

ارزیابی میزان آلودگی و توزیع فلزات سنگین در رسوبات معدن مس سرچشمه با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های آماری

محمد رضا شایسته فر^{۱*}، علی رضایی^۲

۱- استادیار دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی معدن؛ Email: shayeste@mail.uk.ac.ir

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان، Email: rezaei.ali169@gmail.com

(دریافت ۳ خرداد ۱۳۸۹، پذیرش ۵ دی ۱۳۸۹)

چکیده

سد باطله معدن مس سرچشمه حاوی فلزات سنگین زیادی است. به این منظور، رسوبات مجتمع مس سرچشمه، برای تعیین غلظت فلزات سنگین و شدت آلودگی، آنالیز شیمیایی شدند. در واقع، هدف این پژوهش، ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین (Fe و Ti, Pb, Ni, Mn, Cr, Zn, Mo, Cu, Co) در رسوبات معدن مس سرچشمه منتهی به سد باطله است. در این پژوهش، شاخص‌های آلودگی نظیر ضریب آلودگی، شاخص بار آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی استفاده شد. تا توزیع فلزات سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه، ارزیابی شود. مقادیر فاکتور غنی‌شدگی (کبالت: ۰/۹۵، مس: ۱۶/۶۳، مولیبدن: ۳/۸۴، روی: ۱/۹۵، کروم: ۰/۸۷، منگنز: ۱/۲۷، نیکل: ۰/۳۶، سرب: ۱/۶۲، تیتانیوم: ۰/۸۳ و آهن: ۱۰/۰۱) و غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های قابل بررسی ارزیابی شد. با توجه به محاسبه شاخص زمین‌انباشتگی برای فلزات سنگین، فلزات مس، روی و آهن ($Zn > Cu > Fe > Mo > Pb > Mn > Cr$) در محدوده آلودگی قرار گرفتند. در این پژوهش از مطالعات آماری (ضریب همبستگی و آنالیز خوشه‌ای) برای یافتن منشأ رسوبات، الگوی پراکنش عناصر و ارزشیابی زیست محیطی وضعیت موجود در منطقه مورد مطالعه کمک گرفته شد. نتایج به‌دست آمده از مطالعات ژئوشیمیایی، آماری (به کارگیری صحیح آمار چند متغیره) و محاسبه شاخص‌های آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی، ضریب آلودگی و شاخص بار آلودگی برای نمونه‌های رسوب، تأییدکننده غلظت‌های بالای این فلزات است. نتایج به‌دست آمده از آنالیز فاکتوری و آنالیز خوشه‌ای (میزان بار فلز سنگین) بر نمونه‌های رسوبات منطقه مورد مطالعه با نتایج حاصل از محاسبه ضریب آلودگی برای ایستگاه‌های نمونه‌برداری مطابقت کامل دارد.

کلمات کلیدی

فلزات سنگین، فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی، آمار چندمتغیره، سد باطله، معدن مس سرچشمه

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

معدن مس سرچشمه با مختصات $55^{\circ} 53' 00''$ طول شرقی و $29^{\circ} 58' 00''$ عرض شمالی در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غربی کرمان و ۵۰ کیلومتری رفسنجان قرار دارد [۱]. موقعیت جغرافیایی مجتمع مس سرچشمه در شکل ۱ نشان داده شده است. سد باطله معدن در ۱۷ کیلومتری شمال شرق مجتمع مس سرچشمه قرار دارد. شماتیک سد باطله معدن مس سرچشمه نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. این سد به منظور ذخیره باطله واحد تغلیظ و استفاده مجدد از آب آن احداث شده است. از جمله ورودی‌های این دریاچه، رودخانه شور است که سرچشمه آن زهاب اسیدی معدن می‌باشد و در بین راه یک سری فاضلاب‌های مجتمع و آب تعدادی چشمه نیز به آن اضافه می‌شود. رسوبات، ترکیبات گوناگونی از انواع کانی‌ها و ذرات آلی هستند که سهم مهمی در تشخیص الگوهای آلودگی سامانه‌های آبی دارند. این مواد هم حمل‌کننده و هم مخزنی برای آلاینده‌ها محسوب می‌شوند [۲] و [۳].

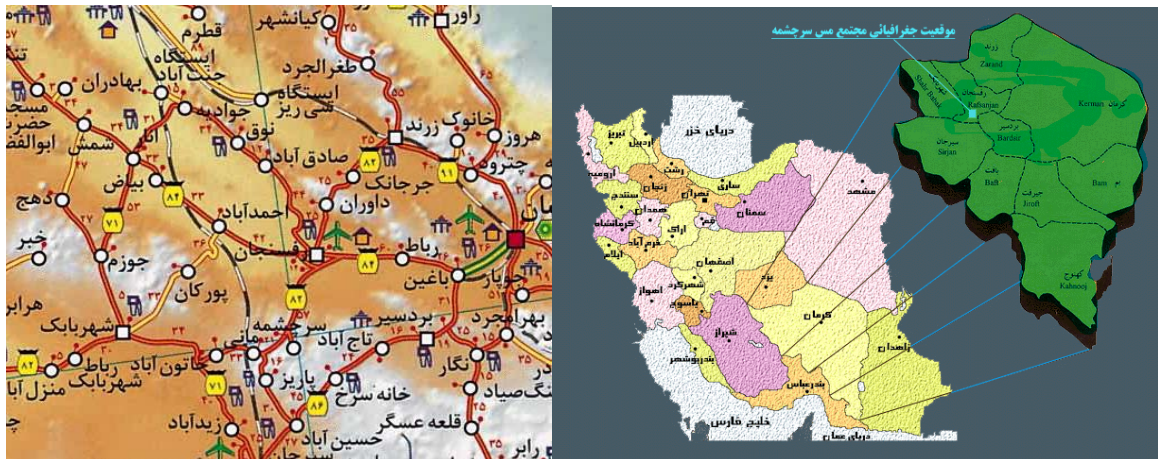
فلزات سنگین موجود در رسوبات دو منشا طبیعی و انسانی دارند. بخشی از غلظت عناصر کمیاب در رسوبات، به‌طور عمده در اثر هوازدهی سنگ‌های بستر، واریزه‌های غیرآلوده و اجزای اصلی رسوبات را تشکیل می‌دهند. پس از رسیدن عناصر کمیاب به اکوسیستم آبی، ممکن است فرایندهای ژئوشیمیایی زیست محیطی بر غلظت آن‌ها در رسوبات تأثیر بگذارد [۴]. انباشتگی و توزیع فلزات سنگین در رسوبات تحت تاثیر عواملی چون، بافت رسوبات، ترکیب مینرالوژیکی، فرایندهای جذب و پس‌دهی^۱ و همچنین نقل و انتقال فیزیکی قرار دارد. مشارکت این فلزات در مکانیسم‌های بیوژئوشیمیایی گوناگون و همچنین قابلیت تحرک قابل توجه این عناصر، روی اکوسیستم‌ها در فرایندهای انباشتگی تأثیرگذار است [۵]. در ایران نیز با توجه به غنای معدنی و توسعه معادن، بررسی مسائل زیست محیطی آن‌ها ضروری است. از این میان، معادن سولفیدی در مرحله استخراج به دلیل افزایش تمرکز عناصر سنگین مهم هستند. فلزات سنگین تخلیه شده به داخل سدهای باطله ناشی از تأثیر فرایندهای طبیعی و کارخانه‌های تغلیظ است [۶]. در مناطق معدنی، دگرسانی و هوازدهی فرایندهای طبیعی هستند که پایداری و مقاومت سنگ‌ها را کاهش می‌دهند. عوامل مختلف از قبیل نوع سنگ میزبان و خصوصیات فیزیکوشیمیایی سیال گرمایی روی دگرسانی سنگ تأثیر دارند، در حالی که استعداد سنگ‌ها در برابر هوازدهی به فاکتورهای متعددی از قبیل ترکیب کانی‌شناسی، اندازه دانه، بافت، ساخت و شرایط محیطی بستگی دارد. سنگ‌های معدن مس سرچشمه نیز مانند دیگر معادن مس

پورفیری تحت تأثیر دگرسانی قرار گرفته‌اند و مناطق مختلف دگرسانی دارند و عمدتاً سنگ‌های آندزیتی به‌عنوان سنگ میزبان بیشترین تأثیر را پذیرفته‌اند [۷]. هوازدهی فیزیکی، منبع تأمین رسوب برای آب‌های جاری منطقه است. در حالی که منابع عمده انسانی شامل معدن‌کاری، ذوب و فعالیت‌های صنعتی و باطله‌های معدنی ناشی از این فعالیت‌هاست. در گذشته تلاش‌های زیادی برای ارزیابی و توزیع فلزات سنگین در رسوبات انجام شده است [۸] و [۹].

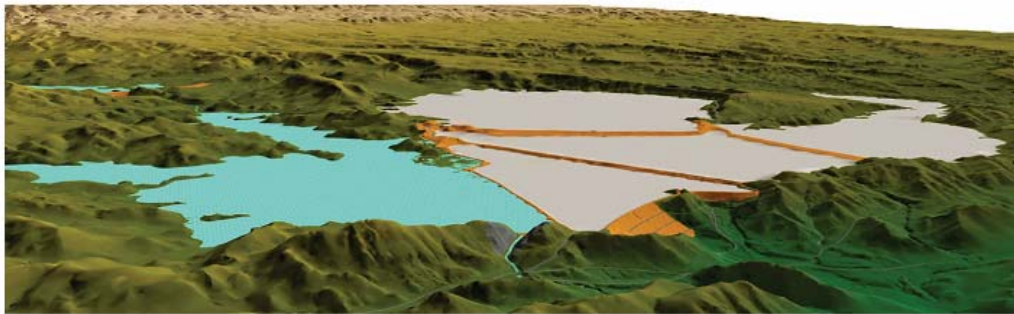
معدن مس سرچشمه که طی سالیان متمادی فعال است، علاوه بر تسریع هوازدهی سنگ‌های دارای کانی‌های حاوی فلزات سنگین، حجم عظیمی فاضلاب نیز تولید می‌کند. آنالیز رسوبات، سهم مهمی در تعیین وضعیت آلودگی مناطق دارد [۱۰] و [۱۱]. مطالعه غنی‌شدگی و انباشتگی فلزات سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه برای تشخیص فعالیت‌های تأثیرگذار انسان روی محیط زیست منطقه، مهم است.

سدهای نگهدارنده پساب به منظور حفاظت از محیط زیست در مقابل پخش گسترده مواد زائد حاصل از استخراج معادن و همچنین نگهداری منابع ارزشمند آب ساخته می‌شوند. سد باطله از ذرات ریز سنگ‌های خارج شده از مرحله تغلیظ حاصل شده که پتانسیل آلایندهی بالایی دارد. با توجه به تولید پساب‌های مختلف در حین عملیات کارخانه تغلیظ که آلودگی‌های زیست محیطی فراوان همچون انواع مواد شیمیایی، pH نامناسب، وجود یون‌های فلزات سمی و ذرات ریز معلق دارد، طراحی سدهای باطله به منظور کنترل آلودگی ناشی از باطله‌ها و حفاظت از متابولیسم طبیعی امری حیاتی است. در این خصوص در معادن خاصه معادن روباز با حجم وسیعی از باطله‌ها، طراحی سدهای باطله اهمیت بسیاری دارد. از جهتی، پساب‌های کارخانه فرآوری، عناصر سمی زیادی را با خود به داخل سد باطله حمل می‌کنند و در صورتی که سدهای باطله پایداری لازم را در طراحی نداشته باشند باعث نفوذ عناصر سمی به داخل آب‌های زیرزمینی می‌شوند [۱۲].

فلزات سنگین به دلیل پایداری و تجزیه‌ناپذیری و همچنین مشکلات دسترس‌پذیری زیستی از آلاینده‌های مهم و خطرناک محیط زیست هستند. بر اساس فرایندهای هیدرودینامیکی و زیست زمین‌شیمیایی و شرایط زیست محیطی (pH، شوری و دما)، رسوبات به‌عنوان مصرف‌گاہ مهم فلزات سنگین در سامانه‌های آبی شناخته شده‌اند، ولی با تغییر در شیمی رسوبات می‌توانند فلزات و آلاینده‌ها را به آب روی رسوب خود انتقال دهند و با تحرک دوباره آلاینده‌ها در بوم سامانه، به‌عنوان منبع آلودگی عمل کنند [۱۳]. به همین دلیل تعیین غلظت



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی مجتمع مس سرچشمه



شکل ۲: نمایی از سد باطله معدن مس سرچشمه [۱۲]

دارند، پس از اطمینان از خشک شدن نمونه‌ها و همگن‌سازی، ذرات کوچک‌تر از ۶۳ میلی‌متر با الک جدا شدند و برای تجزیه عناصر سنگین به روش ICP-MS به آزمایشگاه Acme کانادا ارسال شدند. برای اطمینان از دقت و صحت آنالیزهای انجام شده، چند نمونه تکراری نیز آنالیز شد که نتایج آزمایشگاه را تأیید می‌کرد.

۲-۱- مطالعات و بررسی شاخص‌های آلودگی

نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های رسوب نشان داد که غلظت کل فلزات در جزء کوچکتر از ۶۳ میلی‌متر بسیار متغیر است و گستره آن برای عناصر روی، مس، کروم، کبالت، مولیبدن، منگنز، نیکل، سرب، تیتانیوم و آهن در ایستگاه‌های نمونه- برداری به همراه پارامترهای آماری نمونه‌ها در جدول ۱ آمده است. در مطالعات زیست محیطی به ویژه زمانی که توزیع ژئوشیمیایی عناصر در محیط، حاصل ترکیبی از عوامل انسانی و طبیعی باشد، باید روند تغییرات با استفاده از شاخص‌های آلودگی ارزیابی شود. عامل غنی‌شدگی^۲، شاخص زمین- انباشتگی^۳، ضریب آلودگی^۴ و شاخص بار آلودگی^۵، از معیارهایی

فلزات سنگین در رسوبات برای ارزیابی کیفیت محیط زیست ضروری است.

۲- مواد و روش‌ها

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین (Fe و Ti, Pb, Ni, Mn, Cr, Zn, Mo, Cu, Co) در رسوبات معدن مس سرچشمه منتهی به سد باطله است. در این پژوهش، شاخص‌های آلودگی نظیر ضریب آلودگی، شاخص بار آلودگی، عامل غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی به کار برده می‌شود تا توزیع فلزات سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه ارزیابی شود. نمونه‌برداری از رسوبات مجتمع مس سرچشمه منتهی به سد باطله در سال ۱۳۸۷ در ۲۰ ایستگاه انجام شد. شکل ۳ موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در رسوبات مجتمع مس سرچشمه را نشان می‌دهد. نمونه‌برداری از جریان کم‌عمق توسط بیلچه پلاستیکی انجام شد، بطوری که نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلن ریخته و مهر و موم شدند. سپس نمونه‌ها در دمای اتاق کاملاً خشک شدند. از آنجا که کانی‌های رسی و ذرات ریزدانه توانایی زیادی در جذب عناصر سنگین

۲-۲- ضریب آلودگی و ضریب بار آلودگی

ضریب آلودگی از تقسیم کردن غلظت عنصر در نمونه برداشت شده به غلظت همان عنصر در نمونه زمینه به دست می آید و بیانگر میزان آلودگی رسوبات به عناصر سنگین است [۱۸] و [۱۹]. نمونه زمینه از مقایسه رسوبات منطقه با رسوبات محلی که عوامل انسانزاد روی آن تاثیرگذار نبوده اند با روش های آماری در منطقه مورد مطالعه به دست آمده است.

$$CF = \frac{C_{Sample}}{C_{Background}} \quad (1)$$

که در آن، CF: ضریب آلودگی، n: تعداد فلزات، C_{sample}: غلظت عنصر در نمونه، C_{background}: غلظت عنصر در نمونه زمینه است.

اگر CF > 1 باشد، نشان دهنده وجود آلودگی در رسوبات است و اگر CF < 1 باشد، به این معنی است که آلودگی عنصری وجود ندارد. برای رسوبات معدن مس سرچشمه، غلظت میانگین، ضریب آلودگی و ضریب بار آلودگی محاسبه گردیده است که نتایج آن در جدول شماره ۲ آمده است. ضریب بار آلودگی از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n} \quad (2)$$

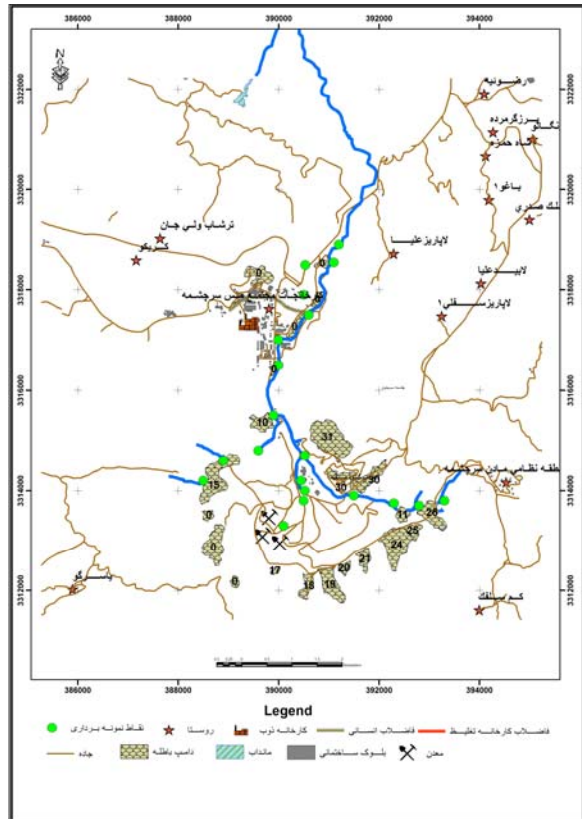
اگر PLI نزدیک به عدد یک باشد، نشان دهنده این است که بار یا غلظت فلزات سنگین نزدیک به غلظت زمینه و اگر بیش از یک باشد نشان دهنده این است که رسوب آلوده می باشد [۱۹] و [۲۰].

با توجه به محاسبات انجام شده برای ضریب آلودگی عناصر مورد مطالعه، مقدار ضریب بار آلودگی (PLI) طبق رابطه ۲ به دست آمده است: PLI = ۱/۷۵

جدول ۲: غلظت میانگین و ضریب آلودگی فلزات سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه (mg/kg)

عنصر	غلظت میانگین	ضریب آلودگی
کبالت (Co)	۲۱/۷۹	۰/۸۷
مس (Cu)	۱۳۷۳/۴۹	۱۵/۳۰
مولیبدن (Mo)	۲۱/۲۱	۳/۵۴
روی (Zn)	۱۶۱/۱۹	۱/۷۹
کروم (Cr)	۲۶/۳۵	۰/۷۹۸
منگنز (Mn)	۹۰۳/۱۰	۱/۱۷
نیکل (Ni)	۲۴/۷۰	۰/۳۳
سرب (Pb)	۶۲/۶۶	۱/۴۹
تیتانیوم (Ti)	۴۳۱۰	۰/۷۶
آهن (Fe)	۵۱۸۶۰	۹/۲۱

هستند که با در نظر گرفتن غلظت عناصر در نمونه زمینه روند آلودگی را نشان می دهند. عامل غنی شدگی (EF)، معیار مناسبی برای تفکیک منابع انسانی و طبیعی فلزات سنگین است [۱۴]، [۱۵]، [۱۶] و [۱۷].



شکل ۳: نقشه موقعیت ایستگاه های نمونه برداری شده در رسوبات مجتمع مس سرچشمه

جدول ۱: پارامترهای آماری فلزات سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه (mg/kg)

عناصر	دامنه	میانگین	میان	انحراف معیار
Zn	۲۴۷-۲۱/۵	۱۶۱/۱۹۵	۱۶۴/۵۰	۵۰/۳۷
Cu	۹۷-۶۷۰۰	۱۳۷۳/۵۰	۱۲۰۰	۱۵۲۶/۵۶
Cr	۱۱-۴۰	۲۶/۳۵	۲۵/۵۰	۷/۵۶
Co	۱۴/۱۰-۵۳/۲۰	۲۱/۷۹	۱۹/۹۵	۸/۲۹
Mo	۱/۱-۸۵/۳۰	۲۱/۲۱	۱۸/۱۰	۲۰/۰۲
Mn	۱۹۵-۱۸۴۰	۹۰۳/۱۰	۱۰۰۳	۴۷۴/۶۱۵
Ni	۱۴-۳۶	۲۴/۷۰	۲۳/۵۰	۵/۷۸
Pb	۲۱/۶۰-۱۲۷	۶۲/۶۶	۵۵/۳۰	۳۱/۷۱
Ti	۱۵۶۰-۶۴۱۰	۴۳۱۰	۴۴۶۰	۱۲۳۳/۴۲
Fe	۲۷۶۰۰-۸۴۹۰۰	۵۱۸۶۰	۵۰۱۰	۱۳۶۲۲/۸۷

۳-۲- فاکتور غنی‌شدگی

فاکتور غنی‌شدگی بیانگر شدت تأثیر عامل خارجی بر رسوبات است [۱۳]. در فاکتور غنی‌شدگی معمولاً غلظت عناصر در نمونه آلوده با غلظت آن عنصر در نمونه زمینه مقایسه می‌گردد و برای حذف برخی غنی‌شدگی‌ها، عناصری مانند Fe, Y, Ti, Sc, Al [۱۷] و Sr [۱۱] را در رابطه غنی‌شدگی تأثیر می‌دهند. رابطه فاکتور غنی‌شدگی مطابق معادله ۳ است:

$$EF = \frac{M_X XFe_b}{M_B XFe_X} \quad (3)$$

که در آن، EF: فاکتور غنی‌شدگی، M_X و Fe_X : غلظت نمونه‌های رسوب فلزات سنگین و Fe (فلز نرمالیزه شده)، M_b و Fe_b : غلظت رسوبات در نمونه زمینه و مرجع هستند [۳]، [۸]، [۱۷] و [۲۱]. از آنجایی که در محاسبه فاکتور غنی‌شدگی، توزیع آهن نسبت به بقیه فلزات سنگین متناسب نیست و آهن به طور معمول غلظت طبیعی بالایی دارد، از Fe به‌عنوان فلز نرمالیزه شده، استفاده شده است. مقادیر فاکتور غنی‌شدگی به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند [۳]:

$EF < 1$: غنی‌شدگی وجود ندارد؛ $EF < 3$: غنی‌شدگی کم؛ EF : 3-5: غنی‌شدگی متوسط، 5-10: EF : غنی‌شدگی متوسط تا شدید؛ EF : 10-25: غنی‌شدگی شدید؛ EF : 25-50: غنی‌شدگی خیلی شدید و $EF > 50$: غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید. در این پژوهش، مقادیر فاکتور غنی‌شدگی (EF) فلزات سنگین برای رسوبات منطقه مورد مطالعه محاسبه شده است که نتایج آن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: مقادیر فاکتور غنی‌شدگی (EF) فلزات سنگین برای رسوبات منطقه مورد مطالعه

عناصر	فاکتور غنی‌شدگی	طبقه‌بندی فاکتور
کبالت (Co)	۰/۹۵	فاقد غنی‌شدگی
مس (Cu)	۱۶/۶۳	غنی‌شدگی شدید
مولیبدن (Mo)	۳/۸۴	غنی‌شدگی متوسط
روی (Zn)	۱/۹۵	غنی‌شدگی کم
کروم (Cr)	۰/۸۷	فاقد غنی‌شدگی
منگنز (Mn)	۱/۲۷	غنی‌شدگی کم
نیکل (Ni)	۰/۳۶	فاقد غنی‌شدگی
سرب (Pb)	۱/۶۲	غنی‌شدگی کم
تیتانیوم (Ti)	۰/۸۳	فاقد غنی‌شدگی
آهن (Fe)	۱۰/۰۱	غنی‌شدگی شدید

بالاترین میانگین فاکتور غنی‌شدگی مربوط به مس با مقدار ۱۶/۶۳ است. بعد از مس، آهن دارای غنی‌شدگی شدید با مقدار ۱۰/۰۱ است که این امر می‌تواند ناشی از تأثیر فرایندهای طبیعی و تولید پساب‌های مختلف در حین عملیات کارخانه تغلیظ مجتمع مس سرچشمه در سال‌های اخیر باشد. تفاوت در مقادیر فاکتور غنی‌شدگی می‌تواند ناشی از اختلاف در میزان ورودی هر فلز در رسوبات و یا اختلاف در میزان انتقال فلز در رسوبات باشد. محیط ژئومورفولوژی منطقه نیز بر شرایط و مسائل زیست محیطی منطقه مؤثر بوده است. محیط ژئومورفولوژی منطقه، آب باران را به‌صورت جریان‌های سطحی و زیرزمینی به سمت معدن و سد باطله و داخل سرباره‌های معدنی هدایت می‌کند، لذا امکان آلوده شدن منابع آب و انتقال آلودگی را فراهم ساخته است.

۴-۲- شاخص زمین‌انباشتگی

شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) برای اولین بار به‌وسیله مولر پیشنهاد و اندیس مولر نامیده شد [۲۲]. این شاخص برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات سنگین در رسوبات به کار برده می‌شود [۲۳]، [۲۴] و [۲۵]. این شاخص به صورت زیر بیان می‌شود [۲۲]:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right] \quad (4)$$

که در آن، C_n : غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در نمونه و B_n : غلظت همان عنصر در نمونه زمینه است. ضریب ۱/۵ نیز برای حذف تغییرات احتمالی زمینه به علت تأثیرات زمین‌شناختی اعمال می‌شود [۵]، [۲۶] و [۲۷].

شاخص زمین‌انباشتگی هفت گروه (Class) دارد که بر اساس مقادیر آن، رسوبات از غیرآلوده تا به شدت آلوده طبقه‌بندی می‌شوند [۵]. مقادیر محاسبه‌شده شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) فلزات سنگین برای رسوبات منطقه مورد مطالعه در جدول ۴ آمده است.

بر این اساس شدت آلودگی عناصر سنگین رسوبات معدن مس سرچشمه به جزء برای عناصر مس (۳/۳۵)، روی (۳/۹۷) و آهن (۲/۶۳) تقریباً در محدوده غیرآلوده قرار می‌گیرند. شدت آلودگی عناصر به شرح زیر است:

$$Zn > Cu > Fe > Mo > Pb > Mn > Cr$$

این آلودگی ناشی از فعالیت‌های معدنی (تأثیر معدن مس سرچشمه، مواد باطله حاصل از کارخانه فرآوری و ذوب) است.

جدول ۴: مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی (I_{gen}) فلزات سنگین برای

رسوبات منطقه مورد مطالعه

عنصر	شاخص زمین- انباشتگی	شدت آلودگی منطقه
کبالت (Co)	< ۰	غیرآلوده
مس (Cu)	۳/۳۵	خیلی آلوده
مولیبدن (Mo)	۰/۵۳	غیرآلوده تا کمی آلوده
روی (Zn)	۳/۹۷	خیلی آلوده
کروم (Cr)	۰/۰۱	غیرآلوده تا کمی آلوده
منگنز (Mn)	۰/۱۱	غیرآلوده تا کمی آلوده
نیکل (Ni)	< ۰	غیرآلوده
سرب (Pb)	۰/۲۷	غیرآلوده تا کمی آلوده
تیتانیوم (Ti)	< ۰	غیرآلوده
آهن (Fe)	۲/۶۳	کمی آلوده تا خیلی آلوده

سرچشمه با آزمون همبستگی پیرسون به منظور تفسیر آماری رابطه عناصر سنگین با یکدیگر و منشأیابی آن‌ها استفاده شده است. مقدار ضریب همبستگی عناصر سنگین رسوبات معدن مس سرچشمه در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود ارتباط معنی‌دار مثبتی میان Co با Mo, Zn و Cr و همچنین ارتباط معنی‌دار منفی میان Cu با Mn, Mo با Zn و Ti وجود دارد. این امر می‌تواند نشان‌دهنده آلودگی از منابع یکسان (باطله‌های معدنی حاصل از کارخانه فرآوری و ذوب) باشد. به منظور تدوین مناطق همگن از نظر غلظت عناصر سنگین (درجه آلودگی) از آنالیز خوشه‌ای به روش وارد^۴ استفاده شده است. نتایج آنالیز خوشه‌ای در شکل ۴ آمده است. در روش آنالیز خوشه‌ای مطابق شکل ۴، عناصر به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:

گروه اول یا گروه A که خود به دو زیر گروه A_1 و A_2 تقسیم شده است، به طوری که زیر گروه A_1 شامل فلزات Co و Mo و زیر گروه A_2 شامل Ni, Pb و Cu می‌باشد.

گروه دوم یا گروه B که خود به دو زیر گروه B_1 و B_2 تقسیم شده است. به طوری که فلزات Cr و Mn در گروه B_1 و فلزات Zn, Fe و Ti در گروه B_2 قرار می‌گیرند.

۲-۵-۲- تحلیل عاملی

تحلیل عاملی یا آنالیز فاکتوری روشی برای بررسی و مطالعه هم‌زمان تغییرات متغیرهای مورد بررسی در یک نقطه و انعکاس نحوه تغییرات آن‌هاست [۲۹]. مهم‌ترین مسئله در آنالیز فاکتوری، اصل بیان همبستگی بین مقادیر غلظت عناصر به منظور نمایش الگوی تغییرات هم‌زمان آن‌ها در یک مکان است. به این منظور ابتدا باید میزان اعتبار آنالیز فاکتوری روی غلظت فلزات سنگین بررسی شود.

در این راه از آزمون‌های Bartlett KMO بهره گرفته می‌شود [۳۲]. در این پژوهش، مقدار KMO معادل ۰/۷۰۲ به دست می‌آید که انجام آنالیز فاکتوری را تأیید می‌نماید. در آنالیز فاکتوری به روش مؤلفه‌های اصلی (PCA)، برآورد ماتریس ضرایب همبستگی به دست می‌آید. با محاسبه مقادیر ویژه این ماتریس مقادیر بزرگتر از یک جدا شده و برای آن‌ها بردارهای ویژه محاسبه می‌گردد. در جدولی که تحت عنوان درصد تجمعی واریانس^۷ آمده است، مقادیر ویژه، درصد واریانس و درصد تجمعی واریانس متناظر با عوامل، محاسبه شده و سپس مقادیر بزرگتر از یک استخراج و دوران داده شده‌اند. با توجه به جدول ماتریس دوران یافته (جدول ۶) و نیز میزان بار فاکتوری که نرم‌افزار برای هر عامل محاسبه می‌کند، سه فاکتور اصلی ایجاد می‌شود.

خرد کردن سنگ برای جداسازی کانسار، سطح تماس سنگ با آب را افزایش داده و امکان هوازدگی شیمیایی را بالا برده است که شکل مهم آن اکسید شدن سولفیدها و تولید اسید سولفوریک در سنگ است. از آنجایی که در اثر نفوذ آب‌های زیرزمینی به سطح و همچنین فرسایش سطحی زمین و به دنبال آن فرسایش شیمیایی باعث به جریان در آمدن فلزات می‌شود، لذا با توجه به عمل اکسیداسیون پیریت و در نتیجه به وجود آمدن شرایط اسیدی Eh-pH جدیدی حاکم خواهد بود که متعاقباً سبب غنی‌شدگی و پایداری غلظت فلزات آلاینده گردیده است.

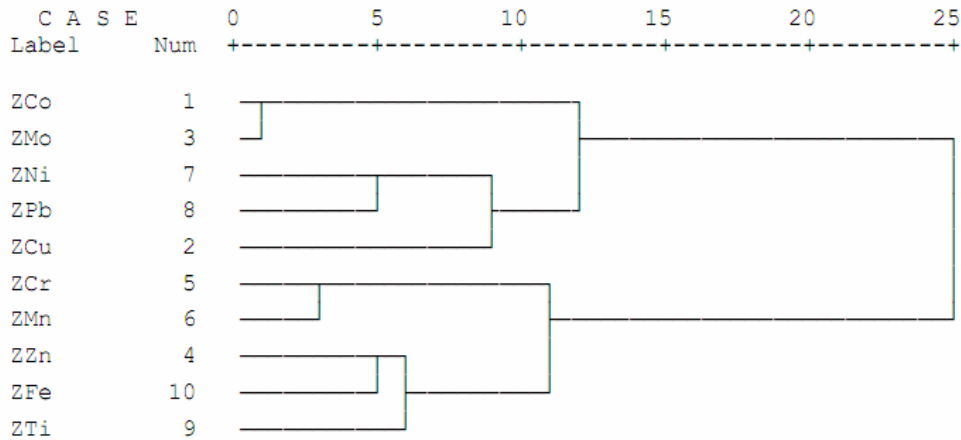
۲-۵-۲- مطالعات آماری

۲-۵-۱- ضریب همبستگی و آنالیز خوشه‌ای

مطالعات ژئوشیمیایی رسوبات می‌تواند گام مؤثری برای یافتن منشأ رسوبات، الگوی پراکنش عناصر و ارزشیابی زیست محیطی وضعیت موجود در یک منطقه باشد [۲۸]. در صورت نبود دسترسی به امکانات لازم، می‌توان از علم آنالیز خوشه‌ای برای منشأیابی عناصر سنگین در رسوبات استفاده نمود [۲۹]. آنالیز خوشه‌ای، یک روش آماری چندمتغیره است که در این مطالعه به منظور منشأیابی آماری عناصر [۱۴] و به‌وسیله نرم‌افزار SPSS.17 استفاده شده است. از ضرایب همبستگی که با نرم‌افزار به دست آمد، برای دستیابی به ضرایب تشابه و رسم دندروگرام استفاده می‌شود. درخت خوشه‌ای، گزینه‌های هم وزن را به هم متصل می‌کند تا خوشه‌های بزرگتر ایجاد شود و تشابهات مابین نمونه‌ها را سنجش و ارزیابی نماید [۳۰] و [۳۱]. ضرایب همبستگی عناصر سنگین در رسوبات معدن مس

جدول ۵: ضریب همبستگی عناصر سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه

	Co	Cu	Mo	Zn	Cr	Mn	Ni	Pb	Ti	Fe
Co	1	0.126	0.761	-0.663	-0.570	-0.212	0.301	0.103	-0.445	-0.313
Cu	0.126	1	0.206	-0.288	-0.322	-0.546	-0.007	0.189	0.026	0.159
Mo	0.761	0.206	1	-0.687	-0.514	-0.266	0.094	-0.072	-0.575	-0.252
Zn	0.663	0.208	-0.687	1	0.413	0.089	-0.096	-0.155	0.337	0.438
Cr	0.570	0.322	-0.514	0.413	1	0.554	-0.044	-0.171	0.266	0.128
Mn	-0.212	-0.546	-0.266	0.089	0.554	1	-0.349	-0.189	-0.031	-0.05
Ni	0.301	0.007	0.094	-0.096	-0.044	-0.349	1	0.355	0.098	-0.033
Pb	0.103	0.187	-0.072	-0.155	-0.171	-0.189	0.355	1	0.243	0.055
Ti	-0.445	0.026	-0.575	0.337	0.266	-0.031	0.098	0.243	1	0.362
Fe	-0.313	0.159	-0.252	0.438	0.128	-0.05	-0.033	0.055	0.362	1



شکل ۴: دندروگرام آنالیز خوشه‌ای عناصر سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه

جدول ۶: ماتریس دوران عوامل در رسوبات منطقه مورد مطالعه

Variable	Factor		
	1	2	3
Co	-0.840	.200	.216
Cu	.010	.829	-.008
Mo	-0.839	.305	-.077
Zn	.798	-.124	-.149
Cr	.507	-0.634	-.061
Mn	.076	-0.804	-.275
Ni	-.126	.018	.822
Pb	.052	.169	.764
Ti	.704	.037	.373
Fe	.618	.338	-.052
Initial Eigenvalue	3.540	1.980	1.270
Percent of variance	32.07	20.28	15.56
Cumulative Percent	32.07	52.35	67.91

فاکتور اول: این فاکتور بیشتر تحت تأثیر فلزات سنگین Co, Mo, Zn, Ti و Fe است.

فاکتور دوم: این فاکتور بیشتر تحت تأثیر فلزات سنگین Cr, Cu و Mn است.

فاکتور سوم: این فاکتور بیشتر تحت تأثیر فلزات سنگین Ni و Pb است.

فاکتورهایی که شامل انواع سنگ منشأ و خاک، فرایندهای هوازدگی، پدیده‌های جذب سطحی و مشخصات محیط‌های رسوب‌گذاری هستند، تأثیر به‌سزایی در توزیع فلزات موجود در رسوبات دارد. در نتیجه ارتباط فلز/ فلز می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز، وابستگی بسیار شدیدی با تمرکز فلزات دیگر در محیط‌های آبدار یا اشباع از آب دارد.

۳- نتیجه گیری

ملی صنایع مس ایران به دلیل حمایت مالی برای این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

- [1] Shayestehfar, M. R; Karimi Nasab, S.; Mohammadalizadeh, H; 2007; "Mineralogy, petrology, and chemistry studies to evaluate oxide copper ores for heap leaching in Sarcheshmeh copper mine, Kerman, Iran", Journal of Hazardous Materials, pp. 602- 612.
- [2] Alkarkhi, A. F. M., Ismai, N., Ahmed, A. and Easa, A.; 2008; "Analysis of heavy metal concentrations in sediments of selected estuaries of malaysia-a statistical assessment", Environmental Monitoring Assessment 151, pp.311- 318.
- [3] Cevik, F., Goksu, M., Derici, O., Findik, O.; 2009; "An assessment of metals pollution in surface sediments of Seykan dam by using enrichment factor, Geoaccumulation index and statistical analysis", Environmental Monitoring Assessment 152, pp. 309-317.
- [4] Wang, Sh., Cao, Z., Lan, D., Zheng, Z., Li, G.; 2008; "Concentration distribution and assessment of several heavy metals in sediments of west- four Pearl River, Estuary", Environmental Geology 155, pp.963- 975.
- [5] Gonzales- Macias, C., Schifter, I., Liuch- Cota, D.B.,endez- Rodriguez, L., & Hernandez- Vazquez, S.; 2006; "Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of Salina Cruz Bay, Mexico", Environmental Monitoring and Assessment, 118, pp. 211- 230.
- [6] Chen, Z., Saito, Y., Kanai, Y., Wei, T., Li, L., Yao, H. & Wang, Z.; 2004; "Low concentration of heavy metals in the Yangtze. Estuarine sediments, China, adiluting setting", Estuarine, Coastal and Shelf Science 60, pp. 91-100.
- [7] اسلامی، محمد؛ اسدی پور میبیدی، مرتضی و طاهری، علی؛ ۱۳۸۴؛ "تأثیر دگرسانی و هوازدگی بر مقاومت سنگهای معدن مس سرچشمه"؛ دومین کنفرانس معادن روباز ایران؛ ۱۱۷-۱۱۱ ص.
- [8] Gonzalez, A., Rodriguez, M., Sanchez, J.C., Espinosa, A.J. and La Rosa, F.J.; 2000; "Assessment of metals in sediments in a tributary of GUADALQUIVIR river (Spain). Heavy metal partitioning and relation between the water and sediment system water", Air and soil pollution 121, pp. 11-29.
- [9] Milenkovic, N., Damjanovic, M., Ristic, M.; 2005; "Study of heavy metal pollution in sediments from

در پژوهش حاضر، از شاخص‌های آلودگی مختلف (فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی، ضریب آلودگی و شاخص بار آلودگی) برای تعیین و ارزیابی فلزات سنگین (Cu, Co, Mo, Zn, Cr, Mn, Ni, Pb, Ti و Fe) در رسوبات منتهی به سد باطله مجتمع مس سرچشمه استفاده شد. نتایج حاکی از آن است که فلزات سنگین (Cu, Mo, Zn, Mn, Pb و Fe) در نمونه‌های رسوبات منطقه مورد مطالعه، غنی شده‌اند. بر اساس مقادیر محاسبه شده شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo})، رسوبات منطقه مورد مطالعه به‌وسیله فلزات سنگین (Cu, Zn و Fe) به شدت آلوده شده‌اند، درحالی‌که در رسوبات، آلودگی به وسیله فلزات سنگین (Mn, Ni و Ti) مشاهده نشد. این آلودگی به شکل واضح ناشی از فعالیت‌های معدنی، تولید زهاب اسیدی معدن (AMD) به‌وسیله معدن مس سرچشمه و باطله‌های حاصل از کارخانه فرآوری و ذوب است. ضریب آلودگی برای فلزات (Cu, Mo, Zn, Mn, Pb و Fe) بالاتر از یک است که نشان‌دهنده غلظت‌های بالای این فلزات و تأثیر عوامل انسانی علاوه بر عوامل طبیعی بر غلظت این فلزات است. از عوامل انسانی موجود در منطقه می‌توان به ورودی پساب کارخانه تغلیظ و زهاب اسیدی معدن اشاره کرد. مهم‌ترین تأثیر انسان بر ژئومورفولوژی منطقه، رهاسازی مقادیر زیادی خرده‌سنگ و باطله در بستر آبراهه است. این سنگ‌ها با کاهش شیب آبراهه-ها امکان نفوذ را افزایش داده و بالطبع هوازدگی شیمیایی در سنگ به تولید زهاب اسیدی و افزایش مقدار فلزات سنگین در آب‌های زیرزمینی بستر آبراهه‌ها منجر می‌شود. بیشترین ضریب همبستگی حاصل از آزمون همبستگی برای جفت عناصر (Mo- Co, Co- Zn, Co- Cr, Cu- Mn, Mo- Zn, Ti- Mo) است. همچنین جفت عناصر Ti- Co و Mo- Cr دارای همبستگی منفی و Cr- Mn دارای همبستگی مثبت هستند. ضریب همبستگی متفاوت این عناصر با منگنز می‌تواند نشان‌دهنده جذب متفاوت این عناصر با اکسید و هیدروکسیدهای آهن- منگنز باشد. نتایج حاصل از آنالیز فاکتوری و آنالیز خوشه‌ای (میزان بار فلز سنگین) بر رسوبات منطقه مورد مطالعه با نتایج حاصل از محاسبه ضریب آلودگی برای ایستگاه-های نمونه‌برداری مطابقت کامل دارد.

۴- تقدیر و تشکر

در خاتمه، نگارندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی کل دانشگاه شهید باهنر کرمان، هسته پژوهشی مهندسی محیط زیست دانشگاه شهید باهنر کرمان و شرکت

- Ashanti Region of Ghana". Environmental Monitoring Assessment 141, pp. 165- 175.
- [20] Qishlag, A., Moore, F., Forghani, G.; 2007; "Impact of untreated wastewater irrigation on soils and crops in Shiraz suburban area, SW Iran", Environmental Monitoring Assessment 149, pp.254- 262.
- [21] Hernandez, L., Probst, J.L & Ulrich, E.; 2003; "Heavy metal distribution in som French Forset soils: for evidence atmospheric contamination", the science of the Total Environment Vol.31, pp.195- 212.
- [22] Muller, G.; 1979; "Schwermetalle in den sedimenten des Rheins Veranderungen seit 1971", Umschau Vol. 79, No. 24, pp. 778- 783.
- [23] Audry, S., Schafer, J., Blanc, G., Jouanneau, JM; 2004; "Fifty- year sedimentary record of heavy metal pollution(Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France)", Environmental Pollution Vol.132, No. 3, pp. 413- 426.
- [24] Bermejo Santos, JC. Beltran, R., Gomez Araiza, JL.; 2003; "Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel River (southwest Spain)", Environ Int Vol. 29, No.1, pp. 69- 77.
- [25] Munendra, S., Muller, G., Sinhg, B.; 2002; "Heavy metals in freshly deposited stream sediments of rivers associated with urbanization of the Ganga plain, India", Water, Air Soil Pollut 141, pp. 35- 54.
- [26] Chen, C.W., Kao, C.M., Chen, C.F., & Dong, C.D.; 2007; "Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan", Chemosphere Vol. 66, No. 8, pp. 1431- 1440.
- [27] Ghrefat, H., Yusuf, N.; 2006; "Assessing Mn, Fe, Cu, Zn and Cd pollution in bottom sediments of Wadi AL- Arab Dam, Jordan", Chemosphere 65, pp. 2114- 2121.
- [28] Shajan, K.P.; 2001; 'Geochemistry of Bottom sediments from a River- Estuary- Shelf Mixing Zone on the tropical Southwest Coast of India. Bull", Geo1. Surv. Japan, Vol.52, No. 8, pp. 371- 382.
- [29] Davis, J.C.; 1986; Statistics and data analysis in Geology, Wiley International, New York, 646p.
- [30] Anazawa, K., et al; 2004; "Heavy Metal Distribution in River Waters and sediments around a " Fire Fly Village". Shikoku, Japan: Application of Multivariate Analysis.J", Analytical Science, Vol.20, pp. 79-84.
- [31] Baeyens, Wet al; 2005; "Correlations, Partitioning and Bioaccumulation of heavy metals Between the Iron Gate (Danube River), Serbia and Montenegro", Polish Journal of Environmental studies vol.14, No. 6, pp. 781-787.
- [10] Morillo, J., Usero, J., and Gracia, I.; 2004; "Heavy metal distribution in marine sediments from the southwest coast of Spain", Chemosphere 55, pp. 431-442.
- [11] Pekey, H.; 2006; "The distribution and sources of heavy metals in Izmit Bay surface sediments affected by a Polluted stream", Marine Pollution Bulletin 52, pp. 1197- 1208.
- [۱۲] شایسته‌فر، محمدرضا؛ رضایی، علی؛ ۱۳۸۸؛ "ارائه راهکار در کاهش آلودگی زیست محیطی سد رسوبگیر معدن مس سرچشمه با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی"؛ بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین و سیزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران؛ تهران؛ ۲۵۴ص.
- [13] Zhang, W.; 2009; "Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes", Environmental Pollution Vol.1-11.
- [14] Adama, P., Arienzo, M., Improato, M., Noimo, D., Nardi, G. and Stanzione, D.; 2005; "Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port", Chemosphere 61, pp.800- 809.
- [15] Reddy, M., Basha, S., Sravan Kumar, V.G., Joshi, H.V. and Ramachandraiah, G.; 2004; "Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of the Alang-Sosiya ship scrapping yard, India", Marine Pollution Bulletin 48, pp. 1055- 1059.
- [16] Selvaraj, K., Rom Mohan, V. and Szefer, P.; 2004; "Evaluation of metal contamination in coastal sediments of the Bay of Bengal, India; geochemical and statistical approaches", Marine Pollution Bulletin 49, pp. 174- 185.
- [17] Vard'es, J., Var Gas, G., Sifeddine, M.; 2005; "Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23 AS), Northern Chile: geochemical and statistical approach", Marine Pollution Bulletin 50, pp.1558- 1568.
- [18] Abraham, G. M. S., Parker, R. J.; 2008; "Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree contamination in marine sediments from Tamaki. Estuary, Auckland, New Zealand", Environmental Monitoring and Assessment 136, pp. 227- 238.
- [19] Adomako, D., Nyarko, B.J.B, Dampare, S.B., Serfor- Armah, Y., Osae, S., Fianko, J.R., Akaho, E.H.; 2008; "Determination of toxic elements in waters and sediments from River Subin in the

[۳۲] مومنی، منصور؛ ۱۳۸۷؛ تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS؛ انتشارات کتاب نو.

Different Components of Lake Balaton.J", Science of the total Environment 341, pp. 211- 226.

پی‌نوشت

-
- ¹ Desorption
 - ² Enrichment Factor
 - ³ Geoaccumulation Index
 - ⁴ Contamination Factor
 - ⁵ Pollution Load Index
 - ⁶ Ward
 - ⁷ Total Variance Explained