

ORIGINAL ARTICLE

## Spatial analysis and assessment of heavy metal pollution indices in sediments of the Hara Protected Area and the Khour-e-Khoran International Wetland

Sadegh Rostami Estabragh<sup>1</sup>, Mohsen Dehghani Qhanatghestani<sup>2\*</sup>, Lobat Taghavi<sup>3</sup>, Seied Mahdi Jabbarzadeh Shiadeh<sup>4</sup>

1- Department of Environment, Qe.C., Islamic Azad University, Qeshm, Iran

2- Department of Environment, B.A.C., Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

[m.dehghani933@iau.ac.ir](mailto:m.dehghani933@iau.ac.ir)

3- Department of Environment, S.R.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Department of Fisheries, Qe.C, Islamic Azad University, Qeshm, Iran

### ABSTRACT

Wetlands, particularly mangrove ecosystems, play a crucial role in environmental sustainability by supporting biodiversity, maintaining coastal ecological processes, and providing essential ecosystem services. Despite their ecological and socioeconomic importance, these ecosystems are increasingly affected by anthropogenic pressures, including heavy metal pollution. The accumulation of metals in sediments is of particular concern because sediments can act as repositories of contaminants and represent a potential source of exposure for sediment-associated organisms. Assessing sediment contamination is therefore important for identifying potential ecological risks and informing the conservation and management of mangrove habitats. This study assessed heavy metal contamination and associated ecological risks in the Hara Protected Area and the Khour-e-Khoran International Wetland, which together encompass one of Iran's most ecologically and economically valuable mangrove ecosystems. Sediment concentrations of nickel (Ni), cadmium (Cd), lead (Pb), copper (Cu), zinc (Zn), and iron (Fe) were measured. Contamination was evaluated using the contamination factor (CF) and pollution load index (PLI), while comparisons with sediment quality guidelines (SQGs) were used to assess the potential for adverse biological effects. These complementary approaches provided a basis for evaluating sediment quality and identifying metals of greatest ecological concern. The mean sediment concentrations of Ni, Cd, Pb, Cu, Zn, and Fe were  $86.87 \pm 37.45$ ,  $1.25 \pm 0.76$ ,  $8.32 \pm 5.03$ ,  $61.12 \pm 24.68$ ,  $113.04 \pm 62.31$ , and  $2159.77 \pm 432.64$  mg/kg, respectively. The combined assessment identified Ni and Cd as the principal metals of ecological concern, particularly in relation to potential effects on benthic communities. These findings highlight the importance of interpreting metal concentrations alongside contamination indices and biological effect thresholds, as the ecological significance of individual metals cannot be determined from their concentrations alone. Overall, the results indicate considerable heavy metal contamination in the coastal-marine sediments of the Khour-e-Khoran International Wetland and raise concerns regarding sediment quality and the protection of associated biological communities. Potential implications for food-web integrity warrant further investigation, although sediment concentrations alone do not establish metal bioavailability, uptake, or trophic transfer. The findings support regular sediment monitoring, further investigation of contamination sources, and complementary assessments of metal

### ARTICLE INFO

#### Key words:

Wetland  
Protected area  
Heavy metals  
Ecological risk  
Mangrove forest



Corresponding author:

Email address: [m.dehghani933@iau.ac.ir](mailto:m.dehghani933@iau.ac.ir)

Received: 05 July 2026 | Revised: 31 July 2026 | Accepted: 10 August 2026 | Published online: 24 August 2026

© Authors 2026. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

---

**ORIGINAL ARTICLE**

---

accumulation and biological responses in resident organisms. Such efforts would strengthen the evidence available for management and help safeguard the ecological functions and ecosystem services of this valuable mangrove wetland.

---

## تحلیل فضایی و ارزیابی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در رسوبات منطقه حفاظت شده حرا و تالاب بین‌المللی خورخوران

صادق رستمی<sup>۱</sup>، محسن دهقانی قناتگستانی<sup>۲\*</sup>، لعبت تقوی<sup>۳</sup>، سید مهدی جبارزاده شیاده<sup>۴</sup>

- ۱- گروه محیط زیست، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران.
- ۲- گروه محیط زیست، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران.
- ۳- گروه محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- ۴- گروه شیلات، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران.

### چکیده

تالاب‌ها و به‌ویژه اکوسیستم‌های مانگرو نقش اساسی در پایداری محیط‌زیست و ارائه خدمات اکولوژیکی دارند، اما در سال‌های اخیر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی با آلودگی فلزات سنگین مواجه شده‌اند. در این مطالعه، ارزیابی ریسک اکولوژیکی منطقه حفاظت شده حرا و تالاب بین‌المللی خورخوران، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و ارزشمندترین زیست‌بوم‌های مانگروی ایران با اهمیت اکولوژیکی و اقتصادی بالا، بر اساس اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در رسوبات مورد بررسی قرار گرفت. میانگین غلظت فلزات سنگین  $\text{Fe}$  و  $\text{Zn}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Cd}$ ،  $\text{Ni}$  در رسوبات به ترتیب  $8637/45 \pm 87$ ،  $76/0 \pm 25/1$ ،  $03/5 \pm 32/8$ ،  $68/24 \pm 12/61$ ،  $31/62 \pm 04/113$  و  $432/2159 \pm 77/64$  میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. ارزیابی شاخص‌های آلودگی (CF)، (PLI) و راهنمای کیفیت رسوب (SQGs) نشان داد نیکل و کادمیوم مهم‌ترین عوامل خطر اکولوژیکی برای آبریان بویژه کفزیان منطقه هستند. در مجموع، نتایج حاکی از آلودگی قابل توجه فلزات سنگین در اکوسیستم ساحلی - دریایی تالاب بین‌المللی خورخوران است که می‌تواند پایداری زیست‌محیطی و سلامت زنجیره غذایی را تهدید نماید.

**کلیدواژه‌ها:** تالاب، منطقه حفاظت شده، فلزات سنگین، ریسک اکولوژیکی، جنگل‌های حرا

### نوع مقاله

#### مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۹

تاریخ چاپ الکترونیکی:

۱۴۰۵/۰۶/۰۲

\*نویسنده مسئول:

[m.dehghani933@iaua.ac.ir](mailto:m.dehghani933@iaua.ac.ir)

## مقدمه

تالاب‌ها نقش بسیار مهمی در تأمین نیازهای انسانی و اکولوژیکی دارند. با افزایش آگاهی نسبت به اهمیت و کارکردهای طبیعی تالاب‌ها، توجه به حفاظت و مدیریت آن‌ها نیز رشد قابل توجهی یافته است. تالاب‌ها در سراسر جهان، تحت تأثیر شرایط زیست‌محیطی همچون گرمایش جهانی و خشکسالی و فعالیت‌های انسانی مانند بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی، آبی‌پروری، تغییر کاربری اراضی، ورود رواناب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی دچار تغییرات گسترده شده‌اند و از وسعت و کارکرد اکولوژیکی آن‌ها کاسته شده است [۲ و ۱]. تالاب‌ها از مولدترین اکوسیستم‌های طبیعی روی زمین هستند و طیف وسیعی از خدمات و عملکردهای اکوسیستمی را ارائه می‌دهند [۳ و ۴]. جنگل‌های مانگرو در اکوسیستم‌های تالابی به‌عنوان محل پرورش گونه‌ها، زیستگاه بسیاری از موجودات، منبع اصلی تولید غذا، و نقش حیاتی در تصفیه آب نقش کلیدی دارند. علاوه بر این، آن‌ها باعث تثبیت سواحل، ایجاد مناطق حائل در برابر طوفان‌ها و ذخیره کربن می‌شوند. جنگل‌های مانگرو به‌عنوان مکان تولیدمثل و زیستگاه بسیاری از ماهیان و صدف‌ها عمل می‌کنند و از نظر اقتصادی و اجتماعی ارزش مستقیم و غیرمستقیم دارند [۵]. مطالعات متعددی در طول سال‌ها به بررسی جنگل‌های مانگرو در سراسر جهان پرداخته‌اند، اما اکولوژی این جنگل‌ها و نقش آن‌ها در پایداری اکوسیستم‌های دریایی همچنان موضوع مورد توجه محققان است [۶].

در میان آلاینده‌های مختلف موجود در اکوسیستم‌های تالابی و جنگل‌های حرا، فلزات سنگین از طریق تجمع در زنجیره غذایی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده محسوب می‌شوند. برخی فلزات برای انسان ضروری هستند، به‌ویژه مس و روی، در حالی که برخی دیگر مانند جیوه، سرب و کادمیوم سمی محسوب می‌شوند [۷ و ۸]. بیشتر فلزات سنگین غیرقابل تجزیه همچون آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی، در اولویت بررسی‌های ریسک بوم‌شناختی قرار دارند [۹]. این فلزات به‌واسطه ویژگی‌هایی چون پایداری، سمیت بالا، قابلیت تجمع زیستی<sup>۱</sup> و بزرگنمایی زیستی<sup>۲</sup> در طول زنجیره غذایی، از خطرناک‌ترین انواع آلودگی‌های محیط زیست به‌شمار می‌روند [۱۰ و ۱۱]. فلزات سنگین معمولاً با ته‌نشینی در رسوبات، در چرخه زیستی نقش مهمی ایفا می‌کنند. امروزه آلودگی‌های ناشی از فلزات سنگین به‌دلیل اثرات گسترده بر سلامت انسان و موجودات زنده به‌عنوان یک نگرانی جهانی مطرح هستند. رسوبات دریایی به‌عنوان تله‌هایی برای فلزات سنگین عمل می‌کنند و اغلب شاخص مناسبی برای فعالیت‌های انسانی هستند [۱۲]. با این حال، این رسوبات قادر نیستند فلزات سنگین را برای همیشه نگه دارند، زیرا ممکن است تجزیه شده و دوباره وارد آب شوند. از این رو رسوبات نقش مهمی در ذخیره و انتقال فلزات سمی در اکوسیستم‌های دریایی دارند [۸]. مطالعات Davari و همکاران (۲۰۱۳) در خورهای نوار ساحلی بوشهر نشان دادند میزان آلودگی فلزات سنگین در جنگل‌های مانگرو این منطقه به دلیل وجود تاسیسات نفتی پارس جنوبی، عدم اختلال و جریان آب در رویشگاه مانگرو زیاد است [۱۳]. نتایج Kulkarni و همکاران (۲۰۱۸) و Aljahdali و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که شاخص‌های ارزیابی بیانگر آلودگی متوسط تا زیاد تالاب‌ها و جنگل‌های مانگرو مورد مطالعه بوده است [۱۴ و ۱۵].

از آنجا که تالاب بین‌المللی خورخوران از نظر شیلاتی و تأمین منابع غذایی برای جوامع محلی اهمیت فراوانی دارد، ارزیابی ریسک بوم‌شناختی فلزات سنگین در رسوبات این تالاب، ضرورتی اساسی برای پیشگیری از تشدید آلودگی و حفاظت بلندمدت از کارکردهای اکوسیستمی آن محسوب می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه

تالاب بین‌المللی خورخوران منطقه‌ای به بزرگی ۱۰۰ هزار هکتار در سواحل شمالی خلیج فارس، جنوب غربی بندرعباس و شمال غربی جزیره‌ی قشم قرار گرفته است. این تالاب دلیل در سال ۱۳۵۱ با عنوان منطقه‌ی حفاظت شده حرا تحت حفاظت قرار گرفت. تالاب بین‌المللی خورخوران به دلیل داشتن ۸۰۰۰ هکتار از جنگل‌های مانگرو و تنوع زیستی کم نظیر، از اهمیت زیست‌محیطی بالایی برخوردار است و به عنوان ذخیره‌گاه زیست‌کره در فهرست جهانی یونسکو به ثبت رسیده است. جنگل‌های مانگرو در منطقه‌ی حفاظت شده حرا زیستگاه مهمی برای گونه‌هایی

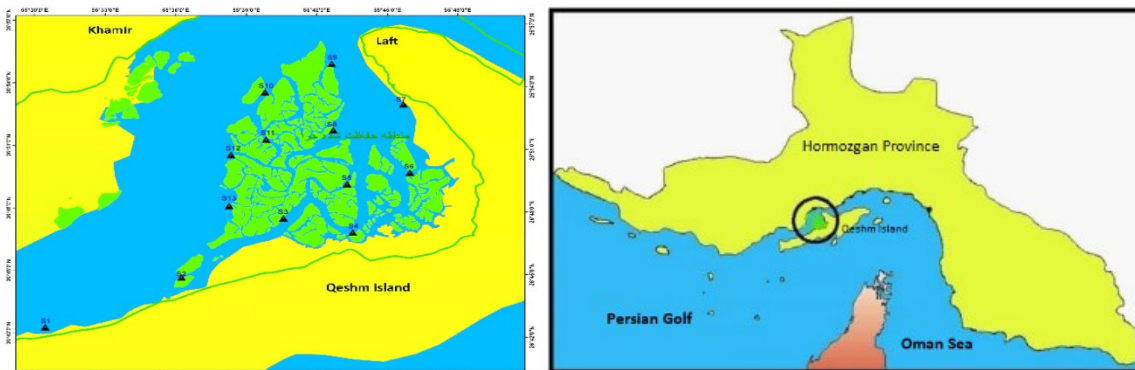
1 Bioaccumulation

2 Biomagnification

متعددی از پرندگان آبی و کنار آبی، ماهیان، سخت‌پوستان، میگوها، صدف‌ها و سایر آبزیان است [۱۶]. احداث سایت‌های پرورش میگو، توسعه بنادر، تردد شناورها و ورود پساب‌های شهری و صنعتی مهمترین منابع آلودگی این منطقه هستند [۱۷].

### نمونه برداری

سیزده ایستگاه در تالاب بین‌المللی خورخوران انتخاب شد. مختصات نقاط نمونه‌برداری با سیستم موقعیت‌یاب جهانی<sup>۳</sup> ثبت و نقشه آن تهیه گردید (شکل ۱). در هر ایستگاه سه نمونه رسوب به صورت تصادفی از عمق ۲۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شد.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های نمونه برداری در منطقه حفاظت شده حرا و تالاب بین‌المللی خورخوران

### هضم نمونه‌ها و اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین

هضم میکروویوی نمونه‌های جمع‌آوری شده رسوبات بر اساس روش‌های استاندارد EPA3051 انجام شد. ابتدا نمونه‌های رسوب پس از خشک شدن، از الک ۶۳ میکرومتر عبور داده شدند. برای هضم، به ۰/۲ گرم از نمونه‌های رسوب، ۲ میلی‌لیتر  $\text{HNO}_3$ ، ۶ میلی‌لیتر  $\text{HCl}$  و ۲ میلی‌لیتر  $\text{HF}$  افزوده شد. سپس نمونه‌ها روی هات‌پلیت در دمای ۱۵۰-۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵۰ دقیقه قرار داده شدند تا هضم نمونه‌ها کامل شود [۱۹ و ۱۸]. سپس غلظت یون‌های فلزی  $\text{Fe}$ ،  $\text{Zn}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Pb}$ ،  $\text{Cd}$ ،  $\text{Ni}$  با استفاده از دستگاه جذب اتمی Agilent مدل ۷۵۰۰ اندازه‌گیری شد. برای اطمینان از نتایج، هر آزمایش سه بار تکرار شد.

### محاسبه شاخص‌های ریسک بوم‌شناختی رسوبات

جهت ارزیابی ریسک بوم‌شناختی، از تعدادی از مهمترین شاخص‌های آلودگی به شرح ذیل استفاده گردید:

#### - فاکتور آلودگی<sup>۴</sup> (Cf)

فاکتور آلودگی توسط Håkansson (۱۹۸۰) معرفی گردید [۲۰] که بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$Cf = \frac{Mx}{Mb} \quad (1)$$

در این معادله:  $Mx$ : میزان غلظت آلاینده در نمونه مورد نظر و  $Mb$ : غلظت استاندارد همان آلاینده است. همچنین میزان آلودگی رسوبات بر اساس جدول ۱ درجه بندی شد.

جدول ۱. طبقه‌بندی ریسک زیست‌محیطی رسوبات بر مبنای فاکتور آلودگی (Cf)

| محدوده Cf | شدت آلودگی رسوبات |
|-----------|-------------------|
|-----------|-------------------|

3 GPS

4 Contamination factor

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| آلودگی پایین       | $Cf \leq 1$        |
| آلودگی متوسط       | $1 \leq Cf \leq 3$ |
| آلودگی قابل ملاحظه | $3 \leq Cf \leq 6$ |
| آلودگی بسیار بالا  | $Cf \geq 6$        |

#### – شاخص بار آلودگی<sup>۵</sup> (PLI)

PLI به عنوان یک ابزار ترکیبی برای ارزیابی میزان آلودگی یک منطقه برای مجموعه مشخصی از فلزات سنگین به کار می‌رود [۲۱]. معادله ۲ برای محاسبه PLI استفاده شد:

$$PLI = (CF_1 * CF_2 * CF_3 * ... * CF_n)^{1/n} \quad (2)$$

که در آن، n تعداد فلزات و CF فاکتور آلودگی است. مقدار PLI برابر با ۱، نشان‌دهنده عدم وجود آلودگی بالقوه است، در حالی که  $PLI > 1$  نشان‌دهنده آلوده بودن محل می باشد.

#### – دستورالعمل‌های کیفیت رسوبات<sup>۶</sup> (SQG)

اثرات نامطلوب آلاینده‌ها، از جمله فلزات سنگین، بر جنبه‌های بوم‌شناسی رسوبات و موجودات حساس وابسته به بستر رسوبی، با استفاده از دستورالعمل‌های کیفیت رسوب توسعه یافته (SQGs) برای تالاب بین‌المللی خورخوران بررسی گردید [۲۲ و ۲۳]. میانگین نسبت سطح اثر محتمل برای تمامی فلزات (mPEL-Q) مطابق رابطه ۳ تعیین شد:

$$mPEL-Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Ci}{PELi} \quad (3)$$

که در معادله فوق، Ci غلظت فلز در رسوبات و n نیز تعداد کل فلزات اندازه گیری شده است. مقادیر<sup>۷</sup> (PEL) و<sup>۸</sup> (TEL) بر مبنای طبقه بندی استاندارد Long و همکاران (۲۰۰۰) در جدول ۲ ارائه شده است [۲۴].

جدول ۲. مقادیر PEL و TEL بر اساس دستورالعمل‌های عددی کیفیت رسوبات

| فلز | TEL (mg/kg) | PEL (mg/kg) |
|-----|-------------|-------------|
| Ni  | ۱۸          | ۴۲/۸        |
| Cd  | ۰/۶         | ۳/۵         |
| Pb  | ۳۰/۲        | ۱۱۲         |
| Cu  | ۱۸/۷        | ۱۰۸         |
| Zn  | ۱۲۴         | ۲۷۱         |

#### پهنه بندی غلظت فلزات سنگین

نقشه‌های دو بعدی توزیع فضایی غلظت فلزات سنگین Ni، Cd، Pb، Cu، Zn و Fe در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تولید شدند. روش وزن‌دهی معکوس فاصله<sup>۹</sup> (IDW) روش استفاده شده در این تحقیق برای درون‌یابی توزیع آلودگی در تالاب بین‌المللی خورخوران به کار گرفته شد [۲۵].

5 Pollution Load Index

6 Sediment Quality Guidelines

7 Probable Effect Level

8 Threshold Effect Level

9 Inverse Distance Weighting

## آنالیز آماری

قبل از انجام تحلیل داده‌ها، توزیع نرمال و یکنواختی واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون‌های Shapiro-Wilk و Levene بررسی شد. نتایج نشان داد، داده‌ها مطابق توزیع نرمال و یکنواختی واریانس است، بنابراین هیچ گونه تبدیل داده‌ای انجام نشد. تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای تفاوت ایستگاه‌ها بر محتوای فلزات سنگین در رسوب استفاده شد.

## نتایج

## غلظت فلزات سنگین در رسوبات

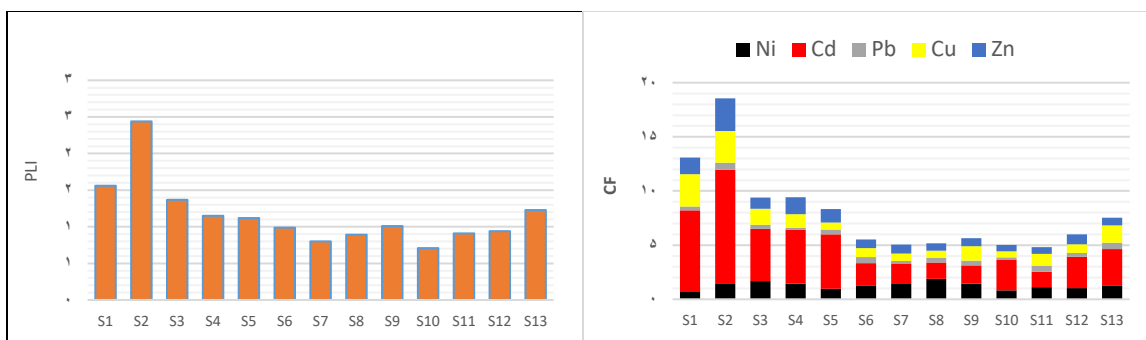
دامنه غلظت فلزات Ni, Cd, Pb, Cu, Zn و Fe به ترتیب در محدوده ۴۹/۱۲۸-۷۰/۶۰، ۰/۳-۴۳/۱۶، ۲/۱۳-۷۵/۰۷، ۰/۳-۴۳/۱۶، ۴۹/۱۲۸-۷۰/۶۰، ۲۵/۱۳۴-۰۶/۹۰، ۸۳/۵۰-۵۴/۲۸۷ و ۱۹۱۷/۴۷-۲۴۱۵/۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک رسوب اندازه‌گیری شد (جدول ۳). نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین ایستگاه‌های نمونه‌برداری از نظر غلظت برخی فلزات سنگین اختلاف معنی‌داری وجود دارد ( $P < 0.05$ ).

جدول ۳. میانگین غلظت فلزات سنگین در رسوبات ایستگاه‌های نمونه برداری

| ایستگاه          | غلظت فلزات سنگین (میلی گرم بر کیلوگرم) |       |       |        |        |         |
|------------------|----------------------------------------|-------|-------|--------|--------|---------|
|                  | Ni                                     | Cd    | Pb    | Cu     | Zn     | Fe      |
| S1               | ۴۹/۷                                   | ۲/۲۴  | ۷/۲۶  | ۱۳۴/۹  | ۱۴۵/۷  | ۲۱۳۸/۸۱ |
| S2               | ۹۷/۲۳                                  | ۳/۱۶  | ۱۳/۰۷ | ۱۳۱/۲  | ۲۸۷/۵  | ۲۰۴۹/۳۷ |
| S3               | ۱۱۴/۸۳                                 | ۱/۴۴  | ۷/۹۰  | ۶۶/۷۶  | ۹۶/۱   | ۲۲۰۵/۷۲ |
| S4               | ۹۸/۱۷                                  | ۱/۵   | ۲/۷۵  | ۵۷/۷   | ۱۴۸/۴  | ۲۳۸۳/۰۸ |
| S5               | ۶۵/۲                                   | ۱/۵۱  | ۹/۱۷  | ۲۹/۲۱  | ۱۱۷/۸  | ۲۰۹۰/۱۲ |
| S6               | ۸۴/۹۸                                  | ۰/۶۳  | ۱۱/۲۶ | ۳۶/۴۳  | ۷۴/۷۶  | ۲۲۷۴/۷۵ |
| S7               | ۱۰۰/۷                                  | ۰/۵۵  | ۴/۳۱  | ۳۰/۴   | ۸۰/۹   | ۲۱۴۲/۷۲ |
| S8               | ۱۲۸/۶                                  | ۰/۴۵  | ۹/۲۶  | ۲۸/۷   | ۶۴/۹۶  | ۱۹۱۷/۴۷ |
| S9               | ۹۹/۴                                   | ۰/۵۰  | ۸/۷۸  | ۵۹/۲۵  | ۷۱/۱۴  | ۲۴۱۵/۲۴ |
| S10              | ۵۶/۴۲                                  | ۰/۸۴  | ۴/۹۳  | ۲۵/۰۶  | ۵۴/۸۳  | ۲۱۹۷/۱۱ |
| S11              | ۷۵/۳                                   | ۰/۴۳  | ۱۱/۲۴ | ۴۹/۶۲  | ۵۹/۳۳  | ۲۱۸۹/۸۳ |
| S12              | ۷۰/۸۵                                  | ۰/۸۷  | ۶/۸۷  | ۳۶/۳۵  | ۸۵/۲۶  | ۱۹۵۸/۷۲ |
| S13              | ۸۳/۳۲                                  | ۱/۰۲  | ۱۲/۱۷ | ۷۱/۲۴  | ۶۶/۵۷  | ۲۰۱۴/۱۱ |
| میانگین          | ۸۶/۸۷                                  | ۱/۲۵  | ۸/۳۲  | ۶۱/۱۲  | ۱۱۳/۰۴ | ۲۱۵۹/۷۷ |
| انحراف استاندارد | ±۳۷/۵۴                                 | ±۰/۷۶ | ±۵/۰۳ | ±۲۴/۶۸ | ±۶۲/۳۱ | ±۴۳۲/۶۴ |

## ارزیابی سطح آلودگی رسوبات

مقادیر CF برای فلزات Ni, Cd, Pb, Cu و Zn به ترتیب در محدوده ۰/۷۳-۱/۸۹، ۰/۴۳-۱۰/۵۳، ۰/۱۴-۰/۶۵، ۰/۵۶-۳/۰۰ و ۰/۵۸-۳/۰۳ قرار داشت. بیشترین مقدار CF در کل برای کادمیم مشاهده شد، به‌ویژه در ایستگاه‌های S1 و S2 که نشان‌دهنده آلودگی قابل توجه این عنصر در رسوبات است. مقادیر میانگین CF نشان داد که فلزات Ni, Cu و Zn در محدوده آلودگی متوسط قرار دارند. نتایج محاسبه PLI نشان داد که مقادیر این شاخص در ۱۳ ایستگاه مورد مطالعه بین ۰/۷۱ و ۲/۴۴ قرار دارد. مقادیر بالای PLI ( $PLI > 1$ ) در ۵۴٪ از ایستگاه‌ها (S5, S9, S13, S4, S3 و S2) نشان‌دهنده افت کیفیت رسوبات و وجود آلودگی متوسط تا قابل توجه در این ایستگاه‌ها است (شکل ۲).



شکل ۲. شاخص آلودگی فلزات سنگین و شاخص بار آلودگی در ایستگاه‌های مورد مطالعه

مطالعه کیفیت رسوبات در ایستگاه‌های مختلف با استفاده از راهنمای کیفی رسوب (SQG) نشان‌دهنده وضعیت‌های متفاوتی برای فلزات اندازه‌گیری شده است (شکل ۳). به عنوان مثال فلز نیکل به طور مداوم در تمامی ایستگاه‌ها دارای غلظتی بالاتر از مقدار PEL (۴۲/۸ mg/kg) است.

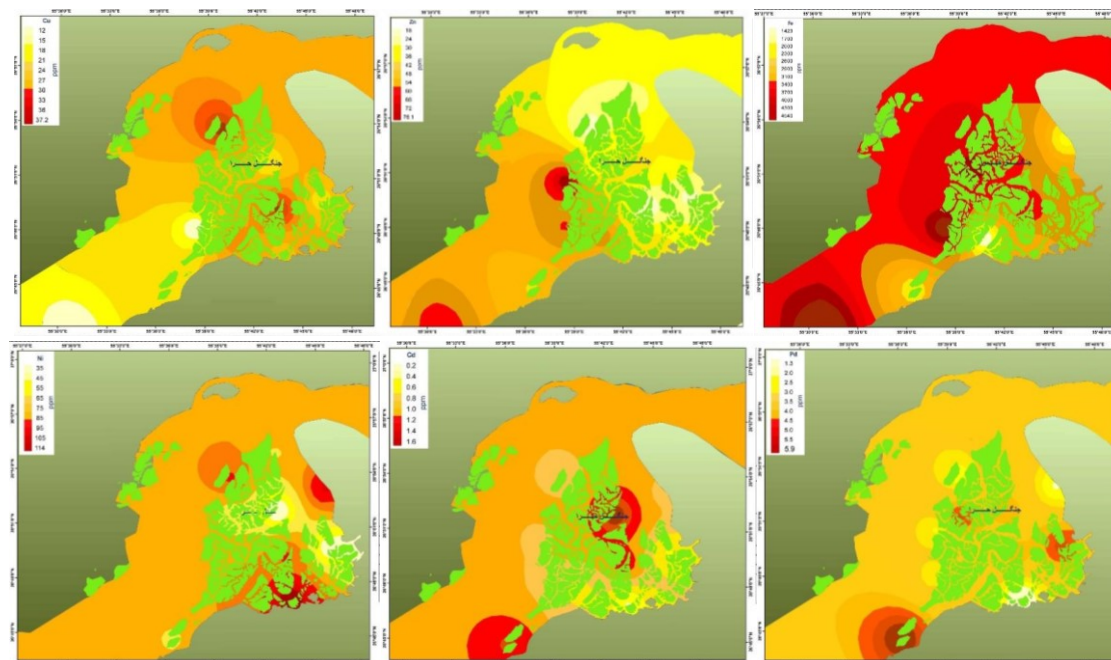
شکل ۳. کیفیت رسوبات با استفاده از شاخص‌های راهنمای کیفی رسوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه

| فلز<br>ایستگاه      | S1     | S2    | S3       | S4     | S5           | S6     | S7                 | S8     | S9     | S10    | S11    | S12    | S13    |
|---------------------|--------|-------|----------|--------|--------------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ni                  | Red    | Red   | Red      | Red    | Red          | Red    | Red                | Red    | Red    | Red    | Red    | Red    | Red    |
| Cd                  | Red    | Red   | Yellow   | Yellow | Red          | Yellow | Yellow             | Yellow | Yellow | Red    | Yellow | Red    | Red    |
| Pb                  | Green  | Green | Green    | Green  | Green        | Green  | Green              | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  |
| Cu                  | Red    | Red   | Yellow   | Yellow | Yellow       | Yellow | Yellow             | Yellow | Yellow | Yellow | Green  | Green  | Yellow |
| Zn                  | Yellow | Red   | Green    | Yellow | Yellow       | Green  | Green              | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  |
| Fe                  | Green  | Green | Green    | Green  | Green        | Green  | Green              | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  |
| mPEL-Q              | Red    | Red   | Yellow   | Yellow | Yellow       | Yellow | Yellow             | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| Pollution Intensity | Low    |       | Moderate |        | Considerable |        | High and Very High |        |        |        |        |        |        |
| Quality             | Green  |       | Yellow   |        | Red          |        | Brown              |        |        |        |        |        |        |

این یافته بیانگر آلودگی شدید و ریسک بالای بروز اثرات سمی زیست‌محیطی نیکل برای جامعه کفزی در کل محدوده مطالعه است. در حالی که سرب و آهن در هیچ‌کدام از ایستگاه‌ها مقداری بالاتر از TEL نداشته و غلظت آنها در محدوده کم‌خطر قرار دارد. شکل ۳ تفسیر نهایی ایستگاه‌های مورد مطالعه را با توجه به مقادیر TEL و PEL نشان می‌دهد. اگرچه کادمیوم بیشترین شدت آلودگی ژئوشیمیایی را در رسوبات تالاب خورخوران نشان داد، اما نیکل به دلیل تجاوز غلظت آن از حد PEL در تمامی ایستگاه‌ها، مهم‌ترین عنصر از نظر مخاطرات اکولوژیکی بالقوه برای موجودات کفزی محسوب می‌شود.

### پهنه بندی فلزات سنگین

الگوی پراکندگی فلزات سنگین در رسوبات مطالعه شده، تصویری نگران‌کننده از آلودگی را به ویژه برای نیکل و در سطوح پایین‌تر برای سایر فلزات در برخی ایستگاه‌ها ارائه می‌دهد (شکل ۴). این وضعیت می‌تواند منجر به پیامدهای منفی بر ساختار و عملکرد جوامع کفزی، کاهش تنوع زیستی و انتقال آلاینده‌ها به سطوح بالاتر زنجیره غذایی خواهد شد.



شکل ۴. نقشه پراکنش فلزات سنگین مورد مطالعه در تالاب بین المللی خور خوران

### بحث و نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد میانگین غلظت فلزات سنگین نیکل، کادمیوم، سرب، مس، روی و آهن در رسوبات منطقه مورد مطالعه به ترتیب  $Fe > Zn > Ni > Cu > Pb$  به صورت الگوی توزیع فلزات به صورت  $۸۶/۸۷$ ،  $۱/۲۵$ ،  $۸/۳۲$ ،  $۶۱/۱۲$ ،  $۱۱۳/۰۴$  و  $۲۱۶۰/۶۵$  میلی گرم بر کیلوگرم است. الگوی توزیع فلزات به صورت  $Fe > Zn > Ni > Cu > Pb$  بیانگر غالب بودن عناصر با منشأ طبیعی در رسوبات منطقه است، هرچند مطالعات مشابه نشان می دهد غلظت برخی عناصر مانند نیکل، کادمیوم، مس و روی می تواند تحت تأثیر فعالیت های انسانی نیز قرار گرفته باشد [۱۲، ۲۶]. مقادیر نسبتاً بالای این عناصر در برخی ایستگاه ها نشان می دهد که علاوه بر منشأ طبیعی، فعالیت های انسانی نیز در افزایش غلظت این عناصر مؤثر بوده اند. همچنین غلظت برخی از عناصر در این مطالعه به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر گزارش شده برای بسیاری از اکوسیستم های ساحلی و مانگرویی جهان است. برای مثال، در رسوبات سواحل حاشیه خلیج بنگال، میانگین نیکل کمتر از  $۵۰ \text{ mg/kg}$ ، و در سواحل غربی مالزی میانگین غلظت کادمیوم عموماً کمتر از  $۱ \text{ mg/kg}$  گزارش شده است [۲۷ و ۲۸]. از سوی دیگر، مقادیر اندازه گیری شده در تالاب خورخوران با نتایج برخی مطالعات انجام شده در سواحل خلیج فارس و دریای عمان که افزایش برخی از فلزات بویژه نیکل را ناشی از فعالیت های بندری، تردد شناورها و صنایع نفت و گاز دانسته اند، همخوانی دارد [۲۹ و ۱۳].

با توجه به نتایج فاکتور آلودگی (CF) کادمیم پتانسیل بالایی برای تجمع در رسوبات دارد. احتمالاً این عنصر تحت تأثیر منابع انسان زاد نظیر تخلیه فاضلاب، فعالیت های بندری، احتراق سوخت های فسیلی و رسوب گذاری آلاینده های جوی قرار دارد [۲۶]. بیشتر ایستگاه های مورد مطالعه دارای  $PLI$  بالاتر از ۱ بودند که نشان دهنده آلودگی رسوبات است. دامنه  $CF$  و  $PLI$  مشاهده شده در تالاب بین المللی خورخوران با نتایج مشابه در رسوبات خلیج فارس، دریای سرخ و سواحل مالزی همخوانی دارد [۱۳، ۱۵ و ۳۱]. مقایسه غلظت های فلزات سنگین رسوبات تالاب خورخوران با شاخص های کیفیت رسوب (SQGS) نشان می دهد که کادمیم و مس در برخی ایستگاه ها، فراتر از سطح اثر محتمل (PEL) قرار گرفته و می توانند اثرات زیستی متوسط تا زیاد بر موجودات رسوبزی ایجاد کنند. نیکل نیز در برخی ایستگاه ها از مقادیر مجاز  $PEL$  تجاوز کرده و احتمال اثرات زیستی این فلز نیز محتمل است. این نتایج با مطالعات Zheng و همکاران (۲۰۲۳) و Afifudin و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد [۸ و ۳۱].

نقشه پهنه بندی فلزات سنگین نشان داد بیشترین اختلاف مکانی مربوط به فلزات نیکل، مس و روی بود که بیانگر ناهمگنی توزیع این عناصر در رسوبات منطقه است. در مقابل، تغییرات سرب و آهن بین ایستگاه‌ها کمتر بوده و الگوی نسبتاً یکنواخت‌تری را نشان داد. با توجه به اهمیت اکولوژیکی جنگل‌های حرا و تالاب بین المللی خورخوران، پایش مستمر فلزات سنگین، شناسایی منابع آلاینده و اجرای برنامه‌های مدیریتی برای کنترل ورود آلاینده‌ها، به‌ویژه از منابع بندری، تردد شناورها و پساب‌های انسانی، برای حفظ سلامت اکوسیستم و پایداری تنوع زیستی منطقه ضروری است.

### تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

### سهم نویسندگان

سهم نفر اول مقاله (دانشجو) در نمونه برداری، انجام کارهای آزمایشگاهی و فراهم آوردن داده‌ها بیشتر از سایر نویسندگان است. استاد راهنما (نویسنده مسئول) مسوولیت نوشتن نسخه اولیه مقاله، تصحیح و ویرایش نسخه نهایی مقاله را به عهده داشته است.

### منابع

- [1] Akbari Noghabi, N., Shojaei, M. G., Farahani, M. M., & Weigt, M. (2022). Stable isotopes reveal the food sources of benthic macroinvertebrates in the arid mangrove ecosystem of the Persian Gulf. *Estuaries and coasts*, 45(7), 2241-2253.
- [2] Keshta, A.E., Riter, J.C.A., Shaltout, K.H., Baldwin, A.H., Kearney, M., El-Din, A.S., Eid, E.M. (2022) Loss of coastal wetlands in Lake Burullus, Egypt: A GIS and remote-sensing study. *Sustainability*, 14(9): 4980.
- [3] Delfan, N., Shojaei, M. G., & Naderloo, R. (2021). Patterns of structural and functional diversity of macrofaunal communities in a subtropical mangrove ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 252, 107288.
- [4] Yan, X., An, J., Yin, Y., Gao, C., Wang, B., Wei, S. (2022) Heavy metals uptake and translocation of typical wetland plants and their ecological effects on the coastal soil of a contaminated bay in Northeast China. *Science of The Total Environment*, 803: 149871.
- [5] Shi, C., Ding, H., Zan, Q., Li, R. (2019) Spatial variation and ecological risk assessment of heavy metals in mangrove sediments across China. *Marine Pollution Bulletin*, 143: 115-124.
- [6] Bastakoti, U., Robertson, J., Alfaro, A.C. (2018) Spatial variation of heavy metals in sediments within a temperate mangrove ecosystem in northern New Zealand. *Marine Pollution Bulletin*, 135: 790-800.
- [7] Hao, Z., Chen, L., Wang, C., Zou, X., Zheng, F., Feng, W., et al. (2019) Heavy metal distribution and bioaccumulation ability in marine organisms from coastal regions of Hainan and Zhoushan, China. *Chemosphere*, 226: 340-350.
- [8] Zheng, Y., Takeuchi, W., Jiang, Q. (2023) Assessing mangrove conservation in China by integrating mangrove ecosystem into ecological footprint accounting. *Ocean & Coastal Management*, 242: 106728.
- [9] Hidalgo, K.T.S., Carrión-Huertas, P.J., Kinch, R.T., Betancourt, L.E., Cabrera, C.R. (2020) Phytoremediation by *Avicennia germinans* (black mangrove) and Nano Zero Valent Iron for Heavy Metal Uptake from Ciénaga Las Cucharillas Wetland Soils. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14: 100363.
- [10] Nguyen, A., Richter, O., Le, B.V., Phuong, N.T.K., Dinh, K.C. (2020) Longterm heavy metal retention by mangroves and effect on its growth: A field inventory and scenario simulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23): 9131.
- [11] Marvah R. S., Chamani, A. (2023) Pollution and environmental risk assessment of potentially toxic elements in surface sediments of Zayandeh-Rood River, Isfahan Province, Iran. *Anthropogenic Pollution*, 7(1): 76-86.

- [12] Jahan, S., Strežov, V. (2018) Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metals in the sediments of seaports of NSW, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 128: 295–306.
- [13] Davari, A., Khorasani, N., Danehkar, A. (2013) Comparison of Heavy Metal Concentration in Bidekhun, Basatin and Melgonze Mangrove Forests. *Iranian Journal of Aquatic Ecology (ijae)*, 1(2): 15-26.
- [14] Kulkarni, R., Deobagkar, D., Zinjarde, S. (2018) Metals in mangrove ecosystems and associated biota: a global perspective. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 153: 215–228.
- [15] Aljahdali, M.O., Alhassan, A.B. (2020) Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Mangrove Habitats, Using Biochemical Markers and Pollution Indices: A Case Study of *Avicennia marina* L. in the Rabigh Lagoon, Red Sea. *Saudi Journal of Biological Sciences*.
- [16] <https://hormozgan.doe.ir>
- [17] Shayesteh, A., Dehghani Ghanatghehstani, M., Jabbarzadeh, M., Mohammadi Kangarani, H., Taghavi, L. (2025) Investigation of the extra-organizational collaborations in reduction environmental pollutions of tourism development on Qeshm Island using network analysis. *Anthropogenic Pollution (AP)*, 9(1): 092514 (1-11).
- [18] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1994) Methods for the determination of metals in environmental samples. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development,
- [19] Stefansson, A., Gunnarsson, I., Giroud, N. (2007) New methods for the direct determination of dissolved inorganic, organic and total carbon in natural waters by reagent-free <sup>TM</sup> ion chromatography and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 582: 69–74.
- [20] Håkansson, L. (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research*, 14(8): 975-1001.
- [21] Tomlinson, L., Wilson, G., Harris, R., Jeffrey, D.W. (1980) Problems in the assessments of heavy-metal levels in estuaries and formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33(10): 566-575.
- [22] 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(1): 81-97.
- [23] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2001) Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life. Summary tables. Winnipeg, MB, Canada. Available at: [https://www.elaw.org/system/files/sediment\\_summary\\_table.pdf](https://www.elaw.org/system/files/sediment_summary_table.pdf)
- [24] Long, E.R., MacDonald, D.D., Severn, C.G., Hong, C.B. (2000) Classifying probabilities of acute toxicity in marine sediments with empirically derived sediment quality guidelines. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 19(10): 2598-2601.
- [25] Igboekwe, M.U., Akankpo, A.O. (۲۰۱۱) Application of geographic information system (GIS) in mapping groundwater quality in Uyo, Nigeria. *International Journal of Geosciences*, 2: 394-397.
- [26] ELTurk, M., Abdullah, R., Rozainah, M. Z., & Bakar, N. K. A. (2018). Evaluation of heavy metals and environmental risk assessment in the Mangrove Forest of Kuala Selangor estuary, Malaysia. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 1-9.
- [27] Rahman, M. S., Rahman, M., Jolly, Y. N., Hossain, M. K., Semme, S. A., Paray, B. A., Arai, T., Yu, J., & Hossain, M. B. (2024). Heavy metals in afforested mangrove sediment from the world's largest delta: Distributional mapping, contamination status, risk assessment and source tracing. *Marine Pollution Bulletin*, 203, Article 116429.
- [28] Krishnan, K., Nadia, A. S., & Chong, M. Y. (2022). Ecological risk assessment of heavy metal pollution in mangrove sediments of the Sepang Besar River, West Coast Peninsular Malaysia. *Environment and Ecology Research*, 10(4), 497–507. <https://doi.org/10.13189/eer.2022.100408>

- 
- [29] Khamr, S., & Hosseini, S. M. (2023). Ecological risk assessment of heavy metals in sediments and different tissues of mangrove (*Avicennia marina*) along the Persian Gulf coasts. *Natural Environment*, 75, 90–106.
- [30] Afifudin, A. F. M., Pramesti, H. N., Irawanto, R., Sari, A., Soegianto, A., Affandi, M., & Payus, C. M. (2025). Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in western Madura Strait sediments. *Results in Engineering*, 26, 105157.
- [31] Usman, A.R., Alkredaa, R.S., Al-Wabel, M.I. (2013) Heavy metal contamination in sediments and mangroves from the coast of Red Sea: *Avicennia marina* as potential metal bioaccumulator. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 97: 263–270.