴ تا ۵	۵
آلودگی بسیار شدید	بیشتر از ۵	۶

• پردازش داده‌ها

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Excel و SPSS انجام شد. در گام نخست نرمال بودن داده‌های مربوط به غلظت فلزات سنگین در رسوبات با استفاده از آزمون‌های شاپیرو-ویلک و کولموگروف - اسمیرنوف ارزیابی شد. سپس برای مقایسه میانگین غلظت فلزات بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه و همچنین پس از آزمون توکی برای مقایسه بین گروه‌ها در سطح معنی داری ۰/۰۵ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج مربوط به میانگین غلظت فلزات سنگین بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک در رسوبات ایستگاه‌های مورد مطالعه همراه با مقادیر موجود در پسته زمین و رسوبات جهانی در جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج تحلیل‌های آماری بین میانگین غلظت فلزات مورد مطالعه در ایستگاه‌های مختلف، تفاوت معناداری وجود داشت ($ANOVA, P < 0/05$). نتایج به دست آمده نشان داد که میانگین غلظت فلزات کادمیوم، سرب و نیکل به میزان قابل توجه از میانگین غلظت آن‌ها در رسوبات جهانی و پسته زمین بیشتر بود. بیشترین غلظت فلزات سنگین در رسوبات ایستگاه‌های مورد مطالعه در تالاب هورالعظیم مربوط به ایستگاه‌های شماره ۲ و ۱۹ بود.

¹ Combination Pollution Index

² Contamination Factor

جدول. Error! No text of specified style in document. میانگین غلظت فلزات سنگین در رسوبات تالاب هورالعظیم بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک (Mg/kg) (Taylor, 1964)

فلزات سنگین	Fe (%)	Cr	Cu	Cd	Pb	Ni	V	Zn
میانگین (Mean)	۲/۱۹	۷۰/۵۶	۲۵/۴۹	۰/۲۶	۲۴/۴۴	۱۰۶/۴۹	۴۷/۲۶	۶۳/۰۱
انحراف استاندارد (SD)	۰/۵۳	۱۹/۹۷	۶/۷۳	۰/۱۲۲	۷۱/۲۹	۳۴/۵۴	۸/۵۸	۷۸/۵۸
میانگین پوسته	۵/۶۳	۱۰۰	۵۵	۰/۲	۱۲/۵	۷۵	۱۳۵	۷۰
میانگین غلظت در شیل	۴/۷۲	۱۰۰	۴۵	۰/۳	۱۹	۶۸	۱۳۰	۹۵

توالی غلظت فلزات سنگین در رسوبات تالاب به این صورت بدست آمد: $Fe > Ni > Cr > Zn > V > Cu > Pb > V$

غلظت بالاتر آهن نسبت به سایر فلزات در رسوبات تالاب هورالعظیم با ویژگی‌های طبیعی پوسته زمین و فراوانی بالای این عنصر در کانی‌های سیلیکاته و اکسیدهای سازگار است. از این رو، غلظت نسبتاً زیاد آهن در رسوبات، لزوماً نشان‌دهنده آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی نیست و در بسیاری از مطالعات به عنوان عنصری با منشأ عمدتاً لیتوژنیک (طبیعی) معرفی شده است (Li et al., 2022; Reimann and de Caritat, 2005). علاوه بر این، الگوی توزیع غلظت فلزات سنگین در مطالعه حاضر با نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در سایر تالاب‌ها و اکوسیستم‌های آبی مطابقت دارد؛ به گونه‌ای که عناصر آهن و منگنز معمولاً بیشترین غلظت را در رسوبات نشان می‌دهند، در حالی که عناصری مانند کادمیوم، سرب و نیکل عمدتاً تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی از جمله توسعه زیر ساخت‌های صنعتی، تخلیه پساب، فعالیت‌های معدنی و نفتی و همچنین رواناب‌های کشاورزی قرار دارند (Kachoueian et al., 2024; Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011). ارزیابی‌های صورت گرفته بیانگر این موضوع بود که ایستگاه‌های شماره ۱۹ و ۲۰ تالاب هورالعظیم دارای بالاترین غلظت فلزات سنگین هستند، که این امر احتمالاً به علت تمرکز بالایی صنایع حفاری و اکتشافات نفت (میدان نفتی یادآوران و آزادگان)، خطوط لوله انتقال و توسعه زیرساخت‌های صنعتی در نزدیکی این ایستگاه‌ها بود. در میان فلزات سنگین اندازه‌گیری‌شده، فلزات نیکل، وانادیوم و کروم دارای غلظت‌های نسبتاً بالایی بودند. افزایش غلظت این عناصر در رسوبات تالاب هورالعظیم می‌تواند بیانگر تأثیر فعالیت‌های مرتبط با صنعت نفت باشد، زیرا نیکل و وانادیوم از عناصر شاخص موجود در نفت خام، گل‌های حفاری و برخی فرآورده‌های نفتی محسوب می‌شوند و معمولاً به عنوان ردیاب‌های ژئوشیمیایی آلودگی‌های نفتی در محیط‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Pereira et al., 2018). علاوه بر این، کروم نیز می‌تواند در اثر فعالیت‌های حفاری، فرسایش تجهیزات صنعتی و ورود پساب‌های صنعتی به محیط‌های آبی افزایش یابد. با توجه به موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری، مهم‌ترین منابع احتمالی ورود این فلزات به رسوبات تالاب هورالعظیم شامل توسعه و بهره‌برداری از میدان نفتی یادآوران و آزادگان، عملیات حفاری و اکتشاف چاه‌های نفت، استقرار دپوی پسماندها و گل‌های حفاری، خطوط انتقال نفت، تردد شناورهای صیادی و باری، ته‌نشست جوی آلاینده‌ها و ورود رواناب‌ها و پساب‌های شهری و صنعتی به تالاب است (Hashemizad et al., 2025; Mirza et al., 2014). یافته‌های این پژوهش در ایستگاه‌های مورد بررسی، با نتایج مطالعات انجام‌شده در سایر مناطق جهان که به بررسی ترکیبات و غلظت فلزات سنگین (بر حسب میلی گرم بر گرم وزن خشک) پرداخته‌اند، مقایسه شده است (جدول ۴). نتایج حاصل از این مقایسه نشان داد که غلظت فلزات سنگین مورد بررسی، به ویژه نیکل، کروم و وانادیوم، در محدوده گزارش‌شده برای مطالعات انجام‌شده در شمال و شمال غرب خلیج فارس و نیز تالاب انزلی قرار دارد، که این مناطق به ترتیب توسط Neystani و همکاران (۲۰۱۶) و Zare و Khoshghbal و همکاران (۲۰۱۳) مورد مطالعه قرار گرفته بود. مقایسه غلظت فلزات سنگین با استانداردهای راهنمای کیفیت رسوبات^۱ (SQGs) یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی اولیه وضعیت آلودگی و احتمال بروز اثرات زیستی ناشی از آلاینده‌ها در اکوسیستم‌های آبی است. این استانداردها با فراهم کردن مقادیر آستانه برای آلاینده‌های مختلف، امکان ارزیابی خطرات بالقوه برای موجودات بتریک و سایر جاندارانی را که به طور مستقیم یا غیرمستقیم با رسوبات در ارتباط هستند را فراهم می‌کنند (MacDonald et al., 2000).

¹ Sediment Quality Guidelines (SQGs)

جدول ۴. مقایسه غلظت فلزات سنگین این مطالعه با سایر مطالعات در ایران و جهان (Mg/Kg)

منطقه	Cd	Pb	Ni	V	Cu	Zn	Cr	منابع
مصب فنی، بنگلادش	NA	۶/۴۷	۳۳/۲۷	NA	۳۵/۳۳	NA	۳۵/۸۲	Saiful islam et al (2018)
تالاب، امیرکلاهی	۰/۲۶	۱۶/۰۸	۱۳/۴۲	۳۲/۶۷	۱۸/۱۷	۵۵/۰۸	۱۲/۰۸	Zare Khosheghbal et al. (2018)
منطقه حرای خورخوران، ایران	۲/۶۳	۷/۹۴	۱۰۱/۴۸	NA	۲۰/۹۸	۴۹/۳۹	NA	Zarezadeh et al.(2017)
شمال غربی خلیج فارس	۰/۸	۳۴/۱۰	۱۱۲/۱۱	NA	۳۲/۱۰	۶۲/۵۰	۸۹	Pejman et al.(2016)
شمال خلیج فارس	۰/۸۲	۸	۹۶/۸	NA	۲۲/۱	۵۴/۹۰	۱۰۱/۷	Neystani et al. (2016)
خلیج فارس	۴/۱۹	۳۰/۸۳	NA	NA	۳۲/۸۶	۶۲/۰۸	NA	Bastami et al. (2015)
تالاب انزلی، ایران	۰/۲۵	۲۲/۸۷	۶۸/۲۳	۱۲۱/۳۳	۵۴/۵۸	۱۰۹/۸۳	۹۸/۷۲	Zare Khosheghbal et al. (2013)
تالاب شادگان، ایران	۴/۷۰	۱۴/۲	NA	NA	۱۴/۸	۳۶/۴	NA	Hosseini. (2011)
شمال غرب خلیج فارس	NA	۴۴	۱۰۹	NA	۲۲	۶۳	NA	Karbasi et al. (2005)
خلیج فارس، قطر	-۰/۰۹ ۰/۰۳	۰/۴۳-۳/۸۸	۰/۷۴-۲۰/۸	-۳۲/۱ ۲/۷	۸/۱۷-۱/۲۲	NA	-۴۰/۸ ۱۱/۵	De Mora et al.(2004)
خلیج فارس، امارات	-۰/۱۱ ۰/۰۲	۰/۶۹-۵/۸۸	۲-۱۰۱۰	-۴/۵ ۳۵/۵	۰/۶۴-۳/۵۸	NA	۱۷/۶-۳۰۳	De Mora et al.(2004)
خلیج فارس، بحرین	-۰/۱۸ ۰/۰۴	۰/۶۷-۹۹	۲/۴۶-۲۳/۲	-۴/۲۸ ۳/۴۷	۲/۳۸-۴۸/۳	-۵۲/۲ ۶/۱۲	-۴۱/۸ ۳/۳۶	De Mora et al.(2004)
خلیج از میر ترکیه	۰/۱-۰/۸	۷-۱۰۳	۱۳-۱۴۶	NA	۴-۷۹	۲۲-۳۱۱	NA	Kucuksezgin. (2001)
تالاب هورالعظیم، ایران	۰/۲۶	۲۴/۴۴	۱۰۶/۴۹	۴۷/۲۶	۲۵/۴۹	۶۳/۰۱	۷۰/۵۶	مطالعه حاضر

*N.A : Not Detected

در جدول ۵، نتایج مربوط به غلظت فلزات سنگین اندازه گیری شده با برخی از استانداردها و دستورالعمل های بین المللی کیفیت رسوب مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه شامل راهنمای کیفیت رسوب ارائه شده توسط (NOAA^۱) در ایالات متحده، دستورالعمل های ISQGs کانادا^۲ (ISQGs) و معیارهای تعیین شده توسط USEPA (سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا) می باشد

جدول ۵. مقایسه غلظت فلزات در تالاب های مورد مطالعه با راهنمای های کیفیت رسوب (SQGs)

راهنمای کیفیت رسوب (SQG) فلزات	هورالعظیم	ISQG		US NOAA		USEPA guidlines		
		TEL	PEL	ERL	ERM	Not polluted	Moderately polluted	Heavily polluted
کادمیوم	۰/۲۶	۰/۶۸	۴/۲۱	۱/۲	۹/۶	NA	NA	>۶
سرب	۲۴/۴۴	۳۰/۲	۱۱۲	۴۷	۲۲۰	<۴۰	۴۰-۶۰	>۶۰
مس	۲۵/۴۹	۱۸/۷	۱۰۸	۳۴	۲۷۰	<۲۰	۲۰-۵۰	>۵۰
روی	۶۳/۰۱	۱۲۴	۲۷۱	۱۵۰	۴۱۱	<۹۰	۹۰-۲۰۰	>۲۰۰
نیکل	۱۰۶/۴۹	۱۵/۹	۴۲/۸	۲۱	۵۲	<۲۰	۲۰-۵۰	>۵۰
وانادیوم	۴۷/۲۶	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
کروم	۷۰/۵۶	۵۲/۳	۱۶۰	۸۱	۳۷۰	<۲۵	۲۵-۷۵	>۷۵

TEL= Threshold effect level

PEL= Probable effect level

ERL= Effects rang low

ERM= Effects range median

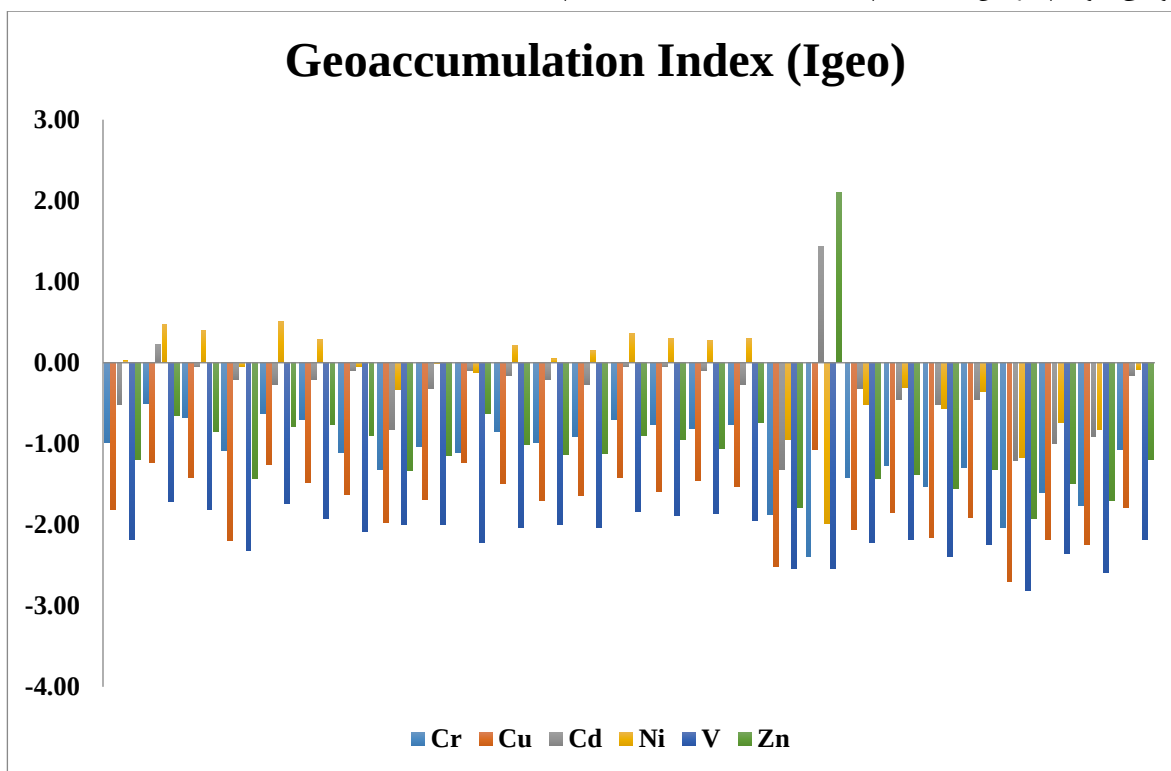
NOAA= National Oceanic and Atmospheric Administration

USEPA guidelines

مقایسه غلظت فلزات سنگین اندازه گیری شده با دستورالعمل های کیفیت رسوبات نشان داد که غلظت فلزات سرب، کادمیوم، مس و روی در تمامی ایستگاه های نمونه برداری کمتر از مقادیر ERL (حدی که کمتر از ۱۰ درصد جوامع بیولوژیک در خطرند) و ERM (حدی که کمتر از ۵۰ درصد جوامع بیولوژیک در خطرند) ارائه شده توسط سازمان ملی اقیانوسی و جوی آمریکا و همچنین پایین تر از مقادیر آستانه TEL (حد آستانه) و PEL (حدی که موجب اثرات زیان آور می شود) در دستورالعمل کیفیت رسوبات کانادا بود. قرار گرفتن غلظت این فلزات در محدوده پایین تر از مقادیر آستانه بیانگر آن است که احتمال بروز اثرات زیان بار بر موجودات کفزی بسیار اندک بوده و در شرایط حاضر این عناصر

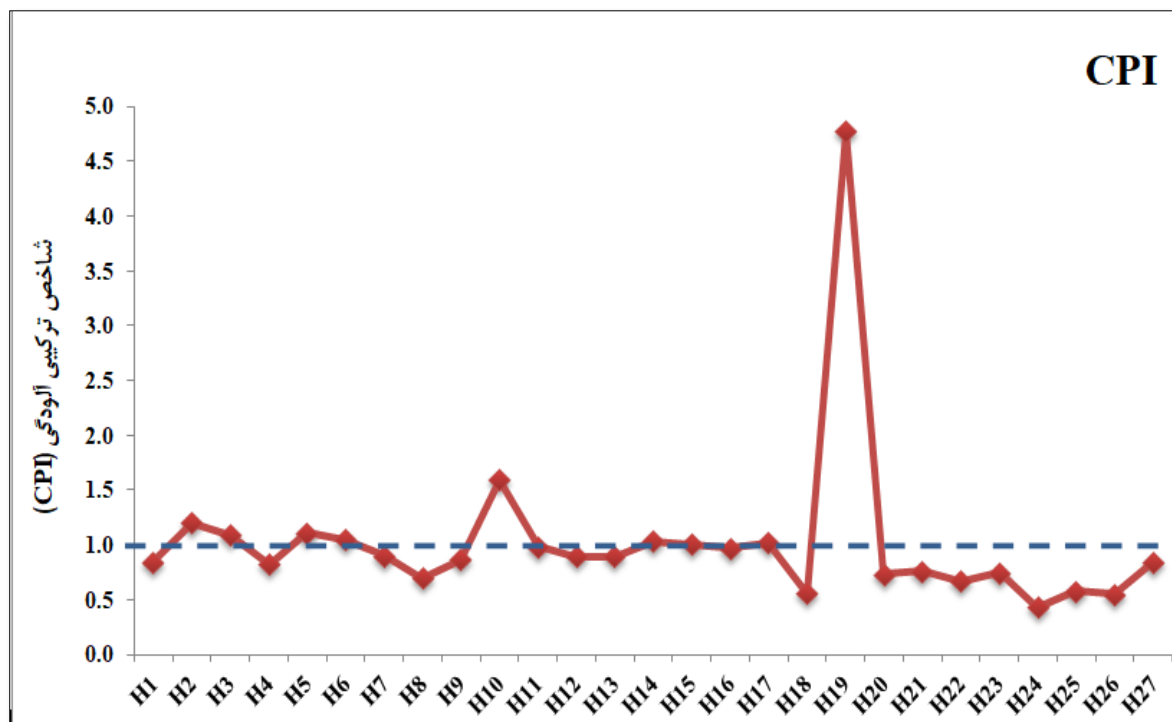
¹ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)² Canadian interim marine sediment quality (ISQG)

تهدید قابل توجهی برای سلامت زیستی تالاب هورالعظیم ایجاد نمی‌کنند. با این حال ارزش اکولوژیکی تالاب هورالعظیم در کنار توسعه روزافزون فعالیت‌های صنعتی و پروژه‌های عمرانی در حوضه آبریز این تالاب، می‌تواند در بلندمدت موجب افزایش بار آلاینده‌ها و تغییر کیفیت رسوبات شود. از این رو، استمرار برنامه‌های پایش، کنترل منابع آلاینده و اجرای راهبردهای مدیریتی مؤثر برای حفاظت از این اکوسیستم ارزشمند ضروری به نظر می‌رسد. در مقابل، نتایج نشان داد که غلظت فلز نیکل در بسیاری از ایستگاه‌ها از تمام سطوح استانداردهای کیفیت رسوب آمریکا (ERL و ERM) و استاندارد کیفیت رسوب کانادا TEL و PEL بیشتر است. این موضوع نشان‌دهنده احتمال بالای وقوع اثرات نامطلوب زیستی بوده و بر اساس معیارهای ارزیابی کیفیت رسوبات (EPA)، بیانگر آلودگی نسبتاً شدید رسوبات از نظر این عنصر است. همچنین، غلظت فلز کروم در برخی ایستگاه‌ها از مقدار TEL فراتر رفت، در حالی که از مقدار PEL کمتر بود؛ بنابراین، احتمال وقوع اثرات زیستی ناشی از این عنصر در سطح متوسط ارزیابی گردید. همچنین نتایج مقایسه نشان داد که غلظت نیکل در رسوبات تالاب از تمامی حدود پیشنهادی در استانداردهای کیفیت رسوب ایالات متحده (ERL و ERM) و همچنین معیارهای کانادایی (TEL و PEL) فراتر می‌باشد. براساس طبقه‌بندی‌های ارائه شده توسط USEPA، این وضعیت بیانگر قرارگیری تالاب در سطح آلودگی شدید نسبت به عنصر نیکل است. در مورد فلز کروم، مقادیر اندازه‌گیری شده تنها از حد آستانه TEL فراتر رفته است. براین اساس و مطابق با دستورالعمل طبقه‌بندی USEPA، رسوبات تالاب از نظر آلودگی به فلز کروم در محدوده آلودگی متوسط ارزیابی می‌شوند. جهت تعیین شدت آلودگی فلزات در رسوبات از شاخص ژئوشیمیایی مولر که در سال ۱۹۷۹ تدوین شد استفاده شد. دامنه شاخص مولر در فلزات ایستگاه‌های مورد بررسی بین ۲/۸۱- تا ۲/۱۱ بدست آمد که بیانگر وضعیت غیر آلوده تا متوسط در رسوبات تالاب بود (شکل ۲). همچنین نتایج حاصل از این شاخص در تالاب هورالعظیم نشان داد که رسوبات تالاب هورالعظیم از نظر آلودگی به فلز نیکل در برخی از ایستگاه‌ها دارای سطح آلودگی غیر آلوده تا آلودگی متوسط، فلز کادمیوم در دو ایستگاه دارای آلودگی متوسط بوده و فلز سرب نیز در ایستگاه‌های ۱۰ و ۱۹ دارای آلودگی متوسط تا زیاد هستند. همچنین نتایج حاصل از این شاخص نشان داد که ایستگاه‌های مورد مطالعه در تالاب هورالعظیم نسبت به سایر فلزات سنگین مطالعه شده در کلاس صفر یعنی غیر آلوده قرار می‌گیرند. فرآیندهای نفتی و شیمیایی یکی از عوامل اصلی تهدید اکوسیستم ارزشمند تالاب هورالعظیم می‌باشد. نتایج بدست آمده از بررسی شاخص تجمع زمینی مولر در تالاب هورالعظیم آلودگی متوسط تا زیاد فلزات نیکل و کادمیوم در برخی از ایستگاه‌ها و سطح غیر آلوده سایر فلزات سنگین در تالاب‌ها را نشان داد. یافته‌های این پژوهش با نتایج گزارش شده از رسوبات رودخانه مرو در بریتانیا نیز قابل مقایسه است. در آن مطالعه نیز مقادیر شاخص زمین‌انباشت (Igeo) در اغلب ایستگاه‌ها کمتر از صفر بوده که بیانگر شرایط غیر آلوده در بخش‌های مورد بررسی است. همچنین برای برخی عناصر مانند سرب و کروم، مقادیر Igeo در محدوده صفر تا یک (از غیر آلوده تا آلودگی متوسط) گزارش شده است (Birch and Taylor, 2000).



شکل ۲. نتایج شاخص ژئوشیمیایی مولر در رسوبات تالاب هورالعظیم

جهت تعیین وضعیت کلی آلودگی رسوبات تالاب هورالعظیم به فلزات سنگین از شاخص ترکیبی آلودگی (CPI) استفاده شد. نتایج مربوط به شاخص ترکیبی آلودگی تالاب هورالعظیم (شکل ۳) نشان داد که رسوبات تالاب هورالعظیم به‌استثنای ایستگاه‌های شماره ۱۹، ۱۰، ۲ و ۳ که دارای مقادیری بالاتر از یک هستند، که بیانگر آلوده بودن آنهاست، در باقی مناطق تالاب همگی دارای سطح پایین از یک بودند که نشان دهنده غیرآلوده بودن رسوبات این منطقه به فلزات سنگین است.



شکل ۳. نتایج شاخص ترکیبی آلودگی در رسوبات تالاب هورالعظیم

۴- نتیجه‌گیری

مقایسه غلظت فلزات سنگین در رسوبات تالاب هورالعظیم نشان داد که توزیع این فلزات در ایستگاه‌های مختلف یک‌نواخت نیست و برخی نقاط دارای مقادیر بالاتری نسبت به سایر ایستگاه‌های نمونه برداری شده است. بالاترین غلظت در ایستگاه‌های دیپوی حفاری چاه‌های نفتی (ایستگاه‌های شماره ۲ و ۱۹) مشاهده شد. علت بالا بودن غلظت در این دو ایستگاه احتمالاً ناشی از تمرکز بالای صنایع حفاری و اکتشافات نفت (طرح توسعه میدان نفتی یادآوران و آزادگان)، خطوط لوله انتقال و توسعه زیرساخت‌های صنعتی در نزدیکی این ایستگاه‌ها بود. نکته قابل توجه این بود که غلظت بالای فلزات نیکل، وانادیوم، کرم و سرب در ایستگاه‌های مورد مطالعه بویژه در این دو ایستگاه نشان دهنده تاثیر بالای پروژه‌های نفتی و تخلیه پساب‌های صنعتی در آلودگی رسوبات تالاب به فلزات سنگین می‌باشد. مهم‌ترین منابع آلاینده فلزی در تالاب هورالعظیم شامل منابع انسانی از جمله مجاورت با صنایع نفتی و پتروشیمی، تخلیه پساب‌های تصفیه‌نشده شهری و کشاورزی، دفع زباله‌های شهری و روستایی، پساب حاصل از شستشو و تعمیر قایق‌های صیادی و باری و همچنین منابع طبیعی از جمله ته‌نشست‌های اتمسفری و فرسایش رودخانه‌ای اشاره کرد. نتایج ارزیابی وضعیت آلودگی رسوبات تالاب به فلزات سنگین و پیامدهای اکولوژیکی آن‌ها براساس شاخص ژئوشیمیایی مولر (Igeo)، نشان داد که رسوبات تالاب هورالعظیم در مجموع در محدوده‌ای غیرآلوده تا آلودگی متوسط قرار دارد. نتایج ارزیابی تعیین وضعیت آلودگی رسوبات تالاب به فلزات و اثرات اکولوژیکی آن‌ها با استفاده از شاخص‌های آلودگی نشان داد که رسوبات تالاب هورالعظیم براساس شاخص ژئوشیمیایی مولر (Igeo) دارای وضعیت غیر آلوده تا آلودگی متوسط رسوبات نسبت به فلزات سنگین بود. نتایج مربوط به شاخص ترکیبی آلودگی (CPI) تالاب هورالعظیم نشان داد که رسوبات تالاب هورالعظیم به‌استثنای ایستگاه‌های شماره ۱۹، ۱۰، ۲ و ۳ که دارای مقادیری بالاتر از یک هستند، که بیانگر آلوده بودن آنهاست، در باقی مناطق تالاب همگی دارای سطح پایین از یک بودند که نشان دهنده غیر آلوده بودن رسوبات این منطقه به فلزات سنگین است. در نهایت، مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری فلزات سنگین در رسوبات تالاب با دستورالعمل‌های کیفیت رسوب نشان داد که فلزات نیکل و کروم از نظر پتانسیل خطر محیط‌زیستی در سطح بالاتری قرار دارند. این دو عنصر بیشترین تهدید را برای سلامت اکوسیستم تالاب ایجاد کرده و می‌تواند اثرات نامطلوب قابل توجهی بر موجودات آبی، به‌ویژه جوامع بنتیک، داشته باشند. بنابراین، این نتایج بر ضرورت اجرای اقدامات پیشگیرانه، تقویت نظام مدیریت محیط‌زیست و اعمال پایش مستمر در این اکوسیستم تأکید می‌کند.

- Alloway, B.J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability (3rd ed.). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Bastami, K.D., Afkhami, M., Mohammadizadeh, M., Ehsanpour, M., Chambari, S., Aghaei, S., Esmailzadeh, M., Neyestani, M.R., Lagzaee, F., & Baniamam, M. (2015). Bioaccumulation and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments and mullet *Liza klunzingeri* in the northern part of the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, *94*(1-2), 329-334.
- Birch, G.F., Taylor, S.E (2002). Assessment of possible sediment toxicity of contaminated sediments in Port Jackson, Sydney, Australia. *Hydrobiologia* 472: 19-27.
- De Mora, S., Fowler, S.W., Wyse, E., & Azemard, S. (2004). Distribution of heavy metals in marine bivalves, fish and coastal sediments in the Gulf and Gulf of Oman. *Marine Pollution Bulletin*, *49*(5-6), 410-424.
- Fuladavand, S., & Sayyad, G.A. (2015). The impact of Karkheh dam construction on reducing the extent of wetlands of Hoor-Alazim. *Journal of Water Resources and Ocean Science*, *4*(2), 33-38.
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, *14*(8), 975-1001.
- Han, D., Cheng, J., Hu, X., et al. (2017). Spatial distribution, risk assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1–2), 141–148.
- Hashemizad, S.A., Charcigi, A., & Hosseni, F. (2025). The distribution pattern of heavy metals in the sediments of HurolAzim lagoon located in the west of Khuzestan. *Advanced Applied Geology*, *14*, 957-975.
- Hosseini Alhashemi, A., Karbasi, A.R., & Kiabi, B. (2011). Accumulation and bioaccessibility of trace elements in wetland sediments. *African Journal of Biotechnology*, *10*, 1625-1636.
- Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L., & Zhang, H. (2017). Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, *586*, 319-327.
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Kachoueian, F., Karbassi, A., Nasrabadi, T., Rashidiyan, M., & De-la-Torre, G.E. (2024). Speciation characteristics, ecological risk assessment, and source apportionment of heavy metals in the surface sediments of the Gomishan Wetland. *Marine Pollution Bulletin*, *198*, 115835.
- Karbasi, A.R., Nabi-Bidhendi, G.R., & Bayati, I. (2005). Environmental geochemistry of heavy metal in a sediment core off Bushehr, Persian Gulf, Iran. *Journal of Environment Health Science Engineering*, *2*, 255-260.
- Kucuksezgin, F. (2001). Distribution of heavy metals in the surficial sediments of Izmir Bay (Turkey). *Toxicological and Environmental Chemistry*, 80, 203-207.
- Li, C., Wang, H., Liao, X., Xiao, R., Liu, K., Bai, J., Li, B., & He, Q. (2022). Heavy metal pollution in coastal wetlands: A systematic review of studies globally over the past three decades. *Journal of Hazardous Materials*, *424*, 127312.
- Long, E.R., MacDonald, D.D., Smith, S.L., & Calder, F.D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, *19*, 81-97.
- MacDonald, D.D., Ingersoll, C.G., & Berger, T.A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystem. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *39*, 20-31.
- Mao, C., Du, S., Zhang, G., Wang, Y., & Rao, W. (2022). Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of a tropical mangrove wetland on Hainan Island, China. *Water*, *14*(22), 3785.
- Mirza, R., Mohammady, I., Faghiri, E., Abedi, A., Fakhri, A., Azimi, M.A., & Zahed, M.A. (2014). Source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment samples

- from the northern part of the Persian Gulf, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, *186*, 7387-7398.
- Mirzaei, R., Conroy, J., & Yoxon, P. (2010). Otters in the Hawr al Azim wetland, Iran. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, *21*(1), 83-88.
 - Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, *2*, 108-118.
 - Neyestani, M.R., Bastami, K.D., Esmaeilzadeh, M., Shemirani, F., Khazaali, A., Molamohyeddin, N., Afkhami, M., Nourbakhsh, S., Dehghani, M., Aghaei, S., & Firouzbakht, M. (2016). Geochemical speciation and ecological risk assessment of selected metals in the surface sediments of the northern Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, *109*, 603-611.
 - Pan, F., Xiao, K., Guo, Z., & Li, H. (2022). Effects of fiddler crab bioturbation on the geochemical migration and bioavailability of heavy metals in coastal wetlands. *Journal of Hazardous Materials*, *437*, 129380.
 - Pejman, A., Bidhendi, G.N., Ardestani, M., Saeedi, M., & Baghvand, A. (2015). A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study. *Ecological Indicators*, *58*, 365-373.
 - Pereira, T.L., Wallner-Kersanach, M., Costa, L.F., Costa, D.P., & Baisch, P.R.M. (2018). Nickel, vanadium, and lead as indicators of sediment contamination of marina, refinery, and shipyard areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 1719-1730.
 - Perin, G., Fabris, R., Manente, S., Wagener, A.R., Hamacher, C. and Scotto, S (1997). A five years study on the heavy metal pollution of Guanabara bay sediments (Rio De Janeiro, Brazil) and evaluation of the metal bioavailability by means of geochemical speciation. *Water Research* 31: 3017-3028.
 - Ramsar Convention Secretariat. (2024). The List of Wetlands of International Importance. Gland, Switzerland: Ramsar Convention on Wetlands.
 - Reimann, C., & de Caritat, P. (2005). Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: Regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, *337*(1-3), 91-107.
 - Saiful Islam, M., Belal, H.M., Abdul, M., & Sarker, M.D. (2018). Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh. *Chemosphere*, *202*, 25-35.
 - Taylor, S.R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. Ge-
 - U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (2007). Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils. Washington, DC: USEPA.
 - Wu, J., Rong, S., Wang, M., Lu, R., & Liu, J. (2022). Environmental quality and ecological risk assessment of heavy metals in the Zhuhai Coast, China. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 898423.
 - Zare Khosheghbal, M., & Esmaeizadeh, M. (2018). Evaluating of heavy metal pollution in Amir-Kalayeh wetland using geochemical and statistical analyses. *Water Science and Technology*, *76*, 1276-1286.
 - Zare Khosheghbal, M., Charkhabi, A.H., Sharifi, F., & Ghazban, F. (2013). An investigation of sediment pollution in the Anzali wetland. *Polish Journal of Environmental Studies*, *22*, 277-282.
 - Zarezadeh, R., Rezaee, P., Lak, R., Masoodi, M., & Ghorbani, M. (2017). Distribution and accumulation of heavy metals in sediments of the northern part of mangrove in Hara Biosphere Reserve, Qeshm Island (Persian Gulf). *Soil and Water Research*, *12*, 86-95.