

ارزیابی شدت آلودگی و خطرات اکولوژیکی عناصر بالقوه سمی در رسوبات دریایی شمال شرقی خلیج فارس

راضیه لک*؛ دانشیار پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

علیرضا واعظی؛ استادیار پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۱

چکیده

خلیج فارس به عنوان یک بدنه آبی با تعادل اکولوژیکی حساس، از اهمیت جهانی برخوردار است. به واسطه حساسیت خلیج فارس و تاثیرات منفی و مخربی که این منطقه بواسطه صنایع آلاینده گوناگون متحمل می شود، پایش زیست محیطی این منطقه ضروری می باشد. در این مطالعه، تجزیه و تحلیل جامعی از تغییرات ژئوشیمیایی، منشا و ارزیابی خطر زیست محیطی و اکولوژیکی عناصر بالقوه سمی بر روی ۱۴۰ نمونه رسوبی برداشت شده از بستر آب های تحت حاکمیت ایران در شمال شرقی خلیج فارس ارائه شده است. نتایج نشان داد که As ، Cd و Mo در نمونه های رسوبی دارای غنی شدگی قابل توجه می باشند. عناصر $(Fe > Pb > Ni > Cr > Mn)$ در رده غنی شدگی متوسط و عناصر $(Cu > Zn > Ba > V > Co)$ در رده غنی شدگی کم قابل طبقه بندی می باشند. خطر اکولوژیکی کادمیوم در سطح متوسط و برای سایر عناصر در سطح کم ارزیابی گردید. میانگین کلی شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) در تمام ایستگاه های نمونه برداری نشان دهنده سطح کم خطر اکولوژیکی است. میانگین شاخص خطر سمیت (TRI) نشانگر رده بدون خطر سمیت می باشد. نیکل با ۵۲٪ اثر، بیشترین سهم را در شاخص خطر سمیت دارد. کروم با ۱۹٪ سهم دوم را در شاخص خطر سمیت دارد. غلظت کروم و نیکل در رسوبات عمدتاً زمین زاد است، که با همبستگی بالای آنها با آلومینیوم تأیید می شود. غنی شدگی متوسط کروم و نیکل را می توان به غلظت طبیعی بالای آنها در خاک جنوب ایران نسبت داد. با این حال، مقادیر کمتری از این عناصر نیز منشأ انسان ساخت دارند. غنی شدگی قابل توجه As و Cd در رسوبات نشان دهنده منشأ غالب انسان ساخت این عناصر است. غلظت بالای آرسنیک را می توان به انتشار فاضلاب از منابع شهری و کشاورزی در شهرهای ساحلی مجاور، وجود صنایع مختلف، میادین گاز و نفت نسبت داد. ممکن است مقداری از غلظت بالای آرسنیک از ذرات گرد و غبار نیز منشأ گرفته باشد. وجود کادمیوم در خلیج فارس را می توان به منابع مختلف انسان زاد از جمله حمل و نقل نفتکش ها و همچنین فاضلاب صنعتی کارخانه ها نسبت داد.

واژگان کلیدی آرسنیک، آلودگی، خلیج فارس، رسوب، فلزات سنگین.

مقدمه

خلیج فارس یکی از شاهرگ‌های اصلی اقتصاد بین‌المللی با بیش از ۶۰ درصد تجارت جهانی نفت است. خلیج فارس از مهمترین منابع ذخایر نفت و گاز است. وجود این ذخایر عظیم موجب توسعه فعالیتهای مربوط و وابسته به نفت شده است. اکتشاف، حفاری و استخراج، پالایش، خطوط انتقال نفت در بستر دریا، بارگیری و حمل و نقل نفت توسط تانکرهای غول پیکر و نظیر آن در مناطق ساحلی فلات قاره و همچنین توسعه مناطق ساحلی و جزایر از جمله این فعالیت‌ها می‌باشند. عوامل مذکور هر یک بالقوه منبع آلوده کننده بوده و در شرایط کنونی همواره به طرق مختلف موجب افزایش بار آلودگی منابع آب خلیج فارس یا این محیط زیست دریایی می‌گردند (A. R. Vaezi, Karbassi, & Fakhraee, 2015). اهمیت اکولوژیکی این حوضه نیمه بسته و کم عمق، آن را به یکی از قابل توجه ترین اکوسیستم‌های دریایی در جهان تبدیل کرده است (A. R. Vaezi, Karbassi, & Fakhraee, 2015). تنوع زیستی غنی و منابع شیلاتی متنوع، با وجود شوری شدید و دمای بالا، از ویژگی‌های خلیج فارس می‌باشد (Hume et al., 2013). با این حال، این منطقه به دلیل داشتن حدود دو سوم منابع نفتی جهان در معرض تهدیدات شدید آلاینده‌ها از جمله عناصر بالقوه سمی (PTEs^۱) قرار دارد (Al-Awadhi, 1999; Nadim et al., 2008; Price, 1998). عناصر بالقوه سمی آلاینده‌هایی هستند که هم در محیط‌های خشکی و هم در محیط‌های آبی یافت می‌شوند (Samani et al., 2015; A. R. Vaezi, Karbassi, Valavi, et al., 2015; Wagh et al., 2018). این عناصر به دلیل ماهیت سمی، پایدار و تجمع‌زیستی (در اکوسیستم) توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند (Bacha et al., 2017; Karbassi et al., 2014; Ranjbar Jafarabadi et al., 2018). این آلاینده‌ها می‌توانند از منابع طبیعی و انسانی وارد محیط‌زیست شوند (Akhbarizadeh et al., 2017; Bastami et al., 2017) و می‌توانند از طریق چرخه‌های مختلف بیوژئوشیمیایی به ذرات جذب شوند یا دوباره کانی‌سازی شوند (Karbassi et al., 2015; Ranjbar Jafarabadi et al., 2018). عناصر بالقوه سمی در رسوبات محیط‌های آبی انباشته می‌شوند و می‌توانند تعادل اکوسیستم‌های آبی را مختل کنند (Elsagh et al., 2021; Venugopal et al., 2009). بنابراین، رسوبات به عنوان شاخصی مناسب برای پایش آلودگی محیطی شناخته شده‌اند (Karbassi et al., 2015; Seshan et al., 2010; A. R. Vaezi et al., 2016). عناصر بالقوه سمی یکی از گروه‌های اصلی آلاینده‌های محیط‌های آبی می‌باشند که در اثر فعالیت‌های طبیعی و انسانی از جمله پساب واحدهای صنعتی، صنایع کشاورزی، سیستم حمل و نقلی، مواد حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی، فضولات انسانی و دامی و پساب ناشی از پرورش دام به محیط‌های آبی راه می‌یابند (Akhbarizadeh et al., 2017; Bastami et al., 2017). برخی از آنها در غلظت‌های بسیار پایین وجود دارند و برخی دیگر از لحاظ بیولوژیکی ضروری می‌باشند. عناصر بالقوه سمی جزء آلاینده‌های پایدار می‌باشند و از جمله آلاینده‌هایی می‌باشند که قابلیت تجزیه بیولوژیکی ندارند (Elsagh et al., 2021; Venugopal et al., 2009). در مناطق ساحلی، عناصر بالقوه سمی به طور طبیعی بوسیله رودخانه و یا فرسایش بادی و خاکی به دریا انتقال پیدا می‌کنند.

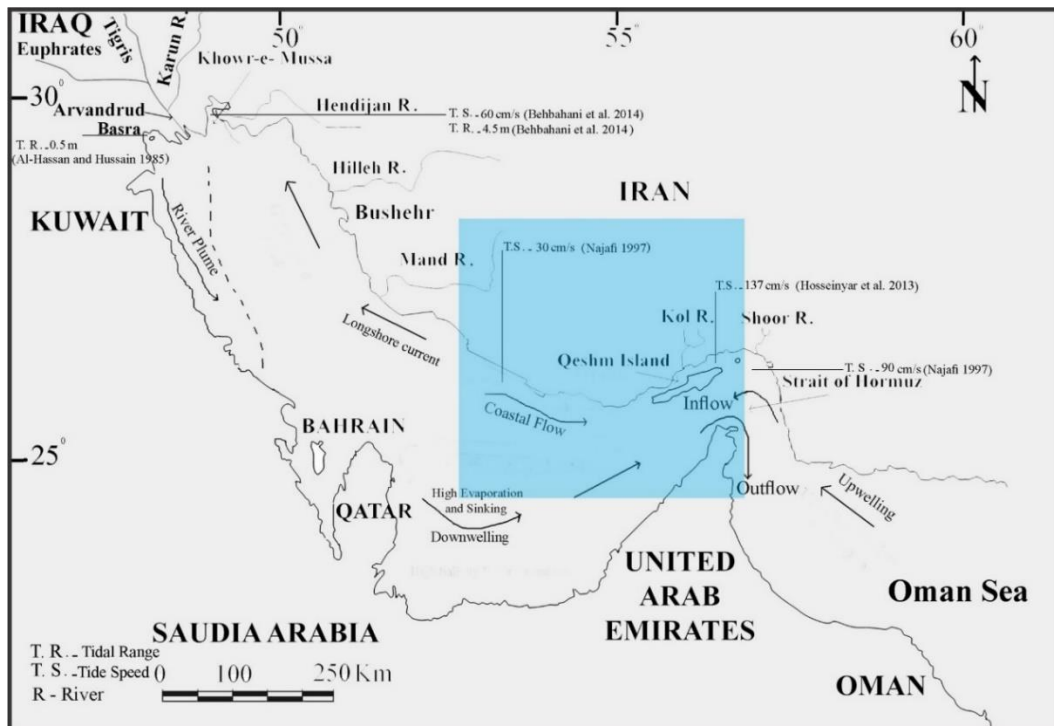
در عین حال فعالیت‌های انسانی می‌تواند عامل افزایش غلظت عناصر بالقوه سمی در محیط زیست ساحلی باشد (Samani et al., 2015; A. R. Vaezi, Karbassi, Valavi, et al., 2015; Wagh et al., 2018). عناصر بالقوه سمی دارای نیمه عمر زیستی طولانی بوده و به‌همین جهت خطری جدی برای ارگانسیم‌های آبرزی محسوب می‌گردند. ارگانسیم‌ها از نظر توانایی تنظیم عناصر وارد شده به بدن متفاوتند. اکثر آن‌ها تنها در محدوده خاصی قادر به عمل هستند و فلزات دفع نشده در بدن باقی مانده و به‌طور مداوم طی دوره زندگی، میزان آن‌ها افزوده می‌شود که این امر تجمع زیستی نامیده می‌شود. خطرات حاصله از تجمع زیستی این عناصر در سطوح بالاتر زنجیره غذایی، یکی از نگرانی‌های عمده در بحث سلامتی انسان می‌باشد. جانوران تغذیه کننده از موجودات دارای تجمع زیستی، رژیم غذایی غنی از برخی از عناصر پایدار دارند و به نوبه خود ذخیره بدنی بیشتری از آلاینده را ایجاد می‌کنند. این امر بزرگنمایی زیستی نامیده شده و ویژگی خاص آن این است که مصرف کنندگان رأس هرم شامل انسان‌ها در معرض غلظت‌های بسیار بالا از یک ماده پایدار در غذای خود قرار می‌گیرند. در نتیجه، این مواد یک پتانسیل خطر برای سلامت انسان‌ها و تهدیدی برای منابع طبیعی هستند (Bacha et al., 2017; Karbassi et al., 2014; Ranjbar Jafarabadi et al., 2018). شمال شرقی خلیج فارس در معرض منابع مختلف آلودگی به ویژه عناصر بالقوه سمی قرار دارد که خطراتی را برای سلامت انسان و اکوسیستم ایجاد می‌کند (Soltani et al., 2019). با توجه به گردش محدود آب، عمق کم، دما و شوری بالا (Kazemi et al., 2012; Pourang et al., 2005)، آلودگی محیطی و اکولوژیکی منطقه می‌تواند قابل ملاحظه باشد. آلودگی‌های ناشی از فرآیندهای صنعت نفت و گاز، کارخانه‌های پتروشیمی، نیروگاه‌ها و کارخانه‌های کشتی‌سازی از جمله منابع اولیه عناصر بالقوه سمی در این منطقه هستند (Allami et al., 2020; Neyestani et al., 2016). این صنایع ممکن است عناصر بالقوه سمی مانند Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V و Zn را از طریق تخلیه مستقیم پساب یا نشست ذرات گرد و غبار به آب‌های اطراف آزاد کنند (Saadatmand et al., 2022). علاوه بر این، ذخایر نفت خام و گاز طبیعی ممکن است حاوی عناصر بالقوه سمی مانند سرب، کادمیوم و مس باشند که می‌توانند در حین فرآیندهای حفاری، حمل و نقل و پالایش وارد اکوسیستم شوند (Akhbarizadeh et al., 2017). تخلیه پساب از تاسیسات استخراج نفت همچنین می‌تواند به آلودگی عناصر بالقوه سمی در محیط‌های دریایی مجاور بیافزاید (Lahijan-zadeh et al., 2019). رواناب کشاورزی از مزارع و تخلیه فاضلاب تصفیه نشده از مناطق پرجمعیت، از عوامل دیگر افزایش آلودگی عناصر بالقوه سمی در محیط‌های آبی منطقه هستند (Diagomanolin et al., 2004). علاوه بر این، فرآیندهای زمین‌شناسی طبیعی، از جمله فرسایش و هوازدگی سازندهای سنگی، می‌توانند منجر به انتشار عناصر بالقوه سمی در شمال شرق خلیج فارس شوند (Haghnazar et al., 2023). مطالعات بر روی تنوع ژئوشیمیایی و ارزیابی ریسک اکولوژیکی عناصر اصلی و کمیاب عمدتاً به منطقه شمال غربی خلیج فارس محدود شده است (Bastami et al., 2015; Delshab et al., 2017; El-Taher et al., 2018; Karbassi & Bayati, 2005; Sharifinia et al., 2018; A. R. Vaezi, Karbassi, & Fakhræe, 2015). این مطالعات در منطقه شمال شرق خلیج فارس عمدتاً از نظر تعداد ایستگاه‌های نمونه برداری و تعداد عناصر مورد مطالعه محدودیت داشته‌اند (Rezaei et al., 2021).

به این ترتیب، این مطالعات عمدتاً جامع نبوده و فقط درک محدودی از توزیع فضایی، میزان غنی شدگی و تجمع عناصر اصلی و کمیاب ارائه می‌دهند (Maghrebi et al., 2018; Rezaei et al., 2021). در این راستا در این مطالعه، ۱۴۰ نمونه رسوب سطحی که از اعماق مختلف آب‌های تحت حاکمیت ایران در شمال شرقی خلیج فارس به منظور ارائه یک تصویر جامع از میزان آلودگی و ریسک اکولوژیکی عناصر Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo Ni, Pb, V, Zn، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

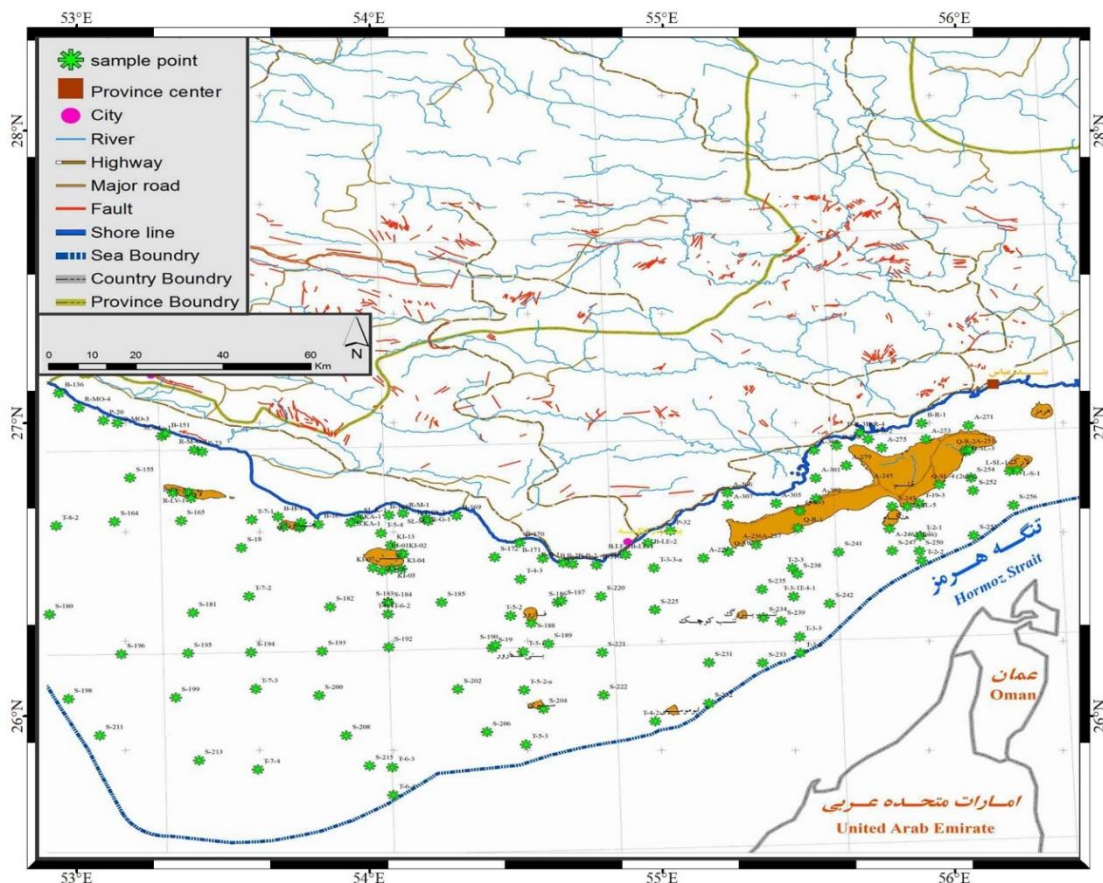
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی در این مطالعه، رسوبات آب‌های تحت حاکمیت ایران در شمال شرقی خلیج فارس می‌باشد (شکل ۱). رسوبات عهد حاضر بخش شمالی خلیج فارس، شامل نهشته‌های تخریبی رودخانه‌ای، بیوژنیک و بادی می‌باشد (Lak et al., 2009). نهشته‌های تخریبی رودخانه‌ای از رودخانه‌های سواحل شمالی تامین می‌شود (Al-Bakri & El-Sayed, 1991; W. Sugden, 1963). رسوبات بادی که عمدتاً توسط بادهای جنوب غربی که شمال نامیده می‌شود، تامین می‌شوند (Mokhtari et al., 2015). این طوفان‌های گرد و غبار مواد ریزدانه را از دشت‌های ساحلی، بیابان‌های شمالی، عراق و صحرای عربستان به خلیج فارس می‌آورد (Al-Bakri & El-Sayed, 1991; W. Sugden, 1963). در نزدیکی بندرعباس در آب‌های کم‌عمق، میانگین نرخ رسوب ۱/۰۴ میلی‌متر در سال و حداکثر میزان رسوب ۱/۲ میلی‌متر در سال است (Maghrebi et al., 2018). مطالعات انجام شده در این منطقه میانگین سطح اکسیژن محلول در کف را ۶/۵ پی پی ام در آب‌های کم عمق تا عمق ۲۵ متر و ۳/۵ پی پی ام در نواحی عمیق تر گزارش کرده‌اند (Behbahani et al., 2015; Caouette, 2020). جریان‌های جزر و مدی عامل غالب در هیدرودینامیک خلیج فارس هستند که معمولاً به موازات حوضه آبریز جریان دارند. حداکثر سرعت جریان جزر و مدی در نزدیکی تنگه هرمز حدود ۹۰ سانتی متر بر ثانیه برآورد شده است، در حالی که بخش مرکزی تنگه خوران بین بندر پل (بندرعباس) و لافت (جزیره قشم) ممکن است حداکثر سرعت جزر و مد تا ۱۳۷ سانتی متر بر ثانیه را تجربه کند (Caouette, 2020; Hosseinyar et al., 2014). ارتفاع جزر و مد در خلیج فارس از ۱ تا ۵ متر متغیر است (Caouette, 2020). اصلی ترین خشکی مرتبط به منطقه مورد مطالعه استان هرمزگان است. رودخانه‌های استان از رشته کوه‌های شرقی زاگرس سرچشمه می‌گیرند. تعداد رودخانه‌های دائمی استان بسیار اندک بوده و به دلیل عبور از گنبدهای نمکی در مسیر خود، کیفیت خویش را برای مصارف کشاورزی و آشامیدنی از دست می‌دهند. لذا اکثر رودخانه‌های استان شور و غیر قابل بهره‌برداری است. مهم‌ترین رودخانه‌های آب شور دائمی استان شامل کل، مهران، شور اول و دوم می‌باشند. رودخانه کل دارای وسیع‌ترین حوزه آبریز با مساحت ۴۰ هزار کیلومتر مربع است که جمع کننده آب تعدادی از رودخانه‌های شور، گنج، حاجی آباد و رسول است. مهم‌ترین رودخانه‌های شیرین دائمی استان شامل میناب (جعین و رودان)، گنج در حاجی آباد، جگین و گابریک در جاسک، جلابی و حسن لنگی و ماشاری در بندرعباس است. خلیج فارس یکی از معدود حوضه‌های رسوبی جهان است که امروزه در آن کانی‌های کربناته به اشکال گوناگون در حال تشکیل می‌باشد (Caouette, 2020). وجود رودخانه‌هایی مانند کل (شور) و میناب در شمال شرق خلیج فارس به دلیل داشتن اجزای آواری باعث تولید کمتر رسوبات کربناته در شمال خلیج فارس (Ghazban, 2007) نسبت به قسمت جنوبی آن می‌شود (Caouette, 2020).

رسوبات سطحی در شمال خلیج فارس حاوی میزان بالایی اجزای آلی-زیستی مانند گاستروپود، استراکود، خارپوستان و روزن داران هستند، در حالی که اجزای آواری شامل کوارتز، فلدسپات، میکا، کانی‌های رسی و قطعات سنگی هستند (Caouette, 2020).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال شرقی خلیج فارس. رژیم فعلی، سرعت جزر و مد (بر حسب سانتی متر بر ثانیه) و محدوده جزر و مد (بر حسب متر) در تصویر قابل مشاهده است. مستطیل آبی رنگ محدوده نشان داده شده در شکل ۲ می‌باشد.



شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری در شمال شرقی خلیج فارس.

برخی از منابع آلاینده انسان ساخت در محدوده مورد مطالعه

اسکله شهید باهنر: این اسکله در انتهای غرب شهر بندرعباس واقع شده است. کالاهای صادراتی این اسکله شامل گوگرد - کلینکر، مواد معدنی و قیر می‌باشد. کالاهای وارداتی و ترانزیتی شامل برنج، شکر، لوازم یدکی، پارچه و الیاف، کاغذ و مقوا، چای و روغن‌های گیاهی، لاستیک و پلاستیک، مصالح ساختمان و خودرو می‌باشد. ظرفیت اسمی این بندر در سال برای انواع کالاها ۵ میلیون تن و برای تردد مسافر یک میلیون و پانصد هزار نفر می‌باشد. آلودگی نفتی اسکله به دلایل مختلف از جمله خروج آب توازن کشتی‌ها، تصادفات و حوادث غیرمترقبه می‌باشد. در بعضی موارد نیز بشکه‌های قیر ممکن است ایجاد آلودگی نفتی در دریا نمایند. لنج‌ها و کشتی‌ها، روغن‌های سوخته خود را در حاشیه اسکله تخلیه می‌کنند. از دیگر مواردی که در داخل حوضچه تولید آلودگی می‌نمایند، رنگ آمیزی و اسکراب کشتی‌هاست. در مورد حمل مواد فله‌ای نیز بیشتر گوگرد تولید آلودگی می‌کند، زیرا علیرغم اینکه در مرحله برداشت از کشتی روی اسکله با چادر پوشانده می‌شود، باز به علت اینکه مواد پودری هستند توسط باد پراکنده می‌شوند و گاهی توسط کامیون‌هایی به انبار حمل می‌شوند که بدون روکش محافظ هستند و در هوا پخش می‌شوند.

اسکله فولاد: اسکله فولاد نیز در ضلع غربی شهر بندرعباس قرار دارد. وسعت محوطه اسکله ۳۰ هکتار می‌باشد. این اسکله شامل واردات و صادرات مواد معدنی به صورت فله‌ای می‌باشد. موادی نظیر پودر سنگ آهن، زغال سنگ، کنداله سنگ آهن و در یک مورد کلینگر نیز در این اسکله تخلیه و بارگیری می‌شوند. به طور متوسط قادر است ۶/۵ میلیون تن در سال مواد معدنی را صادر و وارد نماید. با وجود سیستم تخلیه و بارگیری مدرن اسکله فولاد ولی به علت پودری بودن مواد معدنی و حجم زیاد تخلیه و بارگیری و استهلاک دستگاهها مقادیر قابل توجهی از مواد به اطراف پراکنده شده و به طور مستقیم و غیرمستقیم وارد دریا می‌گردد.

اسکله شهید رجایی: این اسکله در غرب بندرعباس واقع شده است. صادرات و واردات مواد نفتی، مواد شیمیایی، کالاهای تجاری و بازرگانی، مصالح ساختمانی، مواد معدنی (گوگرد، سرب و روی، کرومیت، شن و ماسه، سنگ گچ و ...) قیر، ماشین آلات و خودرو از این اسکله صورت می‌گیرد. در اینجا نیز بارزترین آلودگی، آلودگی نفتی است. در مورد آب توازن در بسیاری از موارد قوانین رعایت نمی‌شود. در موقع پهلوگیری کشتی‌ها و تخلیه مواد فله‌ای به اسکله باید چادرهای برزنتی در روی اسکله پهن گردد تا مواد در اطراف پراکنده نشوند. خروجی‌های شناورها در موقع پهلوگیری باید پمپ شود و موادخروجی آنها چک گردد. رنگ آمیزی قایق‌ها و کشتی‌ها نیز یکی از منابع آلوده کننده ساحل می‌باشد.

مجتمع کشتی سازی: این مجتمع در غرب بندرعباس واقع شده است. فعالیت این مجتمع شامل ساخت و تعمیر شناورها می‌باشد. علاوه بر این اسکراب، رنگ آمیزی و صادرات قیر و مازوت نیز در این مجتمع صورت می‌گیرد. رنگ آمیزی و اسکراب باعث ورود رنگ و ضایعات بدنه شناورها به حوضچه‌های اسکله و نهایتاً دریا می‌شود. در اثر تعمیر و یا ساخت شناورها، مواد نفتی و روغن وارد دریا می‌گردد. صادرات مازوت و قیر از اسکله‌های این مجتمع نیز موجب آلوده ساختن منطقه شده است. لای حوضچه‌ها پس از لایروبی نیز به دریا وارد می‌شود که این نیز آلودگی زیادی ایجاد می‌کند.

پالایشگاه هشتم بندرعباس: این پالایشگاه در ۳۰ کیلومتری غرب شهر بندرعباس و ۶ کیلومتری سواحل خلیج فارس واقع شده است. طراحی پالایشگاه فوق بر اساس ۲۲۰ هزار بشکه نفت خام بوده که با احتساب ۱۲ هزار بشکه مایعات استحصالی پالایشگاه گاز سرخون ظرفیت نهایی پالایشگاه در مجموع به ۲۳۲ هزار بشکه در روز می‌رسد. عملیات تصفیه بصورت فیزیکی در دستگاه تقطیر فشار اتمسفری، فشار خلاء و تصفیه شیمیایی (واحد کاتالیستی) انجام می‌شود و محصولات نظیر نفت کوره، گازوئیل، نفت سفید، بنزین، گاز مایع، روغن‌های موتور بنزینی - دیزلی، لکوموتیو، روغن‌های صنعتی، قیر، آسفالت و ... تولید می‌کند. به دلیل بهره‌برداری زود هنگام از پالایشگاه و عدم راه‌اندازی برخی واحدها نظیر واحد گوگرد سازی، واحد هیدروژن و برخی واحدهای کاتالیستی، فعالیت تولیدی پالایشگاه ضمن اتلاف مقادیر زیاد انرژی و مواد قابل استحصال سبب انتشار گازهای نظیر SOX و NOX و CO2 و سایر هیدروکربورها در هوا شده و آلودگی شدید هوا و محیط را در پی داشت. تا زمانی که واحد تصفیه فاضلاب و پساب صنعتی پالایشگاه راه‌اندازی نشده بود، پساب مربوطه در استخرهای بزرگ نگهداری می‌شد که علاوه بر بوی تعفن شدید در محوطه و مناطق اطراف، باعث آلودگی شدید در محیط می‌شد. از دیگر

موارد آلاینده، تخلیه حجم عظیمی از آب برگشتی به دریا (تقریباً ۳۵۰۰ متر مکعب در ساعت) و تأثیر منفی بر اکوسیستم دریایی منطقه و محیط‌های پرورشی آبزیان و زیستگاه پرندگان می‌باشد.

نیروگاه توانیر بندرعباس: این نیروگاه در ۱۲ کیلومتری غرب بندرعباس در ساحل و در نزدیکی اسکله شهید رجایی قرار دارد. آب مصرفی نیروگاه جهت خشک کردن کندانسورها و کوره‌های واحد بخار و آب تغذیه آب شیرین کن می‌باشد که توسط پمپ از آب دریا تغذیه می‌کند و جهت تأمین آب مقطر صنعتی و آب مشروب نیروگاه استفاده می‌شود. جهت شستشوی پیش گرم کن‌ها، بویلرها و آب شیرین کن‌ها و نیز برای خنثی سازی پساب از لحاظ pH از یک سری مواد شیمیایی نظیر سود سوزآور، تری فسفات سدیم، هیدرازین، فسفات، کلر، اسید کلریدریک، اسید سولفوریک، پلی فسفات، پتاس و مواد ضد کف (گلانوپون) و نیز انعقاد کننده‌ها استفاده می‌شود. آب خروجی از خنک کردن فرایند تولید و شستشوی پیشگرم کن‌ها و بویلرها و پساب حوضچه خنثی سازی توسط دو کانال به دریا تخلیه می‌گردند. همچنین آب تغلیظ شده آب شیرین کن‌ها بعلاوه کلر تزریقی به آب ورودی سیستم و اسید سولفوریک تزریقی به آب شیرین کن‌ها و نیز نشئی آب مقطر از واحدهای بخار نیز به دریا هدایت می‌شود و در اثر حوادثی نظیر سیلاب و بارندگی شدید عمده‌تاً مقادیری از مازوت به انضمام آب حاصل از جداسازی آب از مازوت بطور مستقیم و غیر مستقیم به دریا تخلیه می‌شود. همچنین وجود روغن‌های آسکارل از مهم‌ترین مسائل زیست محیطی نیروگاه می‌باشد. آسکارل‌ها از ترکیبات سرطان زای پلی کلرینه بیفنیل (PCB) می‌باشند. این روغن‌های سوز مصنوعی به دلیل پایداری شیمیایی و خواص حرارتی ویژه در ترانسفورماتورها استفاده می‌شوند.

مجتمع آلومینیوم المهدی: این کارخانه با ظرفیت اولیه ۲۲۰۰۰۰ تن در سال در غرب بندرعباس می‌باشد مواد اولیه کارخانه اکسید آلومینیوم می‌باشد که از تصفیه سنگ بوکسیت بدست می‌آید و روش تولید بر اساس عملیات الکترولیز می‌باشد. پساب صنعتی و فاضلاب انسانی و بهداشتی این مجتمع از جمله نگرانی‌های زیست محیطی می‌باشد.

شرکت مینرال اکسپورت: این شرکت در امر صدور پودر سولفور و پودر روی و سرب و کروم فعالیت دارد که وابسته به وزارت صنایع و معادن است. انبار این شرکت، محوطه روبازی است که در جاده منتهی به اسکله شهیدرجایی واقع شده، از ابتدای جاده خروجی بندرعباس به اسکله تا محل انبار این شرکت پودر گوگرد در دو طرف جاده و سطح جاده به وضوح دیده می‌شود که دلیل آن حمل گوگرد توسط کامیونهای روباز می‌باشد. صادرات این شرکت از راه دریا و با استفاده از اسکله شماره ۳ نقاله نیروی دریایی صورت می‌گیرد. هنگام دپو، اسکله و اطراف آن به شدت آلوده می‌شود و این آلودگی به دریا منتقل می‌گردد.

خورهای بندرعباس: خور شیلات در جنوب محله نایبند و ضلع شرقی شیلات بندرعباس واقع شده که حجم عظیمی از فاضلابهای محلات و خصوصاً فاضلابهای تصفیه نشده شیلات به این خور وارد می‌شود و آنرا به شکل یک کانال فاضلاب درآورده است. منابع آلاینده این خور زباله، تفاله‌های جامدو پساب‌های خانگی و فاضلاب‌های ناشی از فعالیتهای مختلف شیلات و پسابهای دفعی صدا و سیمای بندرعباس می‌باشد. خور گور سوزان از ضلع غربی ساختمان فعلی مخابرات گذشته و پس از عبور از شاه حسینی سابق و شهید مدرس (شهناز سابق) تا محله کمربندی پیش می‌رود. فاضلابهای خانگی و زباله‌های جامد به علت فقر اقتصادی و فرهنگی و بالا بودن سطح

آب زیرزمینی و نبودن امکان حفر چاه برای دفع فاضلاب به این خور هدایت می‌شود. همچنین پساب‌های فعالیت کسبه، تعمیرکاران اتومبیل و زوائد اضافی بازار ماهی فروشان وارد این خور می‌شود. خور سورو در بخش غربی شهر بندرعباس و مقابل منازل مسکونی نیروی دریایی و محلات سورو قرار گرفته است. اکثر صیادان از این خور به منظور محافظت یا انجام تعمیرات موتور لنج‌های خود استفاده می‌کنند. منابع آلاینده این خور، پساب‌های خانگی شهرک‌های هدیش، سورو و پساب‌های شستشوی لنج‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، ۱۴۰ نمونه رسوب سطحی که از اعماق مختلف آب‌های تحت حاکمیت ایران در شمال شرقی خلیج فارس در کروژ MG-PG-2008 برداشت شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارائه یک تصویر جامع از میزان آلودگی و ریسک اکولوژیکی عناصر Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo Ni, Pb, V, Zn در این مطالعه نمونه‌های رسوب با استفاده از طیف‌سنجی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) برای تعیین غلظت عناصر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همچنین کمی‌سازی شدت آلودگی در رسوبات با استفاده از شاخص‌های شاخص تجمع زیستی (Igeo)، فاکتور تجمع (EF) و درجه آلودگی اصلاح شده (mCd) صورت گرفت. میزان خطر اکولوژیکی عناصر بالقوه سمی در نمونه‌های رسوبی بر اساس شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) و تعیین میزان خطر سمیت عناصر کمیاب بر اساس شاخص خطر سمیت بوم‌شناختی (TRI) ارزیابی گردید.

نمونه برداری

سازمان زمین‌شناسی کشور در زمستان ۱۳۸۸ مطالعه جامعی بر روی پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در شمال خلیج فارس آغاز نمود. نمونه برداری در طول گشت دریایی MG-2008-PG انجام شد که در آن ۱۴۰ نمونه سطحی از رسوبات پایینی مرز دریایی قلمرو ساحلی ایران در شمال شرقی خلیج فارس با استفاده از نمونه برداری Van Veen Grab جمع‌آوری شد (شکل ۲). در این تحقیق، برای اولین بار در شمال خلیج فارس، رسوبات سطحی به طور سیستماتیک در یک بازه زمانی مشخص نمونه برداری شد. این مطالعه تعداد قابل توجهی از ایستگاه‌های نمونه برداری را در منطقه پوشش داد و امکان تجزیه و تحلیل همزمان رسوب‌شناسی و ژئوشیمی رسوبی را فراهم کرد. با توجه به نو بودن پژوهش در زمان نمونه برداری، هماهنگی لجستیکی و اخذ مجوزهای لازم از جمله مجوزهای زیست محیطی، پیچیدگی‌هایی را ایجاد کرد. برای تسهیل مطالعه، یک کشتی تحقیقاتی ۵۵ متری مجهز به دستگاه صوتی اکو و وینچ‌های قوی برای بازیابی نمونه تهیه شد. در فرآیند نمونه برداری دقت زیادی به عمل آمد تا از آسیب دیدن صخره‌های مرجانی شمال غرب خلیج فارس جلوگیری شود. انجام این پژوهش چالش دیگری را از نظر زمان نمونه برداری طولانی ایجاد کرد. نمونه برداری تقریباً یک ماه در کشتی تحقیقاتی به طول انجامید و حدود سه ماه به صورت روزانه در آبهای ساحلی (با استفاده از قایق) ادامه یافت. نمونه برداری در بهمن ماه انجام شد که طی آن برخی از روزها شرایط جوی نامساعدی حاکم بود (Force 5) که منجر به پهلوگیری کشتی و ایجاد بیماری در بین اعضای تیم تحقیقاتی شد. بالاترین لایه رسوب، تقریباً ۱۰ سانتی متر عمق، با استفاده از نمونه بردار گرب جمع‌آوری شد.

بخش عمده ای از مطالعات رسوب شناسی در آزمایشگاه رسوب شناسی مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین شناسی واقع در کرج و مرکز ساری و مرکز بندر عباس صورت گرفت پس از انتقال رسوبات از دریا به آزمایشگاه، نمونه رسوب برداشت شده توسط گرب به چهار قسمت تقسیم گردید. یک بخش جهت آزمایشات ژئوشیمیایی، یک بخش برای آنالیز اندازه ذرات و مورفومتری و مورفوسکوپی رسوبات و تعیین پارامترهای آماری و یک بخش برای شستشو و آماده سازی برای مطالعه فرامینرها و بخشی نیز برای ذخیره سازی به انبار منتقل گردید تا در صورت لزوم تکرار آزمایشات و یا سایر کار بردها از آنها استفاده شود. بطور کلی آزمایشات شامل آنالیزهای ژئوشیمیایی، آنالیز اندازه دانه‌ها، مورفومتری و مورفوسکوپی و مطالعات میکروفسیلها می باشد. رسوباتی که توسط گرب برداشت شده است در عرشه کشتی درون کیسه نایلونهایی که روی آنها شماره نمونه با ماژیک ضد آب (water proof) نوشته شده بود خالی گردید. نمونه‌ها بمدت ۴۸ ساعت در یک محل ثابت باقی مانده است. تا آب داخل نایلون صاف گردیده و رسها ته نشین شود. سپس آب صاف بالای کیسه‌ها را توسط سوراخهایی که با سرنگ به دیواره‌های پلاستیک زده شده بود خارج گردید. پس از جمع آوری نمونه‌ها در کشتی، آنها را به دقت در یخچال‌های قابل حمل نگهداری گردیدند. نمونه‌ها برای تجزیه و تحلیل بیشتر به آزمایشگاه منتقل شدند.

آنالیز عنصری

غلظت عناصر در ۱۴۰ نمونه از رسوبات به وسیله ICP اندازه گیری شد. از هر نمونه ۰/۵ گرم وزن گردید و در ظروف تفلون قرار داده شد. سپس، ۷ میلی لیتر محلول aqua-regia (1:3 HCl:HNO₃) به هر ظرف اضافه گردید (Karbassi et al., 2008; Loring & Rantala, 1992). هضم با استفاده از هاضم میکروویو Milestone Ethos1 انجام شد و نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه تا دمای ۱۸۵ درجه سانتیگراد حرارت داده شدند و سپس به مدت ۱۵ دقیقه دیگر نیز در این دما حرارت داده شدند. سپس نمونه‌ها با آب مقطر دیونیزه شده (MQ water) تا حجم ۵۰ میلی لیتر رقیق شده و با استفاده از دستگاه ICP-MS (Agilent 7700x) در سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران از نظر عناصر اصلی و کمیاب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای اطمینان از صحت و دقت اندازه‌گیری‌ها، چندین اقدام تضمین کیفیت/کنترل کیفیت (QA/QC) اجرا شد. که شامل اجرای نمونه بلنک، داپلیکیت و نمونه استاندارد (MESS-1) بود. نتایج تجزیه و تحلیل با مقادیر پیشنهادی در استاندارد مقایسه شد و دقت بر اساس سه تجزیه و تحلیل تکراری، در محدوده $\pm 5\%$ درصد از مقادیر استاندارد بود.

کمی سازی شدت آلودگی رسوبات

در زمینه ارزیابی آلودگی، خطرات اکولوژیکی و سمیت عناصر بالقوه سمی در رسوبات، تا کنون شاخص‌های آلودگی مختلف و شاخص‌های کیفیت رسوب مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Aydın et al., 2023; Pejman et al., 2015; A. R. Vaezi, Karbassi, & Fakhraee, 2015). در این پژوهش، کمی سازی شدت آلودگی در رسوبات با استفاده از شاخص‌های زمین انباشتگی (Igeo)، عامل غنی شدگی (EF)، درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)، شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) و شاخص خطر سمیت (TRI) صورت گرفت.

شاخص زمین انباشتگی (Igeo)

یکی از قدیمی‌ترین شاخص‌های شدت آلودگی، شاخص زمین انباشتگی (Igeo) است که در سال ۱۹۶۹ تدوین شد (Müller, 1969). این شاخص بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (1)$$

در این فرمول C_n نشان دهنده میزان عنصر بالقوه سمی در رسوب است و B_n غلظت مرجع ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (Upper Continental Crust Composition: UCC) برای هر عنصر است (UCC; Taylor and McLennan, 2003).

در این رابطه برای اینکه اثرات مادری رسوب و نوسانات طبیعی محتوای ماده داده شده در محیط زیست و تغییرات کم ایجاد شده توسط فعالیت انسانی تصحیح شود از ضریب تصحیح ۱/۵ استفاده شده است. مولرشش کلاس برای شاخص زمین انباشتگی در نظر گرفت که در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱. طبقه بندی آلودگی رسوبات بر اساس شاخص زمین انباشتگی

Level of pollution	شاخص زمین انباشتگی	درجه آلودگی
practically unpolluted	کمتر از صفر	غیر آلوده
unpolluted to moderately polluted	۱-۰	غیرآلوده تا آلودگی متوسط
moderately polluted	۲-۱	آلودگی متوسط
moderately to heavily polluted	۳-۲	آلودگی متوسط تا شدید
heavily polluted	۴-۳	شدیدا آلوده
heavily to extremely polluted	۵-۴	شدیدا تا فوق العاده آلوده
extremely polluted	بزرگتر از ۵	فوق العاده آلودگی

عامل غنی شدگی

شاخص EF "Enrichment Factor" است در سال ۱۹۷۹ توسط Buat-Menard and Chesselet ارائه گردید. از عامل غنی شدگی جهت تعیین درجه غنی شدگی هر یک از فلزات سنگین مورد بررسی به تنهایی استفاده شد. فرمول محاسبه عامل غنی شدگی بشرح زیر است (Buat-Menard and Chesselet, 1979).

$$EF = \frac{[(M_C)/(M_R)]_s}{[(M_C)/(M_R)]_b} \quad (2)$$

در این فرمول M_C غلظت عناصر را نشان می‌دهد، در حالی که M_R مقدار عنصر استاندارد را نشان می‌دهد که در چارچوب این تحقیق آلومینیوم (Al) در نظر گرفته شد. به منظور کاهش تأثیر اندازه دانه ذرات رسوب بر آلودگی فلزات سنگین، داده‌های غلظت باید با استفاده از یک عنصر محافظه کار نرمال سازی شوند. آلومینیوم در فرآیند مهاجرت یک عنصر خنثی است و عمدتاً از منابع طبیعی لیتوژنیک نشأت می‌گیرد. لذا استفاده از آلومینیوم به عنوان یک عنصر استاندارد شده عمومیت دارد و به رسمیت شناخته می‌شود. نماد s نشان‌دهنده نمونه انتخاب شده است، در حالی که b نشان‌دهنده غلظت مرجع ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (Upper Continental Crust)

(Composition: UCC) برای هر عنصر است (UCC; Taylor and McLennan, 2003). برای توصیف موثر سطوح آلودگی، شش کلاس مجزا (جدول ۲) بر اساس مقادیر EF تعیین شد (Sutherland, 2000).

جدول ۲. طبقه بندی آلودگی رسوبات بر اساس عامل غنی شدگی

Level of enrichment	درجه آلودگی	عامل غنی شدگی
No enrichment	بدون غنی شدگی	کمتر از یک
Deficiency to minimal	غنی شدگی کم	۱-۲
Moderate	غنی شدگی متوسط	۲-۵
Significant	غنی شدگی قابل توجه	۵-۲۰
Very high	غنی شدگی خیلی زیاد	۲۰-۴۰
Extremely high	شدیداً غنی شدگی فوق العاده زیاد	بزرگتر از ۴۰

درجه آلودگی اصلاح شده (Modified Degree of Contaminatio)

در این مطالعه، ارزیابی آلودگی رسوبی به صورت کلی در هر ایستگاه با استفاده از درجه آلودگی اصلاح شده انجام شد (mCd; Abraham and Parker, 2008). یکی از عوامل موجود در معادله mCd فاکتور آلودگی (Cf) است که با تقسیم غلظت اندازه گیری شده بر غلظت مرجع مربوطه در ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (UCC; Taylor and McLennan, 2003) محاسبه می‌شود. این نسبت به ما اجازه می‌دهد تا سطح آلودگی نسبی را برای هر عنصر تعیین کنیم و اندازه‌های از میزان کلی آلودگی را ارائه کنیم. شاخص mCd میزان کلی آلودگی موجود در نمونه‌های رسوب را با طبقه بندی آن به هفت دسته یا طبقه مجزا، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، ارائه می‌دهد (Abraham and Parker, 2008).

$$Cf^i = \frac{C_{sample}^i}{C_{background}^i} \quad (3)$$

$$mCd = \frac{\sum_{i=1}^n C_f^i}{n}$$

(4)

جدول ۳. طبقه بندی آلودگی رسوبات بر اساس شاخص درجه آلودگی اصلاح شده

Degree of contamination	درجه آلودگی	درجه آلودگی اصلاح شده
Zero to the very low	آلودگی خیلی کم	کمتر از ۱/۵
Low	آلودگی کم	۱/۵-۲
Moderate	آلودگی متوسط	۲-۴
High	آلودگی زیاد	۴-۸
Very high	آلودگی بسیار زیاد	۸-۱۶
Extremely high	شدیدا آلوده	۱۶-۳۲
Ultra-high	آلودگی فوق العاده زیاد	بزرگتر از ۳۲

شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (Potential Ecological Risk Index)

شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) یک تخمین نسبتاً جامع برای ارزیابی سطوح آلودگی با در نظر گرفتن اثرات نامطلوب عناصر بالقوه سمی بر زیست بوم است (Mihankhah et al., 2020; Alireza Vaezi et al., 2023).

برای محاسبه RI، معادلات (۵) و (۶) به شرح زیر استفاده می‌شود (Hakanson, 1980).

$$Er^i = Tr^i \times Cf^i \quad (5)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n Er^i$$

(6)

در معادلات داده شده، از فاکتور آلودگی (Cf^i) برای نشان دادن غلظت اندازه گیری شده هر عنصر نسبت به غلظت پس زمینه مربوطه استفاده می‌شود (Liang et al., 2015). ضریب سمیت (Tr^i) اختصاص داده شده به هر عنصر بالقوه سمی، مضر بودن نسبی آن را تعیین می‌کند (Weissmannová et al., 2019). به طور خاص، As، Cd، Cr، Cu، Ni، Pb و Zn به ترتیب دارای ضرایب ۳۰، ۱۰، ۵، ۵، ۲ و ۱ هستند (Briki et al., 2017; Alireza Vaezi et al., 2023). خطر اکولوژیکی نسبت داده شده به هر عنصر بالقوه سمی با Er^i نشان داده می‌شود. مجموع Er^i در هر ایستگاه میزان پتانسیل خطر اکولوژیکی ناشی از وجود عناصر بالقوه سمی را در آن ایستگاه نشان می‌دهد. جدول ۴ طبقه بندی مقادیر Er^i به پنج دسته و همچنین RI را به چهار دسته جداگانه را نشان می‌دهد (Hakanson, 1980).

جدول ۴. طبقه بندی آلودگی رسوبات بر اساس شاخص‌های Eri و RI

ریسک اکولوژیکی	RI	Pollution	آلودگی	Er^i
کم	کوچکتر از ۱۵۰	Low	کم	کوچکتر از ۴۰
متوسط	۱۵۰-۳۰۰	Moderate	متوسط	۴۰-۸۰
زیاد	۳۰۰-۶۰۰	High	زیاد	۸۰-۱۶۰
بسیار زیاد	بزرگتر از ۶۰۰	Serious	شدید	۱۶۰-۳۲۰
		Severe	بسیار شدید	بزرگتر از ۳۲۰

شاخص خطر سمیت (Toxic Risk Index)

شاخص خطر سمیت (TRI) یک ابزار ارزیابی یکپارچه است که برای ارزیابی خطر سمیت عناصر بالقوه سمی در رسوبات استفاده می‌شود (Aydın et al., 2023; Zhang et al., 2016). TRI بر اساس دستورالعمل‌های کیفیت رسوب (SQGs)، به‌ویژه سطح اثر آستانه (TEL) و سطح اثر احتمالی (PEL) برای تعیین اثرات سمیت عناصر بالقوه سمی بر رسوب استفاده می‌شود (Aydın et al., 2023; Ustaoğlu). برای تعیین خطرات سمیت یکپارچه عناصر بالقوه سمی در رسوبات، از معادلات (۷) - (۸) به روش زیر استفاده می‌شود. محاسبه شاخص خطر سمیت برای یک عنصر به عنوان TRI^i نشان داده می‌شود، در حالی که Ci نشان دهنده غلظت عنصر بالقوه سمی خاص در نمونه رسوب است. تعداد کل عناصر بالقوه سمی با n نشان داده می‌شود. شاخص خطر سمیت با TRI نشان

داده می‌شود که شاخص‌های خطر سمیت تمام عناصر بالقوه سمی موجود در رسوب را در نظر می‌گیرد. مقادیر TRI در پنج دسته طبقه بندی می‌شوند که در جدول ۵ نشان داده شده است (Kükreer et al., 2019).

$$TRI^i = \sqrt{\frac{(\frac{C_i}{TEL})^2 + (\frac{C_i}{PEL})^2}{2}} \quad (7)$$

$$TRI = \sum_{i=1}^n TRI^i \quad (8)$$

جدول ۵. طبقه بندی آلودگی رسوبات بر اساس شاخص TRI

Toxic Risk	خطر سمیت	TRI
No toxic risk	بدون خطر سمیت	کوچکتر از ۵
Low	کم	۵-۱۰
Moderate	متوسط	۱۰-۱۵
Considerable	قابل ملاحظه	۱۵-۲۰
Very high	بسیار زیاد	بزرگتر از ۲۰

تجزیه و تحلیل خوشه‌ای

تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA) یک تکنیک آماری پرکاربرد برای تشخیص خوشه‌هایی از عناصر است که الگوهای مشابهی را نشان می‌دهند. آنالیز خوشه‌ای یک روش آماری است که به وسیله آن گروه‌هایی از عناصر که رفتاری مشابه دارند یا خوشه‌هایی که ارتباط قابل ملاحظه‌ای با هم دارند را می‌توان مشخص کرد. نتایج آنالیز خوشه‌ای به شکل دندوگرام نمایش داده می‌شود (Ebraheim et al., 2021; Marefat et al., 2023; Reyment & Davis, 1988; Taghinia Hejabi et al., 2011). به منظور تجزیه و تحلیل ارتباط عناصر با هم می‌بایست نتایج به صورت دندوگرام رسم و ضرایب مشابه عناصر و ارتباط آن‌ها با هم مشخص گردد که بدین منظور در این پژوهش، از نرم افزار بسته آماری چند متغیره 3.1 MVSP برای ارزیابی سطح شباهت بین عناصر مختلف و اندازه ذرات استفاده گردید (Alireza Vaezi & Lak, 2023). این نرم افزار گزینه‌های هم وزن را به هم متصل می‌کند تا خوشه‌های بزرگتر ایجاد شود و تشابهات مابین نمونه‌ها را سنجش و ارزیابی نماید. از روش گروه زوج وزنی (Reyment and Davis, 1988; Taghinia Hejabi et al., 2011) و ضریب همبستگی پیرسون (Alireza Vaezi & Lak, 2023) به دلیل شهرت تثبیت شده آن‌ها در شناسایی موثر خوشه‌ها استفاده گردید (Reyment & Davis, 1988; Sharmad et al., 2012; A. R. Vaezi et al., 2016).

یافته های پژوهش و بحث

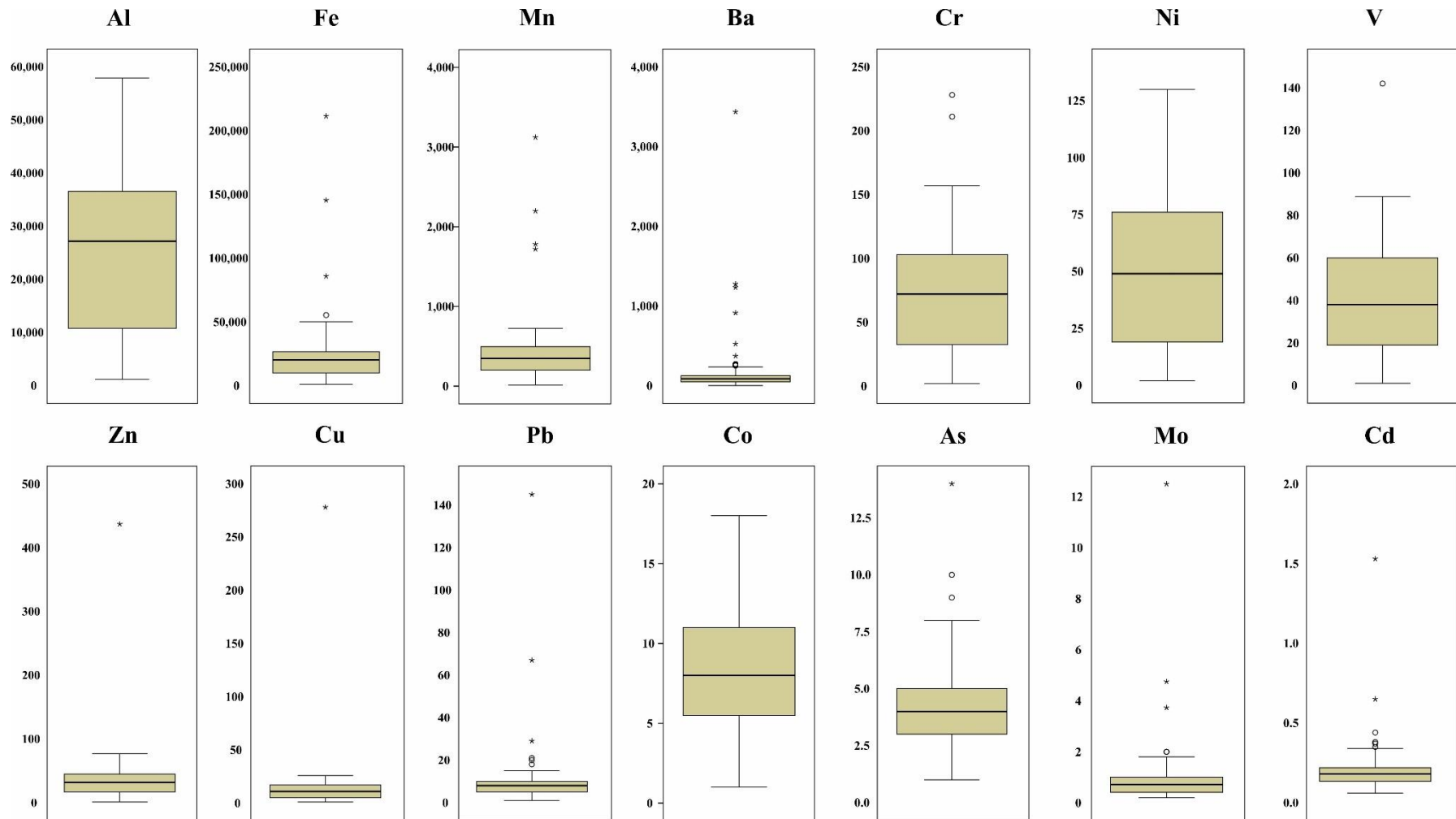
تجزیه و تحلیل عنصری

بررسی آماری تغییرات عناصر اصلی و کمیاب در کنار میزان غلظت مرجع مربوطه در ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی (UCC; Taylor and McLennan, 2003) و رسوبات شیل (Turekian & Wedepohl, 1961) در جدول ۶ ارائه گردیده است. عناصر اصلی و کمیاب موجود در رسوبات به ترتیب نزولی به صورت زیر رتبه بندی شدند:

در بین عناصر مورد مطالعه، غلظت آلومینیوم (Al) بیشترین است، اما میانگین غلظت Al در رسوبات دریایی منطقه مورد مطالعه (میانگین ۲/۵٪)، به طور قابل توجهی از میانگین غلظت این عنصر در پوسته قاره‌ای بالایی و شیل کمتر است. تفاوت قابل توجهی بین میانگین غلظت Ba در رسوبات سطحی منطقه مورد مطالعه و مقادیر میانگین غلظت Ba در پوسته قاره‌ای بالایی (UCC) وجود دارد (Ba بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر است). ضریب تغییرات (CV، coefficient of variation) نسبت انحراف معیار به میانگین است. هر چه ضریب تغییرات بیشتر باشد، سطح پراکندگی حول میانگین بیشتر است. این ضریب به طور کلی به صورت درصد بیان می‌شود. این عناصر Al، Fe، Zn، Cu، Pb و Mo دارای C.V بیش از ۱۰۰٪ بودند. که نشان دهنده تغییرات قابل توجه در غلظت این عناصر است. کمترین ضریب تغییرات متعلق به کلسیم است که نشان دهنده تغییرات کمتر در غلظت کلسیم در منطقه مورد مطالعه است. نمودار جعبه‌ای تغییرات غلظت عناصر اصلی و کمیاب در سراسر رسوبات سطحی منطقه شمال شرقی خلیج فارس در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۶. بررسی آماری تغییرات عناصر اصلی و کمیاب رسوبات سطحی شمال شرق خلیج فارس، در کنار میزان غلظت مرجع مربوطه در ترکیب پوسته قاره‌ای بالایی و رسوبات شیل.

	Min	Max	Mean	SD	C.V. (%)	UCC	Shale
Al (%)	0.11	5.79	2.52	1.59	63	8.04	8.0
Fe (%)	0.09	21.14	2.18	2.30	106	3.50	4.7
Mn (mg/kg)	13	3122	387	374	97	600	850
Ba (mg/kg)	2	3436	142	327	230	550	580
Cr (mg/kg)	2	228	70	45	65	85	90
Ni (mg/kg)	2	130	50	34	68	50	68
V (mg/kg)	1	142	41	26	64	110	90
Zn (mg/kg)	1	437	34	39	115	71	95
Cu (mg/kg)	1	278	13	24	178	25	45
Pb (mg/kg)	1	145	9	14	146	16	20
Co (mg/kg)	1	18	8	4	53	17	19
As (mg/kg)	1	14	4	2	54	2	13
Mo (mg/kg)	0.2	12.5	0.9	1	138	1.5	2.6
Cd (mg/kg)	0.06	1.53	0.20	0.15	75	0.10	0.30



شکل ۳. نمودار جعبه‌ای تغییرات غلظت عناصر اصلی و کمیاب در سراسر رسوبات سطحی منطقه شمال شرقی خلیج فارس.

ارزیابی شدت آلودگی رسوبات

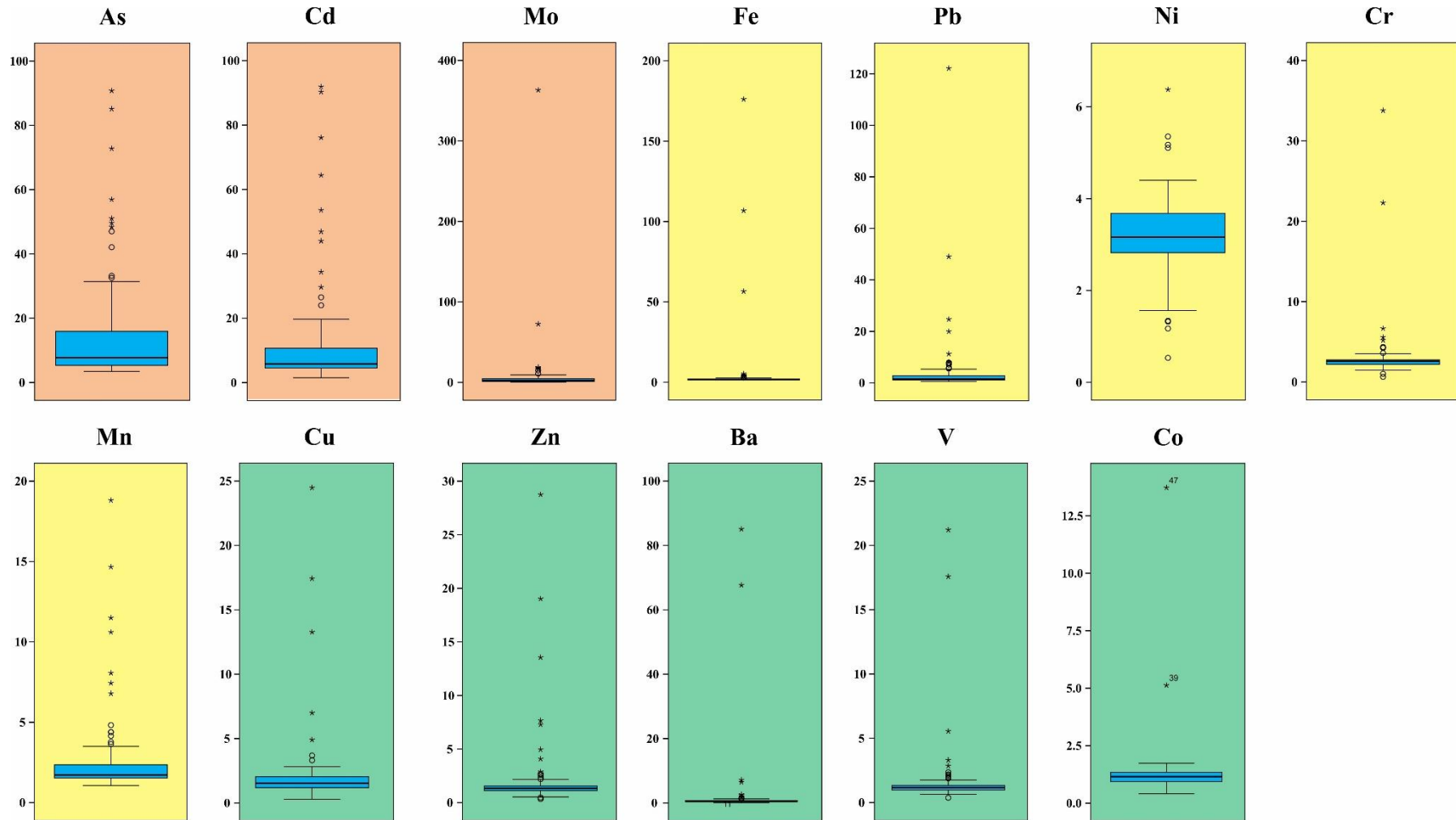
شاخص زمین انباشتگی (Igeo)

برای ارزیابی شدت آلودگی، شاخص زمین انباشتگی (Igeo) برای عناصر اصلی و کمیاب در رسوبات محاسبه شد (جدول ۷). شاخص Igeo نشان داد که As، و Cd در رده غیرآلوده تا آلودگی متوسط (unpolluted to moderately polluted) قرار گرفتند. سایر عناصر طبق شاخص Igeo در دسته غیر آلوده (practically unpolluted) طبقه بندی شدند. جدول ۷. بررسی آماری تغییرات عناصر اصلی و کمیاب، ارزیابی شدت آلودگی بر اساس شاخص زمین انباشتگی (Igeo)، عامل غنی شدگی (EF) و فاکتور آلودگی (CF)

	As	Cd	Ni	Cr	Mo	Fe	Pb	Mn	Co	Cu	Zn	V	Ba
Igeo	0.7	0.3	-1.2	-1.4	-1.7	-1.8	-1.8	-1.8	-2.0	-2.1	-2.3	-2.5	-3.5
EF	14.6	11.4	3.2	3.0	7.5	4.3	3.7	2.4	1.5	2.0	1.9	1.5	1.8
CF	2.7	2.1	1.0	0.8	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3

عامل غنی شدگی (EF)

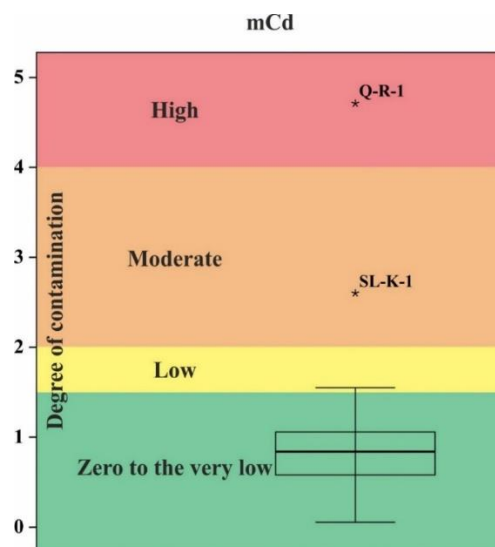
برای ارزیابی شدت آلودگی عناصر در رسوبات، عامل غنی شدگی (EF) عناصر اصلی و کمیاب در رسوبات محاسبه شد و نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است. همچنین شکل ۴ نمودارهای جعبه‌ای عامل غنی شدگی (EF) را برای عناصر مختلف موجود در نمونه‌های رسوبات دریایی نشان می‌دهد. عناصر ($As > Cd > Mo$) در رده غنی شدگی قابل توجه (Significant) قرار می‌گیرند. عناصر ($Fe > Pb > Ni > Cr > Mn$) در رده غنی شدگی متوسط (Moderate) و عناصر ($Cu > Zn > Ba >$) در رده غنی شدگی کم (Deficiency to minimal) قابل طبقه‌بندی می‌باشند. نمونه‌های رسوب جمع‌آوری شده از شمال شرقی خلیج فارس غلظت‌های کمتری از Fe، Ba، V، Zn، Pb و Cu را در مقایسه با مقادیر متناظر خود در پوسته قاره‌ای فوقانی (UCC) نشان می‌دهند. علاوه بر این، مقادیر EF آنها کمتر از ۱/۵ است، که نشان می‌دهد این عناصر عمدتاً از منابع زمین زاد منشا گرفته‌اند.



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای که عامل غنی‌شدگی (EF) را برای عناصر مختلف موجود در نمونه‌های رسوب دریایی نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر میانگین عامل غنی‌شدگی، عناصر (As > Cd > Mo) در رده غنی‌شدگی قابل توجه (Significant) با پس‌زمینه نارنجی رنگ، عناصر (Fe > Pb > Ni > Cr > Mn) در رده غنی‌شدگی متوسط (Moderate) با پس‌زمینه زرد رنگ، عناصر (Cu > Zn > Ba > V > Co) در رده غنی‌شدگی کم (Deficiency to minimal) با پس‌زمینه سبز رنگ، طبقه‌بندی شده‌اند.

درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)

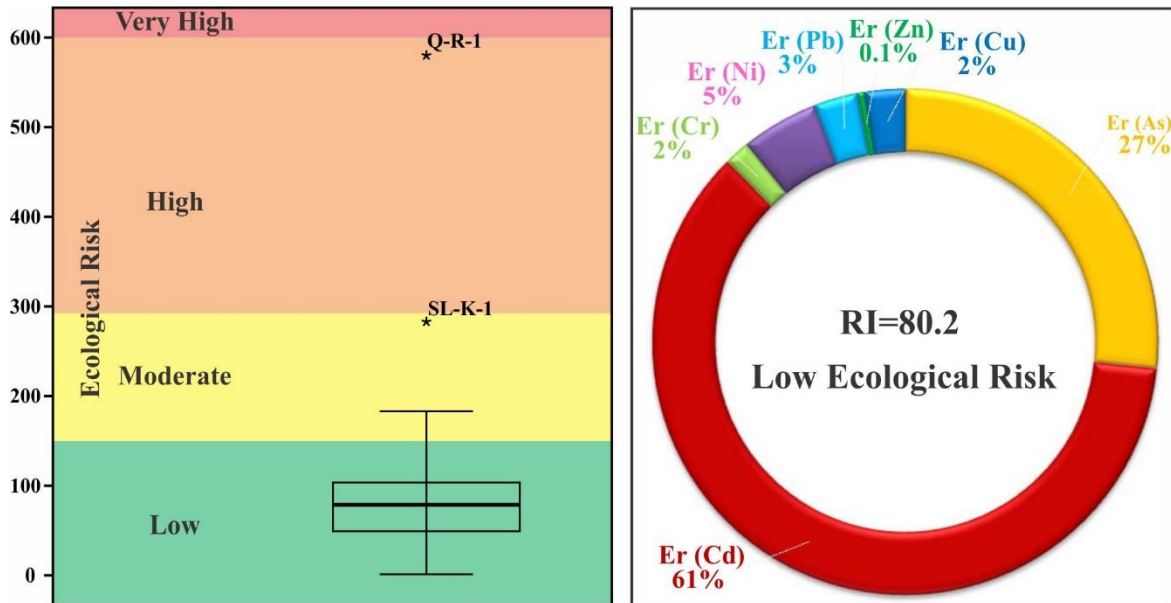
بر اساس نتایج، ایستگاه‌های Q-R-1 و SL-K-1 به ترتیب با رده آلودگی زیاد (High) و آلودگی متوسط (Moderate) دارای بالاترین مقادیر درجه آلودگی اصلاح شده (mCd) هستند (شکل ۵). ایستگاه S-195 نیز با مقدار مرزی ۱/۵۵ دارای آلودگی کم (Low) می‌باشد. مقادیر mCd برای سایر ایستگاه‌ها زیر ۱/۵ بود، که بر مبنای طبقه‌بندی توسعه‌یافته توسط Hakanson (1980) سطح آلودگی خیلی کم (Zero to the very low) را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد این سطوح آلودگی پایین با یافته‌های سایر مطالعات در منطقه مطابقت دارد (Mirza et al., 2019, 2014). به عنوان مثال، در بررسی وضعیت زیست محیطی تنگه‌های خوران در شمال شرقی خلیج فارس، وضعیت کلی رسوبات در این منطقه غیرآلوده تا کمی آلوده طبقه بندی گردید (Mirza et al., 2019).



شکل ۵. نمودار جعبه‌ای درجه آلودگی اصلاح شده (mCd) در رسوبات سطحی شمال شرقی خلیج فارس.

شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI)

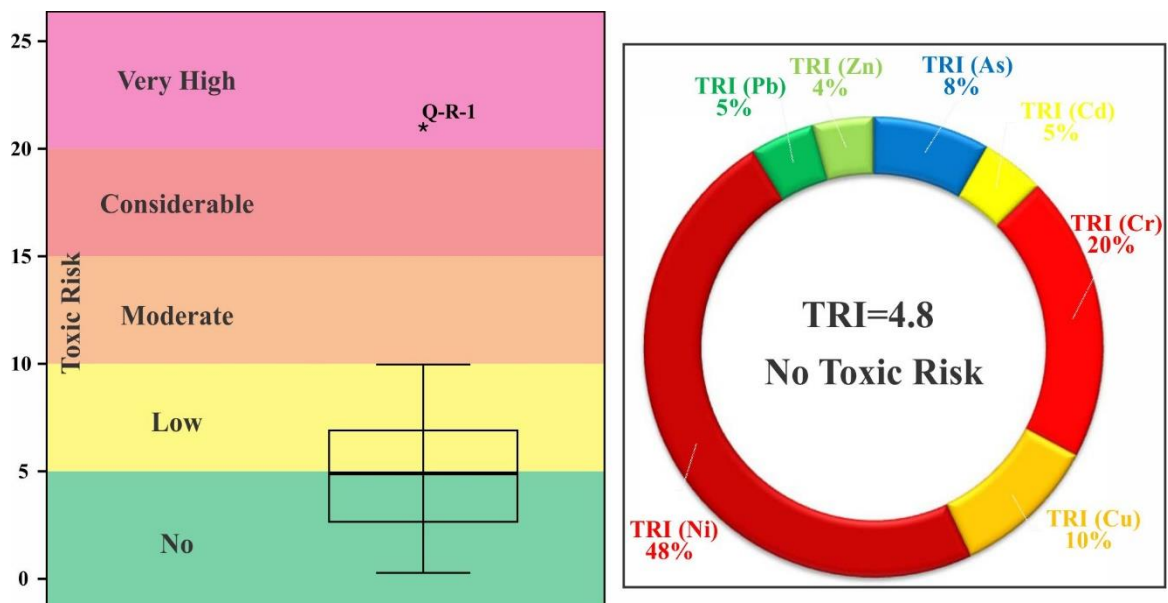
شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) یک تخمین نسبتاً جامع برای ارزیابی سطوح آلودگی با در نظر گرفتن اثرات نامطلوب عناصر بالقوه سمی بر زیست بوم است (Mihankhah et al., 2020; Alireza Vaezi et al., 2023). رسوبات سطحی با غلظت بالای عناصر بالقوه سمی خطرات قابل توجهی برای اکوسیستم‌های دریایی و سلامت موجودات زنده در ایجاد می‌کند (Briki et al., 2017; Liang et al., 2015). خطر اکولوژیکی نسبت داده شده به هر عنصر بالقوه سمی (Er^i) در رسوبات سطحی شمال شرقی خلیج فارس نشان دهنده ترتیب کاهشی خطر اکولوژیکی $Cd > As > Ni > Pb > Cu > Cr > Zn$ است. میانگین Er برای کادمیوم ۶۲/۴ بدست آمد. بر این اساس خطر اکولوژیکی کادمیوم در سطح متوسط (Moderate) ارزیابی گردید. میانگین Er برای سایر عناصر کمتر از عدد ۴۰ بدست آمد که نشان دهنده سطح کم (Low) خطر اکولوژیکی است. میانگین کلی شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) در تمام ایستگاه‌های نمونه برداری ۸۰/۲ بود که نشان دهنده سطح کم (Low) خطر اکولوژیکی است. کادمیوم بیشترین اثر را در شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) داشت که ۶۱٪ از عدد کل شاخص را تشکیل داد. آرسنیک، عنصر تاثیر گذار بعدی با سهم ۲۷٪ در تشکیل شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی است (شکل ۶).



شکل ۶. پیل سمت راست سهم عناصر بالقوه سمی در شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی در رسوبات سطحی شمال شرقی خلیج فارس. پیل سمت چپ نمودار جعبه‌ای شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) در رسوبات سطحی شمال شرقی خلیج فارس.

شاخص خطر سمیت (TRI)

شاخص خطر سمیت (TRI) یک ابزار ارزیابی یکپارچه است که برای ارزیابی خطر سمیت عناصر بالقوه سمی در رسوبات استفاده می‌شود (Aydın et al., 2023; Zhang et al., 2016). خطر سمیت نسبت داده شده به هر عنصر بالقوه سمی (TRI) در رسوبات سطحی شمال شرقی خلیج فارس نشان دهنده ترتیب کاهشی خطر سمیت $Ni > Cr > Cu > As > Cd$ است. همانطور که در شکل ۷ نیکل با ۵۲٪ اثر، بیشترین سهم را در شاخص خطر سمیت (TRI) دارد. کروم با ۱۹٪ سهم دوم را در شاخص خطر سمیت دارد.



شکل ۷. سهم عناصر بالقوه سمی شاخص خطر سمیت (TRI) در رسوبات سطحی شمال شرقی خلیج فارس. نمودار جعبه‌ای شاخص خطر سمیت (TRI) در رسوبات سطحی شمال شرقی خلیج فارس.

تقریباً نیمی از ایستگاه‌های نمونه‌برداری دارای شاخص خطر سمیت (TRI) با مقادیر کوچکتر از ۵ هستند که نمایانگر رده بدون خطر سمیت (No toxic risk) است (شکل ۷). نیم دیگر ایستگاه‌های نمونه‌برداری دارای شاخص خطر سمیت (TRI) با مقادیر بین ۵ تا ۱۰ هستند که نمایانگر رده خطر سمیت کم (Low) است. در مجموع میانگین شاخص خطر سمیت (TRI) ۴/۸ است که نشانگر رده بدون خطر سمیت (No toxic risk) می‌باشد.

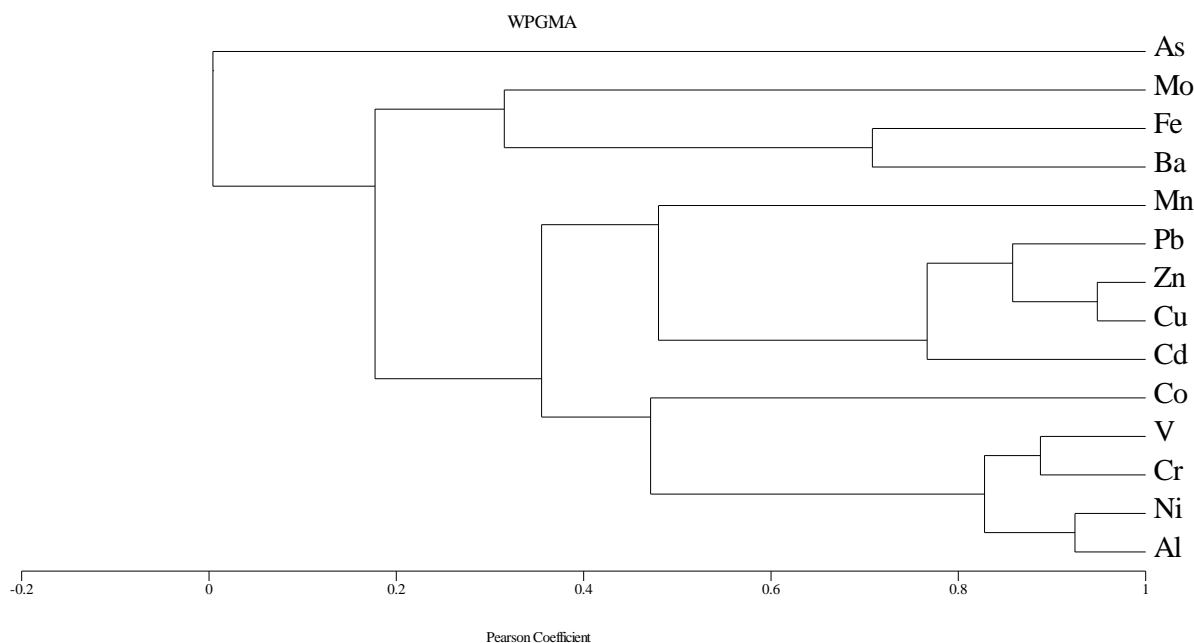
تحلیل‌های آماری و تحلیل منشأ عناصر

همانطور که در شکل ۸ ارائه شده است، بیشترین ضرایب همبستگی بین $Zn-Cu$ (0.95)، $Co-V$ (0.93)، $Al-Ni$ (0.92)، $Co-Ni$ (0.91)، $Cr-V$ (0.89)، $Zn-Pb$ (0.88)، $Al-Co$ (0.86)، $Zn-Cd$ (0.86)، $Pb-Cd$ (0.85)، $Cu-Cd$ (0.85)، $Al-Cr$ (0.84)، $V-Ni$ (0.83)، $Pb-Cd$ (0.82)، $Al-V$ (0.82) مشاهده شد.

دندوگرام ارائه شده در شکل ۹ اطلاعات دقیقی در مورد شباهت‌های بین خوشه‌ها در اختیار ما قرار داد و ما را قادر ساخت تا داده‌ها را بهتر تفسیر کنیم. تجزیه و تحلیل UPGMA از دندروگرام چندین خوشه قابل توجه با همبستگی قوی را نشان داد: $(A) Al-Ni-Cr-V$; $(B) Cd-Cu-Zn-Pb$; $(C) Ba-Fe$. همبستگی قابل توجه بین آلومینیوم، نیکل، کروم و وانادیوم (Al ، V ، Cr ، Ni) نشان دهنده منشأ زمین زاد این عناصر است. وجود Al در این خوشه به عنوان شاخص منشأ آواری برای رسوبات عمل می‌کند. مشابه نتایج پژوهش حاضر، بر اساس تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، منشأ مشترکی برای آلودگی عناصر Ni ، Zn ، Co ، Cu ، Fe ، Cr و Al در رسوبات ساحلی استان هرمزگان واقع در شمال خلیج فارس شناسایی شد (Jahromi et al., 2021). غنی‌شدگی بسیار کم این عناصر نشان داد که غلظت این عناصر کمتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است (Jahromi et al., 2021). به طور مشابه، یک همبستگی مثبت قوی بین Ni ، Co ، Fe ، Cr و Al در رسوبات بندر عسلویه که یکی از بنادر تجاری اصلی کشور است مشاهده شد (Delshab et al., 2017). علاوه بر این، مطالعه روی تنگه خوران در شمال شرقی خلیج فارس همبستگی بالایی را بین Ni ، Zn ، Cu ، Fe ، Cr و Al نشان داد (Mirza et al., 2019). منشأ زمین زاد این عناصر عمدتاً ناشی از فرسایش کنار رودخانه‌ای، هوازدگی و بارش جوی است (Mirza et al., 2019). نیکل و کروم در رسوبات شمال شرقی خلیج فارس دارای غنی‌شدگی متوسط (Moderate) هستند. غلظت کروم، نیکل در رسوبات این منطقه عمدتاً زمین زاد است، که با همبستگی بالای آنها با آلومینیوم تأیید می‌شود. علاوه بر این، غلظت‌های کمتر این عناصر در رسوبات اطراف جزایر را می‌توان به مقدار نسبتاً کمتر ورودی رسوبات آواری نسبت داد. این نتایج بیانگر این واقعیت است که منشأ این عناصر خاص در رسوبات خلیج فارس عمدتاً ماهیت زمین زاد دارد. غنی‌شدگی متوسط کروم و نیکل را می‌توان به غلظت طبیعی بالای آنها در خاک جنوب ایران نسبت داد (Abbasi et al., 2019; Jahromi et al., 2021). با این حال، مقادیر کمتری از این عناصر نیز وجود دارند که منشأ انسان ساخت دارند (Vaezi and Lak, 2023; Vaezi et al., 2015a; Zarezadeh et al., 2017). آلیاژهای با نیکل بالا (Jahromi et al., 2021) در فرآیندهای مختلف صنعتی، از جمله پالایش نفت (Jumbe & Nandini, 2009) نیز می‌توانند به غلظت نیکل در رسوبات منطقه مورد مطالعه افزوده باشند.

	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Mn	Ni	Pb	V	Zn
Al	1.00													
As	0.17	1.00												
Ba	0.05	0.32	1.00											
Cd	0.19	0.13	0.32	1.00										
Co	0.86	0.26	0.09	0.03	1.00									
Cr	0.84	0.30	0.35	0.25	0.79	1.00								
Cu	0.29	0.05	0.01	0.85	0.14	0.19	1.00							
Fe	0.28	0.41	0.71	0.30	0.24	0.47	0.18	1.00						
Mo	-0.06	0.41	0.16	0.61	-0.15	-0.02	0.29	0.48	1.00					
Mn	0.54	0.20	0.26	0.53	0.23	0.47	0.51	0.32	0.20	1.00				
Ni	0.92	0.19	-0.02	0.07	0.91	0.82	0.20	0.24	-0.08	0.37	1.00			
Pb	0.16	0.60	0.31	0.82	0.08	0.20	0.85	0.54	0.43	0.50	0.03	1.00		
V	0.82	0.41	0.46	0.35	0.93	0.89	0.28	0.62	0.09	0.47	0.83	0.33	1.00	
Zn	0.47	0.18	0.14	0.86	0.26	0.39	0.95	0.36	0.33	0.59	0.38	0.88	0.49	1.00

شکل ۸. نمودار ماتریس مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین عناصر اصلی و کمیاب رسوبات سطحی شمال شرق خلیج فارس. سبز پررنگ نشان دهنده یک همبستگی مثبت قوی است.



شکل ۹. دندروگرام الگوهای خوشه بندی عناصر اصلی و کمیاب را در رسوبات سطحی شمال شرق خلیج فارس نشان می‌دهد.

نتایج هیچ رابطه معناداری را بین As و سایر عناصر در رسوبات شمال شرقی خلیج فارس نشان نداد. منابع آرسنیک هم فعالیت‌های انسانی و هم فرآیندهای طبیعی مانند هوازدگی سنگ‌ها و خاک را شامل می‌شود (Jahromi et al., 2021; Varol and Sünbül, 2018). غنی‌شدگی قابل توجه (Significant) As و Cd در رسوبات شمال شرقی خلیج فارس نشان دهنده منشأ غالب انسان ساخت این عناصر است. علاوه بر این همانطور که پیشتر اشاره گردید، As و Cd در مقایسه با سایر عناصر بالقوه سمی، در شمال شرق خلیج فارس دارای خطر اکولوژیکی بالاتری هستند. مطالعه‌ای که در نوامبر ۲۰۱۷ انجام شد، ارزیابی منشأ و خطر اکولوژیکی

عناصر بالقوه سمی در رسوبات ساحلی استان هرمزگان در شمال خلیج فارس نشان دهنده غنی شدگی قابل توجه (Significant) عناصر Ni، Mn، Cr، Cd و As بود (Jahromi et al., 2021). در این پژوهش، بر اساس تجزیه و تحلیل آماری پیشنهاد گردید که آلودگی As ممکن است با منابع انسانی مرتبط باشد. این غلظت‌های بالا را می‌توان به انتشار فاضلاب از منابع شهری و کشاورزی در شهرهای ساحلی مجاور، وجود صنایع مختلف، میادین گاز و نفت نسبت داد (Jahromi et al., 2021; Varol and Sünbül, 2018). مطالعات قبلی مقادیر بالایی از آرسنیک را در ذرات گرد و غبار در ایران ثبت کرده‌اند (Dahmardeh Behrooz et al., 2021; Alireza Vaezi et al., 2023). بنابراین، ممکن است مقداری از غلظت بالای آرسنیک از ذرات گرد و غبار نیز منشاء گرفته باشد.

مس، روی، سرب و کادمیوم نیز ضریب همبستگی نسبتاً بالایی را نشان دادند که نشان دهنده یک منشاء مشترک است. وجود کادمیوم در خلیج فارس را می‌توان به منابع مختلف انسان زاد نسبت داد (Mirza et al., 2019; Yavar Ashayeri & Keshavarzi, 2019). این منابع شامل حمل و نقل نفتکش‌ها و همچنین فاضلاب صنعتی کارخانه‌ها است. علاوه بر این، انتشار آلاینده‌ها از موتور کشتی‌ها و قایق‌ها (Yavar Ashayeri & Keshavarzi, 2019)، رواناب زمین‌های کشاورزی، رنگدانه‌ها و انتشار پساب‌های شهری و خانگی نیز می‌تواند سبب افزایش غلظت کادمیوم در منطقه باشد (Mirza et al., 2019). جالب توجه است که Ba و Cd دارای ضریب همبستگی نسبتاً بالایی هستند که نشان دهنده منابع مشترک احتمالی برای این عناصر است. از طریق تحلیل رگرسیون خطی چندگانه مشخص شد که تقریباً ۶۱/۳۵ درصد از غلظت عناصر بالقوه سمی در رسوبات ساحلی استان هرمزگان از منابع زمین زاد منشأ گرفته‌اند (Jahromi et al., 2021). علاوه بر این، آلاینده‌های با منشأ انسانی، مانند فاضلاب‌های شهری و کشاورزی، موتور قایق‌ها، استخراج نفت خام و عبور تانکرهای نفتی، و پساب‌های صنعتی (به‌ویژه صنایع پتروشیمی)، تا ۱۸/۷۶ درصد سهم از غلظت عناصر بالقوه سمی دارند (Delshab et al., 2017; Jahromi et al., 2021). در این پژوهش ۱۲/۷۹ درصد از غلظت عناصر بالقوه سمی در رسوبات ساحلی استان هرمزگان به زباله سوزها، دودکش‌های صنعتی و مشعل‌ها نسبت داده شد، در حالی که ۷/۱۱ درصد مربوط به سایر منابع آلودگی در منطقه ارزیابی گردید (Jahromi et al., 2021).

جمع بندی

خلیج فارس بدون تردید یکی از مهمترین و حساسترین اکوسیستم‌های جهان است که با توجه به تحولات و دگرگونی‌های عمیق و جاری در عرصه مناسبات بین‌المللی، در قرن ۲۱ مورد توجه بیشتر قرار گرفته است. برنامه‌های توسعه ای، عدم شناخت کافی از وضعیت زمین شناسی بستر دریا، منابع عظیم نفت، مسائل زیست محیطی و آلودگی عناصر بالقوه سمی در سواحل خلیج فارس نیاز روزافزون به مطالعات زمین شناسی دریایی در این پهنه آبی را روشن می‌سازد.

As، Cd و Mo در نمونه‌های رسوبی غنی شدگی قابل توجه را نشان دادند. عناصر (Fe > Pb > Ni > Cr > Mn) در رده غنی شدگی متوسط و عناصر (Cu > Zn > Ba > V > Co) در رده غنی شدگی کم قابل طبقه‌بندی می‌باشند. نمونه‌های رسوبی غلظت‌های کمتری از Fe، Ba، V، Zn، Pb و Cu را در مقایسه با مقادیر متناظر خود در پوسته قاره‌ای فوقانی نشان دادند. علاوه بر این، مقادیر عامل غنی شدگی (EF) در آنها کمتر از ۱/۵ است، که نشان می‌دهد این عناصر عمدتاً از منابع زمین زاد منشأ گرفته‌اند. مقادیر درجه آلودگی اصلاح شده (mCd) برای تقریباً تمامی ایستگاه‌ها سطح آلودگی خیلی کم را نشان داد.

خطر اکولوژیکی نسبت داده شده به هر عنصر بالقوه سمی در رسوبات سطحی شمال شرقی خلیج فارس نشان دهنده ترتیب کاهشی خطر اکولوژیکی $Cd > As > Ni > Pb > Cu > Cr > Zn$ است. خطر اکولوژیکی کادمیوم در سطح متوسط و برای سایر عناصر در سطح کم خطر اکولوژیکی ارزیابی گردید. میانگین کلی شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی (RI) در تمام ایستگاه‌های نمونه برداری نشان دهنده سطح کم خطر اکولوژیکی است. کادمیوم بیشترین اثر را در شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی داشت که ۶۱٪ از عدد کل شاخص را تشکیل داد. آرسنیک، عنصر تاثیر گذار بعدی با سهم ۲۷٪ در تشکیل شاخص پتانسیل خطر اکولوژیکی است. میانگین شاخص خطر سمیت (TRI) نشانگر رده بدون خطر سمیت می‌باشد. نیکل با ۵۲٪ اثر، بیشترین سهم را در شاخص خطر سمیت دارد. کروم با ۱۹٪ سهم دوم را در شاخص خطر سمیت دارد.

غنی‌شدگی قابل توجه Cd و As در رسوبات شمال شرقی خلیج فارس نشان دهنده منشأ غالب انسان ساخت این عناصر است. علاوه بر این As و Cd در مقایسه با سایر عناصر بالقوه سمی، در شمال شرق خلیج فارس دارای خطر اکولوژیکی بالاتری هستند. این غلظت بالای آرسنیک را می‌توان به انتشار فاضلاب از منابع شهری و کشاورزی در شهرهای ساحلی مجاور، وجود صنایع مختلف، میداین گاز و نفت نسبت داد. ممکن است مقداری از غلظت بالای آرسنیک از ذرات گرد و غبار نیز منشأ گرفته باشد. وجود کادمیوم در خلیج فارس را می‌توان به منابع مختلف انسان زاد از جمله حمل و نقل نفتکش‌ها و همچنین فاضلاب صنعتی کارخانه‌ها نسبت داد.

همبستگی قابل توجه بین آلومینیوم، نیکل، کروم و وانادیوم (V, Cr, Ni, Al) نشان دهنده منشأ زمین زاد این عناصر است. وجود Al در این خوشه به عنوان شاخص منشأ آواری برای رسوبات عمل می‌کند. منشأ زمین زاد این عناصر عمدتاً ناشی از فرسایش کنار رودخانه‌ای، هوازدگی و بارش جوی است. این نتایج بیانگر این واقعیت است که منشأ این عناصر خاص در رسوبات خلیج فارس عمدتاً ماهیت زمین زاد دارد. غنی‌شدگی متوسط کروم و نیکل را می‌توان به غلظت طبیعی بالای آنها در خاک جنوب ایران نسبت داد. با این حال، مقادیر کمتری از این عناصر نیز منشأ انسان ساخت دارند. آلیاژهای با نیکل بالا در فرآیندهای مختلف صنعتی، از جمله پالایش نفت نیز می‌توانند به غلظت نیکل در رسوبات منطقه مورد افزوده باشند.

منابع

- Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Shojaei, N., Sorooshian, A., Soltani, N., & Delshab, H. (2019). Geochemistry and environmental effects of potentially toxic elements, polycyclic aromatic hydrocarbons and microplastics in coastal sediments of the Persian Gulf. *Environmental Earth Sciences*, 78(15). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8420-z>
- Abraham, G. M. S., & Parker, R. J. (2008). Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1–3). <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9678-2>
- Agah, H., Leermakers, M., Elskens, M., Fatemi, S. M. R., & Baeyens, W. (2009). Accumulation of trace metals in the muscle and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf. *Environmental Monitoring and Assessment*, 157(1–4). <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0551-8>
- Akhbarizadeh, R., Moore, F., Keshavarzi, B., & Moeinpour, A. (2017). Microplastics and potentially toxic elements in coastal sediments of Iran's main oil terminal (Khark Island). *Environmental Pollution*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.038>
- Al-Awadhi, F. M. A. (1999). The Year of the Ocean and its crucial importance to the Gulf. *Desalination*, 123(2–3). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00066-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00066-1)
- Al-Bakri, D., & El-Sayed, M. (1991). Mineralogy and provenance of the clastic deposits of the modern intertidal environment of the northern Arabian Gulf. *Marine Geology*, 97(1–2). [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(91\)90022-V](https://doi.org/10.1016/0025-3227(91)90022-V)
- Allami, H., Afzali, A., & Mirzaei, R. (2020). Determination and investigation of heavy metal concentrations in sediments of the Persian Gulf coasts and evaluation of their potential environmental risk. *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal*, 3(4). <https://doi.org/10.24200/amecj.v3.i04.122>
- Aydın, H., Tepe, Y., & Ustaoglu, F. (2023). A holistic approach to the eco-geochemical risk assessment of trace elements in the estuarine sediments of the Southeastern Black Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114732>
- Bacha, M. E., Nedjimi, B., Ararem, A., & Beladel, B. (2017). Seasonal variation of selected trace elements in rare endemic species Thuriferous Juniper growing in the Aurès Mountains of Algeria. *Journal of Forestry Research*, 28(2). <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0320-4>
- Bastami, K. D., Afkhami, M., Mohammadzadeh, M., Ehsanpour, M., Chambari, S., Aghaei, S., Esmaeilzadeh, M., Neyestani, M. R., Lagzaee, F., & Baniamam, M. (2015). Bioaccumulation and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments and mullet *Liza klunzingeri* in the northern part of the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 94(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.01.019>
- Bastami, K. D., Neyestani, M. R., Esmaeilzadeh, M., Haghparast, S., Alavi, C., Fathi, S., Nourbakhsh, S., Shirzadi, E. A., & Parhizgar, R. (2017). Geochemical speciation, bioavailability and source identification of selected metals in surface sediments of the Southern Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 114(2). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.025>
- Behbahani, R., Hosseinyar, G., & Lak, R. (2015). The controlling parameters on organic matter preservation within the bottom sediments of the northern part of the Persian Gulf. *Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie - Abhandlungen*, 276(3). <https://doi.org/10.1127/njgpa/2015/0485>
- Briki, M., Zhu, Y., Gao, Y., Shao, M., Ding, H., & Ji, H. (2017). Distribution and health risk assessment to heavy metals near smelting and mining areas of Hezhang, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6153-6>
- Buat-Menard, P., & Chesselet, R. (1979). Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 42(3). [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(79\)90049-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(79)90049-9)

- Caouette, C. (2020). *The Persian Gulf:: Oceanography and Wildlife*. Nova Science Publishers. <https://books.google.com/books?id=VdyozQEACAAJ>
- Dahmardeh Behrooz, R., Kaskaoutis, D. G., Grivas, G., & Mihalopoulos, N. (2021). Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran. *Chemosphere*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127835>
- Delshab, H., Farshchi, P., & Keshavarzi, B. (2017). Geochemical distribution, fractionation and contamination assessment of heavy metals in marine sediments of the Asaluyeh port, Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.033>
- Diagomanolin, V., Farhang, M., Ghazi-Khansari, M., & Jafarzadeh, N. (2004). Heavy metals (Ni, Cr, Cu) in the Karoon waterway river, Iran. *Toxicology Letters*, 151(1). <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2004.02.018>
- Ebraheim, G., Karbassi, A., & Mehrdadi, N. (2021). The thermodynamic stability, potential toxicity, and speciation of metals and metalloids in Tehran runoff, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(11). <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00966-3>
- El-TaHER, A., Alshahri, F., & Elsaman, R. (2018). Environmental impacts of heavy metals, rare earth elements and natural radionuclides in marine sediment from Ras Tanura, Saudi Arabia along the Arabian Gulf. *Applied Radiation and Isotopes*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.11.022>
- Elsagh, A., Jalilian, H., & Ghaderi Aslshabestari, M. (2021). Evaluation of heavy metal pollution in coastal sediments of Bandar Abbas, the Persian Gulf, Iran: Mercury pollution and environmental geochemical indices. *Marine Pollution Bulletin*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112314>
- Ghazban, F. (2007). *Petroleum Geology of Persian Gulf*. Tehran University and National Iranian Oil Company.
- Haghnazar, H., Sabbagh, K., Johannesson, K. H., Pourakbar, M., & Aghayani, E. (2023). Phytoremediation capability of *Typha latifolia* L. to uptake sediment toxic elements in the largest coastal wetland of the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114699>
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Research*, 14(8). [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Hosseinyar, G., Moussavi-Harami, R., & Behbahani, R. (2014). Shallow gas accumulations and seepage in the sediments of the Northeast Persian Gulf. *Acta Geophysica*, 62(6). <https://doi.org/10.2478/s11600-014-0236-3>
- Hume, B., D'Angelo, C., Burt, J., Baker, A. C., Riegl, B., & Wiedenmann, J. (2013). Corals from the Persian/Arabian Gulf as models for thermotolerant reef-builders: Prevalence of clade C3 Symbiodinium, host fluorescence and ex situ temperature tolerance. *Marine Pollution Bulletin*, 72(2). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.032>
- Jahromi, F. A., Keshavarzi, B., Moore, F., Abbasi, S., Busquets, R., Hooda, P. S., & Jaafarzadeh, N. (2021). Source and risk assessment of heavy metals and microplastics in bivalves and coastal sediments of the Northern Persian Gulf, Hormogzan Province. *Environmental Research*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110963>
- Jumbe, A. S., & Nandini, N. (2009). Impact assessment of heavy metals pollution of Vartur lake, Bangalore. *Journal of Applied and Natural Science*, 1(1). <https://doi.org/10.31018/jans.v1i1.35>
- Karbassi, A. R., & Bayati, G. R. N.-B. I. (2005). ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY OF HEAVY METALS IN A SEDIMENT CORE OFF BUSHEHR, PERSIAN GULF. In *Journal of Environmental Health Science & Engineering* (Vol. 2, Issue 4).
- Karbassi, A. R., Fakhraee, M., Heidari, M., Vaezi, A. R., & Valikhani Samani, A. R. (2015). Dissolved and particulate trace metal geochemistry during mixing of Karganrud River with Caspian Sea water. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(4). <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1267-4>
- Karbassi, A. R., Heidari, M., Vaezi, A. R., Samani, A. R. V., Fakhraee, M., & Heidari, F. (2014). Effect of pH and salinity on flocculation process of heavy metals during mixing of Aras River water with Caspian Sea water. *Environmental Earth Sciences*, 72(2). <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2965-z>
- Karbassi, A. R., Monavari, S. M., Nabi Bidhendi, G. R., Nouri, J., & Nematpour, K. (2008). Metal

- pollution assessment of sediment and water in the Shur River. *Environmental Monitoring and Assessment*, 147(1–3). <https://doi.org/10.1007/s10661-007-0102-8>
- Kükrer, S., Çakır, Ç., Kaya, H., & Erginal, A. E. (2019). Historical record of metals in Lake Küçükçekmece and Lake Terkos (Istanbul, Turkey) based on anthropogenic impacts and ecological risk assessment. *Environmental Forensics*, 20(4). <https://doi.org/10.1080/15275922.2019.1657985>
- Lahijan-zadeh, A. R., Rouzbahani, M. M., Sabzalipour, S., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.030>
- Liang, A., Wang, Y., Guo, H., Bo, L., Zhang, S., & Bai, Y. (2015). Assessment of pollution and identification of sources of heavy metals in the sediments of Changshou Lake in a branch of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(20). <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4825-8>
- Loring, D. H., & Rantala, R. T. T. (1992). Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth Science Reviews*, 32(4). [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(92\)90001-A](https://doi.org/10.1016/0012-8252(92)90001-A)
- Maghrebi, M., Karbassi, A., Lak, R., Noori, R., & Sadrinassab, M. (2018). Temporal metal concentration in coastal sediment at the north region of Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.017>
- Marefat, A., Ghaderi, A., & Karbassi, A. (2023). Natural and electro-flocculation of Cr, Cd, Co, and Ni during estuarine mixing. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6). <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04863-3>
- Mihankhah, T., Saeedi, M., & Karbassi, A. (2020). A comparative study of elemental pollution and health risk assessment in urban dust of different land-uses in Tehran's urban area. *Chemosphere*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124984>
- Mirza, R., Moeinaddini, M., Pourebrahim, S., & Zahed, M. A. (2019). Contamination, ecological risk and source identification of metals by multivariate analysis in surface sediments of the khouran Straits, the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.028>
- Mirza, R., Mohammadi, M., Faghiri, I., Abedi, E., Fakhri, A., Azimi, A., & Zahed, M. A. (2014). Source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment samples from the northern part of the Persian Gulf, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3935-y>
- Mokhtari, S., Hosseini, S. M., Danehkar, A., Azad, M. T., Kadlec, J., Jolma, A., & Naimi, B. (2015). Inferring spatial distribution of oil spill risks from proxies: Case study in the north of the Persian Gulf. *Ocean and Coastal Management*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.08.017>
- Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geology Journal*, 2.
- Nadim, F., Bagtzoglou, A. C., & Iranmahboob, J. (2008). Coastal management in the Persian Gulf region within the framework of the ROPME programme of action. *Ocean and Coastal Management*, 51(7). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2008.04.007>
- Neyestani, M. R., Bastami, K. D., Esmailzadeh, M., Shemirani, F., Khazaali, A., Molamohyeddin, N., Afkhami, M., Nourbakhsh, S., Dehghani, M., Aghaei, S., & Firouzbakht, M. (2016). Geochemical speciation and ecological risk assessment of selected metals in the surface sediments of the northern Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 109(1). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.024>
- Pejman, A., Nabi Bidhendi, G., Ardestani, M., Saeedi, M., & Baghvand, A. (2015). A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study. *Ecological Indicators*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.012>
- Price, A. R. G. (1998). Impact of the 1991 Gulf War on the coastal environment and ecosystems: Current status and future prospects. *Environment International*, 24(1–2). [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(97\)00124-4](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(97)00124-4)
- Ranjbar Jafarabadi, A., Riyahi Bakhtiari, A., Spanò, N., & Cappello, T. (2018). First report of geochemical fractionation distribution, bioavailability and risk assessment of potentially toxic

- inorganic elements in sediments of coral reef Islands of the Persian Gulf, Iran. *Marine Pollution Bulletin*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.052>
- Reyment, R. A., & Davis, J. C. (1988). *Statistics and Data Analysis in Geology*. *Biometrics*, 44(3). <https://doi.org/10.2307/2531613>
- Rezaei, M., Mehdinia, A., Saleh, A., Modabberi, S., & Mansouri Daneshvar, M. R. (2021). Environmental assessment of heavy metal concentration and pollution in the Persian Gulf. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2). <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00913-8>
- Saadatmand, M., Dadolahi-Sohrab, A., Tavani, M. B., Khazaei, S. H., & Saadatmand, F. (2022). Monitoring heavy metal contamination on the Iranian coasts of the Persian Gulf using biological indicators: risk assessment for the consumers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09755-6>
- Samani, A. R. V., Karbassi, A. R., Fakhraee, M., Heidari, M., Vaezi, A. R., & Valikhani, Z. (2015). Effect of dissolved organic carbon and salinity on flocculation process of heavy metals during mixing of the Navrud River water with Caspian Seawater. *Desalination and Water Treatment*, 55(4). <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.920730>
- Seshan, B. R. R., Natesan, U., & Deepthi, K. (2010). Geochemical and statistical approach for evaluation of heavy metal pollution in core sediments in southeast coast of India. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7(2). <https://doi.org/10.1007/BF03326139>
- Sharifinia, M., Taherizadeh, M., Namin, J. I., & Kamrani, E. (2018). Ecological risk assessment of trace metals in the surface sediments of the Persian Gulf and Gulf of Oman: Evidence from subtropical estuaries of the Iranian coastal waters. *Chemosphere*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.077>
- Sharmad, T., Nabi Bidhendi, G. R., Karbassi, A. R., Moatar, F., & Adabi, M. H. (2012). Historical changes in distribution and partitioning of natural and anthropogenic shares of heavy metals in sediment core from the southern Caspian Sea. *Environmental Earth Sciences*, 67(3). <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1540-3>
- Soltani, N., Moore, F., Keshavarzi, B., Sorooshian, A., & Javid, R. (2019). Potentially toxic elements (PTEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fish and prawn in the Persian Gulf, Iran. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.005>
- Sutherland, R. A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39(6). <https://doi.org/10.1007/s002540050473>
- Taghinia Hejabi, A., Basavarajappa, H. T., Karbassi, A. R., & Monavari, S. M. (2011). Heavy metal pollution in water and sediments in the Kabini River, Karnataka, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 182(1–4). <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1854-0>
- Taylor, S. R., & McLennan, S. M. (2003). Chemical Composition and Element Distribution in the Earth's Crust. In *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00097-1>
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Bulletin of the Geological Society of America*, 72(2). [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:DOTAIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTAIS]2.0.CO;2)
- Vaezi, A., Karbassi, A., Fakhraee, M., Samani, A. V., & Heidari, M. (2014). Assessment of sources and concentration of metal contaminants in marine sediments of Musa Estuary, Persian Gulf. *Journal of Environmental Studies*, 40(2).
- Vaezi, A. R., Karbassi, A. R., & Fakhraee, M. (2015). Assessing the trace metal pollution in the sediments of Mahshahr Bay, Persian Gulf, via a novel pollution index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4833-7>
- Vaezi, A. R., Karbassi, A. R., Habibzadeh, S. K., Heidari, M., & Samani, A. R. V. (2016). Heavy metal contamination and risk assessment in the riverine sediment. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 45(8).
- Vaezi, A. R., Karbassi, A. R., Valavi, S., & Ganjali, M. R. (2015). Ecological risk assessment of metals contamination in the sediment of the Bamdezh wetland, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(3). <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0710-0>
- Vaezi, Alireza, & Lak, R. (2023). Sediment Texture, Geochemical Variation, and Ecological Risk Assessment of Major Elements and Trace Metals in the Sediments of the Northeast Persian Gulf.

- Minerals, 13(7). <https://doi.org/10.3390/min13070850>
- Vaezi, Alireza, Shahbazi, R., Lak, R., Ahmadi, N., Sheikh, M., & Gol, A. R. M. (2023). Assessment of potentially toxic elements in atmospheric dust and associated health risks in Zahedan City, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01674-w>
- Varol, M., & Sünbül, M. R. (2018). Multiple approaches to assess human health risks from carcinogenic and non-carcinogenic metals via consumption of five fish species from a large reservoir in Turkey. *Science of the Total Environment*, 633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.218>
- Venugopal, T., Giridharan, L., & Jayaprakash, M. (2009). Characterization and risk assessment studies of bed sediments of river adyar-an application of speciation study. *International Journal of Environmental Research*, 3(4).
- W. Sugden. (1963). Some Aspects of Sedimentation in the Persian Gulf. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 33. <https://doi.org/10.1306/74d70e57-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Wagh, V. M., Panaskar, D. B., Mukate, S. V., Gaikwad, S. K., Muley, A. A., & Varade, A. M. (2018). Health risk assessment of heavy metal contamination in groundwater of Kadava River Basin, Nashik, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(3). <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0496-z>
- Weissmannová, H. D., Mihočová, S., Chovanec, P., & Pavlovský, J. (2019). Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22). <https://doi.org/10.3390/ijerph16224495>
- Yavar Ashayeri, N., & Keshavarzi, B. (2019). Geochemical characteristics, partitioning, quantitative source apportionment, and ecological and health risk of heavy metals in sediments and water: A case study in Shadegan Wetland, Iran. *Marine Pollution Bulletin*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110495>
- Zarezadeh, R., Rezaee, P., Lak, R., Masoodi, M., & Ghorbani, M. (2017). A study of textural and accumulation heavy metals of sediments in mangrove ecosystem of Persian Gulf, South Iran. *In Indian Journal of Geo Marine Sciences (Vol. 46, Issue 01)*.
- Zhang, G., Bai, J., Zhao, Q., Lu, Q., Jia, J., & Wen, X. (2016). Heavy metals in wetland soils along a wetland-forming chronosequence in the Yellow River Delta of China: Levels, sources and toxic risks. *Ecological Indicators*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.042>