

Investigation and Assessment Ecological Risk in the Dried Sediments of Horul Azim Wetland

Soroush Namjoo | Ahmad Nohegar^{2*}  | Zeinab Sazvar³

1. Department of Environmental Engineering, Air Pollution, Kish International Campus, University of Tehran.
2. Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, University of Tehran. Tehran. Iran.
E-mail: nohegar@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 21 Jul. 2024
Revised: 14 Nov. 2024
Accepted: 16 Nov. 2024
Published online: 01 Mar. 2025

Keywords:
*Ecological Risk,
Wetland,
Soil Pollution,
Heavy Metals,
Horul Azim.*

Abstract

Horul Azim Wetland is located in southwestern Iran, in Khuzestan Province, and covers an area of 1180 km². About 70% of the wetland lies in Iraq, where it has faced challenges such as drought and oil drilling. As a result, many of its southern areas have dried up and become sources of dust storms. The present study was conducted to assess the levels of heavy metal pollution in the dried portions of this wetland. First, 15 sampling stations were identified using LANDSAT imagery, and soil samples were collected from the dried wetland using the quadrat method. The concentrations of Cd, Cu, Pb, Fe, Mn, and Ni were measured using an ICP-MS device. To evaluate pollution levels, various indices, including Igeo, ER, PLI, RI, CSI, and mCd, were applied. The results showed that the concentrations of Cd, Cu, Ni, and Pb exceeded the shale standard. According to the Igeo index, Cd pollution ranged from moderate to severe. The PI index indicated high pollution levels for Cd and moderate pollution for Pb. The ER index revealed that Cd posed a significant ecological risk, while other metals did not present an ecological threat. The average cumulative indices for ER and PLI were 193 and 9.7, respectively, suggesting a potential ecological risk across all sampling points. The CSI pollution safety values for Cd, Cu, Ni, and Pb were 0.52, 0.25, 4.02, and 0.34, respectively, while the mCd index values were 0.27, 10.4, 13.9, and 8.9. These findings indicate a very high severity of pollution risk for Ni and Cd.

Cite this article: Namjoo, S., Nohegar, A., Sazvar, Z. (2025). Investigation and Assessment Ecological Risk in the Dried Sediments of Horul Azim Wetland. *Journal of Range & Watershed Management*, 78 (1), 73-90. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.379709.1776>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

بررسی و ارزیابی خطر اکولوژیکی در رسوبات خشک شده تالاب هورالعظیم

سروش نامجوfer^۱ | احمد نوحهگر^{۲*} | زینب سازور^۳

۱. گروه مهندسی محیط زیست، آلودگی هوا، پردیس بین المللی کیش - دانشگاه تهران، تهران، ایران
 ۲. گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
 ۳. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
 رایانامه: nohegar@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تالاب هورالعظیم با مساحت ۱۱۸۰ کیلومترمربع در جنوب غربی ایران در استان خوزستان قرار دارد و حدود ۷۰ درصد از محدوده تالاب در عراق واقع شده که با چالش خشکسالی و حفاری‌های نفتی روبه‌رو شده است و بسیاری از اراضی جنوبی آن خشک شده و به کانون گردوغبار تبدیل شده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی سطوح آلودگی فلزات سنگین در بخش خشک‌شده این تالاب انجام شد. ابتدا ۱۵ نقطه بر روی تصویر ماهواره‌ای لندست مشخص شد و از خاک خشک شده تالاب با کوادرات نمونه‌برداری شد و در آزمایشگاه با دستگاه ICP-MS غلظت کادمیوم، مس، سرب، آهن، منگنز و نیکل اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی سطوح آلودگی از شاخص‌های زمین‌انباشتگی ژئوشیمیایی (Igeo)، خطر اکولوژیکی (ER)، بار آلودگی (PLI)، خطر بالقوه آلودگی (RI)، امنیت آلودگی (CSI) و درجه اصلاح (mCd) استفاده شد. نتایج نشان داد غلظت کادمیوم، مس، نیکل و سرب بیشتر از حد مجاز آن در میانگین شیل است. بر اساس شاخص Igeo، آلودگی کادمیوم زیاد است و سطح آن متوسط تا شدید است. بر اساس شاخص PI نیز آلودگی کادمیوم و سرب به ترتیب زیاد و متوسط است. شاخص Er نشان می‌دهد آلودگی اکولوژیکی کادمیوم قابل ملاحظه است، اما دیگر فلزات خطر اکولوژیکی ندارند. میانگین شاخص‌های تجمعی ER و PLI به ترتیب ۱۹۳ و ۹/۷ به دست آمد و بیان‌گر خطر اکولوژیکی محتمل برای تمام نقاط است. شاخص امنیت آلودگی CSI برای کادمیوم، مس، نیکل و سرب ۰/۵۲، ۰/۲۵، ۰/۰۲ و ۰/۳۴ و شاخص mCd نیز به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۴، ۱۰/۹ و ۸/۹ به دست آمد بیان‌گر شدت خیلی زیاد امنیت آلودگی برای نیکل و کادمیوم است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

کلیدواژه‌ها:

خطر اکولوژیکی،

تالاب،

آلودگی خاک،

فلزات سنگین،

هورالعظیم.

استناد: نامجوfer؛ سروش، نوحهگر؛ احمد، سازور؛ زینب (۱۴۰۴). بررسی و ارزیابی خطر اکولوژیکی در رسوبات خشک شده تالاب هورالعظیم. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۸(۱)، ۷۳-۹۰.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2024.379709.1776>

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

تالاب، به مناطق مردابی، آب مانده اراضی سیاه باتلاقی، برکه‌ها که مصنوعی یا طبیعی، به‌طور دائم یا موقت دارای آب ساکن یا جاری، با مزه آب شیرین، شور و لب‌شور بوده و همچنین مناطق ساحلی دریاها که هنگام جزر، ارتفاع آب بیشتر از ۶ متر نباشد، تالاب گفته می‌شود (سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۹۷). زیست‌بوم تالاب بیشترین ارزش خدمات اکوسیستمی را در بین انواع زیست‌بوم‌ها دارد و حدود ۴۷ درصد از ارزش‌های زیست‌بوم جهانی را به‌خود اختصاص داده است (داویدسون^۱، ۲۰۱۴). از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی که تالاب ارائه می‌دهد، می‌توان به تأمین زیستگاه برای آبزیان و حیات‌وحش، حفظ تنوع زیستی، حفاظت و بهبود کیفیت آب، ترسیب کربن و جلوگیری از گرمایش جهانی، حفظ خاک و جلوگیری از فرسایش اشاره کرد (کوستانزا^۲ و همکاران، ۲۰۱۴). بسیاری از موجودات زنده به‌ویژه پرندگان شرایط تالابی را برای زندگی انتخاب می‌کنند که دلیل اصلی آنها وجود عمق کم آب در تالاب و وجود موجودات آبی آن است (هوو^۳ و همکاران، ۲۰۲۳). به‌همین دلیل است که تالاب‌ها را به‌عنوان مرکز خدمات بیولوژیکی معرفی کرده‌اند. کنوانسیون رامسر در سال ۱۹۷۱ امضاء شد که هدف آن حفاظت از عملکرد زیست‌بوم‌های تالابی در جهان و تحقق توسعه پایدار بود که در قالب همکاری‌های بین‌المللی مطرح گردید. حدود ۲۳۰۳ تالاب با مساحتی حدود ۲۲۹ میلیون هکتار در سایت رامسر ثبت شده است که اهمیت بین‌المللی دارند، اما این لیست تنها ۱۹ درصد از کل تالاب‌های جهان (۱۲۱۰ میلیون هکتار) را پوشش می‌دهد. ۸۱ درصد از تالاب‌های دیگر که در لیست رامسر قرار ندارند، به‌شدت دچار انحطاط شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که نتایج نشان می‌دهد از سال ۱۷۰۰ تا قرن بیست‌ویکم حدود ۸۷ درصد از تالاب‌ها از بین رفته‌اند که عمدتاً در اوایل قرن ۲۱ رخ داده است. از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۵ حدود ۳۵ درصد از تالاب‌ها از بین رفته‌اند و ارزشی حدود ۹/۹ تریلیون دلار از دست رفته است (گاردنر و فینالیسون^۴، ۲۰۱۸). در قاره آسیا تغییرات اکولوژیکی و از بین رفتن تالاب‌ها بیشتر از سایر قاره‌ها است و پژوهش‌ها نشان داده است که حدود ۸۵ درصد از تالاب‌های آسیا از بین رفته است که علت اصلی آن شکار موجودات زنده، آلودگی ناشی از ورود فاضلاب شهری-کشاورزی، توسعه شهرنشینی و همچنین خشکسالی‌های قرن ۲۱ است (عبدالله^۵ و همکاران، ۲۰۲۴).

عواملی که منجر به خشک شدن تالاب‌های جهانی شده است، در نقاط مختلف جهان متفاوت است؛ اما عوامل اصلی آن شامل احداث سد و آب‌بند بر روی رودخانه‌هایی که تالاب را تغذیه می‌کند (ماتاگی^۶ و همکاران، ۱۹۹۸)، خشک کردن تالاب جهت حفاری و استخراج منابع زیرزمینی و هیدروکربنی (ژانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۲) و عوامل طبیعی مانند تغییر اقلیم و خشکسالی می‌باشد. از طرفی تالاب‌ها محلی برای دفع پسماندها، فاضلاب‌های شهری-صنعتی، پساب‌های کشاورزی و حفاری‌های نفتی تبدیل شده است. همه این موارد حاوی عناصری است که به‌عنوان فلزات سنگین شناخته می‌شود. عنصری که چگالی آن بیشتر از ۵ گرم در سانتی‌مترمکعب باشد، فلز سنگین محسوب می‌گردد که می‌توان به کادمیوم، آهن، نیکل، سرب، مس، منگنز، آرسنیک، جیوه و... اشاره کرد. این فلزات خاصیت تجمع‌پذیری دارند و در صورتی که از خاک وارد بافت موجودات زنده شوند، در فیزیولوژی آن اختلال ایجاد کرده و در مواردی باعث سمیت و مرگ آن می‌شوند. فلزات سنگین در پسماند ناشی از حفاری‌های نفتی، فاضلاب صنعتی و شهری، پساب‌های کشاورزی و وسایل نظامی مانند مهمات جنگی وجود دارد. تخلیه این مواد به تالاب باعث ورود فلزات سنگین به آب و جذب توسط موجودات زنده و یا ته‌نشین شدن آن در رسوبات می‌شود (علیخانی^۸ و همکاران، ۲۰۲۳). با خشک شدن تالاب، رسوباتی حاوی فلزات سنگین خطر زیستی دارند، چون که

1 Davidson

2 Costanza

3 Howe

4 Gardner and Finlayson

5 Abdullah

6 Matagi

7 Zhang

8 Alikhani

عبور بادهای شدید از روی رسوبات خشک باعث انتقال فلزات سنگین از محل شده و در محیط‌های دیگر رسوب می‌کند و زیست‌بومی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هر یک از فلزات سنگین تأثیر متفاوتی بر عملکرد سیستم‌های بیولوژیکی وارد می‌کند؛ مثلاً سرب باعث کاهش سنتز آنزیم‌ها در هموگلوبین خون، نارسائی کلیه، اختلالات عصبی و مشکلات رفتاری می‌شود؛ کادمیوم جایگزین کلسیم در استخوان می‌شود و منجر به بیماری روماتیسم می‌شود؛ آهن و منگنز اگرچه به مقدار کم برای موجودات زنده مفید هستند، اما افزایش غلظت آنها باعث نارسائی کلیه می‌شوند (سودی^۱، ۲۰۰۵). بنابراین اگر خاک‌های خشک شده تالاب‌ها حاوی فلزات سنگینی باشد که از منابع انسانی برجای مانده است، یک خطر محسوب می‌شود و احتمال ورود مجدد آن به زنجیره غذایی و فیزیولوژی موجودات زنده وجود دارد.

با توجه به این که فلزات سنگین خاصیت تجمع‌پذیری در بافت موجودات زنده دارند، حضور آنها در خاک‌های کشاورزی و یا تالاب‌ها که زیست‌بوم‌های زیادی در این اراضی وجود دارد، بسیار خطرناک است. در اطراف شرکت صنایع فولاد خوزستان، زمین‌های کشاورزی به‌ویژه صیفی‌جات وجود دارد که توسط صنایع فولادی آلوده شده‌اند و پژوهشگران نشان دادند که با فاصله ۱۰۰ متر به ۱۰۰۰۰ متر، مقدار کل فلزات سنگین در خاک حدود ۷۵ درصد کاهش می‌یابد که بیان‌گر نقش صنایع در آلودگی خاک است (لجمیراورک نجاتی و همکاران، ۱۳۹۷). توفان‌های گردوغبار که از اراضی بیابانی نشأت می‌گیرند نیز یکی دیگر از منابع فلزات سنگین است که نتایج پژوهشگران نشان داد در خاک‌های مرتعی غرب استان خوزستان که در مسیر بادهای ورودی از بیابان‌های عراق قرار دارد، غلظت فلزات سنگین بیشتر از شرق استان است که در فاصله دورتری از بیابان‌های عراق قرار دارند که دلیل اصلی وجود فلزات سنگین در این توفان‌های گردوغباری، استفاده از مهمات در جنگ‌های ۴۰ ساله در عراق است (حبیبی و همکاران، ۱۴۰۰). فلزات سنگین در دلتای هندیجان که یکی از نقاط کانونی گردوغبار در استان خوزستان است، با شاخص‌های آلودگی ارزیابی شده است که نتایج آن نشان می‌دهد منشاء فلزات آرسنیک و کادمیوم، فعالیت‌های انسانی به‌ویژه پساب‌های کشاورزی، آلودگی ترافیکی و آلودگی باقی‌مانده از جنگ هشت‌ساله ایران و عراق است (اکرم جویباری و همکاران، ۱۴۰۱). سازندهای زمین‌شناسی و شورابه‌های نفتی یکی دیگر از منابع فلزات سنگین است که پژوهشگران در ۱۳ چشمه شورابه‌ای استان خوزستان غلظت فلزات را بررسی کردند و نشان دادند که سازند گچساران حاوی کبالت است، اما منشاء فلزاتی مانند آرسنیک، کروم، کادمیوم، نیکل و سرب عمدتاً شورابه‌های نفتی است (رضایی و همکاران، ۱۴۰۰).

زباله‌های صنعتی و شهری یکی دیگر از منابع اصلی فلزات سنگین است که اگر این زباله‌ها وارد تالاب شود، خسارت زیادی بر زیست‌بوم‌های آن وارد می‌کند. در خرمشهر اگرچه زباله‌های شهری و فاضلاب وارد تالاب ناصری می‌شوند، اما اندازه‌گیری‌ها نشان داد که آلودگی رسوبات آن کم است و ریسک اکولوژیکی بسیار پایینی دارد (ولایت‌زاده و کوشافر، ۲۰۱۹)؛ اما در تالاب انزلی در شمال ایران، آلودگی رسوبات آن زیاد است و ریسک اکولوژیکی بالایی دارند و زباله‌های انسانی به‌ویژه فاضلاب‌های شهری-صنعتی منشاء این آلاینده‌ها می‌روند (جمشیدی زنجانی و سعیدی، ۲۰۱۲). در ۱۱ تالاب از حوضه دریاچه ویکتوریا در آمریکا، فلزات سنگین مورد ارزیابی قرار گرفت که نشان داد در تالاب‌هایی که زباله‌های شهری-صنعتی در آن تخلیه می‌شود، غلظت آهن، سرب، آرسنیک و کادمیوم بسیار بیشتر از تالاب‌های دور از مکان‌های صنعتی است و این فلزات در ریشه گیاهان تجمع یافته و غلظت آنها بیشتر از برگ گیاهان است (نابولو^۲ و همکاران، ۲۰۰۸). زباله‌های ناشی از حفاری نفت آلوده به فلزات سنگین به‌ویژه سرب و باریوم است و سطح آلودگی آنها نیز زیاد است. در حفاری‌های نفتی خیبر پختونخوا پاکستان که به تالاب تخلیه می‌شوند، غلظت این دو فلز بسیار زیاد است و باعث سمیت زیست‌بوم ساحلی آن شده است (حسین قیصر و همکاران، ۲۰۱۹).

در اراضی خشک شده تالاب، غلظت فلزات سنگین بیشتر از پهنه آبی آن است، چون که فلزات سنگین به‌ویژه در آب‌های اسیدی سریعاً توسط موجودات زنده جذب شده و در بافت آنها تجمع می‌یابد و غلظت فلزات در آب و رسوبات محیط تالاب کاهش می‌یابد؛ اما در

1 Sodhi

2 Nabulo

رطوبات خشک شده تالابی به دلیل عدم حضور موجودات زنده، فلزات سنگینی که از تالاب برجای مانده است در خاک باقی می ماند و باعث بالا رفتن غلظت آنها می شود که در تالاب Yilong در چین پژوهشگران نشان دادند که غلظت فلزات سنگین در بخش خشک شده تالاب بیشتر از بخش آبی و بخش زیرکشت رفته تالاب است (بای^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). همان طور که بیان شد، پساب های کشاورزی نقش زیادی در تغلیظ فلزات سنگین در خاک دارند که دلیل اصلی آن استفاده از کودهای میکرو است که حاوی آهن و مس است؛ اما کادمیوم در علف کش ها، سموم و آفت کش ها استفاده می شود و ورود آن به خاک بیشتر از سایر فلزات سنگین است (راجنراکومار و رامچاندران^۲، ۲۰۲۱)؛ به گونه ای که غلظت فلزات سنگین در خاک تالاب اوگورو در کشور نیجریه در حد مجاز استاندارد خاک کشاورزی قرار دارد، اما غلظت کادمیوم بیشتر از استاندارد است و دلیل اصلی آن ورود پساب کشاورزی به تالاب است (اگوو^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). فلزات سنگین به اعماق خاک نفوذ چندانی نمی کنند و اغلب در عمق کمتر از یک متری تجمع می یابند. یکی از دلایلی که غلظت فلزات سنگین در اراضی کشت شده اطراف تالاب کمتر از اراضی جنگلی و مرتعی است، وجود ریشه های افشان و فراوان گیاهان زراعی در عمق سطحی خاک و جذب فلزات سنگین است، اما گیاهان جنگلی و مرتعی گستردگی ریشه های کمتری دارند و بنابراین فلزات کمتری جذب می کنند که در تالاب های ساحلی جنوب غربی چین این مورد تأیید شد (سان^۴ و همکاران، ۲۰۲۰).

تالاب هورالعظیم محل دریافت رواناب ها، رودخانه ها، پساب های کشاورزی و صنعتی است و اطراف آن در نیمه شمالی عمدتاً به زمین های شهری - زراعی اختصاص دارد. پژوهشگران آلودگی فلزات سنگین را در خاک های بخش شرقی تالاب در استان خوزستان ارزیابی کردند که نشان داده شد کادمیوم دارای غنی شدگی بسیار شدید، نیکل و کروم غنی شدگی متوسطی دارند که منشاء آن فعالیت های انسانی در فضای صنعتی به ویژه فعالیت های نفتی و کشاورزی است (عبیات و همکاران، ۲۰۲۰). آلودگی فلزات سنگین در رسوبات پهنه آبی تالاب هورالعظیم و ماکروبتنوزهای آن نیز ارزیابی شد که نتایج نشان داده است با توجه به تداوم فعالیت های استخراج نفت و تخلیه آلاینده های سمی به تالاب، پتانسیل زیادی در افزایش سریع و تجمعی غلظت فلزات به ویژه وانادیوم و کادمیوم وجود دارد (الباجی و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به اینکه اراضی زراعی - شهری بخش شرقی تالاب هورالعظیم و همچنین رسوبات کف و آب تالاب نیز از لحاظ سطوح آلودگی فلزات سنگین ارزیابی شده است، اما زمین های خشک شده تالاب که در بخش جنوبی آن گستردگی بیشتری دارد، مشخص نیست که حاوی چه مقدار فلز سنگین است؟ آیا غلظت فلزات در این خاک های خشک تالاب که به کانون توفان های گردوغبار نیز تبدیل شده است، بیشتر از زمین های کشاورزی بخش شرقی تالاب و پهنه آبی تالاب است؟ و اینکه سطوح آلودگی فلزات سنگین در این خاک ها به چه مقدار است؟ پژوهش حاضر در راستای پاسخ گویی به این سوال ها مطرح گردیده است و هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی سطوح آلودگی فلزات سنگین در این خاک های خشک شده بخش جنوبی تالاب هورالعظیم است.

۲. مواد و روش ها

هورالعظیم یا هورالهیوز، تالابی است دائمی با آب شیرین که در بین النهرین قرار دارد و به وسعت ۱۱۸۰ کیلومتر مربع در جنوب غربی کشور ایران در استان خوزستان واقع شده است و مرز سیاسی کشور ایران و عراق آن را به دو قسمت تقسیم کرده است که حدود یک سوم آن در ایران و مابقی در کشور عراق است (شکل ۱). رودخانه اصلی و تأمین کننده آب در این تالاب، رودخانه کرخه در ایران است که از زاگرس مرتفع در ایلام، کرمانشاه، لرستان، همدان، خوزستان و حتی رواناب هایی در کردستان سرچشمه گرفته و وارد جلگه هموار خوزستان شده و طی انشعابات متعدد، وارد تالاب هورالعظیم می شود.

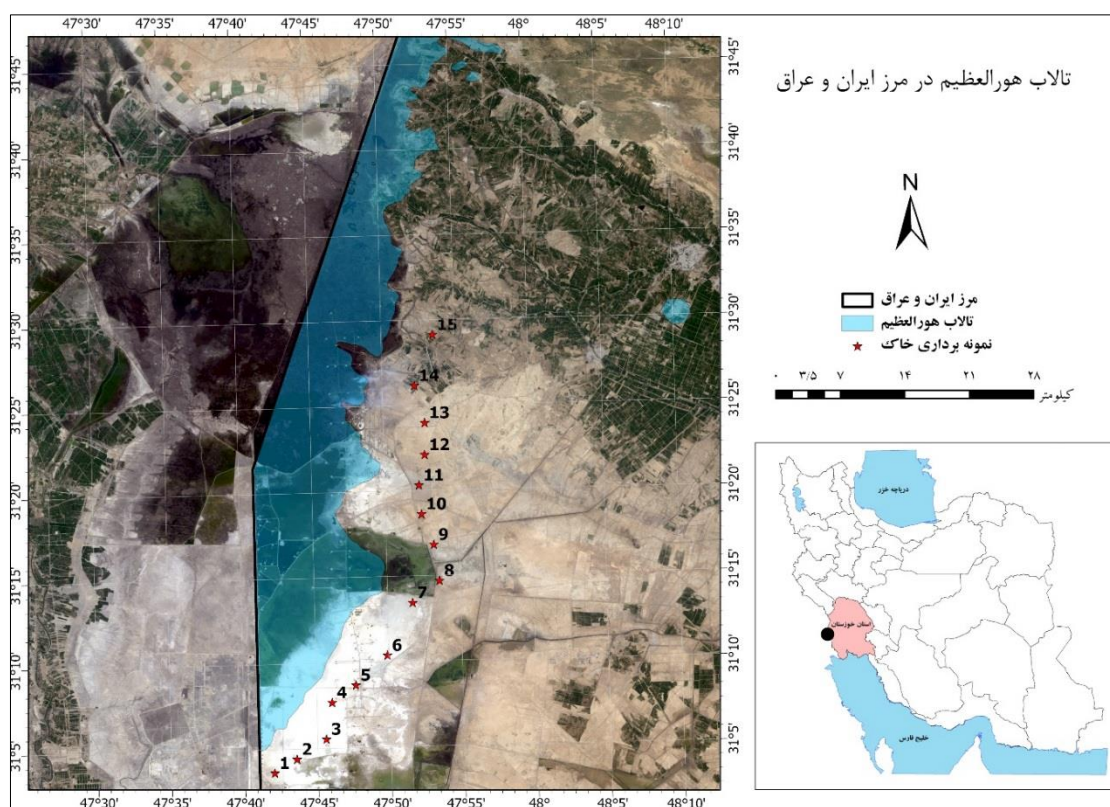
1 Bai

2 Rajendrakumar & Ramachandran

3 Egwu

4 Sun

بخش جنوبی تالاب هورالعظیم در سال‌های اخیر خشک شده است و خاک آن همان رسوبات برجای مانده از پهنه آبی تالاب می‌باشد. در این پژوهش، هدف اصلی پاسخ‌دادن به این سوال است که سطوح آلودگی فلزات سنگین در این خاک‌های خشک ارزیابی شود. به‌همین دلیل، نمونه‌برداری از خاک‌های خشک شده بخش جنوبی تالاب هورالعظیم انجام شد.



شکل ۱. محل نمونه‌برداری خاک در اراضی خشک شده تالاب هورالعظیم، استان خوزستان

۲-۱. نمونه‌برداری خاک

بازدید میدانی از تالاب هورالعظیم در آذرماه ۱۴۰۲ انجام شد و ۱۵ نقطه در جنوب و شرق تالاب برای نمونه‌برداری خاک تعیین شد. ابتدا پلات کوادرات به ابعاد ۱×۱ متر تهیه شد و بر روی زمین قرار داده شد، سپس با بیلچه از خاک سطحی به عمق ۱۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شده و در کیسه پلی‌اتیلن قرار داده شد (شکل ۲). نمونه‌ها در کمتر از ۲۴ ساعت از محل نمونه‌برداری به آزمایشگاه خاک دانشگاه تهران انتقال داده شد تا عملیات سنجش فلزات سنگین بر روی آن صورت گیرد.

در آزمایشگاه، نمونه‌های خاک به مدت ۱۴۰ دقیقه در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا کاملاً خشک و به وزن ثابت رسیدند و از آون خارج شدند. برای هضم نمونه‌ها از روش تر (مرطوب) استفاده شد؛ به این شرح که ۰/۵ گرم از نمونه در بالن ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شده و ۲۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک، ۲۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک و یک میلی‌لیتر مولیبدات سدیم ۲ درصد به آن اضافه شد. نمونه‌ها سرد شد و سپس ۲۰ میلی‌لیتر مخلوط اسید نیتریک و اسید پرکلریک به نسبت ۱:۱ به نمونه اضافه شد، سپس مخلوط حرارت دید تا بخار سفید رنگ اسید محو شد، مخلوط سرد شده و ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آرامی به مخلوط اضافه شد. حدود ۱۰۰ دقیقه حرارت دید و محلول شفاف

به دست آمد. پس از سرد شدن به بالن ژوژه ۱۰۰ میلی لیتر منتقل شد و به حجم رسانده شد. سنجش فلزات سنگین شامل کادمیوم، مس، سرب، آهن، منگنز و نیکل در نمونه هضم شده با روش پلاسمای جفت شده القایی و ترکیب آن با طیفسنجی جرمی (ICP-MS) صورت گرفت. هضم نمونه های خاک و سنجش فلزات سنگین توسط کارشناس خاک شناسی آزمایشگاه دانشگاه تهران انجام گرفت.



شکل ۲. نحوه نمونه برداری از خاک سطحی در منطقه خشک شده تالاب هورالعظیم، استان خوزستان

۲-۲. شاخص‌های آلودگی

پس از سنجش فلزات سنگین در نمونه‌های خاک، سطوح آلودگی فلزات در خاک با شاخص‌های آلودگی محیط‌زیستی ارزیابی شد که شامل شاخص زمین‌انباشتگی ژئوشیمیایی (Igeo)، شاخص آلودگی (Pi)، شاخص خطر اکولوژیکی (ER)، شاخص بار آلودگی (PLI)، شاخص خطر بالقوه آلودگی (RI)، شاخص امنیت آلودگی (CSI) و شاخص درجه اصلاح آلودگی (mCd) می‌باشد.

۲-۲-۱. شاخص زمین‌انباشتگی ژئوشیمیایی (Igeo)

شاخص زمین‌انباشتگی ژئوشیمیایی، یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای ارزیابی سطح آلودگی فلزات سنگین در خاک است که برای هر فلز جداگانه محاسبه می‌شود و سطح آلودگی هر فلز را در خاک مشخص می‌کند. این شاخص از طریق رابطه (۱) برآورد می‌گردد (هاریس^۱ و همکاران، ۲۰۱۷):

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

C_n غلظت عنصر اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک؛ B_n غلظت زمینه‌ای همان عنصر است. برای تعدیل اثرات احتمالی ناشی از فعالیت‌های زمین‌شناسی و تزریق سازندها، ضریب ۱/۵ در غلظت زمینه‌ای در نظر گرفته می‌شود. غلظت زمینه‌ای برای فلزات کادمیوم، سرب، مس، آهن و نیکل به ترتیب ۰/۳، ۲۰، ۴۵، ۴۷۰۰۰ و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بر مبنای میانگین شیل جهانی در نظر گرفته شد (فورسترنر و مولر^۲، ۱۹۸۱). سپس برای ارزیابی سطح آلودگی هر فلز در خاک، از جدول (۱) استفاده گردید.

جدول ۱. درجه‌بندی سطح آلودگی فلزات سنگین براساس شاخص تجمع ژئوشیمیایی مولر

ردیف	آلودگی	شاخص I_{geo}	عدد به‌دست آمده برای شاخص تجمع ژئوشیمیایی
۱	کاملاً غیرآلوده	۰	۰
۲	غیرآلوده تا آلودگی متوسط	۱	۰ - ۱
۳	آلودگی متوسط	۲	۱ - ۲
۴	آلودگی متوسط تا شدید	۳	۲ - ۳
۵	آلودگی شدید	۴	۳ - ۴
۶	آلودگی شدید تا بسیار شدید	۵	۴ - ۵
۷	آلودگی بسیار شدید	۶	۵

همچنین شاخص آلودگی (PI) که شبیه به شاخص I_{geo} است، با این تفاوت که ضریب تعدیل ۱/۵ در آن به‌کار نمی‌رود و غلظت عنصر اندازه‌گیری شده بر میانگین شیل جهانی آن عنصر تقسیم می‌شود. برای ارزیابی سطح آلودگی هر فلز نیز طبقه‌بندی PI به‌گونه‌ای است که عدد به دست آمده کمتر از یک باشد (عدم آلودگی)؛ بین ۱ و ۲ (آلودگی کم)؛ بین ۲ و ۳ (آلودگی متوسط)؛ بین ۳ و ۵ (آلودگی زیاد) و بیشتر از ۵ باشد (آلودگی بسیار زیاد) است (کوالاسکا^۳ و همکاران، ۲۰۱۸).

۲-۲-۲. شاخص خطر آلودگی اکولوژیکی (ER)

این شاخص برای ارزیابی سطح آلودگی رسوبات ته‌نشین شده در آب و یا تالاب‌های خشک شده به‌کار می‌رود که در تالاب هورالعظیم

1 Haris

2 Förstner, U., & Müller

3 Kowalska

می‌تواند بسیار کاربردی باشد که برای هر فلز جداگانه محاسبه شد (رابطه ۲):

$$E_r^i = T_r^i \times PI_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، T_r^i شدت آلودگی رسوبات و PI_i شاخص آلودگی است و ضرب آنها خطر اکولوژیکی را محاسبه می‌کند. شدت آلودگی رسوبات (T_r^i) برای کادمیوم، مس، سرب و نیکل به ترتیب ۳۰، ۵، ۵ و ۵ می‌باشد که از طبقه‌بندی هاکانسون به‌دست آمده است میرانزاده مه‌آبادی و همکاران، ۲۰۲۰). این متغیر به ماندگاری و یا غلظت فلزات در رسوبات نیست، بلکه به میزان سمی بودن و اثر اکولوژیکی آن فلز مربوط است که شدت آلودگی کادمیوم بیشتر از سایر فلزات اندازه‌گیری شده در این پژوهش است.

جدول ۲. طبقه‌بندی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در خاک بر اساس شاخص E_r^i

طبقه	شاخص E_r^i	خطر اکولوژیکی رسوبات
۱	کمتر از ۴۰	خطر اکولوژیکی کم
۲	۴۰ تا ۸۰	خطر اکولوژیکی متوسط
۳	۸۰ تا ۱۶۰	خطر اکولوژیکی قابل ملاحظه
۴	۱۶۰ تا ۳۲۰	خطر اکولوژیکی زیاد
۵	بزرگتر از ۳۲۰	خطر اکولوژیکی بسیار زیاد

علاوه بر شاخص‌های منفرد، شاخص‌های تجمعی نیز برای ارزیابی میزان آلودگی خاک استفاده گردید که به شرح ذیل می‌باشد.

۲-۲-۳. شاخص بار آلودگی (PLI)

این شاخص، تخریب خاک توسط فلزات سنگین را ارزیابی می‌کند و از رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

$$PLI = \sqrt[4]{PI_{Cd} \times PI_{Ni} \times PI_{Pb} \times PI_{Cu}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، شاخص آلودگی (PI) هر فلز در زیر رادیکال ضرب شده و فرجه آن، تعداد عنصر اندازه‌گیری شده است که در این پژوهش، تعداد ۴ عنصر برای این شاخص تجمعی در نظر گرفته شده است و فرجه عدد ۴ می‌باشد. عدد به‌دست آمده از شاخص PLI به‌گونه‌ای است که اگر کوچکتر از یک باشد (بیان گر عدم تخریب خاک)، اگر عدد به‌دست آمده برابر با یک باشد (فقط سطوح پایه آلودگی وجود دارد و خطر زیادی برای تخریب خاک وجود ندارد)، اما اگر عدد به‌دست آمده بزرگتر از یک باشد (بیان گر تخریب شدن خاک توسط فلزات سنگین) است (ربیعی و همکاران، ۲۰۱۱).

۲-۲-۴. شاخص خطر بالقوه اکولوژیکی (RI)

این شاخص، مجموع شاخص E_r^i است که خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در خاک را نشان می‌دهند. اگر عدد به‌دست آمده کمتر از ۹۰ باشد (پتانسیل خطر اکولوژیکی کم است)؛ اگر بین ۹۰ تا ۱۸۰ باشد (خطر اکولوژیکی متوسط است)؛ اگر بین ۱۸۰ تا ۳۶۰ باشد (خطر اکولوژیکی محتمل)؛ اگر بین ۳۶۰ تا ۷۲۰ باشد (خطر اکولوژیکی زیاد) و اگر بیشتر از ۷۲۰ باشد (خطر اکولوژیکی بسیار زیاد) است که زیست‌بوم‌ها را تهدید می‌کند (لیو^۱ و همکاران، ۲۰۱۸).

۲-۲-۵. شاخص امنیت آلودگی (CSI)

این شاخص بیان‌گر میزان سمیتی است که از فلزات سنگین نشأت می‌گیرد و شرایط نامناسبی برای محیط خاک ایجاد می‌کند. در محاسبه این شاخص، از اثرات با محدوده کم (ERL) و اثرات با محدوده متوسط (ERM) استفاده می‌شود و از رابطه (۴) برای محاسبه آن استفاده می‌شود:

$$CSI = \sum_{i=1}^n w \left(\left(\frac{C_i}{ERL} \right)^2 + \left(\frac{C_i}{ERM} \right)^2 \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه، w وزن محاسبه شده هر فلز بر اساس جدول (۳) و C_i غلظت فلز اندازه‌گیری شده است. مقادیر ERL و ERM نیز از جدول (۳) به دست می‌آید. پس از محاسبه شاخص، میزان امنیت آلودگی فلزات بر اساس جدول (۴) به دست می‌آید (سان^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

جدول ۳. پارامترهای شاخص امنیت آلودگی خاک

وزن (w)	ERM	ERL	فلز
۰/۲۵	۹/۶	۱/۲	کادمیوم
۰/۰۷۵	۲۷۰	۳۴	مس
۰/۲۵۱	۲۱۸	۴۶/۷	سرب
۰/۲۱۵	۵۱/۶	۲۰/۹	نیکل

جدول ۴. طبقه‌بندی شاخص امنیت آلودگی (CSI) برای فلزات سنگین در خاک

میزان امنیت آلودگی	شاخص CSI	طبقه
عدم آلودگی	کمتر از ۰/۵	۱
شدت بسیار کم	۱ - ۰/۵	۲
شدت کم	۱/۵ - ۱	۳
شدت کم تا متوسط	۲ - ۱/۵	۴
شدت متوسط	۲/۵ - ۲	۵
شدت متوسط تا زیاد	۳ - ۲/۵	۶
شدت زیاد	۴ - ۳	۷
شدت خیلی زیاد	۵ - ۴	۸
شدت بسیار زیاد	بزرگتر از ۵	۹

۲-۲-۶. درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)

این شاخص، امکان ارزیابی آلودگی کل خاک را با فلزات سنگین مهیا می‌کند. برای به دست آوردن این شاخص، مجموع غلظت فلزات سنگین مورد نیاز است و از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$mCd = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که C_i غلظت فلزات سنگین و n تعداد فلزات اندازه‌گیری شده در مطالعه است. سطح آلودگی نیز بر اساس جدول (۵) ارزیابی می‌شود (ابراهیم^۲ و همکاران، ۲۰۰۸).

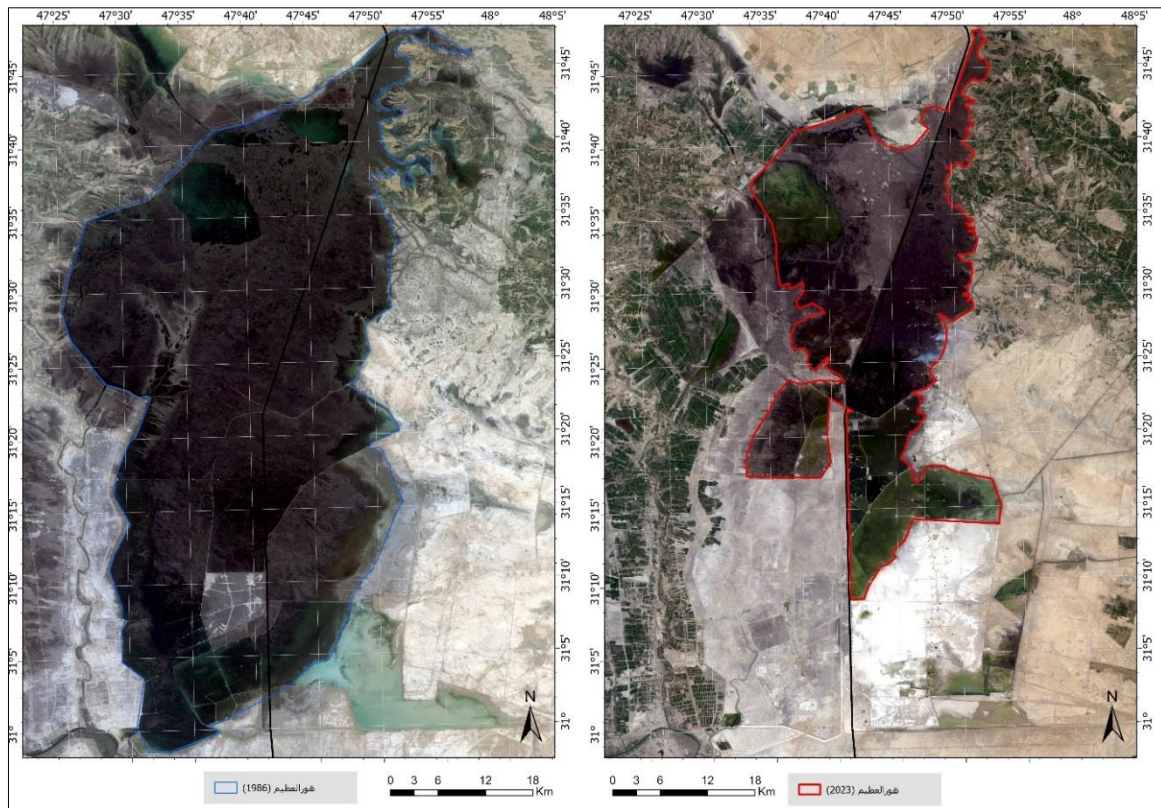
جدول ۵. طبقه‌بندی درجه آلودگی اصلاح شده برای فلزات سنگین در خاک

درجه آلودگی	mCd
بسیار کم	کمتر از ۱/۵
کم	۱/۵ - ۲
متوسط	۲ - ۴
زیاد	۴ - ۸
خیلی زیاد	۸ - ۱۶
بسیار زیاد	۱۶ - ۳۲
خطرآفرین	بزرگتر از ۳۲

۳. بحث و نتایج

۳-۱. تغییرات مساحت تالاب هورالعظیم

در این پژوهش، وسعت تالاب هورالعظیم از روی تصاویر ماهواره لندست برای سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۳ محاسبه شد و نتایج نشان داد که در طی ۳۷ سال گذشته، حدود ۱۴۰۲ کیلومترمربع از وسعت تالاب کاسته شده و محل آبیگری آن به بیابان تبدیل شده است که به‌عنوان کانون ریزگرد بیابانی شناخته می‌شود (شکل ۳). در ایران ۲۷۹ کیلومترمربع و در عراق حدود ۱۱۲۳ کیلومترمربع از وسعت تالاب کاسته شده است و این نشان می‌دهد که خشک‌شدن تالاب در عراق بیشتر از ایران بوده است (جدول ۶).



شکل ۳. تغییرات مساحت تالاب هورالعظیم در سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۳ میلادی در مرز بین ایران و عراق

جدول ۶. تغییرات وسعت تالاب هورالعظیم در سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۳

ردیف	سال	وسعت تالاب در ایران (کیلومتر مربع)	وسعت تالاب در عراق (کیلومتر مربع)	مجموع وسعت تالاب (کیلومتر مربع)
۱	۱۹۸۶	۸۱۱	۱۶۸۹	۲۵۰۰
۲	۲۰۲۳	۵۳۲	۵۶۶	۱۰۹۸

۳-۲. غلظت فلزات سنگین

غلظت فلزات سنگین در ۱۵ نقطه از بخش شرقی تالاب هورالعظیم در جدول (۷) ارائه شده است. نتایج میانگین عناصر نشان می‌دهد که غلظت کادمیوم، مس، نیکل و سرب بیشتر از میانگین شیل است. آماره و سطح معناداری آزمون شاپیرو-ویلک نشان می‌دهد که تمام عناصر دارای توزیع نرمال هستند و سطح پراکندگی آنها در ۱۵ نقطه بسیار کم است. غلظت بالای فلزات سنگین بیانگر تخلیهٔ پساب‌های صنعتی و شهری و همچنین پسماندهای ناشی از حفاری نفت در تالاب هورالعظیم است. در بین فلزات سنگین، میانگین غلظت آهن و منگنز کمتر از میانگین شیل جهانی است. در جدول (۸) مقایسه‌ای بین میانگین غلظت فلزات سنگین در پژوهش حاضر با دیگر تالاب‌های داخلی ایران و تالاب‌های بین‌المللی ارائه شده است که نشان از آلودگی زیاد کادمیوم، مس و سرب دارد و تالاب کلاهی-تیاب در میناب (استان هرمزگان) نیز وضعیتی شبیه به تالاب هورالعظیم دارد. در پژوهشی که عبیات و همکاران (۱۳۹۹) انجام دادند نشان داده شد که غلظت فلزات سنگین در رسوبات بخش زراعی در شرق تالاب هورالعظیم نیز سطح آلودگی زیاد است و حتی غلظت کادمیوم و منگنز بیشتر از رسوبات خشک شدهٔ بیابانی تالاب در پژوهش حاضر است. مقایسهٔ فلزات سنگین در نمونه‌های آب تالاب‌های جهانی بسیار کمتر از غلظت آن در رسوبات است که دلیل اصلی آن گردش آب و تجمع فلزات در بافت موجودات زنده است، اما در رسوبات، فلزات یکجا در افق رویی خاک تجمع می‌یابند و باعث افزایش غلظت عناصر در رسوبات می‌گردد (زارعی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳).

جدول ۷. غلظت فلزات سنگین در نقاط مورد مطالعه در تالاب هورالعظیم

عناصر	حد استاندارد در میانگین شیل جهانی (mg/kg)	میانگین (mg/kg)	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	آزمون شاپیرو-ویلک	
						آماره	سطح معنی‌داری
Cd کادمیوم	۰/۳	۱/۶۴	۰/۴۳۲	۰/۳۲۳	-۱/۵۷۲	۰/۸۹۳	۰/۰۷۵
Cu مس	۴۵	۶۲/۴	۹/۴۱۷	-۰/۰۵۸	-۰/۳۲۹	۰/۹۷۹	۰/۹۵۸
Fe آهن	۴۷۰۰۰	۲۱۲/۶	۸۶/۰۸	۰/۲۶۳	۰/۱۲۳	۰/۹۶۷	۰/۸۱۹
Mn منگنز	۸۵۰	۴/۶۶	۲/۰۵	۰/۴۶۲	۰/۶۵۱	۰/۶۴۷	۰/۴۷۵
Ni نیکل	۵۰	۸۳/۸۶	۸/۴۳۳	-۰/۲۱۳	-۱/۲۶۹	۰/۹۰۷	۰/۱۲۱
Pb سرب	۲۰	۵۳/۴	۱۰/۶۱	-۰/۶۴۶	-۰/۲۲۶	۰/۹۲۳	۰/۲۱۲

جدول ۸. مقایسه غلظت فلزات سنگین در پژوهش حاضر با دیگر تالابها

ردیف	منطقه	کادمیوم	مس	آهن	منگنز	نیکل	سرب
۱	شیل جهانی	۰/۳	۴۵	۴۷۰۰۰	۸۵۰	۵۰	۲۰
۲	تالاب ناصری خرمشهر (ولایت زاده و کوشافر، ۱۳۹۸)	-	۳۱/۵۱	۲۹۳۱	۲۷۹	۱۰/۸۶	-
۳	خاک زراعی هورالعظیم (عبیات و همکاران، ۱۳۹۹)	۲/۱۵	۱۹	۱/۵۶	۴۲۶	۷۵/۳	۱۴/۸
۴	آب تالاب هورالعظیم (الباجی و همکاران، ۱۴۰۱)	۰/۱۵	-	-	-	۰/۲۴	۰/۲۱
۵	تالاب انزلی (جعفری و حسن زاده، ۱۳۹۸)	۱/۲۵	۲۱/۹	-	-	-	۴/۳۹
۶	تالاب تیاب و کلاهی در میناب (دهقانی و دست افکن، ۱۳۹۵)	۶/۱۵	۳۶/۱۸	-	-	۱۴۲/۸	۲۳/۲۲
۷	تالاب Beel در بنگلادش (سلام ^۲ و همکاران، ۲۰۲۱)	-	۴/۷۱	-	۶۰/۴	-	-
۸	تالاب Khyber Pakhtunkhwa پاکستان (حسین قیصر و همکاران، ۲۰۱۸)	۰/۱۸۸	-	-	۱/۰۲۴	۰/۱۹	۴۷/۳
۹	آب تالاب اوگورو نیجریه (محمد و همکاران، ۲۰۲۰)	۰/۰۰۰۳	۱/۷	۰/۲۱	۳۳	-	۱۲
۱۰	خاک خشک شده هورالعظیم (پژوهش حاضر)	۱/۶۴	۶۲/۴	۲۱۲/۶	۴/۶۶	۸۳/۸۶	۵۳/۴

۳-۳. سطوح آلودگی فلزات سنگین

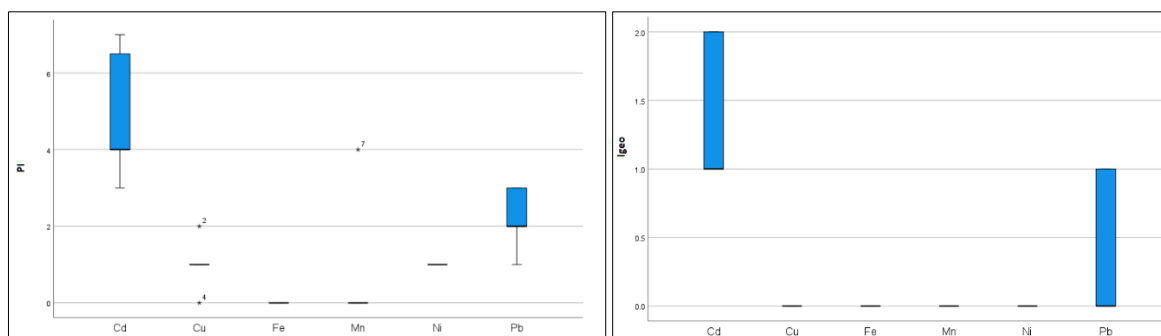
شاخص زمین‌انباشت ژئوشیمیایی و شاخص آلودگی برای هر یک از فلزات موردنظر در تمام نقاط اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و نمودار جعبه‌ای (Boxplot) برای آنها ترسیم شد (شکل ۴). ارزیابی سطح آلودگی با شاخص زمین‌انباشتگی نشان می‌دهد که آلودگی کادمیوم متوسط و متوسط تا شدید است؛ سرب دارای زمین‌انباشتگی غیرآلوده تا آلودگی متوسط و اما مس، آهن و منگنز غیرآلوده هستند. شاخص آلودگی (PI) که از غلظت فلز اندازه‌گیری شده تقسیم بر حد مجاز آن به دست آمده است، نشان می‌دهد که آلودگی کادمیوم زیاد و بسیار زیاد است. پس از آن آلودگی سرب قرار دارد که آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد را نشان می‌دهد؛ اما آلودگی نیکل کم است و سطح آلودگی آهن و منگنز ناچیز بوده و خاک از لحاظ این فلزات، آلودگی ندارد. بنابراین، شاخص‌های زمین‌انباشتگی و شاخص آلودگی نشان می‌دهند که سطح آلودگی کادمیوم و تا حدودی سرب در خاک‌های هورالعظیم زیاد بوده و می‌تواند خطر ساز باشد (شکل ۴).

خطر آلودگی اکولوژیکی رسوبات تالاب هورالعظیم نیز محاسبه شد (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهد که خطر اکولوژیکی کادمیوم قابل ملاحظه و زیاد است، اما برای دیگر فلزات (مس، نیکل و سرب) خطر اکولوژیکی کم است. بنابراین از لحاظ اکولوژیکی، فلز کادمیوم در خاک‌های هورالعظیم خطر آفرین بوده و می‌تواند اکولوژی منطقه را تحت تاثیر قرار بدهد.

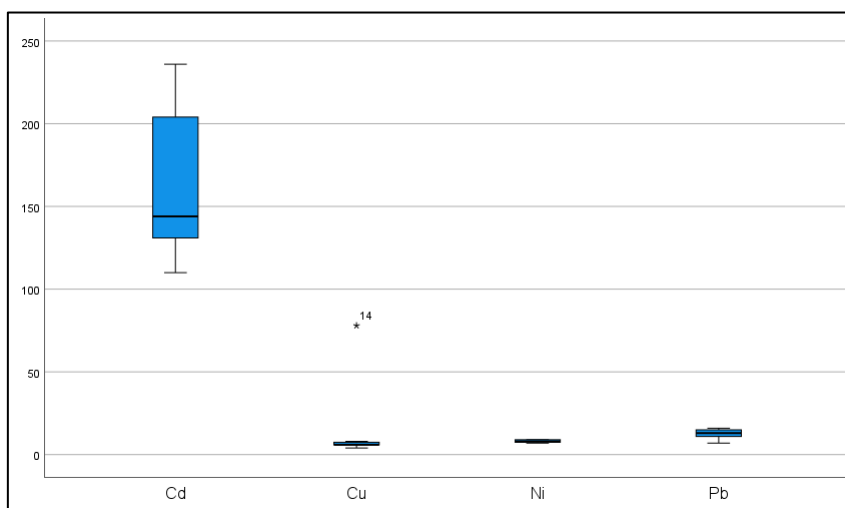
1 Jaffari and Hassanzadeh

2 Dehghani M, Dast Afkan

3 Salam



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای شاخص‌های Igeo و Pi برای فلزات سنگین در خاک‌های خشک شده هورالعظیم

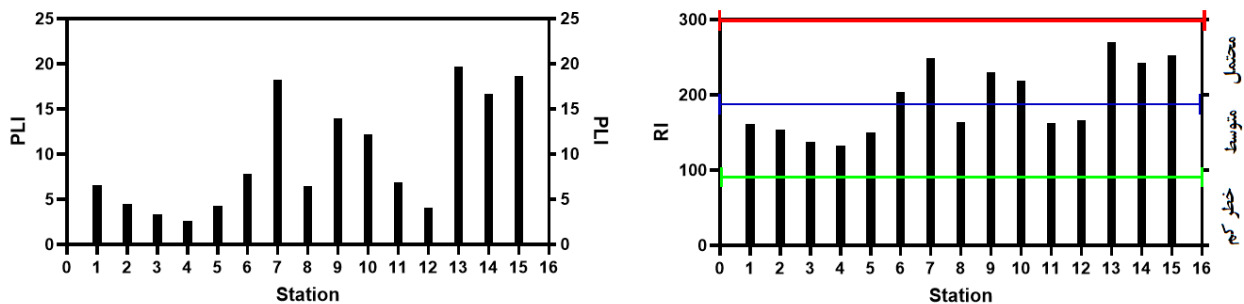


شکل ۵. ارزیابی فلزات سنگین در خاک هورالعظیم با شاخص آلودگی اکولوژیکی (Er)

۳-۴. شاخص‌های تجمعی آلودگی

تخریب خاک با فلزات سنگین در هر یک از نقاط مورد مطالعه با شاخص بار آلودگی (PLI) محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که فلزات سنگین در همه نقاط، پتانسیل تخریب خاک را دارند؛ چون که عدد به‌دست آمده برای شاخص PLI در همه نقاط بیشتر از یک است که بیان‌گر تخریب خاک توسط فلزات سنگین است. شاخص خطر اکولوژیکی بالقوه (RI) که از مجموع شاخص ER محاسبه گردید، نشان می‌دهد که ۸ نقطه در طبقه خطر اکولوژیکی متوسط و ۷ نقطه در طبقه خطر اکولوژیکی محتمل قرار گرفته‌اند. بنابراین خطر اکولوژیکی در تمام نقاط اندازه‌گیری شده در بخش شرقی تالاب هورالعظیم وجود دارد (شکل ۶).

برای هر فلز، میانگین سطح آلودگی در ۱۵ نقطه به‌دست آمد و با دو شاخص بررسی شد. شاخص امنیت آلودگی یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست است که در این مطالعه غلظت‌ها نشان می‌دهد شدت خیلی زیاد برای عنصر نیکل است و پس از آن کادمیوم با شدت بسیار کم قرار دارد. اما از لحاظ درجه آلودگی اصلاح شده، عناصر مس، نیکل و سرب درجه خیلی زیاد دارند (جدول ۹).



شکل ۶. نمودار ستونی شاخص PLI و RI برای ۱۵ ایستگاه اندازه‌گیری فلزات سنگین در خاک

جدول ۹. ارزیابی تجمعی فلزات سنگین با شاخص‌های امنیت‌الودگی و درجه آلودگی اصلاح شده

سرب	نیکل	مس	کادمیوم	شاخص
۰/۳۴	۴/۰۲	۰/۲۵	۰/۵۲	شاخص امنیت آلودگی
عدم آلودگی	شدت خیلی زیاد	عدم آلودگی	شدت بسیار کم	
۸/۹	۱۳/۹	۱۰/۴	۰/۲۷	درجه آلودگی اصلاح شده
خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	بسیار کم	

۳-۵. شناسایی منشاء فلزات سنگین

تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) یکی از روش‌های تحلیل آماری چندمتغیره است که برای منشاء‌یابی فلزات سنگین در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد و این روش مورد تأیید پژوهشگران قرار گرفته است. نتایج این آزمون آماری بر روی غلظت فلزات سنگین در بخش شرقی تالاب هورالعظیم در جداول (۱۰ و ۱۱) ارائه شده است. بر اساس این جداول، دو عامل مهم و اصلی تشخیص داده شد که ۹۳ درصد واریانس کل را شامل می‌شوند. عامل اول با ۵۶/۹ درصد واریانس رابطه مستقیمی با فلزات کادمیوم، مس، نیکل و سرب دارد. در بین این فلزات، مقدار میانگین غلظت همه این چهار فلز بیش‌تر از میانگین شیل جهانی است. با توجه به عامل غنی‌شدگی، این فلزات دارای منشاء انسانی دارند و انسان با ریختن پساب و زباله به تالاب باعث افزایش غلظت این فلزات در رسوبات خشک شده تالاب شده‌اند. در رسوبات هندیمان در استان خوزستان نیز این فلزات منشاء انسانی و غیرزمین‌زاد دارند. در عامل دوم که ۳۶/۷ درصد کل واریانس را تشکیل می‌دهد، رابطه مستقیمی با آهن و منگنز دارد. غلظت این دو فلز کمتر از میانگین شیل جهانی است و دارای غنی‌شدگی بسیار پایینی هستند که بیان‌گر منشاء زمین‌زاد برای این دو فلز است.

جدول ۱۰. نتایج تحلیل مولفه اصلی برای فلزات سنگین در رسوبات خشک شده تالاب هورالعظیم

مولفه	مقادیر ویژه اولیه			مجموع مربعات قبل از چرخش			مجموع مربعات بعد از چرخش		
	کل	درصد واریانس	درصد تجمعی	کل	درصد واریانس	درصد تجمعی	کل	درصد واریانس	درصد تجمعی
۱	۴/۰۸	۶۷	۶۷	۴/۰۸	۶۷/۹	۶۷/۹	۳/۴۲	۵۶/۹	۵۶/۹
۲	۱/۵۴	۲۵	۹۳	۱/۵۴	۲۵/۶	۹۳/۶	۲/۲۰	۳۶/۷	۹۳/۶
۳	۰/۲۳۷	۳/۹	۹۷						
۴	۰/۰۷۴	۱/۲۲	۹۸/۸						
۵	۰/۰۵۲	۰/۸۶۸	۹۹/۷						
۶	۰/۰۱۶	۰/۲۶۱	۱۰۰						

جدول ۱۱. ضریب همبستگی فلزات سنگین و دو عامل اصلی

مولفه		
۲	۱	
-۰/۲۶۲	۰/۹۲۸**	کادمیوم (Cd)
۰/۳۰۴	۰/۹۱۲**	مس (Cu)
۰/۹۶۸**	-۰/۱۹۰	آهن (Fe)
۰/۹۷۳**	-۰/۱۵۸	منگنز (Mn)
-۰/۳۸۴	۰/۹۱۰**	نیکل (Ni)
۰/۱۰۳	۰/۹۱۵**	سرب (Pb)

۴. نتیجه‌گیری

تالاب بین‌المللی هورالعظیم، محل دریافت آب از رودخانه کرخه در ایران و دجله از عراق است؛ زیست‌بوم‌های بسیار قوی در این تالاب وجود دارد و به‌عنوان مخزن ژنتیکی آبزیان در میان‌رودان شناخته می‌شود؛ اما عوامل انسانی مانند احداث آب‌بند بر روی رودخانه‌ها، حفاری و استخراج نفت از مخزن نفتی هورالعظیم به‌همراه خشکسالی‌ها موجب از بین رفتن بیش از ۱۴۰۰ کیلومتر مربع از تالاب در ۳۷ سال گذشته شده است. بخش جنوبی تالاب کاملاً خشک شده و به بیابان تبدیل شده است. خاک این ناحیه حاصل از رسوبات تالاب است و به‌دلیل تخلیهٔ پساب‌های صنعتی، تأسیسات نفتی، پسماندهای ناشی از حفاری برای نفت در تالاب، فلزات سنگین در رسوبات مشاهده شده است. این پژوهش نشان داد که غلظت کادمیوم و سرب در این تالاب بسیار زیاد است و خطر اکولوژیکی بالایی دارد. غنی‌شدگی و زمین‌انباشت این دو فلز بیشتر از میانگین شیل جهانی است و منشاء انسانی دارند. منشایابی با تحلیل آماری چندمتغیره نیز نشان داد که این دو فلز که با عامل اول (۵۶/۹ درصد از واریانس کل) ارتباط مستقیمی دارند، منشاء انسانی و غیرزمین‌زاد دارند. از طرفی مشاهدات میدانی از محل نیز تأییدکنندهٔ این مسئله است. از شمال، غرب و شمال‌شرقی که سکونتگاه‌های انسانی و تأسیسات صنعتی و به‌ویژه نفتی در نزدیکی و درون تالاب وجود دارد، پساب و پسماندها را در تالاب تخلیه می‌کنند و باعث بالا رفتن غلظت فلزات سنگین در رسوبات شده است. خاک خشکِ برجای‌مانده از تالاب، به کانون گردوغبار تبدیل شده است و غبارهایی که آغشته به فلزات سنگین هستند، می‌تواند محیط‌زیست مناطق مجاور را به‌شدت آلوده و سمی کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای جلوگیری از ورود این خاک‌های آلوده به محیط‌زیست، تثبیت خاک به‌ویژه با عملیات درختکاری انجام شود تا از انتشار هرگونه مواد آلاینده به‌ویژه فلزات سنگین در سطح استان خوزستان و دیگر استان‌های هم‌جوار جلوگیری به‌عمل آید. درختکاری علاوه‌بر اینکه باعث تثبیت ذرات خاک می‌شود، بلکه ریشه‌های آن فلزات سنگین را جذب کرده و از انتشار آن جلوگیری می‌کنند و این می‌تواند به عنوان گیاه‌پالایی نیز مطرح گردد.

References

- Abdullah, H. M., Mukti, M., Miah, M. G., Karim, M. A., Tanzir, M. T., & Hossain, M. S. (2024). *Development at the cost of unsustainable degradation of wetlands: Unraveling the dynamics (historic and future) of wetlands in the megacity Dhaka*. *World Development Sustainability*, 4, 100131.
- Abraham, G. M. S., & Parker, R. J. (2008). Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental monitoring and assessment*, 136(1), 227-238.
- abyat, H., ansari, M. R., Rang Zan, N., & abyat, A. (2020). Assessment of Heavy Metals in Hooralazim Wetland Sediments by Calculation of Pollution Index. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), 2469-2481. [In Persian].

- Albaji L, Sabzalipour S, Askary sari A, Payandeh K, & Mohammadi Rouzbahani M. 2023. Evaluation of heavy metal pollution in sediments, water and macrobenthos of Hur Al-Azim wetland (Khuzestan). *Journal of Oceanography*, 13 (52) :29-47 [In Persian].
- Alikhani, S., Nummi, P., & Ojala, A. (2023). *Modified, ecologically destructed, and disappeared—History of urban wetlands in Helsinki metropolitan area*. *Wetlands*, 43(4), 33.
- Bai, J., Yang, Z., Cui, B., Gao, H., & Ding, Q. (2010). Some heavy metals distribution in wetland soils under different land use types along a typical plateau lake, China. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 344-348.
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... & Turner, R. K. (2014). *Changes in the global value of ecosystem services*. *Global environmental change*, 26, 152-158.
- Davidson, N. C. (2014). *How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area*. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934-941.
- Dehghani M, & Dast Afkan S. *Assessment of heavy metals pollution indices in sediments of Tiyab and Kolahi International Wetlands*. *J. Aqua. Eco* 2016; 6 (1) :82-92. [In Persian].
- Egwu, G. N., Okunola, O. J., & Ugwoke, K. C. (2018). Evaluation of some heavy metals in wetland soils of Uguru, Yobe State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 22(6), 987-992.
- Förstner, U., & Müller, G. (1981). *Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact*. *GeoJournal*, 5, 417-432.
- Gardner, R. C., & Finlayson, C. (2018, October). *Global wetland outlook: state of the world's wetlands and their services to people*. In Ramsar convention secretariat (pp. 2020-5).
- Habibi S, Behrouzi M, & Nohegar A. (2021). *Evaluation of heavy metals from desert dust in rangeland ecosystems of Khuzestan province*. *EER*; 11 (1) :75-95. [In Persian].
- Haris, H., Looi, L. J., Aris, A. Z., Mokhtar, N. F., Ayob, N. A. A., Yusoff, F. M., ... & Praveena, S. M. (2017). Geo-accumulation index and contamination factors of heavy metals (Zn and Pb) in urban river sediment. *Environmental Geochemistry and Health*, 39, 1259-1271.
- Howe, R. W., Niemi, G. J., Bracey, A. M., Brady, V., Elliott, L., Fiorino, G. E., ... & Wheelock, B. (2023). *An index of biotic condition (IBC) using birds as indicators of coastal wetland quality in North America's Laurentian Great Lakes*. *Ecological Indicators*, 156, 111174.
- Hussain Qaiser, M. S., Ahmad, I., Ahmad, S. R., Afzal, M., & Qayyum, A. (2019). Assessing heavy metal contamination in oil and gas well drilling waste and soil in Pakistan. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(2): 785-793.
- Jaffari F, & Hassanzadeh N. (2019). *Ecological quality assessment of Anzali wetland for heavy metals using heavy metals pollution index (HPI)*. *ijhe* 2019; 12 (2) :173-184. [In Persian].
- Jamshidi Zanjani, Ahmad, & Saidi, Mohsen. (2012). Assessment of pollution and qualitative zoning of surface sediments of Anzali lagoon based on the results of heavy metal pollution indicators. *Ecology*, 39(4 (ser. 68)), 157-170. [In Persian].
- Joybari, Seyedah Akram, Pirovan, Hamidreza, Rezaei, Peyman, & Gholami, Hamid. (1401). *Investigation and analysis of heavy metal concentration and sediment pollution indicators in Handijan dust center, Khuzestan province*. *Watershed Engineering and Management*, 14 (3), 312-331. [In Persian].
- Kowalska, J. B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., & Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environmental geochemistry and health*, 40, 2395-2420.
- Iajmirorak Nejati, M., Rang Zan, N., Nadian Ghomsheh, H., & Khalilimoghdam, B. (2019). *Risk Assessment of Heavy Metals in Soils around Khuzestan Steel Company*. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(4), 61-78. [In Persian].
- Liu, J., Liu, Y. J., Liu, Y., Liu, Z., & Zhang, A. N. (2018). Quantitative contributions of the major sources of heavy metals in soils to ecosystem and human health risks: A case study of Yulin, China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 164, 261-269.
- Matagi, S., Swai, D., & Mugabe, R. (1998). A review of heavy metal removal mechanisms in wetlands.
- Nabulo, G., Oryem Origa, H., Nasinyama, G. W., & Cole, D. (2008). Assessment of Zn, Cu, Pb and Ni contamination in wetland soils and plants in the Lake Victoria basin. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5, 65-74.
- Rabee, A. M., Al-Fatlawy, Y. F., & Nameer, M. (2011). Using Pollution Load Index (PLI) and geoaccumulation index (I-Geo) for the assessment of heavy metals pollution in Tigris river sediment in Baghdad Region. *Journal of Al-Nahrain University*, 14(4), 108-114.

- Rajendrakumar, S., & Ramachandran, V. S. (2021). Heavy Metals Pollution and Its Studies in Coimbatore District, Tamil Nadu. In *Handbook of Research on Environmental Education Strategies for Addressing Climate Change and Sustainability* (pp. 338-356). IGI Global.
- Rezaei, M., Zarasvandi, A., Azdari, A., Mousavi, S. S., Heidari, M., & Azizi, N. (2021). *Assessment of geological source and geochemical dispersion of heavy metals in the sediments of brine springs in Khuzestan Province*. *Advanced Applied Geology*, 11(2), 349-364. [In Persian].
- Salam, M. A., Alam, M. A., Paul, S. I., Islam, F., Shaha, D. C., Rahman, M. M., ... & Islam, T. (2021). *Assessment of heavy metals in the sediments of Chalan Beel Wetland area in Bangladesh*. *Processes*, 9(3), 410.
- Sodhi, G.S. (2005). *Fundamental Concepts of Environmental Geology*, 2nd edn, Narosa Publishing House, New Delhi, pp339-347.
- Sun, C., Zhu, S., Zhao, B., Li, W., Gao, X., & Wang, X. (2020). Effect of land use conversion on surface soil heavy metal contamination in a typical Karst Plateau Lakeshore Wetland of Southwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(1),84: 1-12.
- Sun, Q., Qi, W., & Jiang, W. (2021, March). Land use assessment using indices of heavy metal contamination in soils from intensive agricultural areas. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 687, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.
- Velayatzadeh M, & Koshafar A. Pollution Assessment some of Heavy Metals in Water and Surface Sediments of Nasserri Wetland (Khorramshahr). *sjsp* 2019; 17 (2) :157-168 [In Persian].
- Zarei, S., Karbassi, A., Sadrinassab, M., & Sarang, A. (2023). *Investigating heavy metal pollution in Anzali coastal wetland sediments: a statistical approach to source identification*. *Marine Pollution Bulletin*, 194, 115376.
- Zhang, Z., Cui, B., & Fan, X. (2012). Removal mechanisms of heavy metal pollution from urban runoff in wetlands. *Frontiers of Earth Science*, 6, 433-444.