مطالعه سیستماتیک و متاآنالیز آلودگی، پتانسیل سمیت، خطرات اکولوژیکی و بیولوژیکی فلزات سنگین در رسوبات سطحی خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی (نواحی ساحلی استان خوزستان)

فریبا هدایت‌زاده[۱]
علیرضا ایلدرمی[۲]
نسرین حسن‌زاده[۳]*
نادر بهرامی‌فر[۴]

۱. دانشجوی دکترای محیطزیست، گروه محیطزیست، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.
۲. دانشیار گروه مدیریت آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.
۳. استادیار، گروه محیطزیست، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.
۴. دانشیار گروه محیطزیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

***مسئول مکاتبات:**
nasrinhassanzadeh@gmail.com

کد مقاله: ۱۳۹۹۰۲۰۸۱۶
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۳۰
این مقاله پژوهشی و برگرفته از رساله دکتری است.

چکیده

نواحی ساحلی از جمله خوریات خلیج فارس از مناطق حساس و شکننده اکوسیستم‌های آبی در ایران هستند که به شدت متأثر از آلاینده‌های ناشی از شهرنشینی، صنعتی شدن و فعالیت‌های دریایی هستند. علیرغم مطالعات متعدد انجام شده در زمینه بررسی وضعیت آلودگی به ویژه فلزات سنگین در این مناطق، مطالعات جامع و سیستماتیک مربوط به این موضوع انجام‌نشده است؛ بنابراین، مطالعه حاضر به‌منظور بررسی جامع و تجزیه‌وتحلیل سیستماتیک آلودگی فلزات سنگین (Cu، Hg، Ni، Pb، Cd و Co) در رسوبات ساحلی این مناطق با جستجوی مطالعات انجام‌شده در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۹ از طریق پایگاه‌های اطلاعاتی انجام گردید. شاخص‌های متعدد نیز برای توصیف عینی و جامع آلودگی و خطرات فلزات در رسوبات ساحلی مناطق استفاده شد. در بین فلزات موردبررسی، Cd، Hg و Ni نگران‌کننده‌ترین فلزات در رسوبات این مناطق بودند؛ ازنظر شاخص بار آلودگی (PLI) و ریسک محیطزیستی بالقوه (PER)، خور موسی آلوده‌ترین ایستگاه و در طبقه ریسک قابل‌توجه بود و سایر ایستگاه‌ها در طبقه غیر آلوده و ریسک محیط زیستی کم قرار داشتند. از دیدگاه خطر اکولوژیکی هر عنصر (Er_r^i)، تمامی فلزات به‌استثنای Cd و Hg در طبقه کم‌خطر بودند و بیشترین درصد سهم فلزات در خطرات محیطزیستی بالقوه (PER) مربوط به Cd و Hg بود؛ ازنظر شاخص سمیت ($\sum TU$) به‌استثنای خور موسی و درویش سایر مناطق در طبقه غیر سمی بودند و بیشترین درصد سهم فلزات در سمیت کل، مربوط به Ni و Hg بود؛ بر اساس شاخص ارزیابی ریسک بیولوژیکی (mPELQ)، به‌استثنای خور دورق (۹ درصد احتمال سمیت بیولوژیکی)، سایر ایستگاه‌ها در محدوده ۲۱ درصد تا ۴۹ درصد احتمال سمیت بیولوژیکی قرار داشتند. بر اساس نتایج از دیدگاه کنترل آلودگی، سمیت و خطرات ناشی از فلزات، لازم است از انتقال فلزات سنگین به‌ویژه Cd، Ni و Hg ناشی از فعالیت‌های انسانی غالب در محدوده خوریات به رسوبات ساحلی خلیج‌فارس جلوگیری شود. همچنین با توجه به بیشتر بودن میزان شاخص‌ها در ایستگاه‌های بندر امام خمینی، خور درویش، غنام و به‌ویژه خور موسی، باید تجزیه‌وتحلیل منابع آلودگی جهت کنترل ورود آلاینده‌ها و تدوین استراتژی‌های مدیریتی مؤثرتر در این مناطق صورت گیرد.

واژگان کلیدی: فلزات سنگین، رسوبات، شاخص ریسک اکولوژیکی بالقوه، شاخص ریسک بیولوژیکی، شاخص واحدهای سمیت، خلیج‌فارس.

مقدمه

طی دهه‌های گذشته، شهرنشینی سریع و توسعه صنعتی نگرانی‌های جدی را برای زیست‌بوم‌های آبی ایجاد کرده است، به‌طوری‌که حدود ۸۰ درصد از جمعیت جهان ازنظر امنیت آب با تهدید نگران‌کننده‌ای روبه‌رو هستند (Islam *et al*., 2017). در این میان، آلودگی محیط‌های آبی به فلزات سنگین (Heavy Metals; HMs) درنتیجه فعالیت‌های انسانی طی چند دهه گذشته به یک نگرانی اساسی و ازجمله مهم‌ترین مشکلات

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

محیط زیستی در کشورهای درحال‌توسعه و توسعه‌یافته به شمار می‌رود (Islam *et al.*, 2017). پس از ورود آن‌ها به محیط‌های آبی، بیشتر فلزات سنگین به ذرات ریز متصل می‌شوند و در رسوبات تجمع می‌یابند، به‌طوری‌که بیش از ۹۰ درصد کل بار فلزات سنگین در محیط‌های آبی به ذرات معلق و رسوبات متصل است (Raknuzzaman *et al.*, 2016)، بنابراین رسوبات می‌توانند توسط انواع مواد سمی به‌ویژه فلزات سنگین آلوده شوند و درنتیجه اثرات بیولوژیکی نامطلوبی را در پی داشته باشند (Ustaoğlu and Islam, 2020)، زیرا رسوبات بستر زیستگاه‌ها و منبع غذایی موجودات آبزی را تشکیل می‌دهند. لذا اخیراً مسئله آلودگی فلزات سنگین در رسوبات سطحی این محیط‌ها به دلیل اثرات سمی آن‌ها، توانایی تجمع در بافت موجودات آبزی و غیرقابل تجزیه بودن آلودگی اکوسیستم‌های آبی به‌عنوان یک موضوع اساسی موردبحث و توجه بیشتری قرارگرفته است (Saleem *et al.*, 2015; Raknuzzaman *et al.*, 2016). در این زمینه بررسی‌های اخیر نیز نشان می‌دهد که آلاینده‌هایی از قبیل فلزات سنگین، مواد شیمیایی آلی، مواد مغذی و پاتوژن‌های موجود در رسوبات همه‌گیر هستند و خطرات قابل‌توجهی برای انسان و جوامع بنتیک ایجاد می‌کنند (Pan *et al.*, 2014; Saleem *et al.*, 2015). درنتیجه، یک تجزیه‌وتحلیل از توزیع فلزات سنگین در رسوبات مجاور مناطق پرجمعیت می‌تواند برای ارزیابی اثرات انسانی بر اکوسیستم‌ها و نیز بررسی خطرات ناشی از دفع زباله‌ها و فاضلاب‌های انسانی مورداستفاده قرار گیرد (Zheng *et al.*, 2008). اصولاً نواحی ساحلی یکی از مناطق حساس و شکننده اکوسیستم‌های آبی هستند که می‌توانند به‌شدت تحت تأثیر آلاینده‌های انسانی ناشی از فعالیت‌های صنعتی، کشتی‌رانی، فعالیت‌های ماهیگیری، تخلیه فاضلاب و رواناب شهری و سوخت‌های فسیلی قرار گیرند (Ustaoğlu and Islam, 2020). خوریات بندر ماهشهر و بندر امام خمینی (ره) نیز ازجمله شاخص‌ترین نمونه اکوسیستم‌های ساحلی خلیج‌فارس هستند که ازنظر اکولوژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند؛ اما متأسفانه در حال حاضر به علت حضور تعداد زیادی از صنایع پتروشیمی در محدوده خورها و مجاورت با پرترددترین بنادر تجاری ایران (بندر ماهشهر و بندر امام خمینی) و وجود اسکله‌های نفتی و مجتمع‌های پتروشیمی، روزانه مقادیر زیادی از آلاینده‌های مختلف آلی و معدنی به‌خصوص فلزات سنگین را دریافت می‌کنند (عظیمی و همکاران، ۱۳۹۱؛ آقابکی آلوقره و همکاران، ۱۳۹۸). غلظت فلزات سنگین در رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی در بسیاری از مطالعات موردبررسی قرارگرفته است و بر اساس مطالعات متعدد غلظت‌های مختلفی از فلزات سنگین یافت شده است. به‌عنوان‌مثال، میانگین غلظت کادمیوم در رسوبات خور موسی در یک مطالعه منتشرشده در سال ۱۳۹۲ (چراغی و همکاران، ۱۳۹۲) ۱۴ برابر بیشتر از میزان ارائه‌شده در دو مطالعه منتشرشده در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ (Abdolahpur Monikh و همکاران، ۲۰۱۳b؛ Lahijanzadeh و همکاران، ۲۰۱۹) بود. Rastegari Mehr و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که Hg شاخص اصلی خطرات اکولوژیکی بالقوه در رسوبات خور موسی است، اما واعظی و همکاران (۱۳۹۳) دریافتند که Zn شاخص اصلی خطرات اکولوژیکی در رسوبات خور موسی است. علاوه بر این موارد، غلظت فلزات سنگین در رسوبات خوریات مختلف ماهشهر و بندر امام خمینی تغییرات مکانی را به دلیل تغییر در ورودی‌های فلزات سنگین، تغییرات فصلی و تغییرات مکانی در pH، غلظت اکسیژن محلول و سایر شرایط نشان داده است (جلالی و همکاران، ۱۳۹۴؛ موری بازیافتی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Abdollahpur Monikh *et al.*, 2013؛ Nabavi *et al.*, 2014). چنین تغییراتی درک مسئولان از مدیریت خوریات سواحل خلیج‌فارس را برای درک آلودگی فلزات سنگین و توسعه راهکارهای پیشگیری از آلودگی فلزات سنگین در رسوبات این خوریات ساحلی دشوار کرده است. ازاین‌رو روش بهتری مانند متاآنالیز برای توصیف آلودگی فلزات سنگین در رسوبات این مناطق موردنیاز است.

اخیراً از این روش در مطالعات متعددی برای تجزیه و تحلیل داده‌های آلودگی محیط زیست استفاده شده است تا امکان تجزیه و تحلیل جامع آلودگی فراهم شود (Shao *et al.*, 2016; Ali Azadi *et al.*, 2018; Niu *et al.*, 2019; Fakhri *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020). در پژوهش حاضر نیز به دلیل اهمیت منطقه مطالعاتی (خوریات نواحی ساحلی خلیج‌فارس)، مطالعات متعدد و بسیار پراکنده‌ای درزمینه‌ی بررسی وضعیت آلودگی به‌ویژه ازنظر فلزات سنگین در بخش‌های مختلف این منطقه به‌صورت موردی در طی سال‌های مختلف انجام‌شده است. با توجه به این‌که این مطالعات متعدد نتایج متفاوتی را در پی داشته‌اند و یک مطالعه جامع که اکثر خوریات منطقه را جهت مقایسه آن‌ها در نظر گرفته‌شده

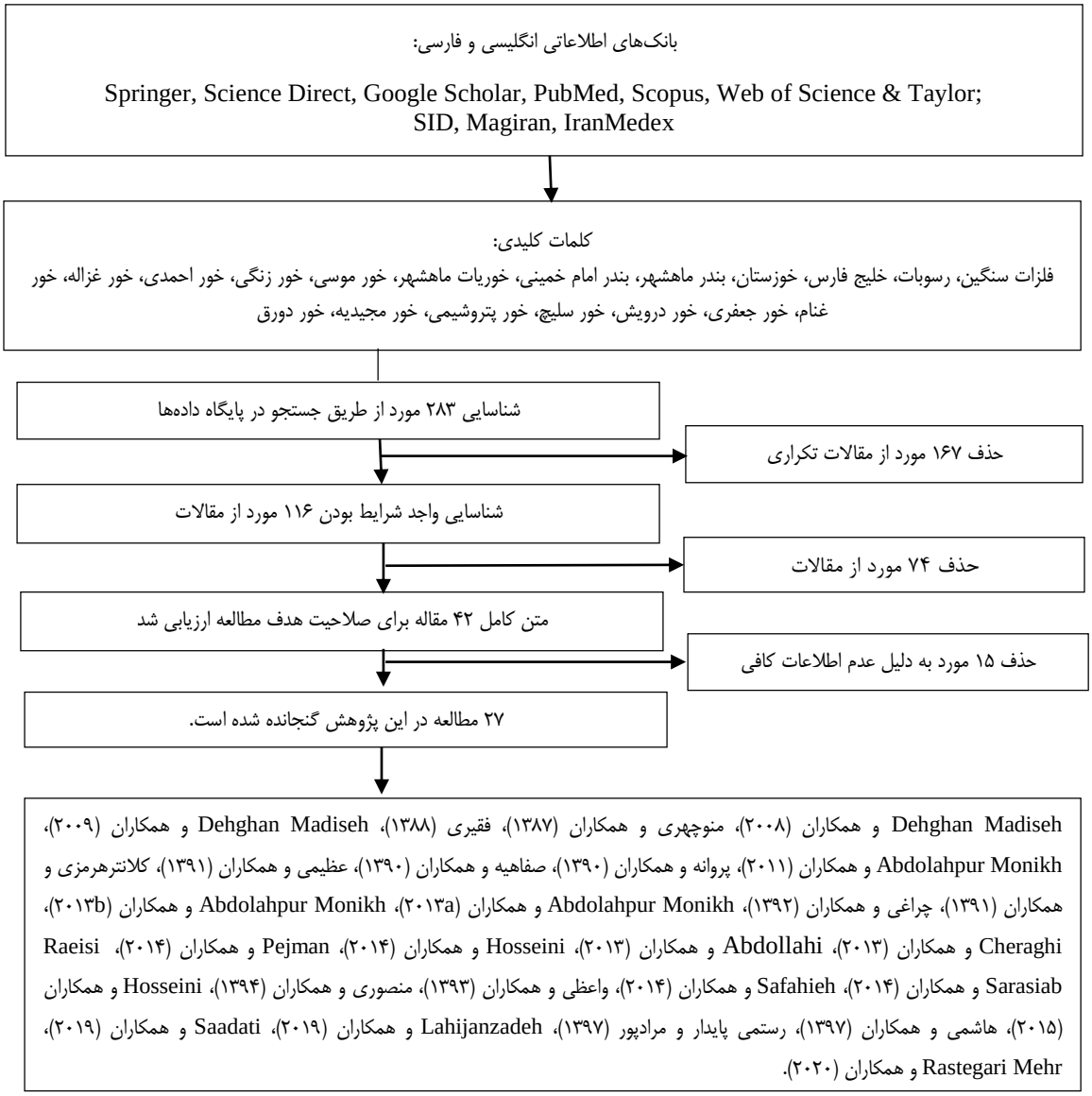
[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

باشد صورت نگرفته است، لذا چنین تغییراتی درک مسئولان از وضعیت آلودگی کل خوریات منطقه و درنهایت توسعه راهکارهای پیشگیری و مدیریت یکپارچه و طولانی‌مدت را با مشکل مواجه می‌کند. جهت رفع این مسئله استفاده از روش متاآنالیز پیشنهاد مناسبی است چراکه با استفاده از این روش می‌توان به‌صورت جامع مطالعات قبلی را بررسی و نتایج آن‌ها را ادغام کرد و درنهایت می‌توان با متد یکسان همه نتایج این مطالعات را در چهارچوب بررسی وضعیت آلودگی و ارزیابی ریسک پوشش داد تا برای تمام منطقه به یک جمع‌بندی واحد رسید. لذا جهت غلبه بر برخی از موارد ذکرشده در پژوهش حاضر داده‌های مطالعات قبلی درزمینه‌ی فلزات سنگین در رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی در سواحل خلیج‌فارس–استان خوزستان (۱۳۹۹–۱۳۸۷) استفاده می‌شود و به‌طور سیستماتیک آلودگی فلزات سنگین در رسوبات با استفاده از اصول اساسی روش متاآنالیز ارزیابی می‌گردد. به‌علاوه جهت انجام یک بررسی جامع آلودگی فلزات سنگین در رسوبات این مناطق ساحلی، از شاخص‌های متعددی چون شاخص بار آلودگی فلزات سنگین، خطرات اکولوژیکی و بیولوژیکی بالقوه ناشی از فلزات سنگین و نیز میزان سمیت فلزات سنگین استفاده می‌گردد.

مواد و روش‌ها

متاآنالیز یک روش آماری جهت تجزیه‌وتحلیل جامع مجموع داده‌های مربوط به مطالعات متعدد بی‌شماری در یک زمینه خاص برای ادغام نتایج است (Moher *et al.*, 2015). در خصوص مطالعه آلودگی بخش‌های مختلف محیط‌زیست نیز متاآنالیز داده‌های مطالعات منتشرشده وقتی‌که امکان پایش داده‌ها در دسترس نیست، باارزش هستند. متاآنالیز هنوز به یک فرآیند تجزیه‌وتحلیل یکپارچه برای انجام ارزیابی‌های آلودگی محیط‌زیست تبدیل نشده است و در حال حاضر روش‌های موجود معمولاً شامل جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل مجدد داده‌های آلاینده از انتشارات مربوطه برای توصیف وضعیت آلودگی منطقه موردنظر است. در پژوهش حاضر نیز مطالعات متعدد فارسی و انگلیسی درزمینه موضوع مطالعه و بازه زمانی موردنظر، مورداستفاده قرار گرفت (شکل ۱). چندین پایگاه داده الکترونیکی برای جمع‌آوری داده‌های پایش فلزات سنگین در رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی مورداستفاده قرار گرفت.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]



شکل ۱: فرآیندهای انتخاب پیشینه پژوهش و نتایج حاصل.

خوریات ماهشهر از انشعابات متعددی تشکیل‌شده است که هر یک به‌تنهایی به‌عنوان یک خور شناخته می‌شوند. در هر یک از مطالعات انجام‌شده اغلب تعدادی از این خورها موردبررسی قرارگرفته است. لذا اصطلاحات اصلی جستجو در این پایگاه داده‌ها "فلزات سنگین"، "رسوبات" و "خوری‌ات ماهشهر" بود و مطالعات را از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۹ پوشش داد. سرانجام، تعداد ۲۸۳ مطالعه جمع‌آوری و ۲۷ مورد از آن‌ها انتخاب شد.

پس از بررسی ۲۷ مطالعه‌ی برگزیده، ایستگاه‌های مطالعاتی (شامل خوریات بندر ماهشهر و بندر امام خمینی) و نیز فلزات سنگینی را که در اکثر پژوهش‌ها موردبررسی قرارگرفته بودند تعیین گردید، سپس موقعیت جغرافیایی خوریات انتخابی به همراه میانگین غلظت فلزات سنگین موردنظر (Cu، Hg، Ni، Pb، Cd، Co) در رسوبات سطحی این خوریات از مقالات متعدد منتشرشده طی ۱۲ سال اخیر استخراج شد. البته قابل‌ذکر است

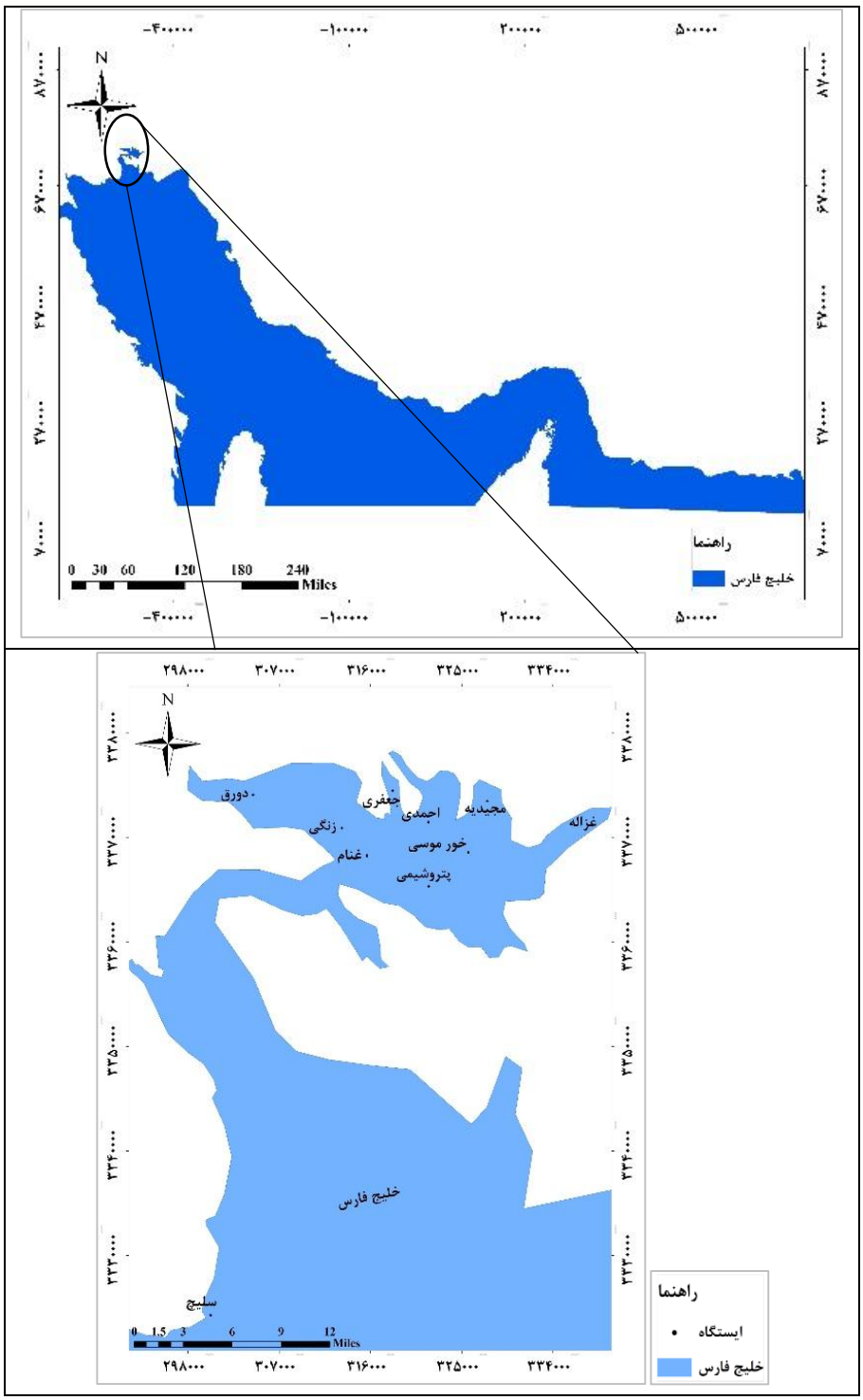
[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

که اگرچه سعی گردید تمام مطالعاتی که دارای غلظت مربوط به این ۶ عنصر هستند و در این دوره (۱۳۹۹–۱۳۸۷) موردبررسی قرارگرفته‌اند، در نظر گرفته شوند ولی در خصوص داده‌های مربوط به غلظت فلزات موردنظر در این دوره مطالعاتی گپ اطلاعاتی نیز وجود داشته است به‌این‌ترتیب که در برخی از سال‌های این دوره ۱۲ ساله اطلاعات مربوط به غلظت برخی از این عناصر فقدان بوده است (به‌عنوان‌مثال Co فقط در ۶ سال، Cu و Cd در ۸ سال، Hg و Ni در ۹ سال و Pb در ۱۰ سال از این دوره ۱۲ ساله مطالعاتی دارای داده‌های غلظت بودند). علاوه بر این مورد، کلیه‌ی خوریات موردبررسی نیز در تمام سال‌های این دوره موردبررسی قرار نگرفته بودند و در بیشتر مطالعات به خوریات موسی، زنگی، احمدی، غزاله، غنام و بندر امام خمینی به‌عنوان منطقه مطالعاتی پرداخته‌شده بود. در جدول ۱ و شکل ۲ موقعیت جغرافیایی خوریات موردمطالعه ارائه گردیده است.

جدول ۱: موقعیت جغرافیایی مناطق موردمطالعه.

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	فعالیت رایج در منطقه
خور زنگی	49° 03′ 48′E	30° 29′ 12″N	دور از فعالیت‌های صنعتی و کشتی‌رانی
خور جعفری	49° 06′ 20′E	30° 27′ 59″N	نزدیکی با مجتمع‌های پتروشیمی
خور پتروشیمی	49° 07′ 07′E	30° 25′ 45″N	ورودی فاضلاب واحد کلرآلکالی پتروشیمی
خور مجیدیه	49° 10′ 33′E	30° 27′ 36″N	اسکله‌ی صادرات نفت
خور غزاله	49° 12′ 30′E	30° 27′ 34″N	پرورش ماهی در قفس
خور غنام	49° 02′ 47′E	30° 25′ 04″N	پایین‌دست تأسیسات صنعتی
خور دورق	49° 01′ 39′E	30° 26′ 68″N	جنب اسکله‌های بندر امام و ماهیگیری
بندر امام خمینی	49° 06′ 25′E	30° 27′ 88″N	مجاورت با صنایع پتروشیمی و نفت
خور موسی	49° 07′ 09′E	30° 26′ 24″N	مجاورت با صنایع پتروشیمی (رازی، فارابی و امام)، بنادر و کشتی‌رانی، صنعت نفت و شیلات

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های موردمطالعه.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

در این پژوهش به‌طور جامع وضعیت آلودگی و میزان خطرات و سمیت فلزات سنگین در رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی ارزیابی گردید. به‌منظور بازتاب بهتر وضعیت آلودگی فلزات سنگین موردمطالعه در رسوبات این مناطق در سواحل خلیج‌فارس، محاسبه‌ی برخی شاخص‌ها صورت گرفت.

شاخص بار آلودگی (Pollution load index (PLI))، برای ارزیابی ریسک اکولوژیکی جامع توسعه‌یافته است (Tomilson *et al*., 1980). این شاخص با استفاده از رابطه‌های زیر قابل‌محاسبه است:

رابطه ۱:
$$PLI = \sqrt[n]{(CF1 * CF2 * CF3 * \dots CFn)}$$

رابطه ۲:
$$CF = \frac{C_s}{C_n}$$

CF فاکتور آلودگی از یک فلز است که در آن Cs میزان غلظت فلز i در نمونه رسوب است؛ Cn مقدار زمینه ژئوشیمیایی فلز i است؛ و n تعداد فلزات است. طبقه‌بندی شاخص PLI نیز به این صورت است: PLI<۱: (غیر آلوده)؛ PLI≥۱ (آلوده).

تجزیه‌وتحلیل واحد سمیت (Toxic unit analysis (TUs)): سمیت حاد بالقوه فلزات سنگین در رسوبات می‌تواند به‌عنوان مجموع واحدهای سمی (Toxic Units; (TUs)) تخمین زده شود و به‌عنوان نسبت غلظت تعیین‌شده به سطوح اثر احتمالی (Probable effect levels; (PELs)) تعریف‌شده است (Zheng *et al*., 2008). TU برای هر فلز با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

رابطه ۳:
$$TU = \frac{C_m}{PEL}$$

رابطه ۴:
$$\sum TUs = TUmetal1 * TUmetal2 * TUmetal3 * \dots * TUmetaln)$$

که Cm غلظت فلز سنگین در رسوبات و PEL مقدار سطوح اثر احتمالی فلزات سنگین در رسوبات است. در معادله دوم $\sum TUs$ مجموع واحدهای سمی فلزات سنگین در رسوبات است.

در شاخص ریسک اکولوژیکی بالقوه (Potential Ecological Risk Index (PERI))، برای ارزیابی خطرات اکولوژیکی برای کنترل آلودگی محیط‌های آبی توسعه داده شد (Hankanson, 1980). این شاخص برای ارزیابی میزان فلزات سنگین در رسوبات، با توجه به سمیت فلزات سنگین و واکنش محیط معرفی‌شده است و می‌تواند با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه گردد:

رابطه ۵:
$$PER = \sum E_r^i$$

رابطه ۶:
$$E_r^i = T_r^i C_f^i$$

رابطه ۷:
$$C_f^i = C_0^i / C_n^i$$

که PER به‌عنوان مجموع کل فاکتورهای خطر برای فلزات سنگین در رسوبات محاسبه می‌شود، E_r^i فاکتور خطر اکولوژیکی احتمالی بالقوه است، T_r^i فاکتور پاسخ سمیت برای یک ماده معین است که برای نیاز سمیت و حساسیت محاسبه می‌شود (T_r^i برای فلزات Cu، Hg، Ni، Pb و Cd به ترتیب ۵، ۴۰، ۵، ۵ و ۳۰ است)، C_f^i فاکتور آلودگی است، C_0^i غلظت فلزات در رسوبات و C_n^i مقدار مرجع برای فلزات است. طبقات مقادیر E_r^i و PERI بر اساس خطرات اکولوژیکی بالقوه در جدول ۲ ارائه گردیده است.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

جدول ۲: خطرات اکولوژیکی برای هر فلز و مجموع فلزات سنگین.

E_r^i	خطر اکولوژیکی برای هر فلز	Ri یا PER	خطر اکولوژیکی بالقوه
<۴۰	ریسک اکولوژیکی کم	<۹۵	ریسک اکولوژیکی کم
۸۰-۴۰	ریسک اکولوژیکی متوسط	۱۹۰-۹۵	ریسک اکولوژیکی متوسط
۱۶۰-۸۰	ریسک اکولوژیکی قابل‌توجه	۳۸۰-۱۹۰	ریسک اکولوژیکی قابل‌توجه
۳۲۰-۱۶۰	ریسک اکولوژیکی زیاد	>۳۸۰	ریسک اکولوژیکی بسیار زیاد
>۳۲۰	ریسک اکولوژیکی بسیار زیاد		

در معادله میانگین سطوح اثرات احتمالی ((mean Probable Effects Level quotient (mPELQ))، به‌منظور تعیین اثرات بیولوژیکی احتمالی فلزات سنگین رسوبات، میانگین مقدار اثرات احتمالی (mPELQ) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

رابطه ۸:

$$mPELQ = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{C_i}{PELi}\right)}{n}$$

که Ci غلظت فلز i، PELi مقدار سطوح اثر احتمالی برای فلز i و n تعداد فلزات در نظر گرفته‌شده است. علاوه بر این، mPELQi به ۴ طبقه تقسیم‌بندی می‌شود: درجه کم آلودگی (۰/۱≤)؛ درجه آلودگی کم – متوسط (۱/۵-۰/۱۱)؛ درجه آلودگی متوسط – بالا (۲/۳-۱/۵۱)؛ و درجه آلودگی بالا (۲/۳<) به ترتیب با داشتن ۸٪، ۲۱٪، ۴۹٪ و ۷۳٪ احتمال سمی بودن (Long *et al.*, 2006).

در شاخص خطر اصلاح‌شده ((Modified hazard quotient (mHQ))، تعیین فاکتور خطر اصلاح‌شده (mHQ) از فلزات سنگین یک ابزار ارزیابی مهم است که درجه خطر هر فلز سنگین برای محیط‌های آبی و موجودات را روشن می‌سازد و این با استفاده از فرمول ریاضی زیر محاسبه می‌شود (Benson *et al.*, 2018):

رابطه ۹:

$$mHQ = \left[Ci\left(\frac{1}{TELi} + \frac{1}{PELi} + \frac{1}{SELi}\right)\right] 1/2$$

که Ci غلظت اندازه‌گیری شده فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب است؛ و TELi، PELi و SEL به ترتیب مخفف سطح اثر آستانه، سطح اثر احتمالی و سطح اثرات شدید برای فلز i ام می‌باشند. در معادله، جذر مربع به‌عنوان یک فرمول ریاضی و رتبه‌بندی در نظر گرفته می‌شود.

طبقه‌بندی پیشنهادشده از آلودگی توسط هر فلز در جدول زیر ارائه‌شده است.

جدول ۳: طبقه‌بندی فاکتور خطر اصلاح‌شده (mHQ).

mHQ	درجه ریسک
mHQ>۳/۵	شدت آلودگی بیش‌ازحد
۳<mHQ<۳/۵	شدت آلودگی بسیار بالا
۲/۵<mHQ<۳	شدت آلودگی بالا
۲<mHQ<۲/۵	شدت آلودگی قابل‌توجه
۱/۵<mHQ<۲	*شدت آلودگی متوسط
۱<mHQ<۱/۵	شدت آلودگی کم
۰/۵<mHQ<۱	شدت آلودگی بسیار کم
mHQ<۰/۵	شدت آلودگی صفر تا بسیار کم

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

نتایج حاصل از این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS (نسخه ۲۲) مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیروویلک صورت گرفت. برای آنالیز اختلاف معنی‌داری با ضریب اطمینان ۹۵ درصد (P=۰/۰۵) میانگین داده‌های مربوط به غلظت فلزات سنگین و شاخص‌های محاسبه‌شده در ایستگاه‌های موردمطالعه از آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد. با توجه به همگنی واریانس‌ها بر اساس آزمون لون و نیز معنی‌دار بودن اختلاف میانگین داده‌ها در بین ایستگاه‌های موردمطالعه از آزمون دانکن جهت تعیین و تفکیک ایستگاه‌های دارای اختلاف استفاده گردید. جهت ترسیم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

نتایج

جدول ۴ خلاصه اطلاعات آماری غلظت فلزات سنگین در رسوبات را بر اساس ۲۷ مقاله انتخاب‌شده نشان می‌دهد. در بین فلزات سنگین رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی، فلزات Cu، Hg، Ni، Pb، Cd و Co موردبررسی قرار گرفتند. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود میانگین غلظت فلزات Cu، Hg، Ni، Pb، Cd و Co به ترتیب برابر ۹/۱۷ ± ۲۲/۰۸، ۰/۶۷ ± ۰/۷۲، ۳۴/۶۸ ± ۶۸/۳۴، ۶/۴۰ ± ۹/۰۶، ۰/۶۲ ± ۰/۷۰ و ۶/۳۰ ± ۱۵/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک است.

در شکل ۳ سال موردبررسی و نیز میانگین مقدار غلظت هر عنصر نشان داده‌شده است. مطابق گزارش آنالیز رسوبات جمع‌آوری‌شده بین سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۹، گزارش‌های محققان مختلف نشان‌دهنده‌ی اختلاف معنی‌دار برخی از میانگین غلظت فلزات سنگین ازجمله Cu، Ni و Co در رسوبات خوریات ساحلی بندر ماهشهر و بندر امام خمینی بین سال‌های موردمطالعه است (P<۰/۰۵).

در شکل ۴ مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین موردبررسی در خوریات ماهشهر و نیز بندر امام خمینی طی دوره ۱۲ ساله (۱۳۹۹–۱۳۸۷) ارائه گردیده است. مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین بین ایستگاه‌های مختلف بر اساس آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نشان داد که غلظت فلزات Hg، Ni و Co در بین خوریات دارای اختلاف معنی‌دار آماری است (P<۰/۰۵) ولی غلظت سایر فلزات (Cu، Pb و Cd) فاقد اختلاف معنی‌دار بودند (P>۰/۰۵).

در شکل ۵ میانگین شاخص بار آلودگی (PLI) ناشی از فلزات سنگین موردبررسی در رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی ذکرشده است. یافته‌های حاصل از محاسبه‌ی شاخص بار آلودگی (PLI) فلزات سنگین در رسوبات مناطق موردبررسی نشان داد که مقادیر PLI خوریات مختلف از ۰/۰۲ تا ۱/۲۰ متغیر است. مقایسه‌ی شاخص PLI بین خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی بر اساس آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نشان داد که ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری بین خوریات مختلف ساحلی ازنظر شاخص PLI وجود دارد (P<۰/۰۵).

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

جدول ٤: میانگین توصیفی و آماری فلزات سنگین مستخرج از مقالات همراه با مقادیر راهنمای رسوبات طی دوره ۱۲ ساله (۱۳۹۹-۱۳۸۷).

فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم)						
Co	**Cd**	**Pb**	**Ni**	**Hg**	**Cu**	**طبقه**
۱۵/۵۶	۰/۷۰	۹/۰۶	۶۸/۳۴	۰/۷۲	۲۲/۰۸	میانگین
۲۷/۳	۳/۸۲	۲۶	۱۴۰/۴۸	۴/۲	۵۶/۵۶	ماکزیمم
۵/۷۱	۰/۲۵	۰/۵۹	۱۴/۵۵	۰/۰۷	۱۰/۶	مینیمم
۶/۳۰	۰/۶۲	۶/۴۰	۳۴/۶۸	۰/۶۷	۹/۱۷	انحراف استاندارد
۳۷/۶۴	۸۵/۱۴	۷۰/۶۱	۵۰/۷۵	۹۳/۰۵	۴۱/۴۹	ضریب تغییرات (٪)
–	۰/۵۹	۳۵	۱۸	۰/۱۷۴	۳۵/۷	TEL
–	۳/۵۳	۹۱/۳	۳۶	۰/۴۸۶	۱۹۷	PEL
–	۵	۳۵	۳۰	۰/۱۵	۷۰	ERL
–	۹	۱۱۰	۵۰	۱/۳	۳۹۰	ERM
–	۱۰	۲۵۰	۷۵	۲	۱۱۰	SEL
۱۹	۰/۳	۲۰	۶۸	۰/۴	۴۵	Background value

*TEL: threshold effect level, PEL: probable effect level (MacDonald *et al*., 2000; MacDonald and Ingersoll, 2002), ERL: effects range low, ERM: effects range median (MacDonald *et al*., 2000; MacDonald and Ingersoll, 2002), SEL: Severe effect level, dry weight (Persaud *et al*., 1993).

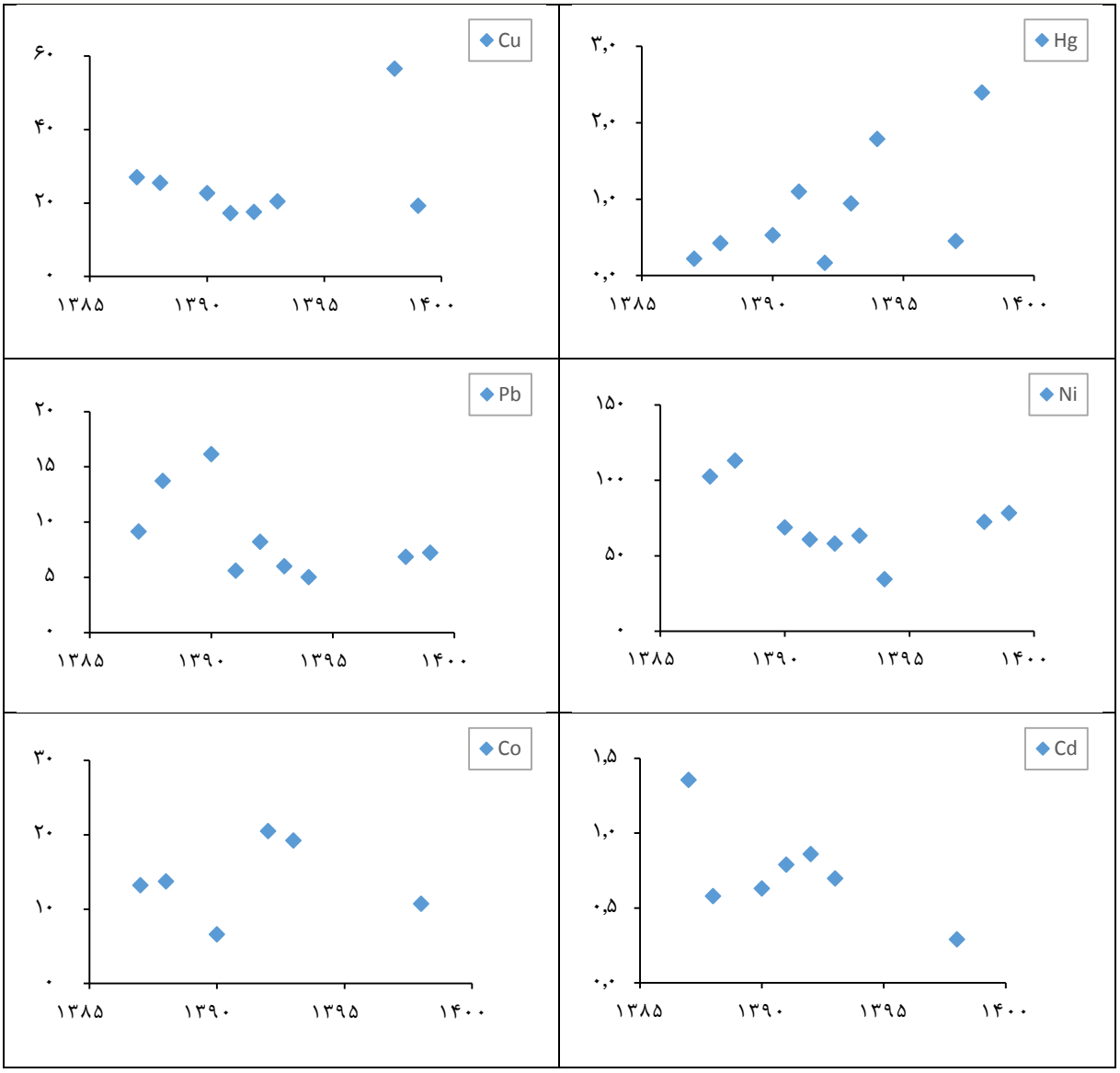
جهت بررسی خطرات اکولوژیکی ناشی از هرکدام از فلزات سنگین در رسوبات ساحلی مناطق مختلف از شاخص Er_r^i استفاده گردید. نتایج بررسی شاخص خطر اکولوژیکی هر فلز (Er_r^i) فلزات سنگین در رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی در شکل ۶ آورده شده است. یافته‌های این شاخص نشان می‌دهد که ازنظر خطر اکولوژیکی فلزات سنگین رسوبات مناطق موردمطالعه برای سه فلز Pb، Ni و Cu در طبقه خطر کم (Er_r^i<۴۰) و فلزات Cd و Hg در طبقه خطر کم (Er_r^i<۴۰) تا قابل توجه (۱۶۰> Er_r^i >۸۰) در رسویات ایستگاه‌های مختلف قرار دارند.قرار دارند.

شاخص ریسک محیط زیستی بالقوه (PER) نیز جهت تعیین خطرات اکولوژیکی ناشی از کل فلزات سنگین در رسوبات ساحلی خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی استفاده شد. در شکل ۷ نتایج محاسبه‌ی شاخص ریسک محیط زیستی بالقوه (PER) فلزات سنگین موردمطالعه در رسوبات ساحلی خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی ارائه گردیده است. مقایسه‌ی میانگین این شاخص بین ایستگاه‌های مختلف نشان داد که ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری بین خوریات مختلف وجود ندارد (بر اساس آزمون ANOVA؛ P>۰/۰۵).

شاخص ریسک محیط زیستی بالقوه (PER) نیز جهت تعیین خطرات اکولوژیکی ناشی از کل فلزات سنگین در رسوبات ساحلی خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی استفاده شد. در شکل ۷ نتایج محاسبه‌ی شاخص ریسک محیط زیستی بالقوه (PER) فلزات سنگین موردمطالعه در رسوبات ساحلی خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی ارائه گردیده است. مقایسه‌ی میانگین این شاخص بین ایستگاه‌های مختلف نشان داد که ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری بین خوریات مختلف وجود ندارد (بر اساس آزمون ANOVA؛ P>۰/۰۵).

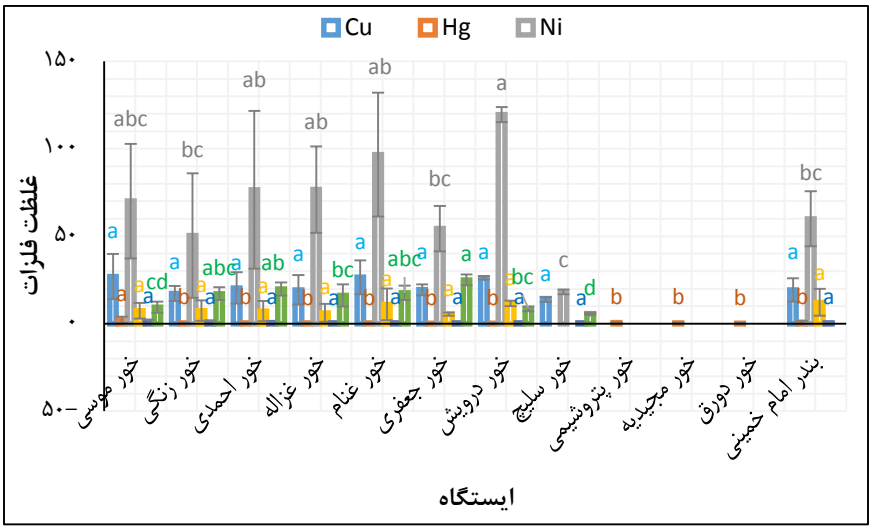
در این مطالعه از رویکرد جدیدی تحت عنوان محاسبه‌ی درصد نسبت Er_r^i / PER جهت تفکیک و تعیین درصد سهم نسبی هرکدام از فلزات سنگین در ریسک محیط زیستی بالقوه (PER) در منطقه مطالعاتی استفاده گردید (Niu *et al*., 2019). نتایج درصد نسبت $PERER_r^i$ / فلزات Cu، Hg، Ni، Pb و Cd در شکل ۸ ذکرشده است. بر اساس نتایج حاصل از محاسبه‌ی این نسبت، درصد سهم نسبی فلزات Cu، Hg، Ni، Pb و Cd به ترتیب ۷/۲۶، ۷۰/۱۹، ۱۳/۲۳، ۶/۲۷ و ۷۳/۰۱ درصد مشاهده شد.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

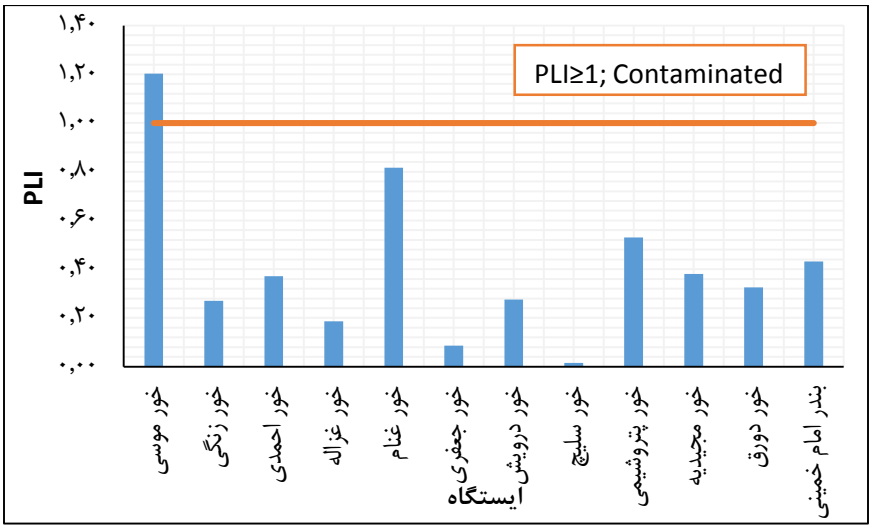


شکل ۳: مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی در سال‌های مختلف.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

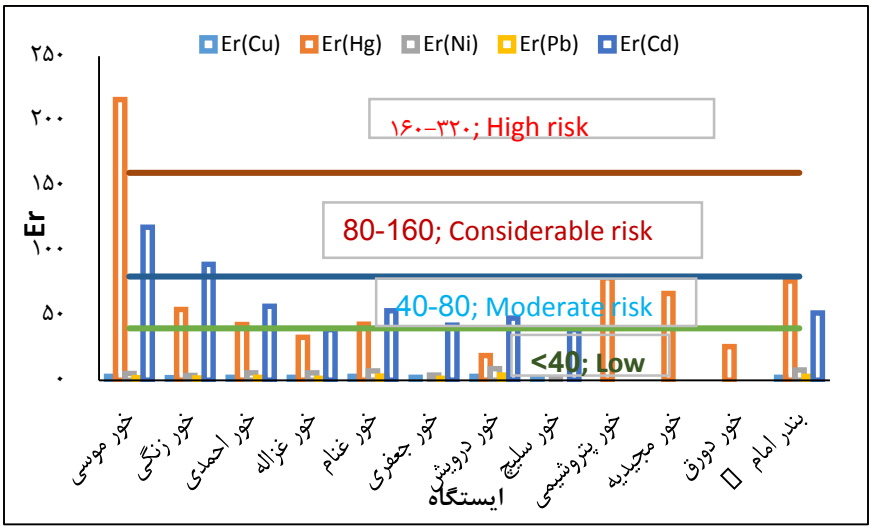


شکل ٤: مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین موردبررسی در ایستگاه‌های مختلف طی دوره ۱۳۹۹-۱۳۸۷.

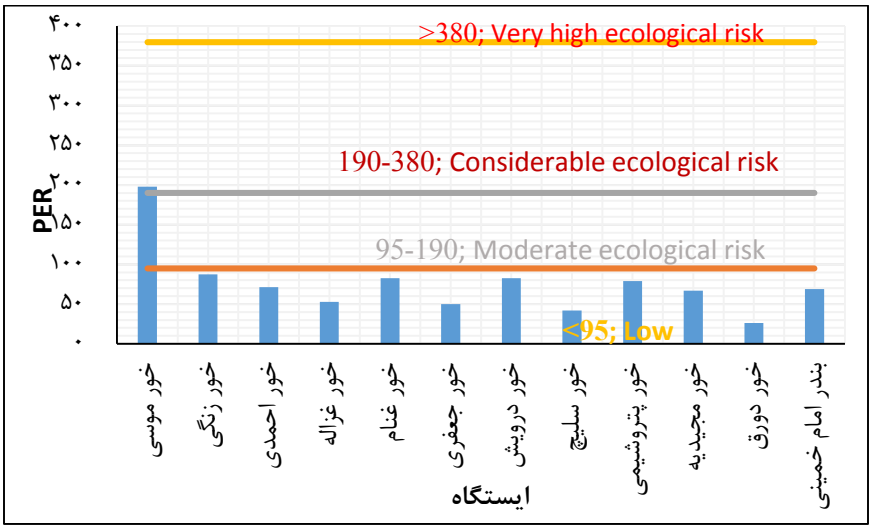


شکل ٥: مقایسه میانگین شاخص بار آلودگی (PLI) در بین ایستگاه‌های مختلف طی دوره ۱۳۹۹-۱۳۸۷.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

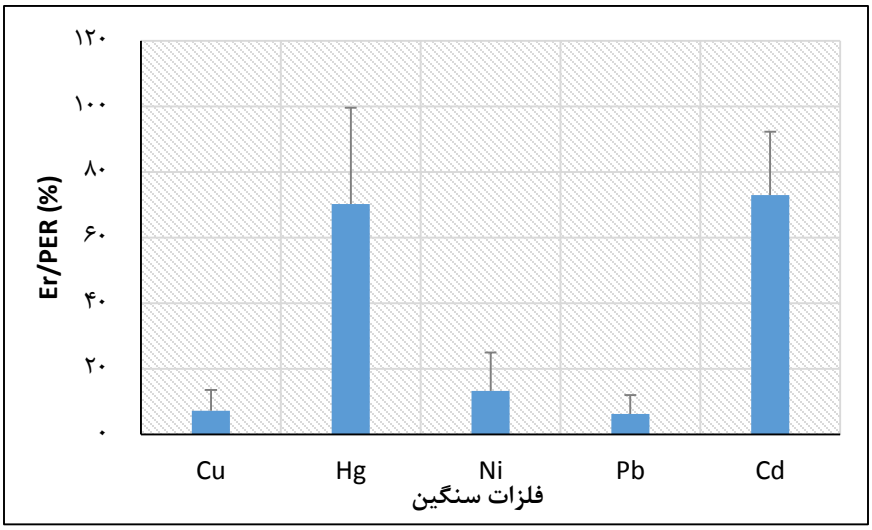


شکل ٦: مقایسه میانگین شاخص خطر اکولوژیکی هر فلز (Er_r^i) در بین ایستگاه‌های مختلف طی دوره ۱۳۹۹-۱۳۸۷.



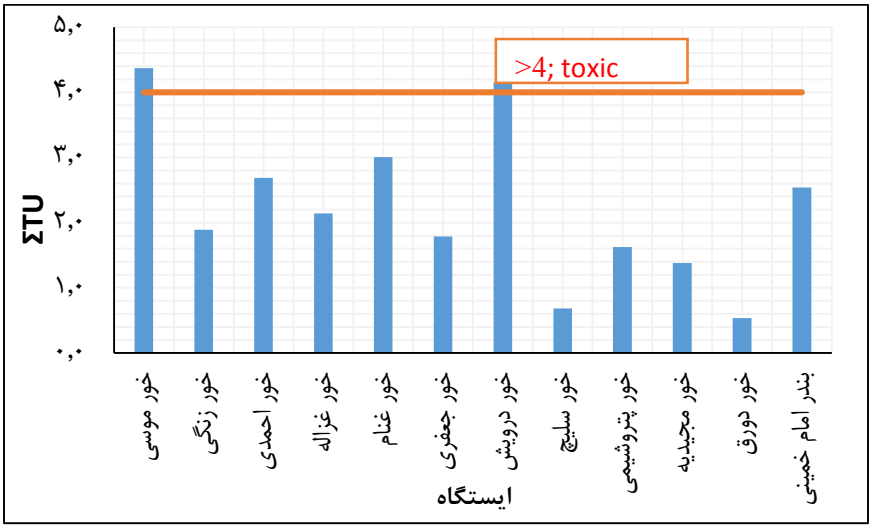
شکل ۷: مقایسه میانگین شاخص ریسک محیطزیستی (PER) بین ایستگاه‌های مختلف طی دوره ۱۳۹۹-۱۳۸۷.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]



شکل ۸: سهم نسبی فلزات سنگین در PER.

برای بررسی سمیت فلزات سنگین در رسوبات ساحلی خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی از شاخص پتانسیل سمیت فلزات سنگین (TU) استفاده گردید و نتایج آماری در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده‌شده است. شکل ۹ خصوصیات توزیع ریسک از کل سمیت فلزات سنگین در رسوبات مناطق مختلف را نشان می‌دهد. مقایسه این شاخص در رسوبات ایستگاه‌های مختلف اختلاف معنی‌داری را بر اساس آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نشان داد (P<۰/۰۵).



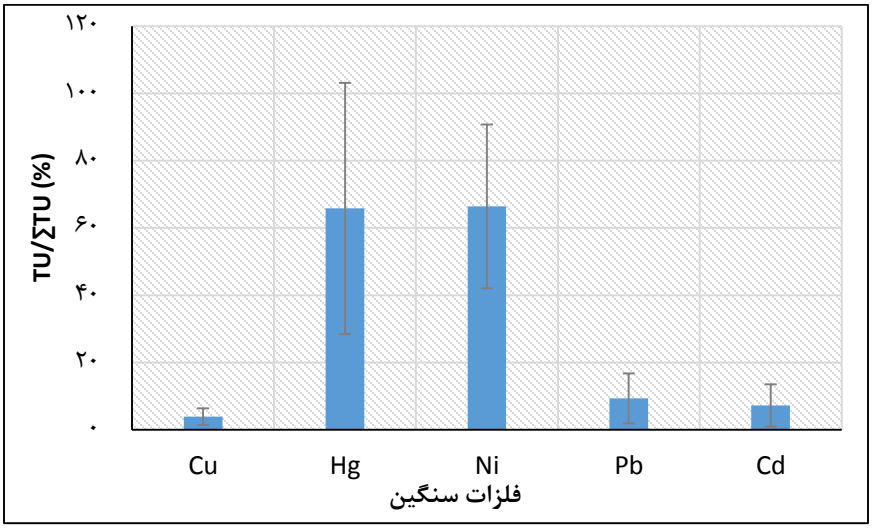
شکل ۹: مقایسه میانگین شاخص پتانسیل سمیت حاد فلزات (∑TU) در بین ایستگاه‌های مختلف طی دوره ۱۳۹۹-۱۳۸۷.

در این مطالعه از رویکرد محا سبه‌ی در صد نسبت TU/∑TU جهت تفکیک و تعیین در صد سهم نسبی هرکدام از فلزات سنگین در سمیت رسوبات استفاده گردید. مطابق شکل ۱۰ که میزان سمیت و سهم سمیت کلی فلزات مختلف را نشان می‌دهد، درصد سهم نسبی فلزات مختلف

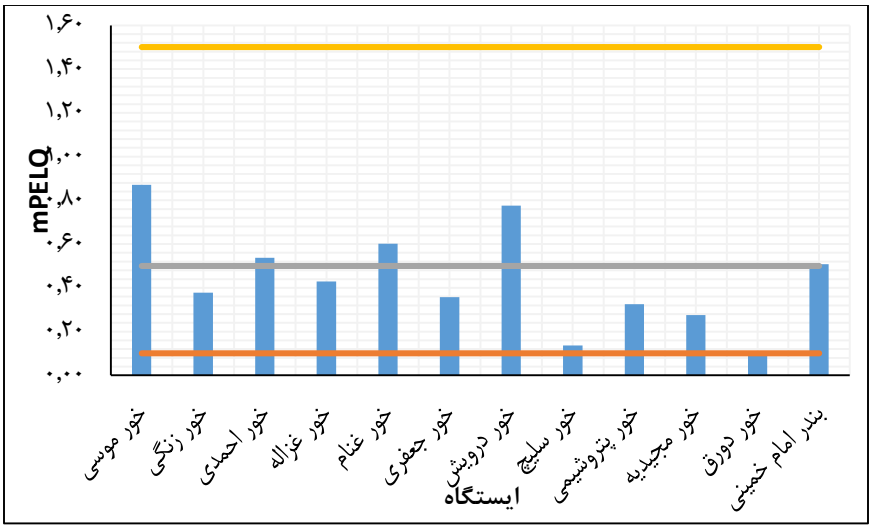
[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

در سمیت کل فلزات سنگین در رسوبات ساحلی خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی برابر ۳/۹۵، ۶۵/۷۹، ۶۶/۴۲، ۹/۳۳ و ۷/۲۷ درصد به ترتیب برای فلزات Cu، Hg، Ni، Pb و Cd بود.

به‌منظور تعیین اثرات بیولوژیکی احتمالی فلزات سنگین ر سوبات، شاخص میانگین میزان اثرات احتمالی (mPELQ) ا ستفاده گردید. م مقایسه میانگین شاخص mPELQ بین ایستگاه‌های مختلف بر اساس آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نشان داد که ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری بین ایستگاه‌های موردمطالعه وجود ندارد (P>۰/۰۵) (شکل ۱۱).



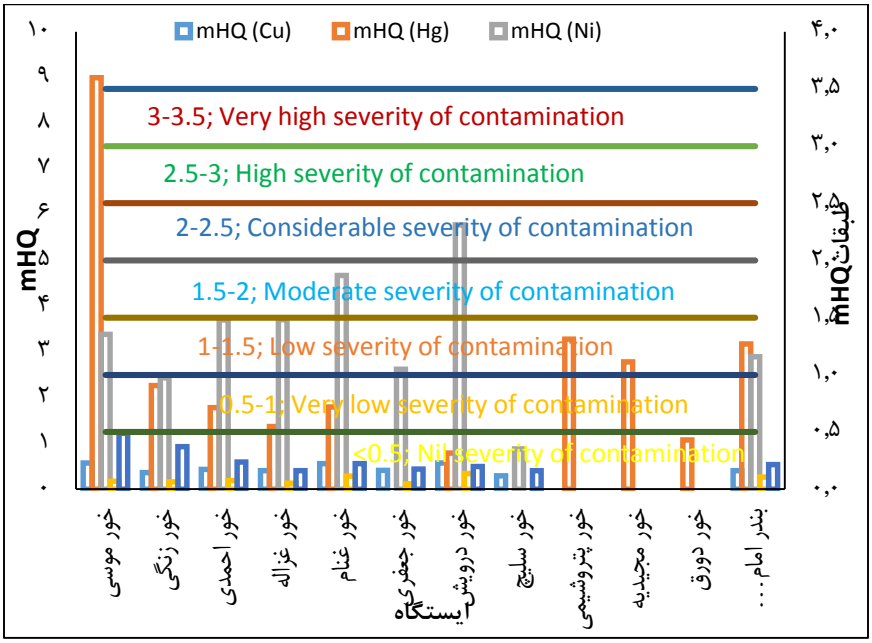
شکل ۱۰: درصد سهم نسبی فلزات سنگین درمجموع واحدهای سمیت (∑TU).



شکل ۱۱: مقایسه میانگین شاخص میانگین سطوح اثرات احتمالی بیولوژیکی (mPELQ) در بین ایستگاه‌های مختلف طی دوره ۱۳۹۹-۱۳۸۷.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

نتایج محاسبه‌ی شاخص ارزیابی خطر اصلاح‌شده (mHQ) فلزات سنگین موردبررسی (Cu، Hg، Ni، Pb و Cd) در رسوبات سطحی خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی در شکل ۱۲ ارائه‌شده است. میزان شاخص ارزیابی خطر اصلاح شده برای فلز Cu در محدوده ۰/۵۷–۰/۲۹، برای Hg در محدوده ۹–۰/۷۹، برای Ni در محدوده‌ی ۵/۷۸–۰/۸۸، برای Pb در محدوده ۰/۳۴–۰/۱۲ و برای Cd در محدوده ۱/۲۳–۰/۴۱ در رسوبات سطحی تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی قرار دارند.



شکل ۱۲: مقایسه میانگین شاخص ارزیابی خطر اصلاح‌شده (mHQ) در بین ایستگاه‌های مختلف طی دوره ۱۳۹۹–۱۳۸۷.

بحث و نتیجه‌گیری

در مورد مقادیر میانگین فلزات موردمطالعه، غلظت Cd و Hg در مقایسه با سایر فلزات بیشتر است و به ترتیب ۲/۳ و ۱/۸ برابر مقدار پس‌زمینه‌ای محیطی بودند. میانگین Ni نیز تقریباً برابر مقدار زمینه‌ای محیطی بود و غلظت سایر عناصر از مقادیر پس‌زمینه‌ی مربوط به آن‌ها کمتر مشاهده شد. ازنظر ضریب تغییرات (CV)، میزان CV برای Hg، Cd و Pb به ترتیب ۹۳/۰۵ درصد، ۸۵/۱۴ درصد و ۷۰/۶۱ درصد و برای سایر عناصر ۶۴/۷۵–۳۷/۵۰ درصد بود و نتایج نشان می‌دهد که غلظت‌های Hg و Cd دارای تغییرات مکانی زیادی هستند. ازآنجاکه کادمیوم و جیوه آلاینده‌هایی هستند که منشأ انسانی دارند، درنتیجه دامنه تغییر غلظت زیادی از آن‌ها انتظار می‌رود (منوچهری و همکاران، ۱۳۸۷). با توجه به خطرات محیط زیستی ناشی از فلزات سنگین در رسوبات، دو مجموعه از رهنمودهای کیفیت رسوبات (SQGها) کانادا و آمریکا یعنی سطوح اثرات آستانه (TEL)/ سطوح اثرات احتمالی (PEL) و محدوده اثر کم (ERL)/ محدوده اثر متوسط (ERM) به تصویب رسید (MacDonald *et al.*, 2000). ERLs و TELs به مقادیر و محدوده‌هایی با غلظت‌های کم طبقه‌بندی می‌شوند که اثرات منفی آن‌ها بر روی جانوران رسوبی به‌ندرت خواهد داشت. PELs و ERMs به این اشاره دارد که میزان غلظت آلاینده‌های بیشتر از آن‌ها اثرات مضر بر روی موجودات ساکن رسوبات دارد و انتظار می‌رود به‌طور مکرر باید ارزیابی شوند (MacDonald *et al.*, 2000). مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین در رسوبات

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی با ERL و ERM، نشان داد که حداکثر غلظت فلزات Hg و Ni بالاتر از غلظت ERM مربوط به آن‌ها و حداکثر غلظت فلزات Cu، Pb و Cd کمتر از ERL آن‌ها بود. در مقایسه با TEL و PEL، حداکثر غلظت فلزات Hg، Ni و Cd بالاتر از نقطه PEL آن‌ها، حداکثر غلظت فلز Cu بالاتر از غلظت PEL آن و حداکثر غلظت Pb کمتر از میزان TEL مربوط به آن مشاهده شد. مقایسه‌ی غلظت فلزات با SEL (استاندارد کیفیت رسوب نیویورک)، حداکثر غلظت فلزات Hg و Ni بیشتر از میزان SEL آن‌ها و حداکثر غلظت سایر فلزات کمتر مشاهده شد. در مطالعه Dehghan Madiseh و همکاران (۲۰۰۸) نیز در ارزیابی و مقایسه آلودگی فلزات سنگین در رسوبات برخی از خوریات ماهشهر در شمال غربی خلیج‌فارس با برخی رهنمودهای کیفیت رسوبات (SQGs) نتایج نشان داد غلظت Ni در بیشتر خودها بیشتر از ERM، مقادیر Hg بیشتر از ERL درخوری‌ات غنام، احمدی، پاتیل، غزاله و زنگی و مقادیر Zn بیشتر از ERL در غنام مشاهده شد. غلظت سایر فلزات (Cu، Cd، Pb و Co) کمتر از این سطوح استاندارد بود. در مطالعه Lahijanzadeh و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی ریسک اکولوژیکی عناصر سمی بالقوه (PTEs) در خور موسی نتایج مقایسه PTEs با مقادیر استانداردهای ERL، ERM، TEL و TPL نشان داد که مشابه پژوهش حاضر غلظت Hg و Ni نسبت به سایر عناصر بیشتر از برخی رهنمودهای کیفیت رسوبات از قبیل ERL، ERM، TEL و PEL مشاهده شدند.

بر اساس نتایج حاصل از این بخش می‌توان اذعان داشت که Hg، Cd و Ni نسبت به سایر فلزات موردبررسی، نگران‌کننده‌ترین فلزات سنگین در رسوبات ساحلی خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی بین سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۹ هستند زیرا حداکثر مقادیر این فلزات از مقادیر زمینه و برخی رهنمودهای کیفیت رسوبات بیشتر بودند. Hg و Cd از سمی‌ترین ترکیبات موجود در محیط هستند و تأثیرات سوء آن‌ها بر بوم سازگان‌های آبی از دیرباز شناخته شده است. این عناصر در فعالیت‌های متابولیسمی بدن موجود زنده شرکت نمی‌کنند و حتی غلظت‌های کم آن‌ها باعث اختلال در فعالیت‌های طبیعی موجود زنده می‌شود (Rao *et al*., 2010; Yargoli *et al*., 2009). برخلاف Hg و Cd، Ni یک عنصر ضروری است اما قرار گرفتن در معرض بیش‌ازحد آن نیز می‌تواند باعث ایجاد اختلالات ایمنی، عصبی، ژنتیکی، تنفسی، سرطان و سایر بیماری‌ها شود (Das *et al*., 2008). بنابراین با توجه به غلظت قابل‌توجه این فلزات در منطقه موردمطالعه و نیز اثرات ناشی از آن‌ها، شناسایی و مدیریت منابع انتشار آن‌ها در این مناطق ضروری است. منوچهری و همکاران (۱۳۸۷) در مطالعه‌ای در بررسی کادمیوم و سرب خور زنگی از انشعابات خور موسی، غلظت بالای کادمیوم را به فعالیت‌های انسانی و پساب پالایشگاه‌ها و تأسیسات صنعتی اطراف این منطقه نسبت دادند. در مطالعه Rastegari Mehr و همکاران (۲۰۲۰) نیز در بررسی توزیع مکانی و ریسک محیط زیستی فلزات سنگین و هیدروکربن‌های آروماتیک بیشترین میزان EF برای Hg در قسمت‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه پتروشیمی مشاهده شد که مشابه سایر مطالعات صورت گرفته در منطقه خوریات ماهشهر (Raeisi Sarasiab *et al*., 2014؛ هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷) به فعالیت واحد کلرآلکالی با یک فرآیند سلول جیوه‌ای در این منطقه نسبت داده شد. به‌علاوه در این مطالعه اشاره گردیده است که باوجود EF بالای Ni نباید آن را یک عنصر کاملاً انسان‌ساخت در منطقه موردمطالعه تلقی کرد.

بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین غلظت هر عنصر در مطالعات متعدد در سال‌های مختلف، در بین مقادیر میانگین غلظت در این گزارش‌ها، حداکثر غلظت فلزات Cu، Hg، Ni، Pb، Cd و Co به ترتیب ۵/۳، ۶۰، ۹/۶، ۴۴، ۱۵/۲ و ۴/۷ برابر حداقل میانگین غلظت این عناصر بود. Hg بیشترین تفاوت را در غلظت‌های به‌دست‌آمده توسط محققان مختلف نشان داد. حداکثر میانگین غلظت Hg برابر ۵/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و توسط Hosseini و همکاران (۲۰۱۵) محاسبه شد. حداقل میانگین غلظت Hg برابر ۰/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود و توسط رستمی پایدار و مرادپور (۱۳۹۷) یافت شد. متفاوت بودن نتایج در مطالعات مختلف می‌تواند به دلیل تفاوت در مکان‌های نمونه‌برداری، فصل و شرایط منطقه باشد. از سویی به دلیل حضور بنادر مهم تجاری و صنایع مختلف پتروشیمی و نفتی در منطقه مطالعاتی، کشتی‌های نفتی و تجاری مختلفی روزانه در منطقه تردد داشته و جهت حفظ عمق کشتیرانی، عملیات لایروبی به‌طور مداوم در خوریات ماهشهر صورت می‌گیرد. اجرای این عملیات لایروبی

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

باعث برهم زدن بستر و آزادسازی فلزات سنگین شده و درنهایت تأثیر مهمی در نتایج حاصله خواهد داشت (موری بازیافتی و همکاران، ۱۳۹۶). ثابت نبودن مقدار جیوه خروجی توسط واحد کلر آلکالی پتروشیمی بندر امام نیز می‌تواند یکی از دلایل گستردگی نتایج در مطالعات مختلف طی سال‌های اخیر باشد (Ramezani *et al*., 2016; Godarzi Nik *et al*., 2012).

مقایسه میانگین غلظت فلزات بین ایستگاه‌های مختلف نشان داد که از میان فلزات موردبررسی تنها غلظت فلزات Hg، Ni و Cd در بین خوریات دارای اختلاف معنی‌داری است. وجود اختلاف معنی‌دار بین مقادیر فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در بین ایستگاه‌های مختلف می‌تواند حاکی از این باشد که منابع آلودگی در منطقه مطالعاتی به‌صورت نقطه‌ای است (عظیمی و همکاران، ۱۳۹۱). درواقع وجود این اختلافات براثر مجاورت خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی با صنایع مختلف واقع در محدوده سواحل خلیج‌فارس در استان خوزستان به‌خصوص صنایع نفت و پتروشیمی، فراوانی حمل‌ونقل کشتی‌ها در اسکله‌های مختلف، مجاورت با محل تعمیر و نگهداری کشتی‌ها و غیره است. بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین غلظت فلزات بین ایستگاه‌های مختلف، بیشترین میزان Hg در خور موسی (۱/۸۲ ± ۲/۱۶) و کمترین میزان آن در خور دورق (۰/۰۹ ± ۰/۱۹) مشاهده شد. جیوه ازجمله آلاینده‌های متداول در خور موسی بوده و مطالعات متعدد حاکی از آلودگی این منطقه به این عنصر فلزی است (فقیری، ۱۳۸۸، بابادی و همکاران، ۱۳۹۴؛ هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷). با وجود استفاده گسترده از جیوه، بررسی‌ها نشان داده است که بزرگ‌ترین مصرف‌کننده جیوه در جهان صنایع کلرآلکالی هستند. در مطالعات صورت گرفته در منطقه خور موسی نیز مشاهده‌شده است که پساب واحد کلرآلکالی پتروشیمی کیمیا واقع در منطقه‌ی اقتصادی، حاوی مقادیر بالایی از جیوه بوده و منبع اصلی آلودگی جیوه در این خور است (Raeisi Sarasiab *et al*., 2014؛ هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ آقابکی آلوقره و همکاران، ۱۳۹۸). به‌علاوه در مطالعاتی که درزمینه‌ی نوع دانه‌بندی این منطقه صورت گرفته است مشاهده شد که نوع دانه‌بندی خور موسی از نوع سیلت و رس بوده است (Dehghan Madiseh *et al*., 2009)؛ بنابراین چون جیوه معدنی حلالیت کمی در آب دارد و از سویی جنس بستر خور موسی از نوع رس است، جیوه‌ی تخلیه‌شده به محیط (دارای بار مثبت) با رس (دارای بار منفی) تشکیل کمپلکس پایدار داده و در سطح بستر ته‌نشین می‌گردد (بابادی و همکاران، ۱۳۹۴؛ جلالی و همکاران، ۱۳۹۴). در مطالعه‌ی Hosseini و همکاران (۲۰۱۴) و Raeisi Sarasiab و همکاران (۲۰۱۴) در سواحل خلیج فارس نیز مشابه پژوهش حاضر بیشترین میزان Hg در خور موسی نسبت به سایر ایستگاه‌ها مشاهده شد. در مطالعه موری بازیافتی و همکاران (۱۳۹۶) بیشترین میزان جیوه مربوط به خور پتروشیمی و کم‌ترین میزان مربوط به خور دورق و سمایلی بود. در مطالعه‌ی حاضر بیشترین میزان Ni در خور درویش (۳/۵۳ ± ۱۱۹/۵۰) و پس‌ازآن در خور غنام (۳۵/۴۲±۹۶/۷۱) مشاهده شد. غلظت بالای Ni در رسوبات، اصولاً ناشی از منابع انسانی مثل تردد کشتی‌ها، قایق‌ها و نفت‌کش‌ها، نفت خام، فاضلاب‌های شهری و صنعتی است (Vieira *et al*., 2016). Mooraki و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه خود غلظت فلزات در این خور را به وجود صنایع و پتروشیمی‌های مستقر در منطقه نسبت دادند. در مطالعه پروانه و همکاران (۱۳۹۰) بیشترین میزان غلظت فلز Ni در رسوبات نیز در خور غنام یافت شد. در این مطالعه عنوان شد که با توجه به موقعیت خور غنام که در پایین دست تأسیسات صنعتی و در قسمت خروجی خوریات قرار داشته و آب آلوده مناطق بالادست را دریافت می‌کند، احتمال آلودگی بیشتری در این منطقه وجود دارد. بر اساس مقایسه میانگین غلظت Co بین ایستگاه‌های مختلف در این مطالعه، بیشترین میزان Co نیز در خور جعفری مشاهده شد. مشابه نتایج این بخش، در مطالعه Abdolahpur Monikh و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی غلظت فلزات سنگین در رسوبات و گونه‌های ماهی پلاژیک و نیز مطالعه Safahieh و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی تغییرات مکانی–زمانی غلظت فلزات در رسوبات برخی خوریات ماهشهر، بیشترین میزان عناصر Co و Cu در خور جعفری ارائه شد. خور جعفری نزدیک‌ترین خور به شهر ماهشهر، واحدهای پتروشیمی و منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی (PETZONE) است (Mooraki *et al*., 2009). علاوه بر این، بندر امام خمینی که یکی از بزرگ‌ترین بنادر ایران است در دهانه این خور واقع‌شده است؛ بنابراین خور جعفری می‌تواند انواع مختلفی از فلزات سنگین را از مناطق اطراف دریافت کند. غلظت کمتر فلزات موردمطالعه در خور سلیچ در مقایسه با سایر خورها می‌تواند به دلیل فاصله داشتن این خور از خروجی‌های پساب پتروشیمی باشد (جلالی و همکاران، ۱۳۹۴). در

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

مطالعه Hosseini و همکاران (۲۰۱۵) و نیز Nabavi و همکاران (۲۰۱۴) نتایج نشان داد که بیشترین غلظت فلزات سنگین مورد مطالعه در رسوبات ایستگاه خور موسی و کمترین غلظت آنها در رسوبات خور زنگی مشاهده شد. در این مطالعه دلیل بیشترین میزان فلزات در رسوبات خور موسی به موقعیت بندر امام خمینی، ترافیک عظیم تانکرهای نفتی، تخلیه بیش‌ازحد واحدهای پتروشیمی، فعالیت‌های کشاورزی و توسعه شهری در این منطقه توضیح داده شد. در مطالعه Hosseini و Sajadi (۲۰۱۸) در ارزیابی و مقایسه سلنیوم و سرب در رسوبات چهار خور در خلیج‌فارس نتایج نشان داد بیشترین غلظت فلزات سلنیوم و سرب در رسوبات ایستگاه‌های مختلف به‌صورت خور موسی > اروندرود > غنام > احمدی مشاهده شد.

بر اساس نتایج شاخص بار آلودگی (PLI)، بیشترین میزان بار آلودگی رسوبات ازنظر فلزات سنگین موردبررسی مربوط به خور موسی (۱/۲۰) و خور غنام (۰/۸۲) و کم‌ترین میزان مربوط به خور سلیچ (۰/۰۲) بود. بر اساس طبقه‌بندی مقادیر شاخص PLI، به‌جز خور موسی که در طبقه آلوده (PLI≥۱) قرار دارد، سایر مناطق در طبقه غیر آلوده (PLI≤۱) قرار داشتند. شرایط شیمیایی محیط رسوبات، آلاینده‌های ورودی و ویژگی‌های فیزیکی عوامل مهمی هستند که بر آلودگی فلزات سنگین در رسوبات یک منطقه تأثیر می‌گذارند (Sun *et al*., 2020). در این مطالعه نیز میزان بار آلودگی و شدت آلودگی در هر یک از خورهای ماهشهر با توجه به موقعیت مکانی و فاصله‌ی آن‌ها از مراکز آلاینده فلزات سنگین، متفاوت است. به‌عنوان‌مثال خور موسی به دلیل مجاورت با صنایع پتروشیمی (رازی، فارابی و امام)، بنادر و کشتی‌رانی، صنعت نفت و شیلات؛ خور غنام به دلیل قرار گرفتن در پایین‌دست تأسیسات صنعتی و در قسمت خروجی خوریات؛ بندر امام خمینی به دلیل مجاورت با صنایع نفت و پتروشیمی؛ خور پتروشیمی به دلیل مجاورت با واحد تولید کلر آلکالی مجتمع پتروشیمی و دریافت پساب این واحد؛ خور مجیدیه وجود تأسیسات نفتی؛ خور غزاله به دلیل قفس‌های پرورش ماهی؛ خور مجیدیه به دلیل وجود اسکله‌ی صادرات نفت در آن، باعث تفاوت درشدت و بار آلودگی در این خورها گردیده است (بابادی و همکاران، ۱۳۹۴؛ موری بازیافتی و همکاران، ۱۳۹۶؛ هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷). در مطالعه Dehghan Madiseh و همکاران (۲۰۰۹) مشابه نتایج مطالعه حاضر بیشترین میزان درجه آلودگی در خور غنام بوده است. در این مطالعه عنوان‌شده است که چون خوری شبیه غنام یک خور با وسعت کمتری است آلودگی زیادی را نشان می‌دهد، درحالی‌که خورهای بیحد، پاتیل و غزاله چون خورهای وسیعی با شاخه‌ها و انشعابات بیشتری هستند و مستقیماً به دریای آزاد متصل می‌شوند، میزان و درجه آلودگی کمتری دارند.

بر اساس نتایج حاصل از محاسبه‌ی شاخص خطر اکولوژیکی (Er_r^i)، به‌استثنای فلزات Pb، Ni و Cu که شاخص خطر اکولوژیکی (Er_r^i) ناشی از آن‌ها در ایستگاه‌های مختلف در طبقه کم‌خطر (Er_r^i<۴۰) بود، این شاخص برای عناصر Cd و Hg در ایستگاه‌های مختلف به ترتیب در محدوده طبقه خطر کم (Er_r^i<۴۰) تا طبقه خطر قابل‌توجه (۱۶۰> Er_r^i >۸۰) و طبقه خطر کم (Er_r^i<۴۰) تا طبقه خطر زیاد (Er_r^i >۱۶۰ >۳۶۰) یافت شد. مقادیر زیاد میانگین غلظت فلزات Cd و Hg در رسوبات نسبت به سایر فلزات موردبررسی، منجر به ریسک اکولوژیکی زیاد ناشی از آن‌ها در ایستگاه‌های مختلف شده است. در مطالعه Rastegari Mehr و همکاران (۲۰۲۰) مقادیر Er_r^i برای تمام فلزات موردبررسی، به‌جز Hg، در کلیه‌ی ایستگاه‌های نمونه‌برداری دارای ریسک اکولوژیکی کم (Er_r^i<۴۰) بود. در مطالعه Lahijanzadeh و همکاران (۲۰۱۹) در خور موسی در خلیج‌فارس نتایج نشان داد مقادیر Er_r^i برای Pb، Zn، Ni، As و Cr در تمام ایستگاه‌ها خطر اکولوژیکی کمی را نشان داد، درحالی‌که مقادیر Er_r^i برای Cd و Cu در برخی ایستگاه‌ها ریسک اکولوژیکی متوسط را نشان داد. عنصر Hg نیز بیشترین فاکتور ریسک الکوبوژیکی بالقوه را به‌ویژه در ایستگاه ۲ واقع در نزدیکی واحدهای پتروشیمی نشان داد. در این مطالعات عنوان شد که در بین فلزات مورد بررسی، Hg بالاترین مقدار Er_r^i را به دلیل غلظت زیاد، آلودگی شدید و فاکتور پاسخ سمیت بالای آن نشان داد. ازنظر شاخص خطر اکولوژیکی (Er_r^i) ناشی از Hg، منطقه‌ی خور موسی در طبقه خطر زیاد (Er_r^i >۱۶۰ >۳۶۰) قرار داشت. حضور میزان زیاد جیوه در این منطقه، توانایی تجمع این ماده شیمیایی در بدن موجودات آبزی، هم‌چنین سمیت بالا و اثرات ناشی از آن، منجر به بروز نگرانی‌هایی در خصوص اثرات اکولوژیکی در رسوبات این منطقه است (بابادی و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین منطقه‌ی خور موسی از نظر آبزی‌پروری و تولید فرآورده‌های شیلاتی منطقه مهمی محسوب

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

می‌شود که افراد زیادی در این محدوده به صید و پرورش آبزیان اشتغال دارند (صفاهیه و همکاران، ۱۳۹۰). بنابراین با توجه به امکان تجمع و بزرگنمایی زیستی جیوه در سطوح بالای هرم غذایی امکان انتقال مقادیر زیاد آن از طریق انوع فرآورده‌های شیلاتی به مصرف کنندگان این محصولات وجود دارد (Subhavana *et al*., 2020; Zhang *et al*., 2020; Malvandi, 2020).

اگرچه مقایسه میانگین شاخص PER بین ایستگاه‌های مختلف اختلاف معنی‌داری یافت نشد، ولی میزان این شاخص در ایستگاه خور موسی به‌مراتب از سایر ایستگاه‌ها بالاتر بود. بر اساس یافته‌های حاصل از این شاخص که مقادیر به‌دست‌آمده در محدوده ۲۶–۱۹۷/۷۶ مشاهده شد، به‌جز خور موسی که در طبقه ریسک محیط زیستی قابل‌توجه (۱۹۰<PER <۳۸۰) قرار دارد، سایر مناطق در طبقه ریسک محیط زیستی کم (PER<۹۵) قرار دارند. مشابه نتایج این بخش مطالعه حاضر که خور موسی در طبقه ریسک محیط زیستی قابل توجه (۱۹۰<PER <۳۸۰) قرار دارد، در مطالعه Rastegari Mehr و همکاران (۲۰۲۰) نیز براساس محاسبه‌ی مقادیر PER ناشی از فلزات، بیشتر درصد نمونه‌های رسوبات در خور موسی نیز در این طبقه قرار داشتند. هم‌چنین در مطالعه Dehghan Madiseh و همکاران (۲۰۰۹) در ارزیابی و تعین سطوح آلودگی برخی خو ری‌ات ماهشهر در آب‌های ساحلی خوزستان در شمال خلیج‌فارس نتایج نشان داد میزان شاخص خطر اکولوژیکی (PER) در خوریات مختلف به‌صورت غنام (۶۱۴) > احمدی (۵۳۹) > زنگی (۴۴۲) > غزاله (۴۱۷) > درویش (۳۹۶) > پاتیل (۳۷۹) > دورق (۳۲۱) > بیحد (۲۹۹) مشاهده شد و بیشترین میزان شاخص PER مربوط به خور غنام، احمدی و زنگی بود، بر اساس شاخص PER نیز تمامی خوریات در طبقه خطر اکولوژیکی قابل‌توجه تا خیلی زیاد قرار داشتند. در مطالعه Lahijanzadeh و همکاران (۲۰۱۹) بیشترین میزان شاخص PER در ایستگاه ۲ (۱۳۸۵/۴۸) با ریسک اکولوژیک بسیار بالا به دلیل نزدیکی این ایستگاه به واحدهای پتروشیمی مشاهده شد. خور موسی شاخه‌ای و جزر و مدی است، بنابراین میزان ماندآب در آن بالا است. وجود صنایع گوناگون در منطقه ازجمله صنایع پتروشیمی، بنادر و کشتیرانی، صنعت نفت، شیلات و سازه‌های دریایی و نیز پساب‌های پتروشیمی، فاضلاب شستشوی کشتی‌ها و نفت‌کش‌ها سبب ورود میزان قابل‌ملاحظه‌ای از انواع آلاینده‌های خطرناک ازجمله فلزات سنگین به این منطقه شده است (پروانه و همکاران، ۱۳۹۰).

بر اساس نتایج حاصل از محاسبه‌ی درصد نسبت Er_r^i / PER جهت تفکیک و تعیین درصد سهم نسبی هرکدام از فلزات سنگین در ریسک محیط زیستی بالقوه (PER)، ترتیب درصد سهم نسبی فلزات موردمطالعه در ریسک اکولوژیکی بالقوه در منطقه موردمطالعه به‌صورت Pb<Cu<Ni<Hg<Cd مشاهده شد. درواقع بیشترین درصد سهم نسبی فلزات سنگین موردمطالعه در ریسک اکولوژیکی بالقوه در رسوبات منطقه موردمطالعه مربوط به عناصر Cd و Hg بود که به ترتیب حدود ۷۳/۱ و ۷۰/۱۹ درصد از خطر بالقوه محیط زیستی را نشان دادند؛ بنابراین این دو عنصر باید جهت کنترل خطرات محیط زیستی بالقوه ناشی از فلزات در رسوبات این مناطق بیشتر موردتوجه و کنترل قرار گیرند. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره گردید با توجه به میانگین قابل‌توجه غلظت‌های عناصر Cd و Hg نسبت به مقادیر زمینه آن‌ها و رهنمودهای کیفیت رسوب در رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی، سهم آن‌ها در ایجاد خطرات اکولوژیکی در رسوبات این مناطق نیز افزایش می‌یابد. مشابه این نتیجه Ran و همکاران (۲۰۱۵) نیز در پژوهشی دریافتند که چون غلظت کادمیوم در محیط آبی موردمطالعه بیشتر از حد آستانه ۱/۰ mg/l افزایش‌یافته است، زیست‌توده جلبک کاهش می‌یابد.

مقایسه میانگین شاخص سمیت کل فلزات سنگین (∑TU) در بین ایستگاه‌های مختلف دارای اختلاف معنی‌داری بود و ترتیب میانگین این شاخص در ایستگاه‌های مختلف به‌صورت: خور موسی>خور درویش>خور غنام>خور احمدی>بندر امام خمینی>خور غزاله>خور زنگی>خور جعفری>خور پتروشیمی>خور مجیدیه>خور سلیچ>خور دورق مشاهده شد. درواقع بیشترین میزان شاخص ∑TU در خور موسی (۴/۳۷) و خور درویش (۴/۱۶) و کم‌ترین میزان در خور دورق (۰/۵۳) و سلیچ (۰/۶۹) مشاهده شد. بر اساس طبقه‌بندی این شاخص سمیت به‌استثنای دو خور موسی و درویش که در طبقه سمی ازنظر فلزات سنگین موردبررسی قرار دارند (∑TU >۴)، سایر مناطق در طبقه غیر سمی (∑TU <۴) مشاهده شدند. بر اساس نتایج حاصل از محاسبه‌ی درصد نسبت TU/∑TU نیز جهت تفکیک و تعیین درصد سهم نسبی هرکدام از فلزات سنگین در

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

سمیت رسوبات منطقه مطالعاتی، ترتیب درصد سهم نسبی فلزات موردمطالعه در سمیت کل به‌صورت Cu<Cd<Pb<Hg<Ni مشاهده شد. درواقع بیشترین درصد سهم نسبی فلزات سنگین موردمطالعه در سمیت رسوبات در منطقه موردمطالعه مربوط به عناصر Ni و Hg بود که به ترتیب حدود ۶۶/۴۲ و ۶۵/۷۹ درصد از سمیت کل را نشان دادند؛ بنابراین بر اساس این نتایج فلزات Ni و Hg پتانسیل و سهم قابل‌توجهی در ایجاد سمیت رسوبات خوریات ماهشهر و بندر امام خمینی دارند و درنتیجه منجر به ایجاد اثرات سمی آشکاری بر موجودات آبزی ساکن در رسوبات این مناطق می‌شوند (Saadati *et al*., 2019).

اگرچه مقایسه میانگین شاخص میزان اثرات احتمالی بیولوژیکی (mPELQ) بین ایستگاه‌های مختلف اختلاف معنی‌داری را نشان نداد، اما به‌طورکلی بیشترین میزان این شاخص در خور موسی (۰/۸۷) و خور درویش (۰/۷۸) و کم‌ترین میزان آن در خور سلیچ (۰/۱۴) و دورق (۰/۱۱) نسبت به سایر ایستگاه‌ها بود. بر اساس طبقات شاخص mPELQ، ایستگاه خور دورق در طبقه آلودگی کم با ۹ درصد احتمال سمیت بیولوژیکی ناشی از این فلزات، ایستگاه‌های خور زنگی، خور غزاله، خور جعفری، خور سلیچ، خور پتروشیمی و خور مجیدیه در طبقه‌ی آلودگی کم – متوسط با ۲۱ درصد احتمال سمیت بیولوژیکی و خور موسی، خور احمدی، خور غنام، خور درویش و بندر امام خمینی در طبقه آلودگی متوسط با ۴۹٪ احتمال سمیت بیولوژیکی ازنظر فلزات سنگین موردمطالعه قرار دارند. نتایج مطالعه Rastegari Mehr و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی شاخص mPELQ جهت ارزیابی اثرات احتمالی بیولوژیکی ترکیبی فلزات Hg، Ni، Zn، Cu، Pb و Cr در رسوبات ساحلی خور موسی نشان داد که در بخش زیادی از منطقه‌ی خور موسی، شاخص mPELQ در محدوده‌ی ۰/۵۱ تا ۱/۵۰ است و درنتیجه احتمال سمیت بیولوژیکی چنین مناطقی ۴۹ درصد است که با نتایج این بخش مطالعه حاضر که شاخص mPELQ در خور موسی در چنین محدوده‌ای است مطابقت دارد. به‌علاوه در این پژوهش اشاره گردیده است که بیشترین احتمال سمیت بیولوژیکی برای رسوبات خور موسی در قسمت شرقی منطقه پتروشیمی با میانگین مقدار mPELQ بیشتر از ۱/۵ اندازه‌گیری شده، می‌باشد.

بررسی میزان شاخص خطر اصلاح‌شده (mHQ) برای فلزات موردبررسی در ایستگاه‌های مختلف نشان داد که بر اساس میزان این شاخص برای فلز Cu در ایستگاه‌های مختلف، به‌جز خوریات موسی، غنام و درویش که در طبقه شدت آلودگی خیلی کم قرار دارند، سایر ایستگاه‌ها در طبقه شدت آلودگی ناچیز هستند. مقایسه این شاخص برای Hg در بین ایستگاه‌های مختلف نیز نشان داد که خور موسی (۹) آلوده‌ترین ایستگاه ازنظر عنصر Hg است که در طبقه آلودگی بسیار شدید قرار دارد و کم‌ترین میزان این شاخص ازنظر Hg نیز در خور درویش (۰/۷۹) و خور غزاله (۱/۳۷) مشاهده شد. ازنظر میزان mHQ برای فلز Ni در ایستگاه‌های مختلف، خوریات درویش (۵/۷۸)، غنام (۴/۶۷)، غزاله (۳/۷) و احمدی (۳/۷) با بیشترین میزان این شاخص در طبقه آلودگی بسیار شدید ازنظر Ni و خور سلیچ (۰/۸۸) با کم‌ترین میزان ازنظر شاخص mHQ برای فلز Ni در طبقه شدت آلودگی خیلی کم قرار دارد. بررسی میزان شاخص mHQ برای فلز Pb در ایستگاه‌های مختلف حاکی از آن است که تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی در طبقه شدت آلودگی ناچیز تا غیر آلوده ازنظر Pb هستند. ازنظر میزان شاخص mHQ برای فلز Cd در ایستگاه‌های مختلف، خور موسی (۱/۲۳) با بیشترین میزان در طبقه شدت آلودگی کم و سایر خوریات در طبقه شدت آلودگی خیلی کم تا ناچیز قرار دارند. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره گردید میزان شدت آلودگی و خطر ناشی از فلزات سنگین موردمطالعه در هر یک از خورهای موردمطالعه با توجه به موقعیت مکانی و فاصله‌ی آن‌ها از مراکز آلاینده فلزات سنگین، متفاوت است.

علی‌رغم اهمیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های ساحلی خلیج‌فارس ازجمله خوریات بندر ماهشهر و بندر امام خمینی در استان خوزستان، متأسفانه در حال حاضر این مناطق ساحلی با برنامه‌ریزی‌های مهم استراتژیک و آلودگی محیطی ازجمله فلزات سنگین روبه‌رو است. در این مطالعه با ارائه یک ارزیابی جامع از اثرات، سمیت و خطرات متعدد آلودگی ناشی از فلزات سنگین (Cu، Hg، Ni، Pb، Cd و Co) بر محیط خوریات بندر ماهشهر و بندر امام خمینی در خلیج‌فارس با استفاده از روش‌ها و شاخص‌های مختلف نتایج قابل‌توجهی به دست آمد. ازجمله اینکه مسئله آلودگی فلزات سنگین به‌ویژه فلزات Cd، Hg و Ni در خوریات متعدد خلیج‌فارس را نمی‌توان نادیده گرفت، چراکه نتایج مطالعه حاکی از این است که خوریات

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

بندر ماهشهر و امام خمینی به‌طورجدی توسط این فلزات آلوده است و آلودگی و درنتیجه خطرات متعدد ناشی از آن‌ها در مناطق توسعه‌یافته اقتصادی یا بسیار صنعتی مانند خور موسی، غنام، پتروشیمی و بندر امام خمینی نسبت به سایر ایستگاه‌ها جدی‌تر بوده است. علاوه بر تعیین سطوح آلودگی بالقوه ناشی از فلزات سنگین در این مناطق، شناسایی میزان سمیت، خطرات اکولوژیکی و بیولوژیکی ناشی از آن‌ها نیز می‌تواند جهت اجرای اقدامات کنترلی و مدیریتی صحیح در این مناطق مناسب باشد. به‌عنوان‌مثال بر اساس نتایج محاسبه شاخص‌ها، از دیدگاه پیشگیری و کنترل آلودگی، سمیت، خطرات اکولوژیکی و بیولوژیکی ناشی از فلزات سنگین در این مناطق، لازم است از انتقال فلزات سنگین به‌ویژه Cd، Ni و Hg ناشی از فعالیت‌های انسانی غالب در محدوده خوریات به رسوبات ساحلی خلیج‌فارس جلوگیری شود. هم‌چنین با توجه به اینکه بیشترین میزان شاخص‌ها در ایستگاه‌های بندر امام خمینی، خور درویش، غنام و به‌ویژه خور موسی مشاهده شد، باید تجزیه‌وتحلیل منابع آلودگی جهت کنترل و جلوگیری از انتشار این آلاینده‌ها و تدوین استراتژی‌های مدیریتی مؤثرتر در این مناطق انجام شود. به‌طورکلی می‌توان اذعان داشت نتایج حاصل از پژوهش حاضر، داده‌های مرجع جامع و کمی آلودگی فلزات سنگین Cu، Hg، Ni، Pb، Cd و Co و نیز میزان سمیت و خطرات متعدد ناشی از آن‌ها را در مناطق موردمطالعه فراهم می‌کند که می‌تواند به سیاست‌گذاران در برنامه‌ریزی‌های استراتژیک منطقه‌ای از منظر حفاظت از این اکوسیستم‌های ساحلی کمک کند.

منابع

آقابکی آلوقره، ص.، بطالبلوئی، ص.، امانی‌پور، ح. و گرایش، ک.، ۱۳۹۸. بررسی غلظت جیوره در رسوبات خور موسی (خوریات پتروشیمی و جعفری، بندر امام). مجله بوم‌شناسی آبزیان، دوره ۹، شماره ۳، صفحات ۱۵۳-۱۴۳.

بابادی، ص.، صفاهیه، ع.، نبوی، س. م. ب.، غانمی، ک. و رونق، م. ت.، ۱۳۹٤. ارزیابی میزان تجمع جیوه در رسوبات سطحی خور موسی (استان خوزستان، خلیج‌فارس). اقیانوس‌شناسی، سال ششم، شماره ۲۱، صفحات ۲۸-۱۹.

پروانه، م.، خیرور، ن.، نیک‌پور، ی. و نبوی، س. م. ب.، ۱۳۹۰. غلظت فلزات سنگین در ماهی کفشک گرد (*Euryglossa orientalis*) و رسوبات خور موسی در استان خوزستان. مجله علمی شیلات ایران، سال ۲۰، شماره ۲، صفحات ۲۶-۱۷.

جلالی، ک.، ابطحی، ب. و سمیعی، ک.، ۱۳۹٤. ارزیابی میزان کادمیوم در بافت‌های کبد و ماهی زمین کن دم نواری *Platycephalus indicus* و رسوبات خور موسی (شمال غرب خلیج‌فارس). مجله علوم و فنون دریایی، دوره ۱۴، شماره ۲، صفحات ۱۳۳-۱۲۳.

چراغی، م.، صفاهیه، ع.، دادالهی سهراب، ع.، غانمی، ک. و دورقی، ع. م.، ۱۳۹۲. مطالعه امکان استفاده از گیاه حرا (*Avicennia marina*) به‌عنوان پایشگر زیستی فلزات سنگین در خوریات ماهشهر. فصلنامه علوم محیطی، دوره ۱۳، شماره ۱، صفحات ۴۲-۳۳.

رستمی پایدار، ق.ا. و مرادپور، ه.، ۱۳۹۷. ارزیابی زیست‌محیطی فلزات سنگین در رسوبات ساحلی بندر امام و دیلم، شمال خلیج‌فارس، ایران. فصلنامه علمی پژوهشی زمین‌شناسی محیط‌زیست، سال ۱۲، شماره ۴۴، صفحات ۱۸-۱.

صفاهیه، ع.ر.، فرهاد، م.، نبوی، س.م.ب.، غانمی، ک.، موحدی نیا، ع.ع. و داراب‌پور، م.، ۱۳۹۰. تجمع فلزات سنگین Ni، V، Cu و Pb در رسوب و دوکفه‌ای *Crassostrea gigas* در بندر امام خمینی (ره). فصلنامه اقیانوس‌شناسی، سال دوم، شماره ۸، صفحات ۵۹-۴۹.

عظیمی، ع.، دادالهی سهراب، ع.، صفاهیه، ع. ر.، ذولقرنین، ح.، سواری، ا. و فقیری، ا.، ۱۳۹۱. مطالعه سطوح فلزات سنگین جیوه، کادمیوم، سرب و مس در رسوبات شمال غرب خلیج‌فارس – بندر امام خمینی (ره). مجله اقیانوس‌شناسی، سال سوم، شماره ۱۱، صفحات ۴۱-۳۳.

فقیری، ا.، ۱۳۸۸. پایش زیستی فلزات سنگین (جیوه، مس و سرب) در بندر امام خمینی (ره) با استفاده از صدف دوکفه‌ای (*Crassostra gigas*). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر.

کلانترهرمزی، س.، جواهری بابلی، م. و عسکری ساری، ا.، ۱۳۹۱. بررسی نقش مواد آلی در تغییرات غلظت فلزات نیکل، جیوه و کادمیوم موجود در رسوب و برگ *Avicennia marina* در سواحل بندر امام خمینی. مجله علوم و فنون دریایی، دوره ۱۱، شماره ۱، صفحات ۷۶-۶۸.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

منصوری، ف.، دانه‌کار، ا.، خراسانی، ن. ا. و اشرفی، س.، ۱۳۹٤. بررسی قابلیت تجمع فلزات سرب و نیکل در ریشه و برگ اجتماعات دست کاشت درختان حرا (*Avicennia marina*) در بندر امام. مجله محیطزیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره ۶۸، شماره ۱، صفحات ۱۲۸-۱۱۹.

منوچهری، ح.، نیکویان، ع. ر.، ولی نسب، ت. و نژاد بهادری، ف.، ۱۳۸۷. بررسی اثرات سرب و کادمیوم بر آب، رسوبات و جوامع ماکروبنتیک خور زنگی (از انشعابات خور موسی در خلیج‌فارس). مجله شیلات، دوره ۲، شماره ۲، صفحات ۲۲-۱۱.

موری بازفتی، ه.، صفاهیه، ع. ر.، نبوی، س. م. ب. و غانمی، ک.، ۱۳۹٦. ارزیابی میزان آلودگی جیوه در رسوبات بین جزر و مدی خوریات ماهشهر. محیطزیست طبیعی، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۷۰، شماره ۳، صفحات ۷۰۸-۶۹۹.

واعظی، ع. ر.، کرباسی، ع.، ولی خانی سامانی، ع.، حیدری، م.، فخرایی، م. و رحمتی، ع.، ۱۳۹۳. پهنه‌بندی، توزیع و منشأ هیدروکربن‌های نفتی کل (TPH) و آلاینده‌های فلزی در رسوبات خور ماهشهر، خلیج‌فارس. علوم و تکنولوژی محیطزیست، دوره ۱۶، شماره ویژه‌نامه، صفحات ۱۹-۱.

واعظی، ع. ر.، کرباسی، ع. ر.، فخرایی، م.، ولی‌خانی سامانی، ع. ر. و حیدری، م.، ۱۳۹۳. بررسی غلظت و منشأ آلاینده‌های فلزی در رسوبات خور موسی، خلیج‌فارس. محیط‌شناسی، دوره ۴۰، شماره ۲، صفحات ۳۶۰-۳۴۵.

هاشمی، ا.، صفاهیه، ع.ر.، سالاری علی آبادی، م. ع. و غانمی، ک.، ۱۳۹۷. پایش زیستی فلز جیوه با استفاده از پلانکتون در خور موسی. مجله پژوهش‌های جانوری (مجله زیست‌شناسی ایران)، دوره ۳۱، شماره ۳، صفحات ۲۷۲-۲۵۵.

Abdolahpur Monikh, F., Hosseini, M., Peery, S., Maryamabadi, A., Ghanemi, K., Abdi Bastami, A. and Karami, O., 2011. Heavy Metals Levels in Sediment and Ray Fish (Dasyatis bennettii) from Musa Estuary and Selech Estuary, Persian Gulf. American-Eurasian Journal of Toxicological Sciences, 3 (4): 224-227.

Abdolahpur Monikh, F., Maryamabadi, A., Savari, A. and Ghanemi, K., 2013b. Heavy metals' concentration in sediment, shrimp and two fish species from the northwest Persian Gulf. Toxicology and Industrial Health, 31(6): 554-565.

Abdolahpur Monikh, F., Safahieh, A., Savari, A. and Doraghi, A., 2013a. Heavy metal concentration in sediment, benthic, benthopelagic, and pelagic fish species from Musa Estuary (Persian Gulf). Environmental Monitoring and Assessment, 185: 215–222.

Abdollahi, S., Raoufi, Z., Faghiri, I., Savari, A., Nikpour, Y. and Mansouri, A., 2013. Contamination levels and spatial distributions of heavy metals and PAHs in surface sediment of Imam Khomeini Port, Persian Gulf, Iran. Marine Pollution Bulletin, 71(1-2): 336–345.

Ali Azadi, N., Mansouri, B., Spada, L., Sinkakarimi, M. H., Hamesadeghi, Y. and Mansouri, A., 2018. Contamination of lead (Pb) in the coastal sediments of north and south of Iran: a review study. Chemistry and Ecology, 34(9): 884-900.

Benson, N. U., Adedapo, A. E., Fred-Ahmadu, O. H., Williams, A. B., Udosen, E. D., Ayejuyo, O.O. and Olajire, A.A., 2018. New ecological risk indices for evaluating heavy metals contamination in aquatic sediment: A case study of the Gulf of Guinea. Regional Studies in Marine Science 18: 44–56.

Cheraghi, M., Espergham, O., Nooriaee, M. H. and Khodabakhshi Lakorgani, S., 2013. Assessment of oyster Crassostrea gigas as Biomonitor Agent for Some Metals (Pb and Cu) from Musa Estuary (Persian Gulf). Life Science Journal, 10: 1-7.

Das, K. K., Das, S. N. and Dhundasi, S. A., 2008. Nickel, its adverse health effects & oxidative stress. The Indian Journal of Medical Research 128(4): 412-25.

Dehghan Madiseh, S., Savari, A., Parham, H., Marammazy, J. G., Papahn, F. and Sabzalizadeh, S., 2008. Heavy metals contaminant evaluation in sediments of Khour-e-Musa cereek, northwest of Persian Gulf. Iranian Journal of Fisheries Sciences, 7(2): 137-156.

Dehghan Madiseh, S., Savary, A., Parham, H. and Sabzalizadeh, S., 2009. Determination of the level of contamination in Khuzestan coastal waters (Northern Persian Gulf) by using an ecological risk index. Environmental Monitoring and Assessment, 159(1-4): 521-30.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

Fakhri, Y., Djahed, B., Toolabi, A., Raoofi, A., Gholizadeh, A., Eslami, H., Taghavi, M., Alipour, M. R. and Mousavi Khaneghah, A., 2020. Potentially toxic elements (PTEs) in fillet tissue of common carp (*Cyprinus carpio)*: a systematic review, meta-analysis and risk assessment study. Toxin Reviews, 11-2.

Godarzi Nik, M., Shahbazi, B. and Grigoryan, K., 2012. The study of mercury pollution distribution around a chlor-alkali petrochemical complex, Bandar Imam, southern Iran. Environmental Earth Sciences, 67(5): 1485-1492.

Hankanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. Water Research, 14(8): 975-1001.

Hosseini, M. and Sajjadi, N., 2018. The comparison of selenium and lead accumulation between contaminated muddy and sandy sediments from four estuaries along the Persian Gulf: effect of grain size. Environmental Geochemistry and Health, 40: 1645–1656.

Hosseini, M., Amiri, A., Hosseinizadeh Sahafi, H., Baniamam, M. and Lakzaei, F., 2015. Distribution of heavy metals (Fe, Hg, Ni and Pb) in sediment and blue crab, Portunus pelagicus from four estuaries, Persian Gulf. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 44(7); 1035-1042.

Hosseini, M., Daryashekan, M., Kashefi, M. and AbdolahpurMonikh, F., 2014. Level of Cd, Hg, Mn and Pb in sediment and invertebrate of North Persian Gulf. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 43(4): 561-563

Islam, M. S., Ahmed, M. K. and Raknuzzaman, M., 2017. Heavy metals in the industrial sludge and their ecological risk: A case study for a developing country. Journal of Geochemical Exploration, 172: 41–9.

Lahijanzadeh, A. R., Mohammadi Rouzbahani, M., Sabzalipour, S. and Nabavi, S. M. B., 2019. Ecological risk of potentially toxic elements (PTEs) in sediments, seawater, wastewater, and benthic macroinvertebrates, Persian Gulf. Marine Pollution Bulletin, 145: 377–389.

Li, H., Chai, L., Yang, Z., Yang, W., Liao, Q., Cao, Z. and Peng, Y., 2020. Systematic assessment of health risk from metals in surface sediment of the Xiangjiang River, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(5): 1677.

Long, E. R., Ingersoll, C. G. and MacDonald, D. D., 2006. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotients: a critical review. Environmental Science & Technology, 40(6): 1726–1736.

MacDonald, D. D. and Ingersoll, C. G., 2002. A guidance manual to support the assessment of contaminated sediments in freshwater ecosystems. US Environmental Protection Agency, Great Lakes National Program Office.

MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G. and Berger, T. A., 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment qua-lity guidelines for fresh-water ecosystems. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 39(1): 20-31.

Malvandi, H., 2020. Assessing the Potential Health Risk from Mercury through consumption of the Most Popular and Preferable Fish Species, Rutilus frisii kutum, on the Northern Coast of Iran. Biological Trace Element Research.

Mehr, M. R., Keshavarzi, B., Moore, F., Fooladivanda, S., Sorooshian, A. and Biester, H., 2020. Spatial distribution, environmental risk and sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments-Northwest of Persian Gulf. Continental Shelf Research, 193, 104036.

Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M. and Stewart, L. A., 2015. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. Systematic reviews, 4(1), 1.

Mooraki, N., Sari, A. E., Soltani, M. and Valinassab, T., 2009. Spatial distribution and assemblage structure of macrobenthos in a tidal creek in relation to industrial activities. International Journal of Environmental Science and Technology, 6(4): 651-662.

Nabavi, S. M. B., Parsa, Y., Hosseini, M. and Nabavi, S. N., 2014. Heavy metals concentration in sediment from North of Persian Gulf. World Applied Sciences Journal, 29 (6): 792-795.

Niu, Y., Jiang, X., Wang, K., Xia, J., Jiao, W., Niu, Y. and Yu, H., 2019. Meta-analysis of heavy metal pollution and sources in surface sediments of Lake Taihu, China. Science of the Total Environment, 700: 134509.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

Pan, S., An, W., Li, H., Su, M., Zhang, J. and Yang, M., 2014. Cancer risk assessment on trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water of China using disability-adjusted life years. Journal of Hazardous Materials, 280C: 288-294.

Pejman, A. H., Nabi Bidhendi, G. R., Ardestani, M., Saeedi, M., Baghvand, A. and Moradi, S., 2014. Assessment of Mineralogical Composition and Heavy Metal Pollution in the Surface Sediment of North West Persian Gulf. International Journal of Environmental Research 8(4):1067-1074.

Persaud, D., Jaagumagi, R. and Hayton, A., 1993. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario.

Raeisi Sarasiab, A., Hosseini, M. and Mirsalari, Z., 2014. Mercury Distribution in Contaminated Surface Sediments from Four Estuaries, Khuzestan Shore, North Part of Persian Gulf. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 93: 522–525.

Raknuzzaman, M., Ahmed, M. K., Islam, M. S., Habibullah-Al-Mamun, M., Tokumura, M., Sekine, M. and Masunaga, S., 2016. Assessment of trace metals in surface water and sediment collected from polluted coastal areas of Bangladesh. Journal of Water Environment Technology, 14: 247–59.

Ramezani, Z., Pourmand, N., Behfar, A. and Momeni, A., 2016. Removal and recovery of mercury from chlor-alkali petrochemical wastes using γ-Fe 2 O 3 nanoparticles. Applied Petrochemical Research, 6(4): 403-411.

Ran, X., Yue, H., Fu, X., Kang, Y., Xu, S., Yang, Y. and Wu, Z., 2015. The response and detoxification strategies of three freshwater phytoplankton species, Aphanizomenon flos-aquae, Pediastrum simplex, and Synedra acus, to cadmium. Environmental Science and Pollution Research, 22(24): 19596-19606.

Rao, A. P., Joshi, K. K. and Tyagi, S., 2010. Biochemical alterations in fish tissues during mercury intoxication and revitalization during monothioles and vitamins therapy. Journal of Cell and Tissue Research, 10 (3): 2311-2318.

Saadati, M., Soleimania, M., Sadeghsabab, M. and Hemami, M. R., 2019. Bioaccumulation of heavy metals (Hg, Cd and Ni) by sentinel crab (Macrophthalmus depressus) from sediments of Mousa Bay, Persian Gulf. Ecotoxicology and Environmental Safety, 191, 109986.

Safahieh, A., Abdolahpour Monikh, F., Savari, A., Doraghi, A. and Ronagh, M. T., 2014. Spatial and seasonal variations of heavy metal concentration in sediment, Musa estuary (Persian Gulf). Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 43 (5): 849-857.

Saleem, M., Iqbal, J. and Shah, M. H., 2015. Geochemical speciation, anthropogenic contamination, risk assessment and source identification of selected metals in freshwater sediments — A case study from Mangla Lake, Pakistan. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 4: 27-36.

Shao, D., Zhan, Y., Zhou, W. and Zhu, L., 2016. Current status and temporal trend of heavy metals in farmland soil of the Yangtze River Delta Region: Field survey and meta-analysis. Environmental Pollution, 219: 329-336.

Sun, M., Wang, T., Xu, X., Zhang, L., Li, J. and Shi, Y., 2020. Ecological risk assessment of soil cadmium in China's coastal economic development zone: a meta-analysis. Ecosystem Health and Sustainability, 6(1): 1733921.

Tomilson, D. C., Wilson, D. J., Harris, C. R. and Jeffrey, D. W., 1980. Problem in assessment of heavy metals in estuaries and the formation of pollution index. Helgoland Marine Research 33(1): 566-575.

Ustaoğlu, F. and Islam, M. S., 2020. Potential toxic elements in sediment of some rivers at Giresun, Northeast Turkey: A preliminary assessment for ecotoxicological status and health risk. Ecological Indicators, 113:106237.

Vieira, L. V., Rainha, K. P., de Castro, E. V. R., Filgueiras, P. R., Carneiro, M. T. W. and Brandao, G. P., 2016. Exploratory data analysis using API gravity and V and Ni contents to determine the origins of crude oil samples from petroleum fields in the Espirito Santo Basin (Brazil). Microchemical Journal, 124: 26–30.

Yargoli, B., Azimi, A., Baghvand, A. and Abasi, F., 2009. Investigating the absorption and accumulation of cadmium in various organs of the gland products in contaminated soils. Water and Sewerage Journal, 20(4): 60-70.

Zheng, N., Wang, Q., Liang, Z. and Zheng, D., 2008. Characterization of heavy metal concentrations in the sediments of three freshwater rivers in Huludao City, Northeast China. Environmental Pollution, 154(1): 135-42.

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]

[Downloaded from jmb.ahvaz.iau.ir on 2025-08-24]