

زمین‌شیمی و توزیع فلزات سنگین در رسوبات ساحلی و دریایی خلیج چابهار

بهنام کشاورزی

استادیار بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز

پوریا ابراهیمی

دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه شیراز

فرید مَر

استاد بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز

محمد علی حمزه

موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ایستگاه پژوهشی دریای عمان و اقیانوس هند، چابهار

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۱۵

amirghobadi@yahoo.com

چکیده

خلیج چابهار در جنوب شرق سواحل استان سیستان و بلوچستان قرار دارد و به دلیل شکل آمگایی و چرخش محدود آب در آن، از نظر زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق ۱۲ نمونه سطحی و ۶ مغزه رسوبات ساحلی و دریایی خلیج چابهار برای بررسی توزیع سطحی و عمقی فلزات سنگین برداشت شد. نتایج تجزیه شیمیایی نشان می‌دهد که میانگین غلظت مس ppm ۱۴/۶۶، سرب ppm ۱۴/۴۴، روی ppm ۴۶/۸۶، نیکل ppm ۵۱/۸۹، کروم ppm ۳۶/۷، کبالت ppm ۹/۵۷، کادمیم ppm ۰/۱۹ و انادیم ppm ۲۳/۸، آرسنیک ppm ۹/۵۱، منگنز ppm ۴۹۷/۲، آهن ۲٪ و منیزیم ۱/۳۵٪ می‌باشد. نتایج ضریب غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشت و ضریب آلودگی نشان دهنده آلودگی عناصر نیکل، کروم، آهن، روی و مس در رسوبات منطقه است. بیشترین غنی‌شدگی عنصر سرب نیز در اسکله هفت تیر چابهار مشاهده می‌شود. آلوده‌ترین مناطق خلیج چابهار، اسکله هفت تیر چابهار، اسکله شهید بهشتی، اسکله شهید کلانتری و اسکله کنارک می‌باشد. نتایج ضریب همبستگی و تحلیل خوشه‌ای نشان می‌دهد که عناصر نیکل، کروم، کبالت، وانادیم، آهن، منیزیم و آلومینیم منشأ زمین‌زاد، و عناصر سرب، روی و مس منشأ انسان‌زاد دارد. در مغزه اسکله هفت تیر چابهار، روند کاهش غلظت عنصر مس نسبت به عمق می‌تواند نشان دهنده نقش فعالیت انسانی در توزیع این عنصر در رسوبات باشد. با بررسی مغزه رسوبات جنگل گُرنا مشخص شد که این منطقه تحت تاثیر آلودگی عنصر روی قرار گرفته است. شباهت روند تغییرات عناصر نیکل، کروم، کبالت، وانادیم، آهن، منیزیم و آلومینیم مغزه‌های مختلف می‌تواند نشان دهنده منشأ زمین‌زاد این عناصر باشد. مهم‌ترین منابع آلودگی انسان‌زاد در منطقه، تعمیر و نگهداری قایق‌ها و لنج‌ها است که به دلیل ریختن روغن موتور، سوخت و رنگ در خلیج، باعث آلودگی رسوبات خلیج به عناصر سرب، روی و مس شده است. در فصل تابستان نیز به دلیل حاکمیت سامانه باران‌های موسمی تابستانی، وزش باد در جهت جنوب غرب - شمال شرق، و امواج پر قدرت، خط ساحلی فرسایش یافته و رسوبات بستر دریا به سمت ساحل منتقل، و باعث آلودگی زمین‌زاد عناصر نیکل، کروم و آهن در رسوبات می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خلیج چابهار، استان سیستان و بلوچستان، فلزات سنگین، آلودگی

مقدمه

در بسیاری از کشورهای جهان از جنگل‌گرناي خودرو یا کاشته شده توسط انسان، جهت کاهش آلودگی پساب‌های انسانی استفاده می‌شود. این بوم‌سامانه‌ها در بعضی بخش‌های سواحل جنوبی کشور به ویژه در سواحل خلیج چابهار توسط انسان ایجاد شده است. این نواحی به دلیل وجود خاصیت فیزیکی و شیمیایی متغیر، می‌تواند نقش مهمی را به عنوان محل ته‌نشست و یا منبع فلزات سنگین در محیط‌های ساحلی بازی کند (Harbison, 1986). آلودگی زیست‌محیطی فلزات سمناک در حال تبدیل شدن به یک پدیده جهانی می‌باشد. به دلیل افزایش نگرانی آثار آلودگی‌های فلزی بر سلامت انسان و بوم‌سامانه‌ها، پژوهش‌های متعددی در این رابطه در سواحل بسیاری از نقاط دنیا انجام شده است (Bertolotto et al., 2003; Feng et al., 2004; Wang et al., 2007).

رسوبات محیط‌های ساحلی محل تجمع انواع آلاینده‌های ورودی به ساحل می‌باشد که از این میان، فلزات سنگین به دلیل سمناکی بالا، قابلیت زیست‌انباشت و پایداری زیاد، از اهمیت بالایی برخوردار است (Tam & Wong, 2000; Clark et al., 1998). نزدیکی سواحل به منابع آلودگی موجود در خشکی باعث شده است که طی سال‌های اخیر، غلظت بالایی از فلزات سنگین در رسوبات بسیاری از بنادر و مناطق ساحلی سراسر دنیا مشاهده شود (Feng et al., 2007; Wang et al., 2004). افزایش شهرسازی، توسعه صنعت، فعالیت‌های تفریحی، تجاری، قایق‌رانی، بارگیری و گاهی نظامی، از جمله منابع انسان‌زاد فلزات سنگین ورودی به مناطق ساحلی می‌باشد. علاوه بر آن، سامانه‌های گرمایی، واحدهای زمین‌شناختی و بستر اقیانوسی دریا را می‌توان به عنوان منابع زمین‌زاد فلزات سنگین ورودی به مناطق ساحلی معرفی کرد.

سانتیمتری انتخاب گردید. نمونه‌های رسوب در آزمایشگاه دانشگاه شیراز با الک ۲۳۰ مش (قطر کمتر از ۶۳ میکرون) الک شد و برای تجزیه شیمیایی به روش طیف سنج جرمی پلاسمای جفتیده القایی (ICP-MS) به آزمایشگاه Acme کانادا ارسال گردید. به منظور تعیین صحت و دقت داده‌ها، یک نمونه استاندارد و سه نمونه تکراری نیز ارسال شد.

بحث

در (جدول ۱) آمار توصیفی فلزات سنگین در نمونه‌های رسوب با عیار طبیعی عناصر در نمونه مرجع و شیل میانگین مقایسه شده است. در این بررسی، نمونه S1 (ماسه بادی) به دلیل دوری از مناطق آلاینده احتمالی، به عنوان نمونه مرجع انتخاب شد. در بین نمونه‌های رسوب سطحی، غلظت عناصر روی و مس در اسکله هفت تیر چابهار (نمونه شماره ۱)، اسکله کنارک (نمونه شماره ۹)، اسکله شهید بهشتی (نمونه شماره ۳) و اسکله تجاری شهید کلانتری (نمونه شماره ۴) اختلاف قابل توجهی با سایر مناطق دارد. غلظت عنصر سرب در اسکله هفت تیر چابهار (نمونه شماره ۱) $18/49 \text{ ppm}$ است که از سایر مناطق بیشتر می‌باشد. این مناطق در معرض فعالیت‌های انسان است و انتقال ذرات ریز فلزی توسط امواج غالب منطقه می‌تواند دلیل آلودگی نمونه‌های رسوب باشد. منشا این فلزات احتمالا ریختن سوخت حاوی سرب، رنگ و روغن قایق‌ها و لنج‌ها در آب دریا است. این روغن‌ها به دلیل اصطکاک زیاد و سایش طولانی مدت قطعات موتور، حاوی مقادیر زیادی ذرات فلزی می‌باشد. غلظت میانگین عناصر نیکل ($51/89 \text{ ppm}$)، کروم ($36/7 \text{ ppm}$)، کبالت ($9/57 \text{ ppm}$)، وانادیم ($23/8 \text{ ppm}$)، منیزیم ($1/35 \text{ ppm}$)، آهن (2 ppm) و آلومینیم ($1/12 \text{ ppm}$) نمونه‌های رسوب از غلظت آن‌ها در نمونه مرجع بیشتر است که احتمالا به دلیل ماهیت سنگ‌های پوسته اقیانوسی و رسوبات افیولیتی بستر دریای عمان می‌باشد. به دلیل عملکرد امواج و سامانه باران‌های موسمی تابستانی در فصل تابستان، بسیاری از کانی‌ها که دارای فلزات سنگین مانند نیکل، کروم، کبالت، وانادیم، منیزیم و آهن است، می‌تواند از رسوبات افیولیتی بستر دریا به سمت سواحل ماسه‌ای رانده شده و باعث افزایش غلظت فلزات سنگین در رسوبات این مناطق شود. غلظت میانگین عناصر کادمیم ($0/19 \text{ ppm}$)، مولیبدن ($0/55 \text{ ppm}$) و سلنیم ($0/14 \text{ ppm}$) نمونه‌های رسوب نیز از غلظت آن‌ها در نمونه مرجع بیشتر است. میانگین غلظت عنصر آرسنیک ($9/51 \text{ ppm}$) می‌باشد که در صورت آلودگی انسان‌زاد، می‌تواند در شرایط قلیایی آب دریا (میانگین $8/12$ در ایستگاه‌های نمونه برداری)، متحرک شده و وارد فاز محلول شود. بیشترین غلظت عنصر آرسنیک ($13/4 \text{ ppm}$)، $9/2 \text{ ppm}$ و $8/3 \text{ ppm}$ به ترتیب در اسکله هفت تیر چابهار (نمونه شماره ۱)، اسکله تجاری شهید کلانتری (نمونه شماره ۴) و اسکله شهید بهشتی (نمونه شماره ۳) قابل مشاهده است. بیشترین غلظت عناصر مولیبدن ($2/41 \text{ ppm}$) و کادمیم ($0/88 \text{ ppm}$) در اسکله شهید بهشتی (نمونه شماره ۳) مشاهده می‌شود. بیشترین غلظت عنصر کلسیم ($33/97 \text{ ppm}$) در بین نمونه‌های رسوب مربوط به نمونه مرجع است که به دلیل وجود مقدار زیاد پوسته آهکی در آن می‌باشد. با توجه به اندازه و بار عنصر استرانسیم، این عنصر می‌تواند جانشین عنصر کلسیم در کانی‌ها شود. غلظت بسیار بالای عنصر استرانسیم در نمونه مرجع ($1811/5 \text{ ppm}$) را می‌توان به جانشینی این عنصر به جای عنصر کلسیم در پوسته‌های آهکی نسبت داد.

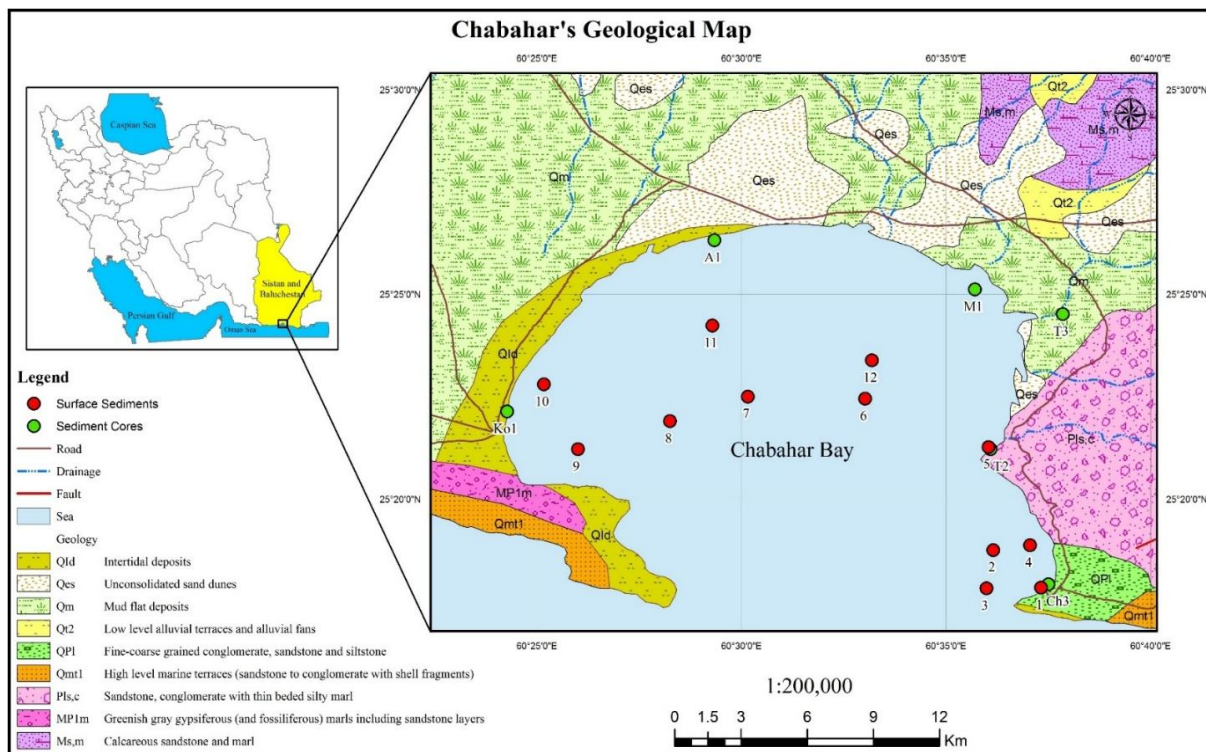
طی سال‌های اخیر، بررسی‌های زیست‌محیطی تغییرات میزان فلزات سنگین در سواحل جنوبی کشور اکثرا معطوف به نواحی ساحلی خلیج فارس بوده (جاوید، ۱۳۸۶؛ Karbassi et al., 2005; Sharghi, 2008; Sadrinassab, 2008) و با وجود اهمیت منطقه مورد مطالعه به دلیل شکل آمگایی و چرخش محدود آب در آن، بجز چند مطالعه محدود، پژوهش جامعی در ارتباط با آلودگی سواحل دریای عمان و بخصوص خلیج چابهار به فلزات سنگین صورت نگرفته است. هدف این تحقیق بررسی توزیع سطحی و عمقی فلزات سنگین انتخابی در رسوبات ساحلی و دریایی خلیج چابهار می‌باشد.

ویژگی‌های عمومی و زمین‌شناختی منطقه

خلیج چابهار با طول جغرافیایی $10^{\circ} 24' 60''$ تا $40^{\circ} 37' 60''$ و عرض جغرافیایی $20^{\circ} 17' 20''$ تا $25^{\circ} 26' 45''$ در جنوب شرق استان سیستان و بلوچستان، در سواحل دریای عمان قرار دارد. عمق متوسط آن ۶ متر، بیشینه عمق دهانه ورودی ۱۹ متر، مساحت آن حدود ۲۹۰ کیلومتر و قطر آن ۲۱ کیلومتر می‌باشد (Owfi et al., 2007). خلیج چابهار از نظر زمین‌شناسی در مکران ساحلی قرار دارد. از ویژگی‌های عمومی مکران ساحلی می‌توان وجود مجموعه‌های افیولیتی، نهشته‌های تیپ فلیش و عدم بروزند سنگ‌های کهن‌تر از کرتاسه را نام برد. واحدهای چینه‌شناسی که در این ناحیه رخنمون دارد در مجموع ماسه‌سنگ، مارن و کنگلومرا می‌باشد. نواحی کم عمق دریا نیز از همین واحدهای رسوبی تشکیل شده است (شکل ۱) (نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چابهار).

روش کار

عملیات صحرایی و نمونه‌برداری از محل اسکله شهید بهشتی، اسکله صیادی هفت تیر چابهار، اسکله تجاری شهید کلانتری، اسکله صیادی تیس، خور منطقه آزاد چابهار، جنگل کُرناهی جدید، کارخانه آب‌شیرین‌کن، جزیره خرچنگ، اسکله صیادی کنارک و قسمت عمیق‌تر دریا در پاییز ۱۳۹۱ انجام شد (شکل ۱). مغزه‌گیری در ایستگاه‌های منطقه کشندی، به صورت دستی توسط لوله‌های پلی‌اتیلن چگال به قطر ۵ سانتیمتر، و نمونه‌برداری از رسوبات داخل خلیج (تا عمق $18/3$ متری) توسط چنگه وان وین (Van Veen Grab) با سطح مقطع 250 سانتیمتر انجام شد. هنگام نمونه‌برداری، pH آب دریا با دستگاه pH متر قابل حمل مدل pH330i اندازه‌گیری شد تا از آن برای تجزیه و تحلیل داده‌های زمین‌شیمیایی استفاده شود. نمونه‌های رسوب بلافاصله پس از نمونه‌برداری به آزمایشگاه موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ایستگاه پژوهشی دریای عمان و اقیانوس هند-چابهار منتقل گردید. مغزه‌های رسوب پس از برش طولی لوله پلی‌اتیلن، به دو نیم تقسیم شد. یک نیمه مغزه با فواصل ۵ سانتیمتر به بخش‌های کوچکتر برش داده شد و رسوب هر قسمت در ظرف مجزا، در دمای محیط خشک شد و نیمه دیگر ذخیره شد. نمونه‌های رسوب داخل خلیج نیز بصورت جداگانه در ظروف پلی‌اتیلن چگال ریخته شد تا در دمای محیط خشک شود. مقدار ماسه رسوبات به روش دانه‌بندی تر (Shau, 1965) و مقدار سیلت و رس آن‌ها توسط دستگاه دانه‌بندی لیزری مدل Fritsch Analysatta 22 اندازه‌گیری شد. در نهایت پس از بررسی بیشتر و در نظر گرفتن توزیع مناسب نقاط نمونه‌برداری، نمونه‌های غیرضروری حذف شد و ۱۲ نمونه رسوب سطحی و ۶ مغزه رسوب انتخاب شد. از هر مغزه رسوبی سه عمق صفر تا ۵ سانتیمتری، ۳۰ تا ۴۰ سانتیمتری و ۶۰ تا ۷۰



شکل ۱. نقشه زمین شناسی و موقعیت نقاط نمونه برداری در منطقه

جدول ۱. آمار توصیفی فلزات سنگین در نمونه های رسوب و عیار طبیعی عناصر در نمونه مرجع و شیل میانگین

عناصر پارامترها	حد آشکارسازی	تعداد	کمینه	بیشینه	میانگین	میانه	انحراف معیار	نمونه مرجع	شیل میانگین*
Cu (ppm)	۰/۰۱	۳۰	۴/۳	۵۶/۱۹	۱۴/۶۶	۱۲/۴۷	۱۰/۸۹	۴/۱۶	۴۵
Pb (ppm)	۰/۰۱	۳۰	۵/۷۵	۲۵/۵۴	۱۴/۴۴	۱۲/۶۱	۵/۲	۱۴/۶۶	۲۰
Zn (ppm)	۰/۱	۳۰	۱۶/۵	۱۰۰/۱۶	۴۶/۸۶	۴۰/۵۵	۲۳/۶۶	۶/۷	۹۵
Ni (ppm)	۰/۱	۳۰	۲۲/۱	۸۹/۵	۵۱/۸۹	۵۳/۴۵	۱۹/۱	۱۰/۳	۶۸
Cr (ppm)	۰/۵	۳۰	۲۰/۷	۵۴/۹	۳۶/۷	۳۷/۱۵	۹/۷۱	۹/۴	۹۰
Co (ppm)	۰/۱	۳۰	۵/۲	۱۵/۳	۹/۵۷	۹/۵۵	۲/۵۸	۸/۶	۱۹
V (ppm)	۲	۳۰	۱۵	۳۳	۲۳/۸	۲۴/۵	۵/۶۹	۱۷	۱۳۰
Cd (ppm)	۰/۰۱	۳۰	۰/۰۶	۰/۸۸	۰/۱۹	۰/۱	۰/۲	۰/۱۴	۰/۳
As (ppm)	۰/۱	۳۰	۴/۷۰	۱۸/۴۰	۹/۵۱	۸/۷۰	۳/۲۳	۳/۱۵	۱۳
Sr (ppm)	۰/۵	۳۰	۱۵۵	۷۹۸/۲۰	۳۳۸/۵۰	۳۲۷/۴۰	۱۴۵/۷۶	۱۸۱۱/۵	۳۰۰
Mo (ppm)	۰/۰۱	۳۰	۰/۰۹	۲/۶۴	۰/۵۵	۰/۲۶	۰/۶۸	۰/۴۷	۲/۶
Se (ppm)	۰/۱	۳۰	۰/۰۵	۰/۵	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۱	۰/۶
Mn (ppm)	۱	۳۰	۴۰۵	۵۷۴	۴۹۷/۲	۴۹۸/۵	۶۳/۱۸	۳۱۸	۸۵۰
Fe (%)	۰/۰۱	۳۰	۱/۰۷	۳/۰۱	۲	۲/۰۴	۰/۵۸	۱/۲۳	۷/۴
Ca (%)	۰/۰۱	۳۰	۵/۱	۱۷/۸۱	۹/۵۱	۸/۶۴	۲/۸۹	۳۳/۹۷	۲/۲۱
Mg (%)	۰/۰۱	۳۰	۰/۶۹	۲/۵۸	۱/۳۵	۱/۳۸	۰/۴۴	۱/۱۱	۱/۵
S (%)	۰/۰۲	۳۰	۰/۰۵	۱/۰۷	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۰۵	۰/۲۴
Al (%)	۰/۰۱	۳۰	۰/۴۲	۱/۹	۱/۱۲	۱/۱۶	۰/۴۲	۰/۲۷	۸

*Turekian & Wedepohl, 1961

دهد که نمونه‌های رسوب از لحاظ عنصر روی آلودگی بسیار بالا و از لحاظ عناصر مس، نیکل و کروم آلودگی قابل ملاحظه دارد. آلودگی عناصر سلنیم و آهن متوسط است و عناصر آرسنیک، مولیبدن و کادمیم بدون آلودگی می‌باشد. عنصر سرب در اسکله هفت تیر چابهار (نمونه شماره ۱) آلودگی متوسط دارد و در سایر نمونه‌های رسوب بدون آلودگی است. شاخص بار آلودگی (PLI) به منظور شناخت اثرات آلودگی کل ناشی از فلزات مختلف و ارزیابی شدت آلودگی استفاده می‌شود (Sharma and Subramanian, 2010). این شاخص با وارد کردن ضریب آلودگی (CF) در رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n}$$

شاخص بار آلودگی کوچکتر از ۱، غلظت طبیعی و شاخص بار آلودگی بزرگتر از ۱ نشان دهنده آلودگی است (Cabrera et al, 1999). بزرگترین شاخص بار آلودگی به ترتیب در اسکله شهید بهشتی (نمونه شماره ۳)، اسکله هفت تیر چابهار (نمونه شماره ۱)، اسکله تجاری شهید کلاتری (نمونه شماره ۵) و اسکله کنارک (نمونه شماره ۱۱) مشاهده می‌شود (شکل ۵).

همبستگی بین فلزات سنگین، ماسه و رس با استفاده از نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 22 محاسبه شد (جدول ۵). بین فلزات سنگین همبستگی زیادی وجود دارد که به دلیل عدم تنوع منابع آلاینده در منطقه می‌باشد. مهمترین منابع آلودگی در محیط ساحلی خلیج چابهار تعمیر، تعویض روغن و نقاشی لنج‌ها و قایق‌های تجاری و صیادی است. دلیل دیگر، یکنواختی ترکیب زمین‌شیمیایی واحدهای زمین‌شناختی ساحلی می‌باشد. ماسه بیشترین همبستگی را با عناصر استرانسیم (۰/۵۶) و کلسیم (۰/۵۲) دارد که نشان دهنده وجود مقادیر بسیار زیاد عنصر کلسیم (به شکل پوسته‌های آهکی) و استرانسیم (به صورت جانشین کلسیم در پوسته‌های آهکی) در رسوبات ماسه‌ای می‌باشد. همبستگی بالای عناصر کلسیم و استرانسیم (۰/۸۹) به دلیل جانشینی عنصر استرانسیم به جای عنصر کلسیم در پوسته‌های آهکی است. همبستگی عناصر مس و سرب ۰/۹ می‌باشد که نشان دهنده منشا آلاینده مشترک آن‌ها است. از آنجا که در منطقه هیچگونه منبع آلاینده عنصر نیکل وجود ندارد، به دلیل همبستگی بسیار زیاد عنصر کروم و کبالت، آهن، منیزیم و آلومینیم با عنصر نیکل (بیش از ۰/۹) و نیز همبستگی زیاد عنصر وانادیم با عنصر نیکل (بیش از ۰/۸)، غلظت بالای این عناصر در رسوبات را می‌توان به حضور کانی‌های سنگین و کانی‌های رسی در رسوبات ساحلی حاصل از افیولیت‌ها نسبت داد. لبلانک و سئولنیر (۱۹۹۲) وجود سولفید نیکل در سنگ‌های افیولیتی بستر دریای عمان را گزارش کرده‌اند. دمورا و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی غلظت فلزات در رسوبات سواحل جنوبی دریای عمان دریافتند که منشا فلز نیکل در رسوبات، سنگ بستر افیولیتی می‌باشد.

به منظور تعیین منشا زمین‌زاد و انسان‌زاد آلودگی، با استفاده از رابطه زیر، ضریب غنی‌شدگی محاسبه شد:

$$EF = (X/RE)_{\text{Sample}} / (X/RE)_{\text{Baseline}}$$

در این رابطه EF ضریب غنی‌شدگی، RE غلظت عنصر مرجع و X غلظت عنصر مورد نظر می‌باشد. در این پژوهش برای محاسبه ضریب غنی‌شدگی، اسکانه‌دیم به عنوان عنصر مرجع و نمونه زمینه به عنوان نمونه مرجع انتخاب شد. جدیدترین رده‌بندی ضریب غنی‌شدگی توسط چن و همکاران (۲۰۰۷) ارائه شده است (جدول ۲).

با توجه به جدول فوق و (شکل ۲)، عناصر روی و نیکل غنی‌شدگی متوسط دارد. غنی‌شدگی عناصر مس، کروم، وانادیم، سلنیم، منگنز و آهن کم است. عناصر سرب، کبالت، کادمیم، استرانسیم و منیزیم بدون غنی‌شدگی است. عناصر آرسنیک و مولیبدن نیز بدون غنی‌شدگی است که می‌تواند به دلیل عدم وجود منابع آلودگی یا متحرک شدن آن‌ها در شرایط قلیایی دریا (میانگین ۸/۱۲ در ایستگاه‌های نمونه‌برداری) و وارد شدن آن به فاز محلول باشد. در اسکله هفت تیر چابهار (نمونه شماره ۱)، سرب بیشترین غنی‌شدگی را دارد. با استفاده از شاخص زمین‌انباشت می‌توان درجه آلودگی رسوب را ارزیابی نمود و آن را بر اساس کیفیت استاندارد رده‌بندی کرد. این شاخص طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Muller, 1979):

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_n / 1.5 \times B_n)$$

C_n غلظت عنصر در نمونه، B_n غلظت عنصر در نمونه مرجع و ضریب ۱/۵ برای حذف تاثیر لیتولوژی‌های مختلف در منطقه است. بر اساس نتایج شاخص زمین‌انباشت، هفت رده I_{geo} و کیفیت رسوب را می‌توان در نظر گرفت (جدول ۳).

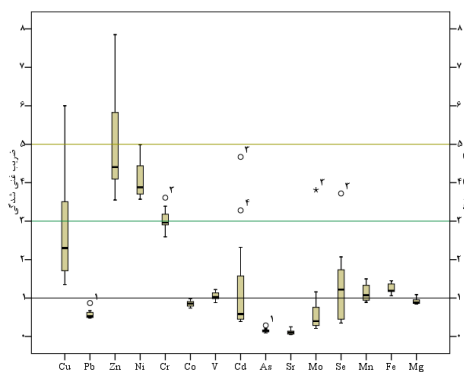
(جدول ۳) و نمودار جعبه‌ای شاخص زمین‌انباشت فلزات سنگین (شکل ۳) نشان می‌دهد که آلودگی عنصر روی نمونه‌های رسوب متوسط تا بالا است. عناصر مس، نیکل، کروم و آلومینیم آلودگی متوسط دارد. عناصر سلنیم و آهن، نآلوده تا دارای آلودگی متوسط می‌باشد. نمونه‌های رسوب از لحاظ عناصر سرب، کبالت، وانادیم، کادمیم، آرسنیک، استرانسیم، مولیبدن، منگنز و منیزیم نآلوده است. میزان آلودگی یا غنی‌شدگی فلزات سنگین در رسوبات را می‌توان با محاسبه ضریب آلودگی (C_f^i) ارزیابی کرد (Hakanson, 1980):

$$C_f^i = C_i / C_n^i$$

در این رابطه C_i غلظت عنصر در رسوب و C_n^i غلظت همان عنصر در نمونه مرجع است. هاکانسون (۱۹۸۰) برای C_f^i چهار رده ارائه کرده است (جدول ۴). (جدول ۴) و نمودار جعبه‌ای ضریب آلودگی فلزات سنگین (شکل ۴)، نشان می‌-

جدول ۲. رده بندی رسوبات بر اساس ضریب غنی شدگی

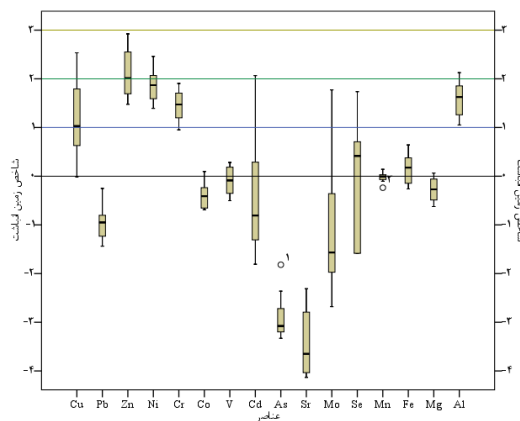
میزان غنی شدگی	ضریب غنی شدگی
بدون غنی شدگی	کمتر از ۱
غنی شدگی کم	۱ تا ۳
غنی شدگی متوسط	۳ تا ۵
غنی شدگی متوسط تا شدید	۵ تا ۱۰
غنی شدگی شدید	۱۰ تا ۲۵
غنی شدگی بسیار شدید	۲۵ تا ۵۰
غنی شدگی بسیار بسیار شدید	بیش از ۵۰



شکل ۲. نمودار جعبه ای ضریب غنی شدگی عناصر

جدول ۳. رده های شاخص زمین انباشت

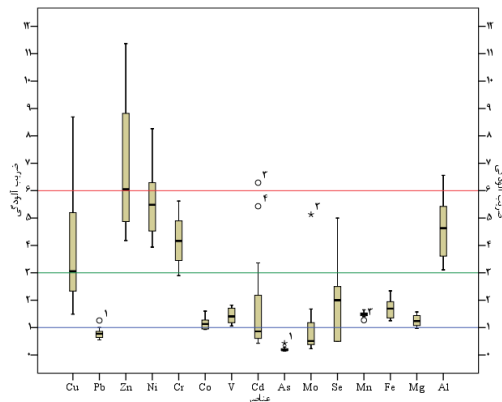
رده I_{geo}	گستره	کیفیت رسوب
۶	بیشتر از ۵	آلودگی بسیار بالا
۵	۴ تا ۵	آلودگی بالا تا آلودگی بسیار بالا
۴	۳ تا ۴	آلودگی بالا
۳	۲ تا ۳	آلودگی متوسط تا آلودگی بالا
۲	۱ تا ۲	آلودگی متوسط
۱	صفر تا ۱	ناآلوده تا آلودگی متوسط
۰	کمتر از صفر	ناآلوده



شکل ۳. شاخص زمین انباشت فلزات سنگین بر اساس نمونه مرجع

جدول ۴- رده‌های ضریب آلودگی

میزان آلودگی	ضریب آلودگی
بدون آلودگی	کمتر از ۱
آلودگی متوسط	۱ تا ۳
آلودگی قابل ملاحظه	۳ تا ۶
آلودگی بسیار بالا	بیشتر از ۶

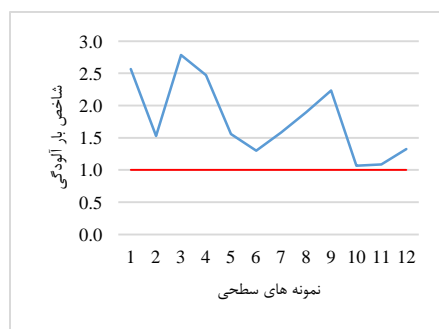


شکل ۴- ضریب آلودگی فلزات سنگین

جدول ۵- همبستگی اسپیرمن بین عناصر، رس و ماسه نمونه‌های رسوب

	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	Co	V	Cd	As	Sr	Mo	Se	Mn	Fe	Ca	Mg	S	Al	Sand	Clay
Clay	۰.۲۹	۰.۱۸	۰.۵۵	۰.۶۸*	۰.۶۹	۰.۶۸	۰.۶۰	۰.۰۱	-۰.۲۰	-۰.۴۵	۰.۲۰	-۰.۰۲	۰.۱۴	۰.۶۶*	-۰.۴۶	۰.۶۰	۰.۲۴	۰.۶۸	-۰.۵۸	۱
Sand	۰.۲۷	۰.۳۶	۰.۰۵	-۰.۰۲	-۰.۰۸	-۰.۱۷	-۰.۱۱	۰.۴۸	۰.۲۲	۰.۵۶	۰.۲۵	۰.۴۹	-۰.۰۴	-۰.۰۶	۰.۵۲	۰.۰۱	۰.۲۴	-۰.۰۴	۱	
Al	۰.۸۲	۰.۷۳**	۰.۹۰**	۰.۹۷**	۰.۹۹**	۰.۹۰**	۰.۹۲**	۰.۶۴*	-۰.۰۱	-۰.۰۴	۰.۷۷**	۰.۶۷*	-۰.۲۵	۰.۹۸**	-۰.۱۱	۰.۹۸**	۰.۷۳**	۱		
S	۰.۹۰**	۰.۸۹**	۰.۷۵**	۰.۶۶*	۰.۶۶*	۰.۴۷	۰.۷۱*	۰.۸۹**	۰.۴۵	۰.۴۷	۰.۹۰**	۰.۷۰*	-۰.۵۲	۰.۶۸*	۰.۲۹	۰.۷۷**	۱			
Mg	۰.۸۵	۰.۷۴**	۰.۸۸**	۰.۹۶**	۰.۹۶**	۰.۸۸	۰.۹۲**	۰.۷۰*	-۰.۰۱	-۰.۰۶	۰.۸۱**	۰.۷۰*	-۰.۳۲	۰.۹۷**	-۰.۰۲	۱				
Ca	۰.۲۸	۰.۳۴	۰.۰۲	-۰.۱۷	-۰.۱۵	-۰.۳۱	۰.۰۹	۰.۶۳*	۰.۵۵	۰.۹۸**	۰.۴۸	۰.۴۰	-۰.۴۲	-۰.۱۶	۱					
Fe	۰.۸۰**	۰.۶۷*	۰.۹۲**	۰.۹۷**	۰.۹۹**	۰.۹۳**	۰.۹۰**	۰.۶۱*	-۰.۰۲	-۰.۰۸	۰.۷۶**	۰.۶۸*	-۰.۳۱	۱						
Mn	-۰.۵۹۵	-۰.۳۶	-۰.۴۵	-۰.۱۵	-۰.۲۸	-۰.۱۲	-۰.۴۹	-۰.۶۰*	-۰.۳۶	-۰.۴۵	-۰.۶۰۴	-۰.۵۳	۱							
Se	۰.۸۳**	۰.۸۱**	۰.۷۶**	۰.۶۲*	۰.۶۷*	۰.۵۷	۰.۷۰*	۰.۸۸**	۰.۴۰	۰.۴۹	۰.۸۳**	۱								
Mo	۰.۹۱**	۰.۸۴**	۰.۸۶**	۰.۷۰*	۰.۷۴**	۰.۵۹	۰.۸۳**	۰.۹۲**	۰.۴۱	۰.۵۵	۱									
Sr	۰.۳۶	۰.۴۱	۰.۱۰	-۰.۰۸	-۰.۰۸	-۰.۲۰	۰.۱۴	۰.۷۰*	۰.۵۴	۱										
As	۰.۳۲	۰.۵۶	۰.۲۲	-۰.۱۰	-۰.۰۲	-۰.۲۰	۰.۰۷	۰.۴۵	۱											
Cd	۰.۸۹**	۰.۸۶**	۰.۶۹*	۰.۵۷	۰.۶۰*	۰.۴۰	۰.۷۳**	۱												
V	۰.۸۷**	۰.۷۰*	۰.۸۸**	۰.۸۴**	۰.۹۲**	۰.۸۰**	۱													
Co	۰.۶۰*	۰.۴۹	۰.۸۲**	۰.۹۳**	۰.۹۳**	۱														
Cr	۰.۷۹**	۰.۶۸*	۰.۹۱**	۰.۹۷**	۱															
Ni	۰.۷۲**	۰.۶۳*	۰.۸۳**	۱																
Zn	۰.۸۹**	۰.۷۹**	۱																	
Pb	۰.۹۰**	۱																		
Cu	۱																			

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
 **. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



شکل ۵- شاخص بار آلودگی نمونه‌های رسوب

غلظت سرب (5/75 ppm) را می‌توان در عمق ۶۰ تا ۷۰ سانتیمتری مغزه اسکله کنارک (مغزه K01) مشاهده کرد. بیشترین غلظت عنصر روی در منطقه مورد مطالعه در اسکله صیادی تیس (مغزه T1) مشاهده می‌شود بطوریکه با افزایش عمق، غلظت این عنصر یک روند افزایشی را نشان می‌دهد و در عمق ۶۰ تا ۷۰ سانتیمتری به ۱۰۰/۶۰ ppm می‌رسد. غلظت روی در عمق صفر تا ۵ سانتیمتری مغزه رسوبات اسکله هفت تیر چابهار (مغزه Ch3) ۸۷/۸ ppm و در عمق صفر تا ۵ سانتیمتری مغزه رسوبات جنگل گرنای جدید (مغزه M1) ۴۰ ppm می‌باشد. روند عمقی غلظت این عنصر می‌تواند نشان دهنده دخالت انسان در توزیع عنصر روی در این ایستگاه‌ها باشد.

غلظت عنصر روی در عمق صفر تا ۵ سانتیمتری مغزه رسوبات خور منطقه آزاد چابهار (مغزه T3) به ۶۰/۶ ppm می‌رسد که با توجه به روند عمقی، دارای غنی‌شدگی است. کمترین غلظت عنصر روی (۱۶/۵ ppm) مربوط به عمق صفر تا ۵ سانتیمتری مغزه رسوبات کارخانه آب‌شیرین‌کن (مغزه A1) می‌باشد. غلظت عنصر مس در عمق صفر تا ۵ سانتیمتری مغزه رسوبات اسکله هفت تیر چابهار (مغزه Ch3) ۵۶/۱۹ ppm است که با توجه به روند کاهشی شدید غلظت آن نسبت عمق، نقش فعالیت انسانی در توزیع این عنصر مشخص می‌شود.

در طول مغزه رسوبات کنار کارخانه آب‌شیرین‌کن (مغزه A1) روند خاصی از تغییر غلظت عناصر مشاهده نمی‌شود. بنابراین کارخانه آب‌شیرین‌کن نقش مهمی در تغییر توزیع طبیعی عناصر ندارد. مغزه رسوبات اسکله کنارک (مغزه K01) در ساحل نمونه‌برداری شده و روند عنصری معنی‌داری در آن مشاهده نمی‌شود ولی غلظت بالای عنصر روی (۷۳/۷ ppm) در نمونه سطحی اسکله کنارک (نمونه شماره ۹) می‌تواند نشان دهنده آلودگی روی در این محیط نیمه بسته باشد.

نتیجه‌گیری

بررسی و پایش آلودگی زیست‌محیطی فلزات سنگین در رسوبات محیط نیمه بسته اسکله‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. بالاترین غلظت نیکل، کروم، کبالت، وانادیم، آهن، منیزیم و آلومینیم در بین تمام نمونه‌ها، در خور منطقه آزاد چابهار مشاهده می‌شود. نتایج تجزیه شیمیایی به همراه ضریب غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشت و ضریب آلودگی فلزات سنگین، نشان دهنده آلودگی عناصر نیکل، کروم، آهن، روی و مس در رسوبات می‌باشد. با توجه به ضریب آلودگی، عنصر سرب در اسکله هفت تیر چابهار آلودگی متوسط دارد. بیشترین آلودگی در خلیج چابهار در اسکله هفت تیر چابهار، اسکله شهید بهشتی، اسکله شهید کلانتری و اسکله کنارک مشاهده می‌شود. نتایج ضریب همبستگی و تحلیل خوشه‌ای نشان داد که عناصر نیکل، کروم، کبالت، وانادیم، آهن، منیزیم و آلومینیم منشأ زمین‌زاد و عناصر سرب، روی و مس منشأ انسان‌زاد دارد.

آهن نسبت به رس همبستگی بیشتری با فلزات سنگین دارد که نشان دهنده نقش مهم‌تر اکسی‌هیدروکسیدهای آهن در خارج کردن فلزات سنگین از آب می‌باشد. روند کاهشی شدید عنصر مس نسبت به عمق مغزه رسوبات اسکله هفت تیر چابهار نشان دهنده نقش فعالیت انسانی در توزیع این عنصر در منطقه می‌باشد.

مهمترین منابع آلاینده خلیج چابهار، سوخت‌های حاوی سرب، رنگ و روغن قایق‌ها و لنج‌ها است. این مواد آلاینده پس از ریختن در آب دریا، توسط امواج غالب منطقه به ساحل منتقل شده و باعث آلودگی عناصر سرب، روی و مس در

pH متوسط آب دریا هنگام نمونه‌برداری ۸/۱۲ بود. در این pH، کانی‌های رسی و اکسی‌هیدروکسیدها دارای سطوح باردار منفی می‌باشد و با جذب سطحی فلزات سنگین دارای بار مثبت، آن‌ها را از ستون آب خارج می‌کند (Sarkar, 2002). همبستگی عنصر آهن با فلزات سنگین متوسط تا بسیار زیاد (۰/۶ تا ۰/۹) است که به دلیل منشأ یکسان این عناصر با عنصر آهن و نیز جذب سطحی آن‌ها توسط اکسی‌هیدروکسیدهای آهن می‌باشد. عدم وجود همبستگی معنی‌دار عنصر منگنز با فلزات سنگین نشان می‌دهد که اکسی‌هیدروکسیدهای منگنز در جذب سطحی این عناصر نقش مهمی ندارد.

همبستگی جزء رس اندازه با عناصر نیکل، کروم، کبالت، وانادیم، آهن، منیزیم و آلومینیم بیش از ۰/۶ است که به دلیل وجود این عناصر در کانی‌های رسی پوسته اقیانوسی (مانند کلینوکلر و کلریت) و نیز جذب سطحی آن‌ها توسط کانی‌های رسی است. عنصر آهن نسبت به رس همبستگی بیشتری با فلزات سنگین دارد که نشان دهنده نقش مهم‌تر اکسی‌هیدروکسیدهای آهن در خارج کردن فلزات سنگین از آب می‌باشد. تحلیل خوشه‌ای به روش Word's Method انجام شد (شکل ۶). عناصر نیکل، کروم، کبالت، وانادیم، آهن، منیزیم و آلومینیم در یک خوشه قرار گرفته است که نشان دهنده منشأ زمین‌زاد آن‌ها است.

همچنین قرار گرفتن عنصر سرب، روی و مس در خوشه دیگر نشان دهنده منشأ انسان‌زاد آن‌ها می‌باشد. پس از تجزیه شیمیایی نمونه‌های مربوط به اعماق مختلف مغزه‌های رسوبی، با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013، غلظت هر عنصر در برابر عمق مربوطه ترسیم شد و با تفسیر نمودارهای تهیه شده، توزیع قائم عناصر بررسی شد (شکل ۷). تقریباً تمام نمونه‌های رسوب غنی‌شدگی عناصر نیکل، کروم، کبالت، وانادیم، منیزیم، آهن و آلومینیم را نشان می‌دهد.

روند تغییرات این عناصر در هر مغزه مشابه است که می‌تواند نشان دهنده همبستگی بالا و منشأ زمین‌زاد این عناصر باشد. انطباق روند تغییر غلظت عنصر آهن در هر مغزه با روند تغییر غلظت بعضی از عناصر در همان مغزه می‌تواند نشان دهنده منشأ مشترک و نیز جذب سطحی این عناصر توسط هیدروکسیدهای آهن باشد.

بالاترین غلظت عناصر نیکل (۸۹/۵ ppm)، کروم (۵۴/۹۰ ppm)، کبالت (۱۵/۳۰ ppm) و وانادیم (۳۳ ppm)، منیزیم (۲/۵۸٪)، آهن (۳/۰۱٪) و آلومینیم (۱/۹٪) در بین تمام نمونه‌ها، در خور منطقه آزاد چابهار (مغزه T3) مشاهده می‌شود. اگرچه این زهکش از سازندهای آفیولیتی منطقه سرچشمه نمی‌گیرد، ولی از آنجا که منبعی برای آلودگی این عناصر در منطقه وجود ندارد، می‌توان خور منطقه آزاد را به عنوان یکی از منابع درون‌داد طبیعی عناصر نیکل، کروم، کبالت، وانادیم، منیزیم، آهن و آلومینیم به خلیج چابهار معرفی کرد.

آلودگی رسوبات این منطقه می‌تواند از طریق موجودات کفزی وارد زنجیره غذایی شده و حیات تمامی موجودات آبی و نیز موجوداتی که از جانوران آبی تغذیه می‌کند (به ویژه انسان) را به خطر اندازد. بیشترین غلظت عنصر سرب در منطقه مورد مطالعه (۲۵/۵۴ ppm) در عمق صفر تا ۵ سانتیمتری مغزه رسوبات اسکله هفت تیر چابهار (مغزه Ch3) مشاهده می‌شود و کاهش غلظت این عنصر با افزایش عمق می‌تواند نشان دهنده منشأ آلودگی انسان‌زاد عنصر سرب باشد.

غلظت سرب در عمق صفر تا ۵ سانتیمتری خور منطقه آزاد چابهار (مغزه T3) ۲۱/۲۴ ppm است و دارای روند کاهشی نسبت به عمق می‌باشد. کمترین

فصل تابستان که بسیاری از کانی‌های حاوی فلزات سنگین (مانند کلینوکلر و
قدردانی
نویسندگان مقاله از کارکنان موسسه ملی اقیانوس‌شناسی، ایستگاه پژوهشی دریای
عمان و اقیانوس هند-چابهار و معاونت پژوهشی دانشگاه شیراز به خاطر حمایت-
های مالی و آزمایشگاهی کمال تشکر را دارند.

رسوبات ساحلی می‌شود. همچنین عملکرد امواج و سامانه باران‌های موسمی در
کلریت) را از رسوبات افیولیتی بستر دریا به سمت سواحل ماسه‌ای حمل می‌کند،
می‌تواند باعث آلودگی عناصر نیکل، کروم و آهن در رسوبات شود.

منابع

- جاوید. ا. م.، ۱۳۸۶، مدل‌سازی تاثیر تغییر pH در انتقال فلزات سنگین (نیکل و کادمیم) ناشی از فعالیت‌های پتروشیمی بندر امام خمینی خلیج فارس (خورموسی)، علوم تکنولوژی محیط زیست (۹)، شماره ۴، ص ۱۳-۲.
- نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چابهار، وزارت معادن و فلزات، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- Bertolotto. R. M., Tortarolo. B., Frignani. M., Bellucci. L. G., Albanese. S., Cuneo. C., 2003, Heavy metals in coastal sediments of the Ligurian sea off Vado Ligure, *J. Phys.*, Vol: 107, No:1, p: 159-162.
- Cabrera. F., Clemente. L., Diaz Barrientos. E., Lopez. R., Murillo. JM., 1999, Heavy metal pollution of soils affected by the Guadiamar toxic flood, *Sci Tot Environ*, Vol: 242, P: 117-129.
- Chen. A., Lin. C., Lu. W., Wu. Y., Ma. Y., Li. J., Zhu. L., 2007, Well water contaminated by acidic mine water from the Dabaoshan Mine, South China: Chemistry and Toxicity, *Chemosphere*, Vol: 70, P: 248-255.
- Clark. M. W., McConchie. D., Lewis. D. W., Saenger. P., 1998, Redox stratification and heavy metal partitioning in Avicennia-dominated mangrove sediments: a geochemical model, *Chemical Geology*, Vol: 149, p: 147-171.
- De Mora. S., Fowler. S. W., Wyse. E. and Azemard. S., 2004, Distribution of heavy metals in marine bivalves, fish and coastal sediments in the Gulf and Gulf of Oman, *Marine Pollution Bulletin*, Vol: 49, P: 410-424.
- Feng. H., Han. X.F., Zhang. W.G., Yu. L.Z., 2004, A preliminary study of heavy metal contamination in Yangtze River intertidal zone due to urbanization, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol: 49, P: 910-915.
- Hakanson. L., 1980, Ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Res.*, Vol: 14, No: 5, P: 975-1001.
- Harbison. P., 1986, Mangrove muds: a sink or source for trace metals. *Marine Pollution Bulletin*, Vol: 17, p: 246-250.
- Karbassi. A. R., Nabi-Bidhendi. G. R., Bayati. I., 2005, Environmental geochemistry of heavy metals in a sediment core off Bushehr, Persian Gulf, Iran. *J. Environ. Health. Sci. Eng.*, Vol: 2, No: 4, p: 255-260.
- Leblanc. M. and Ceuleneer. G., 1992, Chromite crystallization in a multicellular magma flow: evidence from a chromitite dike in the Oman ophiolite, *Lithos*, Vol: 27, P: 231-257.
- Muller. G., 1979, Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seitt 1971, *Umschan*. Vol: 79, p: 778-783.
- Owfi. F., Rabbaniha. M. and Tosi. M., 2007, Geomorphological structure and habitat diversity of marine coastal ecosystems of Iranian zone, INOC, Jordean.
- Sadrinasab. M., 2008, Three-dimensional numerical modeling of the pollution dispersion in the Persian Gulf, International conference on Monitoring and modeling of Marine pollution, 1-3 December, Kish Island, Iran.
- Shau. B. K., 1965, Theory of sieving, *Journal Sedimentary Petrology*, Vol: 35, p: 750-753.
- Sharghi. A., 2008, Monitoring pollution in Persian Gulf, International conference on Monitoring and modeling of Marine pollution, 1-3 December, Kish Island, Iran.
- Sharma. S.K. and Subramanian. V., 2010, Source and distribution of trace metals and nutrients in Narmada and Tapti river basins, India, *Environ Earth Sci*, Vol: 61, P: 1337-1352.
- Sarkar. B., 2002, *Heavy Metals in the Environment*. Marcel Dekker, New York, p: 725.
- Tam. N. F. Y., Wong. W. S., 2000, Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. *Environmental Pollution*, Vol: 110, p: 195-205.
- Turekian. K.K. and Wedepohl. K.H., 1961, Distribution of the Elements in some major units of the Earth's crust, *Geological Society of America Bulletin*, Vol: 72, p: 175-192.
- Wang. X.C., Feng. H., Ma. H.Q., 2007, Assessment of Metal Contamination in Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Qingdao, China, *Clean*, Vol: 35, No: 1, p: 62-70.