

ارزیابی ریسک اکولوژیکی عناصر سنگین (کادمیوم، نیکل، سرب و جیوه) در آب و رسوبات سطحی بندر هندیجان

چکیده

در این تحقیق با نمونه‌برداری از آب و رسوب از سواحل بندر هندیجان، غلظت فلزات سنگین کادمیوم، نیکل، سرب و جیوه تعیین و شاخص‌های ژئوشیمیایی مولر، ضریب غنی‌شدگی، شاخص آلودگی، شاخص بار آلودگی و ریسک خطر اکولوژیکی این فلزات تعیین شد. این مطالعه در فروردین‌ماه سال ۱۳۹۹ انجام شد. ۱۰ ایستگاه انتخاب شد. سپس در هر ایستگاه ۳ نمونه آب و ۳ نمونه رسوب سطحی (به‌صورت هم‌زمان در هر ایستگاه) جمع‌آوری شد. بیشترین میانگین غلظت فلزات در آب به ترتیب نیکل، سرب، کادمیوم و جیوه و در رسوب به ترتیب نیکل، سرب، جیوه و کادمیوم بود. مقادیر mcd در رسوب برای کادمیوم متوسط $(2/46)$ و در آب نیکل متوسط بود $(2/54)$. مقادیر EF نشان داد که در آب و رسوب، کادمیوم در سطح به‌شدت زیاد قرار دارد. بر اساس شاخص Er و RI کادمیوم در آب و رسوب در سطح خطر قابل‌ملاحظه است و نیز جیوه در آب در سطح متوسط قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد که کادمیوم فلزی است که در منطقه ایجاد آلودگی کرده است. فلزات جیوه و نیکل نیز خطراتی را ایجاد می‌نمایند و سرب در رسوب ایجاد خطر می‌کند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که کیفیت زیست‌محیطی، در تمامی نقاط نمونه‌برداری، در زمره مناطق آلوده محسوب می‌شود. بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود که پهنه‌بندی فلزات سنگین آب و رسوب در بندر هندیجان انجام شود و مقادیر میانگین زمینه فلزات مختلف تعیین شود تا بتوان با دقت بیشتری آلودگی فلزات در منطقه را بررسی نمود.

واژگان کلیدی: شاخص‌های ژئوشیمیایی، پساب‌های صنعتی، فلزات سنگین، هندیجان.

مقدمه

آلاینده‌های رسوبات به‌ویژه فلزات سنگین امکان ایجاد اثرات مستقیم بر روی ارگانیسم‌های ساکن رسوب را دارند و می‌توانند به‌طور غیرمستقیم بر روی انسان و سایر حیوانات تأثیر منفی بگذارد (El-Alfy et al., 2020). در دهه‌های اخیر آلودگی خاک و اثرات آن بر انسان و محیط‌زیست افزایش چشمگیری داشته است (جویباری و همکاران، ۱۴۰۱). افزایش فلزات سنگین در اشکال مختلف باعث تخریب محیط‌زیست می‌شوند. فعالیت‌های انسانی موجب افزایش غلظت فلزات سنگین در رسوبات ساحلی گردیده است که همواره در مناطقی با سطوح بالای فعالیت‌های صنعتی و شهری، غلظت‌های بسیار زیاد این آلاینده‌ها در رسوبات افزایش می‌یابد (Kanat et al., 2018). رسوبات بستر زیستگاه‌ها و منبع غذایی موجودات آبی را تشکیل می‌دهند. مسئله آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی این محیط‌ها به دلیل اثرات سمی آن‌ها، توانایی تجمع در بافت موجودات آبی و غیرقابل تجزیه بودن آلودگی اکوسیستم‌های آبی به‌عنوان یک موضوع اساسی موردبحث و توجه بیشتری قرار گرفته است (هدایت زاده و همکاران، ۱۳۹۹). بسیاری از مطالعات نشان داده است که فلزات سنگینی که در رسوبات تجمع می‌کنند نه‌تنها ممکن است محیط‌زیست را آلوده کنند، بلکه وارد زنجیره غذایی می‌شود و تأثیرات بلندمدتی بر سلامت انسان دارد (Pradit et al., 2022). امروزه آلودگی

احمد رضا افضلی^۱

محبوبه چراغی^{۲*}

۱. گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

*مسئول مکاتبات:

mahboobeh_cheraghi_env@yahoo.com

کد مقاله: ۱۴۰۱۰۲۰۹۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵

این مقاله پژوهشی و برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد است.

رسوبات به عنوان یکی از وخیم ترین مشکلات بوم سامانه های مصبی مطرح شده است (Li et al., 2019). مطالعات تأیید کرده اند که فلزات سنگین و متالوئیدها در آب، رسوبات، موجودات آبی و ماکروفیت ها وجود دارند (Qin and Tao, 2022).

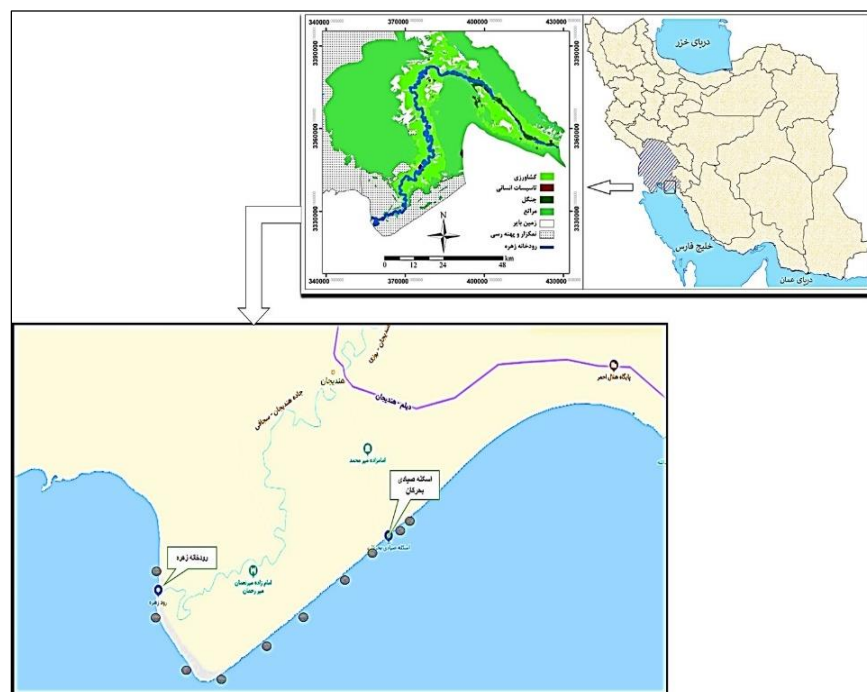
جهت تعیین منشأ فلزات در محیط زیست، می بایست علاوه بر تعیین غلظت کلی فلزات نسبت های حضور آن ها در بخش های گوناگون ژئوشیمیایی رسوبات (پایدار و ناپایدار) نیز سنجیده شوند (Karbassi et al., 2008). شاخص های ارزیابی فلزی مختلفی برای بررسی کیفیت رسوب و خاک توسعه داده شده است. برای ارزیابی آلودگی فلزی، اندیس ضریب انباشت (Igeo) فاکتور غنی شدگی و درجه آلودگی (Cd) با استفاده از مقدار کل فلزی محاسبه می شوند، فاکتور آلودگی (CF) فاکتور آلودگی یک عنصر منفرد محاسبه می شود. فاکتور غنی شدگی برای نشان دادن سطح نسبی تجمع در یک پروفیل خاک استفاده می شود که می تواند به مقدار زیادی تأثیر منفی بافت خاک بر نتایج ارزیابی را کاهش دهد. فاکتور ریسک اکولوژیک که مبین فاکتور سمیت یک ماده است، مقدار عددی را برای ترکیب ریسک آلودگی با سیستم اکولوژیکی فراهم می کند. ارزیابی ریسک اکولوژیک را به عنوان فرایندی برای ارزیابی احتمال رویداد اثرات اکولوژیکی مضر به صورت نتیجه ای از در معرض محرک بودن تعریف کرد. هدف از ارزیابی ریسک اکولوژیک ارزیابی اثرات اکولوژیکی فعالیت های انسان برای حفاظت و مدیریت محیط زیست است (Kanat et al., 2018).

(Das Sharma, 2019). نواحی ساحلی یکی از مناطق حساس و شکننده اکوسیستم های آبی هستند که می توانند به شدت تحت تأثیر آلاینده های انسانی ناشی از فعالیت های صنعتی، کشتیرانی، فعالیت های ماهیگیری، تخلیه فاضلاب و رواناب شهری و سوخت های فسیلی قرار گیرند (هدایت زاده و همکاران، ۱۳۹۹). به دلیل تجمع رسوبات در کف، اکوسیستم هایی مثل بنادر سواحل صنعتی به دلیل ورود دائمی فلزات، دارای بیشترین رسوبات آلوده می باشند. همچنین با توجه به غلظت بالای فلزات سنگین در رسوبات، عمده تحقیقات صورت گرفته برای ارزیابی این فلزات در فاز رسوبی انجام شده است. فلزات پس از ورود به محیط آبی، از طریق فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و یا بیولوژیکی در رسوبات انباشته می شوند (کاظمی درسنگی و نعیمی، ۱۴۰۱). نظر به اهمیت شناسایی آسیب های فلزات سنگین در محیط زیست ضروری است در نواحی ساحلی آلاینده های فلزات سنگین در آب و رسوبات بررسی شود. خلیج فارس از جنبه های مختلف تجاری مانند ذخایر عظیم نفت و گاز، منابع غذایی، تنوع زیستی و ذخایر عظیم کانی و همجواری با صنایع پالایشگاهی نفت، گاز، فولاد از اهمیت ویژه ای برخوردار است (کاظمی درسنگی و نعیمی، ۱۴۰۱؛ کوسج و همکاران، ۱۴۰۰). بررسی مطالعات انجام شده در خصوص آلودگی فلزات سنگین در آب و رسوبات سواحل خلیج فارس نشان داد که بیشتر مطالعات روی رسوب متمرکز شده بود؛ نتایج این مطالعات نشان داد که آلودگی در برخی مناطق بالاتر از استانداردهای تعیین شده است (کاظمی درسنگی و نعیمی، ۱۴۰۱). با توجه به اینکه مطالعات در زمینه وضعیت آلاینده های فلزات سنگین در بندر هندیجان بسیار محدود است و بررسی مقالات پژوهشی معتبر نشان می دهد که تاکنون مطالعه ای در زمینه حضور و اثرات فلزات در آب و رسوبات سطحی در بندر هندیجان انجام نشده است از این رو در این تحقیق با نمونه برداری از آب و رسوب از سواحل بندر هندیجان، غلظت فلزات سنگین کادمیوم، نیکل، سرب و جیوه تعیین و با شاخص های ژئوشیمیایی مولر، ضریب غنی شدگی، شاخص آلودگی، شاخص بار آلودگی (PLI)، ارزیابی شد و ریسک خطر اکولوژیکی این فلزات تعیین شد. در ایران مطالعات متعددی در حوزه خلیج فارس باهدف تبیین سهم فلزات سنگین در آلودگی این پهنه آبی انجام شده است؛ اما تعداد مطالعات سنجش ریسک اکولوژیک انگشت شمار است. با در نظر گرفتن جایگاه بندر هندیجان در زمینه صید محصولات آبزیان در منطقه، بررسی فلزات سنگین در منطقه اهمیت دارد.

مواد و روش ها

جهت تعیین غلظت فلزات سنگین (کادمیوم، نیکل، سرب و جیوه) در رسوبات سطحی و آب در بندر هندیجان، پس از بازدید از منطقه، ۱۰ ایستگاه در نقاط مختلف (برای مثال ورودی فاضلاب، محل تردد لنج ها و قایق ها و ...) انتخاب شد (شکل ۱). سپس در هر ایستگاه ۳ نمونه آب و ۳ نمونه

رسوب سطحی (به صورت هم‌زمان در هر ایستگاه) جمع‌آوری شد. این مطالعه در فروردین‌ماه سال ۱۳۹۹ انجام شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده در شرایط استاندارد به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌برداری رسوبات با استفاده از استاندارد American Society for Testing and Materials شماره D2488 با استفاده از گرب (Ekerman grab) با سطح مقطع ۲۲۵ سانتی‌متر از ۳۰ سانتی‌متری بستر و در هر ایستگاه با تکرار ۳ انجام شد. نمونه‌های رسوب در بطری‌هایی که از قبل با محلول آب مقطر و اسید نیتریک ۱۰ درصد (ساخت شرکت مرک آلمان) استریل شده بودند به آزمایشگاه منتقل شدند. برای تعیین فلزات از دستگاه ICP-OES استفاده شد (Pradit et al., 2022).



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در بندر هندیجان (سال ۱۳۹۹).

در مطالعات متعددی از شاخص‌های ژئوشیمیایی نظیر درجه آلودگی عناصر (CF) و درجه آلودگی اصلاح‌شده (mCd) ضریب بار آلودگی (PLI) برای تعیین شدت و درجه آلودگی و پیش‌بینی منابع ایجادکننده آلودگی و روند تغییرات آن استفاده شده است (Manno; Qin and Tao, 2022; Thomilson et al., 1980; Qishlag et al., 2007; Adomako et al., 2008; Abraham and Parker, 2008; et al., 2006; Muller, 1979). ضریب آلودگی بیانگر میزان آلودگی نمونه به فلزات است. PLI بالا نشان‌دهنده بار آلودگی نمونه‌ها است (Adomako et al., 2008). درجه آلودگی (Cd) برای ارزیابی شدت آلودگی کلی محیط به کار می‌رود. در مطالعات مختلف برای محاسبه شاخص‌های ژئوشیمیایی، مقادیر محاسبه‌شده از مطالعات پیشین را به عنوان مقادیر زمینه انتخاب می‌کنند. در بعضی از مطالعات هم از غلظت فلزات در پوسته زمین به عنوان مقادیر زمینه استفاده شده است. در ایران اطلاعات پیشین از عناصر محدود است. از مقادیر پیشنهادی Hakanson (۱۹۸۰) به عنوان مقدار زمینه برای محاسبه شاخص‌ها استفاده شد.

ارزیابی پتانسیل خطر بوم‌شناختی این شاخص اولین بار توسط Hakanson (۱۹۸۰) برای بررسی آلودگی رسوبات معرفی گردید. در این روش در مرحله نخست غلظت فلز در نمونه نسبت به غلظت زمینه سنجیده می‌شود. درواقع مزیت این روش در مقایسه با میزان غنی‌شدگی این است که با

ارزیابی ریسک اکولوژیکی عناصر سنگین (کادمیوم، نیکل، سرب و جیوه) در آب و رسوبات سطحی بندر هندیجان / افصلی و چراغی

استفاده از شاخص خطر بوم‌شناختی بالقوه (RI) خطرات ناشی از فلزات سنگین علاوه بر یک فلز، در یک نمونه و منطقه نمونه‌برداری تخمین زده می‌شود. RI میزان حساسیت جوامع زیست‌شناختی به مواد سمی و ریسک بوم‌شناختی بالقوه ناشی از فلزات سنگین را نشان می‌دهد. با استفاده از این دو شاخص می‌توان خطر بوم‌شناختی یک فلز و منطقه نمونه‌برداری را محاسبه کرد. برای تعیین شاخص‌های ژئوشیمیایی از رابطه‌های زیر استفاده شد (Muller, 1979; Abrahim and Parker, 2008; Hakanson, 1980; Maanan et al., 2018) و طیف تغییرات در جدول ۱ و ۲ آمده است.

رابطه ۱: $CF = C / \text{زمینه } C \text{ نمونه}$

$CF =$ فاکتور آلودگی.

$C =$ غلظت عنصر موردنظر در نمونه.

$C =$ غلظت عنصر زمینه در نمونه مرجع.

رابطه ۲: $Cdeg = \sum Cf$

رابطه ۳: $mCd = \sum_i^n Cf/n$

رابطه ۴: $PLI = (CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)^{1/n}$

جدول ۱: طیف تغییرات شاخص‌های مورد مطالعه.

رده آلودگی	عامل آلودگی	درجه آلودگی	درجه آلودگی	اصلاح شده	
آلودگی کم	$CF < 1$	$Cdeg < 7$	فاقد آلودگی تا درجه پایینی از آلودگی	$mC_d < 1/5$	کیفیت خوب نمونه منطقه $PLI < 1$
آلودگی متوسط	$1 < CF \leq 3$	$7 \leq Cdeg < 14$	درجه پایین آلودگی	$1/5 \leq mC_d < 2$	آلودگی نزدیک به زمینه $PLI = 1$
آلودگی زیاد	$3 < CF \leq 6$	$14 \leq Cdeg < 28$	درجه متوسط آلودگی	$2 \leq mC_d < 4$	کیفیت نامناسب $PLI > 1$
شدیداً آلوده	$CF \geq 6$	$Cdeg \geq 28$	درجه بالای آلودگی	$4 \leq mC_d < 16$	-
-	-	-	آلودگی فوق‌العاده زیاد	$16 \leq mC_d < 32$	-
-	-	-	آلودگی بی‌نهایت زیاد	$mCd \geq 32$	-

رابطه ۵: $EF = (C_{nx}/B_{nx}) / (C_{ny}/B_{ny})$

EF : فاکتور تجمع.

C_{nx} : غلظت عنصر در نمونه.

B_{nx} : غلظت آهن در منطقه مورد مطالعه.

C_{ny} : غلظت عنصر در پوسته زمین.

B_{ny} : غلظت آهن در پوسته زمین.

جدول ۲: طیف تغییرات شاخص EF.

تجمع کم	$EF < 2$
تجمع متوسط	$2 \leq EF < 5$
تجمع قابل ملاحظه	$5 \leq EF < 20$
تجمع خیلی زیاد	$20 \leq EF < 40$
تجمع بسیار زیاد	$EF \geq 40$

برای به دست آوردن ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین از رابطه‌های زیر استفاده شد (Hakanson, 1980).

$$E_i = Tr * C_f$$

رابطه ۶:

$$RI = \sum_i^n E_i$$

رابطه ۷:

E_i = ریسک اکولوژیکی هر عنصر و RI ریسک اکولوژیکی مجموع عناصر و Tr شاخص سمی بودن فلزات سنگین را نشان می‌دهد. Hakanson (۱۹۸۰) برای مقدار Tr فلزات سنگین کبالت = مس = نیکل = سرب = ۵ و روی = ۱ و کادمیوم = ۳۰ را ارائه کرد. طیف مقادیر این دو شاخص در جدول ۳ ارائه شده است (Xu et al., 2015).

جدول ۳: درجات پتانسیل ریسک بالقوه (RI , E_i).

E_i	Ecological Risk Grade	RI	Ecological Risk Grade
$E_i < 15$	Low	$RI < 50$	Low
$15 \leq E_i < 30$	Moderate	$50 \leq RI < 100$	Moderate
$30 \leq E_i < 60$	Considerable	$100 \leq RI < 200$	Considerable
$60 \leq E_i < 120$	High	$200 \leq E_i$	High
$120 \leq E_i$	Very high		

E_i , The ecological risk factor of metal i ; RI , the ecological risk index

نتایج

محدوده تغییرات غلظت (حداقل و حداکثر غلظت) فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در رسوبات برحسب میلی گرم بر کیلوگرم در جدول ۴ و در آب در جدول ۵ ارائه شده است. غلظت نیکل در آب و رسوب بیشتر از دیگر عناصر مورد مطالعه بود و به ترتیب سرب، کادمیوم و جیوه در رده‌های بعدی قرار داشتند.

جدول ۴: میانگین غلظت فلزات سنگین در رسوب در ایستگاه‌های مورد بررسی در بندر هندیجان

(میلی گرم بر کیلوگرم) (سال ۱۳۹۹).

ایستگاه	سرب	نیکل	جیوه	کادمیوم
ایستگاه ۱	۸/۸۹	۱۹/۹۳	۰/۰۱۹	۰/۵
ایستگاه ۲	۹/۳۳	۲۱/۶۷	۰/۰۴۹	۰/۶۰۳
ایستگاه ۳	۹/۰۹	۱۸/۰۲	۰/۰۳۲	۰/۳۸۹
ایستگاه ۴	۱۰/۰۹	۲۱/۵۷	۰/۰۲۹	۰/۳۹

ارزیابی ریسک اکولوژیکی عناصر سنگین (کادمیوم، نیکل، سرب و جیوه) در آب و رسوبات سطحی بندر هندیجان / افصلی و چراغی

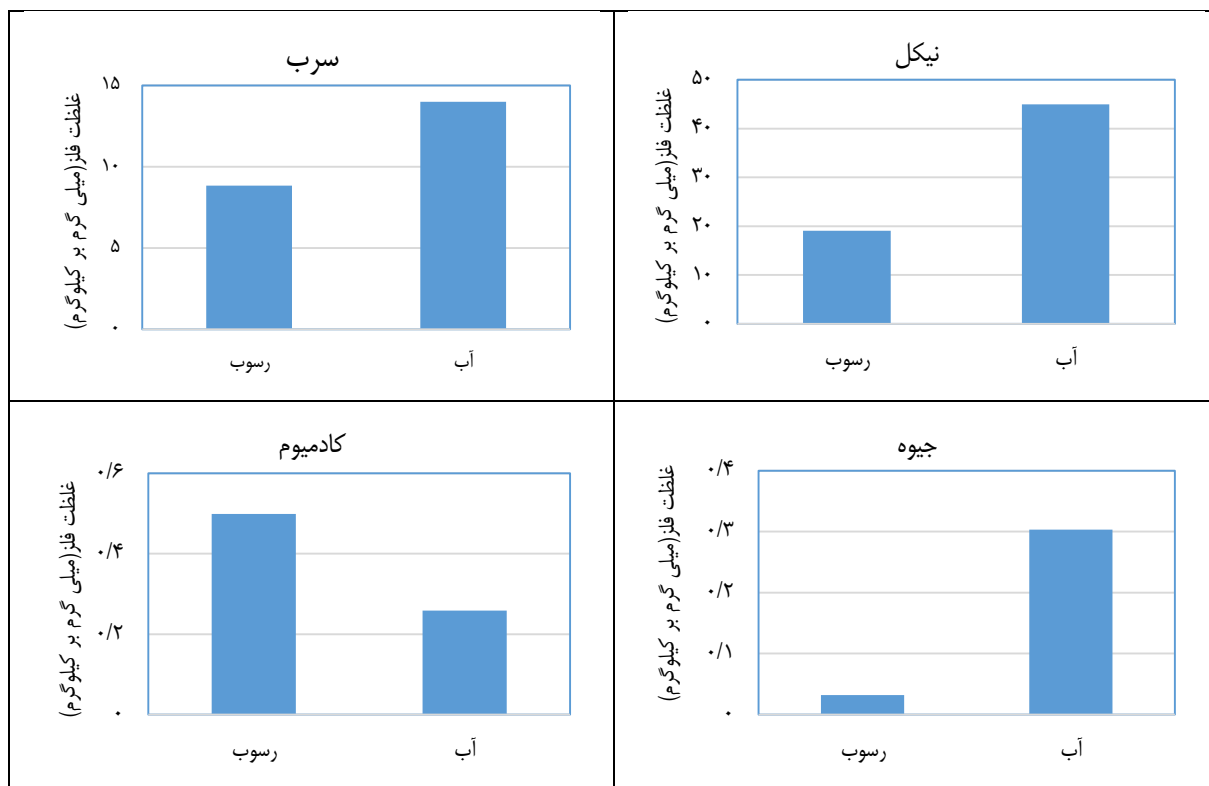
سرب	نیکل	جیوه	کادمیوم	
۸/۳۳	۲۰/۶۷	۰/۰۳۰۵	۰/۵۱۳	ایستگاه ۵
۷/۹۹	۱۶/۵۷	۰/۰۲۹	۰/۵۲	ایستگاه ۶
۸/۳۴	۱۸/۳۳	۰/۰۴۲	۰/۴۹۹	ایستگاه ۷
۹/۱۲	۱۷/۶۶	۰/۰۳۸	۰/۵۷۷	ایستگاه ۸
۸/۰۵	۱۹/۰۱	۰/۰۱۵	۰/۳۹۹	ایستگاه ۹
۹/۰۵	۱۶/۹۸	۰/۰۳۶	۰/۵۹۹	ایستگاه ۱۰
۸/۸۲۸	۱۹/۰۴۱	۰/۰۳۱	۰/۴۹۸	میانگین
۰/۶۵	۱/۸۴	۰/۰۱	۰/۰۸۲	انحراف معیار
۰/۳۹	۳/۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۶	واریانس
۱۰/۰۹	۲۱/۶۷	۰/۰۴۹	۰/۶۰۳	بیشترین
۷/۹۹	۱۶/۵۷	۰/۰۱۵	۰/۳۸۹	کمترین
۸/۹۷	۱۸/۶۷	۰/۰۳۱	۰/۵۰۶	میانه

جدول ۵: میانگین غلظت فلزات سنگین در آب در ایستگاه‌های موردبررسی در بندر هندیجان

(میلی گرم بر کیلوگرم) (سال ۱۳۹۹).

سرب	نیکل	جیوه	کادمیوم	
۱۲/۶۶	۴۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۱۷	ایستگاه ۱
۱۲/۵۹	۳۸/۹۹	۰/۳	۰/۲۲	ایستگاه ۲
۱۱/۹۸	۳۹/۸۷	۰/۲۹	۰/۱۹	ایستگاه ۳
۱۲/۸۶	۴۰/۵	۰/۳۲	۰/۱۸	ایستگاه ۴
۱۶/۹۹	۴۷/۸	۰/۳۳	۰/۲۷	ایستگاه ۵
۱۵/۶۳	۴۲/۳۳	۰/۳۶	۰/۲۹	ایستگاه ۶
۱۴/۰۴	۴۹/۰۱	۰/۲۴	۰/۲۹	ایستگاه ۷
۱۵/۳۹	۴۹/۳	۰/۳۷	۰/۳۴	ایستگاه ۸
۱۱/۹۸	۴۸/۴۴	۰/۳۲	۰/۲۸	ایستگاه ۹
۱۵/۸۱	۵۳/۲۱	۰/۳۳	۰/۳۶	ایستگاه ۱۰
۱۳/۹۹۳	۴۴/۹۴	۰/۳۰۳	۰/۲۵۹	میانگین
۱/۸۲	۱/۸۴	۰/۰۴	۰/۰۸	انحراف معیار
۳/۰۰۵	۳/۳۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	واریانس
۱۶/۹۹	۵۳/۲۱	۰/۳۷	۰/۳۶	بیشترین
۱۱/۹۸	۳۸/۹۹	۰/۱۷	۰/۱۷	کمترین
۱۳/۴۵	۴۵/۰۶	۰/۳۲	۰/۲۷۵	میانه

در شکل ۲ میانگین غلظت فلزات در نمونه‌های رسوب و آب نشان داده شده است. غلظت نیکل، سرب و جیوه در آب بیشتر از رسوب بود و غلظت کادمیوم در رسوب بالاتر از آب بود.



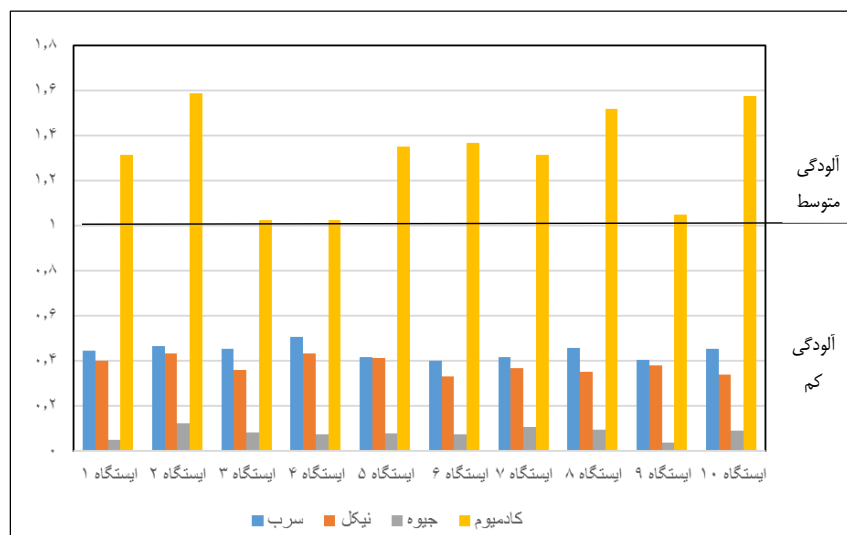
شکل ۲: میانگین غلظت فلزات سرب، جیوه، کادمیوم و نیکل در نمونه‌های رسوب و آب در نقاط مورد مطالعه در هندیجان (سال ۱۳۹۹).

در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب مقادیر به‌دست‌آمده شاخص CF در رسوب و آب نشان داده شده است. شاخص توصیف‌کننده آلودگی در نمونه‌های رسوب نشان داد که آلودگی کادمیوم در سطح متوسط بود (شکل ۳) و در نمونه‌های آب نیکل در سطح متوسط است (شکل ۴). مقایسه سطوح برآورده شده شاخص CF در نمونه‌های آب و رسوب نشان می‌دهد که مقادیر شاخص در آب بیشتر است با این وجود سطح آلودگی در حد کم و متوسط برآورد شد.

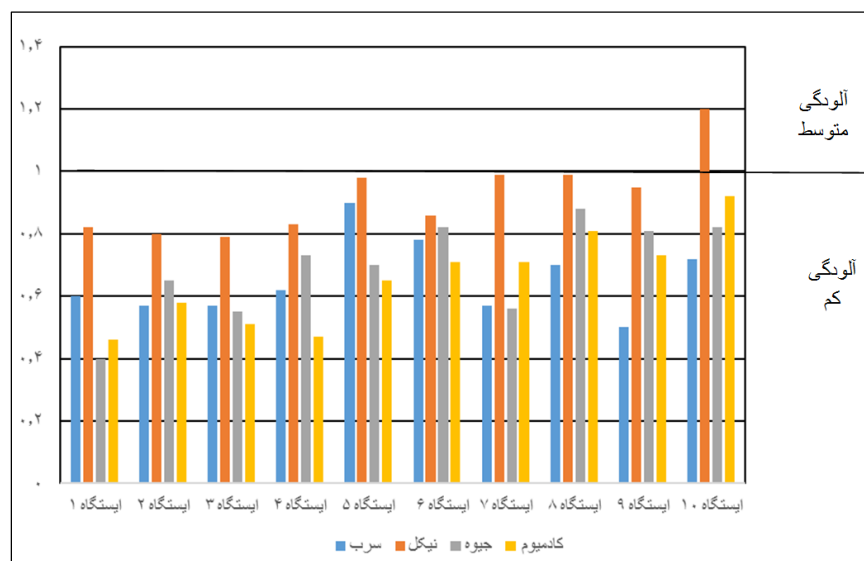
مقادیر شاخص درجه آلودگی Cdeg در نمونه‌های آب و رسوب نشان داد که رده‌بندی شاخص در تمام ایستگاه‌ها برای همگی فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های آب و رسوب در سطح پایین است.

شاخص mCd این امکان را فراهم می‌سازد تا بتوان تعداد متنوعی از فلزات سنگین را بدون محدودیت بررسی کرد. مقادیر رده‌بندی mCd فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب و آب در شکل ۵ نشان داده شده است. در نمونه‌های آب فلزات جیوه، سرب و کادمیوم سطح شاخص درجه آلودگی پایین و نیکل درجه متوسط آلودگی بود و در نمونه‌های رسوب سطح شاخص در همگی فلزات در حد متوسط بود (شکل ۵). همان‌طور که مقادیر شاخص mCd نشان می‌دهد در نمونه‌های آب نیکل آلاینده‌ی بیشتر ایجاد می‌کند (شکل ۵). نتایج شاخص بار آلودگی PLI نشان داد که در نمونه‌های رسوب فلزات غیر آلوده و در نمونه‌های آب آلاینده است.

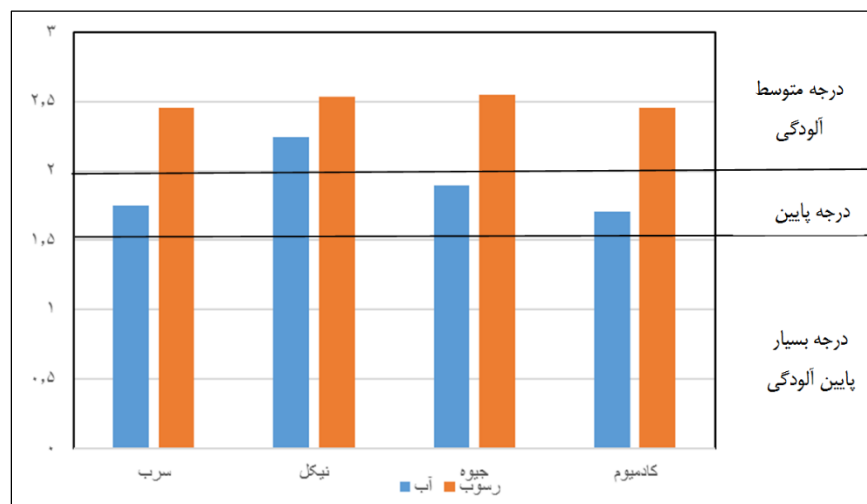
ارزیابی ریسک اکولوژیکی عناصر سنگین (کادمیوم، نیکل، سرب و جیوه) در آب و رسوبات سطحی بندر هندیجان / افصلی و چراغی



شکل ۳: مقادیر شاخص CF فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب هندیجان (سال ۱۳۹۹).

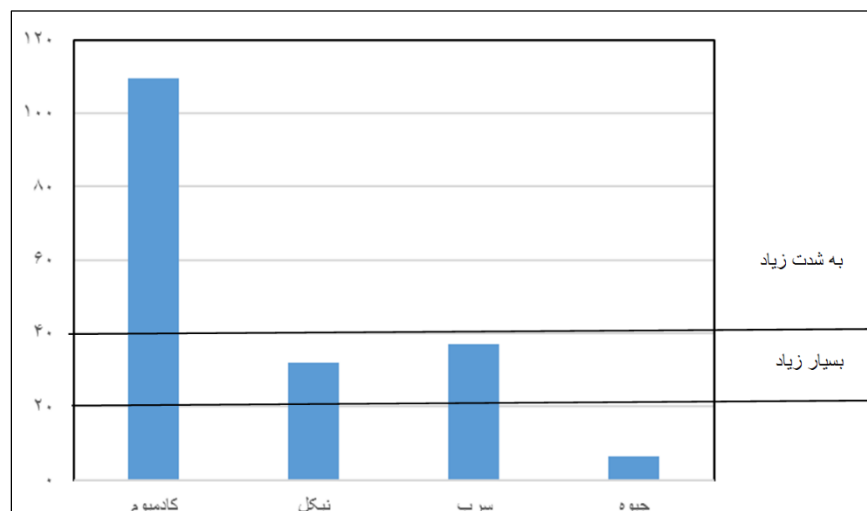


شکل ۴: مقادیر شاخص CF فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های آب هندیجان (سال ۱۳۹۹).

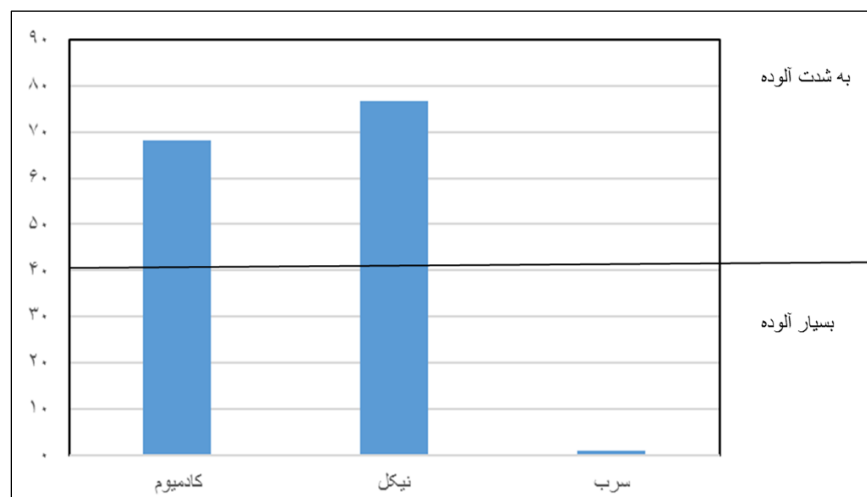


شکل ۵: مقادیر شاخص mCd فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های رسوب و آب در هندیجان (سال ۱۳۹۹).

در بسیاری از مطالعات برای محاسبه فاکتور غنی‌شدگی فلزات، فلز نرمالیزکننده، از فلزات آهن و آلومینیوم که کمترین سطح آلودگی انسانی را دارند به‌عنوان نرمالیزه‌کننده استفاده شده است. در این مطالعه از عنصر آهن برای جداسازی مؤلفه انسانی از طبیعی استفاده شد. در شکل‌های ۶ و ۷ میانگین مقادیر شاخص EF فلزات سنگین به ترتیب در نمونه‌های رسوب و آب نشان داده شده است. در نمونه‌های رسوب، غنی‌شدگی کادمیوم و سرب در سطح به‌شدت زیاد، نیکل در سطح بسیار زیاد و جیوه در سطح زیاد بود. در نمونه‌های آب غنی‌شدگی کادمیوم و نیکل به‌شدت زیاد و سرب کم بود. در شکل جیوه نشان داده نشده است زیرا مقدار به‌دست‌آمده در مقایسه با مقادیر مرتبط با سرب و نیکل و کادمیوم در حد بسیار بالایی قرار داشت.

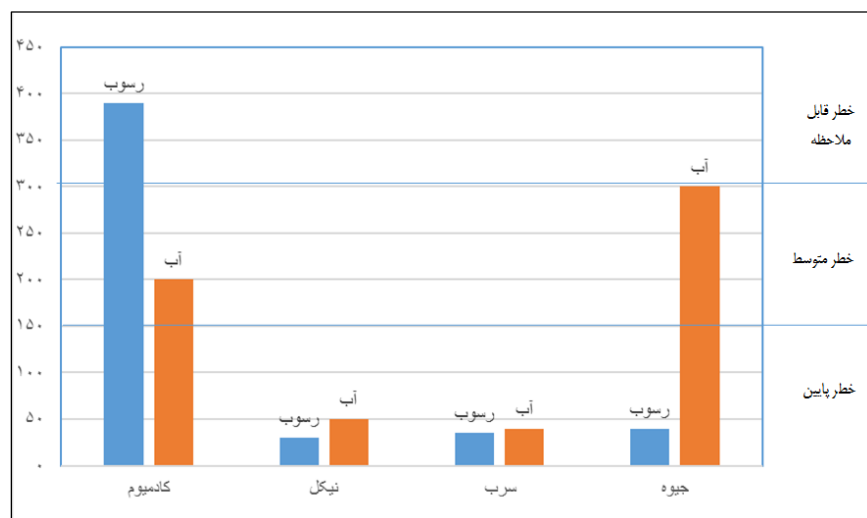


شکل ۶: میانگین مقادیر EF و سطوح رده‌بندی این شاخص در نمونه‌های رسوب در هندیجان (سال ۱۳۹۹).



شکل ۷: میانگین مقادیر EF و سطوح رده‌بندی این شاخص در نمونه‌های آب در هندیجان (سال ۱۳۹۹).

مقادیر شاخص Er فلزات سنگین در نمونه‌های آب و رسوب نشان داده نشان داد که وجود فلزات نیکل و سرب و جیوه در آب و رسوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه خطر پایینی دارد و آلاینده‌گی فلز کادمیوم در نمونه‌های رسوب در حد متوسط بود. نتایج شاخص خطر IR فلزات سنگین در ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج ارزیابی خطر اکولوژیکی و محیط زیستی فلزات سنگین کادمیوم، جیوه، نیکل و سرب در نمونه‌های آب و رسوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه در بندر هندیجان نشان داد که کادمیوم در رسوب در حد قابل ملاحظه و در آب در حد متوسط خطر ایجاد می‌نماید و خطر نیکل و سرب در آب و رسوب پایین است و خطر جیوه در رسوب پایین و آب در حد متوسط تا قابل ملاحظه‌ای است (شکل ۸).



شکل ۸: مقادیر و سطوح شاخص RI فلزات سنگین مورد مطالعه در بندر هندیجان (سال ۱۳۹۹).

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت آثار تخریبی فلزات سنگین و آلاینده‌های نفتی در تهدید حیات زیست‌شناختی موجودات ساکن و متأثر از پیکره‌های آبی، بررسی و پایش وضعیت کیفی رسوبات سواحل، دریاها و اقیانوس‌ها همواره از اهم ملاحظات زیست‌محیطی مرتبط محسوب می‌شود. تصفیه شیمیایی فلزات سنگین در محیط‌های طبیعی دشوار است و این فلزات در سه مخزن رسوب، آب و موجودات زنده تجمع می‌یابند، از بین این سه مخزن، ظرفیت ذخیره‌سازی فلزات سنگین در رسوبات محیط‌های آبی بالاتر است (Hossain et al., 2021). مطالعات ژئوشیمیایی رسوبات محیط‌های ساحلی، آبی و بستر دریاها می‌تواند گام مؤثری برای یافتن منشأ رسوبات و الگوی پراکنش عناصر و ارزیابی زیست‌محیطی وضعیت آلاینده‌ها برای مدت موجود در یک منطقه باشد؛ بنابراین اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین می‌تواند تصویر واقعی از آلودگی‌های یک محیط را فراهم سازد (کازمی درسکی و نعیمی، ۱۴۰۱). اگرچه آلاینده‌ها برای مدت طولانی در رسوبات باقی می‌مانند، ولی در اثر فعالیت‌های زیست‌شناختی و تغییر شرایط فیزیکی و شیمیایی می‌توانند وارد آب‌های فوقانی شوند. لذا، اندازه‌گیری غلظت میانگین کل فلز سنگین می‌تواند تصویری واقعی از آلودگی یک محیط آبی را فراهم آورد (کوسج و همکاران، ۱۴۰۰). بر اساس نتایج مطالعه حاضر غلظت سرب نیکل و جیوه در آب بیشتر از رسوبات بود و غلظت کادمیوم در رسوب بیشتر از آب بود (شکل ۲). کوسج و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند که منابع انتشار کادمیوم نیکل و سرب و مس نقطه‌ای است و با فعالیت‌های مرتبط با بندرگاه‌ها ارتباط دارد. قسمت اعظم نیکل به‌صورت کلئیدی بوده و شدیداً در مصب‌ها و سواحل رسوب می‌کند نیکل از جمله عناصر مهم آلاینده محیط‌زیست و نیز از اجزای تشکیل‌دهنده نفت است که علت آن می‌تواند به نفت‌خیز بودن منطقه برگردد. همچنین بالا بودن غلظت نیکل می‌تواند ناشی از منابع نقطه‌ای و یا احتمالاً لجن حاصل از لایروبی اسکله‌ها یا ورود لجن فاضلاب شهری باشد؛ زیرا که فاضلاب شهری هم‌مقدار قابل‌توجهی از نیکل با خود دارد (Haghshenas et al., 2017).

در مطالعه Tian و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده شد که نیکل در مناطق ساحلی در آب و رسوبات عمدتاً منبع ژئوژنیک و سرب و کادمیوم و جیوه عمدتاً منشأ انسانی دارند. در مقابل مطالعات بسیاری از محققین، آلودگی رسوبات به نیکل را اصولاً ناشی از منابع انسانی می‌دانند. این منابع شامل فاضلاب‌های شهری و صنعتی، تردد کشتی‌ها، قایق‌ها و نفت‌کش‌ها و نفت خام است. از آنجاکه نیکل یکی از عمومی‌ترین فلزات در آب‌های سطحی می‌باشد، در نتیجه آلودگی به نیکل، احتمالاً به علت ورود منابع آلوده شهری و پساب‌های صنعتی اعم از مواد شوینده، سموم، آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی و نهایتاً فاضلاب‌ها به منطقه باشد. همچنین شستشو و ریزش سوخت و مواد روغنی توسط شناورها و قایق‌های موتوری و تفریحی منطقه نیز می‌تواند عامل آلاینده باشد (کوسج و همکاران، ۱۴۰۰).

شاخص توصیف‌کننده آلودگی در نمونه‌های رسوب نشان داد که آلودگی کادمیوم در سطح متوسط بود (شکل ۳) و در نمونه‌های آب نیکل در سطح متوسط است (شکل ۴). مقایسه سطوح برآورده شده شاخص CF در نمونه‌های آب و رسوب نشان می‌دهد که مقادیر شاخص در آب بیشتر است با این‌وجود سطح آلودگی در حد کم و متوسط برآورد شد. بر اساس نتایج مطالعه حاضر علی‌رغم اینکه برخی شاخص‌ها در مقایسه با شیل میانگین از سطوح رده‌بندی پایین برخوردار هستند، حتی در این شرایط که مقدار زمینه محیط مشخص نیست تا به توان شرایط فعلی منطقه را با شرایط نرمال و پاک و با شرایط طبیعی مقایسه نمود با این‌حال شاخص PLI بالای یک، نشان‌دهنده آلودگی محیط است، به‌خصوص کادمیوم در شرایط بسیار شدید آلودگی قرار دارد. غلظت جیوه و نیکل سرب در آب در مقایسه با رسوب بیشتر و غلظت کادمیوم در آب و رسوب بالا است. این ممکن است به علت لایروبی رسوبات در منطقه باشد. هدایت زاده و همکاران (۱۳۹۹) طی مطالعه خود، میزان آلودگی فلزات سنگین را در رسوبات ماهشهر و بندر امام طی یک دوره دوازده‌ساله بررسی کردند، نتایج آن مطالعه نشان داد که فلزات جیوه نیکل سرب مهم‌ترین آلاینده‌های منطقه هستند و نیکل و جیوه آلودگی شدیدتری در منطقه ایجاد می‌کنند.

در نمونه‌های رسوب، غنی‌شدگی کادمیوم و سرب در سطح به‌شدت زیاد، نیکل در سطح بسیار زیاد و جیوه در سطح زیاد بود. در نمونه‌های آب غنی‌شدگی کادمیوم و نیکل به‌شدت زیاد و سرب کم بود (شکل‌های ۶ و ۷). در مطالعه جویباری و همکاران (۱۴۰۱) غلظت فلزات سنگین و

شاخص‌های آلودگی رسوبات در کانون گردوغبار هندیجان بررسی شد نتایج این مطالعه نشان داد که غلظت فلزات نیکل و سرب در مناطق جنوبی هندیجان در طول خط ساحلی روند افزایشی دارد. ایشان بیان کردند که می‌توان تردد شناورها، آلودگی‌های ناشی از تعمیر و نگهداری شناورها و کشتی‌ها در اسکله بحرکان و فاضلاب شهری هندیجان را علت افزایش این دو فلز در نظر گرفت.

در مطالعه حاضر ارزیابی ریسک خطر محیط‌زیستی نشان داد که جیوه و کادمیوم در آب بسیار شدید آلاینده و در رسوب در سطح خیلی شدید ایجاد آلاینده‌گی کرده‌اند (شکل ۸). سرب در آب کمتر و در رسوب به‌شدت آلاینده است. کادمیوم در رسوب به‌شدت آلاینده است. نتایج نشان می‌دهد که کادمیوم مهم‌ترین فلزی است که در منطقه ایجاد آلودگی کرده است؛ و فلزات جیوه و نیکل نیز خطراتی را ایجاد می‌نمایند و سرب در رسوب ایجاد خطر می‌کند. بر اساس شاخص خطر اکولوژیکی فلزات می‌توان بیان کرد در بین عناصر اندازه‌گیری شده، رسوبات از نظر فلز کادمیوم در معرض خطر متوسط اکولوژیکی قرار دارند. دلیل افزایش کادمیوم احتمالاً ورود پساب‌های صنعتی، رواناب‌ها و حمل ذرات رسوبی حاوی این فلز به دریا است. نوسان در جریان‌ات ورودی به دریا، اعم از بارندگی‌ها، پساب‌ها، زهکشی آب و رواناب‌ها از عوامل مهم تغییر معنادار غلظت فلز کادمیوم در آب دریا است. همچنین منبع اصلی کادمیم موجود در دریاها، فاضلاب‌های صنعتی و شهری است. فراوانی کادمیم به‌طور کلی در طبیعت پایین است و بیشتر دارای منشأ انسانی است (Haghshenas *et al.*, 2017). در مطالعه جویباری و همکاران (۱۴۰۱) ارزیابی ریسک خطر فلزات در هندیجان نشان داد که منطقه دارای خطر زیست‌محیطی کمی است و در بین فلزات مورد مطالعه آرسنیک و کادمیوم بیشترین ریسک خطر را داشتند.

حلالیت فلز کادمیوم در آب بالا است (جویباری و همکاران، ۱۴۰۱) اما در مطالعه حاضر غلظت کادمیوم در رسوب بیشتر از آب بود. بررسی غلظت فلزات سنگین Cu و Cd, Pb در رسوبات سطحی سواحل جزرومدی بندر دیلم خلیج فارس میزان فلز کادمیوم در تمامی ایستگاه‌ها بالاتر از استاندارد جهانی است. بنابراین رسوبات منطقه از نظر کادمیم دارای آلودگی زیادی است. میزان کادمیوم از میزان استانداردهای USEPA، کیفیت رسوب آمریکا NOAA و کیفیت رسوب کانادا ISQGS بیشتر بوده است (سیدی و همکاران ۱۴۰۰). بالا بودن میزان کادمیم می‌تواند به دلیل تردد قایق‌های تفریحی، اسکله صیادی، تأثیرپذیری از فاضلاب منطقه باشد (استانی و همکاران، ۱۴۰۰) از این رو پیشنهاد می‌شود که در مطالعاتی که در آینده انجام می‌شود منشأ طبیعی یا انسان ساخت فلزات سنگین به‌خصوص کادمیم شناسایی شود.

مطالعه جویباری و همکاران (۱۴۰۱) نشان داد که با توجه به الگوی توزیع فلزات می‌توان بیان کرد که فعالیت‌های مرتبط با اسکله صیادی بحرکان از یک سو و سکوها نفتی دور از ساحل میدان نفتی هندیجان از سویی دیگر، موجب تغلیظ فلزات نیکل، سرب، روی و مس در جنوب گستره مورد مطالعه شده است. فعالیت‌های کشاورزی نیز غلظت فلزات کادمیم و آرسنیک را در این گستره کنترل کرده، منشأ غلظت کروم نیز پساب‌های کشاورزی، آلودگی‌های ترافیکی و آلودگی‌های باقی‌مانده حاصل از جنگ هشت‌ساله عراق و ایران تعیین شد (جویباری و همکاران، ۱۴۰۱).

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که کیفیت زیست‌محیطی، در تمامی نقاط نمونه‌برداری، در زمره مناطق آلوده محسوب می‌شود. بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود که پهنه‌بندی فلزات سنگین آب و رسوب در بندر هندیجان انجام شود و مقادیر میانگین زمینه فلزات مختلف تعیین شود و شاخص‌های ژئوشیمی در هندیجان با مناطق دیگر مقایسه شود و نیز ارزیابی ریسک زیست‌محیطی ناشی از حوادث لنج‌ها و کشتی‌ها در بندر هندیجان انجام شود و راهکارهای کاهش یا حذف آلودگی از رسوبات و آب بندر هندیجان ارائه شود. در تحقیق حاضر به دلیل محدودیت‌های مالی امکان تحقیق بر روی پارامترهای بیشتری از فلزات سنگین و تکرار نمونه‌ها و ایستگاه‌های بیشتر مقدور نبود لذا پیشنهاد می‌شود به دلیل اهمیت موضوع، پایش فلزات به‌صورت مستمر و با تعداد پارامترهای بیشتری از فلزات سنگین صورت گیرد. خطرات بالقوه اکولوژیکی در آینده در رسوبات محیط‌های آبی دلیل قانع‌کننده‌ای برای نظارت پیوسته بر فلزات سنگین در رسوبات است و توصیه می‌شود که استراتژی‌های مختلفی برای کاهش و پیشگیری از خطرات زیست‌محیطی این فلزات سنگین در محیط‌های آبی برای حفاظت و مدیریت این محیط‌ها در درازمدت اتخاذ شود (Islam Al Sadikul *et al.*, 2023). مقایسه با مقادیر فلزات سنگین در مناطق دیگر یکی از راه‌های بررسی میزان آلودگی فلزات سنگین

است و نیز از مقادیر شیل میانگین که در منابع علمی وجود دارد برای برآورد شاخص‌ها استفاده می‌شود و بایستی از میزان مقادیر فلزات سنگین در قبل از آلوده شدن محیط آگاه بود (Pradit et al., 2022؛ Zhou et al., 2022) در مطالعه حاضر مقایسه‌ای بین میانگین غلظت فلزات سنگین در پژوهش حاضر با مقادیر فلزات سنگین در شیل که در مطالعات دیگر ارائه شده است، انجام گرفت، از آنجایی که مطالعاتی نظیر پژوهش حاضر در منطقه اندک است، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد جهت صحت‌سنجی و به منظور اعتباربخشی به پژوهش‌های علمی که در آینده انجام خواهد شد لازم است با بررسی‌های متعدد علمی مقادیر عناصر زمینه برآورد شود تا بتوان با دقت بیشتری آلودگی فلزات در منطقه را بررسی نمود.

منابع

- استانی، م، ماشین چیان مرادی، ع. و قوام مصطفوی پ، ۱۴۰۰. بررسی غلظت فلزات سنگین در رسوبات ساحلی بندرعباس، فصلنامه علمی پژوهشی زمین‌شناسی محیط‌زیست، ۱۵(۵۵): صفحات ۲۵-۱۳.
- جویباری، س. ا، پیروان، ح، رضایی، پ. و غلامی، ح، ۱۴۰۱. بررسی و تحلیل غلظت فلزات سنگین و شاخص‌های آلودگی رسوبات در کانون گردوغبار هندیجان، استان خوزستان، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آب‌خیز. ۴۱ (۳): صفحات ۳۳۱-۳۱۲.
- سیدی، ج، موسوی ده‌موردی، ل. و خاکی، ا، ۱۴۰۰. بررسی غلظت فلزات سنگین Cu و Cd، Pb در رسوبات سطحی سواحل جزرومدی بندر ديلم خلیج‌فارس، علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۳(۱۲): صفحات ۲۱۰-۲۰۱.
- کاظمی درسنگی، ر. و سادات نعیمی، ا، ۱۴۰۱. آلودگی فلزات سنگین در آب و رسوبات سواحل خلیج‌فارس: مطالعه مروری روایتی. مجله طب دریا، ۴ (۴): صفحات ۱۹۸-۲۰۵.
- کوسج، ن، جعفریان، ح. ا، رحمانی، ع، پاتیمار، ع. و قلی‌پور، ح، ۱۴۰۰. ارزیابی آلودگی فلزات سنگین و بررسی منشأ آلودگی‌های زیست‌محیطی رسوبات مناطق قشم، بندر خمیر و بندر لافت استان هرمزگان در خلیج‌فارس، علوم و فنون شیلات، ۱۰ (۲): صفحات ۱۶۳-۱۵۱.
- هدایت زاده، ف، ایلدرمی، ع، حسن‌زاده، ن. و بهرامی‌فر، ن، ۱۳۹۹. مطالعه سیستماتیک و متاآنالیز آلودگی، پتانسیل سمیت، خطرات اکولوژیکی و بیولوژیکی فلزات سنگین در رسوبات سطحی خوربات ماهشهر و بندر امام خمینی (نواحی ساحلی استان خوزستان)، زیست‌شناسی دریا، ۱۲ (۲): صفحات ۸۰-۵۵.
- Abraham, G. M. S. and Parker, R. J., 2008. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand, Estuar. Coast Shelf Science, 136: 227-238.
- Adomako, D., Nyarko, B. J. B., Dampare, S. B., Serfor-Armah, Y., Osae, S., Fianko, J. R. and Akaho, E. H., 2008. Determination of toxic elements in waters and sediments from River Subin in the Ashanti Region of Ghana. Environmental Monitoring Assessment, 141: 165-175.
- Das Sharma, S., 2019. Risk Assessment and Mitigation Measures on the Heavy Metal Polluted Water and Sediment of the Kolleru Lake in Andhra Pradesh, India. Pollution, 5(1).
- El-Alfy, M. A., El-Amier, Y. A. and El-Eraky, T. E., 2020. Land use/cover and eco-toxicity indices for identifying metal contamination in sediments of drains, Manzala Lake, Egypt. Heliyon, 6 (2020) e03177.
- Haghshenas, A., Hatami-manesh, M., Mirzaei, M., Mir Sanjari, M. and Khezri, P., 2017. Measurement and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Pars Special Economic Energy Zone. Iran South Med Journal, 20 (5): 448-469.
- Hakanson, L., 1980. Ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach, Water Research, 14, 5: 97-101.

- Hossain, M., Ahmed, K., Liyana E, Hossein, S., Jolly, Y. N., Kabir, M. J., Akter, S. and Rahman, S., 2021.** A case study on metal contamination in water and sediment near a coal thermal power plant on the eastern coast of Bangladesh. *Environments*, 8(10):108.
- Islam A. I., Sadikul, M., Hossain, M. E., Nahar, K. and Majed, N., 2023.** Assessment of Environmental Hazard and Heavy Metal Contamination in Dhaleshwari River Sediment: A Toxicity based Study on Pollution. *Pollution*, 9(1): 67-83.
- Karbassi, A. R., Monavari, S. M., Nabi Bidhendi, R. J. and Nematpour K., 2008.** Metal pollution assessment of sediment and water in the Shur River. *Environ Monit Assess*, 147(1-3): 107-16
- Kanat. G., Ikizoglu, B., Erguven, G. and Akgun, B., 2018.** Determination of Pollution and Heavy Metal Fractions in Golden Horn Sediment Sludge (Istanbul,Turkey). *Pol. Journal Environment Stud*, 27: 6.
- Li, X., Henglun Shen, Y., Zhao, Y., Cao, W. and Hu, C., 2019.** Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Water, Sediments, and Aquatic Macrophytes: A Case Study of the Junction of Four Rivers in Linyi City, China. *International Journal Environmental Research and Public Health*, 16: 2861.
- Maanan, M., El Barjy, M., Hassou, N. and Zourarah, B., 2018.** Origin and potential ecological risk assessment of trace elements in the watershed topsoil and coastal sediment of the Oualidia lagoon, Morocco. *Journal Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(3).
- Manno, E., Varrica, D. and Dongarrá, G., 2006.** Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily. *Atmospheric Environment*, 40: 5929-5941
- Muller, G., 1979.** Schwermetalle in den sedimenten des Rheins Veränderungen seit. *Umschau*, 79(24): 778-783.
- Pradit S, Noppradit, P., Jitkaew P., Sengloyluan, K., Thawanrat, K., Laerosa A. and Sirivithayapakor, S., 2022.** Heavy Metal Contamination and Ecological Risk Assessment in the Sediment Cores of the Wetlands in Southern Thailand. *Marine Science and Engineering*. 10, 1921: 1-13.
- Qishlag, A., Moore, F. and Forghani, G., 2007.** Impact of untreated wastewater irrigation on soils and crops in Shiraz suburban area, SW Iran. *Environmental Monitoring Assessment*, 149: 254-262.
- Qin, Y. and Tao, Y., 2022.** Pollution status of heavy metals and metalloids in Chinese lakes: Distribution, bioaccumulation and risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 248: 114293. Available
- Thomilson, D. C., Wilson, D. J., Harris, C. R. and Jeffrey, D. W., 1980.** Problem in heavy metals in estuaries and the formation of pollution index. *Helgol Wiss Meeresunters*, 33(1-4): 566-575.
- Tian, K., Wua, Q., Liua, P., Hua, W., Huang, B., Shid, B., Zhou, B. Y., Kwone, B. O., Choie, K. K., Ryuf, J., Seong, K. and Wang, T., 2020.** Ecological risk assessment of heavy metals in sediments and water from the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Environment International*, 136: 105512.
- Xu, X., Lu, X., Han, X. and Zhao, N., 2015.** Ecological and health risk assessment of metal in resuspended particles of urban street dust from an industrial city in China. *Current Science*, 108 (1): 10.
- Zhou, W., Cao, Q., Hong, M., Lei, Y., Wen, D. and Zang, D., 2022.** Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in seawater and sediments in Jieshi Bay, Shanwei, China. *Frontiers in Marine Science*, 9: 1-15. 10.3389/fmars.2022.1011564