

بررسی تمرکز عناصر سنگین Ni, Mn, Pb, Cu, Ag, Zn, Sr, Co, Cd در پهنه‌های ماسه‌ای پلایای گاوخونی (جنوب شرق اصفهان)

حمیدرضا پاکزاد، استادیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان*

مهرداد پسندی، استادیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان

زینب علی‌نایی، دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان

چکیده

حوضه پلایای گاوخونی واقع در جنوب شرق اصفهان از دو محیط دلتایی و دریاچه پلایایی تشکیل شده است. این پلایا شامل پهنه‌های ماسه‌ای، گلی و نمکی است. در غرب پلایا تپه‌های ماسه‌ای گسترش دارند. اجزای تشکیل‌دهنده رسوبات ماسه‌ای بادی را خرده سنگ‌های آندزیت، داسیت، توف، گرانیت، شیست، گنیس، سنگ آهک فسیل‌دار، ماسه سنگ و کانی‌های کوارتز و فلدسپات تشکیل می‌دهند. کانی‌های سنگین این رسوبات شامل هورنبلند، پیروکسن، اپیدوت، زیرکن، گارنت، اسپینل، ایدوکراز، تورمالین، بیوتیت، ولاستونیت، مگنتیت، هماتیت، گوتیت و پیریت می‌باشند. اغلب رسوبات ماسه‌ای توسط رودخانه دائمی زاینده‌رود و از شمال منطقه به این حوضه وارد شده و تحت تأثیر جریان باد تشکیل پهنه‌ها و تپه‌های ماسه‌ای را داده‌اند. متوسط غلظت فلزات سنگین مورد بررسی در رسوبات ماسه‌ای بادی بر حسب ppm به ترتیب فراوانی به صورت منگنز (۳۱۹/۹۹)، استرانسیم (۲۴۰/۵۵)، سرب (۳۲/۶۷)، روی (۲۴/۹۳)، نیکل (۱۹/۱۴)، مس (۷/۲۵)، نقره (۶/۱۵)، کبالت (۵/۷۲) و کادمیم (۳/۳۹) است. توزیع این عناصر سنگین در رسوبات با عواملی نظیر بافت رسوبات و ترکیب ذرات تشکیل‌دهنده ارتباط زیادی دارد. هر چه ذرات ماسه دانه ریزتر می‌شوند، به علت افزایش کانی‌های سنگین از قبیل هورنبلند، پیروکسن، گارنت و بیوتیت که عمدتاً منشأ آذرین دارند، میزان تمرکز نسبی عناصر سنگین در این رسوبات نیز افزایش می‌یابد. با کاهش کانی‌های هورنبلند، پیروکسن و بیوتیت به طرف جنوب پلایا، میزان تمرکز مس و روی کاهش می‌یابد. افزایش غلظت عناصر سرب، منگنز، کادمیم، استرانسیم و نقره به طرف جنوب پلایا ارتباط مستقیمی با فراوانی ذرات آهک دارد. تغییرات غلظت کبالت از شمال به جنوب متناسب با افزایش و یا کاهش کانی‌های سنگین مانند آمفیبول، پیروکسن، مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت است. فاکتور غنی‌شدگی فلزات سنگین در رسوبات مورد بررسی نشان می‌دهد که عناصر کادمیم و نقره دارای غنی‌شدگی فوق‌العاده زیاد بوده و عناصر Sr, Co غنی‌شدگی زیاد دارند. غنی‌شدگی عناصر Ni و Pb متوسط می‌باشد و عناصر Cu, Mn و Zn در همه نمونه‌ها غنی‌شدگی کم دارند.

واژه‌های کلیدی: عناصر سنگین، کانی‌های سنگین، پهنه ماسه‌ای، پلایای گاوخونی.

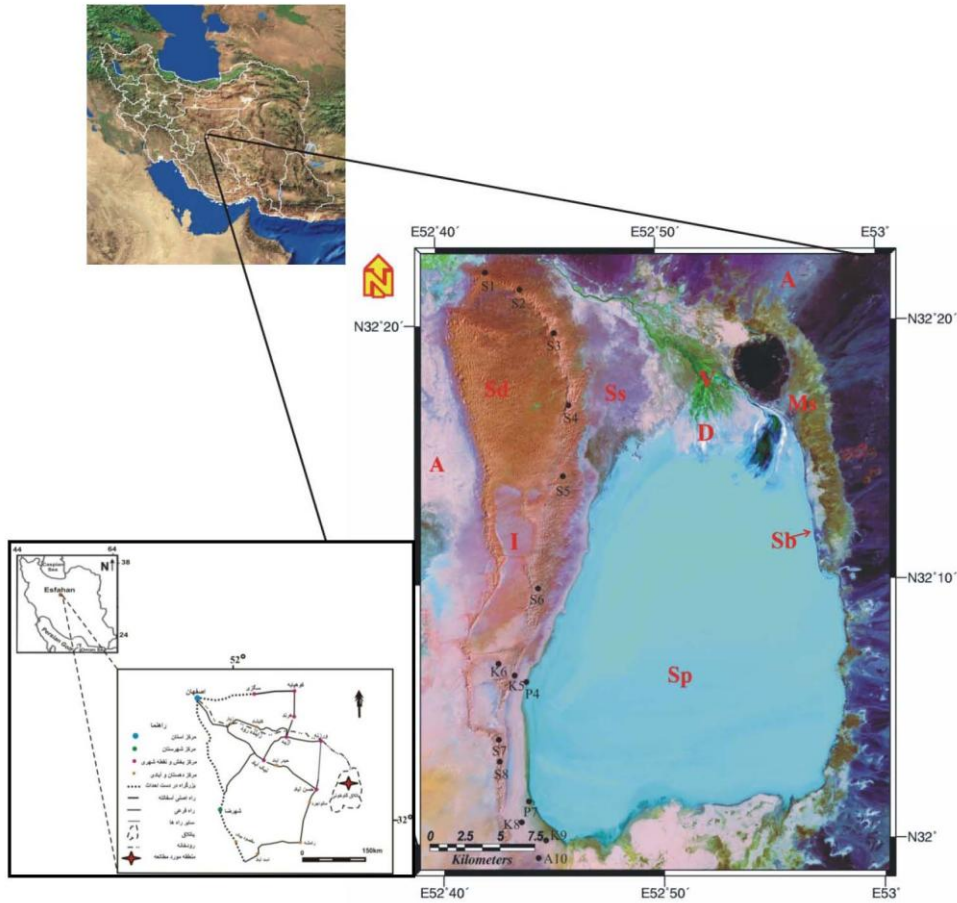
مقدمه

رسوبات مهم‌ترین بخش سنگ‌کره از نظر ژئوشیمی زیست - محیطی هستند زیرا محل تجمع نهایی عناصر بالقوه سمی در محیط آبی بوده و در شرایط خاصی می‌توانند به عنوان منبع آلودگی در آب عمل کنند (Jalali and Khanlari 2006). فلزات و دیگر عناصر تحت فرایندهای زمین‌شناسی به طور پیوسته وارد هیدروسفر، اتمسفر و بیوسفر می‌شوند. گروهی از این فرایندها فلزات را از عمق به سطح می‌آورند و گروه دیگر فلزات را در محیط پراکنده می‌کنند. اولین فرآیند که به پراکندگی ناهمگن فلزات در سنگ‌ها منجر می‌گردد، میزان تجمع فلزات در انواع سنگ‌های مختلف است. دومین فرآیند هوازدگی است و بسیاری از فرایندهای هوازدگی در بازه زمانی خاصی صورت می‌گیرند که با شرایط زیست محیطی مرتبط است (Bradl 2005). فلزات سنگین از جمله آلاینده‌های رودخانه‌ها هستند که در اندازه دانه‌های مختلف توزیع هموزنی ندارند (Goldsmith 2001). الگوی توزیع فلزات بستگی به بافت رسوبات دارد. فلزات سنگین بیشترین تجمع را در رسوبات در اندازه سیلت و رس دارند و این ویژگی رس‌ها به خاطر سطح ویژه زیاد و خصوصیت جذب سطحی آنها می‌باشد (Krumgalz 1991; Martincic 1990). همچنین، فلزات سنگین در ذرات به اندازه ماسه دانه ریز به علت حضور کانی‌های سنگین تمرکز بیشتری دارند (Vareikiene 2007; Singh 1999).

پلاپای گاوخونی با وسعتی حدود 550 km^2 در 130 کیلومتری جنوب شرق اصفهان قرار دارد. رودخانه دائمی زاینده‌رود پس از طی مسافتی در حدود 440 کیلومتر به

پلاپای گاوخونی می‌ریزد. علاوه بر آن تعدادی از رودخانه‌های فصلی و آبراهه‌ها نیز مستقیماً به آن منتهی می‌شوند. در طی کوتاه‌ترن مقادیر زیادی رسوب در اندازه شن و ماسه به این منطقه حمل گردیده و رسوب کرده است. این رسوب‌ها عمدتاً در دلتای رودخانه زاینده‌رود (شمال غربی پلاپای گاوخونی) و شمال غربی تپه‌های ماسه‌ای در حاشیه رودخانه زاینده‌رود به‌ویژه از ورزنه تا پلایا رسوب نموده‌اند (شکل‌های ۱ و ۲). علاوه بر این مخروطه افکنه‌های بزرگ اطراف پلایا می‌توانند منشأ بخشی از این رسوب‌ها باشند (Pakzad 2003). پلاپای گاوخونی دارای سه پهنه اصلی می‌باشد که عبارتند از: ماسه‌ای، گلی و نمکی (شکل ۱). قسمت اعظم سطح پلایا را قشر نمکی می‌پوشاند (Pakzad and Fayazi 2007). براساس مطالعات زمین‌شناسی، حوضه آبریز پلاپای گاوخونی را سنگ‌های آذرین، رسوبی (به‌ویژه آهک) و دگرگونی تشکیل می‌دهند. سنگ‌های شیست، گنایس، آهک، ماسه‌سنگ، شیل و آندزیت گسترش بیشتری در حوضه دارند. این منطقه دارای آب و هوای خشک بوده و میانگین درجه حرارت آن از حدود 7° - درجه سانتیگراد در زمستان تا حدود 42° + درجه در تابستان متغیر می‌باشد. جهت غالب باد در منطقه به صورت غربی-جنوب غربی است (Pakzad 2003).

هدف از این پژوهش بررسی تمرکز عناصر سنگین Mn, Ni, Pb, Cu, Ag, Zn, Sr, Co, Cd در نهشته‌های ماسه بادی، عوامل مؤثر بر تمرکز این عناصر و نیز ارتباط عناصر مذکور با خرده‌سنگ‌ها و کانی‌های تشکیل‌دهنده این رسوبات به‌ویژه کانی‌های سنگین است.



D: دلتا، V: پوشش گیاهی دلتا، A: نهشته‌های آبرفتی، S: پهنه گلی و گلی-نمکی، Sp: پهنه نمکی، Ss: پهنه ماسه‌ای، Sd: تپه‌های ماسه‌ای، I: بین تپه‌های ماسه‌ای، Sb: نهشته‌های گراولی-ماسه‌ای ساحلی

شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای Landsat TM نشان‌دهنده نهشته‌های مخروط افکنه و پهنه‌های مختلف رسوبی به همراه موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در حوضه پلایای گاوخونی



شکل ۲- تصاویری از حوضه دریاچه پلایایی گاوخونی الف) ماسه‌های بادی (تپه‌ای و بین تپه‌ای) ب) زیرمحوطه‌های کانال و بین کانال به همراه پوشش گیاهی (f: *Phragmites* sp.; s: *Salicornia* sp.) در دلتای زاینده‌رود

روش تحقیق

۱۵ نمونه از رسوبات ماسه بادی (تپه‌های ماسه‌ای و پهنه‌های ماسه‌ای) از شمال به طرف جنوب پلایای گاوخونی برداشت گردید (شکل ۱). دانه‌بندی رسوبات به روش الک خشک انجام شد. کانی‌های سنگین رده ماسه دانه‌ریز با استفاده از مایع بروموفرم جداسازی گردیدند. برای تشخیص نوع خرده‌سنگ‌ها و کانی‌های سبک و سنگین، مقاطع نازک و صیقلی از نمونه‌ها تهیه شده و توسط میکروسکوپ‌های پلاریزان و انعکاسی مطالعه و درصد آنها به روش شمارش تعیین گردید (جدول‌های ۱ و ۲). به منظور تعیین غلظت فلزات سنگین توسط جذب اتمی، ابتدا مقداری از نمونه اولیه با آب مقطر شسته شده و سپس در دستگاه اتو با حرارت ۵۰ درجه سانتیگراد خشک گردید. مقدار ۳ گرم نمونه همگن در هاون پودر گردید و پودر عبوری از الک ۲۳۰ مش در داخل بشر ریخته شده و محلول تیزاب سلطانی (اسید نیتریک و اسید کلریدریک به نسبت ۳ به ۱) به آن اضافه شد. محلول حاصل برای مدت ۱۰ دقیقه بر روی هات پلیت قرار داده شد تا بجوشد. سپس محلول از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ عبور داده شده و دو یا سه مرتبه رسوبات برجای مانده بر روی کاغذ صافی با آب مقطر شستشو گردید. محلول رد شده از کاغذ صافی با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسانده شد و سپس به شدت تکان داده شد تا کاملاً به صورت همگن در

آید (Mico 2008). این محلول پس از ۲۴ ساعت توسط دستگاه AAS مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت.

بحث و بررسی

ماسه‌های بادی واقع در غرب پلایای گاوخونی شامل تپه‌های ماسه‌ای و پهنه‌های ماسه‌ای می‌باشند. حدود ۸۵٪ ماسه‌های بادی در حد ماسه دانه‌ریز هستند و این رسوبات از خرده سنگ‌های آذرین، رسوبی، دگرگونی و کانی‌های کوارتز و فلدسپات و مجموعه کانی‌های سنگین تشکیل گردیده‌اند.

فراوانی ذرات آذرین و دگرگونی ماسه‌های بادی منطقه از شمال به جنوب کاهش یافته و بالعکس ذرات رسوبی افزایش می‌یابند. کانی‌های سنگین سیلیکاته این رسوبات به ترتیب فراوانی شامل زیرکن، آمفیبول، پیروکسن، اپیدوت، کلینوزویت، اسپینل، ایدوکراز، ولاستونیت، ترمولیت-اکتینولیت و آپاتیت می‌باشند (جدول ۲). کانی‌های سنگین غیرسیلیکاته به ترتیب فراوانی شامل هماتیت، لیمونیت، مگنتیت، پیریت و اسفالریت هستند. منشأ کانی‌های اسپینل، ایدوکراز، ولاستونیت و ترمولیت-اکتینولیت، سنگ‌های دگرگونی واقع در شمال منطقه (اسکارن فشارک) است و منشأ کانی‌های زیرکن، آمفیبول، پیروکسن، اپیدوت، پیروکسن، کلینوزویت، مگنتیت و آپاتیت، سنگ‌های آتشفشانی واقع در شمال و شمال شرق منطقه می‌باشند.

جدول ۱- فراوانی درصد خرده‌سنگ‌ها و کانی‌های رسوبات ماسه‌ای پلایای گاوخونی.

شماره نمونه	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	K ₅	K ₆	P ₄	S ₇	S ₈	P ₇	K ₈	K ₉	A ₁₀
آذرین	۵۵/۴	۵۳/۲۲	۵۳/۷	۴۲	۳۱/۸۵	۳۰/۸	۲۳/۵	۱۲/۳	۲۶/۴۶	۲۶	۱۶/۳۶	۱۷/۳۶	۱۴/۲۲	۱۸/۷۴	۱۱/۶۶
رسوبی	۲۲/۰۵	۲۶/۳۳	۲۲/۸	۳۷/۹۳	۵۵/۷۴	۵۸/۲	۶۵/۴	۶۷	۵۵/۸۳	۶۶/۷۵	۸۰	۶۶/۵۳	۶۶/۱۳	۷۲	۸۳/۳
دگرگونی	۳/۱۲	۵/۲	۲/۸	۲/۰۶	۲/۳۹	۰	۱/۳۷	۲/۴	۲/۱	۱	۰	۱/۷	۰/۹	۰	۰
کوارتز	۱۵/۱۰۲	۱۰/۲۲	۱۷	۱۵	۷/۸۴	۹	۸/۲	۱۵/۱۳	۱۲/۳۶	۵	۳	۱۲/۱۳	۱۵/۷۳	۹	۵
فلدسپات	۱	۲/۰۲	۱/۲	۱	۱	۰/۵	۱	۱/۵	۲/۳	۰	۰	۱/۲	۱/۰۳	۰	۰
کانی سنگین	۳/۴۱	۳/۰۱	۲/۵	۲/۰۱	۱/۱۸	۱/۵	۰/۵۳	۱/۶۷	۱/۱۷	۱/۲۵	۰/۶۴	۱/۳۷	۱/۹۹	۱/۲۶	۰/۰۴

جدول ۲- درصد هریک از کانی‌های سنگین در نمونه‌های مورد مطالعه. Am (آمفیبول)، Py (پیروکسن)، Ep (اپیدوت)، Zr (زیرکن)، Gr (گارنت)، Bi (بیوتیت)، Tr (تورمالین)، V (والاسونیت)، Id (ایدیوکراز)، Op (کانی‌های اپاک).

شماره نمونه	Op	Va	Tr	Bi	Gr	Zr	Pi	Ep	Py	Am
S1	۰.۴/۱۶	۰	۲/۱۴	۱/۵	۳/۰۱	۲/۱۵	۳	۱۴/۰۲	۱۵/۲۳	۳۷/۲۱
S2	۲۹/۷۲	۰	۰	۳/۲	۲/۷۳	۳/۴۵	۱/۲	۱۰/۱۶	۱۵/۴۳	۳۰/۸۱
S3	۳۹/۰۲	۰	۰	۲/۴	۰	۱/۴	۱/۵۶	۲۰/۴۳	۷/۵۶	۳۰/۵۱
S4	۱۶/۱۲	۰	۰	۱/۰۲	۳/۲۲	۳/۲۲	۲/۴	۳۴	۲۴/۸	۱۵/۲۲
S5	۳۵/۰۹	۰	۰	۰	۰	۲/۴۱	۰	۳۰/۱۷	۱۰/۳۲	۲۲/۰۱
S6	۳۶/۷۱	۰	۱/۷۲	۲/۱۷	۳/۴۴	۰	۰	۳۴/۴۳	۱۳/۲۴	۷/۱۷
K5	۳۷	۰	۰	۴/۱۴	۰	۰	۰	۳۱/۰۲	۷/۳۱	۱۰/۱۹
K6	۴۲/۷۷	۰	۰	۱/۸	۰	۰	۲/۱۳	۲۸/۹۲	۱۳/۶۲	۶/۴۶
P4	۳۴/۷۲	۰	۲/۱	۳/۲	۱/۲	۱/۳۲	۲	۴۱/۶۲	۸/۰۲	۸/۰۲
S7	۳۰/۷۱	۰	۰/۰۲	۲/۱۷	۰	۰	۵/۱۹	۴۲/۰۵	۱۲/۰۳	۲/۶۱
S8	۴۰/۷۶	۰	۱/۴۶	۲/۱۶	۰	۱/۱۱	۴/۹	۳۳/۵۲	۸/۶۶	۷/۴۳
P7	۲۷/۲۷	۰	۱/۴	۱/۵۹	۲/۹۸	۱/۱۹	۳	۴۸/۰۵	۱۲/۹	۲/۵۹
K8	۸۵/۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۴۶	۵۸/۳۹	۷/۰۱	۵/۹
K9	۴۳/۱۳	۱/۰۹	۰	۰	۱/۹۴	۰	۲	۲۷/۴۵	۱۳/۷۲	۱۱/۷۶
A10	۵۵/۰۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۰/۸۲	۴/۱۱	۰

جدول ۳- غلظت عناصر سنگین مورد مطالعه در نهشته‌های ماسه‌ای بادی ورزنه بر حسب ppm.

ایستگاه	Zn	Sr	Pb	Ni	Mn	Cu	Co	Cd	Ag
S1	۲۸/۹۳	۱۶۷/۳۳	۳۰/۷۶	۲۱/۰۳	۳۵۸/۱۶	۸۷	۴/۶۶	۳/۱۶	۵/۸۶
S2	۲۶/۷۳	۱۴۳/۵۳	۲۱/۳	۲۰/۳۶	۳۱۶/۱۶	۷/۹۶	۴/۹۶	۲/۳۶	۵/۸۶
S3	۳۱/۵۳	۱۳۵/۰۳	۳۵/۵	۱۹/۰۳	۲۸۸/۱۶	۷/۶	۵/۸۶	۲/۱	۵/۵
S4	۲۸/۵۳	۱۸۰/۹۳	۳۰/۷۶	۱۸/۳۶	۲۸۳/۵	۷/۳	۴/۹۶	۲/۱	۴/۵
S5	۲۴/۱۳	۲۰۱/۳۳	۲۶/۰۳	۱۶/۲۳	۲۹۳/۸۶	۶/۵	۴/۶۶	۳/۱۶	۵/۸۶
S6	۲۳/۵۳	۲۱۷/۰۳	۳۵/۵	۲۰/۳۶	۴۶۲/۶۵	۶/۰۴	۴/۰۶	۳/۹۶	۵/۸۶
K5	۲۲/۴۳	۲۸۸/۰۳	۲۸/۴	۱۹/۷	۲۸۴/۴۳	۷/۶	۵/۸۶	۳/۷	۸/۰۶
K6	۲۵/۱۳	۳۲۲/۰۳	۳۳/۱۳	۲۱/۰۳	۳۴۴/۱۶	۸/۳۳	۸/۲۶	۴/۵	۷/۳۳
P4	۲۶/۳	۲۲۰/۰۳	۳۰/۷۶	۲۰/۳۶	۳۶۲/۸۳	۷/۹۶	۶/۱۶	۳/۴۳	۶/۶
S7	۲۱/۱۳	۳۴۴/۱۳	۳۳/۱۳	۱۸/۳۶	۲۶۲/۶۵	۵/۲	۴/۰۶	۳/۸۵	۵/۵
S8	۲۳/۵۳	۳۸۱/۵۳	۴۵/۲۳	۱۵/۱۴	۳۹۰/۸۳	۵/۴	۴/۹۶	۴/۷۶	۶/۲۳
P7	۲۳/۳۳	۲۲۶/۸۳	۳۵/۵	۲۰/۳۶	۲۸۳/۵	۶/۸۳	۹/۱۶	۳/۹۶	۴/۵
K8	۲۴/۱۳	۲۴۵/۰۳	۳۰/۷۶	۱۹/۳۶	۳۱۸/۰۳	۷/۰۲	۴/۰۶	۳/۱۶	۶/۲۳
K9	۲۱/۱۳	۲۴۵/۵۳	۳۵/۵	۲۰/۳۶	۳۰۲/۱۶	۷/۹۶	۷/۳۶	۲/۶۳	۶/۹۶
A10	۲۳/۴	۲۸۹/۹۳	۳۷/۸۶	۱۷/۰۳	۲۴۸/۸۳	۸/۳۳	۶/۷۶	۳/۹۶	۷/۳۳

بررسی تمرکز عناصر سنگین در نهشته‌های ماسه‌ای بادی

کادمیوم (Cd)

بیشترین مقدار این عنصر در نمونه S₈ به میزان ۴/۷۶ ppm و کمترین میزان آن در نمونه‌های (S₃, S₄) به مقدار ۲/۱ ppm و مقدار میانگین آن ۳/۱۶ ppm می‌باشد. (جدول ۳) براساس نتایج تحقیق، کادمیوم با آهن همبستگی مثبت داشته (جدول ۴) و با افزایش آهن تغییرات غلظت این عنصر روند صعودی نشان می‌دهد. در نمونه‌های K₆ و S₈ که بیشترین مقدار ذرات رسوبی را در بین دیگر نمونه‌ها دارا می‌باشند، مقدار کادمیوم نیز بیشتر است، زیرا کادمیوم در کربنات‌ها می‌تواند جانشین کلسیم گردد.

این عنصر در کربنات‌های میزبان سولفیدهای کمپلکس روی، سرب، کادمیوم و نقره در حوضه آبریز پلایای گاوخونی وجود دارد و به عنوان یکی از منشأهای عنصر محسوب می‌شوند (تیموری اصل ۱۳۹۰).

عنصر کادمیوم می‌تواند در ساختار سیلیکات‌ها نیز جانشین کلسیم گردد. در نمونه‌های ماسه‌ای که خرده‌سنگ‌های آذرین بازیک و کانی‌هایی از قبیل پلاژیوکلاز، بیوتیت و آمفیبول در آنها فراوان‌ترند (مانند S₁)، غلظت کادمیوم نیز بیشتر است. علت این همخوانی شباهت موجود بین بار الکتریکی و شعاع یونی Cd^{+2} ($0.97A^{\circ}$) و Ca^{+2} ($0.99A^{\circ}$) می‌باشد (Farago 1979; Martincic 1990).

استرانسیوم (Sr)

مقدار استرانسیوم در نمونه S₈ به میزان ۳۸۱/۵۳ ppm و کمترین مقدار آن در نمونه S₃ به میزان ۱۳۵/۰۳ ppm و مقدار میانگین این عنصر ۱۹۱/۱۳ ppm می‌باشد. (جدول ۳) به علت تشابه شعاع یونی استرانسیوم با کلسیم، این عنصر می‌تواند جایگزین یون کلسیم در کانی‌های کلسیم‌دار مثل پلاژیوکلازها، کلسیت و آپاتیت شود. عنصر Sr با آهن نیز همبستگی مثبت دارد، (جدول ۴) به طوری که در نمونه‌های S₈ و K₆ که بیشترین مقدار ذرات آهنی را دارند، این عنصر

نیز دارای حداکثر مقدار است و در نمونه S₃ که تقریباً دارای کمترین مقدار می‌باشد، این عنصر نیز دارای کمترین مقدار است.

بعلاوه یون استرانسیوم می‌تواند جایگزین یون پتاسیم K⁺ در درون شبکه فلدسپات پتاسیم گردد (Faure 2001)، ولی در نمونه‌های مورد مطالعه نسبت به کلسیم نقش قابل توجهی در افزایش غلظت استرانسیوم نشان نداده است.

کبالت (Co)

بیشترین مقدار کبالت در نمونه P₇ به میزان ۹/۶۱ ppm و کمترین مقدار آن در نمونه‌های S₇, S₆ و K₈ به میزان ۴/۰۶ ppm است و مقدار میانگین آن ۴/۸۱ ppm می‌باشد. (جدول ۳) بجز نمونه S₈، روند فراوانی عنصر کبالت از شمال به جنوب ماسه‌های بادی سیر نزولی دارد.

شعاع یونی کبالت ($0.74 A^{\circ}$) به شعاع یون آهن فرو (A°) نزدیک است. بنابراین، کبالت می‌تواند جانشین این عنصر شود (Bjorklund 1989). کانی‌هایی مانند آمفیبول، پیروکسن، مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت که حاوی آهن هستند، باعث جذب کبالت در ساختار خود می‌شوند. بنابراین، در نمونه‌های S₈, S₃ و P₇ که از لحاظ بافتی خیلی دانه‌ریز هستند و میزان تمرکز کانی‌های سنگین به‌ویژه هماتیت و گوتیت و سولفیدهایی مانند پیریت و کالکوپیریت در آنها زیاده‌تر است، درصد عنصر کبالت افزایش نشان می‌دهد (Behera 2003).

نیکل (Ni)

بیشترین مقدار این عنصر در نمونه‌های K₆ و S₁ به میزان ۲۱/۰۳ ppm و کمترین مقدار آن در نمونه S₈ به میزان ۱۵/۱۴ ppm و مقدار میانگین آن ۱۸/۶۹ ppm می‌باشد. (جدول ۳) غلظت عنصر نیکل در طول ماسه‌های بادی از شمال به سمت جنوب روند کاهشی داشته ولی در نمونه S₆ مقدار آن افزایش یافته و مجدداً در نمونه‌های بعدی روند کاهشی دارد (جدول ۳).

در ایستگاه‌های K₅, K₆, K₈ و K₉ که کانی پیریت زیاد است، غلظت عنصر نقره نیز زیاد است.

سرب (Pb)

بیشترین مقدار این عنصر در نمونه S₈ به میزان ۴۵/۲۳ ppm و کمترین مقدار آن در نمونه S₂ به میزان ۲۱/۳ ppm و میانگین آن ۳۱/۹۴ ppm می‌باشد. (جدول ۳)

عنصر سرب با کربنات همبستگی مثبت دارد (جدول ۴) و مقادیر هر دو از شمال به جنوب ماسه‌های بادی روند صعودی نشان می‌دهند. در نمونه‌های S₈ و A₁₀ که دارای بیشترین میزان کربنات هستند، غلظت این عنصر نیز حداکثر است ولی در نمونه S₂ با کمترین میزان کربنات، عنصر سرب نیز حداقل مقدار را دارا می‌باشد (جدول‌های ۱ و ۳). سرب در سیلیکات‌ها در موقعیت‌های ساختاری مربوط به فلزات تک ظرفیتی و دو ظرفیتی دارای شعاع بزرگ استقرار می‌یابد. اکسید Fe نیز نقش مهمی در جذب سرب در خاک دارد (Goldsmith 2001) (نمونه‌های S₈, A₁₀ و P₇). در نمونه S₃ که کانی‌های آمفیبول، اوژیت، بیوتیت، مگنتیت و پیریت وجود دارند، میزان سرب بیشتر است (جدول ۲)، زیرا این کانی‌ها می‌توانند عنصر سرب را در ساختار خود جذب نمایند (Bradl 2005).

مس (Cu)

بیشترین مقدار این عنصر در نمونه S₁ به میزان ۸/۷ ppm و کمترین مقدار آن در نمونه S₇ به میزان ۵/۲ ppm و مقدار میانگین آن ۶/۹ ppm می‌باشد (جدول ۳). مس تمایل دارد در کانی‌های سولفیدی تمرکز یابد. علت این مسأله پیوند کووالانت قوی بین مس و گوگرد است. اختلاف شدید الکترونگاتیوی بین یون‌های مس و سولفید باعث می‌شود که حتی مس از داخل سیلیکات‌ها خارج شده و با سولفیدها ترکیب شود (Davies 1980).

میزان کانی‌های سولفیدی از قبیل: پیریت و کالکوپیریت

همچنین نیکل با آهن نیز همبستگی منفی نشان می‌دهد (جدول ۴) و با افزایش فاصله به طرف جنوب، میزان آهن افزایش یافته در حالی که غلظت نیکل به این سمت روند کاهشی نشان می‌دهد.

غلظت نیکل عموماً بوسیله کانی‌های سیلیکاته کنترل می‌شود، به طوری که در نمونه‌های مربوط به بخش شمالی ماسه‌های بادی که میزان کانی‌های آمفیبول، پیروکسن، بیوتیت، پلاژیوکلاز و مگنتیت زیاد است، به علت حضور نیکل در ساختار این کانی‌ها (Kuck 2009)، تمرکز این عنصر نیز بیشتر است. نیکل قادر است در جایگاه‌های اکسیدی (+۲) و به علت تشابه اندازه یونی با عناصر آهن و کبالت در کانی‌های مذکور جانشین این عناصر گردد (Bradl 2005). در نمونه S₆ علاوه بر کانی‌های مذکور، کانی‌های دیگری از قبیل فلدسپات، پیریت و کالکوپیریت نیز شناسایی شدند که نیکل در این کانی‌ها نیز حضور می‌یابد (Reddy 2009).

نقره (Ag)

بیشترین مقدار نقره در نمونه K₅ به میزان ۸/۰۶ ppm و کمترین مقدار آن در نمونه‌های S₄ و P₇ به میزان ۴/۵۰ ppm و مقدار میانگین آن ۶/۱۵ ppm می‌باشد. (جدول ۳) روند تغییرات غلظت عنصر نقره در طول پلائیای گاوخونی بسیار متغیر بوده، ولی در دلتای رودخانه زاینده‌رود دارای کمترین مقدار است.

کانی‌های گالن، اسفالریت و کالکوپیریت حاوی مقداری نقره در ساختار خود هستند (Lueth et al. 2000; Koptagel et al. 2007) در حوضه آبریز گاوخونی سنگ‌های میزبان کربناته حاوی سولفیدهای سرب، روی و نقره به وفور وجود دارند که منشأ عمده نقره محسوب می‌گردند (تیموری اصل ۱۳۹۰). در ایستگاه S₈ که بیشترین میزان عنصر سرب اندازه‌گیری شده است، کانی‌های سولفیدی از قبیل پیریت و کالکوپیریت فراوان‌تر می‌باشند، در حالی که در ایستگاه S₄ که دارای کمترین مقدار سرب است، کانی سولفیدی تشخیص داده نشده است.

بادی به صورت کاهشی است. در نمونه S₃ رسوبات ماسه‌ای بسیار دانه‌ریز می‌باشند و کانی‌های سنگین بیشتر در ماسه دانه-ریز تجمع دارند (Behera 2003; Vareikiene 2007). روی به طور غالب تمایل دارد تا در برخی ساختارهای سیلیکاته و اکسیدی استقرار یابد و در این موقعیت‌ها، روی جانشین آهن فرو می‌شود. با توجه به رفتار شیمیایی عناصر آهن فرو و روی، روابط شیمیایی نزدیکی بین این دو یون قابل انتظار است (شعاع یونی Zn⁺² = شعاع یونی Fe⁺²) (Wedpohl 1972). در بین کانی‌های اکسیدی، مگنتیت ساختار مناسبی برای تمرکز روی دارد. مقدار کمی از عنصر روی در ترکیب گوئیت حضور دارد که یا به صورت جذبی بر روی سطح اکسید آهن و یا به صورت جانشین شده با آهن در ساختمان کانی مشاهده می‌شود (Bradl 2005).

میزان کانی‌هایی مانند آمفیبول، پیروکسن، اورثیت، بیوتیت و مگنتیت در بخش شمالی ماسه‌های بادی زیاد است و این کانی‌ها عنصر روی را در ساختار خود جذب می‌نمایند.

ضریب همبستگی

ضرایب همبستگی عناصر سنگین در رسوبات ماسه بادی به منظور تفسیر آماری رابطه این عناصر با یکدیگر و منشأیابی آنها محاسبه گردیده است (جدول ۴). نتایج نشان می‌دهند که برخی از عناصر که همبستگی نزدیکی نسبت به هم دارند، از افزایش غلظت مشابه و معمولاً یکسانی نیز برخوردارند. برخی از عناصر با میزان آهک رسوبات منطقه همبستگی مثبت نشان می‌دهند. عناصری مانند Cd و Sr با همدیگر همبستگی مثبت و بالایی داشته و با کربنات نیز همبستگی بالایی دارند و با افزایش میزان ذرات رسوبی (آهکی) افزایش یافته‌اند. عناصر Zn و Sr نیز همبستگی منفی نشان می‌دهند.

در قسمت شمالی ماسه‌های بادی زیاد است ولی با افزایش فاصله به سمت جنوب، میزان آنها کاهش یافته و بر عکس میزان ذرات آهکی افزایش یافته است. بنابراین، با افزایش فاصله به طرف جنوب، تغییرات غلظت عنصر مس روند کاهشی نشان می‌دهد.

منگنز (Mn)

بیشترین مقدار عنصر منگنز در نمونه S₆ به میزان ۴۶۲/۶۵ ppm و کمترین مقدار آن در نمونه A₁₀ به میزان ۲۴۸/۸۳ ppm و مقدار میانگین آن ۳۳۷/۱۶ ppm می‌باشد. (جدول ۳) روند تغییرات غلظت عنصر منگنز در طول ماسه‌های بادی متغیر است، به طوری که در ابتدا به طور منظم روند افزایشی داشته و در ایستگاه S₄ کاهش یافته تا این‌که در ایستگاه‌های S₆ و S₇ افزایش نشان می‌دهد.

منگنز با کربنات کلسیم همبستگی مثبت نشان می‌دهد (جدول ۳) و حضور آهک تأثیر مهمی در جذب این عنصر دارد (Jenne 1968). به علاوه برخی کانی‌های سنگین مانند آمفیبول، پیروکسن، پلاژیوکلاز، اپیدوت، گارنت، تورمالین، مگنتیت، زیرکن و همچنین کانی‌های سولفیدی از قبیل اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت عنصر منگنز را در ساختار خود جذب می‌کنند (جدول ۲). در نمونه‌های S₆ و S₇ که میزان کانی‌های آهن‌دار و ذرات رسوبی زیاد است، میزان منگنز نیز زیادتر است، زیرا منگنز می‌تواند جایگزین آهن شود (Bradl 2005).

روی (Zn)

بیشترین مقدار این عنصر در نمونه S₃ به میزان ۳۱/۵۳ ppm و کمترین مقدار آن در نمونه K₉ به میزان ۲۱/۱۳ ppm و مقدار میانگین ۲۵/۴۳ ppm می‌باشد. (جدول ۳) روند تغییرات غلظت عنصر روی از شمال به طرف جنوب در ماسه‌های

جدول ۴- ضریب همبستگی عناصر مورد مطالعه در ماسه‌های بادی ورزته

	Ag	Cd	Co	Cu	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	CaCO ₃ %
Ag	۱									
Cd	۰/۳۵	۱								
Co	۰/۱۷	۰/۲۱	۱							
Cu	۰/۳۷	-۰/۳۵	۰/۴۲	۱						
Mn	۰/۰۳	۰/۳۳	-۰/۲۷	-۰/۱۹	۱					
Ni	۰/۰۶	-۰/۲۰	۰/۳۱	۰/۵۳	۰/۱۹	۱				
Pb	۰/۰۳	۰/۵۳	۰/۲۳	-۰/۳۴	۰/۲۲	-۰/۳۸	۱			
Sr	۰/۴۳	۰/۸۲	۰/۱۲	-۰/۴۴	۰/۰۲	-۰/۳۹	۰/۵۷	۱		
Zn	-۰/۳۷	-۰/۵۷	-۰/۱۲	۰/۴۳	۰/۰۶	۰/۱۷	-۰/۲۱	-۰/۷۰	۱	
CaCO ₃ %	۰/۲۸	۰/۷۸	۰/۰۴	-۰/۴۲	۰/۳۵	-۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۷۴	-۰/۴۴	۱

فاکتور غنی‌شدگی

براساس این فاکتور می‌توان مقدار عناصر را نسبت به میزان طبیعی آنها سنجید. این فاکتور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Ef = \frac{Sc}{Rc} \quad (1)$$

در رابطه (۱) فاکتور غنی‌شدگی، Sc^۱ غلظت عنصر در خاک و RC^۲ غلظت عنصر در ماده مرجع می‌باشد. غلظت ماده مرجع، میانگین جهانی غلظت عنصر در ماسه سنگ می‌باشد (Rose et al. 1979; Krauskopf 1967).

براساس فاکتور غنی‌شدگی، ۵ دسته آلاینده‌گی مشخص شده است. اگر میزان فاکتور غنی‌شدگی کمتر از ۵ باشد آلودگی اهمیت چندانی ندارد، زیرا معمولاً غنی‌شدگی‌های کوچک مقدار مربوط به اختلاف در ترکیب رسوب محلی و یا نوع عنصر مرجع مورد استفاده در محاسبه فاکتور غنی‌شدگی می‌باشند (Kartal et al. 2006). اگر $Ef < 2$ باشد، حداقل غنی‌شدگی اتفاق افتاده است. اگر $2 < Ef < 5$ باشد، غنی‌شدگی متوسط است و اگر $Ef < 20$ باشد غنی‌شدگی زیاد می‌باشد.

در صورتی که $20 < Ef < 40$ باشد، غنی‌شدگی بسیار زیاد بوده و اگر $Ef > 40$ باشد، غنی‌شدگی فوق‌العاده زیاد است (Yongming et al. 2006; Kartal 2006; Sutherland 2000). بر طبق فاکتور غنی‌شدگی، عناصر کادمیوم و نقره دارای غنی‌شدگی فوق‌العاده زیاد، Sr و Co غنی‌شدگی زیاد، Ni و Pb غنی‌شدگی متوسط و عناصر Cu, Mn و Zn غنی‌شدگی کم دارند.

¹ Soil Concentration

² Reference Concentration

جدول ۵- مقادیر فاکتور غنی‌شدگی عناصر برای نمونه‌های ماسه بادی.

	Ag	Cd	Co	Cu	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn
S ₁	۸۳/۷۱	۶۳/۲	۱۵/۵۳	۰/۲۹	۰/۷۸	۲/۳۴	۳/۰۸	۸/۳۷	۰/۹۶
S ₂	۸۳/۷۱	۴۷/۲	۱۶/۵۳	۰/۲۷	۰/۶۹	۲/۲۶	۲/۱۳	۷/۱۸	۰/۸۹
S ₃	۷۸/۵۷	۴۲	۱۹/۵۳	۰/۲۵	۰/۶۳	۲/۱۱	۳/۵۵	۶/۷۵	۱/۰۵
S ₄	۶۴/۲۹	۴۲	۱۶/۵۳	۰/۲۴	۰/۶۲	۲/۰۴	۳/۰۸	۹/۰۵	۰/۹۵
S ₅	۸۳/۷۱	۶۳/۲	۱۵/۵۳	۰/۲۲	۰/۶۴	۱/۸۰	۲/۶۰	۱۰/۰۷	۰/۸۰
S ₆	۸۳/۷۱	۷۹/۲	۱۳/۵۳	۰/۲۰	۱/۰۱	۲/۲۶	۳/۵۵	۱۰/۸۵	۰/۷۸
K ₅	۱۱۵/۱۴	۷۴	۱۹/۵۳	۰/۲۵	۰/۶۲	۲/۱۹	۲/۸۴	۱۴/۴۰	۰/۷۵
K ₆	۱۰۴/۷۱	۹۰	۲۷/۵۳	۰/۲۸	۰/۷۵	۲/۳۴	۳/۳۱	۱۶/۱۰	۰/۸۴
P ₄	۹۴/۲۹	۶۸/۶	۲۰/۵۳	۰/۲۷	۰/۷۹	۲/۶۲	۳/۰۸	۱۱/۰۰	۰/۸۸
S ₇	۷۸/۵۷	۷۷	۱۳/۵۳	۰/۱۷	۰/۵۷	۲/۰۴	۳/۳۱	۱۷/۲۱	۰/۷۰
S ₈	۸۹	۹۵/۲	۱۶/۵۳	۰/۱۸	۰/۸۵	۱/۶۸	۴/۵۲	۱۹/۰۸	۰/۷۸
P ₇	۶۴/۲۹	۷۹/۲	۳۰/۵۳	۰/۲۳	۰/۶۲	۲/۲۶	۳/۵۵	۱۱/۳۴	۰/۷۸
K ₈	۸۹	۶۳/۲	۱۳/۵۳	۰/۲۳	۰/۶۹	۲/۱۵	۳/۰۸	۱۲/۲۵	۰/۸۰
K ₉	۹۹/۴۳	۵۲/۶	۲۴/۵۳	۰/۲۷	۰/۶۶	۲/۲۶	۳/۵۵	۱۲/۲۸	۰/۷۰
A ₁₀	۱۰۴/۷۱	۷۹/۲	۲۲/۵۳	۰/۲۸	۰/۵۴	۱/۸۹	۳/۷۹	۱۴/۵۰	۰/۷۸

نتیجه‌گیری

با بررسی غلظت فلزات سنگین Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sr, در نهشته‌های بادی مشخص شد که میزان غلظت Zn و Ag در نهشته‌های بادی مشخص شد که میزان غلظت برخی از عناصر از قبیل Ag, Mn, Sr, Pb به طرف جنوب پلایا و ماسه‌های بادی زیاد شده است در حالی که عناصر Zn, Ni و Cu به این سمت روند کاهشی نشان می‌دهند.

با توجه به حضور واحدهای زمین‌شناسی از جنس آهک در قسمت‌های غرب و جنوب غرب منطقه و همبستگی مثبت و بالای عناصر Cd و Sr با آهک گویای این مطلب است که این عناصر در ساختار آهک جذب شده‌اند. عنصر نقره با وجود اینکه در تمامی سنگ‌های آذرین به مقدار کم وجود دارد قاعدتاً بایستی در قسمت‌های شمالی منطقه که میزان سنگ‌های آذرین فراوان است، نسبتاً زیادتر باشد، ولی به علت وجود ترکیبات سولفیدی آواری در قسمت‌های جنوبی پلایا

که غالباً همراه خرده‌سنگ‌های کربناته می‌باشند، روند افزایشی نشان می‌دهد. زیرا سنگ‌های کربناته در بخش زیادی از حوضه آبریز سنگ میزبان کانی‌های سولفیدی می‌باشد که در ترکیب آنها نقره هم وجود دارد. عنصر کبالت نیز در کانی‌های سنگین آمفیبول، پیروکسن، ترکیبات سولفیدی و اکسیدهای آهن وجود دارد، بنابراین مقدار آن به طرف جنوب منطقه زیاد شده است. عناصر Ni, Zn و Cu به علت فراوانی کانی‌های سنگین از قبیل هورنبلند، پیروکسن، اپیدوت، مگنتیت و بیوتیت در قسمت‌های شمالی تمرکز زیادتری دارند.

براساس فاکتور غنی‌شدگی، در رسوبات مورد بررسی عناصر کادمیوم و نقره با غنی‌شدگی فوق‌العاده زیاد، Sr و Co غنی‌شدگی زیاد، Ni و Pb متوسط و Cu, Mn و Zn با غنی‌شدگی کم ارزیابی می‌شوند.

قدردانی

از تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان که با حمایت‌های مالی زمینه انجام این تحقیق را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Yahyali region, Kayseri, Southern Turkey: Turkish Journal of Earth Science, v. 16, p. 57-76.
- Krauskopf, K. B., 1967, Introduction to geochemistry: McGraw-Hill, New York, 721 p.
- Krumgalz, B. S., G. Fainshtein, and A. Cohen, 1992, Grain size on anthropogenic trace metal and organic matter distribution in marine sediments: The Science of the Total Environment, v. 116, p.15-30.
- Kuck, P. H., 2009, Mineral Yearbook: USGS, 305 p.
- Lueth, V., K. M. Megaw, N. E. Pingitore, and P. C. Goodell, 2000, Systematic variation in galena solid-solution compositions at Santa Eulalia, Chihuahua, Mexico: Economic Geology, v. 95, no. 8, p. 1673-1687
- Martincic, D., Z. Kwokal, and M. Branica, 1990, Distribution of Zinc, Cadmium and Copper between different size fraction of sediments the Krka River estuary and the Kornati Islands (Central Adriatic Sea): The Science of the Total Environment, v. 95, p. 217-225.
- Micó C., Recatala L., Peris M., Sanches J., 2008, Discrimination of lithogenic and anthropogenic metals in calcareous agricultural soils: Soil Sediment Contam, v. 17, p. 467-485
- Pakzad, H. R., 2003, Sedimentary facies association of the lower reaches of the Zayandehrud River and the Gavkhoni playa lake basin, Esfahan province, Iran: Doctoral dissertation, Clausthal University, 273 p.
- Pakzad H. R., Fayazi F., 2007, Sedimentology and stratigraphic sequence of the Gavkhoni playa lake, SE Esfahan, Iran: Carbonates and Evaporites, v. 22(2), p. 93-100.
- Sutherland, R. A., 2000, Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii: Environ. Geol., v. 39, p. 611- 627.
- Wedpohl, K. H., 1972, Hand book of Geochemistry: Springer, 350 p.
- Reddy, B. J., R. L. Frost, and M. L. Dickfos, 2009, Characterisation of Ni silicate-bearing minerals by UV-VIS-NIR Spectroscopy-Effect of Ni substitution in hydrous Ni-Mg silicates: Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, v. 71, p. 1762-1768.
- Rose, A. W., H. E. Hawkes, and J. B. Webb, 1979, Geochemistry in mineral exploration, 2nd eds: London, Academic Press, 450 p.
- Singh, A. K., S. I., Hansnain and D. K., Banerjee, 1999, Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediment of the damoder river tributary of the lower
- تیموری اصل، ف.، ح. ر. پاکزاد و ه. باقری، ۱۳۹۰، بررسی منشأ فلزات و سیالات کانه زا در کانسار سرب و روی ایرانکوه: نشریه پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، شماره سوم (۴۴)، ص ۸۳-۱۰۲.
- Behera, P., 2003, Heavy minerals in beach sands of gopalpur and para deep along Orissa coastline east cost of India: Indian Journal of Marine Sciences, v. 32(2), p. 172-174.
- Bradl, H. B., 2005, Sources and Origins of Heavy Metals: Heavy Metals in the Environment, 273 p.
- Davies, B. H., 1980, Applied soil trace elements: John Wiley and Sons. 482 p.
- Farago, M. E., 1979, Pollution by cadmium in the vicinity of smelting operations: Minerals and the Environment. v. 1, no. 2, p. 75-81.
- Faure, G., 2001, Origin of igneous rocks: Springer-Verlag Heideberg, 496 p.
- Goldsmith, S.L., M. D. Krom, A. Sandler, and B. Herut, 2001, Spatial trends in the chemical composition of sediments on the continental shelf and slope off the Mediterranean coast of Israel: Continental Shelf Research, v. 21(16), p. 1879-1900.
- Jalali, M. and Z.V. Khanlari, 2006, Mobility and distribution of Zinc, Cadmium and Lead in calcareous soils receiving spiked sewage sludge: Soil and Sediment Contamination, v. 15(6), p. 603-620.
- Jenne, E. A., 1968, Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and Zn concentrations in soils and water the significance of hydrous Mn and Fe oxides: American Chemistry Society Advances in Chemistry Series, v. 73
- Kartal, S., Z. Aydin and S. Tokalioglu, 2006, Fractionation of metals in street sediment samples by using the BCR sequential extraction procedure and multivariate statistical elucidation of the data: J. Hazard. Mater, v. 132, p. 80-89.
- Koptagel, O., U. Ulusoy, and A. E. Fallick, 2007, Sulfur and lead isotope investigations of the

Yongming, H., D. Peixuan, C. Junji, and E. S. Posmentier, 2006, Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China: *Sci: Total Environment*, v. 355, p. 176-186.

Gange, india: *Environmental Geology*, v. 39, p. 90-98.

Vareikiene, O., J. Marmo, T. Chernet and J. Laukk, 2007, Results of heavy mineral pre-concentration by the knelson for the geochemical study of soil: a case study in Lithuania: *Geologija*, v. 60, p. 1-9.