



بررسی منشأ فلزات سنگین در رسوبات ماسه‌ای بخشی از دریای عمان در محدوده استان سیستان و بلوچستان

مریم سلیمانی¹، حمیدرضا پاکزاد^{1*}، مهرداد پسندی¹، موسی نقره‌ئیان¹ و مهدی کمالی²

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(2) گروه مهندسی شیمی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت: 1392/5/7، پذیرش: 1393/8/3

چکیده

منطقه مورد مطالعه در دریای عمان در محدوده استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. نمونه‌برداری از رسوبات سطحی بستر دریا در 16 نقطه به‌وسیله دستگاه گراب انجام گرفت. این رسوبات بر روی الک 200 تا 230 مش (ماسه بسیار ریز) و اغلب بر روی الک 230 مش قرار گرفتند. میانگین غلظت عناصر در رسوبات مورد بررسی به‌ترتیب Cu (9/99)، Cd (1/42)، Zn (36/72)، Sr (181/18)، Mn (377/33) و Fe (20247/55) است. انطباق غلظت عناصر روی و مس با فراوانی کانیهای تخریبی رسوبات بیانگر ارتباط بسیار نزدیک این عناصر با کانیهای بیوتیت و مسکویت است. منشأ این دو کانی، گرانودیوریت و گابروهای موجود در افیولیت‌های محدوده ایران‌شهر و گرانیت-پگماتیت‌ها و شیست‌های موجود در افیولیت‌ها و فلیش‌های شمال منطقه است که از طریق حوضه آبریز باهوکلالت به منطقه مورد مطالعه وارد شده‌اند. عناصر استرانسیم و کادمیوم از روند بسیار مشابهی با فراوانی ذرات کربناته رسوبات برخوردار می‌باشند که منشأ این عناصر را می‌توان سنگهای کربناته حوضه آبریز زون مکران و خرده صدفهای موجود در محیط رسوب‌گذاری در نظر گرفت. عناصر آهن و منگنز عمدتاً در ارتباط با کانیهای سنگین موجود در نمونه‌های مورد مطالعه بوده و منشأ آنها غالباً گرانیت‌های بیوتیت‌دار کمپلکس قلامان و گرانودیوریت‌های موجود در افیولیت‌ها و گابروهای ناحیه فنوج می‌باشد که از طریق حوضه‌های آبریز رابچ و باهوکلالت به دریا وارد شده‌اند. تعیین شاخص غنی‌شدگی نشان می‌دهد که رسوبات دارای غنی‌شدگی زیاد تا حداکثر نسبت به کادمیوم بوده و نسبت به استرانسیم غنی‌شدگی متوسط تا زیاد دارند. عنصر روی حداقل تا متوسط غنی‌شدگی را نشان می‌دهد و عناصر آهن، مس و منگنز حداقل غنی‌شدگی را دارند.

واژه‌های کلیدی: رسوبات ماسه‌ای، منشأ کانیهای سنگین، عناصر سنگین، دریای عمان

مقدمه

کانیهای سنگین حاوی عنصر Cr دارای ابعاد بسیار کوچکتری نسبت به سایر کانیها می‌باشند و اکثر آنها در ابعاد کوچکتر از 80 مش قابل مشاهده هستند (Hajati et al., 2006). بررسی‌های صورت گرفته در بخشهای کم‌عمق دریای عمان نیز به وضوح نشان می‌دهد که درصد زیادی از رسوبات تخریبی در این بخش از دریا توسط حوضه‌های آبریز از منطقه قاره‌ای مکران که از لحاظ تکتونیکی بسیار فعال است، به دریا وارد شده‌اند. میزان این رسوبات به عواملی مانند

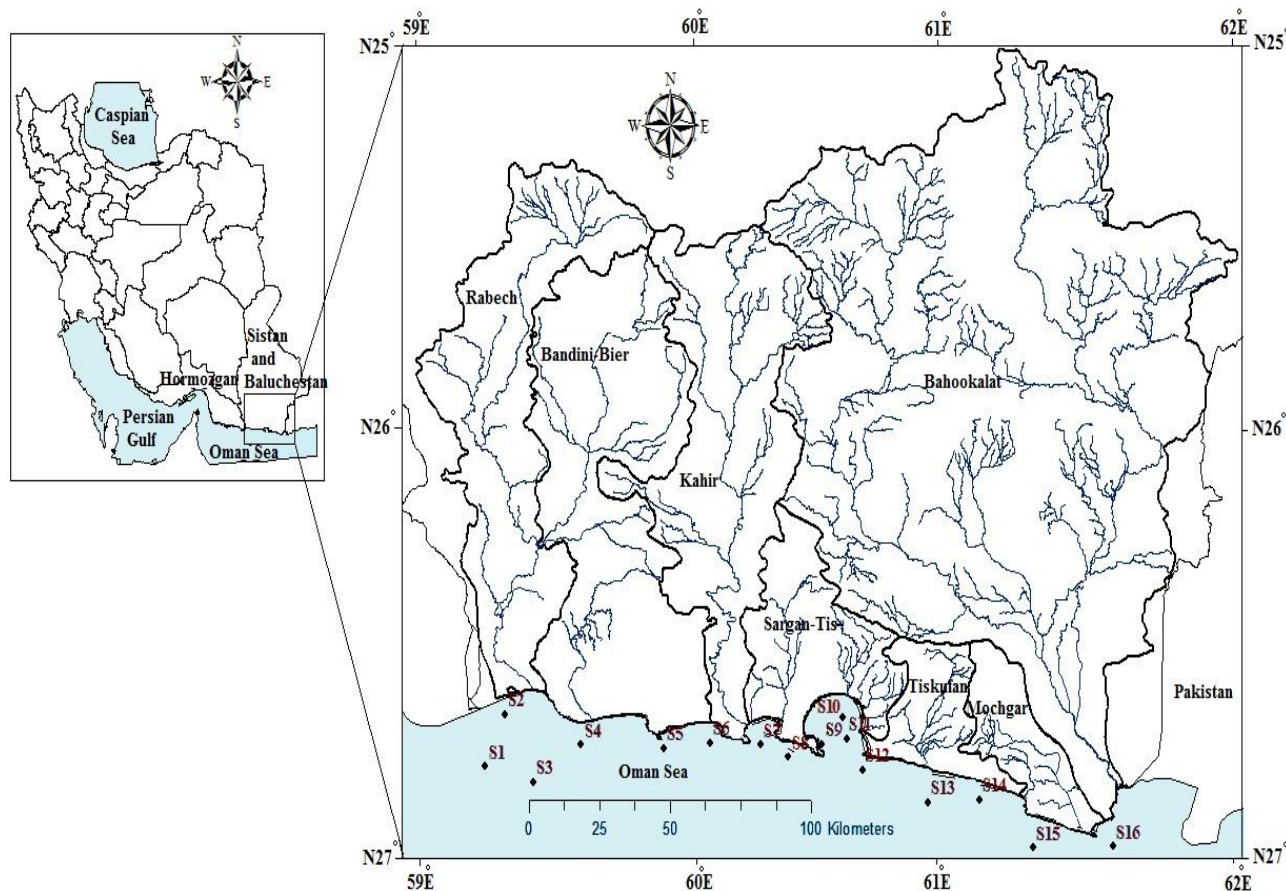
بر اساس مطالعاتی که بر روی رسوبات ساحلی خلیج گواتر صورت گرفته است وجود برخی از عناصر همچون کروم، منیزیم، نیکل و آهن در این ناحیه را به احتمال زیاد ناشی از فرسایش شدید سازندهای افیولیتی توسط رودخانه‌های منطقه و انتقال این عناصر به خلیج گواتر در نظر می‌گیرند (Hamzeh et al., 2012). همچنین مطالعات کانی‌شناسی در سواحل اسکله پسابندر در دریای عمان نشان می‌دهد که

(Nabavi, 1975). کمپلکس‌های اصلی منطقه شامل کمپلکس قلامان (متاولکانیک، رخساره شیست سبز و شیست آبی، ترکیبات افیولیت ملانژ)، کمپلکس بجگان و دیادر (پلتیک شیست، آمفیبولیت، فیلیت، میان‌لایه‌های آهک و مارن) و کمپلکس دورکان (متاولکانیک، فیلیت، شیست، رسوبات دگرگون شده، آهک، پیلولاوا، مقدار کمی توف) می‌باشند (McCall, 2002) منطقه مورد مطالعه در دریای عمان در محدوده استان سیستان و بلوچستان با مختصات جغرافیایی 25° و 3° تا 31° و 27° عرض شمالی از خط استوا و 58° و 50° تا 63° و 21° طول شرقی واقع شده است (شکل‌های 1 و 2).

هدف اصلی این تحقیق بررسی تمرکز فلزات سنگین Fe, Cd, Sr, Cu, Zn در رسوبات ماسه‌ای دریای عمان و ارتباط این عناصر با کانیه‌های تشکیل‌دهنده رسوبات و منشأ آنها می‌باشد.

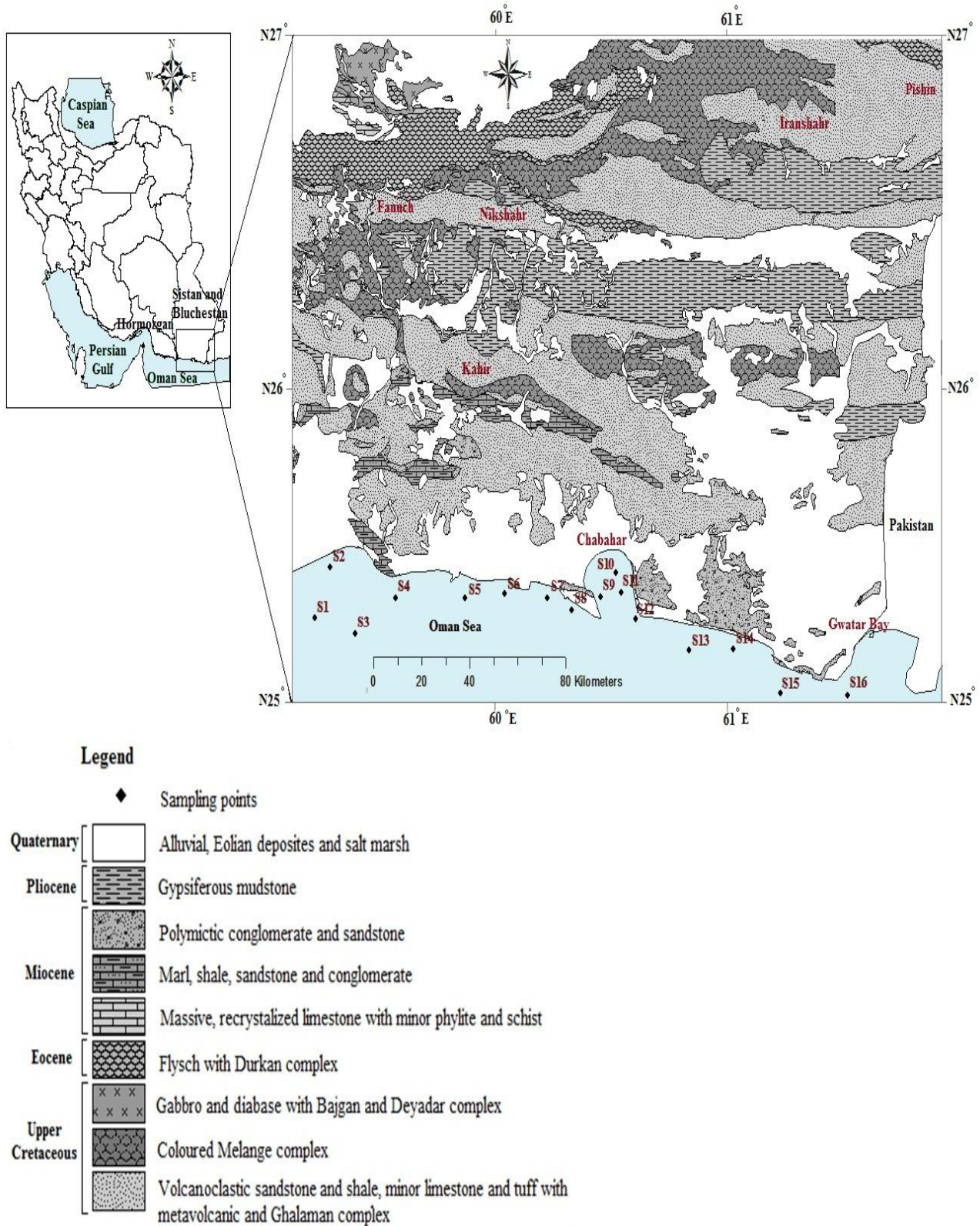
تغییرات سطح آب دریا، آب و هوا و تکتونیک منطقه بستگی دارد (Prins et al., 2000).

زمین‌شناسی منطقه شرق ایران معمولاً به عنوان یک واحد مستقل بررسی می‌شود. در این منطقه ابتدا رسوبات آهکی از نوع دریایی نهشته و سپس در اواخر دوران سوم زمین‌شناسی در اثر جنبشهای کوه‌زایی از دریا جدا شده و در آن رسوباتی با مواد نسبتاً درشت و نرم روی هم انباشته شده‌اند (Grando and McClay, 2006; Saadat and Stem, 2011). از میان ساختارهای زمین‌شناسی، زون مکران بیشترین سهم را در ریخت‌شناسی منطقه داراست. قدیمی‌ترین سنگهای این زون را آویزه‌های رنگی تشکیل می‌دهند که به کرتاسه فوقانی-پالئوسن تعلق دارند. سپس رسوبات ضخیم فلیش مانند ائوسن و الیگوسن قرار دارند که تناوبی از ماسه‌سنگ، شیل و مارن هستند و روی مخلوطهای رنگی فوق قرار می‌گیرند. این رسوبات قبل از آغاز میوسن دچار چین‌خوردگی شده‌اند. ضخامت رسوبات نئوژن نیز زیاد و در حدود 5000 متر است



شکل 1. نقشه حوضه‌های آبریز و نقاط نمونه‌برداری دریای عمان (محدوده استان سیستان و بلوچستان)

Fig 1. Map of the water drainage basins of the study area along with locations of the sampling stations



شکل 2. نقشه نقاط نمونه‌برداری و لیتولوژی کلی حوضه‌های آبریز دریای عمان (محدوده استان سیستان و بلوچستان) (اقتباس از Afaghi and Salak, 1977)

Fig 2. Map of the major lithologies and locations of the sampling stations of the drainage basins of the Oman Sea (district of Sistan and Baluchestan province) (after Afaghi and Salak, 1977)

روش مطالعه

نمونه‌برداری در 16 نقطه در دریای عمان توسط دستگاه مکانیکی گراب از عمق 10 تا حداکثر 48 متری از سطح دریا و از رسوبات سطحی صورت گرفت (به دلیل ناچیز بودن مقدار ماسه در ایستگاه S₃، رسوبات این ایستگاه مورد بررسی قرار نگرفته است). جداسازی بخش ماسه از گل رسوبات از طریق دانه‌بندی کامل رسوبات به روش الک مرطوب انجام گرفت (Lindholm, 1987; Tucker, 1988). کانیهای سنگین موجود در ذرات ماسه از طریق جداسازی به روش مایعات سنگین از سایر کانیهای سبک تفکیک گردید (Mange and Maurer, 1992) به منظور مطالعه کانیها و خرده‌سنگهای موجود در نمونه‌ها از رسوبات مورد مطالعه مقاطع نازک و صیقلی تهیه گردیده و سپس توسط میکروسکپ پلاریزان و انعکاسی مورد مطالعه قرار گرفت. فراوانی هر یک از اجزای رسوبات با استفاده از مقاطع تهیه شده با درصدگیری از تعداد کانیها و خرده‌سنگها تعیین گردید (Folk, 1974; Pettijohn et al., 1981) (جدول 1). به منظور تعیین غلظت فلزات سنگین، (جدول 2) ابتدا نمونه‌های ماسه به روش شیمیایی و با استفاده از تیزاب سلطانی (نسبت 1 به 3 اسیدنیتریک به اسیدکلریدریک) آماده‌سازی شده (Mico et al., 2008) و سپس توسط دستگاه AAS مدل Pu9100 Phillips در آزمایشگاه دانشگاه اصفهان مورد آنالیز قرار گرفتند.

بحث و بررسی

بر اساس مطالعات میکروسکوپی کانیهای موجود در رسوبات ماسه‌ای دریای عمان به ترتیب فراوانی شامل کوارتز، فلدسپات‌ها و کانیهای سنگین می‌باشند. خرده‌سنگهای رسوبات که غالباً آواری‌اند به ترتیب فراوانی متشکل از رسوبی، آذرین و دگرگونی هستند. بررسیهای انجام شده نشان می‌دهند که همبستگی معنی‌داری بین غلظت عناصر سنگین و فراوانی کانیهای سنگین و همچنین بین غلظت تعدادی از عناصر با یکدیگر وجود دارد (جدول 3). در بین عناصر مورد بررسی عناصر کادمیوم و استرانسیوم و همچنین کربنات کلسیم دارای ضرایب همبستگی نسبتاً مثبت می‌باشند. عنصر مس نیز با عناصر روی و آهن در نمونه‌های ماسه‌ای منطقه

همبستگی مثبت نشان می‌دهد. دامنه تغییرات غلظت عناصر مورد بررسی در رسوبات بر حسب ppm به ترتیب فراوانی (105/76-0/426) Cu، (2/81-0/49) Cd، (14/42-7/42) Sr، (576/17-78/58) Zn و (535/43-220/01) Mn است که در زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روی و مس

بیشترین مقدار عنصر روی در ایستگاه S₁₆ واقع در خلیج گواتر با مقدار 105/76 ppm و کمترین مقدار آن در ایستگاه S₉ به مقدار 0/426 ppm و میانگین آن 36/73 است. تغییرات غلظت این عنصر از مرز استانهای هرمزگان و سیستان و بلوچستان به سمت خلیج گواتر به‌طور کلی روند افزایشی نشان می‌دهد (شکل 3-A). تغییرات غلظت عنصر مس از غرب به شرق در نوسان بوده و روند خاصی را نشان نمی‌دهد. بیشترین مقدار این عنصر در ایستگاه S₁₆ به میزان 14/42 ppm و کمترین مقدار آن در ایستگاههای S₁₀ و S₁₁ به میزان 7/42 ppm و میانگین آن 9/99 ppm می‌باشد (شکل 3-B).

عناصر روی (Zn^{2+}) و مس (Cu^{2+}) با شعاعهای یونی $0/74A^{\circ}$ و $0/73A^{\circ}$ (Ahrens, 1953) به دلیل تشابه یونی با Fe^{2+} و Mg^{2+} ($0/66 A^{\circ}$) بر طبق قاعده گلدشمیت (Goldschmidt, 1954) می‌توانند در برخی از کانیهای سنگین از جمله بیوتیت جانشین گردند (Blaxland, 1971). غلظت عنصر روی روند مشابهی را با کانی بیوتیت موجود در نمونه‌ها داراست (شکل 4-A) و از این رو افزایش عنصر روی را می‌توان به افزایش کانی بیوتیت نسبت داد. غلظت عنصر مس در تعدادی از نقاط نمونه‌برداری روند مشابهی را با فراوانی کانی بیوتیت نشان می‌دهد (شکل 4-B). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این منطقه عنصر روی در اکثر نمونه‌ها و عنصر مس در تعدادی از نمونه‌ها در ساختار کانی بیوتیت (شکل 9-A) حضور داشته‌اند و از طریق این کانی به رسوبات مورد مطالعه وارد گشته‌اند. ضریب همبستگی مثبت بین این عنصر و کانی بیوتیت نیز مؤید حمل روی در ساختار کانی بیوتیت تا محدوده مورد مطالعه می‌باشد (جدول 3).

جدول 1. فراوانی خرده سنگها و کانیهای رسوبات ماسه‌ای دریای عمان (بر حسب درصد بر اساس (Folk, 1974; Pettijohn et al., 1981))

Table 1. Percentage of the minerals and rock fragments in the Oman Sea samples (measured based on Folk, 1974; Pettijohn et al., 1981)

	S ₁	S ₂	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₆
Quartz	2	15	20	30	30	50	5	20	4	20	15	4	15	10	25
Feldspar	1	2	7	5	5	5	<1	10	<1	10	5	2	5	4	3
Biotite	0	5	10	4	8	5	3	0	2	4	5	2	10	8	12
Muscovite	0	3	<1	0	1	3	0	0	<1	<1	<1	1	<1	<1	4
Amphibole	0	5	4	<1	0	0	0	<1	<1	0	0	<1	0	0	0.25
Pyroxene	0	1	0	0	0	0.25	0	0	0.25	0.25	0.25	0.2	0.25	1	0.25
Chlorite	<1	<1	3	5	2	<1	1	2	<1	2	1	2	<1	2	3
Epidote	0	5	0	0	<1	0	<1	0	0	0	<1	0	0	<1	0
Glauconite	0	10	0.2	0	0.2	0.25	0	0.25	0	0.25	0	0	0	0	0.25
O.H.M	<1	1	1	<1	1	1	<1	<1	<1	1	1	<1	<1	<1	<1
Granite	4	25	10	5	10	5	2	15	2	5	10	5	5	3	5
V.R.F	1	5	5	<1	5	1	<1	2	1	15	6	5	10	6	10
M.R.F.	<1	<1	0	<1	<1	<1	<1	<1	<1	2	5	2	5	10	5
N.C.R.F	<1	<1	<1	0	<1	<1	<1	<1	<1	0	1	<1	4	5	2
C.R.F	90	20	40	50	40	30	89	50	89	40	50	75	45	50	30

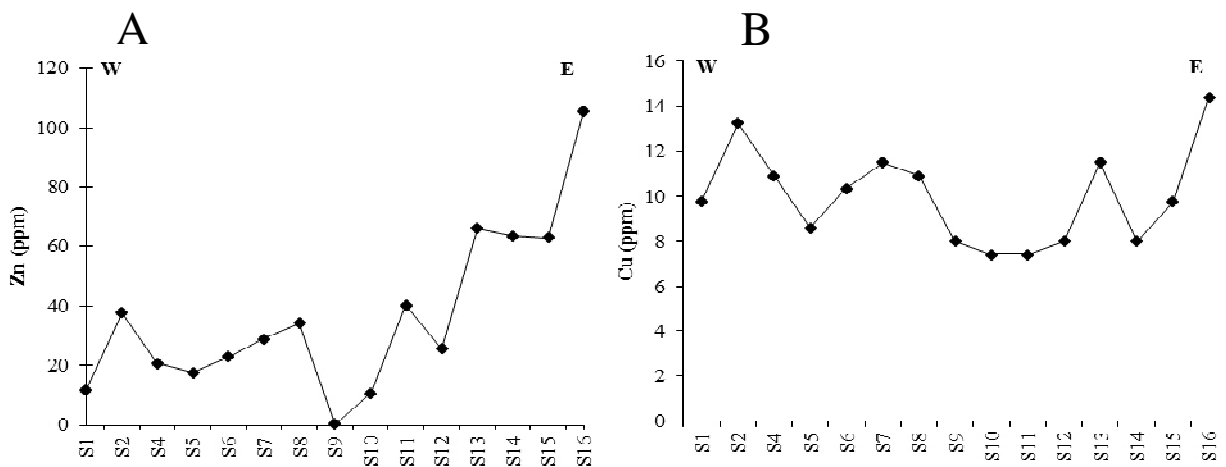
O.H.M: Opaque Heavy Minerals

V.R.F: Volcanic Rock Fragments

M.R.F: Metamorphic Rock Fragments

N.C.R.F: Non-Carbonate Rock Fragments

C.R.F: Carbonate Rock Fragments



شکل 3. توزیع فراوانی عناصر A: روی و B: مس از غرب به شرق دریای عمان

Fig. 3. Distribution of A: the Zn concentration, B: the Cu concentration from west to east of the Oman Sea

جدول 2. غلظت فلزات سنگین رسوبات ماسه‌ای دریای عمان بر حسب ppm

Table 2. Concentrations of the heavy metals in the sand sediment samples of the Oman Sea in ppm

Sampling Station	Cd	Cu	Zn	Sr	Mn	Fe
S ₁	1.820	9.762	11.893	576.173	356.308	25383.86
S ₂	0.490	13.261	37.76	70.584	535.436	33626.94
S ₄	0.157	10.928	20.96	80.746	430.296	27582.04
S ₅	1.488	8.595	17.76	93.450	453.660	21364.42
S ₆	1.488	10.345	23.093	111.234	441.978	23782.38
S ₇	0.822	11.511	28.96	83.287	515.965	26718.48
S ₈	2.818	10.928	34.293	278.917	227.803	13592.4
S ₉	2.486	8.012	0.426	273.836	410.825	18946.46
S ₁₀	2.153	7.428	10.826	304.324	391.355	11001.73
S ₁₁	1.155	7.428	40.426	118.856	313.473	14801.38
S ₁₂	0.822	8.012	25.76	90.905	332.943	18946.46
S ₁₃	1.488	11.511	66.293	223.023	220.015	14110.54
S ₁₄	1.488	8.012	63.626	156.966	270.638	17910.19
S ₁₅	1.820	9.762	63.093	184.913	325.414	26027.63
S ₁₆	0.822	14.428	105.76	70.584	406.931	32763.39
Average	1.43	9.99	36.73	181.18	375.53	21770.55

جدول 3. ضرایب همبستگی فلزات سنگین با کانیها و خرده سنگهای آهکی رسوبات دریای عمان

Table 3. Correlation coefficients of the heavy metals with carbonate rock fragments and minerals of sediments of the Oman Sea

Heavy Metal	Zn	Cu	Cu	Sr	Cd	Fe	Mn
Mineral	Biotite	Muscovite	Biotite	C.R.F	C.R.F	H.M	H.M
Pearson Coefficient	0.62	0.76	0.79	0.82	0.74	0.72	0.53

H.M: Heavy Minerals

C.R.F: Carbonate Rock Fragments

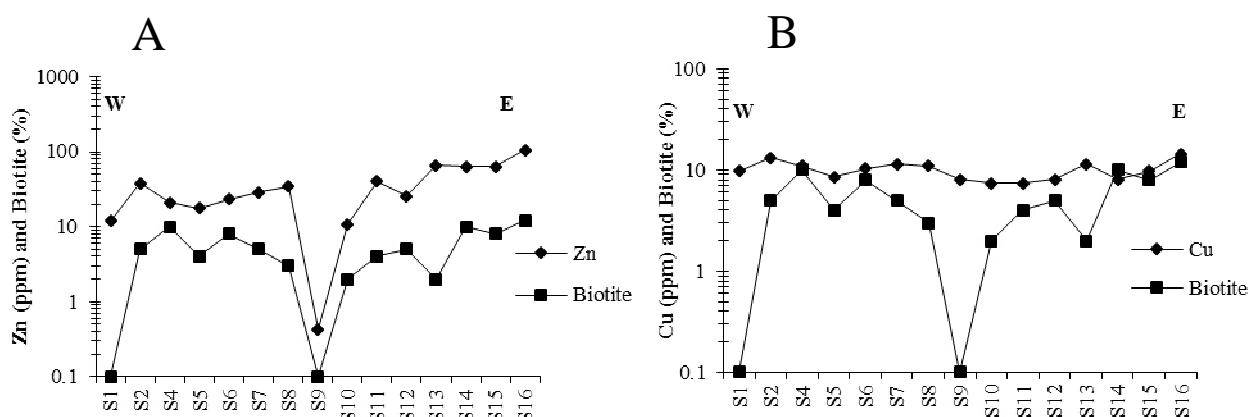
درونی به منافذ دی‌تری‌گونال به‌وسیله نفوذ کاتیون‌های چند ظرفیتی توجیه گردد. در این حالت راه‌های مهاجرت کاتیونهایی مانند مس به بین لایه‌ها و همچنین به منافذ دی‌تری‌گونال از ورقه‌های تتراهدرال کاذب مقابل کاملاً باز شده و این کاتیون‌ها در باندهای فوق مستقر می‌شوند (Madejova et al., 1999). این عنصر از روند بسیار مشابهی

همچنین مس به شکل عنصر اصلی و یا به‌صورت جاننشینی در ساختار برخی از کانیها از جمله آمفیبول، پیروکسن، ارتوکلاز، بیوتیت، مسکویت، تورمالین و مگنتیت می‌تواند حضور یابد (Wilson, 1989; Krauskopf and Bird, 1995) دلیلی عمده ایجاد پیوندهای Cu^{2+} در کانیهای میکایی از جمله مسکویت می‌تواند توسط حرکت یون‌های K^+ از بین لایه‌های

ایران شهر و فلیش‌های ائوسن واقع در شمال زون مکران دانست. با در نظر گرفتن ارتباط نزدیک‌تر عنصر مس با کانی مسکویت (شکل 9-B)، منشأ این عنصر می‌تواند گرانیت‌ها و پگماتیت‌ها، شیبست‌های موجود در افیولیت‌ها و فلیش‌های شمال زون مکران در نظر گرفته شود. بنابراین با توجه به قرارگیری بخش عمده واحدهای سنگ‌شناسی فوق در محدوده حوضه آبریز باهوکلات و فراوانی بیشتر کانیهای میکایی در این منطقه، عناصر روی و مس بیشتر از طریق رودخانه باهوکلات به خلیج گواتر و دریای عمان وارد شده‌اند (شکل 1).

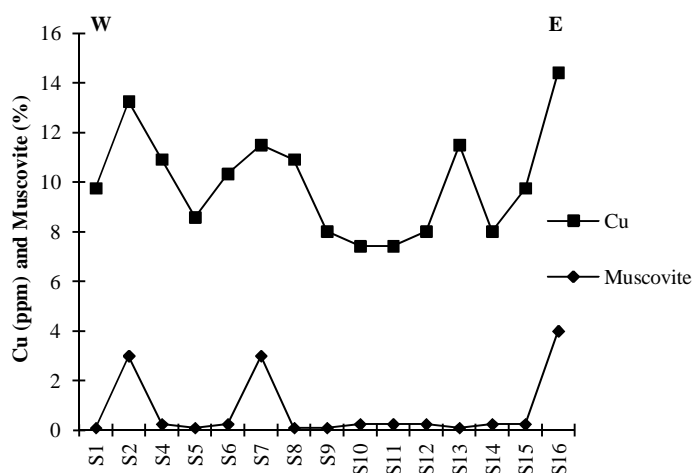
با روند تغییرات درصد کانی مسکویت برخوردار می‌باشد (شکل 5). بنابراین افزایش عنصر مس در ایستگاه S₁₆ را می‌توان به افزایش ناگهانی عنصر مسکویت در این نقطه و کاهش این عنصر در ایستگاه S₁₀ را به کمبود آن نسبت داد. همبستگی نسبتاً مثبتی بین این عنصر و کانی مسکویت نیز مؤید این ارتباط می‌باشد (جدول 3).

با توجه به ارتباط عناصر روی و مس با کانیهای مذکور و لیتولوژی منطقه مورد مطالعه، منشأ اصلی عنصر روی را می‌توان گرانودیوریت‌ها و گابروهای موجود در افیولیت‌های



شکل 4. تطابق روند فراوانی غلظتهای عناصر A: روی و B: مس با درصد کانی بیوتیت از غرب به شرق دریای عمان

Fig. 4. Correlation of A: the Zn concentration, B: the Cu concentration with the biotite percentage from west to east of the Oman Sea



شکل 5. تطابق روند فراوانی غلظت عنصر مس و درصد کانی مسکویت از غرب به شرق دریای عمان

Fig. 5. Correlation of the Cu concentration and the muscovite content from west to east of the Oman Sea

به دو صورت آواری و برجا (صدف موجودات) (شکل 9-C) در رسوبات وجود دارد. بیشترین ذرات آواری کربناته از سنگهای واقع در محدوده فنوج و از طریق حوضه آبریز رابج و سرگان-مچ‌گر (شکل 1) به دریای عمان وارد شده‌اند.

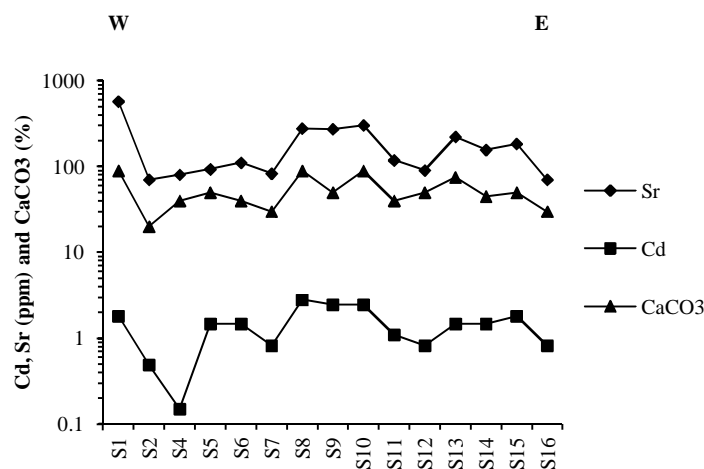
عناصر آهن و منگنز

بیشترین میزان عناصر آهن و منگنز در نمونه‌های ماسه‌ای دریای عمان در ایستگاه S₂ به ترتیب به میزان ppm 33626/94 و 535/43 است. کمترین مقدار عنصر آهن در ایستگاه S₁ به میزان ppm 2538/86 و کمترین مقدار عنصر منگنز در ایستگاه S₁₃ به میزان ppm 220/01 است. میانگین مقدار آهن و منگنز به ترتیب ppm 20247/55 و ppm 375/53 است. تغییرات غلظت این عناصر در طول منطقه مطالعاتی از روند خاصی برخوردار نیست (شکل 7-A و B). آهن بالاترین ضریب همبستگی را با عنصر Mn²⁺ دارد که این امر به دلیل تشابه شعاع یونی این دو عنصر (Fe²⁺: 0.78Å, Mn²⁺: 0.83Å) است و این عناصر می‌توانند در ساختار بیشتر کانیهای سنگین جای‌گزین یکدیگر گردند (Mange and Wright, 2007). مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک و صیقلی رسوبات منطقه بیانگر ارتباط نزدیکی بین این دو عنصر و میزان کل کانیهای سنگین در ایستگاهها می‌باشد (شکل 8).

عناصر استرانسیم و کادمیوم

تغییرات غلظت عناصر استرانسیم و کادمیوم از سمت غرب به طرف خلیج گواتر در نوسان بوده ولی به‌طور کلی روند کاهشی نشان می‌دهد. بیشترین مقدار عنصر استرانسیم در ایستگاه S₁ به میزان ppm 576/17 و کمترین مقدار آن در ایستگاههای S₂ و S₁₆ به میزان ppm 78/58 و میانگین مقدار ppm 181/18 می‌باشد. عنصر کادمیوم نیز با بیشترین مقدار در ایستگاه S₈ به میزان ppm 2/81 و کمترین مقدار آن در ایستگاه S₂ به میزان ppm 0/49 و با میانگین ppm 1/43، از روند مشابهی با استرانسیم برخوردار است (شکل 6). تشابه زیادی بین روند تغییرات غلظتهای عناصر استرانسیم و کادمیوم با میزان کربنات کلسیم در ایستگاهها مشاهده می‌شود (شکل 6). ضریب همبستگی مثبت عناصر Sr²⁺، Cd²⁺ و CaCO₃ در رسوبات مورد بررسی مؤید روند مشابه این دو عنصر با میزان کربنات است (جدول 3).

Sr²⁺ (A° 1,1) و Cd²⁺ (0.97A°) به علت تشابه یونی با Ca²⁺ (1A°) می‌توانند در ساختار کربنات‌ها و سیلیکات‌ها جانشین کلسیم گردند (Wilson, 1989; Krauskopf and Bird, 1995; Efimenko et al., 2010; Kinsman, 2008). بنابراین بیشترین غلظت این عناصر در ایستگاههای S₈, S₁₀ و S₁ را می‌توان ناشی از افزایش قابل توجه کربنات کلسیم موجود در این نقاط و کمترین غلظت استرانسیم و کادمیوم در ایستگاههای S₂ و S₄ را ناشی از کاهش کربنات کلسیم در ایستگاههای مذکور در نظر گرفت. کربنات کلسیم

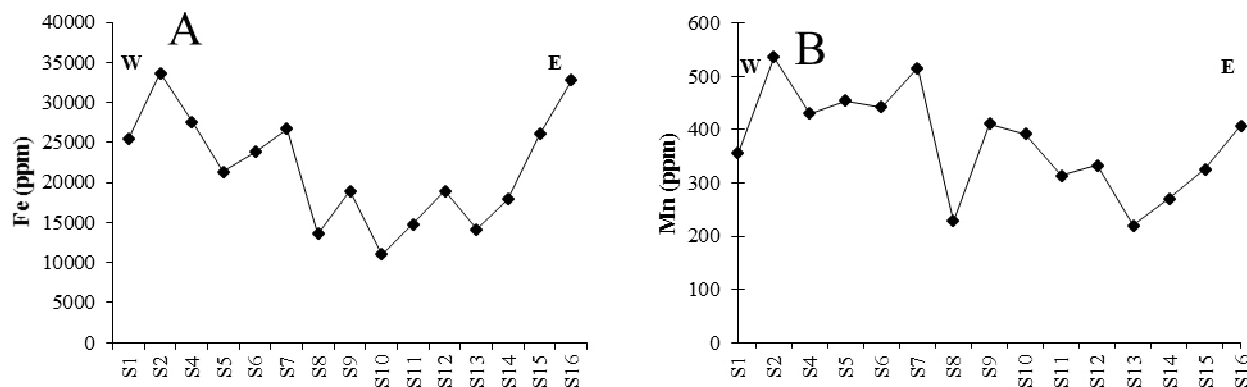


شکل 6. تطابق روند فراوانی غلظت عناصر استرانسیم، کادمیوم و درصد کربنات کلسیم از غرب به شرق دریای عمان

Fig. 6. Correlation of the Sr and Cd concentrations with the CaCO₃ content from west to east of the Oman Sea

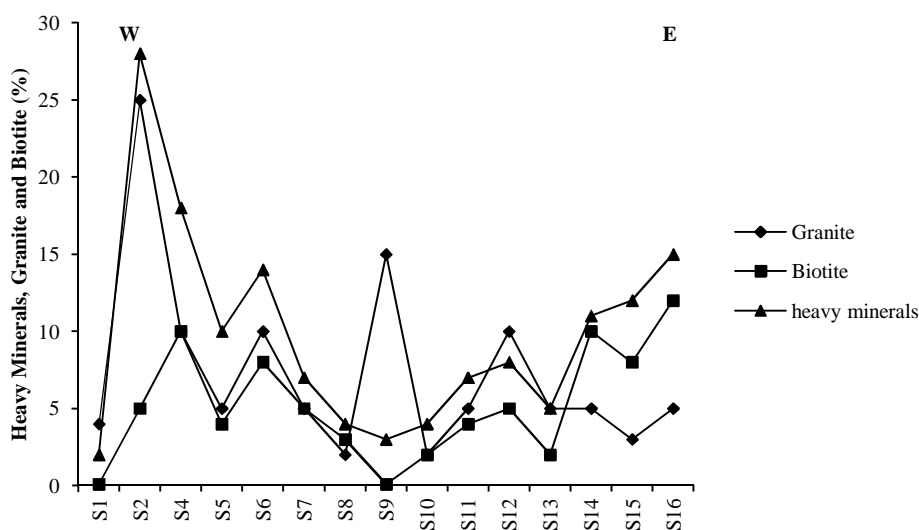
سنگین در این نوع خرده‌های آذرین درونی است (Krauskopf and Bird, 1995). افزایش عناصر آهن و منگنز در ایستگاه S₂ را می‌توان ناشی از افزایش کانیهای سنگین، خصوصاً بیوتیت و همچنین خرده‌های گرانیت بیوتیت دارد در این بخش از منطقه در نظر گرفت. بنابراین منشأ احتمالی این عنصر در منطقه مورد نظر، می‌تواند گرانیت و گرانودیوریت‌های موجود در افیولیت ملانژها و گابروهای ناحیه فنوج باشد که عمدتاً از طریق حوضه آبریز رابچ و باهوکلالت (شکل 1) به دریای عمان وارد گردیده‌اند.

این عناصر به دلیل وزن مخصوص زیاد می‌توانند در بیشتر کانیهای سنگین از جمله پیروکسن (شکل D-9) حضور یابند (Bradl, 2005). ضرایب بالای همبستگی این عناصر و کانیهای سنگین نیز این مطلب را به خوبی نشان می‌دهد (جدول 3). از میان کانیهای سنگین موجود در نمونه‌ها، کانی بیوتیت بیشترین ارتباط را با این عناصر نشان می‌دهد (شکل A و B و شکل 7-8). از طرفی از میان خرده‌سنگهای موجود در نمونه‌های مورد مطالعه، میزان خرده‌سنگهای گرانیتی دارای روندی بسیار مشابه با روند تغییرات این عناصر، خصوصاً عنصر آهن است (شکل 8) که این امر به دلیل حضور کانیهای



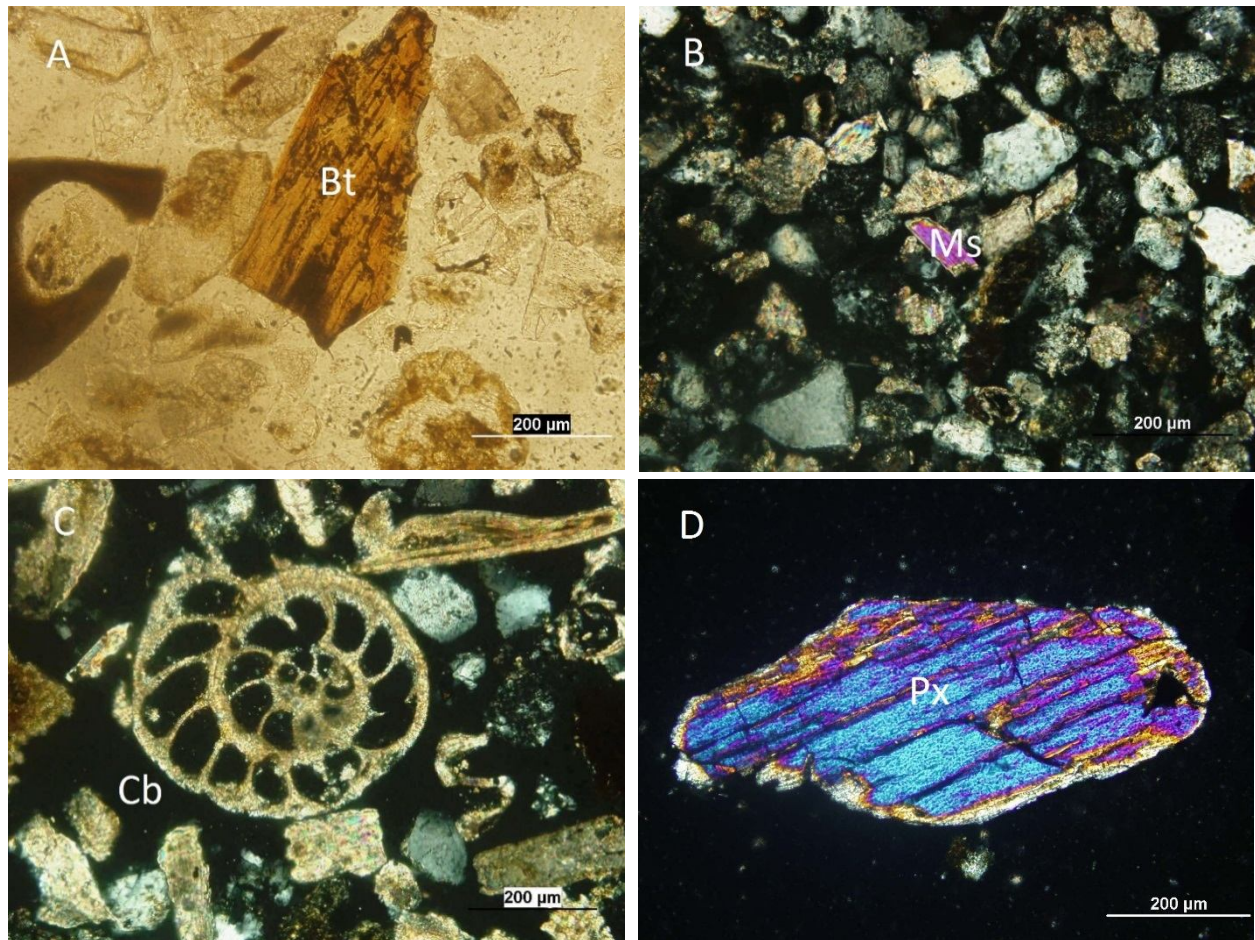
شکل 7. روند فراوانی عناصر A: آهن و B: منگنز از غرب به سمت شرق دریای عمان

Fig. 7. Distribution of A: the Fe concentration, B: the Mn concentration from west to east of the Oman Sea



شکل 8. روند فراوانی کانیهای سنگین، بیوتیت و گرانیت‌های بیوتیت‌دار از غرب به سمت شرق دریای عمان

Fig. 8. Distribution of the biotite, granite and heavy mineral contents from west to east of the Oman Sea



شکل 9. تصاویر میکروسکوپی A: بیوتیت (Bt) در PPL، B: مسکوویت (Ms)، C: خرده‌های کربنات (Cb) و D: کانی سنگین (پیروکسن) (Px) موجود در رسوبات دریای عمان در XPL

Fig. 9. The microscopic photos of A: biotite (Bt) in PPL B: muscovite C: carbonate fragments (Cb) and D: heavy mineral (pyroxene) (Px) in the sediments of the Oman Sea in XPL

اگر $2 < Ef < 5$ باشد، غنی‌شدگی متوسط است، اگر $5 < Ef < 20$ باشد غنی‌شدگی بسیار زیاد است و اگر $20 < Ef < 40$ باشد غنی‌شدگی فوق‌العاده زیاد است (Sutherland, 2000; Kartal et al., 2006). با توجه به محاسبه غنی‌شدگی عناصر مورد بررسی در نمونه‌ها، عنصر Cd از غنی‌شدگی بسیار زیاد تا فوق‌العاده زیاد برخوردار است. عنصر Sr در ایستگاه‌های مختلف غنی‌شدگی بسیار متفاوتی را نشان می‌دهد و به دلیل تغییرات زیاد در فراوانی خرده‌های کربنات در منطقه، از غنی‌شدگی متوسط تا بسیار زیاد در تغییر است، به طوری که بیشترین غنی‌شدگی این عنصر در ایستگاه S_1 دیده می‌شود. این امر را می‌توان

عامل غنی‌شدگی در رسوب

بر اساس عامل غنی‌شدگی می‌توان میزان غنی‌شدگی عناصر را نسبت به مقدار طبیعی خود سنجید. این عامل بر طبق رابطه $Ef = C/B$ تعیین می‌شود (Sutherland, 2000). در این رابطه Ef عامل غنی‌شدگی، C غلظت عنصر اندازه‌گیری شده در رسوب و B غلظت عنصر در ماده مرجع است. به دلیل ماسه‌ای بودن نمونه‌های منطقه، میانگین جهانی غلظت عناصر موجود در ماسه‌سنگ (Krauskopf and Bird, 1995) به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. بر اساس این عامل، پنج دسته غنی‌شدگی مشخص شده است. اگر $Ef < 2$ باشد، حداقل غنی‌شدگی اتفاق افتاده است. اگر

غلظت عناصر استرانسیم و کادمیوم روند مشابهی با فراوانی اجزای کربناته که منشأ آواری و درج‌ازا دارند، نشان می‌دهند. بر این اساس منشأ آواری این عناصر عمدتاً سازندهای کربناته ناحیه فنوج و چابهار می‌باشند که از طریق حوضه‌های آبریز رایج و سرگان-مچ‌گر به محدوده مورد مطالعه وارد شده‌اند. همراهی عنصر آهن با منگنز در رسوبات به‌وضوح قابل مشاهده است. با توجه به حضور این عناصر در ساختار بسیاری از کانیهای سنگین از جمله بیوتیت، منشأ عمده آنها را می‌توان گرانیتهای بیوتیت‌دار کمپلکس قلامان، گرانودیوریت‌های موجود در افیولیت ملانژهای و گابروهای شمال ناحیه فنوج دانست که از طریق حوضه‌های آبریز رایج و باهوکلات به دریا وارد شده‌اند. تعیین شاخص غنی‌شدگی نشان می‌دهد که رسوبات مورد مطالعه دارای غنی‌شدگی زیاد تا حداکثر نسبت به کادمیوم بوده و نسبت به استرانسیم غنی‌شدگی متوسط تا زیاد دارند. عنصر روی حداقل تا متوسط غنی‌شدگی را نشان می‌دهد و عناصر آهن، مس و منگنز حداقل غنی‌شدگی را دارند.

قدردانی

از تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان که با حمایت‌های مالی زمینه انجام این پژوهش را فراهم کردند و همچنین از شرکت تولید و توسعه انرژی اتمی ایران جهت همکاری در نمونه‌برداری، تشکر و قدردانی می‌شود.

References

- Afaghi, A. and Salak, M., 1977. Geological map of Iran, scale 1:1,000,000. Geological Survey of Iran.
- Ahrens, L.H., 1953. Anion affinity and geochemistry, Part 2 of the use of ionization potentials. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 3(1): 1-29.
- Blaxland, A.B., 1971. Occurrence of zinc in granitic biotites. *Mineralium Deposita*, 6(4): 313-320.
- Bradl, H.B., 2005. *Heavy Minerals in the Environment*. Springer-Verlag, Berlin, 269 pp.
- Efimenko, N., Espangenberg, J., Schneider, J., Chiaradia, M., Adatte, T., Matera, V. and Follmi, K.B., 2010. High Cd concentrations in Bajocian carbonates in the Swiss Jura Mountains: Evidences for hydrothermal input, Goldschmidt 2010, University of Tennessee, Tennessee, USA.
- Folk, R.L., 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Texas, 182 pp.
- Goldschmidt, V.M., 1954. *Geochemistry*. Clarendon Press, London, 730 pp.
- Grando, G. and McClay, K., 2006. Morphotectonic domains and structural styles in the Makran accretionary prism, offshore Iran. *Sedimentary Geology*, 196(1-4): 1-23.
- Hajati, A., Abdian, M., Saberian, K. and Shafaei, Z., 2006. Mineralogical and degree of freedom studies of heavy minerals in the coast of Pasabandar dock of the Oman Sea from ore

به‌دلیل وجود بیشترین فراوانی خرده‌سنگ کربناته در این ایستگاه بیان کرد (جدول 1). عنصر Zn حداقل تا متوسط غنی‌شدگی را نشان می‌دهد و عناصر آهن، مس و منگنز حداقل غنی‌شدگی را دارند.

نتیجه‌گیری

بررسی توزیع غلظت فلزات سنگین و تعیین منشأ زمین‌زاد این عناصر در رسوبات دریای عمان در مطالعات زیست‌محیطی اکوسیستم‌های آبی واجد اهمیت زیادی است. بدین منظور در این تحقیق توزیع عناصر سنگین در رسوبات ساحلی دریای عمان مورد بررسی قرار گرفته است. غلظت عناصر مورد بررسی در رسوبات ماسه‌ای به‌ترتیب $Cd (1/42)$, $Cu (9/99)$, $Zn (36/72)$, $Sr (181/18)$, $Mn (377/33)$ و $(20247/55)$ است. بررسیهای پتروگرافی و ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که غلظت عناصر روی و مس با فراوانی کانیهای بیوتیت و مسکویت ارتباط خوبی نشان می‌دهد و کانیهای در برگیرنده این عناصر از واحدهای زمین‌شناسی نسبتاً مشابهی منشأ می‌گیرند. بیشترین مقدار این دو کانی از گرانودیوریت، گرانیته و گابروهای افیولیت ملانژها و فلیش‌های ائوسن شمال شرق منطقه منشأ گرفته و از طریق حوضه آبریز باهوکلات به دریای عمان وارد شده‌اند. فاصله افیولیت ملانژهای شرق منطقه تا دریای عمان حداقل $80/2$ و حداکثر $134/6$ کیلومتر و همچنین فاصله فلیش‌های شمال شرقی منطقه حدود $164/4$ کیلومتر تا دریای عمان محاسبه گردیده است. تغییرات

- processing point of view, 24th Symposium of Earth Sciences, Tehran, Iran. (in Persian)
- Hamzeh, M.A., Boomeri, M., Rezaei, H. and Baskaleh, G.R., 2012. Environmental geochemistry of heavy metals in coastal sediments of the Guatr Bay, closure of the southeastern of Iran. *Journal of Oceanography*, 2(8):11-20. (in Persian)
- Kartal, S., Aydın, Z. and Tokalioglu, S., 2006. Fractionation of metals in street sediment samples by using the BCR sequential extraction procedure and multivariate statistical elucidation of the data. *Journal of Hazardous Materials*, 132(1): 80-89.
- Kinsman, D.J., 2008. Interpretation of Sr (super +2) concentrations in carbonate minerals and rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 39(2): 486-508.
- Krauskopf, K.B. and Bird, D.K., 1995. *Introduction to Geochemistry*. McGraw Hill, New York, 668 pp.
- Lindholm, R., 1987. *A Practical Approach to Sedimentology*. Allen and Unwin, London, 276 pp.
- Madejova, J., Arvaiova, B. and Komadel, P., 1999. FTIR spectroscopic characterization of thermally treated Cu²⁺, Cd²⁺, and Li⁺ montmorillonites. *Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 55(12): 2467-2476.
- Mange, M.A. and Maurer, H.F.W., 1992. *Heavy minerals in color*. Chapman and Hall, London, 147 pp.
- Mange, M.A. and Wright, D.T., 2007. *Heavy minerals in use: Development in Sedimentology* 58. Elsevier, Amsterdam, 1283 pp.
- McCall, G.J.H., 2002. A summary of the geology of the Iranian Makran. *Journal of the Geological Society of London, Special Publications*, 195: 147-204.
- Micó, C., Recatala, L., Peris, M. and Sanches, J., 2008. Discrimination of lithogenic and anthropogenic metals in calcareous agricultural soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 17(5): 467-485.
- Nabavi, M.H., (1975) *An introduction to geology of Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran, 109 pp. (in Persian)
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R., 1981. *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag, New York, 618 pp.
- Prins, M.A., Postma, G. and Weltje, G.J., 2000. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the Late Quaternary: the Makran continental slope. *Marine Geology*, 169(3-4): 351-371.
- Saadat, S. and Stern, C.R., 2011. Petrochemistry and genesis of olivine basalts from small monogenetic parasitic cones of Bazman stratovolcano, Makran arc, southeastern Iran. *Lithos*, 125(1-2): 607-619.
- Sutherland, R.A., 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39(6): 661-627.
- Tucker, M.E., 1988. *Techniques in Sedimentology*. Blackwell, London, 394 pp.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis, A Global Tectonic Approach*. Unwin Hyman, London, 510 pp.



Provenance of the heavy metals in sand sediments of the Oman Sea (Sistan and Baluchestan district)

Maryam Soleimani¹, Hamid Reza Pakzad^{1*}, Mehrded Pasandi¹, Mousa Noghreian¹ and Mehdi Kamali²

1) Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2) Chemical Processes Research Department, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Submitted: July 29, 2013

Accepted: Oct. 25, 2014

Keywords: Sand Sediments, Heavy Minerals Provenance, Heavy Metals, the Oman Sea

Introduction

Mineral composition of source rock is one of the most important factors for concentration and distribution of heavy metals in sediments. Therefore, study on distribution of these elements and the related minerals in sediments provides information about natural origin of elements. Moreover, the interpretation of origin and distribution of sandy sediments is considerably enhanced by mineralogical and geochemical studies of these sediments.

The main objective of this research is to evaluate distribution of Zn, Cu, Sr, Cd, Fe and Mn in sand sediments of the Oman Sea, their relationship with mineral composition of the sediments and also determining their provenance.

Materials and Methods

Sampling of surface sediments of the Oman Sea was performed in 16 sampling stations. Heavy minerals and rock fragments of the sediments in fine and coarse sand sizes respectively were qualitatively and quantitatively studied by polarizing microscope (Folk, 1974; Pettijohn et al., 1981; Tucker, 1988). Concentration of the heavy metals were also analyzed by AAS method (Mico et al., 2008).

Result

Mineralogical composition of the studied sediments contain quartz, feldspars and heavy minerals in their order of abundances. The rock fragments consist of sedimentary, igneous and metamorphic in their order of frequencies as well. The concentrations of the studied heavy metals (in ppm) in the sediments are Cd (1.42), Cu (9.99),

Zn (36.72), Sr (181.18), Mn (377.33) and Fe (20247.55) in their order of abundances.

Distribution of the Zn concentration generally shows decreasing trend from west of the study area to the Guatr Bay. The concentrations of Zn and Cu show close relationship with the frequencies of biotite and muscovite. The Cu concentration also shows positive correlation with the Zn and Fe concentrations. Distribution of the Sr and Cd concentrations is similar to variation of the calcium carbonate content. The Cd and Sr concentrations also show positive correlation with each other and the calcium carbonate content of the sediments.

A close relationship is also observed between the concentrations of Fe and Mn elements and the total amount of heavy minerals. Among the heavy minerals existing in the samples, biotite has the closest relationship with Fe and Mn. Among the rock fragments existing in the sediments, the amount of granitic rock fragments also has a very similar trend to variation of these two elements especially Fe.

Discussion

According to presence of Fe and Mn in structure of many heavy minerals such as biotite (Mange and Wright, 2007; Bradl, 2005), their main provenance can be biotite-bearing granites of Ghalaman complex, granodiorites existing in the ophiolite-melanges and the gabbros located in north of the Fanuch area mostly transported to the Oman Sea via the Rabech and Bahookalat water drainage basins.

The clastic carbonate grains were mostly transported to the Oman Sea by Rabech and Sergan-Mochgar watersheds to the Oman Sea.

*Corresponding authors Email: hpakzad@sci.ui.ac.ir

Biotite and muscovite could mainly originate from the granodiorite, granite, ophiolite-melange gabbro and the Eocene flysches of northeast of the region.

The main provenance of Zn could be granodiorites and gabbros existing in the Iranshahr ophiolites and flysches. According to close relationship between Cu and muscovite, provenance of this element can be granites, pegmatites and schists existing in the ophiolites and flysches of the region. Therefore, Zn and Cu are mostly transported to the Oman Sea and Guatr Bay via Bahookalat River.

Provenance of Sr and Cd are mainly the Fanuch and Chabahr carbonate formations. According to the enrichment factor (Sutherland, 2000) of the studied elements, the sediments are extra-highly to very highly enriched in Cd. The enrichment of Sr changes from medium to very high. Zn shows low to medium enrichment and the sediments are depleted in Fe, Cu and Mn.

Acknowledgement

Financial support by School of Graduate Studies of University of Isfahan and also by the Iranian

Nuclear Energy Production and Development Company are acknowledged.

References

- Bradl, H.B., 2005. Heavy Minerals in the Environment. Springer-Verlag, Berlin, 269 pp.
- Folk, R.L., 1974. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Company, Texas, 182 pp.
- Mange, M.A. and Wright, D.T., 2007. Heavy minerals in use: Development in Sedimentology 58. Elsevier, Amsterdam, 1283 pp.
- Micó, C., Recatala, L., Peris, M. and Sanches, J., 2008. Discrimination of lithogenic and anthropogenic metals in calcareous agricultural soils. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 17(5): 467-485.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R., 1981. Sand and Sandstone. Springer-Verlag, New York, 618 pp.
- Sutherland, R.A., 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. Environmental Geology, 39(6): 661-627.
- Tucker, M.E., 1988. Techniques in Sedimentology. Blackwell, London, 394 pp.