

بررسی مقایسه‌ای شاخص ریسک اکولوژیک فلزات سنگین در شمال خلیج فارس: استان‌های هرمزگان و بوشهر

مهری رضایی^۱، علی مهدی‌نیا^{۲*}، ابوالفضل صالح^۳، سروش مدبری^۴

۱- دانشجوی دکتری محیط زیست-گرایش آلودگی محیط زیست، پژوهشکده علوم دریایی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، پست‌الکترونیکی: m.rezayi@inio.ac.ir

۲- دانشیار گروه علوم زیستی دریا، پژوهشکده علوم دریایی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، پست‌الکترونیکی: a.mehdinia@inio.ac.ir

۳- استادیار گروه علوم زیستی دریا، پژوهشکده علوم دریایی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، پست‌الکترونیکی: saleh@inio.ac.ir

۴- استادیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، پست‌الکترونیکی: modabberi@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۲۰

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۶/۳/۶

چکیده

هدف از مقاله حاضر، بررسی مقایسه‌ای شاخص ریسک اکولوژیک فلزات سنگین در شمال خلیج فارس (استان‌های هرمزگان و بوشهر) است. به همین منظور در سال ۱۳۹۱ نمونه‌گیری از رسوبات سطحی ۵۸ ایستگاه در حوزه خلیج فارس به صورت ترانسکت خطی از ساحل به سمت منطقه فرا ساحل انجام گردید. کلیه نمونه‌ها با رعایت اصول نمونه‌برداری برای آنالیز فلزات سنگین به آزمایشگاه انتقال یافتند و غلظت کل فلزات Hg, Zn, Pb, Cd, Cr, As, Cu با استفاده از هضم اسیدی و توسط دستگاه پلاسما جفت شده القایی- اسپکترومتری جرمی (ICP-MS^۱) آنالیز شدند. همچنین دانه‌بندی ذرات و میزان محتوای کربنات رسوب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بافت عمومی رسوبات سیلت-لومی و میزان کربنات‌ها از ۸/۵ تا ۵۳/۷۲ متغیر است. با توجه به شاخص ریسک انفرادی اکولوژیک (ER^۲) عناصر کادمیوم، جیوه و آرسنیک ریسک متوسط ایجاد می‌نمایند. میانگین شاخص ریسک اکولوژیک (RI^۳) ۳۳۵ بدست آمد که نشان‌دهنده وجود ریسک بالا در کل حوزه مورد مطالعه است. علی‌رغم بالاتر بودن این شاخص در استان هرمزگان هر دو استان بوشهر و هرمزگان در رده خطر بسیار بالا از نظر ریسک اکولوژیک قرار گرفتند. پهنه‌بندی انجام شده برای ریسک اکولوژیک در محیط GIS نشان دهنده کاهش تدریجی شاخص RI از ساحل به سمت فراساحل است که این موضوع اهمیت تخلیه آلاینده‌های زیست محیطی از منابع زمینی به حوزه دریایی را خاطر نشان می‌سازد.

کلمات کلیدی: ریسک اکولوژیک، فلزات سنگین، استان بوشهر، استان هرمزگان، خلیج فارس.

¹ Inductively coupled plasma-mass spectrometry

² Individual ecological risk index

³ Ecological risk index

۱. مقدمه

استفاده گسترده از فلزات سنگین در صنایع، معادن، فعالیت‌های کشاورزی و ... باعث ورود فلزات به محیط زیست با غلظتی بالاتر از غلظت زمینه شده است. پتانسیل آسیب رسانی این عناصر بسته به میزان ثابت شدن این فلزات در رسوبات دارد (Krupadam et al., 2006). فلزات سنگین پس از ورود به زیست بوم‌های آبی به ذرات ریز دانه چسبیده و در رسوبات ته نشین می‌شوند. بعضی از این ترکیبات برای سالیان سال در رسوبات باقی مانده و یا امکان تجزیه ندارند و نهایتاً در رسوبات یا بدن موجودات تجمع می‌یابند (Bentum et al., 2011). رسوبات مخزن مهمی برای فلزات سنگین در بوم‌سامانه‌های آبی محسوب می‌شوند (Ramesh et al., 1990). همچنین یک منبع غیر نقطه ای است که ممکن است آب موجود بر سطح رسوبات را آلوده سازد. فلزات سنگین در رسوبات ثابت نبوده و ممکن است در خلال عوامل زیست‌شناسی و شیمیایی در داخل رسوبات و یا ستون آب بازیابی شوند (Rodrigues et al., 2006; Bentum et al., 2011). مطالعه رسوبات از آنجا اهمیت دارد که مدت‌ها پس از اتمام انتشار از منبع اصلی، امکان ورود آلاینده‌ها به محیط را فراهم می‌آورند. تغییر در pH و سایر عوامل ممکن است مقدمات را برای انتشار مجدد آلاینده‌ها از رسوب فراهم آورد (Zhu et al., 2012; Bentum et al., 2011). دلیل برتری سنجش فلزات در رسوبات نسبت به ستون آب این است که مقدار آنها در رسوبات بیش از ستون آب است و در نتیجه دقت و صحت آنالیزهای آزمایشگاهی بالاتر خواهد بود و همچنین احتمال تغییر نتایج در اثر آلودگی نمونه‌ها در حین آنالیز بسیار کم خواهد شد (Rodrigues et al., 2006). روش‌های مختلفی برای تعیین نوع آلاینده‌های شاخص در آلودگی محیط دریایی وجود دارد. طبق استاندارد EPA نشت نفت در طول حمل و نقل دریایی یا از طریق خطوط انتقال است که منشا ورود عناصری نظیر Pb, Cr, Fe, Zn, Cd, Cu, V به محیط‌های دریایی بوده و از جمله متداول‌ترین عناصر مورد سنجش در آنالیز سرریزهای نفتی هستند (Greaney, 2005). در سال‌های اخیر مطالعات زیست‌محیطی در سیستم‌های آبی به سمت برآورد شاخص‌های RI سوق پیدا کرده است. در ایران نیز مطالعات متعددی در حوزه خلیج فارس با هدف تبیین سهم فلزات سنگین در آلودگی این پهنه آبی انجام شده است. اما تعداد مطالعات در حوزه برآورد ریسک اکولوژیک

انگشت شمار و محدود می‌باشد. در مطالعه انجام شده توسط Dehghan Madiseh و همکاران (۲۰۰۸)، میزان ریسک اکولوژیک فلزات مس، نیکل، کبالت، جیوه، روی، کادمیوم و سرب را در رسوبات ساحلی استان خوزستان (بندر ماهشهر) بررسی نمودند و مقدار شاخص RI را برای کلیه خوریات در رده ریسک اکولوژیک قابل توجه و بسیار بالا گزارش نمودند. ارزیابی ریسک اکولوژیک فلزات سنگین در رسوبات سطحی خلیج نایبند و عسلویه (شمال خلیج فارس) توسط Razaghi و همکاران (۲۰۱۳) انجام گردید. در این مطالعه نیکل، سرب، جیوه، روی، کادمیوم و مس در رسوبات سطحی سه ایستگاه با درجات مختلف تاثیر پذیری آنالیز شدند. پتانسیل ریسک اکولوژیک در مورد تمامی فلزات به جز جیوه در ریسک پایین و برای جیوه در محدوده ریسک بسیار بالا قرار داشت.

لذا با توجه به محدودیت مطالعات ریسک اکولوژیک و لزوم تعیین این شاخص جهت کیفی‌سازی وضعیت بوم‌شناختی حوزه خلیج فارس، انجام مطالعه جامع در این حوزه به منظور ترسیم وضعیت آلاینده‌ها بر اساس شاخص ریسک اکولوژیک با استفاده از روش Hakanson به عنوان هدف این تحقیق تعیین گردید (Hakanson, 1980).

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

با توجه به وسعت منطقه نمونه برداری عملیات نمونه‌گیری در سه بار گشت دریایی در ماه‌های دی، بهمن و اسفند ماه سال ۱۳۹۱ انجام گرفت. حوزه مورد مطالعه در خلیج فارس از منتهی الیه مرز غربی بوشهر شروع و در مرز شرقی هرمزگان در تنگه هرمز پایان یافت (شکل ۱). برای نمونه برداری تعداد ۵۸ ایستگاه توسط ترانسکت خطی به فاصله تقریبی ۲۵ کیلومتر از ساحل به سمت منطقه فرا ساحل در نظر گرفته شد. سعی گردید محل ایستگاه‌ها منطبق بر طرح نمونه برداری راپمی انجام گیرد (ROPME, 2013). در هر ترانسکت حداقل ۳ ایستگاه نمونه برداری در نظر گرفته شد. اما با توجه به وسعت منطقه و تغییر شرایط جوی در طول نمونه‌برداری، امکان پیروی از الگوی فوق در استان هرمزگان وجود نداشت. نمونه‌برداری با استفاده از نمونه بردار گرب ون وین با سطح مقطع 1000 cm^2 در سه

سنجش به صورت (۰/۰۱ ppm) Cu, Pb, Cd و برای عناصر As, Ni, Zn (۰/۱ ppm)، برای Cr (۰/۵ ppm) و برای Hg (۵ ppb) بود. برای آنالیز دانه بندی رسوبات از دستگاه دانه‌بندی لیزری^۱ استفاده گردید.

بدین منظور ۰/۵ گرم از هر نمونه را به بشر منتقل کرده و به آن ۲۵ میلی لیتر محلول ۳٪ تتراسدیم دی فسفات دکاهیدرات^۲ اضافه نموده و با مگنت به مدت دو ساعت هم زده و در نهایت میزان اندازه ذرات توسط دستگاه ثبت گردید (Dias, 2008). برای سنجش کربنات‌ها از روش LOI^۳ استفاده شد. بدین منظور ۴ گرم از هر نمونه را در آون به مدت ۴ ساعت و در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک نموده و سپس نمونه‌ها توزین و مجدداً در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شد و وزن گردید. میزان کربنات‌ها از تفاوت وزن دو نمونه فوق به دست آمد (Dias, 2008).

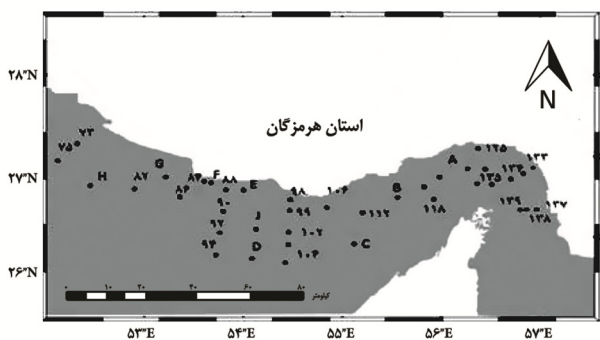
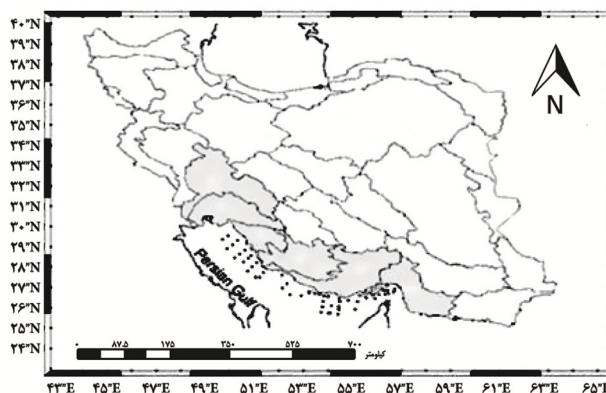
۲-۲ تحلیل داده‌ها

اطلاعات به دست آمده از آنالیز آزمایشگاهی پس از ورود در نرم افزار SPSS، نسخه ۲۴ بررسی و تحلیل شدند. بررسی تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال با آزمون Kolmogorov-Smirnov و آزمون همبستگی توسط آزمون Pearson انجام شد. همچنین برای تعیین تفاوت غلظت عناصر با دور شدن از ساحل در ترانسکت‌ها و لاین‌ها از آنالیز One Way Anova و آزمون Tukey استفاده گردید. جهت تعیین لاین‌ها، ایستگاه‌های موجود بر حسب فاصله از ساحل در ۳ لاین تقسیم‌بندی شدند به طوری که ۱۹ ایستگاه نزدیک به ساحل در لاین ۱، ۱۶ ایستگاه که دورترین فاصله از ساحل را داشتند در لاین ۳ و ایستگاه‌های مابین این دو، لاین دوم را تشکیل می‌دادند.

۳-۲ ارزیابی ریسک اکولوژیک عناصر مورد سنجش

در سال ۱۹۸۰ هاکسون یک شاخص کلی از آلودگی بر مبنای داده های یکپارچه برای هفت فلز سنگین (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Zn)، از رایه داد (Hakanson, 1980). Hakanson نشان داد که

تکرار در هر ایستگاه انجام شد. نمونه‌ها در ظروف پلاستیکی قرارداد شده و در محل برچسب گذاری گردیدند.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و توزیع ایستگاه‌های نمونه‌برداری در استان‌های بوشهر و هرمزگان

نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه با استفاده از دستگاه فریز درایر در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد خشک شدند و تا زمان آنالیز در یخچال نگهداری شدند. کلیه نمونه‌ها برای انجام آزمایشات دقیق به آزمایشگاه ACME کانادا ارسال شدند. پروتکل انتخابی برای سنجش غلظت کل عناصر، هضم نمونه‌ها با استفاده از محلول Aqua Regia و سنجش نمونه‌ها با دستگاه ICP-MS بوده است. حد تشخیص دستگاه برای عناصر مورد

¹ Laser Particle Size Analyzer

² tetra-Sodium-diphosphate-decahydrate

³ Loss on Ignition

کریجینگ، IDW و همسایگی طبیعی^۱ استفاده شد. برای تعیین مدل برتر ابتدا یک خروجی از تمام مدل‌های موجود گرفته شد و خروجی مدل‌ها دو به دو مقایسه گردید. در نهایت بر اساس مقادیر خطای استاندارد مدل‌های برتر غربال‌گری شدند. مدل‌های شعاعی^۲ و IDW از سایر مدل‌ها خروجی بهتر و اعداد مناسب-تری را نشان دادند. در نهایت از مدل Radial برای اخذ خروجی استفاده گردید.

۳. نتایج و بحث

۳-۱- وضعیت عمومی غلظت عناصر در حوزه مورد مطالعه

میزان حداقل، حداکثر و میانگین فلزات سنجش شده در جدول ۲ آورده شده است. کمترین مقدار عناصر سنگین به جز عناصر Pb, As, Hg در ایستگاه F (شرق هندورابی - استان هرمزگان) مشاهده گردید. بیشترین غلظت فلزات به جز Cd در ایستگاه ۱۳۳ (دهانه رود میناب) مشاهده شد. عناصر به ترتیب کاهش غلظت به صورت $Cr > Zn > Cu > Pb > As > Cd > Hg$ به دست آمد. در مقایسه با غلظت عناصر در شیل (Li and Schoonmaker, 2003) همه عناصر از حد غلظت خود در شیل کمتر بوده و در مقایسه با غلظت عناصر در رسوبات کربناته (Turekian and Wedepohl, 1961) تنها عنصر سرب کمتر از غلظت خود در رسوبات کربناته است و سایر عناصر از مقادیر خود در رسوبات کربناته فراتر رفته‌اند.

مطالعات صورت گرفته در حوزه میدانی نشان می‌دهد در بالا دست رودخانه میناب واحدهای متعدد استحصال کروم و در پایین دست واحدهای کشت و پرورش میگو قرار گرفته است که زهاب خود را به خلیج فارس می‌ریزند (اجلالی و همکاران، ۱۳۸۹؛ دخت بندری و رضایی ۱۳۹۴). همچنین وجود رخنمون-های غیر طبیعی برای فلزات $Cr, Mn, Cu, Zn, V, Pb, Ni, Co$ در استان هرمزگان و در حواشی دهانه رود میناب توسط سازمان زمین شناسی کشور اعلام شده است (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، ۱۳۹۶) که می‌تواند منشا بروز غلظت‌های بالای برخی از عناصر باشد. در مطالعه‌ای که توسط Karbassi و همکاران (۲۰۰۵) انجام شد میزان فلزات سنگین را در مغزه‌های

جمع عددی هشت آلاینده خاص دلالت بر درجه نهایی آلودگی رسوبات دارد و در نهایت فرمول پیشنهادی وی به صورت رابطه ۱ تغییر یافت:

$$RI = \sum_i^n E_r^i \quad E_r^i = T_r^i * C_f^i \quad \text{رابطه ۱}$$

$$C_f^i = C_{\text{surface}}^i / C_n^i$$

در این فرمول RI جمع احتمال ریسک فلزات سنگین، ER احتمال ریسک برای هر فلز، T_i فاکتور سمیت برای فلزات مورد مطالعه (روی=۱، کروم=۲، مس و سرب =۵، آرسنیک=۱۰، کادمیوم=۳۰، جیوه=۴۰)، C_{fi} ضریب آلودگی، $C_{\text{surface}i}$ غلظت فلزات سنگین در رسوبات، C_{ni} غلظت پیش از صنعتی شدن فلزات مورد نظر است (Zhu et al., 2012). در نهایت اعداد بدست آمده از فرمول RI در طبقات متفاوت دسته بندی و ریسک حاصله به دست می‌آید (جدول ۱) (Krupadam et al., 2006).

جدول ۱: طبقات ER در تعیین ارزیابی ریسک انفرادی و طبقات RI

ER	ریسک اکولوژیک انفرادی آلاینده ^۱	RI	پتانسیل ریسک اکولوژیک جامع ^۲
۴۰ <	اندک	۹۰ >	اندک
۸۰-۴۰	میانه	۹۰-۱۸۰	میانه
۱۶۰-۸۰	قوی	۱۸۰-۳۶۰	قوی
۳۲۰-۱۶۰	خیلی قوی	۳۶۰-۷۲۰	خیلی قوی
۳۲۰	بسیار قوی	۷۲۰ <	بسیار قوی

^۱Single-pollutant ecological risk

^۲Comprehensive-potential ecological risk

نکته حایز اهمیت در فرمول RI غلظت زمینه عناصر C_{ni} است. به طور معمول از غلظت‌های استاندارد در پوسته، شیل به عنوان غلظت زمینه استفاده می‌شود. چنانچه در مطالعات ایستگاه شاهد وجود داشته باشد، استفاده از غلظت ایستگاه شاهد نتایج دقیق‌تری را به دست می‌دهد. با توجه به پایین تر بودن غلظت عناصر در ایستگاه F نسبت به غلظت‌های استاندارد در شیل از غلظت‌های این ایستگاه به عنوان غلظت پیش از صنعتی شدن برای تعیین شاخص ریسک استفاده گردید.

۴-۲ تحلیل بر پایه GIS

جهت پهنه‌بندی داده‌ها و بررسی تغییرات مکانی و برآورد غلظت فلزات سنگین از روش میان‌یابی شامل روش‌های

^۱ Natural Neighborhood

^۲ Radial

مناطق با انرژی پایین (شدت موج کم) و شن و سیلت در نواحی با انرژی بالا غالب هستند (Dias, 2008). آنالیز دانه بندی به منظور تعیین درصد شن، رس و سیلت برای کلیه نمونه های گرفته شده انجام گردید. با توجه به این که کلیه ایستگاه‌های نمونه برداری در منطقه فراساحل قرار داشت لذا انتظار کلی ما بر غالبیت بخش سیلت و رس بود. نتیجه آنالیز دانه بندی در ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز نشان داد که درصد بالایی از ذرات رسوبی، ذرات ریز دانه رسی - سیلتی بوده و مقدار کمی شنی هستند.

بخش شنی دارای تغییرات بسیار بالایی در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه بود. میزان این تغییرات از مقادیر نزدیک به صفر در ایستگاه‌های ۹۲، ۸۶، ۷۵ تا میزان ۷۶٪ در ایستگاه ۶۲ (استان بوشهر) متغیر بود. بخش سیلتی تقریباً بخش غالب دانه بندی را تشکیل داد. بیش از ۸۶٪ ایستگاه‌ها ذرات سیلت را به صورت غالب نشان دادند. میزان رس از ۱۸ درصد در ایستگاه ۷۵ (واقع در مرز هرمزگان - بوشهر) تا صفر درصد در ایستگاه‌های A, D ۱۲۱ (واقع در استان هرمزگان) متغیر بود. کربنات‌ها به عنوان یک عامل ترقیق کننده آلاینده‌ها و تجمع دهنده فلزات سنگین مانند کادمیوم و مس شناخته شده‌اند. در حوزه مورد مطالعه میزان کربنات‌ها بین ۵۳/۷۲-۸/۵ متغیر بود. میزان کلی کربنات‌ها در استان هرمزگان از غلظت بیشتری نسبت به استان بوشهر برخوردار است. کمترین مقدار کربنات‌ها در ایستگاه ۸۶ و ۱۱۲ در استان هرمزگان مشاهده شد.

۳-۳ مقایسه غلظت عناصر در استان‌های بوشهر و هرمزگان

جهت درک بهتر تفاوت غلظت عناصر را در ایستگاه‌های نمونه‌برداری به صورت استانی تحلیل نمودیم. در جدول ۳ میانگین، حداقل و حداکثر غلظت سنجش شده برای هر عنصر به تفکیک استان‌ها آورده شده است. عناصر Cu, Zn, Cr در استان بوشهر از غلظت بیشتری برخوردار بودند. نکته حائز اهمیت این است که به لحاظ استقرار پهنه های صنعتی نفت و گاز که به طور بالقوه منتشرکننده آلودگی بسیاری هستند، استان بوشهر دارای سه پهنه بزرگ کنگان، عسلویه و خارک است که همگی در حاشیه ساحلی مستقر گشته‌اند. اما در استان هرمزگان اسکله شهید رجایی و باهنر، نیروگاه برق بندر عباس، مزارع پرورش میگو میناب و واحدهای آب شیرین کن قشم از جمله مهمترین صنایع و

استان بوشهر اندازه گیری نمودند و در عمق ۵۰ سانتی‌متری غلظت فلزات را به صورت (Cu (۲۴/۱), Pb (۵۳/۳), Cr (۱۲۶/۲), Zn (۴۹/۱), Ni (۱۰۱), Al (۲۰۷۰), Fe (۲۲۰۰), Mn (۴۴۶/۶) میکروگرم بر گرم خشک رسوب گزارش نمودند. در این مطالعه میزان عناصر سرب، نیکل و کادمیوم از میزان غلظت این عناصر در پوسته بالاتر گزارش شدند (Karbassi et al, 2005). همچنین Biati و همکاران (۲۰۱۲) فلزات سرب، روی و منیزیم را در رسوبات استان بوشهر اندازه گیری نمودند و مقادیر آن‌را پایین‌تر از مقادیر میانگین پوسته گزارش نمودند. لازم به ذکر است که عموماً در مطالعات رسوبی خلیج فارس، محققین مقادیر عنصری با غلظت عناصر در پوسته و یا شیل را مقایسه می‌کنند. در مطالعه حاضر با توجه به فراوانی غلظت رسوبات کربناته، مقایسه عناصر با غلظت عنصری در رسوبات کربناته انجام گرفت که به نظر می‌رسد مشابهت بیشتری با غلظت سنجش شده در رسوبات خلیج فارس دارد.

جدول ۲: غلظت عناصر Cu, As, Cr, Cd, Hg, Pb, Zn بر حسب میکروگرم بر گرم بر وزن خشک

عناصر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	میانگین شیل ^۲	میانگین رسوبات کربناته ^۱
Cu	۱/۶۵	۳۵/۰۶	۱۶/۰۶	۵/۸۴	۴۵	۴
Pb	۲/۷۱	۱۵/۱۰	۶/۳۵	۲/۰۳	۲۰	۹
Zn	۲/۹	۷۵/۱	۳۶/۱۳	۱۴/۳۳	۹۵	۲۰
As	۰/۰۵	۱۱/۲۰	۲/۲۹	۲/۰۰	۱۳	۱
Cd	۰/۱۱	۰/۳۹	۰/۱۷	۰/۰۴۱	۰/۳	۰/۰۳۵
Cr	۶/۷	۱۱۶/۸	۵۴/۹۲	۲۰/۶۲	۹۰	۱۱
Hg	۰/۰۰۲	۰/۰۵۷	۰/۰۱۶	۰/۰۰۷	۰/۴	۰/۰۴

^۱Turekian and Wedepohl, 1961

^۲Li and Schoonmaker, 2003

۳-۲ دانه‌بندی رسوبات و مقدار کربنات‌ها و عمق در ایستگاه‌های مورد مطالعه

دانه بندی رسوبات و میزان مواد آلی^۱ مهمترین پارامترهایی هستند که رفتار فلزات سنگین را در رسوبات کنترل می‌کنند و ظرفیت رسوبات را برای پذیرش فلزات تحت تاثیر قرار می‌دهند (Lin et al., 2003). ذرات ریز با توجه به نسبت سطح به حجم بالا، جاذب مواد آلی هستند و می‌توانند به عنوان مخزن ریز مغذی‌ها محسوب شوند (Plathe, 2010). ذرات رسی معمولاً در

^۱ Organic Matter

غلظت از لاین ساحلی (لاین ۱) به سمت لاین فرا ساحل (لاین ۳) بوده و تفاوت غلظت عمدتاً بین لاین‌های یک و سه دیده شد. در استان بوشهر عنصر روی در لاین ۱ (نزدیک به ساحل) به طور معنی‌داری بیشتری از لاین ۳ بدست آمد ($P \leq 0/05$) و سایر عناصر فاقد تغییرات معنی‌دار در بین لاین‌ها بودند ($P > 0/05$). الگوی کلی اغلب عناصر کاهش غلظت با افزایش فاصله از ساحل بوده که نشان‌دهنده وجود منابع انتشاردهنده زمینی هستند.

۳-۴-۲ تفاوت غلظت عناصر در بین ترانسکت‌های نمونه‌برداری

نتایج آنالیز One Way ANOVA نشان داد که بین غلظت عناصر در بین ترانسکت‌های تعیین شده تفاوت معنی‌دار وجود ندارد ($P > 0/05$). تنها عنصر جیوه در ترانسکت دهم (ایستگاه‌های ۸۲ و G در استان هرمزگان که هر دو در فاصله ۱۳ و ۵۰ کیلومتری جنوب جزیره لاوان قرار دارند) با ترانسکت ۵ (ایستگاه‌های ۵۲، ۵۴، ۵۶ در استان بوشهر)، ترانسکت ۶ (ایستگاه‌های ۶۰، ۶۲، ۶۴ در استان بوشهر)، ترانسکت ۲۱ (ایستگاه‌های ۱۲۸، ۱۲۵، ۱۳۰ در استان هرمزگان)، ترانسکت ۲۲ (ایستگاه‌های ۱۳۳، ۱۳۴، ۱۳۵ در استان هرمزگان) تفاوت معنی‌دار نشان داد ($P \leq 0/05$). همچنین میزان جیوه در ترانسکت ۲۲ با ۸ (ایستگاه‌های ۷۳، ۷۵ استان بوشهر) تفاوت معنی‌دار نشان داد ($P \leq 0/05$).

۳-۴-۵ ارزیابی ریسک انفرادی عناصر مورد سنجش (ER)

براساس مقادیر به دست آمده عناصر سرب، روی و کروم از نظر ریسک انفرادی در رده یک (ریسک اندک) قرار داشته و سایر عناصر کادمیوم، جیوه و آرسنیک در گروه متوسط از نظر ایجاد خطر اکولوژیک قرار می‌گیرند (جدول ۴). حد بیشینه عناصر مس، سرب، روی و کروم در ایستگاه ۱۳۳ استان هرمزگان (دهانه رود میناب) مشاهده شدند و جیوه و آرسنیک در ایستگاه G واقع در غرب استان هرمزگان (جنوب لاوان) به حداکثر خود رسیدند. در حالی‌که میزان کمینه عناصر مس، روی، کروم در ایستگاه F در شرق هندرابی به دست آمد. نکته حایز اهمیت وجود غلظت‌های بیشینه و کمینه عناصر در استان هرمزگان است. وجود پاکترین ایستگاه با کمترین آلودگی و آلوده‌ترین ایستگاه در یک استان احتمالاً ناشی از وجود منابع غیر پایدار (اعم از تصادفات و نشت اتفاقی نفت) و یا رخنمون-

مراکز آلاینده حاشیه ساحل در این استان هستند. در استان هرمزگان رودهای میناب، شمیل، شور و جلابی پس از گذشت از شهرها و مراکز جمعیتی به خلیج فارس می‌ریزند. معادن فلزی استان هرمزگان عمدتاً معادن کرومیت هستند که به صورت یک پهنه وسیع در بالادست رود میناب قرار گرفته اند. وجود رخنمون‌های غیرطبیعی از محل برخی عناصر سنگین در دهانه رود میناب توسط سازمان زمین‌شناسی کشور گزارش شده است. بر اساس اطلاعات موجود در نقشه میداین نفت و گاز حوزه خلیج فارس، استان بوشهر دارای میداین فعال نفت و گاز دریایی است در حالی‌که استان هرمزگان تنها یک میدان نفتی را در پهنه آبی خود دارد. لذا دو استان از منظر منابع بالقوه و بالفعل آلاینده از دو سیمای متفاوت برخوردار هستند (واقفی و همکاران، ۱۳۹۰؛ بهره مند، ۱۳۹۲). تفاوت دیگر دو استان در رودخانه‌هایی است که از حوزه آبریز آنها وارد خلیج فارس می‌شود. در حالی‌که در استان بوشهر رودخانه حله و مند در پایان مسیر خود عمدتاً از میان مناطق حفاظت شده گذشته و به خلیج فارس می‌ریزند.

جدول ۳: مقایسه میانگین عناصر سنجش شده در رسوبات سطحی استان‌های بوشهر و هرمزگان (بر حسب میکروگرم بر گرم وزن خشک)

عنصر/استان	Cr	Cu	Pb	Zn	Hg	Cd	As
میانگین	۵۶/۹	۱۶/۳	۶/۲	۳۹/۲	-/۰۱	-/۱۸	۲/۹
بوشهر	حداکثر ۷۸/۰	۲۱/۸	۷/۶	۵۴/۳	-/۰۳	-/۲۴	۶/۳
حداقل	۳۸/۷	۱۱/۱	۴/۸	۲۵/۵	-/۰۰	-/۱۳	۱/۷
میانگین	۵۴/۸	۱۶/۲	۶/۴	۳۵/۲	-/۰۲	-/۱۸	۳/۵
هرمزگان	حداکثر ۱۱۶/۸	۲۵/۰	۱۵/۱	۷۵/۱	-/۰۶	-/۳۹	۱۱/۲
حداقل	۶/۷	۱/۶	۲/۷	۲/۹	-/۰۰	-/۱۱	-/۰۵

۳-۴-۴ تفاوت لاین‌ها و ترانسکت‌های نمونه برداری در غلظت عناصر سنجش شده

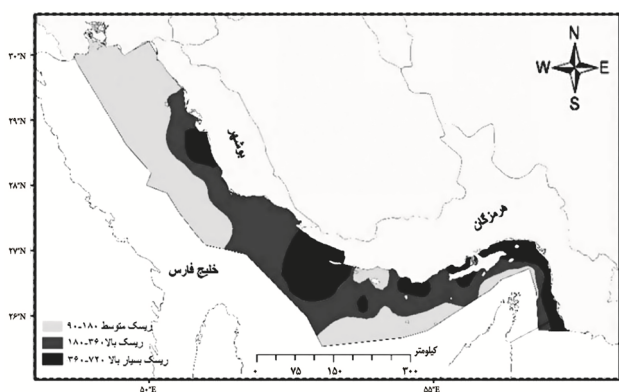
۳-۴-۱ تفاوت غلظت عناصر در بین لاین‌های نمونه برداری

توجه به تفاوت طرح نمونه برداری در استان‌های بوشهر و هرمزگان، ایستگاه‌ها به صورت مجزا در این دو استان رده بندی شدند و آزمون‌های One Way ANOVA و Tukey بر آنها اعمال گردید. در استان هرمزگان عنصر سرب به همراه پارامتر عمق تغییرات معنی‌داری را در بین سه لاین نشان داد. در مورد سایر عناصر گرچه تغییرات معنی‌دار در بین لاین‌ها وجود نداشت، اما الگوی کلی تغییر غلظت عناصر به صورت کاهش

روی میزان ریسک بوم‌شناختی رسوبات سطحی استان بوشهر نشان داد که میزان این شاخص در رده خطر بالا قرار دارد (میزان شاخص ۵۰۴ تا ۱۰۵۷). با توجه به وجود نواحی صنعتی گسترده در استان بوشهر که عمده فعالیت‌های پالایشگاهی و پتروشیمی در حوزه خلیج فارس را پوشش می‌دهد پیش‌بینی شد که شاخص ریسک اکولوژیک در این استان بیش از استان هرمزگان است. لذا اختلاف نتیجه را می‌توان در اثر عوامل تاثیرگذار دیگر مانند شرایط محیطی دانست. تفاوت بافت رسوبات، نقش مهمی در تجمع آلاینده‌ها در این دو استان دارد. در ایستگاه F که پاک‌ترین ایستگاه شناسایی شد، بافت رسوبی عمدتاً ماسه‌ای بوده و میزان کربنات‌ها در حد بیشینه خود قرار دارد (۵۴). در حالی که ایستگاه ۱۳۳ به عنوان یکی از آلوده‌ترین ایستگاه‌ها دارای بافت لومی - شنی است و میزان کربنات‌ها در آن به حداقل می‌رسد (۵، ۸).

۳-۷ پهنه‌بندی شاخص ریسک اکولوژیک در محیط GIS

پهنه‌بندی شاخص ریسک اکولوژیک RI (شکل ۲) نشان‌دهنده یک الگوی کلی در حوزه خلیج فارس است. در این الگو مشابه نتیجه‌ای که در آزمون One Way ANOVA به دست آمد حداکثر شاخص RI در نوار ساحلی رویت شده است و با فاصله از ساحل میزان این شاخص رو به کاهش می‌رود. تنها استثنا در این قاعده در منطقه حد فاصل لاوان تا کیش (ایستگاه F) است که در ریسک اکولوژیک رده دو قرار می‌گیرد. وجود چنین الگویی مجدداً اهمیت منابع خشکی مانند روان آب‌های سطحی، زهاب‌های صنعتی و تخلیه‌های غیرمجاز صنایع حاشیه‌ای را در ورود آلاینده‌های مورد سنجش به خلیج فارس تاکید می‌کند.



شکل ۲: نقشه پراکنش شاخص ریسک اکولوژیک RI در حوزه مورد مطالعه

های غیرطبیعی است که هنوز زمان لازم برای انتشار به همراه جریان‌های دریایی را نیافته است و سایر عوامل ترقیق‌کننده نیز فرصت ترقیق آلاینده‌ها را در بوم‌سامانه نیافته‌اند. بر خلاف آن، استان بوشهر از نوعی یکنواختی در غلظت‌های آلودگی برخوردار است. علاوه بر این نوع پارامترهای تاثیرگذار بر آلودگی نیز می‌تواند در بروز چنین نتایجی تاثیرگذار باشد. وجود کربنات فراوان و نوع دانه بندی ذرات رسوبی می‌تواند نقش ترقیق‌کنندگی را برای عناصر فلزی ایفا نماید.

جدول ۴: میزان میانگین و محل مشاهده حد بیشینه و کمینه شاخص ریسک انفرادی ER-Value برای عناصر مورد سنجش

	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As	
میانگین	۴۸/۷	۱۱/۷	۱۲/۵	۱۶/۲	۴۸/۳	۷۴/۵	۴۶/۹	
حد بیشینه	۱۰۶/۲	۲۷/۹	۲۵/۹	۳۴/۹	۱۰۶/۴	۲۵۳/۳	۱۶۰/۰	
شماره ایستگاه	۱۳۳	۱۳۳	۱۳۳	۱۳۳	۸۲	G	G	
محل رویت	دهانه رود	دهانه رود	دهانه رود	دهانه رود	جنوب لاوان	جنوب لاوان	جنوب لاوان	
حد کمینه	۵	۱	۱	۱	۱	۰/۱	۱	
شماره ایستگاه	F	۹۴	F	F	۱۰۴	۹۴	۱۰۴	
محل رویت	شرق هندورابی	جنوب کیش	شرق هندورابی	شرق هندورابی	جنوب فارور	جنوب کیش	جنوب فارور	

۳-۶ ارزیابی ریسک اکولوژیک (RI)

متوسط شاخص ریسک اکولوژیک (RI) برای کل حوزه خلیج فارس 335 به دست آمد که نشان‌دهنده وجود ریسک بالا در حوزه مورد مطالعه است. میزان شاخص ریسک اکولوژیک برای استان بوشهر ۳۱۸ و برای استان هرمزگان ۳۴۵ به دست آمد. از لحاظ شاخص RI تنها دو ایستگاه در کل حوزه مورد مطالعه در رده ریسک متوسط قرار داشتند (در استان هرمزگان، ایستگاه‌های ۹۴ و ۱۰۴). در استان بوشهر سه ایستگاه ۲۲، ۵۱، ۵۴ در رده خطر بالا و سایر ایستگاه‌ها در رده خطر بسیار بالا قرار گرفتند. درصد ایستگاه‌های رده خطر بالا در استان بوشهر ۱۵٪ و رده خطر بسیار بالا ۸۵٪ و برای استان هرمزگان درصد ایستگاه‌های دارای خطر بالا و خطر بسیار بالا ۴۷٪ و دارای خطر متوسط ۶٪ بدست آمد. گرچه شاخص RI در استان هرمزگان بیش از بوشهر است اما هر دو در یک رده خطر قرار می‌گیرند. مقالات منتشر شده در حوزه ارزیابی ریسک اکولوژیک در حوزه خلیج فارس محدود است. مطالعه Janadeleh و Jahangiri (۲۰۱۶) روی رسوبات منطقه شمال جزیره هرمز نشان داد که شاخص ریسک اکولوژیک برای این منطقه پایین است (مقدار شاخص ۱۲، ۱۰-۱۹، ۱۷). مطالعه Razaghi و همکاران (۲۰۱۱)

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که بافت عمومی رسوبات در حوزه مورد مطالعه سیلت - لومی و میزان کربنات‌ها از $۸/۵ - ۵۳/۷۲$ متغیر هستند. با توجه به ریسک انفرادی اکولوژیک (ER) غلظت عناصر کادمیوم، جیوه و آرسنیک ریسک متوسط ایجاد می‌کنند. میانگین شاخص ریسک اکولوژیک (RI) ۳۳۵ به دست آمد که نشان‌دهنده وجود ریسک بالا در کل حوزه مورد مطالعه است. حداقل و حداکثر شاخص ریسک اکولوژیک در استان هرمزگان مشاهده شد، در حالی که میزان این شاخص در استان بوشهر با تغییرات کم مواجه بود. الگوی کلی توزیع آلودگی از محل هفت عنصر آنالیز شده، نشان‌دهنده کاهش غلظت با افزایش فاصله از ساحل بوده است که نشان از نقش پررنگ منابع زمینی در ورود این آلاینده‌ها به محیط زیست خلیج فارس دارد.

منابع

- اجلالی، ک.خ؛ اکبرزاده، غ.؛ آقاجری، ش.؛ نگارستان، ح.؛ تمدنی، س.؛ اکبری، ح.، ۱۳۸۹. بررسی اثرات پساب‌های مزارع پرورش میگو بر توزیع و تراکم ماکروبتوزها در خور مازغ در هرمزگان. نشریه اقیانوس‌شناسی. سال ششم، شماره ۳. صفحات ۱-۵.
- بهره مند، ب.، ۱۳۹۲. سنجش آسیب‌پذیری سواحل استان هرمزگان در برابر آلودگی صنایع با استفاده از روش ارزیابی چند معیاره مکانمند (SMCE)، اولین همایش ملی مهندسی و مدیریت کشاورزی، محیط زیست و منابع طبیعی پایدار. همدان. انجمن ارزیابان محیط زیست هگمتانه. ۱۶ صفحه.
- پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، ۱۳۹۶. پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، بانک اطلاعات اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک، <http://www.ngdir.ir/SiteLinks/Geochemical/indexp.htm>
- دخت بندری، م.غ.؛ رضایی، پ.، ۱۳۹۴. مطالعه آلودگی فلزات سنگین رسوبات ساحلی جزیره هرمز و منشا آن‌ها. نشریه اقیانوس‌شناسی. سال ششم، شماره ۲۲. صفحات ۹۷-۱۰۶.
- واقفی، م.؛ زارعی، م.؛ نبی‌الهی، م.، ۱۳۹۰. آلاینده‌های دریایی خلیج فارس و پیامدهای زیست محیطی ناشی از آلودگی آن، کنفرانس بین‌المللی بهره‌برداری از آب دریا. کرمان. مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی. ۱۳ صفحه.
- Bentum, J.K.; Anang, M.; Boadu, K.O.; Koranteng-Addo, E.J. ; Antwi, E.O., 2011. Assessment of heavy metals pollution of sediments from Fosu lagoon in Ghana. Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia, 25(2): 191-196.
- Biati, A.; Nikoomaram, H.; Karbassi, A.R., 2012. Study of metals concentrations in surface sediments of the Persian Gulf coastal area (Bushehr Province). International Journal of Marine Science and Engineering, 2(1): 75-80.
- Dehghan Madiseh, S.; Savary, A.; Parham, H.; Sabzalizadeh, S., 2008. 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): 521-530
- Dias, M.I.; Prudencio, M.I., 2008. On the important of using Scandium to normalize geochemical data preceding multivariate analyses applied to archeometric pottery studies. Microchemical Journal, 88(2): 136-141
- Greaney, K.M., 2005. An assessment of heavy metal contamination in the marine sediments of Las Perlas Archipelago, Gulf of Panama. M.Sc. thesis, Edinburgh: School of Life Sciences Heriot-Watt University. 27P.
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. Water Research, 14(8): 975-1001.
- Janadeleh, H.; Jahangiri, S., 2016. Study of contamination and risk assessment of heavy metal in fish (*Otolithes ruber*) and sediments from Persian Gulf. Journals of Community Health Research, 5(3): 159-181.
- Karbassi, A.R.; Nabi-Bidhendi, G.R.; Bayati, L., 2005. Environmental geochemistry of heavy metals in a sediment core off Bushehr, Persian Gulf. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 2(4): 255-260.
- Krupadam, R.; Smita, P.; Wate, S., 2006. Geochemical fractionation of heavy metals in sediments of the Tapi

- Ecological risk assessment using heavy metals from surface sediments of Nayband Bay and Asaluyeh region (Northern Persian Gulf). *Journal of Aquatic Ecology*, 2(3): 68-57.
- Rodrigues, M.L.K.; Formoso, M.L.L., 2006. Geochemical distribution of selected heavy metals in stream sediments affected by tannery activities. *Water, Air, and Soil Pollution*, 169(1-4): 167-184.
- Regional Organization for the Protection., 2013. State of the marine environment report, Ropme Report, 9P.
- Turekian, K.K.; Wedepohl, K.H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2): 175-192.
- Zhu, H.; Yuan, X.; Zeng, G.; Jiang, M.; Liang, J.; Zhang, C.; Juan, Y.; Huang, H.J.; Liu, Z.; Jiang, H., 2012. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(6): 1470-1477.
- estuaries. *Geochemical Journal*, 40(5): 513-522.
- Li, Y.; Schoonmaker, J., 2003. Chemical composition and mineralogy of marine sediments. University of Hawaii Honolulu, HI. USA. 36P.
- Lin, J.; Chen, S.; Su, C., 2003. Assessment of sediment toxicity by metal speciation in different particle-size fractions of river sediment. *Water Science & Technology*, 47(7): 233-241.
- Plathe, K., 2010. Nanoparticle heavy metal associations in river sediments. Ph.D Thesis, Department of Geoscience, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute. 37P.
- Ramesh, R.; Subramanian, V.; Van Grieken, R., 1990. Heavy metal distribution in sediments of Krishna river basin, India. *Environmental Geology and Water Sciences*, 15(3): 207-216.
- Razaghi, M.; Shokri, M.R.; Savari, A.; Pazooki, J., 2011. Ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediment of Nayband-Asalooyeh Bay-Persian Gulf. *Journal of Aquatic Ecology*, 42(2): 63-57.
- Razaghi, M.; Shokri, M.R.; Savari, A.; Pazooki, J., 2013.