

“Research article”

DOI: 10.82460/jepsud.2025.1225060

Assessment of pollution levels and sources of heavy metals in dried Kaftar Wetland sediments using quantitative and qualitative indices

Malihesadat Afzalizadeh¹, Mozghan Ahmadi Nadoushan^{*2}, Ahmad Jalalian³, Atefeh Chamani¹

¹Department of Environmental Sciences, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

²Department of Environmental Sciences, Waste and Wastewater Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

³Department of Soil Science, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

^{*}Corresponding Author: m.ahmadi@iau.ac.ir

(Received: 18 November 2025, Accepted: 6 January 2026)

Abstract

The Kaftar Wetland, covering approximately 5,600 km², is located about 180 km north of Fars Province and has completely dried up. The present study evaluated the concentrations of selected heavy metals – cadmium, arsenic, cobalt, lead, chromium, nickel, zinc, and manganese – in sediments of the dried Kaftar Wetland, where wetland desiccation and upstream agricultural activities have contributed to the formation of critical dust and pollution hotspots. A systematic sampling method was used to determine sediment sampling locations. The wetland area was divided into 24 blocks, and one point in each block was randomly selected for sampling. Surface sediment samples were collected in spring and autumn 1400 (Iranian calendar) from a depth of 0 - 10 cm. Samples were transported to the laboratory in zip-lock bags and, after drying, digestion, and preparation, metal concentrations were measured using an Agilent MP-AES (Model 4100). Quality control was performed using control samples and reference standards to ensure analytical accuracy. Among the measured metals, cadmium showed the highest concentration (0.84 mg/kg), placing it in the strong to very strong contamination range at several stations, whereas other elements generally remained within lower contamination ranges across both seasons. The elevated cadmium levels were attributed primarily to upstream agricultural activities.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Heavy metals, Sediment, Kaftar wetland, Quality indicators, Cadmium



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۲، شماره ۳، پیاپی ۷
پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۵۶-۴۵

DOI: 10.82460/jepsud.2025.1225060

«مقاله پژوهشی»

ارزیابی آلودگی و منشأیابی فلزات سنگین در رسوبات تالاب خشک شده کافت‌ر با استفاده از شاخص‌های کمی و کیفی

ملیحه سادات افضلی^۱، مژگان احمدی ندوشن^{۲*}، احمد جلالیان^۳، عاطفه چمنی^۱

^۱گروه محیط زیست، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

^۲گروه محیط زیست، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

^۳گروه خاک، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: m.ahmadi@iau.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶)

چکیده

تالاب کافت‌ر با مساحت ۵۶۰۰ کیلومترمربع در ۱۸۰ کیلومتری شمال استان فارس واقع است و به طور کامل خشک شده است. پژوهش حاضر به ارزیابی غلظت فلزات سنگین کادمیوم، آرسنیک، کبالت، سرب، کروم، نیکل، روی و منگنز در رسوبات تالاب کافت‌ر پرداخته که در اثر خشک شدن تالاب همراه با فعالیت‌های کشاورزی بالادست به ایجاد نقاط بحرانی گرد و غبار و آلودگی در این نواحی منجر شده است. از این رو برای جانمایی نقاط برداشت نمونه رسوب از روش نمونه‌برداری سیستماتیک استفاده شد. محدوده تالاب به ۲۴ بلوک تقسیم شد. سپس در هر بلوک یک نقطه با انتخاب تصادفی برای نمونه‌برداری مشخص شد. نمونه‌برداری سطحی خاک در فصل پاییز ۱۴۰۰، از عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری انجام شد. سپس نمونه‌ها در کیسه‌های زیپ کیف به آزمایشگاه منتقل شد و پس از خشک شدن، هضم و آماده‌سازی به وسیله دستگاه MP-AES برند AGILENT مدل ۴۱۰۰ برای فلزات شناسایی و غلظت آن‌ها اندازه‌گیری شد. کنترل کیفیت با استفاده از نمونه‌های شاهد و استانداردهای مرجع انجام شد تا دقت نتایج تضمین گردد. در بین فلزات سنگین کادمیوم، به مراتب غلظت بیش‌تری را در نمونه رسوب خاک (۰/۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از خود نشان داد. این فلز را در برخی ایستگاه‌ها در محدوده آلودگی قوی یا بسیار قوی قرارداد؛ حال آنکه سایر عناصر عموماً در هر دو فصل در محدوده بدون آلودگی یا بدون آلودگی باقی ماندند. این مطالعه، افزایش آلاینده کادمیوم را به دلیل فعالیت‌های کشاورزی در بالادست تالاب مرتبط می‌داند.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، رسوب، تالاب کافت‌ر، شاخص‌های کیفی، کادمیوم

مقدمه

تالاب‌ها و دریاچه‌های موقت در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در صورت خشک‌شدن، به یکی از مهم‌ترین منابع تولید گرد و غبار تبدیل می‌شوند. زمانی که یک تالاب خشک می‌شود، رسوب‌های باقی‌مانده در بستر آن که معمولاً شامل ذرات ریز و کم‌چگالی هستند، در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرند. این رسوبات، به دلیل اندازه کوچک و وزن سبک، به راحتی توسط باد جابه‌جا می‌شوند و به صورت گرد و غبار در محیط پراکنده می‌شوند (۱). در مقایسه با خاک‌های اراضی طبیعی، رسوب‌های تالاب‌های خشک‌شده حاوی ذرات ریزتری هستند که توانایی بیش‌تری برای تشکیل گرد و غبار دارند. علاوه بر این، این رسوبات اغلب شامل مواد شیمیایی و معدنی خاصی هستند که می‌توانند اثرات مخربی بر سلامت انسان و محیط زیست داشته باشند. تخریب پوشش گیاهی و خشک‌شدن تالاب‌ها هر دو به طور مستقیم و غیرمستقیم در تولید گرد و غبار نقش دارند، اما تفاوت‌هایی در نحوه تأثیرگذاری آن‌ها وجود دارد. تخریب پوشش گیاهی بیش‌تر به‌عنوان یک فرایند تدریجی و ناشی از فعالیت‌های انسانی مطرح است، درحالی‌که خشک‌شدن تالاب‌ها می‌تواند به سرعت و در اثر تغییرات اقلیمی یا مدیریت نادرست منابع آبی رخ دهد (۲). در عین حال، این دو عامل می‌توانند به طور هم‌زمان و متقابل عمل کنند. تخریب پوشش گیاهی در اطراف تالاب‌ها می‌تواند منجر به تشدید خشک‌شدن آن‌ها شود، زیرا پوشش گیاهی نقش مهمی در تنظیم چرخه آب و کاهش تبخیر دارد. از سوی دیگر، رسوب‌های ناشی از تالاب‌های خشک‌شده می‌توانند بر خاک‌های اطراف تأثیر منفی گذاشته و

فرسایش بادی را در مناطق مجاور افزایش دهند. بر این اساس، تخریب پوشش گیاهی و رسوب‌های تالاب‌های خشک‌شده هر دو نقش برجسته‌ای در تولید گرد و غبار دارند، اما با مکانیزم‌های متفاوتی عمل می‌کنند. در حالی که پوشش گیاهی به‌عنوان یک سد طبیعی در برابر فرسایش بادی عمل می‌کند، تالاب‌های خشک‌شده به دلیل وجود رسوب‌های ریز و مستعد، مستقیماً به منابع گرد و غبار تبدیل می‌شوند (۳). فلزات سنگین شامل عناصری مانند سرب، کادمیوم و جیوه هستند که به دلیل تراکم بالای اتمی و پایداری شیمیایی، به سختی از محیط حذف می‌شوند. این فلزات معمولاً از طریق فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و حمل و نقل وارد خاک و رسوبات می‌شوند و با فرسایش بادی به گرد و غبار منتقل می‌شوند (۴). رسوبات و گرد و غبار آلوده به فلزات سنگین می‌توانند اثرات قابل توجهی بر سلامت انسان داشته باشند، زیرا این مواد از طریق استنشاق یا تماس پوستی وارد بدن می‌شوند. به‌طور کلی، تجمع فلزات سنگین در رسوبات بیش‌تر به دلیل رسوب‌گذاری تدریجی و خاصیت جذب بالای ذرات ریز رخ می‌دهد، در حالی‌که در گرد و غبار، انتقال و پراکندگی این فلزات سریع‌تر است و اثرات گسترده‌تری دارد (۵). در دنیا توجه به غلظت فلزات سنگین در خاک به دلیل خطرات بالقوه آن‌ها برای محیط زیست و سلامت انسان افزایش یافته است (۶). فلزات سنگین به‌عنوان گروهی از آلاینده‌ها در نظر گرفته می‌شوند که به دلیل سمیت زیاد، تجزیه‌ناپذیری، تجمع زیستی و بزرگ‌نمایی زیستی، به‌ویژه در تمام محیط‌های ساحلی و دریایی، خطرات زیست‌محیطی قابل توجهی را به همراه دارند (۷). فلزات سنگین مانند سرب، روی، مس، کادمیوم،

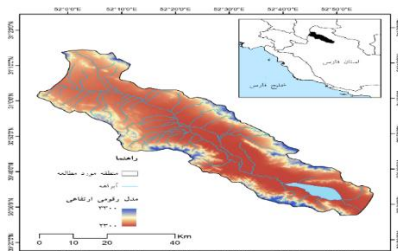
آرسنیک و کروم به دلیل خاصیت سمی و تجمع زیستی، از جمله مهم‌ترین و جدی‌ترین عوامل آلودگی محیط‌زیست را تشکیل می‌دهند (۸). استفاده بیش از حد از فلزات سنگین می‌تواند منجر به مسمومیت‌های حاد و مزمن، از جمله آسیب به سیستم عصبی مرکزی، ترکیب خون، ریه، کلیه، کبد و حتی مرگ گردد (۹). این فلزات به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و تأثیرات فیزیولوژیکی بر انسان و سایر موجودات زنده، حتی در غلظت‌های کم اهمیت قابل توجهی دارند (۱۰). کودکان نسبت به بزرگسالان، مقدار بیش‌تری از این فلزات را جذب می‌کنند. این باعث اختلال در رفتارهای متابولیکی آن‌ها می‌شود (۱۱). توسعه گسترده فعالیت‌های انسانی و صنایع، مقادیر زیادی از آلاینده‌ها، شامل فلزات سنگین را وارد محیط زیست می‌کند (۱۲). فلزات سنگین از راه‌های مختلف وارد محیط زیست می‌شوند. این آلاینده‌ها به هوا، خاک و در نهایت اکوسیستم‌های آبی وارد می‌شوند (۱۳). و فور آلاینده‌ها، سمیت و پایداری آن‌ها در اکوسیستم‌های آبی، توجه مجامع علمی جهانی را به خود جلب کرده است. فلزات سنگین موجود در اکوسیستم‌های آبی منشأ طبیعی و یا انسانی دارند. منشأ طبیعی آن از هوازدگی خاک‌ها و سنگ‌ها، فرسایش محیط، آتش‌سوزی اکوسیستم‌های طبیعی و فعالیت‌های آتشفشانی حاصل می‌شود (۱۴). منشأ انسانی نیز از تخلیه پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی و تخلیه مواد زائد کشاورزی و معدن‌کاوی و سایر فعالیت‌های انسانی حاصل می‌شود (۱۵). مطالعات متعدد انجام شده نشان از بالاتر بودن غلظت برخی از عناصر سنگین در رسوبات و در نتیجه موجودات محیط‌های

آبی داشته و این امر ناشی از انباشتگی این آلاینده‌ها در سیستم‌های اکولوژیکی در طول زمان دارد (۱۶). فلزات سنگین اثرات مستقیمی بر سیستم‌های حیاتی مختلف بدن دارند. سرب، یکی از شایع‌ترین فلزات سنگین، به‌ویژه در کودکان، اثرات مخربی بر سیستم عصبی دارد و منجر به کاهش ضریب هوشی، اختلالات یادگیری و مشکلات رفتاری می‌شود. در بزرگسالان، سرب، می‌تواند باعث افزایش فشارخون، آسیب به کلیه‌ها و اختلالات قلبی - عروقی شود. جیوه، عمدتاً سیستم عصبی را تحت‌تأثیر قرار داده، می‌تواند باعث لرزش، اختلالات حافظه و کاهش هماهنگی حرکتی شود. اثرات جیوه در زنان باردار خطرناک‌تر است، زیرا می‌تواند به جنین منتقل شده و موجب اختلالات رشد مغزی شود (۱۷). کادمیوم، به‌ویژه از طریق مصرف مواد غذایی آلوده، موجب آسیب‌های کلیوی، پوکی‌استخوان و افزایش خطر ابتلا به سرطان ریه می‌شود. آرسنیک نیز که معمولاً از طریق آب آشامیدنی آلوده وارد بدن می‌شود، می‌تواند باعث آسیب به پوست، سیستم گوارشی و افزایش خطر انواع مختلفی از سرطان‌ها، به‌ویژه سرطان مثانه و پوست، شود (۱۸).

آنجانا^۱ و همکارانش در مطالعه‌ای (۱۹) به بررسی وجود عناصر بالقوه سمی (PTES) در رسوبات سطحی و آب تالاب آشتامودی، در ساحل جنوب غربی هند، می‌پردازد. شاخص‌های آلودگی و ریسک اکولوژیکی (مانند EF, CF, Jgeo, mCd, EI, RI, mHQ, TRI, PLI) خطرات و آلودگی اکولوژیکی متوسط تا قابل توجه را نشان می‌دهند. ارزیابی‌های ریسک سلامت، افزایش ریسک سرطان مرتبط با نیکل، کادمیوم، سرب

^۱ Anjana

گونه‌های شاخص تالاب عبارت‌اند از: تنجه، چنگر معمولی، اردک سرخانی، خوتکا، اردک سرسبز، غاز خاکستری، عقاب دم‌سفید و انواع پرندگان کنار آبی است. اراضی حاشیه تالاب محل زمستان‌گذرانی جمعیت‌های درنا است. تالاب کافت‌ر در سال‌های اخیر به طور کامل خشک بود که با بارندگی ۵۸۰ میلی‌متری زمستان گذشته نزدیک به ۳۰٪ آن آبیگری شد (۲۰).



شکل (۱): حوضه آبخیز تالاب کافت‌ر

نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل داده‌ها

- نمونه‌برداری رسوب

در این مطالعه برای بررسی غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه رسوب تالاب کافت‌ر از روش نمونه‌برداری سیستماتیک استفاده شد. برای این منظور محدوده تالاب با توجه به مساحت آن به ۲۴ بلوک تقسیم شد. سپس در هر بلوک یک نقطه برای نمونه‌برداری مشخص شد. در این نقاط، نمونه‌های سطحی در انتهای فصل پاییز از عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری سطح خاک برداشت شد. این روش باعث کاهش توزیع در انتخاب نقاط نمونه‌برداری شده، پوشش فضایی مناسبی از کل محدوده فراهم ساخت.

- آماده‌سازی نمونه‌ها جهت سنجش فلزات سنگین

برای محاسبه غلظت فلزات سنگین، نمونه‌های خاک در دمای محیط خشک شدند تا رطوبت آنها از بین برود. سپس نمونه‌ها به صورت پودری همگن درآمده و از الک با مش ۶۳ میکرون عبور داده شدند

و کروم را در مناطق با آلودگی بالا شناسایی می‌کند. این کار تغییرات فصلی، شاخص‌های ریسک پیشرفته، ارزیابی ریسک سلامت و تکنیک‌های اصلاح را که برای مدیریت پایدار حیاتی هستند، ادغام می‌کند. بنابراین، یافته‌ها خواستار استراتژی‌های اصلاحی هدفمند برای کاهش آلودگی فلزات سنگین و حفاظت از یکپارچگی اکولوژیکی و سلامت عمومی تالاب آشتامودی هستند.

در این پژوهش به ارزیابی غلظت فلزات سنگین کادمیوم، آرسنیک، کبالت، سرب، کروم، نیکل، روی و منگنز در رسوبات تالاب کافت‌ر پرداخته که در اثر خشک‌شدن تالاب همراه با فعالیت‌های کشاورزی بالادست به ایجاد نقاط بحرانی گرد و غبار و آلودگی در این نواحی منجر شده است.

مواد و روش‌ها

- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کافت‌ر با مساحت ۵۶۰۰ کیلومتر مربع و با مختصات جغرافیایی از ۵۱ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۲۲، ۲۷ دقیقه تا ۳۱ درجه ۱۴، ۴۹ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی در استان فارس واقع شده است (شکل (۱)).

فعالیت‌های کشاورزی اصلی‌ترین فعالیت انسانی در منطقه مورد مطالعه است، حال آن‌که سکونت‌گاهی انسانی قابل توجهی در منطقه وجود نداشته و عمدتاً از مراکز کوچک روستایی تشکیل شده‌اند که بخش بزرگی از آن‌ها به دلیل خشک‌شدن تالاب کافت‌ر از منطقه مهاجرت کرده‌اند. منبع تأمین آب تالاب کافت‌ر، رودخانه شادکام با دبی متوسط ۱ مترمکعب و آهکی است. کیفیت آب دریاچه در پایان دوره بارندگی بهترین و در آغاز بارندگی نامناسب‌ترین است.

آلودگی بسیار شدید (اعداد بیش از ۵) مورد ارزیابی قرار می‌دهد (جدول (۱)) (۲۱).

$$I_{geo} = \log_2 \frac{c_n}{1.5B_n} - 1 \quad \text{معادله (۱)}$$

جدول (۱): معیارهای طبقه‌بندی شاخص زمین انباشتگی

شدت آلودگی	محدوده تغییرات (I_{geo})
آلودگی بسیار شدید	بیش‌تر از ۵
آلودگی شدید	بین ۴-۵
آلودگی زیاد	بین ۳-۴
آلودگی متوسط	بین ۲-۳
آلودگی کم	بین ۱-۲
فاقد آلودگی	کم‌تر از ۱-۰

- شاخص غنی‌شدگی

این فاکتور برای ارزیابی درجه آلودگی فلزات سنگین با نرمال‌سازی غلظت فلزات سنگین نسبت به یک عنصر مرجع (معمولاً عنصری که پایدار و به طور طبیعی فراوان است، مانند آهن یا آلومینیوم) استفاده می‌شود. این فاکتور به تفکیک سهم طبیعی و انسان‌ساخت فلزات سنگین پرداخته و به تعیین منابع احتمالی طبیعی یا انسانی غلظت‌های به‌دست‌آمده کمک می‌کند. برای محاسبه این شاخص از معادله (۲) استفاده می‌شود که در آن نسبت X مربوط به غلظت فلز اندازه‌گیری شده و C مربوط به غلظت عنصر مرجع مورد استفاده است. در این شاخص، اعداد کم‌تر از ۲ نشان دهنده محیط غیر آلوده است و اعداد بیش از ۵، نشان‌دهنده آلودگی بسیار شدید به فلزات سنگین به دلیل فعالیت‌های انسانی است (جدول (۲)) (۲۲).

$$EF = \frac{(C_n)_{\text{X}}}{(C_n)_{\text{C}}} \quad \text{معادله (۲)}$$

جدول (۲): رده‌بندی مقادیر غنی‌شدگی

شدت غنی‌شدگی	مقادیر شاخص غنی‌شدگی
غناى حداقل	$EF < 2$
غناى متوسط	$2 \leq EF < 5$
غناى قابل توجه	$5 \leq EF < 20$
غناى شدید	$20 \leq EF < 40$
غناى بسیار شدید	$EF \leq 40$

تا برای هضم اسیدی آماده شوند. برای هر نمونه، حدود ۰/۵ گرم از خاک توزین شده و با مخلوطی از ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ، ۳ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوریک و ۱ تا ۲ میلی‌لیتر اسید پرکلریک یا اسید کلریدریک ترکیب شد. سپس نمونه‌ها در رآکتور ماکروویو در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۰ بار قرار داده و به مدت ۶۰ دقیقه هضم گردید. پس از اتمام هضم، نمونه‌ها خنک شده و محلول از فیلتر عبور داده می‌شود تا ذرات جامد جدا شوند. سپس محلول فیلتر شده با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در مرحله نهایی، فلزات سنگین موجود در محلول نمونه‌ها شامل کروم (Cr)، نیکل (Ni)، منگنز (Mn)، سرب (Pb)، روی (Zn)، کبالت (Co)، آرسنیک (As) و کادمیوم (Cd) با استفاده از دستگاه MP-AES برند AGILENT مدل ۶۱۰۰ شناسایی و غلظت آن‌ها را اندازه‌گیری شد. کنترل کیفیت نیز با استفاده از نمونه‌های شاهد و استانداردهای مرجع انجام شد تا دقت نتایج تضمین گردد.

- محاسبه شاخص‌های آلودگی

- شاخص زمین - شیمیایی مولر

شاخص زمین‌انباشت برای ارزیابی سطح آلودگی فلزات سنگین در رسوبات با مقایسه غلظت‌های فعلی با سطوح پیش‌صنعتی استفاده می‌شود. این شاخص با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود که در آن C_n غلظت اندازه‌گیری شده فلز در نمونه و B_n غلظت زمینه‌ای فلز است. در این رابطه، ضریب ۱/۵ برای در نظر گرفتن تغییرات احتمالی در مقادیر زمینه‌ای به علت عوامل طبیعی استفاده می‌شود. همچنین این شاخص، آلودگی رسوبات به عناصر سنگین را در ۷ کلاس، از رده کاملاً غیر آلوده (اعداد کم‌تر از صفر) تا

- شاخص بار آلودگی

جدول (۳): طبقه بندی شاخص خطر		
رده	محدوده ریسک	شدت ریسک
۱	$RI < 150$	خطر کم
۲	$150 \leq RI < 300$	خطر متوسط
۳	$300 \leq RI < 600$	خطر قابل توجه
۴	$RI \leq 600$	خطر بسیار زیاد

بحث و نتیجه گیری

- غلظت فلزات سنگین در رسوب

غلظت کروم در فصل بهار نسبت به پاییز افزایش چشمگیری نشان داد که این می تواند به عوامل محیطی مانند جهت و شدت باد، به علاوه فرایندهای بیولوژیکی فصلی که ممکن است آلاینده ها را جابه جا یا متمرکز کنند، ارتباط داشته باشد. این نتایج با یافته های (۲۴) هم راستا است که نشان داده اند تغییرات فصلی، از جمله بارش و الگوهای باد، تأثیر زیادی بر پراکندگی و غلظت فلزات سنگین در نمونه های محیطی دارند.

غلظت نیکل در رسوبات بیش تر تحت تأثیر شرایط محیطی مانند بارش های فصلی قرار دارد که می تواند موجب شست و شوی فلزات از سطح خاک به سمت رسوبات شود. این پدیده که به «شست و شو» یا «آب شویی» معروف است، در مطالعات مختلفی از جمله (۲۵) گزارش شده است که در آن بارش به عنوان عامل کلیدی در انتقال فلزات سنگین از لایه های سطحی به لایه های عمیق تر خاک یا رسوب شناخته شده است.

کبالت بیش تر به عنوان یک فلز با منابع طبیعی ثابت، شناخته می شود که تغییرات آن کم تر به عوامل فصلی وابسته است. در این راستا، (۱۲) نیز نشان دادند که این فلز سنگین عموماً رفتار ژئوشیمیایی ثابتی دارد کم تر تحت تأثیر تغییرات فصلی قرار می گیرد.

این شاخص یک شاخص تجمعی از سطح کلی آلودگی فلزات سنگین در یک منطقه خاص است. این شاخص به عنوان میانگین هندسی عوامل آلودگی فلزات C برابر با نسبت غلظت فلز اندازه گیری شده (C_{metal}) به غلظت طبیعی آن فلز در خاک ($C_{background}$) محاسبه می شود (معادله (۳)). در این شاخص، اعداد کم تر از ۱، نشان دهنده عدم وجود آلودگی در منطقه است که با افزایش مقدار آن به شدت آلودگی اضافه می شود. اعداد بیش تر از ۳ در این شاخص نشان دهنده آلودگی بسیار شدید خاک است شاخص بار آلودگی یک ارزیابی از وضعیت سمی بودن کلی نمونه است (۲۳).

$$PLI = (C_1 C_2 \dots C_n)^{1/n} \quad \text{معادله (۳)}$$

- شاخص ریسک اکولوژیک

شاخص ارزیابی خطر اکولوژیکی فلزات سنگین در ابتدا به وسیله هاکنسون (۱۹۸۰) مطرح شد تا درجات آلودگی فلزات در خاک ارزیابی و حساسیت جوامع مختلف اکولوژیکی خاک نسبت به سمیت فلزات سنگین سنجیده شود. در این شاخص، E_r^i شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی است که از طریق غلظت اندازه گیری شده هر فلز نسبت به مقدار غلظت زمینه (طبیعی) آن به دست می آید. مقدار فاکتور سمیت (معادله (۴)) در تعیین این شاخص استفاده می شود و برای هر عنصر متفاوت است. مقادیر به دست آمده از این شاخص نیز مقادیر مثبت را شامل می شود که اعداد کم تر از ۱۵۰، خطر اکولوژیکی کم و اعداد بیش از ۶۰۰، خطر اکولوژیکی بالا و معنی دار را نشان می دهد (جدول (۳)).

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad \text{معادله (۴)}$$

– شاخص ژئوشیمیایی مولر
بر اساس شاخص ژئوشیمیایی مولر (Igeo) در
جداول (۴) و (۵)، تغییرات فصلی در مقادیر این
شاخص برای عناصر مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل پاییز، مقادیر Igeo برای عناصر کروم، نیکل،
و منگنز عمدتاً در محدوده «بدون آلودگی» یا «بدون
آلودگی تا آلودگی متوسط» طبقه‌بندی شدند.

جدول (۴): نتایج ژئوشیمیایی مولر فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب فصل پاییز

ایستگاه	Cd	As	Co	Zn	Pb	Mn	Ni	Cr
1	2.138	1.021	-1.565	0.334	0.080	-1.523	-1.808	-1.174
2	2.503	0.678	-1.312	0.547	0.553	-1.687	-0.760	-1.160
3	2.553	1.047	-0.866	0.557	0.661	-1.209	-0.783	-1.360
4	2.360	0.962	-0.784	0.362	0.117	-1.183	-0.885	-1.582
5	2.181	0.995	-0.793	0.608	0.505	-1.179	-1.215	-1.223
6	2.451	0.940	-0.923	0.553	0.364	-1.064	-1.121	-1.099
7	2.663	1.333	-0.808	0.556	0.351	-1.069	-0.920	-1.350
8	1.708	1.366	-1.254	0.281	0.344	-1.919	-1.008	-1.190
9	2.360	1.254	-1.008	-0.146	0.503	-0.887	-0.947	-1.174
10	2.263	0.563	-0.955	0.032	0.408	-1.662	-1.530	-1.297
11	2.379	0.516	-0.838	0.319	0.383	-1.502	-0.912	-0.971
12	2.222	0.915	-1.381	0.058	0.244	-1.167	-1.973	-1.663
13	2.360	1.256	-0.880	0.433	0.173	-1.447	-1.486	-1.461
14	1.900	0.872	-1.069	0.151	0.266	-1.267	-1.068	-0.954
15	1.926	0.497	-0.748	0.096	0.155	-1.378	-1.172	-1.452
16	2.024	1.086	-0.808	0.318	0.512	-1.376	-0.832	-1.528
17	2.397	0.937	-1.261	0.447	0.173	-1.061	-1.694	-1.634
18	2.243	1.115	-1.315	0.428	0.399	-1.901	-0.934	-1.132
19	1.766	1.118	-1.275	0.122	0.523	-1.861	-1.734	-1.377
20	2.047	1.211	-1.075	-0.219	0.336	-1.734	-0.846	-1.702
21	1.585	1.101	-1.743	0.366	0.484	-1.315	-1.057	-1.504
22	2.047	1.192	-0.968	0.398	0.132	-1.542	-1.650	-1.794
23	2.222	1.078	-1.258	0.482	0.269	-1.573	-1.813	-1.035
24	2.138	1.021	-1.565	0.334	0.080	-1.523	-1.808	-1.174

جدول (۵): نتایج ژئوشیمیایی مولر فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب فصل بهار

ایستگاه	Cd	As	Co	Zn	Pb	Mn	Ni	Cr
1	2.541	1.047	-1.512	0.335	0.092	-1.522	-1.769	-1.171
2	2.821	0.756	-1.260	0.549	0.559	-1.686	-0.752	-1.156
3	2.859	1.108	-0.847	0.558	0.668	-1.208	-0.774	-1.356
4	2.638	0.995	-0.754	0.363	0.130	-1.182	-0.876	-1.579
5	2.627	1.030	-0.770	0.610	0.510	-1.178	-1.196	-1.218
6	2.773	1.004	-0.894	0.555	0.376	-1.064	-1.107	-1.096
7	2.952	1.374	-0.787	0.558	0.357	-1.068	-0.908	-1.345
8	2.283	1.395	-1.207	0.282	0.349	-1.919	-0.994	-1.188
9	2.555	1.287	-0.986	-0.142	0.510	-0.887	-0.932	-1.170
10	2.551	0.641	-0.929	0.035	0.416	-1.662	-1.505	-1.293
11	2.554	0.566	-0.818	0.321	0.391	-1.502	-0.903	-0.968
12	2.627	0.954	-1.353	0.060	0.254	-1.167	-1.943	-1.658
13	2.646	1.304	-0.841	0.434	0.181	-1.447	-1.454	-1.457
14	2.225	0.901	-1.021	0.152	0.271	-1.267	-1.052	-0.950
15	2.192	0.535	-0.722	0.098	0.168	-1.377	-1.159	-1.448
16	2.282	1.140	-0.779	0.320	0.522	-1.376	-0.821	-1.524
17	2.703	0.967	-1.215	0.448	0.183	-1.061	-1.673	-1.631
18	2.676	1.162	-1.265	0.429	0.405	-1.900	-0.917	-1.127
19	2.191	1.156	-1.222	0.125	0.530	-1.860	-1.716	-1.375
20	2.498	1.249	-1.032	-0.216	0.343	-1.733	-0.825	-1.697
21	2.114	1.133	-1.675	0.368	0.493	-1.314	-1.032	-1.499
22	2.449	1.222	-0.942	0.400	0.138	-1.541	-1.615	-1.790
23	2.523	1.132	-1.228	0.484	0.281	-1.573	-1.772	-1.030
24	2.601	1.076	-1.499	0.336	0.089	-1.523	-1.780	-1.170

- فاکتور غنی‌شدگی EF

در فصل پاییز، مقادیر EF برای بیش‌تر عناصر در

محدوده آلودگی «کم» یا «متوسط» قرار گرفتند. برای مثال، عناصر کروم، نیکل و منگنز در تمامی ایستگاه‌ها مقادیر کم‌تر از ۲ داشتند و در محدوده «کم» طبقه‌بندی شدند.

بررسی فاکتور غنی‌شدگی (EF) برای عناصر مختلف در دو فصل پاییز (جدول ۶) و بهار (جدول ۷) نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در سطح غنی‌شدگی این عناصر در ایستگاه‌های مختلف است.

جدول ۶: نتایج شاخص غنی‌شدگی فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب فصل پاییز

ایستگاه	Cr	Ni	Mn	Pb	Zn	Co	As	Cd
1	0.276	0.178	0.216	0.658	0.784	0.210	1.262	2.736
2	0.262	0.346	0.182	0.860	0.857	0.236	0.938	3.322
3	0.230	0.342	0.255	0.932	0.867	0.323	1.218	3.458
4	0.204	0.331	0.269	0.662	0.785	0.355	1.190	3.135
5	0.241	0.243	0.249	0.799	0.858	0.325	1.122	2.553
6	0.299	0.294	0.306	0.824	0.940	0.338	1.229	3.502
7	0.243	0.327	0.295	0.789	0.910	0.354	1.558	3.919
8	0.298	0.338	0.180	0.863	0.827	0.285	1.754	2.223
9	0.250	0.292	0.304	0.798	0.509	0.280	1.343	2.891
10	0.244	0.208	0.190	0.797	0.614	0.310	0.888	2.883
11	0.313	0.327	0.217	0.801	0.766	0.344	0.879	3.195
12	0.198	0.159	0.279	0.741	0.651	0.240	1.179	2.920
13	0.200	0.196	0.202	0.620	0.742	0.299	1.313	2.822
14	0.301	0.279	0.243	0.702	0.648	0.278	1.069	2.181
15	0.220	0.267	0.231	0.670	0.643	0.358	0.849	2.286
16	0.238	0.385	0.264	0.978	0.855	0.392	1.455	2.789
17	0.215	0.206	0.320	0.752	0.909	0.278	1.277	3.512
18	0.272	0.311	0.159	0.784	0.800	0.239	1.289	2.816
19	0.232	0.181	0.166	0.867	0.657	0.249	1.309	2.051
20	0.220	0.398	0.215	0.903	0.615	0.340	1.657	2.958
21	0.240	0.327	0.273	0.951	0.876	0.203	1.458	2.040
22	0.173	0.191	0.206	0.657	0.790	0.307	1.370	2.478
23	0.277	0.161	0.190	0.683	0.792	0.237	1.196	2.645
24	0.276	0.178	0.216	0.658	0.784	0.210	1.262	2.736

جدول ۷: نتایج شاخص غنی‌شدگی فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب فصل بهار

ایستگاه	Cr	Ni	Mn	Pb	Zn	Co	As	Cd
1	0.276	0.182	0.216	0.663	0.785	0.218	1.285	3.618
2	0.263	0.348	0.182	0.864	0.858	0.245	0.990	4.144
3	0.230	0.345	0.255	0.937	0.868	0.328	1.270	4.275
4	0.204	0.333	0.269	0.668	0.786	0.362	1.217	3.802
5	0.242	0.246	0.249	0.802	0.859	0.330	1.150	3.480
6	0.300	0.298	0.307	0.831	0.941	0.345	1.285	4.379
7	0.244	0.330	0.295	0.793	0.911	0.359	1.603	4.789
8	0.299	0.342	0.180	0.867	0.827	0.295	1.789	3.311
9	0.250	0.295	0.305	0.802	0.510	0.284	1.374	3.311
10	0.245	0.212	0.190	0.801	0.615	0.315	0.936	3.520
11	0.314	0.329	0.217	0.806	0.768	0.349	0.910	3.608
12	0.198	0.163	0.279	0.746	0.652	0.245	1.212	3.863
13	0.200	0.201	0.202	0.623	0.743	0.307	1.357	3.440
14	0.302	0.282	0.243	0.705	0.649	0.288	1.091	2.732
15	0.220	0.269	0.232	0.676	0.644	0.365	0.871	2.748
16	0.238	0.388	0.264	0.985	0.856	0.400	1.511	3.335
17	0.215	0.209	0.320	0.757	0.910	0.287	1.303	4.343
18	0.272	0.315	0.159	0.788	0.801	0.247	1.331	3.803
19	0.233	0.184	0.166	0.871	0.658	0.259	1.344	2.754
20	0.221	0.404	0.215	0.908	0.616	0.350	1.701	4.043
21	0.241	0.332	0.273	0.957	0.878	0.213	1.492	2.943
22	0.173	0.196	0.206	0.660	0.791	0.312	1.399	3.273
23	0.277	0.166	0.191	0.689	0.792	0.242	1.242	3.257
24	0.276	0.181	0.216	0.661	0.785	0.220	1.311	3.773

- شاخص‌های PLI و RI

تحلیل شاخص‌های PLI و RI برای فصل‌های پاییز و بهار (جدول ۸) نیز نشان‌دهنده تغییرات فصلی در سطح آلودگی کلی و خطر عناصر مورد بررسی است. در فصل پاییز، مقادیر شاخص PLI در اکثر ایستگاه‌ها در محدوده «متوسط» (۱-۲) قرار داشتند. کم‌ترین

مقدار PLI برابر با ۱/۱۸۲ در ایستگاه ۱۲ و بیش‌ترین مقدار آن ۱/۶۰۱ در ایستگاه ۷ ثبت شد. ایستگاه‌های دارای مقادیر بالاتر، مانند ایستگاه ۷، نشان‌دهنده تجمع بالاتر آلودگی بوده و ممکن است به دلیل مجاورت با منابع آلاینده یا فعالیت‌های انسانی بیش‌تر باشد.

جدول (۸): نتایج شاخص بار آلودگی و ریسک اکولوژیک در نمونه‌های رسوب فصل پاییز و بهار

ایستگاه	پاییز		بهار	
	PLI	RI	PLI	RI
1	1.208	244.79	1.266	309.38
2	1.419	301.45	1.478	366.01
3	1.580	319.36	1.637	383.20
4	1.420	280.36	1.466	330.37
5	1.484	256.32	1.555	331.30
6	1.513	296.15	1.573	359.27
7	1.601	344.69	1.655	409.16
8	1.298	205.59	1.376	278.55
9	1.494	288.52	1.531	323.04
10	1.242	257.82	1.289	306.91
11	1.421	277.34	1.454	308.48
12	1.182	255.13	1.237	323.95
13	1.369	285.70	1.420	337.71
14	1.355	215.45	1.407	258.64
15	1.253	211.59	1.293	246.90
16	1.424	237.52	1.470	274.79
17	1.295	283.36	1.343	340.25
18	1.364	266.12	1.432	342.03
19	1.185	204.89	1.243	258.39
20	1.263	240.58	1.327	309.99
21	1.252	187.09	1.327	247.83
22	1.241	238.08	1.297	298.63
23	1.303	260.04	1.354	310.12
24	1.208	244.79	1.276	321.20

نتیجه‌گیری

شاخص‌های آلودگی محاسبه شده نشان دادند که کادمیوم به‌عنوان مهم‌ترین تهدید اکولوژیکی در منطقه، ناشی از استفاده از کودهای فسفاتی و شیوه‌های آبیاری سنتی، در بسیاری از ایستگاه‌ها در طبقه «آلودگی متوسط تا شدید» قرار دارد. مقادیر بالای شاخص غنی‌شدگی و شاخص ریسک اکولوژیکی برای کادمیوم به‌وضوح نشان می‌دهد که این عنصر بیش‌ترین سهم را در تهدیدات زیست‌محیطی منطقه ایفا می‌کند. بر اساس این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که الگوهای آلودگی در منطقه، تحت تأثیر عوامل طبیعی

و انسانی متعددی قرار دارند. فرایندهای طبیعی مانند وزش باد، توپوگرافی محلی و ساختار خاک در کنار فعالیت‌های انسانی شامل کشاورزی فصلی و استفاده از کودهای شیمیایی، مهم‌ترین محرک‌های آلودگی هستند. این مطالعه اهمیت مدیریت پایدار منابع طبیعی و کشاورزی را برای کاهش اثرات آلودگی در این مناطق برجسته می‌کند. اقداماتی مانند تثبیت خاک، کنترل روان‌آب‌های آلوده و کاهش استفاده از مواد شیمیایی در کشاورزی می‌توانند به کاهش بار آلودگی کمک کنند. علاوه بر این، طراحی و اجرای سیاست‌های حفاظتی و احیای تالاب‌های خشک‌شده،

- [8] Javid, A., Nasiri, A., Mahdizadeh, H., Momtaz, S.M., Azizian, M., Javid, N., 2021, Determination and risk assessment of heavy metals in air dust fall particles. *Environmental Health Engineering And Management Journal*, 8(4), 319.
- [9] Ali, M.U., Yu, Y., Yousaf, B., Munir, M.A.M., Ullah, S., Zheng, C., Kuang, X., Wong, M.H., 2021, Health impacts of indoor air pollution from household solid fuel on children and women. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126127.
- [10] Bai, B., Bai, F., Sun, C., Nie, Q., Sun, S., 2023, Adsorption mechanism of shell powders on heavy metal ions Pb^{2+}/Cd^{2+} and the purification efficiency for contaminated soils. *Frontiers in Earth Science*, 10, 1071228.
- [11] Bist, P., Choudhary, S., 2022, Impact of heavy metal toxicity on the gut microbiota and its relationship with metabolites and future probiotics strategy: A review. *Biological Trace Element Research*, 200(12), 5328.
- [12] Yang, T., Wang, Y., Wu, Y., Zhai, J., Cong, L., Yan, G., Zhang, Z., Li, C., 2020, Effect of the wetland environment on particulate matter and dry deposition. *Environmental Technology*, 41(8), 1054.
- [13] Aazami, J., Taban, P., 2018, Monitoring of heavy metals in water, sediment and phragmites australis of Aras River along the Iranian-Armenian border. *Iranian Journal of Toxicology*, 12(2), 1.
- [14] Yang, X., Duan, J., Wang, L., Li, W., Guan, J., Beecham, S., Mulcahy, D., 2015, Heavy metal pollution and health risk assessment in the Wei River in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(3), 111.
- [15] Shang, Z., Ren, J., Tao, L., Wang, X., 2015, Assessment of heavy metals in surface sediment and section of Yellow River, China. *Environmental Monitoring Assessment*, 187(3), 79.
- [16] Mohammadi Galangash, M., Koopi, M., Bani, A., 2019, Heavy metal accumulation capability in the shells of *Cerastoderma lamarcki* in the south west coast of the Caspian sea; Guilan province, *Journal of Animal Research*, 32(2), 135. (in Persian)
- [17] Kumar, M., Mishra, G.V., 2024, Causes and impacts of water pollution on various water bodies in the state of Rajasthan, India: A

می‌تواند نقش مهمی در بهبود شرایط زیست‌محیطی منطقه ایفا کند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع برای اعلام ندارند.

منابع

- [1] Papi, R., Attarchi, S., Darvishi-Boloorani, A., Neysani-Samany, N., 2022, Characterization of hydrologic sand and dust storm sources in the Middle East. *Sustainability*, 14(22), 15352.
- [2] Luo, H., Wang, Q., Guan, Q., Ma, Y., Ni, F., Yang, E., Zhang, J., 2022, Heavy metal pollution levels, source apportionment and risk assessment in dust storms in key cities in Northwest China. *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126878.
- [3] Rana, A., Kobayashi, T., Ralph, T.J., 2021, Planktonic metabolism and microbial carbon substrate utilization in response to inundation in semi-arid floodplain wetlands. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(4), e2019JG005571.
- [4] Sandeep, P., Reddy, G.P., Jegankumar, R., Arun Kumar, K.C., 2021, Monitoring of agricultural drought in semi-arid ecosystem of Peninsular India through indices derived from time-series CHIRPS and MODIS datasets. *Ecological indicators*, 121, 107033.
- [5] Chu, H., Liu, Y., Xu, N., Xu, J., 2023, Concentration, sources, influencing factors and hazards of heavy metals in indoor and outdoor dust: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 1203.
- [6] Shahabazi, K., Fathi-Gerdelidani, A., Marzi, M., 2022, Investigation of the status of heavy metals in soils of Iran: A comprehensive and critical review of reported studies. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(5), 1163. (in Persian)
- [7] Ji, Z., Zhang, Y., Zhang, H., Huang, C., Pei, Y., 2019, Fraction spatial distributions and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Baiyangdian Lake. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 417.

- review. *Environment and Ecology*, 42(2A), 645.
- [18] Tiwari, M., Singh, B.P., Khichi, P., Kumari, S., Gupta, J., Jain, P., Masih, J., 2024, Long-term analysis of BTEX concentrations and health risks in semi-arid urban regions. *Discover Public Health*, 21, 147.
- [19] Anjana, K.R., Suresh, A., Soman, V., Rahman K, H., 2025, Metal contamination in the Ashtamudi Wetland ecosystem: Source identification , toxicological risk assessment of Ni, Cd,Cr and Pb and remediation strategies. *Marine Pollution Bulletin*, 212, 117534.
- [20] Taghvaei, M., Kiumarsi, H., 2014, Application of the analytical hierarchy process and GIS in optimal site selection for coastal tourist towns: A case study of Kaftar lake beach. *Geographical Research on Desert Areas*, 3(2), 215.
- [21] Huang, S.H., Yang, Y., Yuan, C.Y., Li, Q., Ouyang, K., Wang, B., Wang, Z.X., 2017, Pollution evaluation of heavy metals in soil near smelting area by index of geoaccumulation (Igeo). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 52, 012095.
- [22] Buat-Ménard, P., Chesselet, R., 1979, Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 42(3), 399.
- [23] Joksimović, D., Perošević, A., Castelli, A., Pestorić, B., Šuković, D., Đurović, D., 2020, Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Montenegrin coast: A 10-year review. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 2598.
- [24] da Silva, M.V., Pandorfi, H., Jardim, A.M.D.R.F., Oliveira-Júnior, J.F.D., Divincula, J.S.D., Giongo, P.R., da Silva, T.G.F., de Almeida, G.L.P., Moura, G.B.D.A., Lopes, P.M.O., 2021, Spatial modeling of rainfall patterns and groundwater on the coast of northeastern Brazil. *Urban Climate*, 38, 100911.
- [25] Chang, X., Li, Y. 2020, Lead distribution in urban street dust and the relationship with mining, gross domestic product GDP and transportation and health risk assessment. *Environmental Pollution*, 262, 114307.