

ارزیابی زیست محیطی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان بهبهان

حمیدرضا پورخباز^{*}: استادیار دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، ایران

سعیده جوانمردی: مربی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، ایران

حسین یوسف‌نیا: دانشجوی ارشد دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، ایران

مسعود اسلامی: دانشجوی ارشد دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، ایران

سرور مکرونی: دانشجوی ارشد دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، ایران

حسین اقدر: دانش‌آموخته ارشد دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، ایران

وصول: ۱۳۹۳/۱۱/۲۹ پذیرش: ۱۳۹۴/۵/۲۷، صص ۱۰۶-۸۷

چکیده

انتشارات اتمسفری از تأسیسات صنعتی، یکی از منابع اصلی آلودگی محیط زیست است. یکی از صنایع ایجادکننده آلودگی، ذرات کارخانه سیمان است. فلزات سنگین از جمله مهمترین عناصر منتشر در طول فرایند صنعت سیمان به شمار می‌آید. هدف از مطالعه حاضر تعیین میزان آلودگی و منبع اصلی فلزات سنگین در خاک محدوده کارخانه سیمان شهر بهبهان است. بدین منظور تعداد ۶۱ نمونه خاک از اطراف این کارخانه جمع‌آوری شد. این نمونه‌ها از عمق ۱۰-۵ سانتی‌متری تهیه و برای تعیین فلزات آلومینیوم، سرب، کادمیوم و نیکل با روش ICP آنالیز شدند. در نمونه‌های بررسی شده، میانگین غلظت عناصر آلومینیوم، سرب، کادمیوم و نیکل به ترتیب ۸۳/۲۶، ۶۴/۶۹، ۷۵/۲۹ و ۶۴ (ppm) بود. ترتیب فراوانی میانگین غلظت عناصر سنگین عبارت بود از: $Al > Cd > Pb > Ni$. نتایج نشان داد که مقادیر فلزات بر اساس تغییر مسافت از کارخانه سیمان نوسان دارد؛ به طوری که میانگین غلظت اکثر فلزات با افزایش فاصله از کارخانه کاهش می‌یابد. برای بررسی روند پراکنش فلزات در این منطقه از شاخص‌های غنی‌شدگی (EF)، زمین‌انباشتگی (I_{geo}) و بار آلودگی (PLI) استفاده شد. محاسبه شاخص غنی‌شدگی گویای آن است که همه عناصر در طبقه تهی‌شدگی یا حداقل غنی‌شدگی در کل مسافت‌ها بودند؛ به طوری که مقادیر این شاخص برای فلزات، کمتر از ۱/۵ است. شاخص زمین‌انباشتگی برای نمونه‌های خاک نیز نشان می‌دهد که منطقه نسبت به کادمیوم در طبقه شدیداً آلوده و سرب در طبقه کمی آلوده قرار دارد. ضریب بار آلودگی برای همه مسافت‌ها محاسبه شد و نشان از نداشتن آلودگی منطقه به فلزات سنگین در مقیاس زمینه است.

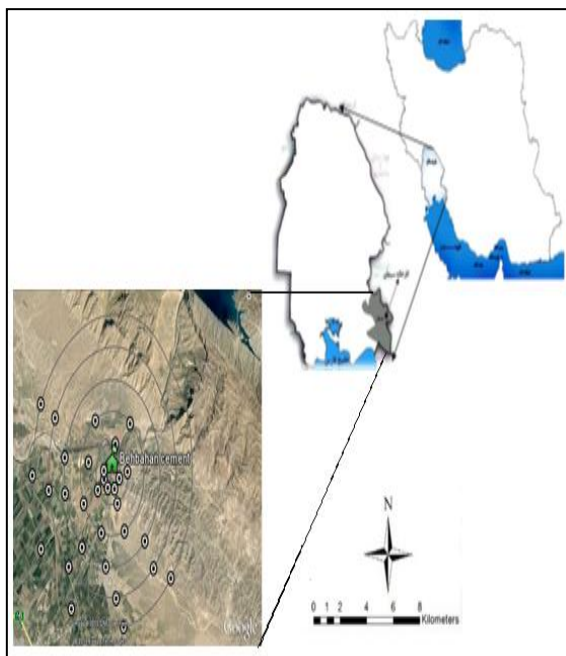
واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، ضریب غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی، آلودگی خاک، کارخانه سیمان

مقدمه

امروزه آلودگی محیط زیست از مسایل مهمی است که جوامع مختلف با آن روبه‌رو هستند. گسترش روزافزون صنایع، توسعه شهرها، افزایش بی‌رویه جمعیت و دخالت بشر در طبیعت، آلودگی منابع آب، خاک و هوا را به دنبال داشته است (توانکار و شفقت، ۱۳۸۷). آلودگی خاک یکی از عوارض مهم به‌هم‌خوردن تعادل و توازن طبیعت است (Mico et al., 2006; Yalcin et al., 2007)، در این ارتباط، آلودگی فلزات سنگین خاک‌ها بسیار گسترده بوده است و خطر انتقال این فلزات سمی و قابل دسترس به انسان، حیوانات و محصولات کشاورزی وجود دارد (Parizanganeh, et al., 2012). خطر بالقوه سلامت عمومی در خصوص فلزات سنگین به میزان جذب آنها بستگی دارد (Ogunbileje, et al., 2013). منابع طبیعی ورود فلزات سنگین، فرسایش مواد مادری خاک بوده و بنابراین با زمین‌شناسی منطقه مرتبط است. معدن‌کاری، صنایع مختلف از جمله صنعت سیمان، حمل و نقل جاده‌ای، سوزاندن پسماند و به‌ویژه استفاده از کودها و مواد شیمیایی در کشاورزی از منابع انسانی بسیار مهم ورود فلزات سنگین به خاک و آب در اکوسیستم‌های سطحی هستند (Yalcin et al., 2007). در این میان، صنایع سیمان به صورت یکی از آلاینده‌ترین صنایع موجود در این آلودگی جایگاه به‌سزایی دارد. نتایج تحقیقات اخیر نشان‌دهنده اثرات زیست محیطی نامطلوب کارخانه‌های سیمان بر محیط اطراف است (Moslempour and Shahdadi, 2013). مهمترین اثر بد کارخانه‌های سیمان بر محیط اطراف، انتشار گرد و غبار (به همراه فلزات سنگین) و گازهای آلاینده است (Bilen, 2010). در فرایند تولید سیمان شامل حرارت‌دهی، کلینگرسازی، خنک‌کردن کلینگر و

انبارکردن سیمان، غبار زیادی تولید می‌شود (Riahi Samani and Isazadeh, 2005) که از طریق باد، باران و غیره گسترش می‌یابد و روی گیاهان، حیوانات و خاک انباشته می‌شود و می‌تواند اثرات بسیار منفی بر سلامت انسان داشته باشد (چهرگانی، ۱۳۸۲، Al-Khashman, 2004). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله pH، درصد ماسه و رس، مقدار کربنات کلسیم موجود در خاک، مقدار مواد آلی، قابلیت تبادل کاتیونی (CEC)، نوع کانی رسی، درصدهای وزنی اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن تأثیر مشخصی در میزان جذب عناصر سنگین دارد (رفیعی و همکاران، ۱۳۹۰، Kabata-Pendias and Pendias, 2001). هر چند این عناصر به طور طبیعی، غلظت کمی در خاک موجود دارند، اما پراکنش جغرافیایی آنها چه به صورت طبیعی و چه از طریق فعالیت‌های انسانی، مشکلات و مسایلی را در بر خواهد داشت (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲). این فلزات می‌توانند با روش‌های مختلفی وارد زنجیره غذایی شوند و بیماری‌های جدی و گاهی کشنده را سبب شوند (Sayadi and Rezaei, 2014). به همین علت پایش آلودگی فلزات سنگین از اهمیت خاصی برخوردار است (Ahiamadjie, et al., 2011). در واقع، تعیین فلزات در خاک، گرد و غبار، گیاهان و رسوبات در پایش زیست محیطی آلودگی بسیار اهمیت دارد (Kawai, et al., 2014). آنالیز عناصر سنگین در خاک، روش مطلوبی است که نه تنها آلودگی خاک بلکه کیفیت پیرامونی را که در خاک منعکس شده است، نشان می‌دهد (رفیعی و همکاران، ۱۳۹۰)؛ البته تحلیل زمانی و جغرافیایی در این خصوص به نتایج مطلوب‌تری می‌انجامد. آگونیلج و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی مقادیر ۱۱ فلز سنگین در غبارات کارخانه سیمان دو منطقه جغرافیایی (نیجریه و آمریکا) به تأثیر

کارخانه از سال ۱۳۵۷ فعالیت خود را شروع کرده و ظرفیت اسمی آن ۲۳۰۰ تن در روز است. مواد اولیه آن سنگ آهن، سنگ سیلیس، سنگ آهک و خاک رس و محصول تولیدی این شرکت، سیمان تیپ ۲ و تیپ ۵ است (شکل ۱). این کارخانه جایگاه مهمی در وضعیت اقتصادی و اشتغال‌زایی منطقه دارد. بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی بهبهان، میانگین بارش این منطقه ۳۵۰ میلی‌متر، میانگین دمای سالیانه آن ۲۴/۵ درجه سانتی‌گراد، اقلیم آن بر اساس روش دومارتن، نیمه‌خشک و جهات باد غالب، منطقه غربی و شمال غربی است.



شکل (۱): موقعیت منطقه مطالعاتی

روش نمونه‌برداری

این تحقیق برای بررسی غلظت فلزات سنگین کادمیوم، نیکل، سرب و آلومینیوم در خاک منطقه تا شعاع ۵ کیلومتری در بهار ۱۳۹۳ انجام شد. دلیل برداشت نمونه‌ها در این فصل، میزان ناچیز بارندگی و تأثیرنداشتن آن بر توزیع فلزات سنگین خاک است. بدین منظور ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی و بازدید از بخش‌های مختلف

فاکتورهای مختلف (خواص فیزیکوشیمیایی خاک، اقلیم، پوشش گیاهی و سنگ بستر) این دو منطقه بر غلظت فلزات تأکید داشتند. ارزیابی زیست محیطی فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های مختلفی از جمله شاخص زمین انباشتگی، فاکتور غنی‌شدگی، درجه آلودگی، فاکتور آلودگی و شاخص بار آلودگی انجام می‌شود (عظیم‌زاده و خادمی، ۱۳۹۲). در این ارتباط به تحقیقات متعددی می‌توان اشاره کرد؛ از جمله دلجانی و همکاران (۱۳۸۸)، شهبازی و همکاران (۱۳۹۱) و آدو و همکاران (۲۰۱۲) وضعیت آلودگی خاک مناطق مختلف را به فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین انباشتگی و شاخص بار آلودگی ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که میزان غلظت این عناصر بر اساس فاصله و جهت از منبع آلودگی از یک الگوی پیچیده پیروی می‌کند. مسلم‌پور و شهدادی (۲۰۱۳) و وانگ (۲۰۱۳) با بررسی غلظت فلزات سنگین اطراف کارخانه سیمان ثابت کردند که با افزایش فاصله از کارخانه، افزایش جزئی در غلظت این فلزات مشاهده شد. بر این اساس هدف از انجام این تحقیق نیز بررسی غلظت عناصر سنگین کادمیوم، نیکل، سرب و آلومینیوم خاک در فواصل و جهات جغرافیایی مختلف از کارخانه سیمان بهبهان و تعیین درجه آلودگی آن از طریق بررسی شاخص‌های زمین‌شناسی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

شهرستان بهبهان با وسعتی معادل ۳۱۹۵ کیلومتر مربع در جنوب شرقی استان خوزستان واقع شده است. کارخانه سیمان بهبهان در شمال شرقی شهر بهبهان و در مختصات جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این

سه روز متوالی در دمای آزمایشگاه خشک شد، پس از آن خاک کاملاً خرد و از الک ۱۰ مش ($< 2 \text{ mm}$) عبور داده شد تا هیچ گونه ناخالصی نداشته باشد و سپس به وسیله چکش‌های چوبی تا حد ۲۰۰ مش ($< 63 \mu\text{m}$) پودر شد (Addo et al., 2012; Shakeri et al., 2014). بعد از آن ۲ گرم از نمونه غربال‌شده به‌دقت وزن شد و با هضم چهار اسیدی شامل ۱۰ میلی‌لیتر HF، ۵ میلی‌لیتر HClO_4 ، ۲/۵ میلی‌لیتر HCl و ۲/۵ میلی‌لیتر HNO_3 هضم گردید. پس از عبور آنها از کاغذ صافی واتمن ۴۲ محتویات ارلن به بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری منتقل و با آب مقطر به حجم رسانده شد. در نهایت غلظت فلزات سنگین نمونه‌های مربوط با دستگاه ICP ساخت فرانسه مدل (Jobilywan) تعیین گردید (Carter, 1993). تحلیل‌های آماری داده‌ها با نرم‌افزار SPSS انجام شد. مقداری از نمونه‌ها برای تعیین بافت خاک، درصد مواد آلی خاک، EC و pH در نظر گرفته شد. pH خاک با روش استاندارد EPASW-846-METHOD9045، EC نمونه‌ها از طریق عصاره‌گیری نسبت ۱ به ۵ خاک به آب و درصد مواد آلی خاک به روش تیتراسیون و بر اساس اکسیداسیون مواد آلی با $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ مشخص شد (گراوند و همکاران، ۱۳۹۱، Omar et al., 2006).

نتایج و بحث

بررسی مقادیر پارامترهای شیمیایی خاک

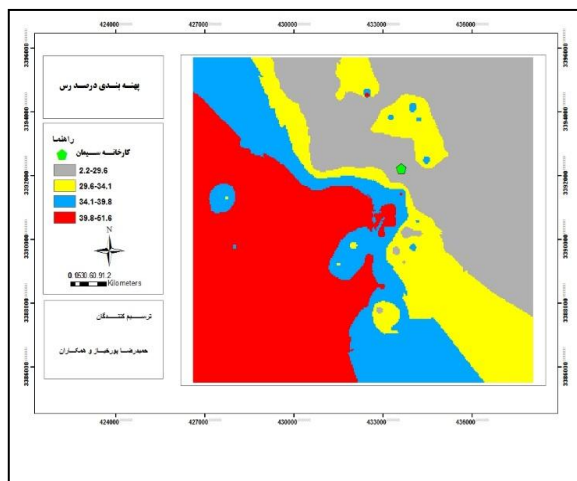
تحرك عناصر در خاک تا حد زیادی به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک بستگی دارد. در این میان pH و ماده آلی خاک می‌توانند تحرك فلزات را تغییر دهند (مر و همکاران، ۱۳۹۱)؛ به طوری که مقدار نسبتاً بالای آنها تحرك فلزات را محدود می‌کنند (Kapusta et al., 2011). بر اساس میانگین مقدار pH ۸/۴۵ (۸/۷۳-۸/۲۴)، منطقه مطالعه‌شده قلیایی و

منطقه مطالعه، نقاط نمونه‌برداری، مشخص و مختصات با دستگاه GPS ثبت شد. برای بررسی‌های زیست محیطی مطلوب منطقه مطالعه، ایستگاه‌های نمونه‌برداری به طریقی انتخاب شدند که کل پیرامون کارخانه سیمان را پوشش دهند. برای این کار، نمونه‌برداری به صورت سیستماتیک تصادفی با مرکز قرارگرفتن کارخانه سیمان انجام گرفت. در این راستا، دایره‌هایی با مرکز متحد شعاعی (ایستگاه‌ها) در فاصله‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ متری به تعداد ۶ ایستگاه در اطراف کارخانه در جهات شرقی، جنوبی و غربی در نظر گرفته و در هر ایستگاه ۹ نمونه به صورت ترکیبی برداشت شد. با توجه به پوشش گیاهی اندک منطقه در فصل نمونه‌برداری و امکان تأثیر آن بر توزیع عناصر سنگین خاک، سعی شد نمونه‌ها از مناطقی که پوشش گیاهی ندارند، جمع‌آوری شود تا تأثیر گیاهان بر میزان غلظت عناصر خاک به حداقل برسد. البته برای به‌دست‌آوردن غلظت زمینه، تعداد ۷ نمونه خاک شاهد به طور تصادفی در جهات غرب و شمال غربی در نقاطی که در تأثیر کارخانه سیمان قرار نداشتند، انتخاب شدند (شهبازی، ۱۳۹۰، شهبازی و همکاران، ۱۳۹۱)؛ در واقع این نمونه‌ها در خلاف جهت باد غالب جمع‌آوری شدند. شایان ذکر است نمونه‌برداری از خاک منطقه فقط یک بار صورت گرفت و در مراحل مختلف آن، اصول کنترل کیفی و تضمین کیفیت نمونه‌برداری رعایت شد. نمونه‌های خاک به وسیله بیلچه استیل از عمق ۱۰-۵ سانتی‌متری خاک برداشت و بعد از حذف سنگ‌های بزرگ و سایر مواد خارجی در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شدند (Addo et al., 2012; Moslempour and Shahdadi, 2013).

آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌ها

نمونه‌های خاک بعد از انتقال به آزمایشگاه به مدت

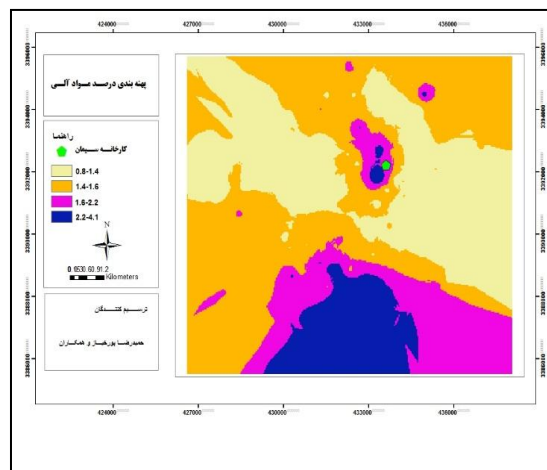
منطقه مطالعاتی (شکل ۳) و بالاترین درصد تغییر میزان رس در شمال و جنوب حاشیه منطقه است. رس در مقادیر بالا به دلیل بار منفی و همچنین نفوذ و حرکت کمتر آب در آن در نگره‌داری و تحرک نداشتن فلزات سنگین نقش بیشتری دارد. بنابراین میزان بالای رس، جایگاه مشابهی در تحرک فلزات سنگین خاک منطقه نشان می‌دهد. به طور کلی نبودن تغییرات چشمگیر در مقادیر این پارامترها تأثیر چندانی در غلظت فلزات سنگین خاک نخواهد داشت. برای اثبات این موضوع در نهایت همبستگی این پارامترها با غلظت فلزات خاک بررسی شد.



شکل (۳): پهنه‌بندی درصد رس خاک اطراف کارخانه سیمان بهبهان

۷۵/۲۹ و آلومینیوم (۸۳/۲۶ ppm) و کمترین آن، برای نیکل (۶۴ ppm) و سرب (۶۴/۶۹ ppm) ثبت شد. مقدار بحرانی نیکل در خاک را بسیاری از محققان در دامنه ۲-۵۰ ppm تخمین زده‌اند (Bergman, 1992; Güne et al., 2004). بر اساس مطالعه حاضر، میانگین عنصر نیکل (۶۴ ppm) نشان می‌دهد که آلودگی این عنصر در حد بحرانی است. پژوهش مسلم‌پور و شهدادی (۲۰۱۳) در ارزیابی آلودگی فلزات خاک اطراف کارخانه سیمان خاش نیز

میانگین مقدار EC اندازه‌گیری شده کمتر از ۴ ds/m بود که نشان می‌دهد خاک منطقه بر اساس طبقه‌بندی نه‌گانه علوم خاک آمریکا (۱۹۸۷) در رده خاک‌های معمولی و غیر شور قرار می‌گیرد (غازان شاهی، ۱۳۸۵). بر این اساس انتظار می‌رود که تحرک فلزات محدود شود (مر و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین با توجه به شکل ۲ تغییرات میزان مواد آلی خاک منطقه مطالعاتی نسبتاً کم و درصد میزان این مواد در خاک باغ‌های جنوبی و داخل کارخانه (حاشیه منطقه مطالعاتی) بالاتر است. در ضمن، مطالعه نشان داد که بافت خاک از نوع رسی با درصد تغییرات کم در کل



شکل (۲): پهنه‌بندی درصد مواد آلی خاک اطراف کارخانه سیمان بهبهان

غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک

غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک اطراف کارخانه سیمان بهبهان اندازه‌گیری شد. توصیف آماری آنها شامل میانگین، انحراف معیار، بیشینه و کمینه، میانگین منطقه، میانگین جهانی شیل و WHO (گراوند و همکاران، ۱۳۹۱، Kabata-Pendias and Pendias, 2001) در خاک‌های محدوده کارخانه سیمان به نسبت فواصل مختلف در جدول ۱ آورده شده است. بیشترین مقدار میانگین فلز، برای کادمیوم (ppm)

(۲۰۱۱) و ال-اوود و همکاران (۲۰۱۱) است. در هر صورت، کمترین دامنه تغییرات را با توجه به عامل مسافت، عنصر سرب دارد که این به دلایل انسانی و طبیعی در منطقه از جمله کاربری زمین، مصرف کود کشاورزی، ترافیک و فرسایش لاستیک ماشین‌های حمل سیمان و وسایل نقلیه دیگر، نوع خاک، pH و CEC خاک است (Mandal and Voutchkov, 2011). در این میان pH و ماده آلی خاک می‌تواند تحرک فلزات را تغییر دهد (مر و همکاران، ۱۳۹۱; Sayadi and Addo et al., 2012; Rezaei, 2014); به طوری که میزان نسبتاً بالای آنها تحرک فلزات را محدود می‌کند (Kapusta et al., 2011). در این ارتباط نتایج این تحقیق با مطالعات شوماخر و همکاران (۲۰۰۲) و آدو و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد.

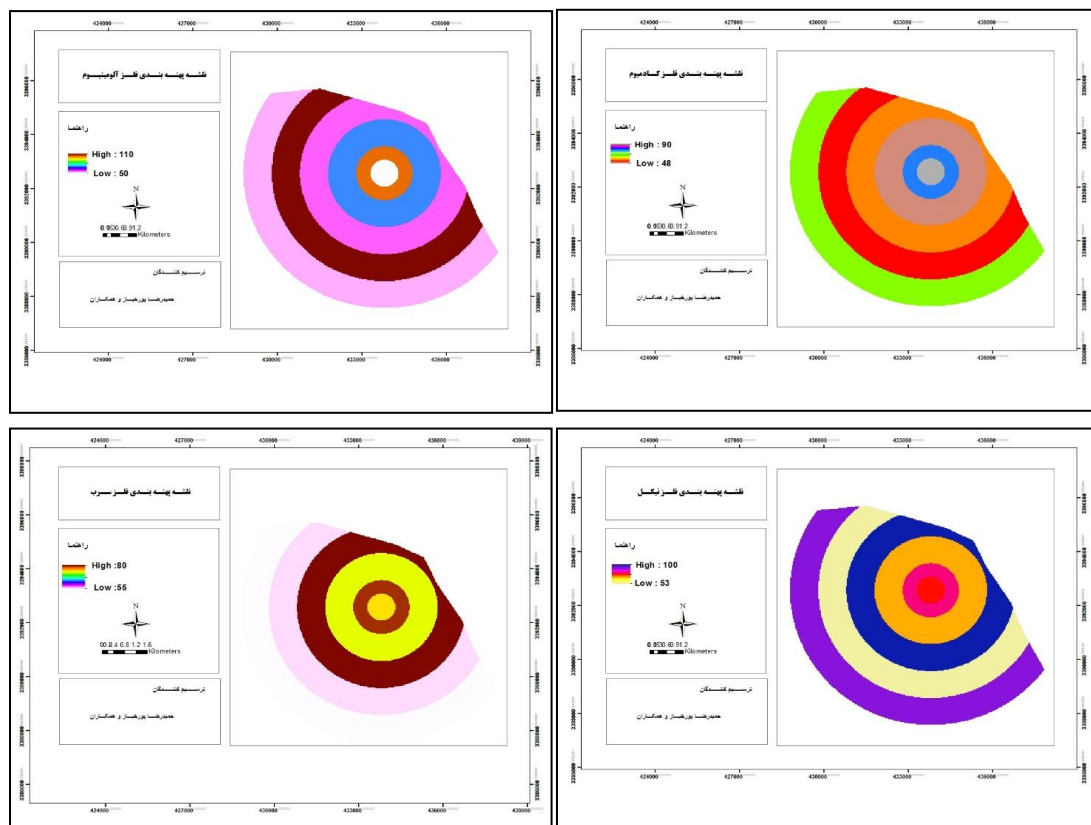
جدول (۱): غلظت فلزات سنگین در ایستگاه‌های اطراف کارخانه سیمان (ppm)

این نتیجه را تأیید می‌کند. در هر صورت، غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک منطقه از این روند پیروی می‌کند: $Al > Cd > Pb > Ni$. مقایسه نتایج با محدوده استاندارد جهانی شیل نشان می‌دهد که غلظت فلزات سنگین در منطقه مطالعه بالاتر از حد استاندارد است. برای ارزیابی تأثیر کارخانه سیمان بر اطراف، مسافت‌های شعاعی با مرکز قرارگرفتن کارخانه در نظر گرفته شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار میانگین غلظت عناصر با افزایش فاصله از کارخانه سیمان از یک فرایند کاهشی پیروی می‌کند. داده‌ها نشان می‌دهد که بالاترین مقدار اکثر فلزات در نزدیک کارخانه اتفاق افتاده است (جدول ۱ و شکل ۴); به عنوان مثال، بالاترین مقدار نیکل و کادمیوم در شعاع ۵۰۰ متری مشاهده می‌شود. بنابراین کارخانه سیمان می‌تواند عامل اصلی در این الگوی پراکنش فلزات باشد. این نتایج، مشابه یافته‌های ال-خشمان (۲۰۰۴)، آهیاماجی و همکاران

| Al | Cd | Pb | Ni | فاصله (متر) |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| انحراف معیار ± میانگین | انحراف معیار ± میانگین | انحراف معیار ± میانگین | انحراف معیار ± میانگین | |
| ۹/۷۴±۹۸/۱۶ | ۴/۵۹±۸۵/۵ | ۵/۵۱±۶۹ | ۸۵/۶۷±۱۰/۵۱ | ۵۰۰ |
| ۲۴/۷۷±۶۹/۷۴ | ۸/۹۸±۶۳/۶۶ | ۶/۰۷±۶۵/۸۶ | ۸/۶۱±۶۲/۵۶ | ۱۰۰۰ |
| ۲۱/۰۴±۸۲/۴۰ | ۱۶/۹۵±۶۹/۰۸ | ۹/۵۱±۷۰/۶۴ | ۸/۲۰±۷۵/۳۶ | ۲۰۰۰ |
| ۲/۵۳±۹۷/۲۳ | ۳/۱۴±۷۵/۲۲ | ۲/۸۹±۶۸/۹۰ | ۲/۹۱±۷۳/۹۷ | ۳۰۰۰ |
| ۱/۰۲±۷۷/۸۲ | ۲/۳۰±۸۳/۹۲ | ۱/۷۱±۷۰/۰۶ | ۰/۹۶±۶۵/۰۴ | ۴۰۰۰ |
| ۲/۵۸±۶۹/۲۰ | ۵/۱۷±۵۶/۴۰ | ۴/۹۸±۶۸/۰۴ | ۸/۰۴±۵۶/۸۰ | ۵۰۰۰ |
| ۵۰ | ۴۸ | ۵۵ | ۵۳ | مینیم |
| ۱۱۰ | ۹۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ماکزیمم |
| ۸۳/۲۶ | ۷۵/۲۹ | ۶۴/۶۹ | ۶۴ | میانگین منطقه |
| ۱۰۰ | ۱ | ۲۰ | ۵۰ | میانگین جهانی شیل ^a |
| - | ۰/۳ | ۲۰ | ۶۸ | WHO میانگین ^b |

^a Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007

^b Kelepetsis, 2001



شکل (۴): پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین در خاک اطراف کارخانه سیمان بهبهان

سنگین است که دلیل آن سرعت و درصد فراوانی پایین بادهای غالب منطقه است و مسلم‌پور و شهدادی (۲۰۱۳) نیز در تحقیقات مشابه به این نتیجه رسیدند. جدول (۲): غلظت فلزات سنگین در جهات مختلف جغرافیایی اطراف کارخانه سیمان (ppm)

برای ارزیابی تأثیر کارخانه سیمان بر غلظت فلزات سنگین خاک منطقه علاوه بر مسافت‌های شعاعی، جهت‌های جغرافیایی مختلف نیز در نظر گرفته شد (جدول ۲). تحلیل مکانی تغییرات غلظت فلزات سنگین در جهت‌های جغرافیایی نشان از تفاوت چشمگیری در مقادیر نیست. این نتیجه بیانگر نبودن ارتباط بین جهت باد غالب و الگوی پراکنش فلزات

| Al | Cd | Pb | Ni | جهت جغرافیایی |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|
| انحراف معیار \pm میانگین | انحراف معیار \pm میانگین | انحراف معیار \pm میانگین | انحراف معیار \pm میانگین | |
| ۱۵/۵۱ \pm ۷۵/۲۴ | ۱۳/۰۱ \pm ۶۶/۸۴ | ۶/۴۲ \pm ۶۹/۷۰ | ۶۷/۴۴ \pm ۱۲/۲۳ | غرب |
| ۱۸/۷ \pm ۷۸/۲۰ | ۱۳/۶۵ \pm ۶۹/۶۱ | ۵/۸۱ \pm ۶۸/۸۸ | ۸/۹۳ \pm ۶۷/۷۸ | شرق |
| ۱۲/۸ \pm ۸۶/۹۷ | ۱۰/۹۰ \pm ۷۷/۲۶ | ۴/۳۳ \pm ۶۵/۳۹ | ۱۰/۳۹ \pm ۶۸/۴۴ | جنوب |

با سایر پژوهش‌ها انجام شد که نتایج در جدول ۳

برای ارزیابی میزان آلودگی منطقه مطالعاتی، مقایسه

اروپا در نظر گرفته شده، به ترتیب کمتر و بیشتر است. جدول (۳): مقایسه میانگین غلظت برخی فلزات سنگین (ppm) در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان مناطق مختلف جغرافیایی

آورده شده است. بر اساس این، مقدار آلومینیوم و کادمیوم در منطقه مطالعاتی نسبت به سایر مناطق جغرافیایی به ترتیب کمتر و بیشتر است، اما میزان عناصر سنگین سرب و نیکل نسبت به مقادیر استاندارد که برای خاک‌های غیر آلوده و معیارهای

| منطقه جغرافیایی | Ni | Pb | Cd | Al | منبع |
|----------------------|--------|--------|-------|-------|---------------------------------|
| بهبهان | ۶۴ | ۶۴/۶۹ | ۷۵/۲۹ | ۸۳/۲۶ | مطالعه حاضر |
| تهران | ۳۷/۵ | ۲۰۷/۴ | - | - | رفیعی و همکاران، ۱۳۹۰ |
| Khash | ۱۰۳/۶۱ | ۱۸/۵۹ | ۱/۲۲ | - | Moslempour and Shahdadi, 2013 |
| Volta Region, Ghana | ۲۴۵/۲۶ | ۱۳/۱۳ | - | - | Addo et al., 2012 |
| Rockfort, Jamaica | - | ۳۱/۴۷ | ۵/۲۴ | - | Mandal and Voutchkov, 2011 |
| Southern Jordan | - | ۵۵ | ۵ | - | Al-Khashman and Shawabkeh, 2006 |
| Riyadh, Saudi Arabia | - | ۴/۲۷ | ۱/۱ | ۵۶۳ | Al-Oud et al., 2011 |
| مقدار استاندارد | ۳۰-۶۰ | ۵۰-۱۰۰ | - | - | Hernandez et al., 2003 |

هیستوگرام‌ها نشان‌دهنده نرمال بودن داده‌هاست و از چولگی خاصی پیروی نمی‌کند. پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها به منظور تعیین ضرایب همبستگی (۲) پیرسون داده‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS 22، استفاده شد (Acosta et al., 2009). مقادیر ضریب همبستگی در جدول ۴ آمده است. بر خلاف انتظار، پارامترهای EC و pH (به جز یک مورد)، هیچ‌گونه همبستگی آشکاری با عناصر مورد بررسی نشان ندادند که تحقیقات گراوند و همکاران (۱۳۹۱) آن را تأیید می‌کند. این موضوع می‌تواند از تغییرات کم این پارامترها در ناحیه مطالعه‌شده ناشی باشد (Qishlaqi et al., 2009). بر اساس داده‌های جدول ۴، کادمیوم با آلومینیوم، رابطه معنی‌دار مثبت ($r=0/636, p<0/01$) و نیکل با آلومینیوم ($p<0/01$)، کادمیوم ($r=0/617, p<0/01$) و با سرب

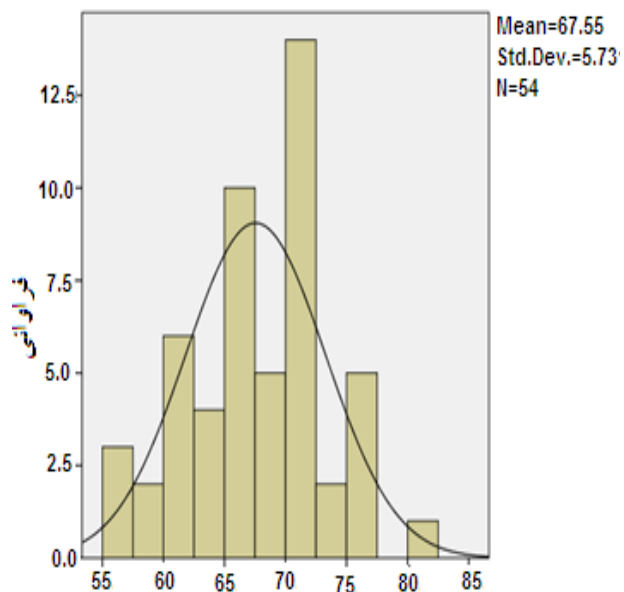
بررسی روابط همبستگی پارامترهای شیمیایی خاک با فلزات سنگین

پارامترهای آماری پایه برای تفسیر رفتارهای محیطی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه مطالعه‌شده محاسبه شد. اطلاع از پارامترها و ویژگی‌های آماری داده‌ها شامل میانگین، انحراف معیار و به‌خصوص انحراف از حالت نرمال، نخستین مرحله برای شناسایی طبیعت داده‌ها است (مؤمنی، ۱۳۸۸، بی‌همتا و زارع، ۱۳۹۰، شایسته‌فر و رضایی، ۱۳۹۲). جدول ۱ توصیف آماری غلظت فلزات سنگین را در خاک‌های محدوده کارخانه سیمان نشان می‌دهد. برای بررسی توزیع و تست نرمال بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد، از آزمون کلموگروف - اسمیرنوف استفاده شد. شکل ۵ هیستوگرام فلزات سنگین کادمیوم، نیکل، سرب و آلومینیوم را بر اساس فاصله نشان می‌دهد.

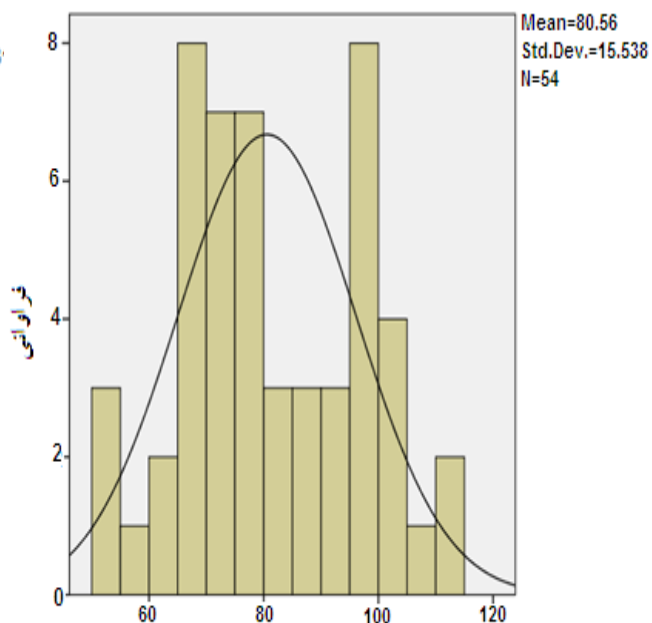
پارامترهای خاک رابطه معنی داری نشان نداد.

($r=0/420$, $p<0/01$) نیز رابطه معنی دار مثبت نشان

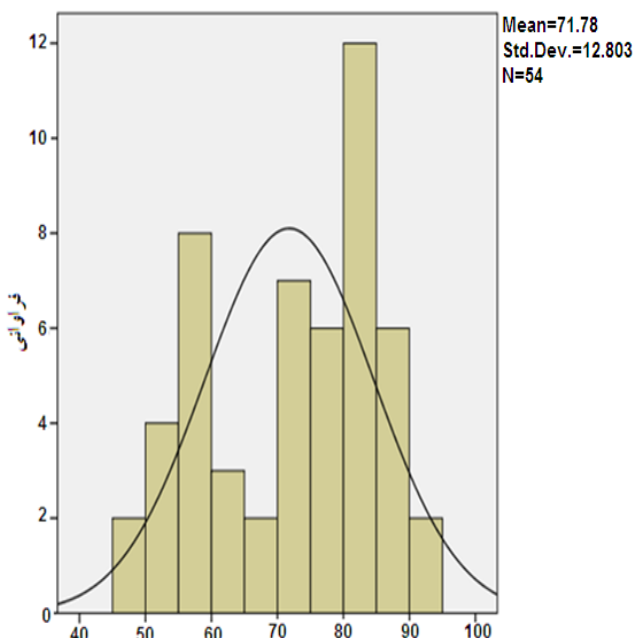
می دهد. در این مطالعه، سرب با هیچ یک از عناصر و



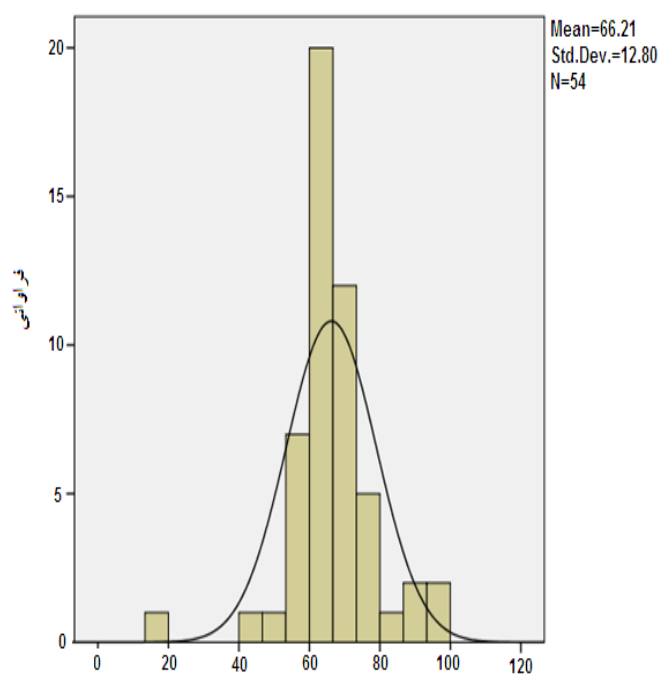
Pb



Al



Cd



Ni

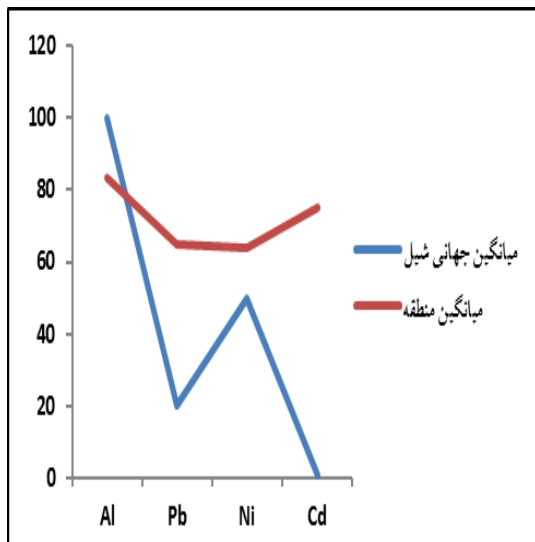
شکل (۵): هیستوگرام عناصر سنگین در منطقه مطالعاتی

جدول (۴): ماتریس مقادیر همبستگی (R) پارامترهای شیمیایی و فلزات سنگین نمونه‌های خاک

| | | | | | | | |
|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|----------|
| | Al | | | | | | |
| Al | ۱ | Cd | | | | | |
| Cd | **۰/۶۳۶ | ۱ | Pb | | | | |
| Pb | ۰/۲۶۶ | ۰/۰۹۱ | ۱ | Ni | | | |
| Ni | **۰/۶۱۷ | **۰/۳۸۵ | **۰/۴۲۰ | ۱ | pH | | |
| pH | -۰/۵۶۸ | -۰/۴۷۴ | -۰/۱۴۲ | *-۰/۶۴۳ | ۱ | EC | |
| EC | ۰/۳۶۱ | ۰/۰۵۹ | ۰/۶۰۸ | ۰/۵۵۳ | -۰/۵۷۱ | ۱ | ماده آلی |
| ماده آلی | ۰/۴۳۳ | ۰/۲۵۶ | ۰/۴۱۰ | ۰/۵۷۳ | -۰/۶۳۱ | -۰/۳۴۸ | ۱ |

** همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

* همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵



شکل (۶): مقایسه میانگین غلظت فلزات سنگین منطقه با میانگین جهانی شیل

خاک به عنوان جاذب اصلی فلزات موجود در هواویزها است و تعیین غلظت فلزات در خاک می‌تواند فراوانی آنها را به دلیل دگرگونی‌های طبیعی و فعالیت‌های انسانی مشخص کند (Frink, 1996). برای تعیین میزان آلاینده‌های خاک به فلزات سنگین در یک منطقه، باید غلظت عناصر در آن منطقه با یک استاندارد شناخته‌شده مقایسه شود که در مطالب قبل به آن اشاره شد. البته بهترین نوع مقایسه، مقایسه با استانداردهای موجود برای همان منطقه است؛ زیرا

ارزیابی زیست محیطی آلودگی فلزات سنگین

در خاک‌های منطقه

برای تعیین میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین باید میزان غلظت عناصر در منطقه مطالعه با استاندارد ملی یا جهانی شناخته‌شده، مقایسه شود. در کشور ما به دلیل وجود داشتن استاندارد خاصی برای درجه آلودگی خاک از استانداردهای موجود در کشورهای دیگر و یا استانداردهای جهانی استفاده می‌شود. مقایسه نتایج حاصل با استانداردهای موجود نشان‌دهنده تفاوت چشمگیر میزان غلظت عناصر سنگین منطقه مطالعه شده با میانگین جهانی شیل است. البته مقدار آلومینیوم موجود از این استاندارد کمتر است. از آنجا که مقدار آلومینیوم به طور طبیعی در پوسته زمین فراوان است، بنابراین بالاتر بودن میزان این عنصر در میانگین شیل نسبت به سایر عناصر، عادی است. مقدار نیکل با سازمان بهداشت جهانی (Abdolhossein et al., 2012) اختلاف زیادی ندارد، اما میانگین غلظت سرب و کادمیوم اختلاف معنی‌داری با استاندارد جهانی بهداشت دارند (جدول ۱ و شکل ۶).

شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی گوناگون در نقاط مختلف دنیا، غلظت‌های متفاوتی را ایجاد می‌کنند (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۲). یکی از آنها استاندارد جهانی شیل است (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۱). در مطالعات زیست محیطی به‌ویژه زمانی که توزیع زمین‌شناسی عناصر در محیط، حاصل ترکیبی از عوامل انسان‌زاد و طبیعی است، باید تغییرات با استفاده از شاخص‌های آلودگی ارزیابی شود. بنابراین در این تحقیق به منظور ارزیابی آلودگی و کیفیت زیست محیطی خاک منطقه، پارامترهای مختلف ژئوشیمیایی خاک از جمله فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی و ضریب بار آلودگی محاسبه شدند (Lu et al., 2009).

$$(1) EF = \left[\frac{(C_m/C_n)_{sample}}{(C_m/C_n)_{background}} \right]$$

در این رابطه، EF، ضریب غنی‌شدگی، در صورت کسر: C_m ، غلظت فلز در محیط بررسی‌شده (خاک)، C_n غلظت فلز مینا (AI) در محیط بررسی‌شده و در مخرج کسر: C_m ، غلظت همان فلز در یک محیط مینا (پوسته زمین) یا نمونه زمینه و C_n ، غلظت فلز مینا (AI) در محیط مینا است. معمولاً AI به عنوان فلز مینا شناخته می‌شود که تأثیر هم‌بیشی و ناسازگار با فلزات بررسی‌شده ندارد (Teng and Huang, 2002; Lu et al., 2003). میانگین AI به عنوان فلز مینا در پوسته زمین برابر با ۸۲۰۰۰ ppm (۸/۲ درصد) در نظر گرفته می‌شود (Bowen, 1979). عنصر نمونه زمینه از مقایسه خاک‌های منطقه با خاک‌های محلی که عوامل انسان‌زاد روی آن تأثیرگذار نبوده‌اند با روش‌های آماری در منطقه مطالعاتی به دست آمده است. مقادیر EF بین ۰/۵ تا ۱/۵ نشان‌دهنده منشأ مواد پوسته‌ای و فرایندهای طبیعی و مقادیر بالاتر از ۱/۵ نشان‌دهنده منشأ انسانی است (Zhang and Liu, 2002; Feng et al., 2004; Addo et al., 2012). اما بر اساس نظر هراندز و همکاران (۲۰۰۳)، مقادیر فاکتور غنی‌شدگی بین ۰/۵ تا ۲، زمین‌زاد و مقادیر بیش از ۲، تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد است (Hernandez et al., 2003). در هر صورت بر اساس فاکتور غنی‌شدگی پنج رده آلودگی مطابق جدول ۵ وجود دارد.

شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی گوناگون در نقاط مختلف دنیا، غلظت‌های متفاوتی را ایجاد می‌کنند (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۲). یکی از آنها استاندارد جهانی شیل است (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۱). در مطالعات زیست محیطی به‌ویژه زمانی که توزیع زمین‌شناسی عناصر در محیط، حاصل ترکیبی از عوامل انسان‌زاد و طبیعی است، باید تغییرات با استفاده از شاخص‌های آلودگی ارزیابی شود. بنابراین در این تحقیق به منظور ارزیابی آلودگی و کیفیت زیست محیطی خاک منطقه، پارامترهای مختلف ژئوشیمیایی خاک از جمله فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی و ضریب بار آلودگی محاسبه شدند (Lu et al., 2009).

شاخص‌های ارزیابی آلودگی خاک

فاکتور غنی‌شدگی (EF)^۱

یکی از روش‌های متداول برای تعیین منشأ آلاینده‌ها (Zhang et al., 2007) و ارزیابی اثرات عوامل انسان‌زاد بر خاک‌ها، محاسبه فاکتور غنی‌شدگی به‌هنجارشده برای غلظت‌های بالاتر از حد زمینه فلزات است (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۲). این فاکتور به دلیل فرمول جهانی خود، ابزار ساده‌ای برای ارزیابی درجه غنی‌شدگی و مقایسه آلودگی محیط‌های مختلف به شمار می‌رود. پژوهشگران مختلفی عناصر مرجع متفاوتی را مانند آلومینیوم، آهن، اسکاندیوم، کبالت و تیتانیوم برای تعیین مقدار فاکتور غنی‌شدگی، استفاده کرده‌اند که این عناصر، تأثیری در نمونه‌های آزمایش‌شده ندارند (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۱، Abrahim et al., ۱۳۹۲).

¹. Enrichment Factor

جدول (۵): طبقه‌بندی فاکتور غنی‌شدگی

| | |
|----------------------------|-----------------|
| شدت غنی‌شدگی | فاکتور غنی‌شدگی |
| تهی‌شدگی یا حداقل غنی‌شدگی | $EF < 2$ |
| غنی‌شدگی متوسط | $EF = 2-5$ |
| غنی‌شدگی شدید | $EF = 5-20$ |
| غنی‌شدگی خیلی شدید | $EF = 20-40$ |
| غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید | $EF > 40$ |

منبع: Loska et al., 2003

تحقیقات اکبری و همکاران (۱۳۹۱) و اگونیلج و همکاران (۲۰۱۳) مشابه تحقیق حاضر، گویای بالابودن میزان سرب در خاک اطراف کارخانه سیمان بهبهان است که عامل اصلی آن را این کارخانه و تردد وسایل نقلیه دانسته‌اند. ترتیب میانگین فاکتور غنی‌شدگی برای این عناصر بر اساس مقدار شیل میانگین به صورت $Cd > Pb > Ni$ است. اما عناصر کادمیوم، نیکل و سرب بر حسب میانگین زمینه در همه مسافت‌ها، حداقل غنی‌شدگی را دارند و دارای منشأ طبیعی هستند و آلوده محسوب نمی‌شوند. تحقیقات گراوند و همکاران (۱۳۹۱) و مسلم‌پور و شهدادی (۲۰۱۳) نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. تفاوت‌های مقادیر EF ممکن است ناشی از تفاوت در میزان ورود هر فلز به خاک و یا تفاوت در نرخ زدایش هر فلز از خاک باشد (Akoto et al., 2008).

شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo})^۱

به منظور تعیین شدت آلودگی، می‌توان از شاخص زمین‌انباشتگی که مولر (۱۹۶۹) آن را پیشنهاد داده است، استفاده کرد. این شاخص از رابطه ذیل محاسبه می‌شود.

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، I_{geo} شاخص تجمع ژئوشیمیایی (زمین‌انباشتگی)، C_n غلظت فلز در نمونه خاک، B_n غلظت فلز در نمونه زمینه یا شیل میانگین (Eby, 2004) است. در این رابطه نیز عنصر آلومینیوم به عنوان عنصر مرجع انتخاب شده است. ضریب ۱/۵، فاکتور تصحیح ماتریس زمینه ناشی از اثرات لیتولوژیکی است (Muller, 1979). اودواند و آیبمولا (۲۰۰۸) هفت کلاس برای شاخص زمین‌انباشتگی در نظر گرفته‌اند (جدول ۷).

مقادیر غنی‌شدگی فلزات مختلف بر اساس رابطه ۱ برای هر نمونه خاک در منطقه منظور محاسبه شد (جدول ۶).

جدول (۶): مقادیر فاکتور غنی‌شدگی برای فلزات

سنگین در مسافت‌های مختلف از کارخانه سیمان

| فاصله (متر) | Cd | | Pb | | Ni | |
|----------------|--------|------|------|------|------|------|
| | b | a | b | a | b | a |
| ۵۰۰ | ۸۶/۰۸ | ۰/۹۶ | ۳/۵۱ | ۰/۹۰ | ۱/۷۱ | ۱/۱۵ |
| ۱۰۰۰ | ۹۱/۲۸ | ۱/۰۷ | ۴/۷۲ | ۱/۳۰ | ۱/۷۹ | ۱/۲۴ |
| ۲۰۰۰ | ۸۳/۸۳ | ۰/۹۳ | ۴/۲۹ | ۱/۱۷ | ۱/۸۳ | ۱/۲۳ |
| ۳۰۰۰ | ۷۷/۳۶ | ۰/۸۶ | ۳/۵۴ | ۰/۹۱ | ۱/۵۲ | ۰/۹۹ |
| ۴۰۰۰ | ۱۰۷/۸۴ | ۱/۲۰ | ۴/۵۰ | ۱/۱۶ | ۱/۶۷ | ۱/۰۹ |
| ۵۰۰۰ | ۸۱/۰۵ | ۰/۹۱ | ۴/۶۳ | ۱/۱۹ | ۱/۶۴ | ۱/۰۷ |
| میانگین | ۸۹/۸۴ | ۱ | ۴/۲۸ | ۱/۱۲ | ۱/۶۷ | ۱/۱۱ |

a: میانگین زمینه منطقه

b: میانگین جهانی شیل

نتایج حاصل از محاسبه فاکتور غنی‌شدگی برای میانگین فلزات سنگین (بر اساس جدول ۶) نشان می‌دهد که بر اساس میانگین شیل جهانی در همه ایستگاه‌ها، عنصر نیکل با غنی‌شدگی حداقل و عنصر سرب با غنی‌شدگی متوسط است. کادمیوم تنها عنصری است که غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید ($EF > 40$) در کل مسافت‌ها دارد. بنابراین این عناصر، منشأ انسانی دارند و آلوده محسوب می‌شوند. نتایج

جدول (۷): مقادیر شاخص زمین انباشتگی در

آلودگی خاک

| شاخص زمین انباشتگی | درجه آلودگی |
|--------------------|----------------------------|
| <۰ | غیرآلوده |
| ۰-۱ | غیرآلوده تا کمی آلوده |
| ۱-۲ | کمی آلوده |
| ۲-۳ | کمی آلوده تا خیلی آلوده |
| ۳-۴ | خیلی آلوده |
| ۴-۵ | خیلی آلوده تا شدیداً آلوده |
| >۵ | شدیداً آلوده |

بار دیگر بر اساس طبقه‌بندی این شاخص در کل مسافت‌ها از کارخانه سیمان، تنها فلز شدیداً آلوده محسوب می‌شود. مطالعات رفیعی و همکاران (۱۳۹۰)، شایسته‌فر و رضایی (۱۳۹۲) و آدو و همکاران (۲۰۱۲) این نتایج را تأیید می‌کند.

ارزیابی ضریب بار آلودگی (PLI)^۱

برای بیان وضعیت آلودگی هر ایستگاه نمونه‌برداری به فلزات سنگین، از روش شاخص بار آلودگی به صورت ذیل استفاده می‌شود (Satyanarayana et al., 1994)

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

در این رابطه، n تعداد فلزات مطالعه‌شده (چهار فلز در این مطالعه) و CF فاکتور آلودگی برای میانگین غلظت فلزات بررسی‌شده به صورت رابطه ۴ است.

$$CF = \frac{C_{metal}}{C_{background}} \quad (۴)$$

در این رابطه، C_{metal} میانگین غلظت فلز در خاک آلوده و $C_{background}$ میانگین غلظت همان فلز در خاک مرجع (مقادیر زمینه و میانگین شیل) است. اگر PLI یک یا نزدیک به یک باشد، نشان می‌دهد که غلظت فلزات سنگین نزدیک به غلظت زمینه و اگر بیش از یک باشد مشخص می‌کند که خاک، آلوده است (شایسته‌فر و همکاران، ۱۳۹۲). فاکتور آلودگی و ضریب بار آلودگی برای میانگین غلظت فلزات نمونه‌های خاک منطقه در هر ایستگاه نسبت به مقدار زمینه و میانگین جهانی شیل محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۹ و شکل ۷ آمده است.

منبع: Odewande and Abimbola, 2008

با استفاده از رابطه ۲، سطح آلودگی نمونه‌های خاک مطالعه‌شده، محاسبه و نتایج حاصل در جدول ۸ ارائه شد.

جدول (۸): نتایج آلودگی خاک منطقه بر اساس شاخص زمین انباشتگی در فواصل مختلف از کارخانه سیمان

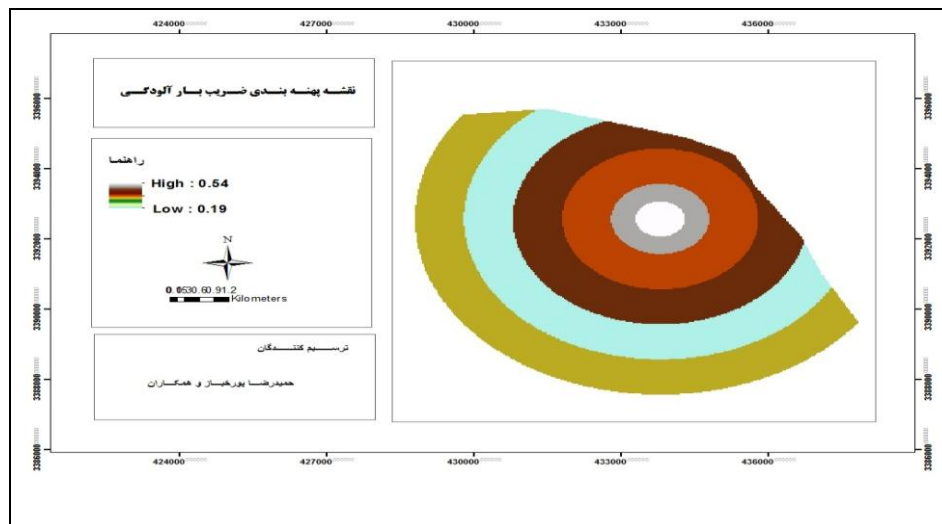
| Al | Cd | Pb | Ni | فاصله (متر) |
|-------|------|------|-------|-------------|
| -۰/۶۲ | ۵/۸۱ | ۱/۲۰ | ۰/۱۸ | ۵۰۰ |
| -۱/۱۸ | ۵/۴۰ | ۱/۱۳ | -۰/۳۲ | ۱۰۰۰ |
| -۰/۹۰ | ۵/۴۹ | ۱/۲۲ | ۰ | ۲۰۰۰ |
| -۰/۶۳ | ۵/۶۵ | ۱/۲۰ | -۰/۰۲ | ۳۰۰۰ |
| -۰/۹۵ | ۵/۸۱ | ۱/۲۲ | -۰/۲۱ | ۴۰۰۰ |
| -۱/ | ۵/۲۳ | ۱/۰۹ | -۰/۱۴ | ۵۰۰۰ |
| -۱/۱۸ | ۵/۲۳ | ۱/۰۹ | -۰/۳۲ | حداقل |
| -۰/۶۲ | ۵/۸۱ | ۱/۲۲ | ۰ | حداکثر |
| -۰/۹ | ۵/۵۶ | ۱/۱۸ | -۰/۰۸ | میانگین |

مقایسه جداول ۷ و ۸ نشان می‌دهد که منطقه مطالعه برای آلومینیوم و نیکل (به استثنای فاصله ۵۰۰ متر) در کل مسافت‌ها غیر آلوده است. سرب نیز در تمام فواصل، آلودگی کمی را نشان می‌دهد. کادمیوم

^۱. Pollution Load index

جدول (۹): مقادیر فاکتور آلودگی و ضریب بار آلودگی فلزات سنگین در مسافت‌های مختلف از کارخانه سیمان

| فاصله (متر) | Ni | | Pb | | Cd | | PLI | |
|-------------|------|------|------|------|------|-------|------|--------|
| | a | b | a | b | a | b | a | b |
| ۵۰۰ | ۱/۳۴ | ۱/۷۱ | ۱/۰۷ | ۳/۴۵ | ۱/۱۲ | ۸۴/۵ | ۰/۵۴ | ۱۶۶/۱۶ |
| ۱۰۰۰ | ۰/۹۸ | ۱/۲۵ | ۱/۰۲ | ۳/۲۹ | ۰/۸۵ | ۶۳/۶۰ | ۰/۲۸ | ۸۷/۲۶ |
| ۲۰۰۰ | ۱/۱۸ | ۱/۵۰ | ۱/۰۹ | ۳/۵۳ | ۰/۹۲ | ۶۹/۰۸ | ۰/۳۹ | ۱۲۱/۹۹ |
| ۳۰۰۰ | ۱/۱۶ | ۱/۴۸ | ۱/۰۷ | ۳/۴۵ | ۱ | ۷۵/۲۰ | ۰/۴۱ | ۱۲۸/۰۲ |
| ۴۰۰۰ | ۱/۰۲ | ۱/۳۰ | ۱/۰۸ | ۳/۵۰ | ۱/۱۱ | ۸۳/۹۲ | ۰/۴۱ | ۱۲۷/۲۷ |
| ۵۰۰۰ | ۰/۸۹ | ۱/۱۴ | ۰/۹۹ | ۳/۲۰ | ۰/۷۵ | ۵۶/۴۰ | ۰/۲۲ | ۶۷/۵۸ |
| میانگین | ۱/۰۴ | ۱/۳۳ | ۱/۰۴ | ۳/۳۷ | ۰/۹۴ | ۷۱/۰۳ | ۰/۳۵ | ۱۰۸/۰۷ |



a: میانگین منطقه

b: میانگین جهانی شیل

شکل (۷): پهنه‌بندی ضریب بار آلودگی (PLI) در خاک اطراف کارخانه سیمان بهبهان

شیل جهانی به شدت آلوده است.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که غلظت فلزات سنگین خاک‌های زیر سطحی می‌تواند به صورت ابزار ژئوشیمیایی قدرتمندی برای پایش اثرات فعالیت‌های انسانی به کار گرفته شود. در این پژوهش، میزان

نتایج شاخص ضریب آلودگی نشان می‌دهد که منطقه مطالعه شده بر اساس میانگین شیل جهانی، از نظر مقادیر سرب و کادمیوم، آلودگی بالا اما از نظر میزان نیکل درجه آلودگی متوسطی دارد. اما بر اساس میانگین منطقه، عناصر مذکور در طبقه آلودگی کم و متوسط قرار دارند. میزان ضریب بار آلودگی بر اساس میانگین منطقه نشانه آلودگی نداشتن منطقه و بر اساس

خطر جدی نیست و به نظر می‌رسد کارخانه سیمان همراه با فعالیت‌های کشاورزی و انتشارات ناشی از ترافیک وسایل نقلیه دلیل اصلی آلودگی برخی فلزات سنگین است؛ به طوری که بالاترین غلظت فلزات نیز در نزدیک کارخانه یافت شده است. برای تعیین میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین در یک منطقه، باید غلظت عناصر در آن منطقه با یک استاندارد شناخته شده مقایسه شود. البته بهترین نوع مقایسه، مقایسه با استانداردهای موجود برای همان منطقه است؛ زیرا شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی گوناگون در نقاط مختلف دنیا، غلظت‌های متفاوتی را ایجاد می‌کنند. بر این اساس، میزان بار آلودگی منطقه نشانه آلودگی نداشتن منطقه بود. در هر صورت، نتایج حاضر باید مقادیر مرجع در مطالعات و ارزیابی‌های آینده کارخانه باشند. توصیه می‌شود که کارخانجات سیمان به دور از نقاط مسکونی تأسیس شوند. قوانین زیست محیطی باید این کارخانجات را به استفاده از اقدامات احتیاطی و تکنولوژی‌های جدید برای حفاظت محیط زیست از آلاینده‌های خطرناک وادار کنند.

تشکر و قدردانی

این مقاله در قالب طرح پژوهشی با حمایت مالی معاونت آموزشی پژوهشی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیای بهبهان اجرا شده است.

منابع

اکبری، عاطفه، عظیم‌زاده، حمیدرضا، برهان دینانی، سهراب، (۱۳۹۱)، بررسی شاخص‌های آلودگی و زمین انباشت فلز سنگین سرب در خاک اطراف کارخانه سیمان بهبهان، اولین همایش ملی حفاظت و برنامه‌ریزی

غلظت فلزات سنگین کادمیوم، نیکل، سرب و آلومینیوم در خاک‌های اطراف محدوده کارخانه سیمان بهبهان با مطالعات آماری و شاخص‌های آلودگی خاک ارزیابی شد. پراکنش غلظت فلزات خاک در منطقه مطالعه شده مشخص کرد که کارخانه سیمان همراه با فعالیت‌های کشاورزی و انتشارات ترافیکی، دلیل اصلی آلودگی فلزات است، چنان که بالاترین غلظت‌های فلزات نزدیک به کارخانه سیمان یافت شدند. برای درک پیچیدگی پراکنش آلاینده‌ها، سه مدل ریاضی، فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین انباشتگی و شاخص بار آلودگی به کار گرفته شدند تا پویایی پراکنش را بر حسب غنی‌شدگی، آلودگی و وضعیت کلی آلودگی ایستگاه‌های نمونه‌برداری تشریح کنند. فاکتور EF محاسبه شده برای فلزات سنگین نشان داد که دامنه غنی‌شدگی از تهی‌شدگی تا بی‌نهایت شدید متغیر است؛ به طوری که عنصر نیکل حداقل و کادمیوم حداکثر غنی‌شدگی را بر اساس میانگین شیل جهانی به خود اختصاص دادند. بنابراین این عناصر، منشأ انسانی داشتند. البته بر اساس میانگین زمینه، حداقل غنی‌شدگی در همه مسافت‌ها دیده می‌شود و منشأ فلزات طبیعی است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص زمین انباشتگی نشان داد که اکثر نقاط نمونه‌برداری برای همه فلزات سنگین به استثنای سرب و کادمیوم غیر آلوده هستند. میانگین این شاخص در خاک مطالعه شده مشخص می‌کند که منطقه از نظر سرب، کمی آلوده اما از لحاظ کادمیوم شدیداً آلوده است. کادمیوم اساساً از طریق ذوب و تصفیه سنگ معدن، سوخت‌های فسیلی و سایر فرایندهای کارخانه سیمان با گرد و غبار وارد اتمسفر می‌شود. خوشبختانه، نتایج نشان می‌دهد که منطقه مطالعاتی در

- محیط زیست.
- بی‌همتا، محمدرضا، زارع چاهوکی، محمدعلی، (۱۳۹۰)، اصول آمار در علوم منابع طبیعی، جلد اول، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
۱. توانکار، فرزاد، شفقت، علی، (۱۳۸۷)، بررسی غلظت کروم در خاک و گیاهان اطراف کارخانه سیمان اردبیل، دومین همایش منطقه‌ای منابع طبیعی و محیط‌زیست.
- چهرگانی، حسین، (۱۳۸۲)، مهندسی محیط زیست در صنعت سیمان، قم، انتشارات نشر حاذق.
- دلچانی، فرهاد، کاظمی، غزل، پروین نیا، محمد و خاکشور، مهدی، (۱۳۸۸)، غنی‌شدگی و توزیع فلزات سنگین در خاک‌های منطقه ویژه اقتصادی پارس جنوبی (عسلویه)، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۳-۲۱ اردیبهشت، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ۸-۱.
- رفیعی، بهروز، آلیانی، فرهاد و فرشباغ، معصومه، (۱۳۹۰)، بررسی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف کارخانه سیمان و ذوب فلزات جنوب شرق تهران و ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۹، ۳۷-۳۰.
- شایسته‌فر، محمدرضا، رضایی، علی، (۱۳۹۲)، بررسی رفتارهای زیست محیطی و مطالعه توزیع عناصر سنگین در خاک‌های محدوده معدن مس سرچشمه کرمان، مجله مهندسی معدن، ۸ (۱۸)، ۲۱-۱۳.
- شفیعی، نجمه، شیرانی، حسین و اسفندیارپور بروجنی، عیسی، (۱۳۹۲)، غنی‌شدگی آرسنیک و سلنیم در خاک‌های اطراف معدن مس سرچشمه، مجله مدیریت خاک، ۲، ۱۱-۱.
- شهبازی، علی، (۱۳۹۰)، ارزیابی اثر فعالیت‌های کشاورزی بر تجمع فلزات سنگین در برخی از خاک‌های کشاورزی استان همدان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشگاه صنعتی اصفهان، گروه محیط زیست.
- شهبازی، علی، سفیانیان، علیرضا، میرغفاری نورالله و عین قلابی، محمدرضا، (۱۳۹۱)، بررسی آلودگی فلزات سنگین خاک با استفاده از شاخص‌های فاکتور آلودگی، زمین‌انباشتگی و شاخص جامع فاکتور آلودگی (مطالعه موردی: شهرستان نهاوند)، محیط زیست و توسعه، ۳ (۵)، ۳۸-۳۱.
- عظیم‌زاده، بهروز و خادمی، حسین، (۱۳۹۲)، تخمین غلظت زمینه برای ارزیابی آلودگی برخی فلزات سنگین در خاک‌های سطحی بخشی از استان مازندران، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۷ (۳)، ۵۵۹-۵۴۸.
- غازان شاهی، جواد، (۱۳۸۵)، آنالیز خاک و گیاه، انتشارات آبیژ، تهران، ۲۷۲ صفحه.
- گراوند، مجتبی، قاسمی، حبیب‌الله و حافظی مقدس، ناصر، (۱۳۹۱)، ارزیابی ژئوشیمیایی و زیست محیطی فلزات سنگین در خاک‌های حاصل از شیست‌های گرگان، مجله علوم زمین، ۸۶، ۴۶-۳۵.
- مر، فرید، کارگر، ساره و راست‌منش، فاطمه، (۱۳۹۱)، غلظت فلزات سنگین در خاک‌های آلوده‌شده در اثر فعالیت کارخانه ذوب روی در جزیره قشم، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۶، ۱۰-۱.
- مؤمنی، منصور، (۱۳۸۸)، تجزیه و تحلیل آماری با SPSS، تهران، انتشارات کتاب نو.
- میرزایی، روح‌الله، اسماعیلی ساری، عباس، قربانی، هادی، حافظی مقدس، ناصر، همای، محمودرضا و رضایی، حمیدرضا، (۱۳۹۲)، پیش‌بینی توزیع مکانی کادمیوم، آرسنیک، کروم و مس در خاک سطحی استان گلستان، مجله پژوهش‌های محیط زیست، ۴ (۷)، ۳۵-۴.
- Abraham, G. M. S., R. J. Parker. (2008). Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand, Estuar. Coast. Shelf Sci., 136 227-238
- Acosta, J. A., A. Fazand, and S. M. Mrtinez.

- pollution on microbial properties and enzyme activities in cultivated and no-till soils. *African Journal of Microbiology Research*, 4 (22): 2418-2425.
- Bowen, H. J. M. (1979). *Environmental Chemistry of the Elements*, Academic Press, New York, 1979. (In: Bradli, H. B., (2005), *Heavy Metals in the Environment*, Elsevier Ltd, Vol, 6.
- Carter, M. R. (ED). (1993). *Soil sampling and method of analysis*, Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers.
- Eby, G. N. (2004). *Principle of environmental Geochemistry*. Thompson Brooks/Cole publication, 514pp.
- Feng, H., X. Han, W. Zhang, and L. Yu. (2004). A preliminary study of heavy metal contamination in Yangtze River intertidal zone due to urbanization. *Marine Pollution Bulletin*, 49(1): 910-915.
- Frink, C. R. (1996). A perspective of metals in soil, *Soil contamination: J Soil Contam*, 32: 329-359.
- Güne, A., M. Alpaslan, and A. Inal. (2004). *Plant growth and fertilizer*; Ankara University, Agriculture Pub, Ankara, Turkey, No: 1539
- Hernandez, L., A. Probst, J.L. Probst, and E. Ulrich. (2003). Heavy metal distribution in some French forest soil: evidence for atmospheric contamination, *The Science of the Total Environ*, 312: 195-219.
- Kabata-Pendias, A., A. B. Mukherjee. (2007). *Trace Elements from Soil to Human*, Springer Berlin Heidelberg New York.
- Kabata-Pendias, A., H. Pendias. (2001). *Trace elements in soils and plants*. Third edition. CRC Press LLC. 408p.
- Kapusta, P., G. M. Szarek-Lukaszewska, and A. Stefanowicz. (2011). Direct and indirect effects of metal contamination on soil biota in a Zn-Pb post-mining and smelting area (S Poland). *Environmental pollution*, 159: 1516-1522.
- Kawai, K., A. Hayashi, H. Kikuchi, and S. Yokoyama. (2014). Desorption properties of heavy metals from cement hydrates in various chloride solutions, *Construction and Building Materials*, 67: 55-60.
- Kelepertsis, A. (2001). *The Environmental Geochemistry of Soils and Waters of Susaki Area, Korinthos, Greece*, (2009). Identification of heavy metal sources by multivariable analysis in a typical Mediterranean city (SESpain), *Environ Monit Assess*, DOI 10.1007/s10661-1194-0.
- Addo M. A., E. O. Darko, C. Gordon, B. J. B. Nyarko, J. K. Gbadago, E. Nyarko, H. A. Affum, and B. O. Botwe. (2012). Evaluation of Heavy Metals Contamination of Soil and Vegetation in the Vicinity of a Cement Factory in the Volta Region, Ghana, *International Journal of Science and Technology*, 2 (1): 40-50.
- Ahiamadjie, H., A. Tandoh, J.B. Gyampo, O. Nyarku, M. Mumuni, I. I. Agyemang, O. Ackah, M. Otoo, and S.B. Dampare. (2011). Determination of the elemental contents in soils around Diamond Cement Factory, Aflao. *Res. J. Environ. and Earth Sci.*, 3(1): 46-50.
- Akoto, O., J. H. Ephraim, and G. Darko. (2008). Heavy metal in surface soils in the vicinity of abundant railway servicing workshop in Kumasi, Ghana. *Int. J. Environmental research*, 2 (4): 359-364
- Al-Khashman, O. A. (2004). Heavy metal distribution in dust, street dust and soil from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. *Atmospheric Environmental*, 38.
- Al-Khashman, O. A., R. A. Shawabkeh. (2006). Metal distribution in soils around the cement factory in Southern Jordan. *Environmental Pollution*, 140, 387-394.
- Al-Oud, S. S., M. E. A. Nadeem, and B. H. Al-Shbel. (2011). Distribution of Heavy Metals in Soils and Plants around a Cement Factory in Riyadh City, Central of Saudi Arabia. *America-Eurasian J. Agric. And Environ. Sci*, 11 (2): 183-191.
- Bergman, W. (1992). *Nutritional Disorders of Plants, Development, Visual and Analytical Diagnosis*; Gustav Fisher Verlag Jena, Stuttgart, New York.
- Bhuiyana, M. A. H., L. Parvez, M.A. Islam, S. B. Dampare, and S. Suzukia. (2010). Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh, *Journal of Hazardous Materials*, 173: 384-392
- Bilen, S. (2010). Effect of cement dust

- Comparison of Total and Bioavailable Heavy Metals in Top Soils of Bonab District in Zanjan Province, *Open Journal of Soil Science*, 2, 123-132.
- Qishlaqi, A., F. Moore, and G. Forghani. (2009). Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis, *Journal of Hazardous Materials*, 172, pp: 374-384.
- Riahi Samani, M., H. Isazadeh. (2005). A review of methods and techniques to improve the performance of electrostatic deposition of the cement industry. *Iranian Chemical Engineering*, 4: 50-5.
- Satyanarayana, D., Panigrahy, P. K., and Sahu, S. D. (1994). Metal pollution in Harbor and coastal sediments of visakhpatnam, est of India, *Indian journal of marine science*, 23: 52-54.
- Sayadi, M. H., M. R. Rezaei. (2014). Impact of land use on the distribution of toxic metals in surface soils in Birjand city, Iran, *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 4(1): 18-29.
- Schuhmacher, M., A. Bocio, M. C. Agramunt, J. L. Domingo, and H. A. M. de Kok. (2002). PDCC/F and metal concentration in soil and herbage samples collected in the vicinity of a cement plant, *Chemosphere*, 48, 209-217.
- Shakeri, A., A. Afrasiabian, M. Rezaei, and M. Karimi. (2014). Assessment of trace elements contamination in surface sediments of the Bakhtegan lake, Iran, *Iranian Journal of Science & Technology*, IJST 38A1: 75-85.
- Teng, Y., Huang, and J. Lon. (2002). Studies on soil enzymatic activities in areas contaminated by tailings from Pb, Zn, and Ag mine. *China Environ Sci*, 22: 551-555.
- Wang, X.-S. (2013). Magnetic properties and heavy metal pollution of soils in the vicinity of a cement plant, Xuzhou (China). *Journal of Applied Geophysics*, 98: 73-78.
- Yalcin, M. G., R. Battaloglu, and S. Ilhan. (2007). Heavy metal sources in Sultan Marsh and its neighborhood, Kayseri, Turkey. *Environ Geol*, 53:399-415
- Zhang, X. Y., H. Feng, Y. Jing, T. Ouyang, X. Yu, R. Liang, C. Gao, and C. Weiqi. *Environmental Geochemistry and Health*, 23 (2): 117-135.
- Loska, K., D. Wiechula, B.E. BarskaCebula, and A. Chojnecka. (2003). Assessment of arsenic enrichment of cultivated soils in Southern Poland. *Pol. J. Environ. Stud.*, 122, 187-192.
- Lu, X., L. Wang, K. Lei, J. Huang, and Y. Zhai. (2009). Contamination assessment of copper, lead, zinc manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China: *J. Hazard. Mater*, 161: 1058-1062.
- Lu, Y., Z. Gong, and G. Zhang. (2003). The Chemical Speciation of Heavy Metals of Urban Soil in NanJing: *Envir. Chem*, 22: 132-138.
- Mandal, A., M. Voutchkov. (2011). Heavy Metals in Soils around the Cement Factory in Rockfort, Kingston, Jamaica. *International Journal of Geosciences*, 2: 48-54.
- Mico, C., L. Recatala, M. Peris, and J. Sanchez. (2006). Assessing heavy metal sources in agricultural soils of a European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere*, 65: 863-872.
- Moslempour, M. E., S. Shahdadi. (2013). Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils around of Khash Cement Plant, SE Iran, *Earth Sciences*, 5: 111-118.
- Muller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2:108-118.
- Muller, G. (1979). Schwermetalle in den sedimenten des Rheins Veränderungen seit 1971. *Umschau* 79(24): 778- 783.
- Odeh, A. A., A.F. Abimbola. (2008). Contamination indices and heavy metal concentrations in urban soil of Ibadan metropolis, southwestern Nigeria, *Environ. Geochem. Health* 30, 243-254.
- Ogunbileje, J. O., V. M. Sadagoparamanujam, J.I. Anetor, E.O. Farombi, O.M. Akinosun, and A.O. Okorodudu. (2013). Lead, mercury, cadmium, chromium, nickel, copper, zinc, calcium, iron, manganese and chromium (VI) levels in Nigeria and United States of America cement dust, *Chemosphere*, 90 (11): 2743-2749.
- Parizanganeh, A. H., V. Bijnavand, A. A. Zamani, and A. Hajabolfath. (2012). Concentration, Distribution and

(2007). Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China Luoping Marine Pollution Bulletin 54 974-982.

Zhang, J., C. L. Liu. (2002). Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-Weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes, Estar. Coast. Shelf, 54: 1951-1070.

