نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره هشتم، شماره هجدهم، سال ۱۳۹۲، صفحه ۱۳ تا ۲۱
Vol. 8, No. 18, 2013, pp. 13-21

بررسی رفتار زیست محیطی و مطالعه توزیع عناصر سنگین در خاک‌های محدوده معدن مس سرچشمه کرمان

محمدرضا شایسته‌فر[1*]، علی رضایی [2]

۱- دانشیار بخش مهندسی معدن (هسته پژوهشی مهندسی محیط زیست) دانشگاه شهید باهنر کرمان ; shayeste@mail.uk.ac.ir
۲- کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان ; rezaei.ali169@gmail.com

(دریافت ۱۱ آبان ۱۳۹۰، پذیرش ۲۶ شهریور ۱۳۹۱)

چکیده

مطالعه توزیع فلزات سنگین موجود در خاک‌ها، از موضوعات مهم زیست محیطی به شمار می‌رود. به منظور تعیین میزان فلزات سنگین در خاک‌های سطحی محدوده معدن مس سرچشمه و ارزیابی ترازهای آلودگی، ۱۲۰ نمونه خاک سطحی تا عمق ۳۰ سانتیمتری جمع‌آوری شد و فلزات سنگین Pb، Ni، Se، Mo و Zn، با استفاده از روش پلاسمای القایی- اسپکتروسکوپی جرمی (ICP- MS) آنالیز شدند. در نمونه‌های خاک بررسی شده، میانگین غلظت ثبت شده برای عناصر سرب، نیکل، سلنیوم، مولیبدن و روی به ترتیب، ۱۲۷، ۲۷، ۱، ۷ و ۲۵۲ (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. ترتیب فراوانی میانگین غلظت عناصر سنگین عبارت است از: Zn> Pb> Ni> Mo> Se. مقایسه میانگین غلظت عناصر سنگین و سمی در نمونه‌های خاک با متوسط جهانی مقادیر خاک‌های غیرآلوده و شیل میانگین نشان داد که عناصر Pb، Ni، Se، Mo و Zn مقادیر بالاتری نسبت به میانگین مقادیر جهانی دارند. عنصر Ni مقدار کمتری نسبت به شیل میانگین دارد. ضریب آلودگی برای عناصر مورد مطالعه، براساس غلظت زمینه خاک و براساس میانگین خاک‌های جهانی غیرآلوده، محاسبه و طبق رده‌بندی هاکنسون، طبقه‌بندی شدند. محاسبه درجه آلودگی اصلاح شده برای میانگین نمونه‌های خاک محدوده منطقه مطالعاتی براساس مقادیر زمینه و مقادیر میانگین جهانی خاک‌های غیرآلوده درجه حدواسط آلودگی کل (۳/۲۴- ۲/۹۹) را نشان داد. نتایج محاسبه فاکتور غنی‌شدگی نشان‌دهنده آن است که میانگین عناصر سرب، روی و مولیبدن در تعدادی از ایستگاه‌های نمونه‌برداری بیش از مقدار زمینه است و غنی‌شدگی غیرطبیعی این فلزات را در منطقه مطالعاتی دربر دارد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص زمین‌انباشتگی برای نمونه‌های خاک حاکی از آن است که عناصر نیکل و سلنیوم در محدوده غیرآلوده و عناصر روی و مولیبدن در محدوده غیرآلوده تا کمی آلوده و عنصر سرب در محدوده کمی آلوده قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی

آلودگی، فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی، فلزات سنگین، خاک‌های سطحی، معدن مس سرچشمه

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

مجتمع مس سرچشمه با مختصات "۰۰ '۵۳ °۵۵ طول شرقی و "۰۰ '۵۸ °۲۹ عرض شمالی در ۱۶۰ کیلومتری جنوب‌غربی کرمان و ۵۰ کیلومتری رفسنجان قرار دارد. بررسی و شناسایی الگوی پراکندگی عناصر در خاک بوسیله فرآیندهای خاکزاد و عوامل انسانزاد در اولویت مطالعات زیست‌محیطی کشورهای پیشرفته و در حال توسعه قرار دارد[۱]. فلزات سنگین موجود در خاک، نتایج منفی بر روی محیط زیست دارند. غلظت این فلزات سنگین در خاک‌ها، ناشی از منابع مختلف شامل: آلودگی‌های انسانزاد، هوازدگی طبیعی بالا در سنگ‌های زمینه و ذخایر فلزی است[۲]. امروزه از مهم‌ترین کاربردهای علم ژئوشیمی معادن، پایش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از فعالیت‌های صنعتی است. حضور فلزات سنگین در خاک توسط فعالیت‌های صنعتی که اغلب با ضایعات کارخانه و یا به صورت گرد و غبار وارد محیط زیست شده، خطر بزرگی برای محیط زیست محسوب می‌شود[۳، ۴]. خاک به عنوان نشست نهایی فلزات سنگین رها شده به محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شود و این فلزات پیوندهایی را با خاک به وجود می‌آورند که جداکردن و پاکسازی آنها هزینه‌های بسیار زیادی را تحمیل می‌نماید[۵،۶]. هدف اصلی از انجام این پژوهش، ارزیابی میزان غلظت فلزات سنگین Pb، Ni، Se، Mo و Zn در خاک‌های اطراف معدن مس سرچشمه توسط مطالعات آماری و شاخص‌های آلودگی می‌باشد.

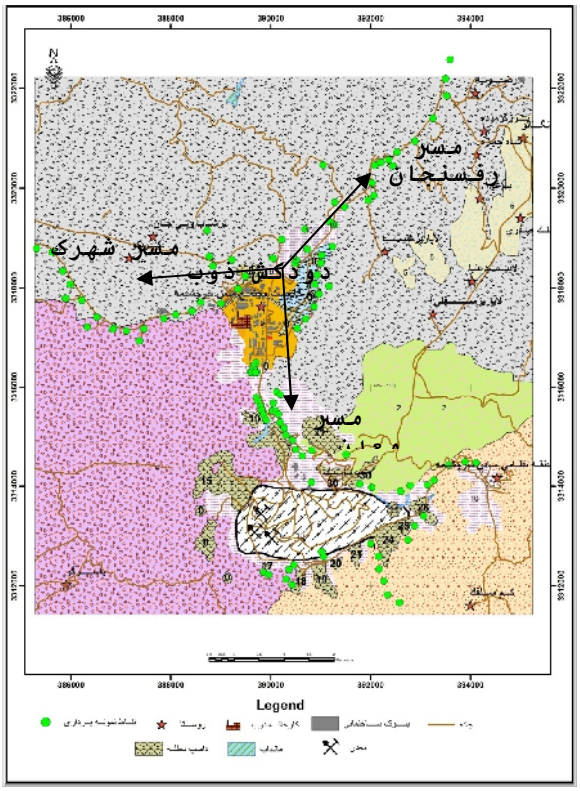
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- طرح نمونه برداری

برای ارزیابی میزان غلظت فلزات سنگین Pb، Ni، Se، Mo و Zn در معدن مس سرچشمه، نمونه‌برداری در سه مسیر مختلف، رفسنجان- کارخانه، کارخانه- شهرک و کارخانه- معدن انجام گرفت. انتخاب این فلزات سنگین، براساس شرایط حاکم در محدوده دودکش‌های کارخانه ذوب و کارخانه فرآوری می‌باشد. مختصات نقاط نمونه‌برداری نیز توسط دستگاه GPS ثبت گردیده است. بدین منظور تعداد ۱۲۰ ایستگاه نمونه‌برداری از مناطق مختلف انتخاب و ۱۲۰ نمونه خاک از خاک‌های سطحی حداکثر تا عمق ۳۰ سانتیمتری از منطقه‌ای به مرکزیت دودکش‌های کارخانه ذوب مجتمع مس سرچشمه به شعاع ۶ کیلومتر، جمع‌آوری شد. از هر محل تقریبا ۳ کیلوگرم خاک (نمونه کلی) برداشت شد. شکل(۱) موقعیت نقاط نمونه‌برداری را در محدوده مجتمع مس سرچشمه نشان می‌دهد.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و روش آنالیز

در ابتدا، از نمونه‌های خاک برداشت شده، سنگ‌های قابل شناسایی و واریزه‌ها جدا شد (همگن‌سازی انجام شد). نمونه‌های خاک با اون خشک شده و پس از تقسیم‌کردن نمونه‌ها به روش چهارقسمتی، از الک ۲ میلیمتری، عبور داده شدند (نمونه اصلی به وزن ۶۰۰ گرم تهیه شد). نمونه‌ها، توسط روش پلاسمای القایی- اسپکتروسکوپی جرمی (ICP- MS) برای فلزات سنگین Pb، Ni، Se، Mo و Zn مورد آنالیز قرار گرفتند.

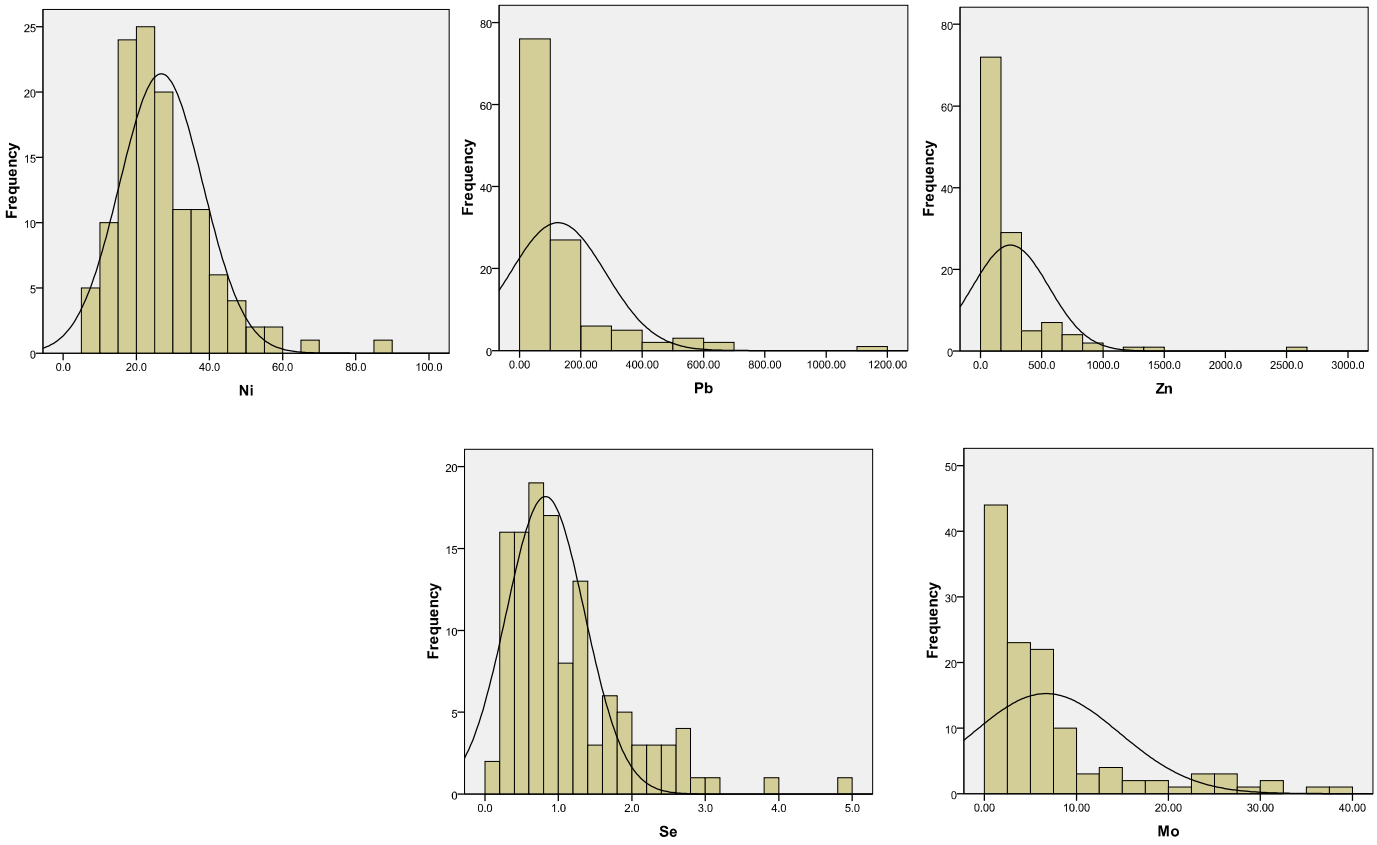


شکل ۱: موقعیت نقاط نمونه‌برداری در محدوده مجتمع مس سرچشمه

۲-۳- آنالیز آماری

پارامترهای آماری پایه برای تفسیر رفتارهای محیطی فلزات سنگین Pb، Ni، Se، Mo و Zn در خاک‌های منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. اطلاع از پارامترها و ویژگی‌های آماری گروهی از داده‌ها شامل میانگین، انحراف معیار و .... به خصوص انحراف از حالت نرمال، اولین قدم برای شناسایی طبیعت داده‌ها می‌باشد[۷]. جدول (۱) توصیف آماری غلظت فلزات سنگین را در خاک‌های محدوده مجتمع سرچشمه را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۲)، هیستوگرام فلزات سنگین Pb، Ni، Se،

Mo و Zn را نشان می‌دهد.

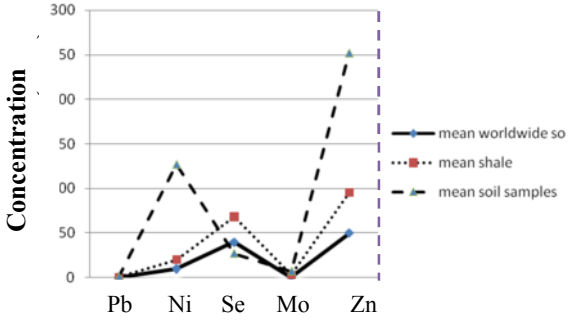


شکل۲: هیستوگرام فلزات سنگین Pb، Ni، Se، Mo و Zn

جدول ۱: توصیف آماری نمونه‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

عنصر	تعداد نمونه	متوسط	انحراف معیار	مینیموم	ماکزیمم
Pb	۱۲۰	۱۲۷/۶۲	۱۵۸/۰۲	۱۵/۰۴	۱۱۲۴/۴۰
Ni	۱۲۰	۲۷/۰۲	۱۲/۵۸	۶/۴۰	۸۸/۷۰
Se	۱۲۰	۱/۰۸	۰/۸۱	۰/۱	۴/۸۰
Mo	۱۲۰	۷/۰۸	۸/۱۱	۰/۳۵	۳۹/۸۰
Zn	۱۲۰	۲۵۲/۲۳	۳۱۸/۹۰	۴۴/۳	۲۶۵۲/۵۰

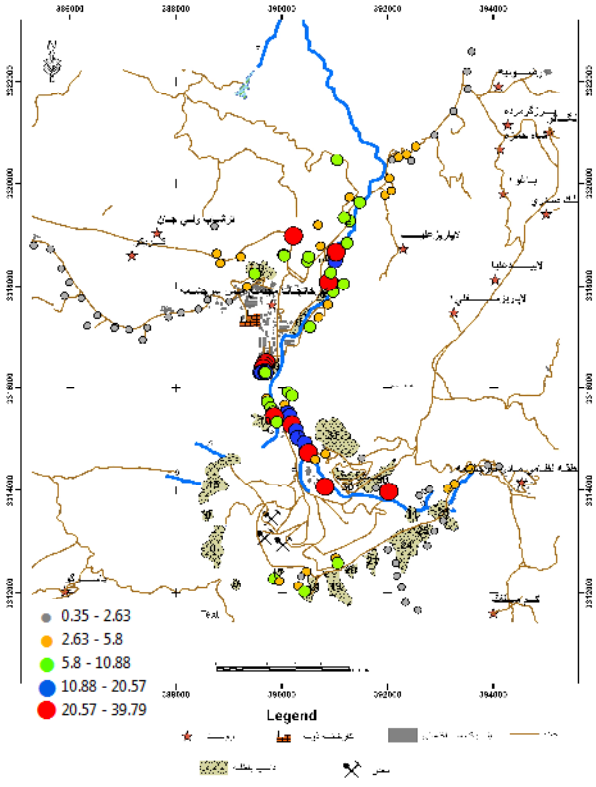
توزیع آماری غلظت عناصر بررسی شده نشان می‌دهد که فلزات سنگین Pb، Mo و Zn توزیع غیرنرمال با چولگی مثبت دارند که نشان‌دهنده دخالت عوامل انسانزاد علاوه بر عوامل طبیعی و هوازدگی واحدهای سنگی در تمرکز این عناصر در بخش‌های مختلف خاک می‌باشد. به عبارتی دیگر نوعی غنی‌شدگی زمین‌زاد که در برخی نمونه‌ها دیده شد به خوبی در توزیع آماری آنها نیز مشخص می‌باشد. هیستوگرام فلزات نیز این مورد را تایید می‌کند. برای تجزیه و تحلیل نتایج و به منظور یافتن روند مشترک، دسته‌بندی عناصر بر اساس منشا و میزان آلودگی از روش‌های آماری، آنالیز مولفه‌های اصلی (PCA)، روش تعیین فاکتور غنی‌شدگی و ضریب آلودگی استفاده گردید. بیشینه غلظت فلزات سنگین Pb، Ni، Se، Mo و Zn به ترتیب ۱۱۲۴، ۸۸/۷، ۴/۸، ۳۹ و ۲۶۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. کمینه و بیشینه میانگین غلظت به ترتیب مربوط به سلنیوم (۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و روی (۲۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) می‌باشد. ترتیب فراوانی میانگین غلظت فلزات سنگین عبارت است از: Zn> Pb> Ni> Mo> Se



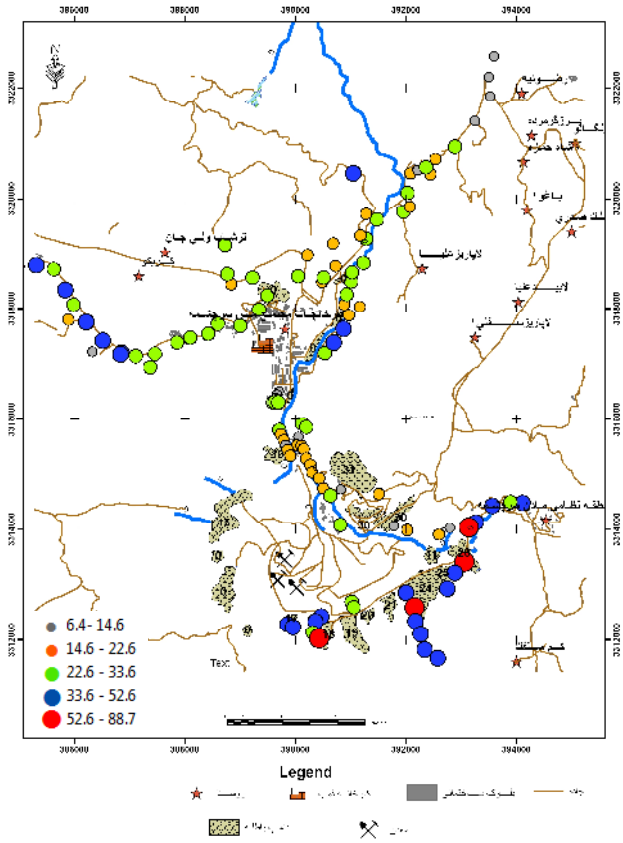
شکل۳: نمودار مقایسه غلظت میانگین عناصر بالقوه سمی در نمونه های خاک منطقه مورد مطالعه با میانگین مقادیر جهانی خاک-های غیرآلوده و شیل میانگین

با توجه به شکل (۳)، مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین و بالقوه سمی در نمونه‌های خاک با متوسط جهانی مقادیر خاک‌های غیرآلوده[۸] و شیل میانگین[۹] نشان می‌دهد که فلزات Pb، Ni، Se، Mo و Zn مقادیر بالاتری نسبت به میانگین مقادیر جهانی دارند. عنصر Ni مقدار کمتری نسبت به شیل میانگین دارد.

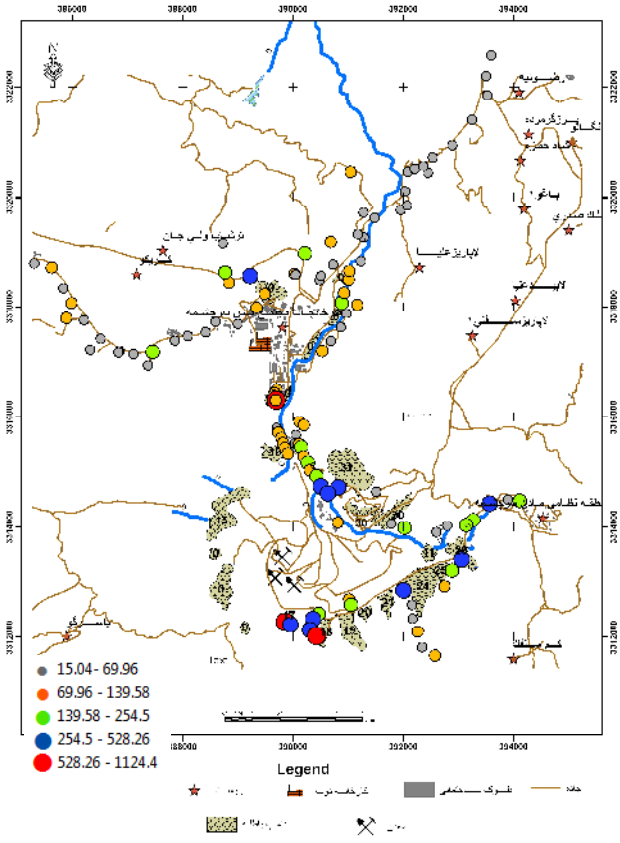
نقشه تغییرات غلظت فلزات سنگین Pb ، Ni، Se، Mo و Zn در منطقه مورد مطالعه در شکل‌های(۴) تا (۸) قابل مشاهده است.



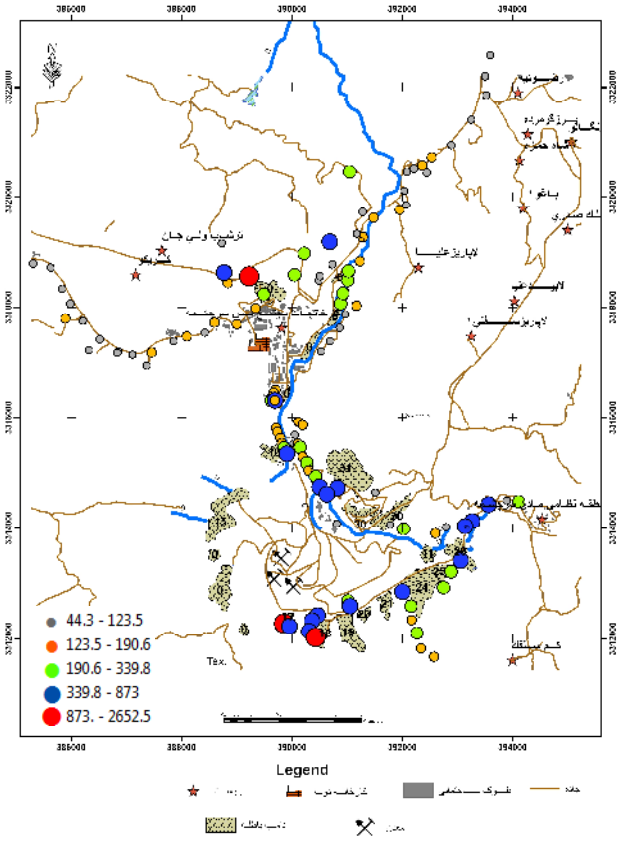
شکل۴: نقشه تغییرات غلظت مولیبدن در منطقه مورد مطالعه



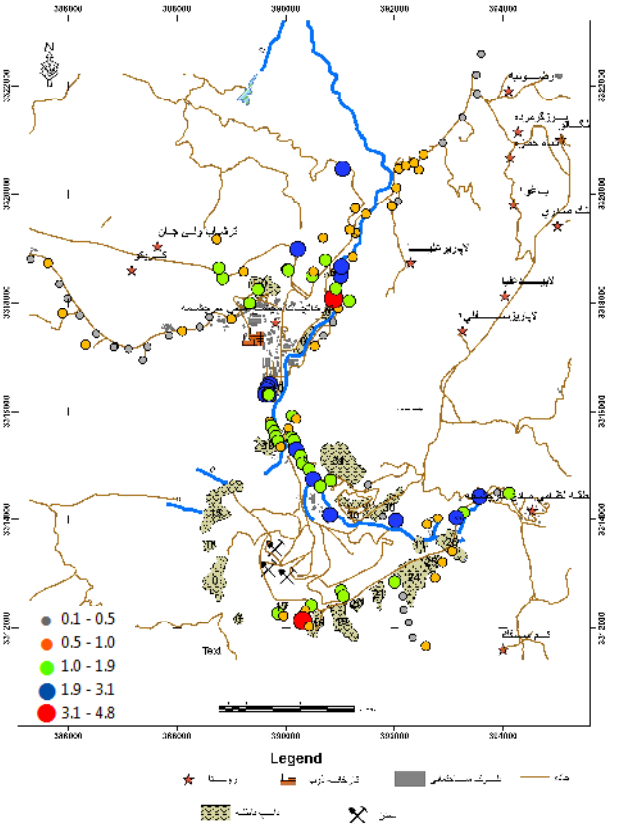
شکل۵: نقشه تغییرات غلظت نیکل در



شکل۶: نقشه تغییرات غلظت سرب در منطقه مورد مطالعه



شکل۷: نقشه تغییرات غلظت روی در منطقه مورد مطالعه



شکل۸: نقشه تغییرات غلظت سلنیوم در منطقه مورد مطالعه

۲-۴) مطالعات آماری

در این پژوهش، ضریب همبستگی برای تعیین روابط عناصر انتخابی به روش پیرسون برای نمونه‌های خاک مورد استفاده قرار گرفته است (جدول.۲). بدین منظور، ابتدا داده‌ها با توجه به هیستوگرام آنها نرمال شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که:

همبستگی مثبت بالای Mo و Pb مرتبط با ذخیره مس پورفیری و موقعیت آلتراسیون این کانسار می‌باشد. فلزات Pb و Zn در حاشیه مناطق مس پورفیری متمرکز شده و بالا بودن مقدار آن در خاک‌های مناطق نمونه‌برداری خالی از انتظار نمی‌باشد. قابلیت تحرک عنصر Zn در محیط‌های معدنی شناخته شده است که خود با عنصر Se همبستگی مثبت بالایی را نشان می‌دهد. حضور عنصر Se در خاک به لحاظ بالا رفتن شرایط احیایی و سولفورهای محیط‌های سطحی و به تحرک در آمدن این عنصر است.

جدول ۲: همبستگی بین عناصر برای نمونه‌های خاک منطقه مورد مطالعه

عنصر	Pb	Zn	Mo	Se	Ni
Pb	۱				
Zn	۰/۸۹۶	۱			
Mo	۰/۴۳۳	۰/۳۱۰	۱		
Se	۰/۵۷۳	۰/۴۱۹	۰/۷۳۱	۱	
Ni	۰/۲۰۴	۰/۳۲۸	۰/۲۸۹	۰/۰۹۴	۱

تحلیل مولفه اصلی (PCA) یکی دیگر از روش‌های آماری چندمتغیره مورد استفاده در مطالعات زیست محیطی است که در تفسیر نتایج آلودگی خاک به کار گرفته شده است[۱۲-۱۰].

نتایج تحلیل مولفه اصلی (PCA) برای فلزات مختلف (جدول۳) به شرح زیر است:

۱- مولفه اول با ۵۳ درصد از واریانس کل، فاکتور وزنی مثبت بالای فلزات سرب و روی و سلنیوم را با هم نشان می‌دهد و این نشاندهنده آن است که این عناصر منشا مشترکی دارند، از آنجایی که در اطراف مناطق حاوی سرب و روی، شکستگی‌هایی از نوع گسل وجود دارد و دایک‌های بسیاری از

مرکز سیستم عبور کرده‌اند. سلنیوم (Se)، به عنوان عناصر سطح کانساری به همراه کمی آنتیموان (Sb) و آرسنیک (As) در امتدادهای گزارش شده وجود دارند. لذا حضور سلنیوم (Se) در محیط‌های سطحی و در امتداد خروجی و ورودی‌های زمین‌شناختی امری طبیعی به نظر می‌رسد. قابلیت تحرک نیز برای عناصر سلنیوم و آرسنیک وجود دارد.

۲- مولفه دوم با ۲۹ درصد از واریانس کل، فاکتور وزنی مثبت بالای فلز نیکل و فاکتور وزنی منفی بالای فلز مولیبدن را نشان می‌دهد.

جدول ۳: تحلیل مولفه اصلی (PCA) برای عناصر نمونه های خاک محدوده مورد مطالعه

عنصر	Component 1	Component 2
Pb	۰/۹۰۸	۰/۲۶۵
Ni	۰/۱۰۲	۰/۸۶۶
Se	۰/۸۱۴	- ۰/۳۵۲
Mo	۰/۷۱۶	- ۰/۵۶۶
Zn	۰/۸۳۰	۰/۴۳۷
درصد واریانس	۵۳/۹۶۶	۲۹/۱۰۳
درصد واریانس تجمعی	۵۳/۹۶۶	۸۳/۰۶۸

۲-۵- بررسی شاخص‌های آلودگی

در مطالعات زیست‌محیطی به ویژه زمانی که توزیع زمین‌شیمیایی عناصر در محیط حاصل ترکیبی از عوامل انسانزاد و طبیعی باشد باید روند تغییرات با استفاده از شاخص‌های آلودگی مورد ارزیابی قرار گیرد. خاک‌ها در صورتی آلوده به فلزات سنگین در نظر گرفته می‌شوند که غلظت‌های حدی از این عناصر که فرآیندهای زیست‌شناختی و زیست‌شیمیایی را تحت تاثیر قرار دهند وجود داشته باشد. فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشت، ضریب آلودگی و شاخص بار آلودگی از معیارهایی هستند که با در نظر گرفتن غلظت عناصر در نمونه زمینه روند آلودگی را نشان می‌دهند. در این پژوهش، این معیارها برای تعیین روند زمین‌شیمی و آلودگی فلزات Pb ، Ni، Se، Mo و Zn در خاک‌های منطقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

برای ارزیابی ریسک آلودگی خاک در این پژوهش از روابط ارائه شده توسط هاکنسون[۶] برای تعیین ضریب آلودگی و ابراهیم[۳] برای مشخص کردن درجه آلودگی اصلاح شده (mcd) استفاده گردید. هاکنسون براساس مجموع داده‌ها، شاخص کلی آلودگی را برای ۷ فلز سنگین خاص به کار برد که این روش بر پایه محاسبه یک ضریب آلودگی، برای هر آلاینده به صورت رابطه زیر است:

$$CF= M_X/ M_b \qquad (۱)$$

M_X: میانگین غلظت آلاینده در خاک آلوده

M_b: میانگین غلظت آلاینده در خاک مرجع

ضریب آلودگی (CF)، برای میانگین غلظت فلزات انتخابی نمونه‌های خاک محدوده مطالعاتی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری نسبت به مقادیر زمینه و میانگین جهانی خاک‌های غیرآلوده محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۴) آمده است. نتایج ضرایب آلودگی نشان می‌دهد:

۱- عنصر سلنیوم براساس غلظت زمینه خاک، ضریب آلودگی میانگین کمتر از یک دارد که طبق رده‌بندی هاکنسون در محدوده آلودگی خیلی پایین قرار می‌گیرد. عنصر نیکل براساس غلظت زمینه خاک، ضریب آلودگی بین ۱/۵ تا ۲ دارد که طبق رده‌بندی هاکنسون در محدوده آلودگی پایین قرار می‌گیرد. عناصر روی و سرب براساس غلظت زمینه خاک، ضریب آلودگی میانگین بین ۲ تا ۴ دارد که طبق رده‌بندی هاکنسون در محدوده آلودگی متوسط قرار می‌گیرند. عنصر مولیبدن براساس غلظت زمینه خاک، ضریب آلودگی ۴/۵۳ دارد که طبق رده‌بندی هاکنسون در محدوده آلودگی بالا قرار می‌گیرد. بیشینه و کمینه ضریب آلودگی براساس غلظت زمینه خاک، به ترتیب مربوط به عناصر مولیبدن و سلنیوم است.

۲- عنصر نیکل براساس میانگین خاک‌های جهانی غیرآلوده، ضریب آلودگی کمتر از ۱/۵ دارد که طبق رده‌بندی هاکنسون در محدوده آلودگی خیلی پایین قرار می‌گیرد. عناصر سرب، روی، مولیبدن و سلنیوم، ضریب آلودگی بین ۲ تا ۴ دارد که طبق رده‌بندی هاکنسون در محدوده آلودگی حدواسط قرار می‌گیرند. بیشینه و کمینه ضریب آلودگی براساس میانگین خاک‌های جهانی غیرآلوده، به ترتیب مربوط به عناصر روی و نیکل است.

با توجه به این که تعیین درجه آلودگی کل یکی از روش‌های مهم ارزیابی ریسک آلودگی خاک می‌باشد، ابراهیم در سال ۲۰۰۸ معادله اصلاح شده‌ای از معادله هاکنسون، برای محاسبه درجه آلودگی کل در یک ناحیه خاص را تحت عنوان درجه آلودگی اصلاح شده ارائه کرد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین درجه آلودگی اصلاح شده از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$mc_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} cf_i}{n} \qquad (۲)$$

محاسبه درجه آلودگی اصلاح شده برای میانگین نمونه‌های خاک محدوده منطقه مطالعاتی براساس مقادیر زمینه و مقادیر میانگین جهانی خاک‌های غیرآلوده درجه حدواسط آلودگی کل(۳/۲۴- ۲/۹۹) را باتوجه به رده‌بندی ابراهیم[۳] نشان می‌دهد (جدول.۴).

ضریب بار آلودگی از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \ldots \times CF_n} \quad (۳)$$

جدول۴: نتایج ضریب آلودگی و آلودگی اصلاح شده کل فلزات بالقوه سمی برای نمونه‌های خاک

Baseline	فاکتور آلودگی					Sum CF	mc_d
	Se	Zn	Ni	Mo	Pb		
میانگین CF (خاک جهانی)	۲/۷۰	٤/۰٦	۱/٤۸	۳/۹۳	٤/۰۱	۱٦/۲۰	۳/۲٤
CF (زمینه)	۰/۹۸	۳/۸۲	۱/۸۰	٤/٥۳	۳/۸٥	۱٤/۹۸	۲/۹۹
غلظت(mg/kg)							
میانگین خاک جهانی	۰/٤	٦۲	۱۸	۱/۸۰	۲٥	*	*
خاک زمینه	۱/۱	٦٦	۱٥	۱/۰۳	۳۱	*	*

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 خاک آلوده می‌باشد[۴ و ۱۳]. نتایج در نمونه‌های خاک نشان می‌دهد که مقدار شاخص بار آلودگی (PLI) در منطقه مورد مطالعه، ۲/۴۹ می‌باشد.

۲-۶- ارزیابی اثرات زیست محیطی فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

جهت تعیین میزان آلایندگی خاک به فلزات سنگین در یک منطقه، بایستی میزان غلظت عناصر در آن منطقه با یک استاندارد شناخته شده مقایسه شود. بهترین نوع مقایسه، مقایسه با استانداردهای موجود برای همان منطقه می‌باشد، زیرا شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی گوناگون در نقاط مختلف دنیا، غلظت‌های متفاوتی را ایجاد می‌کنند. از جمله معیارهایی که برای بررسی درجه آلودگی خاک ارائه شده است، می‌توان به فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی اشاره نمود[۱۴]. جدول(۵) مقادیر غلظت فلزات سنگین را از دیدگاه دو استاندارد مختلف نشان می‌دهد.

جدول۵: مقادیر غلظت فلز سنگین از دیدگاه دو استاندارد مختلف بر حسب ppm

عنصر	Zn	Mo	Ni	Pb	Se
USPEA*	٥۰	۲	۴۰	۱۰	۰/۴۰
میانگین جهانی(شیل	۹٥	۳	۶۸	۲۰	۰/٥۰
میانگین منطقه	۲٥۲	۷/۱	۲۷	۱۲۷	۱/۰۸

* سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا

۲-۶-۱- فاکتور غنی‌شدگی

یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی اثرهای انسانزاد بر روی خاک‌ها، محاسبه فاکتور غنی‌شدگی بهنجار شده برای غلظت‌های بالاتر از حد زمینه فلزات است. پژوهشگران مختلفی عناصر مرجع متفاوتی مانند آهن، آلومینیوم، اسکاندیوم، کبالت و تیتانیوم را برای تعیین میزان غنی‌شدگی مورد استفاده قرار داده‌اند[۳،۱۵]. در این پژوهش عنصر اسکاندیوم (Sc) به عنوان عنصر مرجع مورد استفاده قرار گرفت، زیرا برای ترکیب شیمیایی به صورت خنثی‌کننده عمل می‌کند. بر اساس این فاکتور می‌توان مقدار عناصر را نسبت به مقدار طبیعی خود سنجید. برای محاسبه فاکتور غنی‌شدگی عناصر سنگین در خاک‌های منطقه مورد مطالعه از دو رابطه زیر استفاده گردید:

$$EF_1 = ([M_1]/[Sc])_{Soil} / ([M_2]/[Sc])_{Shale} \quad (۳)$$

$$EF_2 = ([M_1]/[Sc])_{Soil} / ([M_2]/[Sc])_{Background} \quad (۴)$$

که در آن، EF: فاکتور غنی‌شدگی، M_1: غلظت فلز هدف در نمونه خاک و M_2: غلظت فلز هدف در ترکیب شیل میانگین و در نمونه زمینه می‌باشد. نمونه زمینه از مقایسه خاک‌های منطقه با خاک‌های محلی که عوامل انسانزاد روی آن تاثیرگذار نبوده‌اند توسط روش‌های آماری در منطقه مورد مطالعه بدست آمده است.

براساس نظر هرناندز و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۱۵] مقادیر فاکتور غنی‌شدگی بین ۲-۰/۵ به عنوان زمین‌زاد و مقادیر بیش از ۲ به عنوان تاثیر فعالیت‌های انسانزاد می‌باشد.

بر اساس نظریه Zhang مقادیر فاکتور غنی‌شدگی بین ۱/۵- ۰/۵، حاکی از آن است که فلز کاملا از مواد پوسته یا فرآیندهای طبیعی است. مقادیر ۱/۵< فاکتور غنی‌شدگی، نشان دهنده آن است که منابع بیشتر نزدیک به فعالیت‌های انسانزاد است[۱۶].

براساس مطالعات فینگ و دیگران در سال ۲۰۰۴ مقادیر غنی‌شدگی کمتر از ۱/۵ به عنوان منشا پوسته‌ای یا هوازدگی

طبیعی و مقادیر بیش از ۱/۵ به عنوان منشا مواد غیرپوسته‌ای یا هوازدگی غیرطبیعی در نظر گرفته می‌شود.

مقادیر غنی‌شدگی فلزات مختلف برای هر نمونه خاک محاسبه می‌شود (جدول.۶).

نتایج حاصل از محاسبه فاکتور غنی‌شدگی برای میانگین فلزات بالقوه سمی نشان می‌دهد که:

۱- ترتیب میانگین فاکتور غنی‌شدگی برای فلزات انتخابی براساس مقدار زمینه به صورت Pb>Zn>Mo>Se>Ni می‌باشد.

۲- فاکتور غنی‌شدگی میانگین فلزات سرب، روی و مولیبدن بیش از مقدار زمینه براساس رده‌بندی هرناندز است. نظریه Zhang و فینگ این مورد را نیز تایید می‌نماید.

۳- فاکتور غنی‌شدگی براساس مقدار شیل میانگین برای فلزات انتخابی به جزء عنصر سرب کمتر از ۲ می‌باشد.

جدول۶: مقادیر فاکتور غنی‌شدگی برای نمونه‌های خاک نسبت به شیل میانگین و مقادیر زمینه

عنصر	Se	Zn	Ni	Mo	Pb
زمینه	۱/۵۱	۲/۸۸	۰/۵۸	۲/۰۲	۶/۹۸
میانگین شیل	۱/۲۳	۱/۸۶	۰/۵۲	۱/۳۴	۳/۶۴

۲-۶-۲- شاخص زمین‌انباشتگی

شاخص زمین‌انباشتگی که توسط مولر در سال ۱۹۷۹ معرفی شده است، شاخص دیگری است که می‌تواند درجه آلایندگی خاک را تعیین کند و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{geo}=\log_2\left[\frac{C_n}{1.5B_n}\right] \quad (۵)$$

که در آن، Igeo شاخص زمین انباشتگی، Log2، لگاریتم بر پایه دو، C_n، غلظت اندازه گیری شده فلز امتحان شده در خاک و B_n، غلظت زمینه ژئوشیمیایی در فلز مشابه می‌باشد. فاکتور ۱/۵، فاکتور تصحیح ماتریس زمینه ناشی از اثرات لیتولوژیکی است[۱۴]. مولر، بر اساس این شاخص، خاک‌ها را از نظر درجه آلودگی به هفت گروه طبقه بندی نموده است. جدول (۷) طبقه‌بندی مذکور را نشان می‌دهد. با استفاده از رابطه (۵)، شاخص زمین‌انباشتگی برای نمونه‌های خاک مورد مطالعه محاسبه شده و نتایج حاصله در جدول (۸) ارائه شده است. برای غلظت زمینه همانند فاکتور غنی‌شدگی از غلظت متوسط استفاده می‌شود.

جدول۷: مقادیر شاخص زمین انباشتگی در آلودگی خاک[۱۸]

درجه آلودگی خاک	شاخص زمین انباشتگی
غیرآلوده	کمتر از صفر
غیرآلوده تا کمی آلوده	۱-۰
کمی آلوده	۲-۱
کمی آلوده تا خیلی آلوده	۳-۲
خیلی آلوده	۴-۳
خیلی آلوده تا شدیدا آلوده	۵-۴
شدیدا آلوده	بزرگتر از ۵

جدول۸: مقادیر محاسبه شده شاخص زمین انباشتگی در آلودگی خاک منطقه مورد مطالعه

عناصر	شاخص زمین انباشتگی	درجه آلودگی خاک
سلنیوم	<۰	غیرآلوده
نیکل	<۰	غیرآلوده
مولیبدن	۰/۱۴	غیرآلوده تا کمی آلوده
سرب	۱/۴۷	کمی آلوده
روی	۰/۳۲	غیرآلوده تا کمی آلوده

نتایج حاصل از محاسبه شاخص زمین‌انباشتگی برای نمونه‌های خاک (جدول.۸)، حاکی از آن است که عناصر نیکل و سلنیوم در محدوده غیرآلوده و عناصر روی و مولیبدن در محدوده غیرآلوده تا کمی آلوده و عنصر سرب در محدوده کمی آلوده قرار می‌گیرند.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، میزان غلظت فلزات سنگین Pb، Ni، Se، Mo و Zn در خاک‌های اطراف محدوده مجتمع مس سرچشمه توسط مطالعات آماری و شاخص‌های آلودگی خاک ارزیابی شد. مقایسه میانگین غلظت عناصر سنگین و بالقوه سمی در نمونه‌های خاک با متوسط جهانی مقادیر خاک‌های غیرآلوده و شیل میانگین نشان داد که عناصر Pb، Ni، Se، Mo و Zn مقادیر بالاتری نسبت به میانگین مقادیر جهانی دارند. عنصر Ni مقدار کمتری نسبت به شیل میانگین دارد. ضریب آلودگی برای عناصر مورد مطالعه، براساس غلظت زمینه خاک و براساس میانگین خاک‌های جهانی غیرآلوده، محاسبه و طبق رده‌بندی هاکنسون، طبقه‌بندی شدند. محاسبه درجه آلودگی اصلاح شده برای میانگین نمونه‌های خاک محدوده منطقه مطالعاتی براساس مقادیر زمینه و مقادیر میانگین جهانی خاک‌های غیرآلوده درجه حدواسط آلودگی کل (۳/۲۴- ۲/۹۹) را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که غلظت عنصر سلنیوم، تحت تاثیر عوامل زمین‌شناسی مانند لیتولوژی، خاک، سن تشکیلات و ترکیب سنگ‌شناسی (گرانودیوریت و آندزیت

دگرسان و غیر دگرسان شده) در منطقه مورد مطالعه است. نتایج حاصل از محاسبه فاکتور غنی‌شدگی نشاندهنده آن است که میانگین عناصر سرب، روی و مولیبدن در تعدادی از ایستگاه‌های نمونه‌برداری بیش از مقدار زمینه است که آن را می‌توان به تاثیر عوامل انسانزاد نسبت داد. فاکتور وزنی مثبت بالای عناصر سرب، روی و سلنیوم را با هم در مولفه اول نشان می‌دهد و این نشاندهنده آن است که این عناصر منشا مشترکی دارند. نتایج حاصل از محاسبه شاخص زمین‌انباشتگی برای نمونه‌های خاک، حاکی از آن است که عناصر نیکل و سلنیوم در محدوده غیرآلوده و عناصر روی و مولیبدن در محدوده غیرآلوده تا کمی آلوده و عنصر سرب در محدوده کمی آلوده قرار می‌گیرند.

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 باهنرکرمان و شرکت ملی صنایع مس ایران به دلیل حمایت مالی در جهت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

[1] Shayestehfar, M.R. and Rezaei, A. (2010). Methodology presentation in decreasing the environmental of Sarcheshmeh copper mine with the help of geochemical data. *27th Symposium on Geosciences*, Tehran, Iran, 254.

[2] Abrahams, P.W.; 2002; Soils: "Their implications to human health", The Science of the Total Environ. 291, pp. 1-32.

[3] Abrahim, G. M. S., Parker, R. J.; 2008; "Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, NewZealand", Environ Monit Assess 136, pp. 227-238.

[4] 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 Ashanti Region of Ghana", Environ Monit Assess 141, pp. 165- 175.

[5] Duzgoren, A.N.S., C.S.S. e Wong, A. Aydin, Z. song, M. You, and X.D. Li; 2006; "Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China ", Environ Geochem and Heal 28, pp.375-391.

[6] Hakanson, L.; 1980; "Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control, a Sedimentological Approach", Water Research 14, pp. 975-1001.

[7] Momeni, M.; 2009; "Statistical Analysis with SPSS", Ketab-e- Now Publication, 296p.

[8] Turekian, K. K., Wedepohl, D. H.; 1961; " Distribution of the elements in some major units of the earth's crust, Bulletin Geological Society of America, 72, pp.175-192.

[9] Kabata-Pendias, A., Mukherjee, A.B.; 2007; "Trace elements from soil to human", Springer Berlin Heidelberg New York.

[10] Loska, K., Wiechuya, D.; 2003; "Application of principle component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir", Chemo 51, pp. 723- 33.

[11] Shakeri, A., Moore, F., Modaberi. S.; 2009; " Heavy metal contamination and distribution in the Shiraz industrial complex zone soil, South Shiraz, Iran", World Applied Scinces Journal6(3), pp. 413-425.

[12] Shakeri, A., Moore, F.; 2009; "The impact of an industrial complex on freshly deposited sediments, Chener Rahdar river case study, Shiraz, Iran", Environ Monit Assess, DOI 10.1007/S10661-009-1173-5

[13] Qishlag, A., Moore, F., Forghani, G.; 2007; "Impact of untreated wastewater irrigation on soils and crops in Shiraz suburban area, SW Iran", Environ Monit Assess.

[14] Muller, G.; 1979; "Schwermetalle in den sedimenten des Rheins Veranderungen seit 1971. Umschau 79(24), pp.778- 783.

[15] Hernandez, L, Probst, A., Probst, J.L., Ulrich, E.; 2003; "Heavy metal distribution in some French forest soil: evidence for atmospheric contamination", The Scince of the Total Environ 312, pp. 195-219.

[16] Zhang, J. and Liu, C.L.; 2002; "Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China – Weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. Estuar. Coast. Shelf", S. 54, pp. 1051–1070.