

ارزیابی شاخص‌های آلودگی زیست محیطی در اطراف کارخانه مس سرچشمه

هاشم شمس‌الدین^۱، * وحیدرضا جلالی^۲ و اعظم جعفری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۳- استادیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۱۸ پذیرش نهایی: ۱۳۹۴/۰۳/۰۶	فلزات سنگین در همه خاک‌ها وجود دارند ولی آلودگی خاک به این فلزات، به دلیل فعالیت‌های بشری روند نگران‌کننده‌ای به خود گرفته است. هدف این مطالعه بررسی وضعیت فلزات سنگین آرسنیک، سرب، کادمیوم، روی و مس در خاک‌های اطراف مجتمع مس سرچشمه به کمک شاخص‌های زیست محیطی می‌باشد. تعداد ۱۰۰ نمونه خاک سطحی از خاک‌های اطراف معدن و مجتمع فرآوری برداشته شد و با استفاده از روش هضم چهار اسید و به کمک دستگاه (ICP-OES) غلظت کل فلزات سنگین اندازه‌گیری شد. شاخص‌های زمین‌انباشتی، فاکتور غنی‌شدگی و شاخص بار آلودگی جهت تعیین میزان آلودگی منطقه مورد مطالعه بکار برده شد. نتایج نشان داد میانگین غلظت فلزات سنگین بیشتر از غلظت زمینه است که بیانگر ورود عناصر از منابع آنتروپوژنیک در منطقه است. همچنین غلظت بالای عناصر مورد بررسی به استثناء آرسنیک، در نزدیک معدن و کارخانه مشاهده شد. در حالیکه بیشترین غلظت آرسنیک در شمال غربی منطقه تعیین شد. میزان شاخص زمین‌انباشتی برای همه فلزات در اطراف معدن و کارخانه بیشتر از ۳ به دست آمد که نشان می‌دهد خاک دچار آلودگی شدید تا خیلی شدید به ویژه از نظر کادمیوم و آرسنیک محسوب می‌شود. مقادیر منفی شاخص زمین‌انباشتی در مناطق مسکونی مشاهده گردید که در کلاس پاک قرار می‌گیرند. فاکتور آلودگی برای کادمیوم، بیشترین آلودگی و برای روی، کمترین آلودگی را در منطقه نشان داد. تجزیه و تحلیل نقشه پهنه‌بندی شاخص بار آلودگی نشان داد که بیشترین آلودگی در اطراف معدن و سپس در اطراف کارخانه می‌باشد و با افزایش فاصله، غلظت آلودگی به تدریج کمتر می‌شود.
* عهده دار مکاتبات E-mail: v.jalali@uk.ac.ir	

مقدمه

خاک به عنوان یکی از اجزاء مهم محیط زیست، همواره به روش‌های مختلف در معرض آلودگی قرار دارد و این آلودگی می‌تواند برای آب‌های سطحی و زیرزمینی، موجودات زنده، رسوبات و اقیانوس‌ها مسائل بحرانی را ایجاد کند. فعالیت‌های مختلف انسان همچون صنایع محلی، استخراج و اکتشاف معادن، کشاورزی، حمل و نقل و غیره احتمال آلوده شدن خاک را افزایش می‌دهند. در قرن حاضر به سبب فعالیت‌های گسترده انسانی، غلظت بالای فلزات سنگین در خاک‌های صنعتی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. انتشار عناصر سرب، کروم، باریم، روی، وانادیوم، کبالت، مس، نیکل و آرسنیک از فعالیت‌های صنعتی، سوخت‌های فسیلی، سایش لاستیک، روغن‌ها، صنایع و کوره‌های زباله‌سوز که به آسانی به محیط ساطع می‌شوند، می‌توانند در خاک انباشته شوند. دلجانی و همکاران (۶) غنی‌شدگی و توزیع فلزات سنگین در خاک‌های منطقه ویژه اقتصادی پارس جنوبی (عسلویه) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که فلزات کادمیوم، سرب و کبالت، بیشترین و مس، آهن و کروم، کمترین میزان غنی‌شدگی را در میان خاک‌های مورد بررسی داشتند. بهویان و همکاران^۱ (۳) آلودگی فلزات سنگین را در خاک‌های کشاورزی شمال بنگلادش با استفاده از چندین شاخص شامل شاخص غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی و شاخص بار آلودگی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده غنی‌شدگی معنی‌دار خاک‌ها با فلزات تیتانیوم، منگنز، روی، سرب، آرسنیک، آهن، استرانسیم و آنتیموان حاصل از ورودی فعالیت‌های معدنی بود.

عظیم‌زاده و خادمی (۲) به بررسی آلودگی خاک‌های سطحی استان مازندران با استفاده از فاکتور آلودگی پرداختند. نتایج این محققان نشان داد که اکثر خاک‌ها براساس طبقه‌بندی هاکانسن^۲ (۸) در کلاس آلودگی

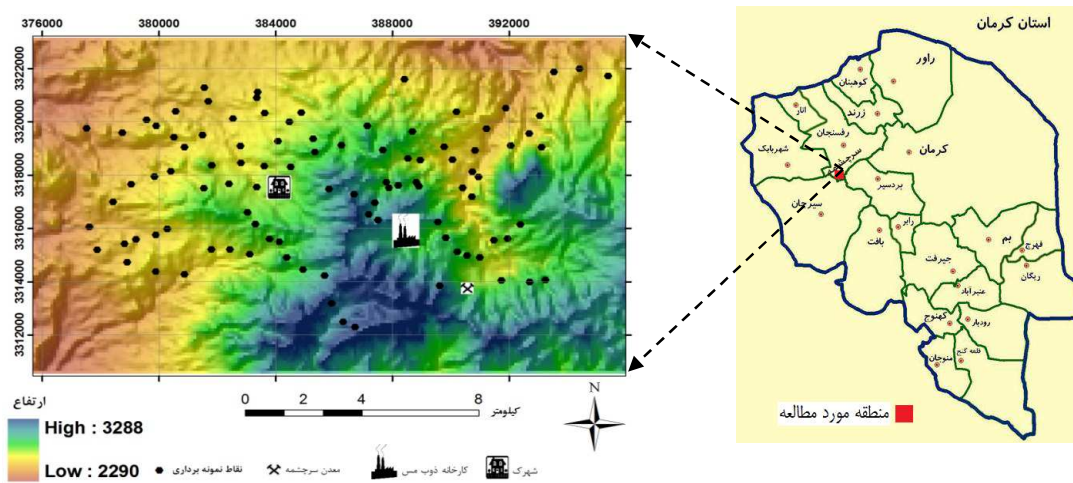
متوسط قرار دارند. مطالعه شهبازی و همکاران (۱۹) به منظور بررسی آلودگی فلزات سنگین در شهرستان نهاوند نشان داد که فلزات سنگین براساس مقادیر شاخص فاکتور آلودگی طبق تقسیم‌بندی بهویان و همکاران (۳) بیشتر در کلاس‌های بدون آلودگی تا آلودگی متوسط قرار دارند. آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین در اطراف کارخانه‌های ذوب فلزات و مکان‌های ضایعات آنها، یک مشکل زیست محیطی مهم محسوب می‌شود. خاک به عنوان قسمتی از سیستم بیوژئوشیمیایی و رابط بین بخش زنده و غیرزنده نقش مهمی در چرخه عناصر ایفا می‌کند. عملیات حفاری معادن و ذوب فلزات باعث ورود فلزات سنگین بیش از غلظت زمینه آنها در خاک می‌شود. در مرحله ذوب، فلزات زیادی از جمله آرسنیک، کادمیم، کروم، کبالت، مس، سرب، نقره، جیوه، نیکل و روی در خاک‌ها رها می‌شوند (۱۸). آزادسازی و افزایش فلزات سنگین به محیط در نتیجه فعالیت‌های انسانی به طور گسترده مطالعه و تحقیق شده است (۵ و ۱۶). حضور فلزات سنگین در خاک در مرحله اول به نوع و جنس مواد مادری خاک بستگی دارد اما فعالیت‌های انسانی از جمله ذوب فلزات منجر به افزایش بیش از حد آنها در طبیعت می‌شود. معدن مس سرچشمه یکی از بزرگترین رسوبات مس میوسن در جهان است و از نظر تمرکز فعالیت‌های صنعتی شامل حفاری، استخراج، ذوب، تصفیه و پالایش یکی از بزرگترین مجموعه‌های صنعتی در ایران به شمار می‌آید. لذا هدف از انجام این تحقیق، بررسی وضعیت تغییرات مکانی برخی از فلزات سنگین در خاک‌های مجتمع مس سرچشمه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و نیز بررسی روند آلودگی منطقه با استفاده از شاخص‌های زیست محیطی مختلف می‌باشد. انتظار می‌رود نتایج تحقیق بتواند برای مدیریت و برنامه‌ریزی شهری از دیدگاه کنترل و کاهش آلودگی فلزات سنگین مفید واقع شود.

از نظر تقسیمات کشوری، مجتمع مس سرچشمه و شهر سرچشمه از بخش‌های تابعه شهرستان رفسنجان می‌باشند. پوشش گیاهی منطقه منحصر به بوته‌های تنک بوده و به ندرت مرتعی است. متوسط بارندگی و درجه حرارت به ترتیب ۳۰۰-۲۵۰ میلی‌متر و ۳۲+ تا ۱۵- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی بیش از ۷۰ درصد منطقه از سنگ‌های آذرین ائوسن با ترکیبی عمدتاً از بازالت و آندزیت تشکیل شده است (شکل ۲).

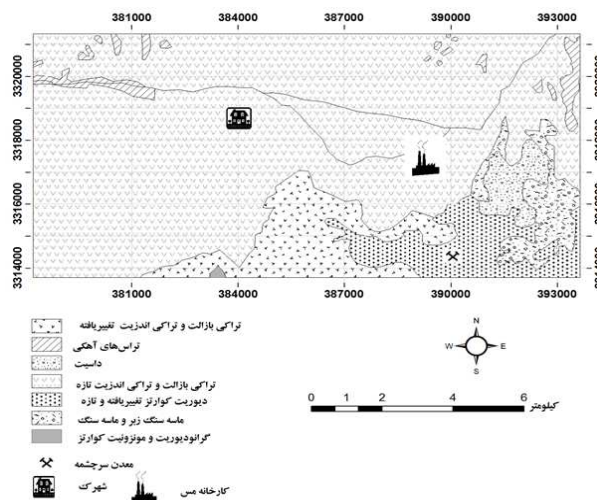
مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

معدن مس سرچشمه در ۱۲۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان کرمان، ۵۰ کیلومتری جنوب رفسنجان و ۶۵ کیلومتری شمال شرق سیرجان در مختصات جغرافیایی ۵۵ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش نقاط نمونه‌برداری
Figure (1) Location of the study area and distribution of sampling points



شکل (۲) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه
Figure (2) Geological map of the study area

شمس الدین و همکاران: ارزیابی شاخص‌های آلودگی زیست محیطی...

در این رابطه، $Igeo$ شاخص تجمع و یا شاخص شدت آلودگی در خاک، \log_2 لگاریتم در پایه دو، C_n غلظت آلاینده موردنظر در نمونه خاک، B_n غلظت زمینه یا مرجع عنصر موردنظر و ضریب ۱/۵، ضریب تصحیح تأثیر لیثوژیکی مقدار غلظت زمینه می‌باشد. پس از محاسبه شاخص ژئوشیمیایی مولر، برای طبقه‌بندی کیفیت خاک می‌توان از جداول شاخص فوق (جدول ۱) استفاده نمود (۱۳).

۲- فاکتور آلودگی

جهت تعیین پتانسیل آلودگی خاک به عناصر سنگین از فاکتور آلودگی استفاده گردید. براساس این فاکتور می‌توان مقدار عناصر را نسبت به مقدار طبیعی خود سنجید و میزان آلودگی خاک را تعیین کرد. این فاکتور از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$CF = \frac{C_n}{B_n} \quad (2)$$

در رابطه فوق CF فاکتور آلودگی، C_n غلظت عنصر در نمونه آلوده و B_n غلظت همان عنصر در نمونه استاندارد، پوسته زمین و یا غلظت زمینه طبیعی منطقه می‌باشد. خاک‌ها براساس فاکتور آلودگی به کلاس‌های زیر تقسیم می‌شوند (جدول ۲).

۳- شاخص بار آلودگی

براساس این شاخص، کیفیت نمونه خاک بر مبنای غلظت تمام عناصر آلاینده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شاخص بار آلودگی (PLI) بر اساس رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$PLI = \sqrt[n]{(CF_1 * CF_2 * \dots * CF_n)} \quad (3)$$

که در رابطه فوق CF شاخص آلودگی هر عنصر و n تعداد عناصر آلاینده می‌باشد.

منطقه سرچشمه فلات مرتفعی در شمال شرق کویر سیرجان بوده و با ارتفاعات چهل تن بیدخان در شرق، کوهستان شهر بابک در غرب، کوهستان خبر و کوه‌های داراب در جنوب و رشته کوه‌های داوران در شمال شرق محصور می‌شود. منطقه سرچشمه از نظر اقلیمی جزء مناطق خشک کوهستانی محسوب شده و از این رو دارای تابستانی معتدل و زمستانی سرد و خشک می‌باشد.

نمونه‌برداری

تعداد ۱۰۰ نمونه خاک سطحی (۱۵-۰ cm) به روش تصادفی طبقه‌بندی شده در مقیاس‌های مکانی مختلف جمع‌آوری شد. پراکنش مکانی نقاط نمونه‌برداری در شکل (۱) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن وضعیت توپوگرافی منطقه، نوع کاربری‌های موجود و همچنین سازندهای موجود در منطقه، فاصله نمونه‌ها ۱ کیلومتر در نظر گرفته شد منتهی در قسمت‌های صعب العبور فاصله نمونه‌ها به ۵ کیلومتر هم می‌رسید.

به دلیل ناهمواری‌های موجود در منطقه مورد مطالعه موقعیت نمونه‌ها از یکنواختی یکسانی برخوردار نیست. از طرفی سعی شد نمونه‌برداری به گونه‌ای صورت گیرد که تغییرات مکانی فلزات سنگین در جهت باد غالب و هم‌چنین با فاصله از معدن و کارخانه ذوب را در برگیرد (شکل ۱).

بعد از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، غلظت عناصر سنگین به روش هضم چهار اسید و به وسیله روش استقرای جفت پلاسما طیف‌سنج گسیل نوری (ICP-EOS) اندازه‌گیری شد.

ارزیابی آلودگی خاک به فلزات سنگین

۱- شاخص زمین‌انباشتی

یکی از شاخص‌های مفید برای مطالعه وضعیت تجمع فلزات سنگین در خاک، استفاده از شاخص ژئوشیمیایی مولر می‌باشد که براساس رابطه (۱) استوار است (۱۴):

$$Igeo = \log_2 \left(\frac{C_n}{1/5 B_n} \right) \quad (1)$$

جدول (۱) کلاس‌های شاخص تجمع (I_{geo}) و کیفیت خاکTable (1) The I_{geo} classes and soil quality

کلاس I_{geo} (I_{geo} classes)	مقدار I_{geo} (I_{geo} amount)	کیفیت خاک (Soil quality)
1	≤ 0	غیر آلوده (Clean)
2	0-1	Clean to Medium (غیر آلوده تا آلودگی متوسط) (pollution)
3	1-2	آلودگی متوسط (Medium pollution)
4	2-3	Medium to High (آلودگی متوسط تا آلودگی زیاد) (pollution)
5	3-4	آلودگی زیاد (High pollution)
6	4-5	High to Very High (آلودگی زیاد تا بسیار زیاد) (pollution)
7	$6 <$	آلودگی بسیار زیاد (Very High pollution)

جدول (۲) طبقه‌بندی مقادیر فاکتور آلودگی (بهویان و همکاران، ۳)

Table (2) The classification levels of contamination factor (Bahuiyan *et al*, 3)

مقدار فاکتور (CF)	درجه آلودگی (Degree of pollution)
0	بدون آلودگی (Clean)
1	بدون آلودگی تا آلودگی متوسط (Clean to Medium pollution)
2	آلودگی متوسط (Medium pollution)
3	آلودگی متوسط تا قوی (Medium to High pollution)
4	آلودگی قوی (High pollution)
5	آلودگی قوی تا خیلی قوی (High to Very High pollution)
6	آلودگی خیلی قوی (Very High pollution)

بر اساس این شاخص، کیفیت خاک در ۵ سطح از کیفیت "عالی" تا کیفیت "آلودگی زیاد" طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۳).

جدول (۳) مقادیر استاندارد شده شاخص بار آلودگی

Table (3) Standardized amounts of pollution load index

کلاس Class	شاخص جامع آلودگی index load pollution	سطح آلودگی pollution Level
1	$p \leq 0.7$	عالی (Great)
2	$1 < p \leq 0.7$	پاک (Clean)
3	$2 < p \leq 1$	آلودگی کم (Minor pollution)
4	$3 < p \leq 2$	آلودگی متوسط (Medium pollution)
5	$p > 3$	آلودگی زیاد (Major pollution)

استفاده باشد. برای غلظت زمینه عناصر مورد مطالعه از غلظت زمینه مطالعه خراسانی‌پور و همکاران^۲ (۱۱) در منطقه مس سرچشمه استفاده گردید (جدول ۴) که برای محاسبه شاخص‌های آلودگی نیز بکار گرفته شد. خراسانی‌پور و آفتابی^۳ (۱۰) غلظت زمینه را از میانگین عناصر در نمونه‌های خاک‌های عمقی غیرآلوده و یا سنگ بستر پروفیل‌های نمونه‌برداری شده تعیین کردند. میانگین غلظت کل فلزات سنگین در نمونه‌های خاک سطحی برای آرسنیک (۱۰۳/۳)، سرب (۱۲/۷)، روی (۲۳۲/۵۸)، مس (۸۳۲/۷۷) و کادمیوم (۱/۵۲) میلی‌گرم در کیلوگرم به دست آمد که بسیار بیشتر از مقدار زمینه این عناصر می‌باشد (جدول ۴). بطوریکه میانگین غلظت آرسنیک، سرب، روی، مس و کادمیوم به ترتیب ۴، ۸/۷، ۳/۲، ۲۰ و ۷/۶ برابر غلظت زمینه می‌باشد. میانگین بیشتر از مقدار زمینه نشان دهنده ورود عناصر از منابع آنتروپوژنیک در منطقه دارد (۹). حداکثر غلظت آرسنیک در شمال غربی منطقه مورد مطالعه و حداکثر غلظت کادمیوم، روی، سرب و مس در اطراف معدن و کارخانه مشاهده شد. مقایسه غلظت عناصر سنگین خاک با مقدار کنترل استاندارد (۱) نشان می‌دهد که غلظت عنصر آرسنیک، روی و مس بیشتر از مقدار کنترل استاندارد می‌باشد. بر این اساس منطقه از نظر عناصر آرسنیک، روی و مس آلوده است.

پهنه‌بندی عناصر سنگین با استفاده از روش‌های مبتنی بر زمین‌آمار

به منظور شناسایی هر چه بهتر مناطق آلوده و یا در معرض آلودگی به فلزات سنگین، اقدام به تهیه نقشه‌های پراکنش شاخص‌های آلودگی شد. در این رابطه، از روش‌های تخمین از جمله روش کریجینگ استفاده گردید. روش کریجینگ، یک روش درونیابی براساس وزن‌دهی است که در علوم خاک برای تخمین متغیر اصلی مجهول در موقعیت‌های مشاهده نشده براساس ترکیب خطی از مشاهدات همسایه به طور گسترده استفاده شده است (۱۲). ساختار مکانی هر خصوصیت (در این مطالعه غلظت فلز سنگین و شاخص آلودگی) توسط مدل‌های سمی‌واریوگرام مشخص گردید. برای بررسی اعتبار مدل و مقایسه مقادیر تخمین زده شده از مدل با مقادیر مشاهده شده، مدل‌های سمی‌واریوگرام اعتبارسنجی شدند. اختلاف بین مقادیر تخمین زده شده و مشاهده شده ارزیابی و با استفاده از میانگین ریشه مربعات خطا^۱ مقایسه شد. بعد از اعتبارسنجی، از پارامترهای مدل سمی‌واریوگرام برای میانیابی متغیر وابسته با روش کریجینگ استفاده گردید و سپس نقشه‌های حاصل از تخمین به وسیله نرم افزار ArcGIS 9.3 تهیه شد. همچنین برای محاسبه ضریب همبستگی پیرسون و سایر پارامترهای آماری از نرم‌افزار SPSS16.0 استفاده شد.

تحلیل نتایج

ویژگی‌های آماری غلظت فلزات سنگین خاک

جهت تعیین میزان آلاینده‌گی خاک به عناصر سنگین در یک منطقه، باید میزان غلظت عناصر در آن منطقه با یک استاندارد شناخته شده مقایسه شود و یا از مقدار زمینه به عنوان منبع برای بررسی وضعیت آلودگی استفاده شود (۴ و ۲۲). در مناطقی مانند منطقه مورد مطالعه که هنوز استانداردهای بهداشتی و زیست‌محیطی برآورد نگردیده است، تخمین غلظت زمینه طبیعی می‌تواند در بررسی زیست محیطی و ارزیابی آلودگی فلزات سنگین قابل

2- Khorasanipour *et al.*

3- Khorasanipour and Aftabi

1- Root Mean Squared Error

جدول (۴) توصیف آماری داده‌های مربوط به غلظت آرسنیک، سرب، روی، کادمیوم و مس کل (میلی گرم بر کیلوگرم) در منطقه مورد مطالعه

Table (4) Statistical description of total concentration of arsenic, lead, zinc, cadmium and copper (mg/ kg) in the study area

As	Pb	Zn	Cu	Cd	پارامترها (Parameters)
10.8	19	57	61	0.28	حداقل (Minimum)
103.3	110.6	232.58	832.77	1.52	میانگین (Average)
3527	3264	6258	35596	18.9	حداکثر (Maximum)
26.6	12.7	73.4	41.25	0.2	مقدار زمینه ^o (Background value)
79	100	96	100	100	تعداد مشاهدات بیشتر از مقدار زمینه Sample more than Background value
34.25	30.5	26.7	30.96	16.09	ضریب تغییرات (CV)
17	300	200	63	3.9	مقدار کنترل استاندارد (Standard Control value)

*: خراسانی پور و همکاران، (۱۱)

جدول (۵) همبستگی عناصر سنگین در خاک های منطقه مورد مطالعه

Table (5) The correlation coefficients of soil heavy metals in the study area

As	Pb	Zn	Cu	Cd	عنصر (Element)
1					As
0.003	1				Pb
0.003	0.98**	1			Zn
0.051	0.32**	0.35**	1		Cu
0.59**	0.76**	0.76**	0.37**	1	Cd

** : Significance at $P < 0.01$

** : معنی دار در سطح یک درصد

مدل گوسین انتخاب شده است. برای نمونه نیم تغییرنمای تجربی غلظت کادمیم در شکل (۳) نشان داده شده است.

پراکنش مکانی فلزات سنگین

نقشه‌های پهنه‌بندی غلظت عناصر سنگین خاک در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشد. با استفاده از این نقشه‌ها می‌توان درک

خوبی از پراکندگی عناصر سنگین در منطقه مورد مطالعه پیدا نمود. غلظت بالای همه عناصر مورد بررسی در نزدیک معدن و کارخانه مشاهده شد. توزیع مکانی عناصر نشان داد که با افزایش فاصله از معدن و کارخانه، میزان آلودگی کاهش می‌یابد. همچنین نقشه‌ها نشان می‌دهند که عناصر کادمیوم، مس، روی و سرب دارای مساحت آلودگی بیشتری در نزدیکی معدن و کارخانه هستند درحالی‌که این نتیجه در مورد آرسنیک صدق نمی‌کند. هرچند که غلظت آرسنیک در اطراف معدن و کارخانه بالا است اما بیشترین غلظت زیاد آرسنیک در قسمت شمال غربی منطقه مشاهده شد. با در نظر گرفتن نوع زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، می‌توان به نقش ماده مادری در بالا بودن غلظت آرسنیک در منطقه پی‌برد. وجود سنگ‌های حاوی آرسنوپیریت و آنارژیت در منطقه مورد مطالعه، گواهی بر ادعای فوق می‌باشد. در این راستا می‌توان به مواد مادری آهنی و تراورتن و همچنین فرآیندهای زمین‌شناسی فاز هیدروترمال و آخرین مرحله فرایند آتشفشانی مربوط به چشمه‌های آب گرم موجود در منطقه اشاره کرد (۷ و ۱۷). همچنین جهت وزش باد غالب در منطقه به سمت شهرستان رفسنجان (یعنی راستای جنوب غربی - شمال شرقی) می‌باشد که به افزایش غلظت آرسنیک در این قسمت کمک کرده است. بالا بودن فشار بخار آرسنیک امکان پخش این عنصر را در مکان‌های دورتر نیز فراهم می‌کند. دلیل دیگر افزایش آرسنیک در این منطقه، استفاده آرسنیک در کوره آند ذوب به عنوان کمک ذوب، برای بالا بردن آمپراژ و افزایش تولید می‌باشد (۲۱).

میانگین غلظت عناصر کادمیوم و سرب در منطقه مورد مطالعه کمتر از مقدار کنترل استاندارد می‌باشد در حالیکه ۷ و ۵ درصد از نمونه‌ها به ترتیب دارای کادمیم و سرب بیشتر از مقدار کنترل هستند که این نمونه‌ها در نزدیکی معدن و کارخانه واقع شده‌اند. بنابراین، این نتایج حاکی از ورود عناصر سنگین در نتیجه عملکرد انسان است. مقدار ضریب تغییرات برای فلزات سنگین مورد مطالعه به ترتیب $As > Cu > Pb > Zn > Cd$ می‌باشد که این امر به نوعی نشان‌دهنده ماهیت بسیار تغییرپذیر عنصر آرسنیک در مقایسه با سایر عناصر مورد مطالعه می‌باشد.

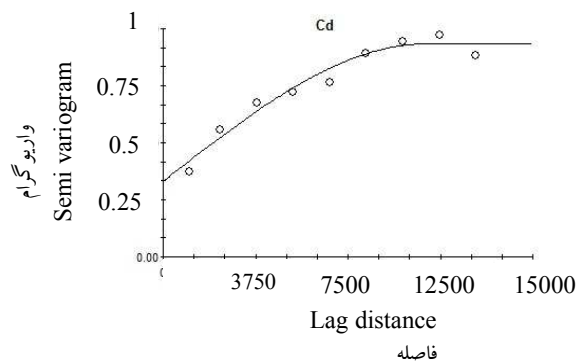
ضریب همبستگی بین غلظت فلزات سنگین

همبستگی بین غلظت فلزات سنگین بر اساس ضریب همبستگی پیرسون در جدول (۵) ارائه شده است. همبستگی بالا بین غلظت فلزات سنگین خاک می‌تواند نشان‌دهنده این مطلب باشد که احتمالاً منبع این فلزات یکسان بوده و عناصری که دارای همبستگی کمی باشند رفتار ژئوشیمی متفاوتی نسبت به عناصر دیگر از خود نشان می‌دهند. بر این اساس، همبستگی معنی‌داری بین عناصر سرب، روی، مس و کادمیم وجود داشته در حالی که آرسنیک فقط ارتباط معنی‌داری با عنصر کادمیم نشان داد. نتایج راست‌منش و همکاران^۱ (۱۵) در منطقه مس سرچشمه همبستگی ضعیف آرسنیک با دیگر عناصر را نشان داد.

آنالیز ساختار مکانی غلظت فلزات سنگین

پس از برازش مدل‌های تئوری مختلف بر غلظت فلزات سنگین، پارامترهای کلیدی نیم تغییرنما استخراج و در جدول (۶) نشان داده شده است. بر اساس جدول (۶) و نیز آزمون ارزیابی تقاطعی^۲، مدل بهینه شده برای آرسنیک، روی و کادمیم مدل کروی می‌باشد، در حالی که برای سرب و مس بهترین مدل برازش داده شده

1- Rastmanesh et al.
2- Cross validation



شکل (۳) نیم تغییرنمای عنصر کادمیوم
Figure (3) Semivariogram of Cadmium

جدول (۶) پارامترهای مدل‌های بهینه نیم تغییرنما برای عناصر مورد مطالعه

Table (6) The parameters of optimized semivariogram models for the studied elements

خطای پیش بینی (Estimation Error)	$C_0/(C_0+C)$	Sill (C_0+C)	Nugget(C_0)	محدوده (Range)	مدل (Model)	عناصر (Elements)
RSS	r^2			(km)		
0.499	0.53	0.29	1.35	0.4	3	کروی (Spherical) As
0.44	0.88	0.2	2.4	0.48	7.9	گوسین (Gaussian) Pb
0.09	0.65	0.37	0.65	0.25	11.4	کروی (Spherical) Zn
0.29	0.93	0.18	2.8	0.51	9.34	گوسین (Gaussian) Cu
0.01	0.95	0.35	0.93	0.33	10.7	کروی (Spherical) Cd

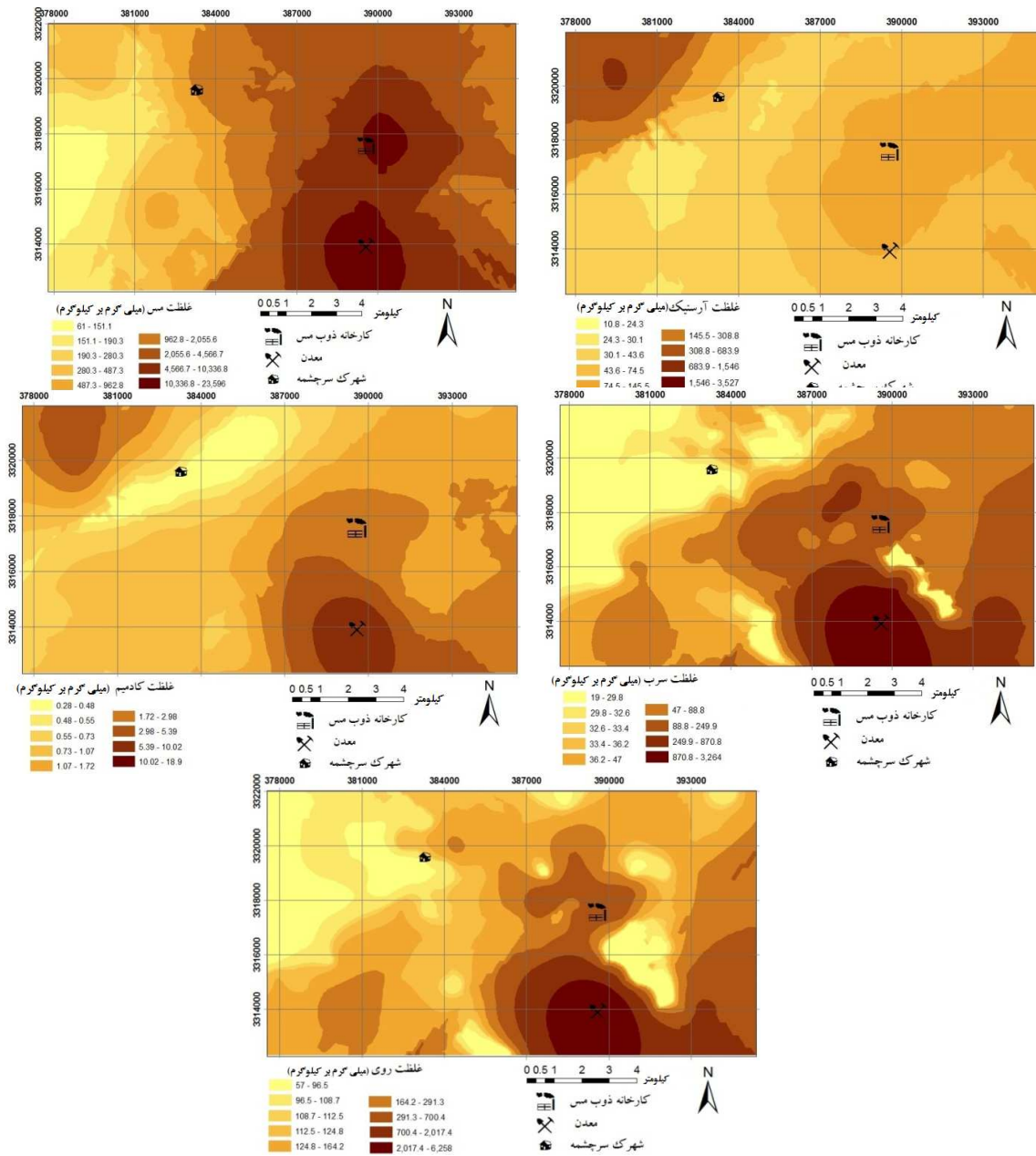
افزایشی به کاهشی شاخص تجمع ژئوشیمیایی در شکل (۶) مشخص است. نتایج حاصل از شاخص زمین انباشتگی نشان داد که بیشترین آلودگی در نقاط مورد مطالعه از طریق کادمیوم، آرسنیک و سرب حاصل شده است. براساس روند شاخص زمین انباشتگی، درجه آلودگی خاک از بیشترین به کمترین به صورت $Cd > Zn > Cu > Pb > As$ است (شکل ۶). این نتایج نشان می‌دهد که در برخی نقاط، خاک دچار آلودگی شدید تا خیلی شدید به ویژه از نظر کادمیوم و آرسنیک می‌باشد. خراسانی‌پور و همکاران (۱۱) به بررسی آلاینده‌گی برخی از عناصر سنگین در منطقه مس سرچشمه پرداختند. نتایج آنها نیز آلودگی شدید کادمیوم در منطقه را تایید می‌کند. همچنین نتایج شایسته‌فر و رضایی (۲۰) مقدار شاخص زمین انباشتگی برای عنصر روی را کمترین نشان داد. روند افزایشی به کاهشی شاخص تجمع ژئوشیمیایی در شکل (۶) مشخص است. آلودگی مس از سایر عناصر بیشتر می‌باشد. نقشه پراکنش شاخص زمین انباشتگی (شکل ۵) مشابه پراکنش غلظت عناصر مورد مطالعه است. شاخص زمین انباشتگی عناصر در اطراف مراکز صنعتی و معدن غلظت-های بالاتری را نشان می‌دهد. مقادیر منفی شاخص زمین انباشتگی در مناطق مسکونی مشاهده گردید که در کلاس غیرآلوده قرار می‌گیرد (شکل ۵) نتایج به دست آمده از فاکتور آلودگی در شکل (۷) ارائه شده است که با نتایج شاخص زمین انباشتگی (شکل ۶) همخوانی دارد. فاکتور آلودگی برای کادمیم، بیشترین آلودگی را در منطقه نشان می‌دهد و کمترین آلودگی سهم روی است.

الگوی مکانی آلودگی کادمیوم به این صورت است که مقدار این عنصر در اطراف کارخانه، معدن و در شمال غربی منطقه مورد مطالعه، بالا است و به سمت شهرک کاهش می‌یابد. منشأ آن را شاید بتوان فاکتورهای انسانی و فاکتورهای طبیعی دانست. کادمیوم مثل آرسنیک از دودکش‌های کارخانه خارج می‌شود و در مسیر جهت وزش باد بر سطح زمین می‌نشیند. البته منشأ کادمیوم در این مناطق می‌تواند در اثر پدیده گوسان (کلاهک‌های آهنی) و فرآیند ذوب باشد. به طور کلی می‌توان منشأ کادمیوم را حاصل از ماده مادری، دودکش‌های کارخانه و فعالیت‌های صنعتی دانست. نقشه پهنه‌بندی سرب و روی از یک الگوی نسبتاً یکسانی پیروی می‌کنند. هر چه از معدن فاصله می‌گیریم میزان آلودگی کاهش می‌یابد. مکان‌های اصلی که دارای بیشترین غلظت سرب و روی می‌باشد در اطراف معدن و کارخانه واقع شده‌اند. پراکنده‌گی مس تا حدودی شبیه به پراکنده‌گی روی و سرب می‌باشد البته با این تفاوت که آلودگی مس در اطراف کارخانه بیشترین مقدار را دارا می‌باشد و هر چه از کارخانه دور می‌شویم غلظت مس به تدریج کم می‌شود (شکل ۴). اگر غلظت عناصر سنگین خاک با مقدار زمینه آنها مقایسه شود، مشاهده می‌شود که غلظت عناصر سنگین خاک از مقدار زمینه عنصر مورد نظر بیشتر است. بنابراین براساس نقشه‌های پراکنش عناصر و همچنین مقادیر بیشتر از غلظت زمینه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که فعالیت‌های انسانی در تجمع این عناصر در خاک نقش مهمی داشته است.

تخمین شدت آلودگی منطقه مورد مطالعه

براساس شاخص‌های آلودگی

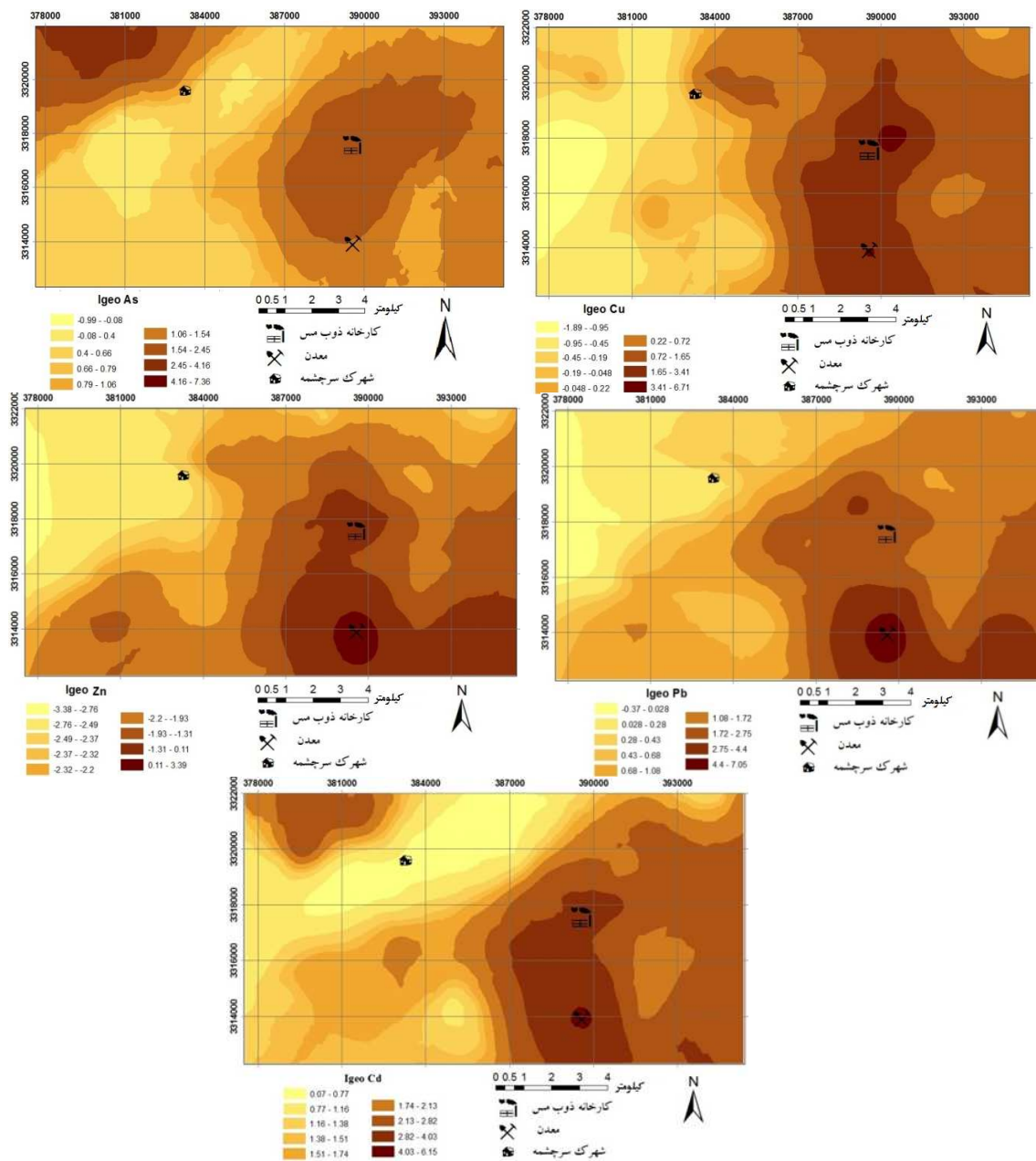
نقشه پراکنش شاخص زمین انباشتگی در شکل ۵ ارائه شده است. همچنین در شکل (۶) شاخص زمین انباشتگی برای عناصر آرسنیک، کادمیوم، سرب، روی و مس نشان داده شده است. براساس شاخص تجمع ژئوشیمیایی Igeo، شدت درجه آلودگی در نقاط مورد مطالعه، برای کادمیوم، بیشترین و برای روی، کمترین بود. روند



شکل (۴) توزیع مکانی فلزات سنگین در منطقه مطالعاتی

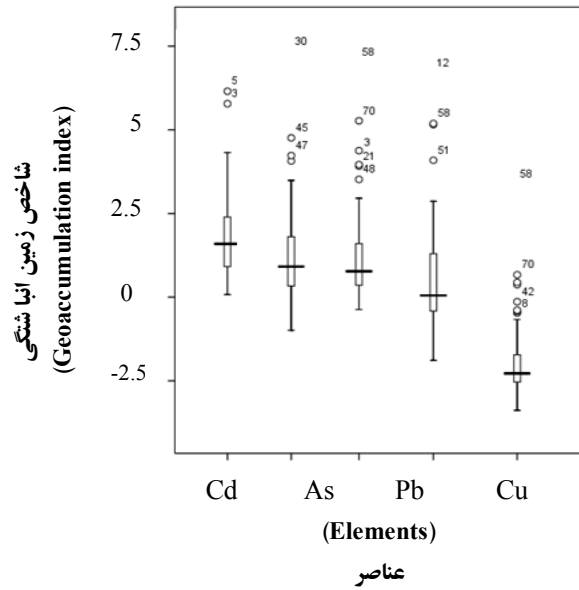
Figure (4) Spatial distribution of heavy metals in the study area

شمس الدین و همکاران: ارزیابی شاخص های آلودگی زیست محیطی ...

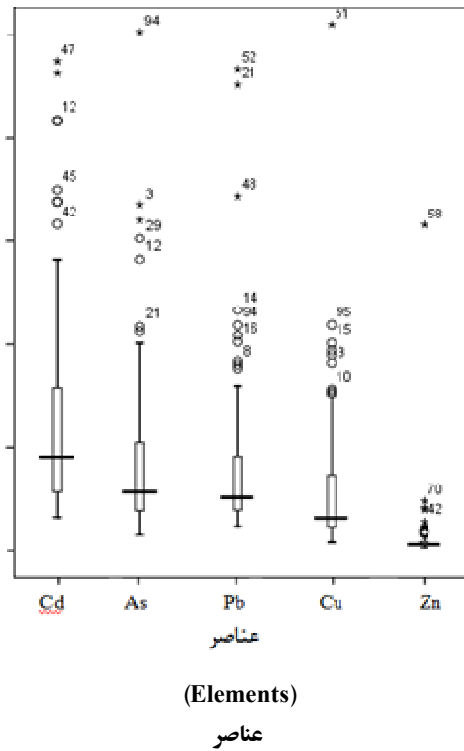


شکل (۵) توزیع مکانی شاخص زمین انباشتی در منطقه مطالعاتی

Figure (5) Spatial distribution of the geoaccumulation index in the study area



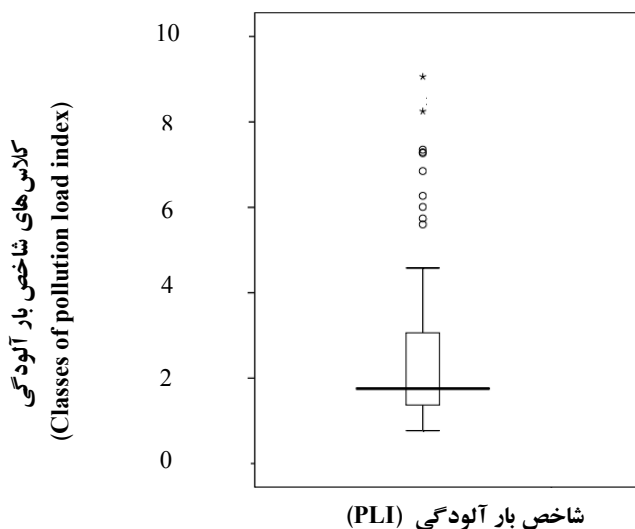
شکل (۶) نمودار جعبه‌ای شاخص ژئوشیمیایی Igeo برای نمونه های خاک مورد مطالعه
 Figure (6) The box plot of Igeo geochemical index for the soil samples



شکل (۷) نمودار جعبه‌ای فاکتور آلودگی
 Figure (7) The box plot of contamination factor

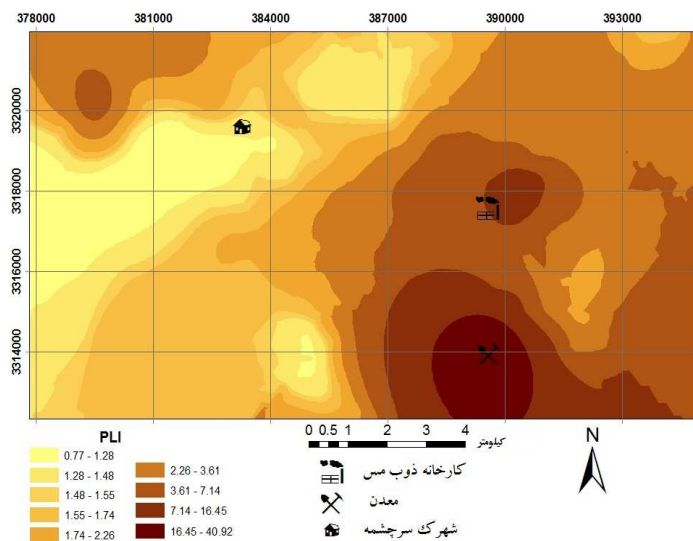
است. پراکنش این عنصر در محدوده کلاس‌های آلودگی شدید تا خیلی شدید بسیار کم است. بیش از ۱۸٪ از نقاط مورد مطالعه دارای کلاس‌های آلودگی بیش از "خیلی شدید" می‌باشند. روی برخلاف عناصر دیگر، بیشتر در کلاس‌های غیرآلوده قرار گرفته است. ۹۲٪ از غلظت این عنصر در نمونه‌ها در محدوده بدون آلودگی قرار گرفته و مابقی به استثنای یک یا دو نمونه، در محدوده آلودگی متوسط قرار گرفته است. همچنین غلظت مس نشان می‌دهد که کمتر از ۵۰٪ درصد آن در کلاس‌های غیرآلوده و آلودگی متوسط قرار گرفته است. این در صورتی است که بیش از ۱۶٪ از غلظت مس در محدوده آلودگی خیلی شدید و بقیه در کلاس آلودگی شدید قرار گرفته است.

روند این فاکتور از بیشترین به کمترین به صورت $Cd > As > Pb > Cu > Zn$ می‌باشد. این شاخص نشان می‌دهد که احتمال آلودگی کادمیوم در مجتمع مس سرچشمه بیشتر از سایر عناصر می‌باشد. نتایج راست‌منش و همکاران (۱۵) در منطقه مس سرچشمه نشان داد که سرب، کادمیوم، مولیبدن و مس بیشترین آلودگی را براساس فاکتور آلودگی در خاک‌های سطحی دارند. غلظت آرسنیک نمونه‌ها به ترتیب در محدوده آلودگی متوسط تا شدید و آلودگی شدید به بالاتر قرار گرفته است. در مورد غلظت سرب نمونه‌ها، حدود ۲۷٪ آن در محدوده کلاس بدون آلودگی تا آلودگی متوسط و حدود ۳۱٪ و ۱۳٪ غلظت سرب نمونه‌ها در محدوده آلودگی متوسط و آلودگی متوسط تا شدید قرار گرفته



شکل (۸) نمودار جعبه‌ای شاخص بار آلودگی

Figure (8) The box plot of pollution load index



شکل (۹) پهنه‌بندی مقادیر شاخص بار آلودگی
Figure (9) Spatial distribution of pollution index

تجزیه و تحلیل نقشه پراکنش مکانی غلظت فلزات سنگین و همچنین نقشه توزیع شاخص زمین انباشتگی و شاخص بار آلودگی بیانگر این بود که بیشترین آلودگی در اطراف معدن و کارخانه می‌باشد. با افزایش فاصله از معدن و کارخانه، غلظت فلزات سنگین و در نتیجه شاخص‌های آلودگی به تدریج کم و کم‌تر می‌شود. نتایج نشان داد که آلودگی خاک به فلزات سنگین در منطقه مس سرچشمه ناشی از فرایندهای طبیعی (زمین شناسی) و فعالیت‌های انسانی است. هر دو این منابع منجر به قرارگیری خاک در کلاس‌های آلوده گردیده است. در مورد عناصر آرسنیک و کادمیوم نقش فرایندهای طبیعی به خوبی روشن است. اما نقش فعالیت‌های انسانی از جمله استخراج معادن و فراوری در کارخانجات بر سرعت بخشیدن به آلوده شدن خاک غیرقابل انکار است. این پدیده در مورد عناصر روی، سرب و مس کاملاً مشخص گردید.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مجتمع مس سرچشمه و همچنین از آقایان دکتر مهدی خراسانی‌پور و مهندس حسن ابراهیمی صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

شاخص بار آلودگی

با توجه به نتایج شاخص بار آلودگی شکل ۸ می‌توان پی برد که کمتر از ۵۰٪ از نقاط مورد مطالعه دارای سطح آلودگی متوسط و شدید می‌باشد و بیش از ۵۰٪ از نقاط مورد مطالعه دارای کلاس‌های آلودگی متوسط و پاک می‌باشند. نتایج حاصل از پهنه‌بندی شاخص بار آلودگی نشان داد که بیشترین آلودگی در اطراف معدن و سپس در اطراف کارخانه می‌باشد (شکل ۹). با افزایش فاصله از معدن، غلظت آلودگی به تدریج کمتر می‌شود. در اطراف شهرک مس سرچشمه (شمال غربی منطقه مورد مطالعه) ناحیه‌ای وجود دارد که آلودگی زیادی را نشان می‌دهد که علت آن را می‌توان به مقادیر بالای آرسنیک و کادمیوم نسبت داد.

نتیجه‌گیری

میانگین غلظت فلزات سنگین بسیار بیشتر از مقدار زمینه این عناصر می‌باشد که نشان دهنده ورود عناصر از منابع آنتروپوژنیک در منطقه است. براساس شاخص زمین انباشتگی و فاکتور آلودگی، بیشترین آلودگی در منطقه مورد مطالعه از طریق آرسنیک و کادمیوم حاصل می‌شود.

منابع

1. Anonymous. 2012. Quality Standards for Soil Resources and its guide. Iran Department of Environment, Office of Water and Soil. P 166 (In Persian).
2. Azimzadeh, B. and Khademi, H. 2013. Estimation of Background Concentration of Selected Heavy Metals for Pollution Assessment of Surface Soils of Mazandaran Province, Iran. *Journal of Water and Soil*, 25(3): 548-559 (In Persian with English abstract).
3. Bahuiyan, M.A.H., Parvez, L., Islam, M.A., Dampare, S.B., and Suzuki, S. 2010. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3): 384-392.
4. Blaser, P., Zimmermann, S., Luster, J., and Shotyk, W. 2000. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in Swiss forest soils. *Science of the Total Environment*, 249(1-3): 257-280.
5. Burt, K., Wilson, M.A., Keck, T.J., Dougherty, D.D., Strom, D.E., and Lindahl, J.A. 2003. Trace element speciation in selected smelter-contaminated soils in Anaconda and Deer Lodge Valley, Montana, USA. *Advances in Environmental Research*, 8:51-67.
6. Delijani, F., Kazemi, Gh., Parvinnia, M. and khakshor, M. 2009. Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soils of South Pars Special Economic Zone (Assaluyeh). Eighth International Congress on Civil Engineering (In Persian).
7. Foster, A.L., Brown, G.E., Tingle, T.N., and Parks, G.A. 1998. Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray absorption spectroscopy. *American Mineralogist*, 83:553-568
8. Hakanson, L.1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*. 14: 975-1001.
9. Iqbal, J. and Shah, M.H. 2011. Distribution, correlation and risk assessment of selected metals in urban soils from Islam Abad, Pakistan. *Journal of Hazardous Materials*, 192: 887-898.
10. Khorasanipour, M. and Aftabi, A. 2010. Environmental geochemistry of toxic heavy metals in soils around Sarcheshmeh porphyry copper mine smelter plant, Rafsanjan, Kerman, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 62:449-465
11. Khorasanipour, M., Tangestani, M.H., and Naseh, R. 2011. Application of multivariate statistical methods to indicate the origin and geochemical behavior of potentially hazardous elements in sediment around the Sarcheshmeh copper mine, SE Iran. *Environmental Earth Sciences*, 66:589-605

12. L'opez-Granados, F., Jurado-Exp'osito, M., Atenciano, S., Garc'ia- Ferrer, A., S'anchez de la Orden, M., and Garc'ia-Torres, L. 2002. Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. *Plant and Soil*, 246:97–105.
13. Meza-Montenegro, M.M., Gandolfi, A.J., Santana-Alcanter, M.E., Klimecki, W.T., Aguilar-Apodaca, M.G., Rio-Salas, R.D., O-Villanueva, M.D.L., Gomez-Alvarez, A., Mendivil-Quijada, H., Valencia, H., and Meza-Figueroa, D. 2012. Metals in residential soils and cumulative risk assessment in Yaqui and Mayo agricultural valleys, northern Mexico. *Science of the Total Environment*, 433: 472-481.
14. Muller, G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geology Journal*, 2:109-118.
15. Rastmanesh, F., Moore, F., Kharratikopaei, M., Keshavarzi, B., and Behrouz, M. 2010. Heavy metal enrichment of soil in Sarcheshmeh copper complex, Kerman, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 62(2):329-336
16. Saracoglu, S., Soylak, M., and Elci, L. 2009. Extractable trace metals contents of dusts of air filters from vehicles by sequential extraction procedure. *Journal AOAC International*, 92(4):1196–1202.
17. Savage, K.S., Tingle, T.N., O'Day, P.A., Waychunas, G.A., and Bird, D.K. 2000. Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode Gold District, Tuolumne County, California. *Applied Geochemistry*, 15:1219-1244.
18. Selinus, O. and Alloway, B.J. 2005. *Essential of medical geology: impacts of the natural environment of public health*. Academic Press, p 812.
19. Shahbazi, A., Soffianian, A., Mirghaffari, N., and Einghalaei, M. 2012. Contamination factor and comprehensive pollution index (A Case Study in Nahavand City). *Environment and Development Journal*, 3(5): 31-38. (In Persian with English abstract)
20. Shayestefar, M.R. and Rezaei, A. 2011. Evaluation of Contamination Rate and Heavy Metals Distribution in the Sediments of Sarcheshmeh Copper Mine Using Geochemical Data and Statistical Studies. *Iranian Journal of mining Engineering*, 6(11): 25-34 (In Persian with English Abstract)
21. Shayestehfar, M.R., Shafiee, N., Shirani, H., Rezaei, A., and Kargar Dianati, M.R. 2012. Distribution of As and Se Elements in the Soil of the Sarcheshmeh Copper Mine Area, Kerman. *Journal of water and soil*, 26(3): 533-534. (In Persian with English abstract)
22. Ye, C., Li, S., Zhang, Y., and Zhang, Q. 2011. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Hazardous Materials*, 191(1-3): 366-372.