

ارزیابی شاخص‌های زمین انباشتگی و فاکتور آلودگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی در برآورد آلودگی خاک

ندا روان خواه^۱، روح اله میرزایی^{۲*}، سعید معصوم^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۷/۱۲

چکیده:

زمینه و هدف: آلودگی خاک چه ناشی از عوامل طبیعی و چه انسانی، کیفیت محیط زیست را کاهش می‌دهد. هدف این پژوهش ارزیابی استفاده از شاخص زمین انباشتگی، فاکتور آلودگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی در برآورد آلودگی خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل است. روش بررسی: ۱۳۵ نمونه خاک سطحی از شهرستان آران و بیدگل جمع‌آوری شد و غلظت عناصر کادمیوم، سرب، نیکل، مس و روی در نمونه‌ها تعیین شد. شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)، فاکتور آلودگی (CF) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای تعیین وضعیت و روند آلودگی خاک این منطقه و تکنیک وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) برای ارائه الگوی مکانی این شاخص‌ها استفاده شد. یافته‌ها: نتایج نشان داد که میانگین غلظت کل کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس در منطقه مورد مطالعه به ترتیب 0.72 mg/kg ، $11/41$ ، $29/87$ ، $48/59$ و $14/82$ است؛ که این غلظت‌ها بالاتر از غلظت‌های زمینه بود. میانگین شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور آلودگی در منطقه روند نزولی مس < کادمیوم < نیکل < روی ~ سرب را نشان داد. الگوی مکانی این شاخص‌ها نشان داد که بیشترین انباشت فلزات کادمیوم، سرب و روی در محدوده شهرک‌های صنعتی، کوره‌های آجرپزی و مناطق شهری اتفاق افتاده است و برای دو عنصر مس و نیکل انباشت بیشتر در مناطق شهری و زمین‌های کشاورزی رخ داده است. طبق تحلیل مؤلفه‌های اصلی دو مؤلفه شناسایی شد که در مؤلفه نخست فلزات مس، نیکل و روی و در مؤلفه دوم کادمیوم و سرب قرار گرفتند. نتیجه گیری: نتایج نشان داد که غلظت فلزات سرب و کادمیوم بیشتر تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی و غلظت نیکل، روی و مس بیشتر تحت کنترل عوامل طبیعی و انسانی هستند.

واژگان کلیدی: فلزات سنگین، شاخص‌های آلودگی خاک، وزن دهی معکوس فاصله، آران و بیدگل

rmirzaei@kashanu.ac.ir

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان
۲. نویسنده مسئول: استادیار گروه محیط زیست دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان
۳. استادیار گروه شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه کاشان

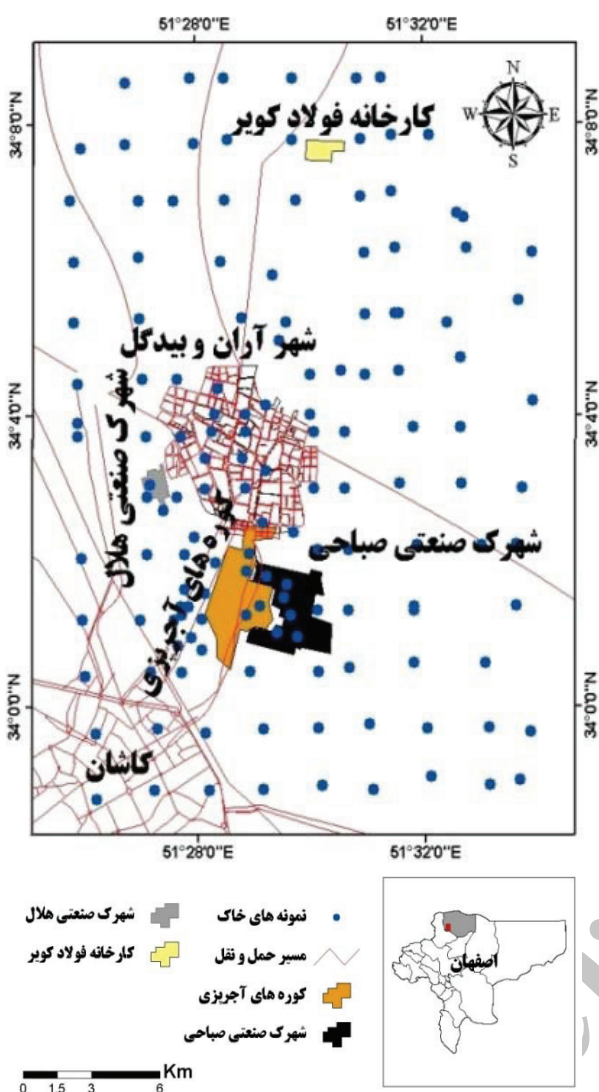
مقدمه

مسائل زیست‌محیطی مطرح در تهدید سلامت خاک شامل فرسایش، کاهش ماده آلی و تنوع‌زیستی، آلودگی، شوری خاک و رانش زمین است (۱). در دهه‌های اخیر با توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع، نگرانی قابل ملاحظه‌ای در مورد آلودگی خاک‌های شهری توسط فلزات سنگین وجود دارد (۲، ۳). نگرانی عمده در مورد فلزات سنگین به علت منابع گسترده انتشار آن‌ها، سمیت و پایداری آن‌ها است (۴). در ایران نیز، آلودگی یکی از تهدیدات خاک محسوب می‌شود. اگر چه میزان خطر آلودگی خاک کمتر از دیگر آلودگی‌ها نیست، اما از آنجایی که این آلودگی ملموس نیست کمتر به آن توجه شده است (۵). طیف وسیعی از روش‌های گوناگون برای مشخص کردن آلودگی خاک وجود دارد. در تمام این روش‌ها تلاش این است که بر اساس مقایسه مناطق، تحلیل‌های آماری و استفاده از غلظت مرجع میزان آلودگی مشخص شود. بر همین اساس، تاکنون این روش‌ها به شکل‌های مختلف طبقه‌بندی شده‌اند. این روش‌ها در یک طبقه‌بندی به دو دسته کیفی مانند تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل عاملی (CA) و کمی مانند فاکتور غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی تقسیم شده‌اند (۶، ۷)؛ که معمولاً روش‌های کمی، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طبقه‌بندی دیگر، روش‌های ارزیابی در دو گروه منفرد و ترکیبی قرار می‌گیرند. روش‌های ارزیابی منفرد مانند فاکتور غنی‌شدگی، فاکتور آلودگی، شاخص زمین‌انباشتگی و فاکتور ارزیابی خطر، آلودگی هر فلز را جداگانه بررسی می‌کنند؛ اما روش‌های ترکیبی از جمله شاخص آلودگی میانگین وزنی و شاخص Nemerow، اثر تجمعی آلودگی بیش از یک فلز را مورد بررسی قرار می‌دهند (۸). از آنجا که روش‌های کمی ارزیابی آلودگی خاک به مقادیر غلظت مرجع تکیه دارند یک مشکل عمده در ارتباط با روش صحیح ارزیابی آلودگی خاک، شناسایی مقادیر مناسب مرجع در شرایطی است که خاک آلوده نشده باشد (۹). مقادیر مرجع معمول مورد استفاده شامل غلظت زمینه، غلظت پوسته زمین و مقادیر

مرجع نظارتی هستند که مناسب‌ترین مرجع، غلظت زمینه منطقه مورد مطالعه است. غلظت زمینه خارج از منطقه برای ارزیابی مناطق با آلودگی ضعیف مناسب نیست، در حالیکه به طور خاص و دقیق، غلظت زمینه داخل منطقه روشی بهینه جهت ارزیابی آلودگی خاک است (۷، ۹). غلظت زمینه وابسته به مکان و مقیاس منطقه است و به طور معمول باید به مقیاس محلی، محدود شود. شواهد نشان داده است که غلظت زمینه در داخل و بین مناطق مختلف، متفاوت است (۶).

در کنار استفاده از روش‌های کمی ارزیابی آلودگی خاک، استفاده از روش‌هایی که به طور همزمان با در نظر گرفتن آلودگی، ماهیت پیوسته تغییرات آن را در خاک نشان دهد قادر به ارائه تصویر واقعی‌تری از گسترش و شدت آلودگی خواهد بود. این دیدگاه به معنی کاربرد تحلیل‌های چند متغیره و زمین‌آمار برای شناسایی خاک‌های آلوده و تعریف طبقات آلودگی است (۱۰-۱۲).

در سال‌های اخیر، توسعه صنعتی و کشاورزی در ایران رشد فزاینده‌ای داشته است از این رو محققین مختلف به دنبال رصد آلودگی در محیط بوده‌اند، در بسیاری از استان‌های کشور، تحقیقاتی که بتوانند وضعیت پراکنش آلودگی را به صورت نقشه‌های کاربردی ارائه کند، بسیار محدود انجام گرفته است. از مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات KhodaKarami و همکاران (۱۳)؛ Esmacili و همکاران (۱۴)؛ Karimi Nezhad و همکاران (۱۵) اشاره کرد. از این رو لازم است تا از مجموعه روش‌های مختلف کمی و کیفی ارزیابی آلودگی خاک به همراه روش‌های پهنه‌بندی به طور هم‌زمان استفاده شود تا درک بهتری از وسعت آلودگی به دست آید. با توجه به اهمیت غنی‌شدگی فلزات سنگین در خاک، این بررسی با هدف ارزیابی آلودگی فلزات کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس با استفاده از شاخص‌های زمین‌انباشتگی، فاکتور آلودگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و نقشه‌سازی آنها با استفاده از زمین‌آمار در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل انجام شده است.



شکل ۱- موقعیت شهرستان آران و بیدگل در استان اصفهان و نقاط نمونه برداری خاک در منطقه مورد مطالعه

تحلیل‌های آماری و زمین آماری

جهت تعیین شدت آلودگی خاک به فلزات سنگین از شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) و فاکتور آلودگی (CF) استفاده گردید. شاخص زمین‌انباشتگی توسط Muller در سال ۱۹۷۹ برای ارزیابی آلودگی خاک به وسیله مقایسه میزان فلزات سنگین در حال حاضر و پیش از صنعتی شدن معرفی شده است (۱۷). این شاخص به منظور مشخص کردن درجه آلودگی و میزان تأثیر عوامل انسانی از عوامل طبیعی در محیط خاک و رسوب

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

شهرستان آران و بیدگل در شمالی‌ترین ناحیه استان اصفهان و در همسایگی شهرستان‌های کاشان، قم، نطنز و اردستان واقع است. این شهرستان با مساحت 6051 km^2 در طول جغرافیایی $33^\circ 30' - 34^\circ$ و $50^\circ 15' - 52^\circ 29' \text{ E}$ و در حاشیه کویر مرکزی ایران قرار دارد. متوسط بارش سالیانه 100 mm و ارتفاع متوسط شهر از سطح دریا 912 m است.

نمونه برداری و آنالیز آزمایشگاهی

۱۳۵ نمونه خاک سطحی ($0-20 \text{ cm}$) از شهرستان آران و بیدگل در سلول‌های هم‌اندازه و از محل تقاطع شبکه‌ها جمع‌آوری شد (شکل ۱). پس از نقطه‌یابی توسط GPS، ۵ زیرنمونه از هر گروه شبکه از عمق $0-20 \text{ cm}$ جمع‌آوری شد به این صورت که یک نمونه از نقطه تقاطع جمع‌آوری شد و ۴ نمونه دیگر از ۴ قسمت به شعاع 50 m از نقطه مرکزی نمونه برداری برداشت شد. زیرنمونه‌ها با هم مخلوط شدند تا نمونه خاک مرکب به دست آید. نمونه‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلنی ذخیره و برای آنالیزهای بعدی به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌ها به منظور آماده‌سازی برای فرآیند هضم از الک پلی‌اتیلنی 2 mm عبور داده شدند. سپس قسمتی از هر نمونه خاک، آسیاب شده و با 100 g الک شد. 1 g از خاک الک شده با استفاده از ترکیب سه اسید HNO_3 ، HF ، HClO_4 به نسبت $3:2:5$ هضم شد (۱۶). غلظت کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس با استفاده از دستگاه جذب اتمی شعله (FAAS) مدل Shimadzu, AA-670 تعیین شد. خاک استاندارد SRM 2711 Montana II (41.70 mg/kg برای کادمیوم، 20.6 mg/kg برای نیکل، 1162 mg/kg برای سرب، 350.4 mg/kg برای روی و 114 mg/kg برای مس) به منظور کنترل کیفیت و بررسی صحت اندازه‌گیری استفاده شد. هنگام هضم به همراه هر گروه از نمونه‌ها یک نمونه شاهد تهیه و همراه با سایر نمونه‌ها مورد آنالیز قرار گرفت. ریکآوری قابل قبولی برای فلزات مورد بررسی به دست آمد ($98.5\% - 101.6\%$).

استفاده می‌شود (۱۸) و از طریق معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right] \quad (\text{معادله ۱})$$

که C_n ، غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در نمونه و B_n غلظت همان عنصر در نمونه زمینه است. در معادله ۱ برای تصحیح اثرات مواد مادری خاک، نوسانات طبیعی و تغییرات بسیار کم ایجاد شده در اثر فعالیت‌های انسانی از ضریب ۱/۵ استفاده می‌شود. بر اساس این شاخص، خاک‌ها در ۷ گروه مختلف به صورت زیر طبقه‌بندی شده است (۱۷):

$I_{geo} \leq 0$ (غیر آلوده)، $0 < I_{geo} < 1$ (غیر آلوده تا کمی آلوده)، $1 < I_{geo} < 2$ (کمی آلوده)، $2 < I_{geo} < 3$ (کمی آلوده تا بسیار آلوده)، $3 < I_{geo} < 4$ (بسیار آلوده)، $4 < I_{geo} < 5$ (بسیار آلوده تا به شدت آلوده) و $I_{geo} \geq 5$ (به شدت آلوده). بر اساس فاکتور آلودگی، می‌توان مقدار فلزات را نسبت به مقدار طبیعی آن‌ها سنجید و میزان آلاینده‌ی خاک را تعیین کرد (۱۹). رابطه فاکتور آلودگی مطابق معادله ۲ است:

$$CF = \frac{[C]_{\text{sample}}}{[C]_{\text{background}}} \quad (\text{معادله ۲})$$

در این رابطه CF فاکتور آلودگی، $[C]_{\text{sample}}$ غلظت عنصر مورد بررسی و $[C]_{\text{background}}$ غلظت عنصر مبنای در نمونه مرجع است. خاک‌ها از نظر آلودگی به فلزات سنگین بر اساس فاکتور آلودگی به ۴ گروه $CF < 1$ (آلودگی کم)، $1 < CF < 3$ (آلودگی متوسط)، $3 < CF < 6$ (آلودگی بالا) و $CF \geq 6$ (آلودگی بسیار بالا) تقسیم می‌شوند (۲۰-۲۲). در این پژوهش از میانگین ۱۲ نمونه خاک که به طور تصادفی از مناطقی که تحت هیچ گونه فعالیت کشاورزی و صنعتی قرار نداشتند به عنوان مقدار فلز در غلظت زمینه استفاده شد. غلظت زمینه کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس به ترتیب 0.15 ، 4.8 ، 8.55 ، 21.11 و 2.17 mg/kg به دست آمد. پارامترهای آمار توصیفی شامل میانگین، حداکثر، حداقل، چولگی و کشیدگی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین مورد مطالعه توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ به دست

آمد. به منظور شناسایی هر چه بهتر مناطق آلوده و یا مناطق در معرض آلودگی به فلزات سنگین، اقدام به تهیه نقشه‌های پراکنش شاخص شاخص زمین‌انباشتی، فاکتور آلودگی و امتیاز فاکتوری مؤلفه‌های اصلی شد. برای پیش‌بینی روند آلودگی خاک معمولاً از روش درون‌یابی کریجینگ معمولی استفاده می‌شود اما به منظور شناسایی مناطق آلوده در مقیاس محلی به خصوص لکه‌های داغ و سرد، روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) مناسب‌تر است (۲۳، ۲۴). بدین منظور برای هر یک از شاخص‌های محاسبه شده، از روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) در محیط نرم افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۱ استفاده شد.

یافته‌ها

توصیف آماری غلظت فلزات سنگین و شاخص‌های آلودگی خاک شهرستان آران و بیدگل در جدول ۱ آورده شده است. میانگین غلظت کل کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس در منطقه مورد مطالعه به ترتیب 0.72 ، 11.41 ، 29.87 ، 48.59 و 14.82 mg/kg است؛ و محدوده تغییرات غلظت عناصر به ترتیب 0.3 – 1.15 ، 1 – 48.52 ، 0.7 – 57.90 ، 21.50 – 75.75 و 1.45 – 35.22 mg/kg است. میانگین شاخص زمین‌انباشتی منطقه روند نزولی مس < کادمیوم < نیکل < روی < سرب را به ترتیب با مقادیر 2.55 ، 2.21 ، 1.66 ، 1.10 و 0.99 نشان داده است (جدول ۱). بر این اساس، تنها مقدار شاخص دو عنصر مس و کادمیوم از ۲ عبور کرده است و در طبقه کمی آلوده تا بسیار آلوده قرار گرفته‌اند. بر اساس شاخص زمین‌انباشتی 1.48% و 35.55% نمونه‌های خاک به ترتیب برای سرب و مس در طبقه بسیار آلوده و 0.74% نمونه‌ها برای مس در طبقه بسیار آلوده تا به شدت آلوده قرار گرفته‌اند (جدول ۲). آنچه که باعث شده است با میانگین شاخص زمین‌انباشت 0.99 برای سرب، برخی نمونه‌های خاک در طبقه بسیار آلوده قرار گیرند، ضریب تغییرات بالا برای ضریب شاخص زمین‌انباشت این عنصر (89.89%) است. برای سایر عناصر، تاحدی انباشت و آلودگی در منطقه مشاهده می‌شود (جدول ۲).

جدول ۱- آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین (mg/kg)، شاخص زمین انباشتگی و فاکتور آلودگی فلزات مورد بررسی

پارامتر	میانگین	حداقل	حداکثر	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	چولگی	کشیدهی
Cd	۰/۷۲	۰/۳	۱/۱۵	۲۵	۰/۱۸	-۰/۱۸	-۰/۳۶
Pb	۱۱/۴۱	۱	۴۸/۵۲	۶۲/۶۶	۷/۱۵	۲/۰۱	۶/۹۳
Ni	۲۹/۸۷	۵/۷	۵۷/۹۰	۴۰/۹۴	۱۲/۲۳	۰/۱۳	-۰/۹۹
Zn	۴۸/۵۹	۲۱/۵۰	۱۶۵/۷۵	۴۵/۱۱	۲۱/۹۲	۲/۷۹	۹/۷
Cu	۱۴/۸۲	۱/۴۵	۳۵/۲۲	۴۳/۹۹	۶/۵۲	-۰/۱۷	۰/۱۶
Igeo (Cd)	۲/۲۱	۱	۲/۹۳	۱۸/۰۹	۰/۴۰	-۰/۸۰	۰/۱۳
Igeo (Pb)	۰/۹۹	-۲/۲۶	۳/۳۳	۸۹/۸۹	۰/۸۹	-۰/۴۷	۱/۲۱
Igeo (Ni)	۱/۶۶	-۰/۵۸	۲/۷۵	۴۰/۳۶	۰/۶۷	-۰/۶۶	-۰/۰۵
Igeo (Zn)	۱/۱۰	-۰/۰۲	۲/۹۷	۴۵/۴۵	۰/۵۰	۱/۱۷	۲/۳۵
Igeo (Cu)	۲/۵۵	-۰/۵۸	۴/۰۱	۳۵/۶۸	۰/۹۱	-۱/۴۳	۱/۳۰
CF(Cd)	۴/۸۱	۲	۷/۶۶	۲۵/۱۵	۱/۲۱	-۰/۱۸	-۰/۳۶
CF(Pb)	۲/۳۷	۰/۲۰	۱۰/۱۰	۶۲/۸۶	۱/۴۹	۲/۰۱	۶/۹۳
CF(Ni)	۳/۴۹	۰/۶۶	۶/۷۷	۴۰/۹۷	۱/۴۳	۰/۱۳	-۰/۹۹
CF(Zn)	۲/۳۰	۱/۰۱	۷/۸۵	۴۴/۷۸	۱/۰۳	۲/۷۹	۹/۷۰
CF(Cu)	۶/۸۱	۰/۶۶	۱۶/۱۹	۴۳/۹۰	۲/۹۹	-۰/۱۴	۰/۱۶

جدول ۲- طبقات شاخص زمین انباشتگی (Igeo) فلزات سنگین در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل (بر حسب %)

طبقات	کادمیوم	سرب	نیکل	روی	مس
غیر آلوده	-	۱۱/۱۱	۱/۴۸	-	۰/۷۴
غیر آلوده تا کمی آلوده	-	۳۲/۶۰	۱۶/۲۹	۴۱/۴۸	۱۲/۶۰
کمی آلوده	۲۲/۹۶	۴۵/۹۳	۴۳/۷۰	۵۳/۳۴	۵/۹۲
کمی آلوده تا بسیار آلوده	۷۷/۰۴	۸/۸۸	۳۸/۵۳	۵/۱۸	۴۴/۴۵
بسیار آلوده	-	۱/۴۸	-	-	۳۵/۵۵
بسیار آلوده تا به شدت آلوده	-	-	-	-	۰/۷۴
به شدت آلوده	-	-	-	-	-

الگوی مشابهی از آلودگی عناصر براساس شاخص فاکتور آلودگی برای مس، کادمیوم، نیکل، سرب و روی به ترتیب ۰/۷۱/۸۵، ۱۴/۰۸، ۲/۲۲، ۲/۲۲ و ۲٪ از نمونه‌ها در طبقه آلودگی بسیار بالا هستند. همچنین ۱۳/۳۴٪، ۷۴/۸۱٪، ۲۲/۲۲٪، ۵۴/۰۷٪ و ۹٪ از داده‌ها به ترتیب برای فلزات مس، کادمیوم، سرب، نیکل و روی در طبقه آلودگی بالا قرار گرفت. در مورد فلز روی ۸۹٪ داده‌ها طبقه آلودگی متوسط را به خود اختصاص دادند (جدول ۳).

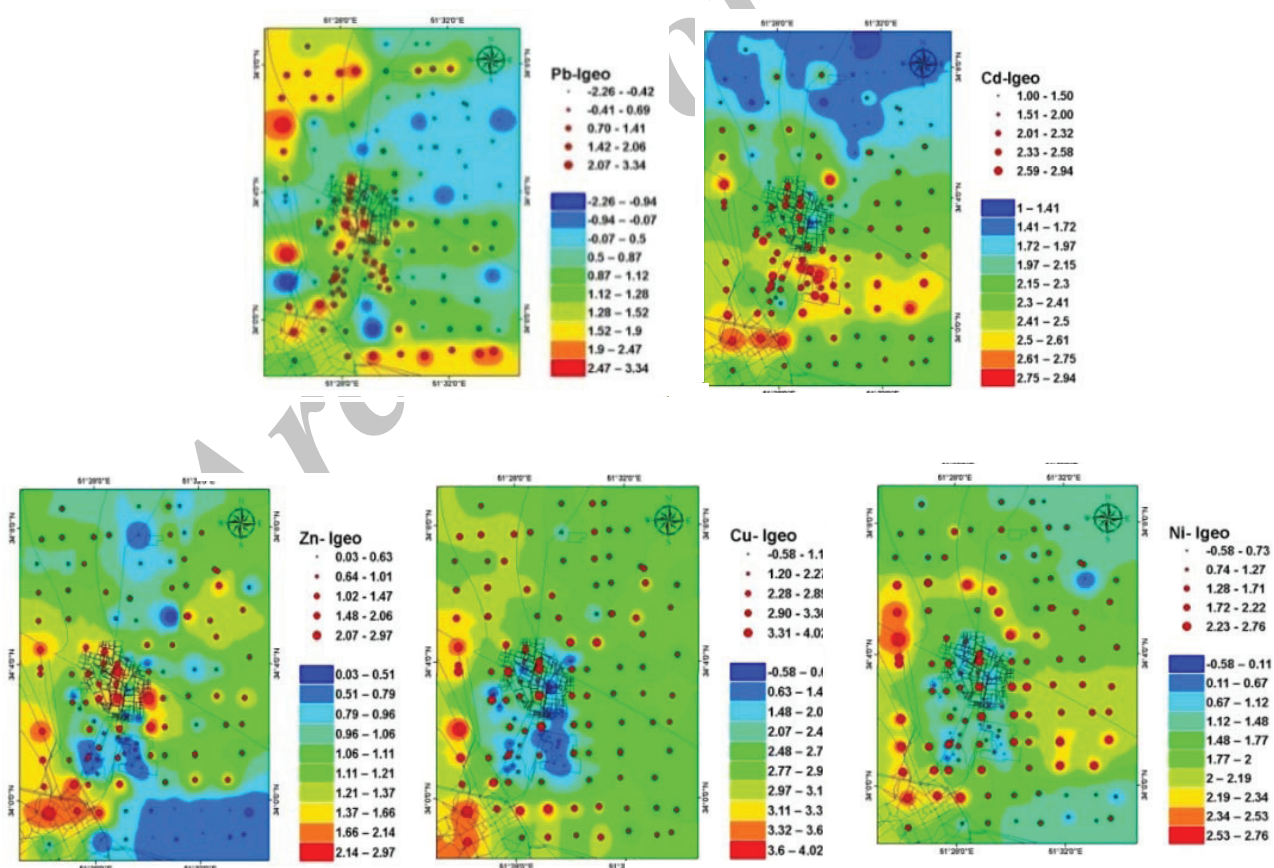
الگوی مشابهی از آلودگی عناصر براساس شاخص فاکتور آلودگی برای عناصر در منطقه به دست آمد (جدول ۱). بر اساس میانگین فاکتور آلودگی، بیشترین میزان غنی‌شدگی به فلز مس با میانگین ۶/۸۱ و کم‌ترین میزان غنی‌شدگی به فلز روی با میانگین ۲/۳۰ اختصاص پیدا کرده است. بیشترین ضریب تغییرات نیز برای عنصر سرب (۶۲/۸۶٪) به دست آمد که مؤید نتایج شاخص زمین‌انباشت است. بر اساس

جدول ۳- طبقات فاکتور آلودگی (CF) فلزات سنگین در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل (بر حسب %)

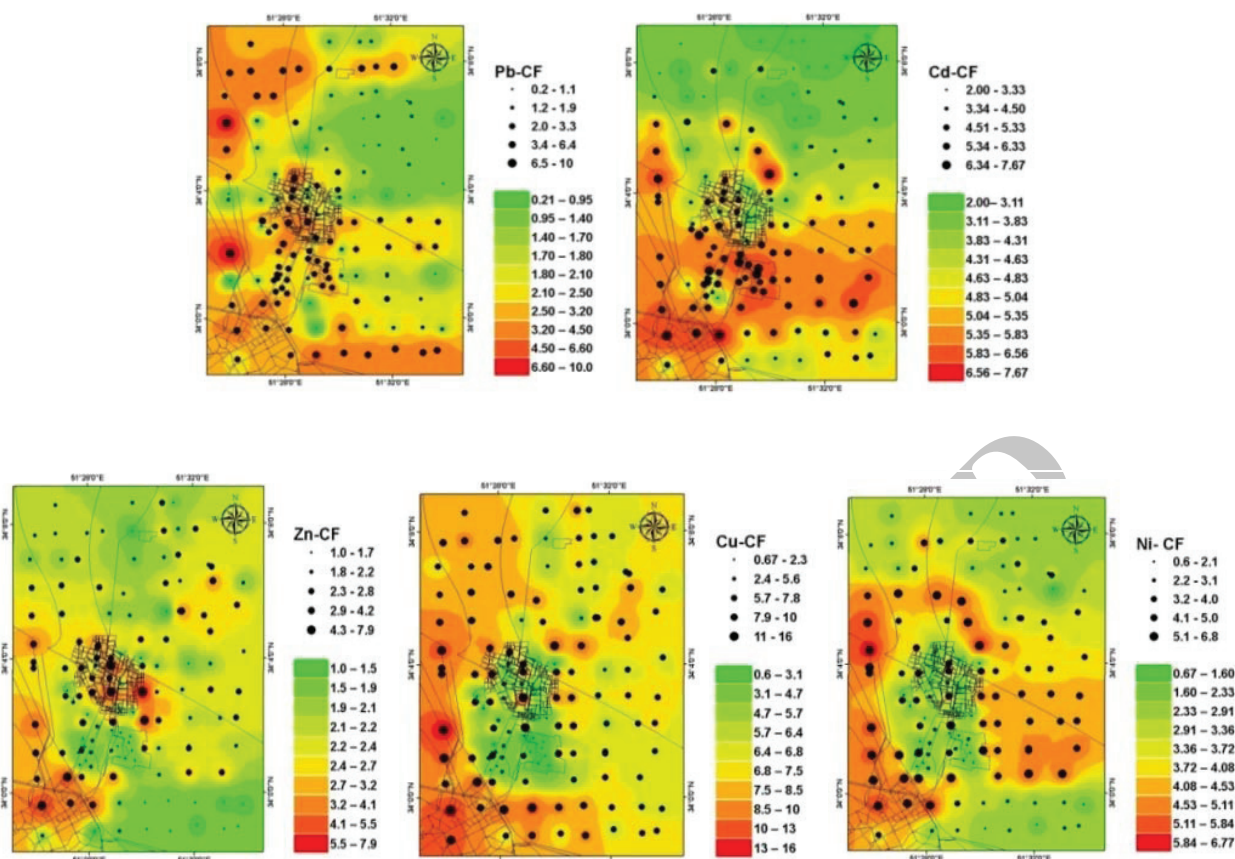
فلز	آلودگی کم	آلودگی متوسط	آلودگی زیاد	آلودگی بسیار زیاد
کادمیوم	-	۱۱/۱۱	۷۴/۸۱	۱۴/۰۸
سرب	۱۰/۳۷	۶۵/۱۹	۲۲/۲۲	۲/۲۲
نیکل	۱/۴۸	۴۲/۲۳	۵۴/۰۷	۲/۲۲
روی	-	۸۹	۹	۲
مس	۰/۷۴	۱۴/۰۷	۱۳/۳۴	۷۱/۸۵

طبق این شاخص، وسعت آلودگی بیشتر برآورد گردیده است (شکل ۳ و ۲).

الگوی مکانی پراکنش فاکتور آلودگی تا حد زیادی شبیه الگوی مکانی شاخص زمین‌انباشت است با این تفاوت که



شکل ۲- پراکنش مکانی شاخص زمین‌انباشتی کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل



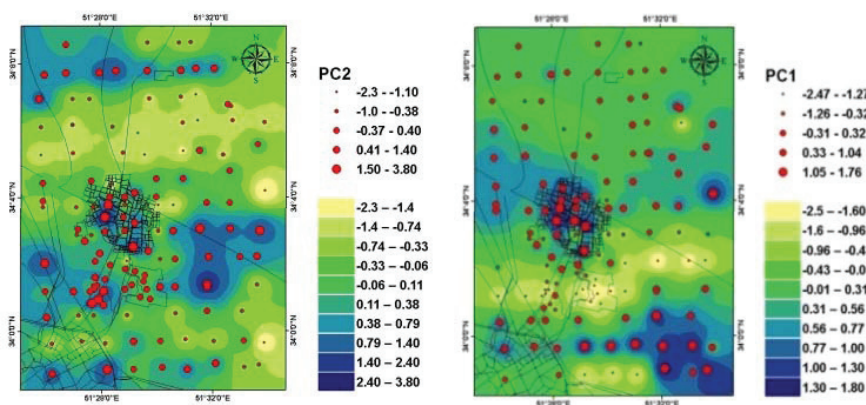
شکل ۳- پراکنش مکانی فاکتور آلودگی کادمیوم، سرب، نیکل، روی و مس در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل

انسانی غلظت عناصر در منطقه با توجه به الگوی مکانی دو مؤلفه اصلی در شکل ۴ بهتر قابل درک است.

جدول ۴- نتایج ماتریس دوران عوامل حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی در خاک سطحی منطقه مورد مطالعه

مؤلفه اول	مؤلفه دوم	فلز
۰/۲۰۸-	۰/۸۱۱	کادمیوم
۰/۰۵۴	-۰/۶۵۶	سرب
۰/۹۱۰	۰/۰۱۷	نیکل
۰/۸۵۸	-۰/۰۸۱	روی
۰/۸۷۰	۰/۲۹۶	مس

انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی به منظور منشأیابی غلظت عناصر در نمونه‌های خاک انجام شد (ضریب $KMO = 0.702$ به دست آمد). این تحلیل به کرات در مطالعات مختلف برای منشأیابی غلظت فلزات در خاک استفاده شده است و معمولاً قاعده این است که فلزاتی که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند به احتمال زیاد از لحاظ منابع کنترل کننده یکسان هستند (۲۵). بر اساس این تحلیل، دو مؤلفه اصلی شناسایی شد (جدول ۴)؛ مؤلفه نخست $47/36\%$ از واریانس کل و مؤلفه دوم $23/67\%$ از واریانس کل را تشکیل داده است. در مؤلفه نخست فلزات مس، نیکل و روی به ترتیب با بارهای عاملی $0/91$ و $0/85$ و در مؤلفه دوم کادمیوم و سرب به ترتیب با بار عاملی $0/81$ و $0/65$ قرار گرفتند. اثر منابع کنترل کننده طبیعی و



شکل ۴- توزیع مکانی دو مؤلفه اصلی حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی در خاک سطحی منطقه مورد مطالعه

برخی قسمت‌ها شباهت وجود دارد. بیشترین آلودگی برای کادمیوم در محدوده بخش شمالی شهرستان کاشان، محدوده شهرک صنعتی و کوره‌های آجرپزی اتفاق افتاده است. برای مس، محدوده‌های شهر آران و بیدگل، بخش شمالی کاشان، محدوده کارخانه فولاد کویر و مسیرهای مواصلاتی دارای بیشترین انباشت هستند. الگوی انباشت دو عنصر نیکل و مس تا حدودی شبیه است و بیشترین انباشت در محدوده بخش شمالی کاشان و زمین‌های کشاورزی مشاهده می‌شود. بیشترین انباشت روی هم در محدوده دو شهر آران و بیدگل و کاشان و مسیرهای ارتباطی اتفاق افتاده است (شکل ۱ و ۲). این نتایج در سایر مطالعات نیز مشاهده شده است (۲۹-۲۶). معمولاً افزایش غلظت سرب در خاک به منابع نقطه‌ای آلودگی و حمل و نقل وسایل نقلیه ارتباط داده می‌شود. این موضوع توسط مطالعاتی مانند Rahmani در ارتباط با افزایش غلظت سرب در اطراف جاده‌ها (۲۹) و مطالعه Lu و همکاران (۲۶) تایید شده است که مشاهده کردند که افزایش غلظت سرب در خاک‌های کنار جاده‌ای به وسیله انتشارات آگروز و فرسوده شدن اجزای اتومبیل ایجاد شده است (۲۷). افزایش غلظت مس هم در خاک تاکنون به فاکتورهای مختلف طبیعی و انسانی ارتباط داده شده است (۷، ۲۶). غلظت بیشتر مس نسبت به سرب در منطقه تا حدی به عوامل انسانی برمی‌گردد چون غلظت طبیعی مس در

بحث

محدوده تغییرات غلظت عناصر به همراه ضریب تغییرات تقریباً وسیع نشان‌دهنده عوامل انسانی اثرگذار بر غلظت فلزات در خاک سطحی منطقه است. بیشترین ضریب تغییرات برای سرب (۶۲/۶۶٪) به دست آمد که نشانگر اثر فعالیت‌های انسانی بر افزایش غلظت این عنصر در خاک منطقه است. این موضوع همچنین با قیاس غلظت‌های میانگین با غلظت‌های زمینه تأیید می‌شود چون غلظت میانگین تمام فلزات از غلظت زمینه آنها بیشتر است. اگر چه به راحتی نمی‌توان در مورد آلودگی خاک و نقش فعالیت‌های انسانی بر غلظت فلزات تنها با تکیه بر غلظت زمینه قضاوت کرد؛ اما برای این پژوهش از غلظت‌های زمینه محلی که بهترین غلظت‌ها برای برآورد آلودگی است استفاده شد (۷).

با توجه به میانگین شاخص زمین‌انباشتی و نیز درصد طبقات این شاخص (جدول ۲) می‌توان بیان داشت که بیشترین انباشت برای عنصر مس در نمونه‌های خاک منطقه اتفاق افتاده است. ضریب تغییرات بالا برای شاخص زمین‌انباشت سرب نشان‌دهنده اثر مختلف فعالیت‌های انسانی بر افزایش و تغییرات گسترده غلظت آن در منطقه است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، الگوهای گوناگونی برای شاخص زمین‌انباشت عناصر مختلف به دست آمده است اگر چه در

خاک منطقه مشخص است و اثر این عوامل به وضوح بهتری مشخص است به این صورت که الگوی مکانی مس و نیکل تقریباً شبیه و مجزا از سه عنصر دیگر است و اغلب آلودگی بالا در زمین‌های اطراف شهر مشاهده می‌شود که مؤید اثر فعالیت‌های کشاورزی و عوامل طبیعی در افزایش غلظت عناصر در منطقه مورد مطالعه دارد. عنصرهای سرب و کادمیوم هم تقریباً الگوی مشابه دارند و عنصر روی دارای الگوی مابینی است و این نشان‌دهنده این است که عوامل مختلفی بر غلظت آن در خاک اثر داشته‌اند. چنین الگوهایی در مطالعات دیگر نیز تاحدودی مشاهده شده است (۷)، که این موضوع نشان‌دهنده ماهیت متغیر غلظت عناصر در خاک مناطق مختلف است و تأکیدی بر این موضوع است که هرگز نمی‌توان براساس نتایج پژوهش‌های دیگر برای منطقه‌ای جدید، نتیجه‌گیری کرد و بررسی آلودگی در هر منطقه باید به طور مجزا انجام شود. نتایج تحلیل مؤلفه‌های تا حد زیادی منطبق با نتایج غلظت‌های زمینه، نتایج شاخص‌های زمین‌انباشت و فاکتور آلودگی است و به نظر می‌رسد غلظت‌های سرب و کادمیوم بیشتر توسط عوامل انسانی مشابهی کنترل می‌شود درحالی‌که غلظت سه عنصر دیگر هم توسط عوامل انسانی هم عوامل طبیعی در منطقه کنترل می‌شود. این نتیجه‌گیری با توجه به الگوی مکانی دو مؤلفه اصلی در شکل ۴ بهتر قابل درک است. همانطور که در شکل مشخص است بیشترین مقادیر مؤلفه اول در اطراف محدوده شهر آران و بیدگل و قسمت جنوبی منطقه (شمال شهر کاشان) قرار گرفته است و در محدوده‌های شهرک‌های صنعتی و کوره‌های آجرپزی مقدار آن بسیار پایین است که این نشان‌دهنده این است که فعالیت‌های صنعتی در منطقه نقش قابل توجهی در افزایش غلظت این عناصر نداشته است. بر عکس مؤلفه اول، بیشترین مقادیر مؤلفه دوم در محدوده‌های شهرهای کاشان و آران و بیدگل، محدوده شهرک‌های صنعتی، کوره‌های آجرپزی و کارخانه فولاد کویر قابل مشاهده است که نشان‌دهنده اثر بیشتر فعالیت‌های انسانی به ویژه حمل و نقل و فعالیت‌های صنعتی بر افزایش غلظت‌های سرب و کادمیوم در خاک منطقه مورد مطالعه است.

خاک از غلظت سرب بیشتر است و این موضوع در مطالعات زیادی مشاهده شده است (۷، ۱۴، ۲۰). در منطقه مورد مطالعه به نظر می‌رسد جدا از منشا طبیعی، مهم‌ترین فعالیت انسانی که بر افزایش غلظت مس اثر داشته باشد، فعالیت‌های کشاورزی است که این موضوع توسط مطالعات متعددی تاکنون گزارش شده است (۱۴، ۲۰، ۲۷). به عنوان نمونه KhodaKarami طی مطالعه‌ای در استان همدان پی برد که استفاده فاضلاب و مصرف غیر اصولی کود در زمین‌های کشاورزی باعث افزایش غلظت این عنصر در خاک شده است (۲۷). غلظت طبیعی کادمیوم هم در خاک از تمام عناصر مورد بررسی معمولاً کمتر است، و اغلب غلظت کادمیوم به سختی از 3mg/kg در خاک عبور می‌کند. تاکنون نیز عوامل مختلف انسانی ورود کادمیوم به خاک توسط مطالعات مختلف گزارش شده است. در این مطالعه، بیشترین غلظت آن در محدوده شهرک صنعتی و کوره‌های آجرپزی مشاهده شد که این موضوع توسط مطالعات دیگر نیز تأیید شده است (۱۵، ۱۶، ۱۹). همچنین برخی منابع به نقش زمین‌های کشاورزی بر افزایش غلظت کادمیوم در خاک اشاره کرده‌اند (۲۸). احتمال این موضوع در منطقه مورد بررسی وجود دارد؛ چون غلظت میانگین کادمیوم از غلظت زمینه بیشتر بود و نقشه شاخص زمین‌انباشت نقطه‌ای هم به خوبی نشان می‌دهد بعضی قسمت‌ها در شرق و شمال منطقه مورد مطالعه تاحدی دارای آلودگی به کادمیوم است (شکل ۲)؛ اما آنچه که واضح است این است که نقش فعالیت‌های صنعتی در افزایش غلظت کادمیوم، بیش از سایر عوامل احتمالی است. الگوی مکانی پراکنش فاکتور آلودگی تا حد زیادی شبیه الگوی مکانی شاخص زمین‌انباشت است با این تفاوت که طبق این شاخص، وسعت آلودگی بیشتر برآورد گردیده است (شکل ۳) که این موضوع می‌تواند به دلیل ضربی باشد که در محاسبه آلودگی خاک توسط شاخص زمین‌انباشت استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر شاخص زمین‌انباشت در برآورد آلودگی خاک محتاط‌تر عمل می‌کند (۷). طبق این شاخص هم اثر شهرک صنعتی، حمل و نقل شهری، کارخانه فولاد کویر، کوره‌های آجرپزی و زمین‌های کشاورزی بر آلودگی

نتیجه‌گیری

مجموعه روش‌های مختلف کمی و کیفی ارزیابی آلودگی خاک به همراه روش‌های پهنه‌بندی به طور هم‌زمان درک بهتری از وسعت آلودگی را فراهم می‌سازند. ارزیابی آلودگی، در این پژوهش بر پایه GIS دارای مزایایی نسبت به مطالعات پیشین است. با استفاده از این نقشه‌ها محققان خاک و مدیران قادرند در مقیاس منطقه‌ای به صورت بصری درجه نفوذ انسان در محیط‌زیست را مشاهده کنند. همچنین ارائه شاخص‌های آلودگی به صورت نقشه به همراه موقعیت منابع آلاینده احتمالی باعث می‌شود با قطعیت بیشتری در مورد آلودگی

و منابع آن در منطقه صحبت کرد و نکته آخر این که نقشه شاخص‌های آلودگی نیز می‌تواند مبنایی کاربردی برای سایر پژوهش‌های خاک قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این مطالعه بخشی از طرح پژوهشی به شماره ۲۰۲۵۵۲۲۰ صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INFS) است. بدین وسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1. Andrews S, Carroll C. Designing a soil quality assessment for sustainable agroecosystem management. *Ecological Applications*. 2002;11(6):1573-85.
2. Sun Y, Zhou Q, Xie X, Liu R. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;174(1):455-62.
3. Chen X, Xia X, Wu S, Wang F, Guo X. Mercury in urban soils with various types of land use in Beijing, China. *Environmental Pollution*. 2010;158(1):48-54.
4. Islam MS, Ahmed MK, Raknuzzaman M, Habibullah-AI-Mamun M, Islam MK. Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*. 2015;48:282-91.
5. Firouzbakht S, Gitipoor S, Valizadeh R, Jalaiean Ghorbanzadeh S. The importance of soil, sources of pollution and soil remediation methods. 2nd Conference on Environmental Planning and Management; 2011; Iran (in Persian).
6. Reimann C, Caritat PD. Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry. *Environmental Science & Technology*. 2000;34(24):5084-91.
7. Wu J, Teng Y, Lu S, Wang Y, Jiao X. Evaluation of soil contamination indices in a mining area of Jiangxi, China. *PLoS One*. 2014;9(11):e112917.
8. Qingjie G, Jun D, Yunchuan X, Qingfei W, Liqiang Y. Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*. 2008;19(3):230-41.
9. Desaulles A. Critical evaluation of soil contamination assessment methods for trace metals. *Science of the Total Environment*. 2012;426:120-31.
10. Man-Zhi T, Fang-Ming X, Jie C, Zhang X-L, Jing-Zhong C. Spatial prediction of heavy metal pollution for soils in peri-urban Beijing, China based on fuzzy set theory. *Pedosphere*. 2006;16(5):545-54.
11. Chabukdhara M, Nema AK. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: A chemometric and geochemical approach. *Chemosphere*. 2012;87(8):945-53.
12. Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution*. 2001;114(3):313-24.
13. Khodakarami L, Amiri F, Sefiyanian A, Shariff ARBM, Tabatabaie T, Pradhan B. Spatial patterns of heavy metals in soil under different geological structures and land uses for assessing metal enrichments. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013;185(12):9871-88.
14. Esmaeili A, Moore F, Keshavarzi B, Jaafarzadeh N, Kermani M. A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran. *Catena*. 2014;121:88-98.

15. Kariminezhad MT, Tabatabaïi SM, Gholami A. Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*. 2015;152:91-109.
16. Li X, Feng L. Multivariate and geostatistical analyzes of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China. *Atmospheric Environment*. 2012;47:58-65.
17. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*. 1969;2(3):108-18.
18. Anagnostou C, Kaberi H, Karageorgis A. Environmental impact on the surface sediments of the bay and the gulf of Thessaloniki (Greece) according to the geoaccumulation index classification. *International Conference on Water Pollution*; 1997; Slovenia.
19. Naimi S, Ayoubi S. Vertical and horizontal distribution of magnetic susceptibility and metal contents in an industrial district of central Iran. *Journal of Applied Geophysics*. 2013;96:55-66.
20. Luo W, Lu Y, Giesy JP, Wang T, Shi Y, Wang G, et al. Effects of land use on concentrations of metals in surface soils and ecological risk around Guanting Reservoir, China. *Environmental Geochemistry and Health*. 2007;29(6):459-71.
21. Rashed M. Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;178(1):739-46.
22. Islam MS, Ahmed MK, Habibullah-Al-Mamun M, Hoque MF. Preliminary assessment of heavy metal contamination in surface sediments from a river in Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*. 2014;73(4):1837-48.
23. Xie Y, Chen T-B, Lei M, Yang J, Guo Q-J, Song B, et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. *Chemosphere*. 2011;82(3):468-76.
24. Mohammadi J. *Pedometry*. Tehran: Pelk Press; 2006 (in Persian).
25. Křibek B, Majer V, Veselovský F, Nyambe I. Discrimination of lithogenic and anthropogenic sources of metals and sulphur in soils of the central-northern part of the Zambian Copperbelt Mining District: a topsoil vs. subsurface soil concept. *Journal of Geochemical Exploration*. 2010;104(3):69-86.
26. Sheng-Gao L, Shi-Qiang B, Li-Xia F. Magnetic properties as indicators of Cu and Zn contamination in soils. *Pedosphere*. 2008;18(4):479-85.
27. Khodakarami L. *Assessment of agricultural non-point pollution sources using RS and GIS [dissertation]*. Iran: University of Technology; 2008 (in Persian).
28. Wei B, Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*. 2010;94(2):99-107.
29. Rahmani H, Kalbasi M, Hajrasuliha S. Lead-polluted soil along some Iranian highways. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science*. 2001;4(4):31-42 (in Persian).

Evaluation of Geoaccumulation Index, Contamination Factor, and Principal Component Analysis for Estimating Soil Contamination

N. Ravankhah¹, R. Mirzaei^{1,2*}, S. Masoum³

¹ MSc graduated of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran

² Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Kashan, Kashan, Iran

Received: 7 July 2015; Accepted: 4 October 2015

ABSTRACT

Background and purpose: Soil contamination resulted from either natural or anthropogenic factors reduces environmental quality. The aim of this study was to evaluate the geoaccumulation, contamination factor, and principal component analysis indices to estimate topsoil contamination in Aran-Bidgol town.

Materials and methods: 135 topsoil samples were collected from Aran-Bidgol town and the metal concentrations of Cd, Pb, Ni, Cu, and Zn in each sample were determined. The index of geoaccumulation (Igeo), contamination factor (CF), and principal component analysis (PCA) techniques were applied to determine the status and trends of soil contamination in this region. The inverse distance weighting (IDW) was then used to map these soil contamination indices.

Results: The research found that the means concentrations of Cd, Pb, Ni, Zn, and Cu were 0.72, 11.41, 29.87, 48.59, and 14.82 mg/kg respectively; all exceeded the background values. Mean Igeo and CF of elements followed the order: Cu > Cd > Ni > Zn ≈ Pb. The Igeo and CF maps showed higher values of Cd, Pb, and Zn in areas near industrial estates, brick kilns, and urban areas whereas higher levels of Cu and Ni occurred in urban and agricultural areas. According to the PCA index, two principal components were identified that Cu, Ni and Zn were highly loaded in PC1 and Cd and Pb occurred in PC2.

Conclusion: Results indicated that the concentration of Pb and Cd are mostly affected by human activities, whereas Ni, Zn, and Cu contents are controlled by both anthropogenic and natural sources.

Keywords: Heavy metals, soil contamination indices, inverse distance weighting, Aran-Bidgol

*Corresponding Author: rmirzaei@kashanu.ac.ir

Mob: +989125461288