

## تهیه نقشه آلودگی کلی خاک به فلزات سنگین با استفاده از راهکار امتیازهای محدودیتی

\*یاسر صفری<sup>۱</sup>، محمدمیر دلور<sup>۲</sup>، عیسی اسفندیاریور بروجنی<sup>۳</sup>، محمدحسن صالحی<sup>۴</sup> و حمیدرضا اولیایی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>دانش آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان و استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه صنعتی شاهرود،

<sup>۲</sup>دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان، <sup>۳</sup>دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان،

<sup>۴</sup>استاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، <sup>۵</sup>دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه یاسوج

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۲۴

### چکیده

سابقه و هدف: همگام با رشد روزافزون صنعت و فناوری، ورود آلاینده‌های زیست‌محیطی و در صدر آن‌ها فلزات سنگین به خاک‌ها، موجب نگرانی‌های رو به رشد جامعه جهانی پیرامون خطرات احتمالی آلودگی منابع خاک شده است. نظر به تعدد منشأهای ورود فلزات سنگین آلاینده به خاک، این عناصر خطرناک اغلب همراه با هم در محیط خاک یافت می‌شوند و در نتیجه، ارزیابی صحیح خطر آلودگی‌های زیست‌محیطی، مستلزم توجه هم‌زمان به تمامی آلاینده‌های موجود است. در پژوهش حاضر به منظور ارائه تصویری از آلودگی کلی خاک در منطقه شهرک صنعتی تخصصی روی زنجان، از راهکار امتیازهای محدودیتی برای تلفیق نقشه‌های تک‌عنصری فلزات سنگین استفاده شد.

مواد و روش‌ها: برای انجام این پژوهش، ۸۵ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۲۰ سانتی‌متر) در قالب یک الگوی شبکه‌ای منظم برداشت و غلظت کل فلزات روی، سرب و کادمیم در آن‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی الگوی پراکنش مکانی عناصر مختلف، اقدام به درون‌یابی مقادیر این عناصر با استفاده از تخمین‌گر کریجینگ معمولی در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.1 شد. برای انعکاس خطر آلاینده‌های عناصر مورد بررسی، ابتدا مقادیر غلظت کل عناصر اندازه‌گیری شده، بر اساس حدود مجاز و خط‌ساز هر یک از عناصر به کمک یک معادله نمایی به امتیاز محدودیتی تبدیل شدند. سپس، مجموع امتیازهای محدودیتی عناصر در نقاط مشاهده‌ای محاسبه شد و با منظور داشتن آن به‌عنوان یک متغیر محیطی، مقادیر این شاخص در فضای نمونه‌برداری برآورد و در نهایت، پهنه‌بندی گردید.

یافته‌ها: بررسی الگوی پراکنش مکانی غلظت کل فلزات سنگین نشان داد که پهنه‌های خاکی دارای بیش‌ترین غلظت هر سه فلز سنگین روی، سرب و کادمیم در قسمت‌های شمال‌غربی منطقه، یعنی در اراضی مجاور شهرک تخصصی روی مشاهده می‌شوند و با افزایش فاصله از این نواحی، شدت آلودگی به‌تدریج کاهش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد که فعالیت‌های صنعتی انجام گرفته در شهرک تخصصی روی، عامل اصلی کنترل توزیع مکانی عناصر روی، سرب و کادمیم در خاک‌های منطقه هستند. با وجود بالاتر بودن مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی برای غلظت کل عنصر روی در مقایسه با عناصر سرب و کادمیم، بر اساس استانداردهای ملی کشور، مقادیر این عنصر در هیچ کجای منطقه مورد

\* مسئول مکاتبه: [yasersafari@znu.ac.ir](mailto:yasersafari@znu.ac.ir)

مطالعه از حد خطرناک این عنصر فراتر نبود؛ حال آنکه در بخش قابل ملاحظه‌ای از خاک‌های منطقه، غلظت عناصر سرب و کادمیم از حد مجاز و حتی در بخش‌های اطراف شهرک تخصصی روی، از حد خطرناک نیز بیش‌تر بود. بررسی الگوی تغییرات مکانی امتیازهای محدودیتی تجمعی فلزات سنگین نشان داد که پهنه‌های دارای بیش‌ترین مقادیر این شاخص در اراضی مجاور شهرک تخصصی روی مشاهده می‌شوند. در نتیجه می‌توان گفت که شهرک صنعتی روی نه تنها توزیع مکانی عناصر آلاینده در منطقه را کنترل می‌کند، بلکه عامل اصلی فراتر رفتن غلظت عناصر از حدود مجاز و گاهی خطرناک، در بخش‌های مشخصی از منطقه و تنزل کیفیت اراضی در این بخش‌ها است.

**نتیجه‌گیری:** به‌طور کلی، فعالیت‌های صنعتی مربوط به فرآوری فلز روی، موجب ورود هم‌زمان چندین فلز سنگین به خاک‌های اطراف و کاهش کیفیت اراضی منطقه شده است. وقوع مقادیر تخمینی غلظت فلزات آلاینده مختلف در دامنه‌های متفاوتی از مقادیر و عدم یکسانی حدود آستانه آلاینده‌گی این عناصر، موجب بروز مشکلاتی در درک خطر آلودگی خاک در منطقه از طریق نقشه‌های تک‌عنصری گردید. استفاده از راهکار امتیازدهی محدودیتی به دلیل استاندارد بودن امتیازهای منسوب به هر متغیر و قابلیت جمع‌پذیری، راهکاری سودمند برای انعکاس هم‌زمان اثرات چندین آلاینده بر کیفیت خاک است.

**واژه‌های کلیدی:** ارزیابی خطرات زیست‌محیطی، امتیاز محدودیتی، تغییرپذیری مکانی، شهرک تخصصی روی زنجان

#### مقدمه

خاک، پیش‌شرط شناسایی منشأهای احتمالی آن‌ها و طراحی برنامه‌های مدیریتی صحیح در راستای کنترل این آلاینده‌های خطرناک است (۳۳).

در عمل، آلودگی خاک به فلزات سنگین از طریق درون‌یابی مقادیر آن‌ها در یک محدوده مشخص و به کمک تعدادی نقطه مشاهده‌ای ارزیابی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در پایان برای هر فلز آلاینده، یک نقشه مجزا ارائه می‌شود (۱۳). اولین مشکل کاربرد این نقشه‌های تک‌عنصری، اعوجاج مرزهای پهنه‌های تفکیک‌شده نسبت به هر یک از نقاط واقع در فضای نمونه‌برداری و مشکلات تعلق دادن این نقاط به پهنه‌های مزبور است (۲۷). برای نمونه، چنانچه غلظت روی در خاک بالاتر از ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد، آن خاک آلوده محسوب شده و برای کشاورزی نامناسب قلمداد می‌شود (۱۴). این بدان معنی است که خاکی با غلظت ۱۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم عنصر روی، آلوده و خاکی با غلظت ۱۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم همین عنصر، غیرآلوده دسته‌بندی

حفاظت از امنیت و سلامت خاک، به‌عنوان مهم‌ترین منبع تولید محصولات کشاورزی و یکی از ارکان اساسی حفظ و استمرار بقای بشر، یک وظیفه عمومی برای تمامی افراد به‌شمار می‌رود (۱۴). همگام با رشد روزافزون صنعت و فناوری، ورود آلاینده‌های زیست‌محیطی و در صدر آن‌ها فلزات سنگین به خاک‌ها، موجب نگرانی‌های رو به رشد جامعه جهانی پیرامون خطرات احتمالی آلودگی خاک شده است (۸، ۲۳). برخلاف آلاینده‌های آلی، این آلاینده‌ها توسط ریزجانداران قابل تجزیه نبوده و اغلب برای مدت‌های طولانی بدون تغییر در محیط باقی می‌مانند (۹). نظر به ماهیت پیچیده خاک و وجود منابع مختلف مسئول در پراکنش فلزات سنگین در خاک، مقدار این آلاینده‌ها تغییرات شدیدی در سطح خاک داشته و الگوی توزیع آن‌ها عموماً دارای ناهمگونی‌های مکانی است (۱۸). این در حالی است که اطلاع از الگوی توزیع مکانی فلزات سنگین در

می‌شوند؛ حال آن‌که ممکن است این اختلاف جزئی مقادیر روی در این دو خاک از خطای آزمایشگاهی یا درون‌یابی ناشی شده باشد. از سوی دیگر، چنان‌چه غلظت روی در نقطه‌ای ۱۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در نقطه مجاور ۳۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد، هر دو مکان بدون توجه به شدت آلودگی در کلاس نامناسب (آلوده) قرار می‌گیرند؛ در حالی‌که شدت آلودگی خاک به روی در نقطه دوم، دو برابر نقطه اول است.

مشکل دوم بررسی نقشه‌های تک‌عنصری، آن است که عناصر مختلف در دامنه‌های متفاوتی از مقادیر در خاک مشاهده می‌شوند که این مسأله، امکان تصور کیفیت کلی خاک را با مشکل مواجه می‌سازد. برای مثال، حد مجاز برای عناصر روی و کادمیم در خاک به ترتیب، ۱۵۰ و ۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (۲۷). حال چنان‌چه غلظت این دو عنصر در نقطه‌ای به ترتیب، ۱۳۰ و ۱/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد، آن مکان برای عنصر روی در کلاس غیرآلوده و مناسب و برای عنصر کادمیم در کلاس آلوده و نامناسب قرار می‌گیرد؛ اما واقعاً شدت آلودگی در این نقطه چقدر است؟ چنان‌چه مقادیر غلظت ۱۰ عنصر آلاینده در یک نقطه را داشته باشیم، چگونه می‌توان نمای کلی آلودگی خاک را تصور نمود؟ در عمل نیز فلزات آلاینده اغلب همراه با هم در محیط خاک یافت می‌شوند و از این‌رو، ارزیابی صحیح خطر آلودگی‌های زیست‌محیطی، مستلزم توجه هم‌زمان به تمامی آلاینده‌های موجود است (۳).

برای غلبه بر این مشکل، رومیک و رومیک (۲۰۰۳) قبل از عملیات درون‌یابی از راهکار تجزیه به عامل‌ها<sup>۱</sup> استفاده نموده و با محاسبه امتیاز عامل اول در نقاط نمونه‌برداری، از مقادیر آن به‌جای مقادیر اولیه فلزات سنگین در عملیات تخمین استفاده کردند (۲۶). هانش و همکاران (۲۰۰۱) از الگوریتم‌های طبقه‌بندی

## 1- Factor Analysis

فازی برای تفکیک عوامل ایجاد آلودگی استفاده کردند (۱۱). امینی و همکاران (۲۰۰۵) از میانگین‌های فازی نظارت‌نشده برای تخصیص مقادیر فلزات سنگین به عوامل مختلف استفاده کرده و نتیجه نهایی را در قالب نقشه‌های عضویت هر شاخه که منعکس‌کننده ترکیبی از فلزاتی هستند که بیش‌ترین هم‌بستگی را دارند، ارائه دادند (۱). تمامی این راهکارها از نظر آماری صحیح هستند اما تفسیر این مفاهیم و نتایج به‌دست آمده از آن‌ها مشکل است (۲۷). در عمل، مدیران و تصمیم‌گیرندگان اراضی می‌خواهند بدون نیاز به دانش و تجربه راجع به آمار، زمین‌آمار و منطق فازی از وضعیت آلودگی خاک‌های نقاط مختلف مزرعه خویش آگاه شوند. در همین راستا، راهکار امتیازهای محدودیتی<sup>۲</sup> برای انتساب درجات متفاوتی از محدودیت به عواملی که موجب کاهش کیفیت اراضی و به خطر انداختن امنیت خاک می‌شوند، توسعه‌یافته است (۱۵).

استاندارد بودن و قابل‌جمع بودن امتیازهای منسوب به متغیرهای غیرهم‌جنس و یا متغیرهای با مقیاس‌های متفاوت در راهکار امتیازهای محدودیتی سبب شده است تا این راهکار برای تجمیع اثرات متغیرهای مختلف در مطالعات ارزیابی تناسب اراضی و محیط زیست مورد استفاده پژوهشگران قرار گیرد (۲۷، ۳۱).

## 2- Limitation Scores

برای انجام این پژوهش، ابتدا با مطالعه نقشه‌های توپوگرافی منطقه (مقیاس ۱:۲۵۰۰۰)، موقعیت جغرافیایی تعداد ۸۵ نقطه نمونه‌برداری در قالب یک الگوی نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم به فاصله ۱۰۰۰ متر تعیین گردید (شکل ۱). پس از یافتن موقعیت جغرافیایی نقاط به کمک سیستم مکان‌یاب جهانی<sup>۴</sup>، به منظور تهیه نمونه‌های مرکب، دایره‌ای فرضی به مرکزیت هر نقطه مشاهده‌ای و قطر دو متر در نظر گرفته شد و از لایه سطحی (عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر) پنج نقطه واقع در روی محیط این دایره، نمونه‌برداری انجام گردید. نمونه‌های برداشت‌شده از نقاط پنج‌گانه با هم ترکیب‌شده و در نهایت حدود یک کیلوگرم خاک از هر نقطه مشاهده‌ای برداشت و در ظروف پلاستیکی به آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشگاه زنجان منتقل گردید. پس از هواخشک‌کردن نمونه‌های برداشت‌شده و جداسازی ذرات درشت آن‌ها توسط الک، عصاره‌گیری نمونه‌ها با استفاده از اسید نیتریک پنج نرمال انجام شد و در نهایت غلظت کل عناصر روی، سرب و کادمیم آن‌ها به کمک دستگاه جذب اتمی مدل Varian A-A 20 تعیین شد (۳۰). همچنین، به منظور کسب اطلاع از ویژگی‌های عمومی خاک‌های مورد مطالعه، ویژگی‌های درصد مواد آلی خاک به روش والکلی-بلاک (۲۲)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۱۷)، بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۰)، واکنش خاک با استفاده از دستگاه pH متر مدل Metrohm 691 و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج مدل JENWAY 4310 اندازه‌گیری گردید.

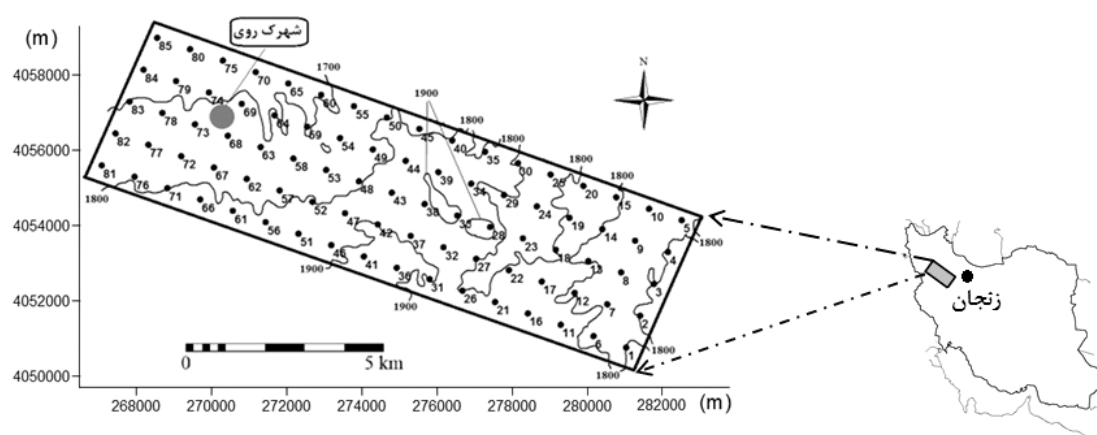
خاک‌های مجاور شهرک، موضوعی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. از این رو، پژوهش حاضر می‌کوشد تا برای اولین بار در کشور با استفاده از راهکار امتیازهای محدودیتی تجمعی، نقشه‌های تک‌عنصری فلزات سنگین این شهرک را با یکدیگر تلفیق کند و تصویری از آلودگی کلی خاک<sup>۱</sup> در این منطقه ارائه دهد.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** شهرک صنعتی تخصصی روی زنجان با مساحت تقریبی ۷۰۰۰ هکتار در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی قرار گرفته است. در محدوده شهرک تخصصی روی بیش از ۲/۵ میلیون تن پسماند حاوی فلزات سنگین انباشته‌شده و تداوم فعالیت‌های صنعتی در آن، احتمال تجمع بیش‌تر فلزات سنگین، از جمله روی، سرب و کادمیم را در این منطقه فراهم نموده است (۲۴). کاربری عمده اراضی موجود در این ناحیه، شامل مناطق کشاورزی، تأسیسات صنعتی، اراضی مرتعی و اراضی مخلوط مرتع و کشت دیم است. بر اساس اطلاعات نقشه زمین‌شناسی زنجان (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰)، ترانس‌های آبرفتی قدیمی واحد زمین‌شناسی اصلی منطقه بوده و خاک‌های مورد مطالعه به‌طور عمده بر روی نهشته‌های آبرفتی کوتاه‌تری تکامل یافته‌اند. بر اساس تعاریف موجود در کلید رده‌بندی خاک آمریکایی (۲۰۱۴)، عمده خاک‌های موجود در منطقه در دو رده انتی‌سول<sup>۲</sup> و اینسپتی‌سول<sup>۳</sup> طبقه‌بندی می‌شوند (۲۹).

- 1- Overall Soil Pollution; OSP
- 2- Entisol
- 3- Inceptisol

4- Global Positioning System; GPS



شکل ۱- حدود تقریبی منطقه مورد مطالعه همراه با نقشه خطوط تراز و الگوی توزیع ۸۵ نقطه نمونه برداری.

Figure 1. Approximate location of study area along with contour lines and 85 sampling points.

اقدام به درون‌یابی مقادیر این عناصر با استفاده از تخمین‌گر کریجینگ معمولی (۳۲) در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.1 شد. مقادیر غلظت کل اندازه‌گیری شده برای هر عنصر بر اساس حد مجاز (استاندارد آلودگی) و حد خطرساز (استاندارد پاک‌سازی) عناصر در خاک‌های کشور (۵)، طبق رابطه ۱ به امتیاز محدودیتی تبدیل شدند (۲۷):

$$LS = \{b_0 \times HMC^{b_1} - 1 \quad \text{if } HMC > x_1 \text{ and } 0 \text{ if } HMC < x_1\} \quad (1)$$

مجاز فلزات سنگین هستند. ضرایب  $b_1$  و  $b_0$  را می‌توان با حل مدل رگرسیونی رابطه ۲ به دست آورد:

$$\ln(LS + 1) = \ln b_0 + b_1 \times \ln(HMC) \quad (2)$$

هستند. همچنین، بر اساس استانداردهای ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست کشور، بیشینه حدود مجاز و خطرساز برای عنصر روی به ترتیب، ۵۰۰ و ۷۵۰۰ و برای عنصر کادمیم به ترتیب، ۵ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم هستند (۵). پس از حل معادله و تعیین ضرایب آن برای هر یک از عناصر سنگین مورد بررسی، با قرار دادن مقادیر مختلف غلظت هر یک از

تجزیه و تحلیل داده‌ها: برای اطلاع از الگوی توزیع داده‌های غلظت کل فلزات سنگین مورد بررسی، مهم‌ترین ویژگی‌های آماری آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۱۸) محاسبه شد. برای کسب آگاهی از انطباق توزیع داده‌ها با شرایط توزیع نرمال، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده گردید. همچنین، به منظور بررسی الگوی پراکنش مکانی عناصر مختلف،

که در آن،  $LS$  امتیاز محدودیتی،  $b_1$  و  $b_0$  ضرایب معادله،  $HMC$  غلظت فلزات سنگین و  $x_1$  غلظت

در اینجا از سه نقطه معلوم برای یافتن مقادیر دو مجهول معادله استفاده گردید. به عنوان نمونه، برای عنصر سرب، از  $LS+1=0$  برای غلظت صفر،  $LS+1=1$  برای غلظت ۷۵ و  $LS+1=5$  برای غلظت ۸۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم استفاده شد (۲۷). غلظت‌های ۷۵ و ۸۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب، بیشینه حدود مجاز و خطرساز برای عنصر سرب

### نتایج و بحث

توصیف آماری داده‌ها اولین قدم در راستای سامان‌دهی داده‌ها و اطلاع از وضعیت توزیع آن‌ها است. جدول ۱ مهم‌ترین ویژگی‌های آماری داده‌های اولیه عناصر سنگین و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

عناصر در رابطه ۱ امتیازهای محدودیتی مربوطه محاسبه شدند. پس از محاسبه امتیازهای محدودیتی برای تمامی عناصر مورد مطالعه، مجموع آن‌ها در هر نقطه نمونه برداری محاسبه شد. سپس، با استفاده از تخمین‌گر کریجینگ معمولی (۳۲)، مقادیر مجموع امتیازهای محدودیتی در فضای نمونه برداری، برآورد و در نهایت پهنه‌بندی گردید.

جدول ۱- خلاصه آماری غلظت کل فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه (۸۵ نمونه).

**Table 1. Summary statistics of the total concentration of studied HMs ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) in soil and some of the physical and chemical properties of studied soils (85 samples).**

P-value	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	انحراف معیار Standard deviation	میانه Median	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	میانگین Mean	متغیر Variable
0.152	24.6	0.16	0.62	1.27	0.42	0.65	مواد آلی (درصد) (Organic matter %)
0.450	1.5	0.12	7.72	7.93	7.35	7.71	واکنش خاک (pH)
0.085	37.0	0.24	0.57	1.78	0.27	0.64	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) (EC dS/m)
0.285	25.5	7.2	28.5	48.0	10.0	28.2	رس (درصد) (Clay %)
0.115	25.0	10.5	42.0	74.0	16.0	41.9	شن (درصد) (Sand %)
0.061	52.2	9.7	19.1	36.5	4.5	18.6	کربنات کلسیم معادل (درصد) (Calcium carbonate equivalent %)
0.001*	148.3	301.40	112.2	1680.7	8.5	203.2	روی (Zn)
0.000*	185.6	278.10	44.4	1519.1	5.1	149.8	سرب (Pb)
0.008*	140.5	6.00	2.4	42.3	1.0	4.3	کادمیم (Cd)

<sup>۱</sup> اعداد، بیانگر نتیجه آزمون کولموگروف-اسمیرنوف هستند و علامت \* بیانگر معنی دار بودن آن‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

<sup>۱</sup> Significant at  $P < 0.05$  by Kolmogrov-Smirnov test.

نسبتاً بالای کربنات کلسیم معادل در خاک موجب وقوع شرایط قلیایی خفیف تا متوسط در خاک‌های مورد مطالعه شده است که این شرایط، از ویژگی‌های

نتایج موجود در جدول ۱ گویای آن است که خاک‌های منطقه مورد مطالعه حاوی مقادیر بسیار پایینی از مواد آلی هستند. از سوی دیگر، وجود مقادیر

منطقه پایین‌تر از حدود مجاز (استاندارد آلودگی) هستند؛ حال آن‌که میانگین مقادیر عنصر سرب، تقریباً دو برابر حد مجاز ارائه‌شده برای این عنصر است (جدول ۱). همچنین، وجود مقادیر بسیار بزرگ‌تر از مقدار میانگین عناصر سرب، روی و کادمیم در خاک، ضمن بالا بردن ضریب تغییرات آن‌ها باعث عدم تبعیت آن‌ها از الگوی توزیع نرمال با توجه به نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف شده است (جدول ۱). مقادیر ضریب همبستگی فلزات مورد مطالعه با یکدیگر در جدول ۲ ارائه شده است.

عمومی خاک‌های واقع در اقلیم‌های نیمه‌خشک تا نیمه‌مرطوب کشور، محسوب می‌شوند (۱۶). در مجموع، خاک‌های منطقه، حاوی مقادیر نسبتاً بالایی از رس هستند که باعث می‌شود بافت این خاک‌ها در کلاس‌های بافتی نسبتاً ریزبافت تا ریزبافت جای گیرد (جدول ۱).

مقایسه مقادیر میانگین غلظت کل فلزات سنگین مورد بررسی در این مطالعه با حدود مجاز فلزات سنگین در خاک‌های کشور (۵)، نشان‌دهنده آن است که میانگین مقادیر عناصر روی و کادمیم در خاک‌های

جدول ۲- ضرایب همبستگی میان فلزات سنگین مورد مطالعه (۸۵ نمونه).

Table 2. Correlation coefficients among the studied HMs (85 samples).

متغیر Variable	روی Zn	سرب Pb	کادمیم Cd
روی (Zn)	1		
سرب (Pb)	0.84**	1	
کادمیم (Cd)	0.79**	0.81**	1

\*\* نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ است.

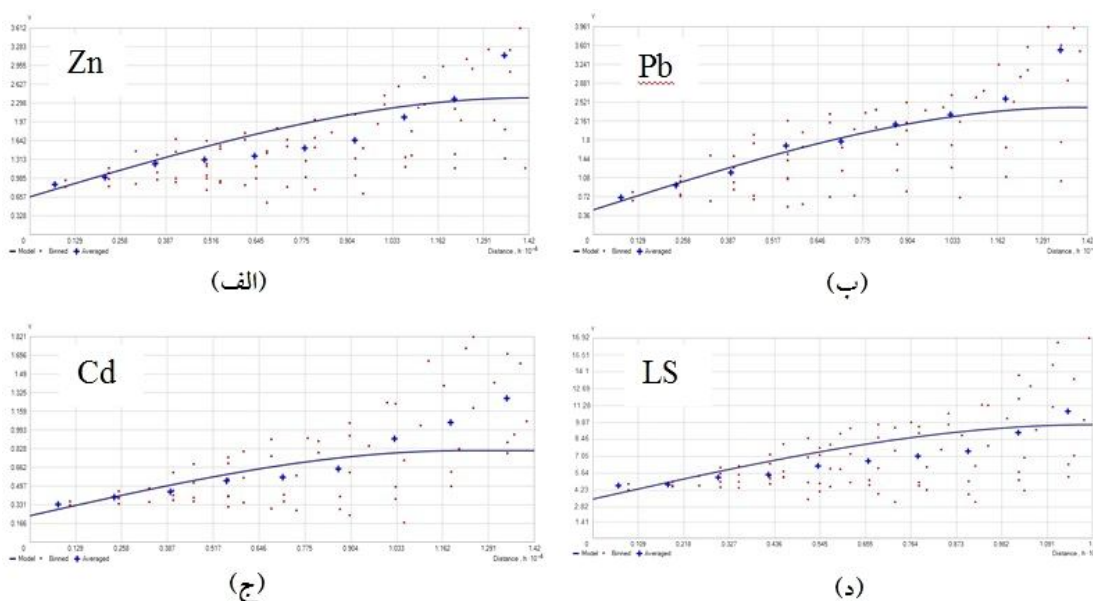
\*\* Significant at  $P < 0.01$ .

در ارزیابی نحوه تأثیرپذیری توزیع مقادیر غلظت فلزات سنگین موجود در خاک از کاربری اراضی، چنین بیان داشتند که همبستگی غلظت عناصر سنگین در خاک می‌تواند دلیلی بر اثرپذیری توزیع آن‌ها از یک یا چند عامل مشترک (مانند فعالیت‌های شهری، صنعتی و یا کشاورزی و نیز ساختار زمین‌شناسی زیرین) باشد (۴). با این وجود، بایستی متذکر شد که همبستگی بین متغیرها به حجم نمونه بستگی دارد (۱۹) و گاه مشخص نمودن یک عامل اصلی

ضرایب همبستگی محاسبه‌شده برای تمامی جفت عناصر مورد مطالعه، نسبتاً بالا و در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۲). به نظر می‌رسد که این مقادیر بالای ضریب همبستگی، شاهدهی بر کنترل توزیع این عناصر توسط عوامل مشترک باشد؛ به بیان دیگر، شاید بتوان این نتیجه را ناشی از آن دانست که فعالیت‌های صنعتی انجام‌گرفته در منطقه، عامل اصلی کنترل توزیع عناصر سنگین در خاک‌های منطقه است. در تطابق با این یافته‌ها، دنکوب و همکاران (۲۰۱۲)

تجزیه و تحلیل ساختار مکانی فلزات سنگین: نیم‌تغییرنماهای تجربی و مدل‌های برازش داده‌شده بر ساختار تغییرپذیری متغیرهای مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، مهم‌ترین ویژگی‌های مدل‌های برازش داده‌شده بر متغیرهای مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است.

کنترل‌کننده توزیع عناصر مختلف در خاک تقریباً غیرممکن است (۲۰). بنابراین، صحت تفسیرهای ارائه‌شده از نتایج کاربرد روش‌های آماری مختلف در مطالعات آلودگی خاک، مستلزم داشتن اطلاع از شرایط محلی و منابعی است که پتانسیل ایجاد آلودگی در محیط را دارند (۲۱).



شکل ۲- نیم‌تغییرنماهای تجربی و مدل‌های برازش داده‌شده برای عناصر روی (الف)، سرب (ب)، کادمیم (ج) و امتیازهای محدودیتی (د).

Figure 2. Experimental semi-variograms and fitted models for Zn, Pb, Cd and LS.

جدول ۳- پارامترهای درونیابی تخمین‌گر کریجینگ و شاخص اعتبارسنجی برای متغیرهای مورد مطالعه.

Table 3. Interpolation parameters for kriging method and cross-validation statistics of studied variables.

RMSE%	کلاس هم‌بستگی مکانی Spatial correlation class	اثر قطعه‌ای نسبی (درصد) Relative nugget effect (%)	حد آستانه Sill	اثر قطعه‌ای Nugget	دامنه (متر) Range (m)	مدل Model	متغیر Variable
38.51	متوسط (Moderate)	38.7	1.73	0.67	12500	کروی (Spherical)	روی (Zn)
35.23	متوسط (Moderate)	26.2	1.45	0.38	12650	کروی (Spherical)	سرب (Pb)
30.23	متوسط (Moderate)	40.3	0.57	0.23	12200	کروی (Spherical)	کادمیم (Cd)
32.25	متوسط (Moderate)	42.6	7.85	3.35	8450	کروی (Spherical)	امتیازهای محدودیتی (LS)



شده‌اند. بنابراین، می‌توان بیان نمود که شهرک روی، عامل اصلی کنترل توزیع مکانی فلزات سنگین روی، سرب و کادمیم در خاک‌های منطقه مطالعاتی است. در تطابق با این یافته‌ها، بسیاری از پژوهش‌های پیشین به اثرات فعالیت‌های صنعتی بر ورود و تجمع عناصر سنگین در خاک اشاره کرده‌اند (۴، ۶، ۱۳، ۲۵، ۲۸).

به‌هرحال، با وجود شباهت الگوی توزیع مکانی برای هر سه عنصر آلاینده، تفاوت‌هایی نیز در الگوی پراکنش آن‌ها به چشم می‌خورد (شکل ۳). برای نمونه، دامنه تغییرات مقادیر تخمینی نیز همانند دامنه تغییرات مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) متغیرها بسیار متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که مقادیر تخمینی برای عنصر کادمیم، تنها در محدوده صفر تا ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم هستند ولی برای عناصر روی و سرب، به‌ترتیب تا ۱۵۰۰ و ۱۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش می‌یابند. در نتیجه، تفکیک پهنه‌های دارای مقادیر مشخصی از هر سه عنصر مورد مطالعه و تصور آلودگی کلی خاک به این عناصر، تنها بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی مزبور، تقریباً غیرممکن است. در حقیقت، انطباق نقشه‌های پهنه‌بندی متغیرهایی با حدود تغییرپذیری متفاوت و استنباط مفهومی واحد از آن‌ها، مستلزم بهره‌گیری از برنامه‌های رایانه‌ای است. حال آن‌که کشاورزان و مدیران اراضی نیازمند کسب اطلاع از کیفیت کلی اراضی بدون الزام به داشتن مهارت‌های پیشرفته رایانه‌ای هستند (۲۷).

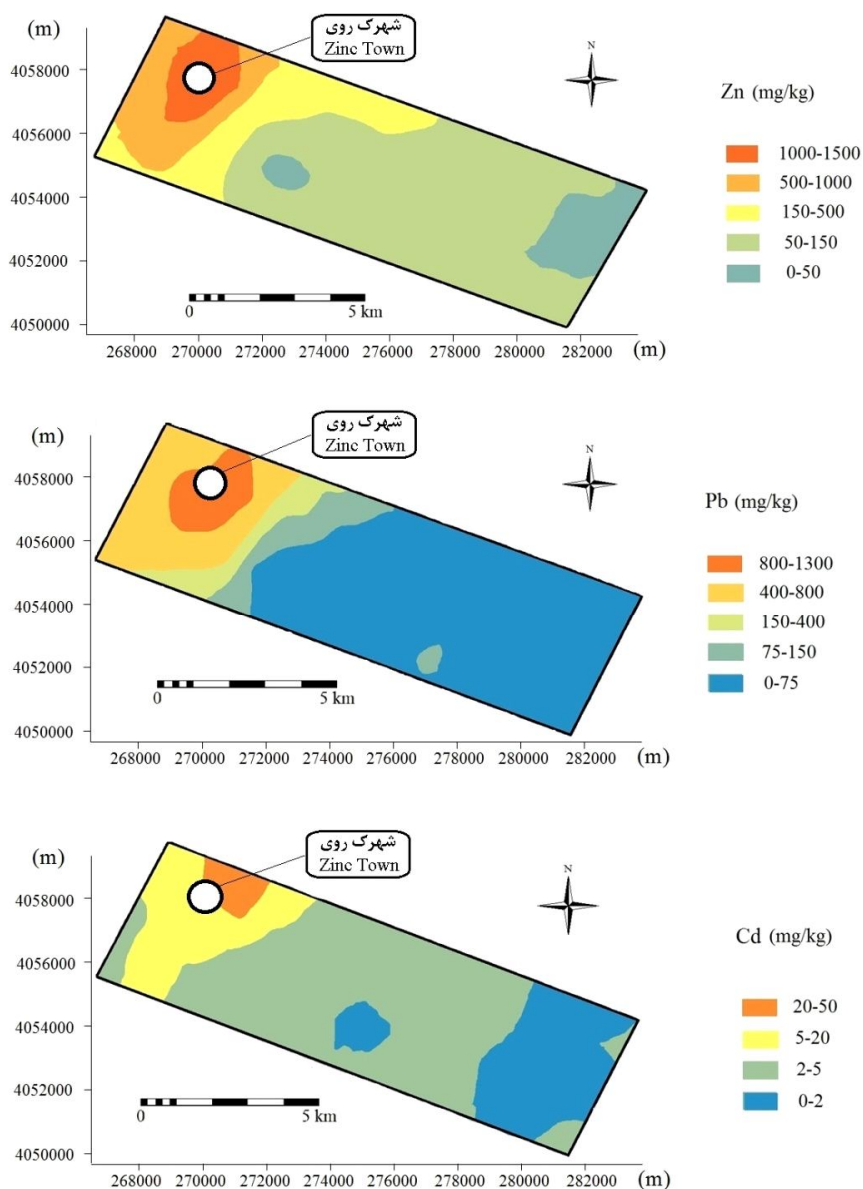
از سوی دیگر، با وجود بالاتر بودن مقادیر تخمینی برای عنصر روی در مقایسه با عناصر سرب و کادمیم، بر اساس استانداردهای ملی کشور، مقادیر این عنصر در هیچ کجای منطقه مورد مطالعه از حد خطرناک این عنصر فراتر نیست (۵). البته در بخش کوچکی از اراضی واقع در اطراف شهرک روی، غلظت عنصر روی از حد مجاز بالاتر است (شکل ۳)؛ حال آن‌که در بخش فراوانی از خاک‌های منطقه، غلظت عنصر سرب

دامنه تأثیر هر سه عنصر روی، سرب و کادمیم در خاک تقریباً برابر و در حدود ۱۲۰۰۰ متر است؛ در حالی که مقدار این ویژگی برای متغیر امتیازهای محدودیتی به ۸۴۵۰ متر کاهش یافته است. علاوه بر ماهیت متغیرهای مورد مطالعه و الگوی توزیع آن‌ها، مواردی هم‌چون مقیاس مورد مطالعه، فاصله نمونه‌برداری و موقعیت سیمای اراضی، کنترل‌کننده مقادیر دامنه تأثیر متغیرها در خاک هستند. اثر قطعه‌ای نسبی یا درجه هم‌بستگی مکانی متغیرها برابر با حاصل ضرب نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه در عدد ۱۰۰ بوده و بیان‌گر توانایی مدل برازش شده در توصیف الگوی تغییرات مکانی متغیرها است (۲). نتایج جدول ۳ گویای آن است که مقادیر این ویژگی برای متغیرهای مورد مطالعه در محدوده اعداد ۲۵ تا ۷۵ درصد است و در نتیجه، همه این متغیرها در کلاس هم‌بستگی مکانی متوسط قرار می‌گیرند. هم‌چنین، پایین بودن نسبی شاخص  $RMSE\%$  گویای دقت قابل قبول تخمین‌گر کریجینگ معمولی در برآورد مقادیر متغیرها در نقاط نمونه‌برداری نشده است (۱۲).

**توزیع مکانی فلزات سنگین:** شکل ۳ پراکنش مکانی فلزات سنگین روی، سرب و کادمیم را در خاک‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر فلزات سنگین، دارای تغییرات مکانی فراوانی در منطقه مطالعاتی هستند. پهنه‌های خاکی دارای بیش‌ترین غلظت هر سه فلز سنگین مورد مطالعه در قسمت‌های شمال‌غربی منطقه، یعنی در اراضی مجاور شهرک تخصصی روی مشاهده می‌شوند و با افزایش فاصله از این نواحی، شدت آلودگی به‌تدریج کاهش می‌یابد؛ به‌نحوی که پهنه‌های خاکی دارای پایین‌ترین سطوح آلودگی به هر سه فلز سنگین مورد بررسی، در قسمت‌های جنوب‌شرقی منطقه، یعنی دورترین مکان از شهرک صنعتی روی واقع

برخی از پژوهش‌های پیشین چنین بیان شده است که ذرات هواگرد خروجی از دودکش کارخانه‌های واقع در شهرک صنعتی روی، حاوی مقادیر بالایی از این فلزات سنگین هستند که می‌تواند موجب تجمع بیش از حد عناصر در اجزای مختلف محیط زیست گردد (۷، ۲۴).

از حد مجاز آن فراتر است و حتی در بخش‌های اطراف شهرک تخصصی روی، مقادیر فلز سرب از حد خطرساز نیز تجاوز نموده است (شکل ۳). به‌طور مشابه، در مورد عنصر کادمیم نیز مشاهده می‌شود که در بخش‌هایی از منطقه، غلظت این عنصر از حد خطرساز فراتر رفته و بنابراین پاک‌سازی این نواحی را الزامی می‌نماید (شکل ۳). در تطابق با این یافته‌ها، در

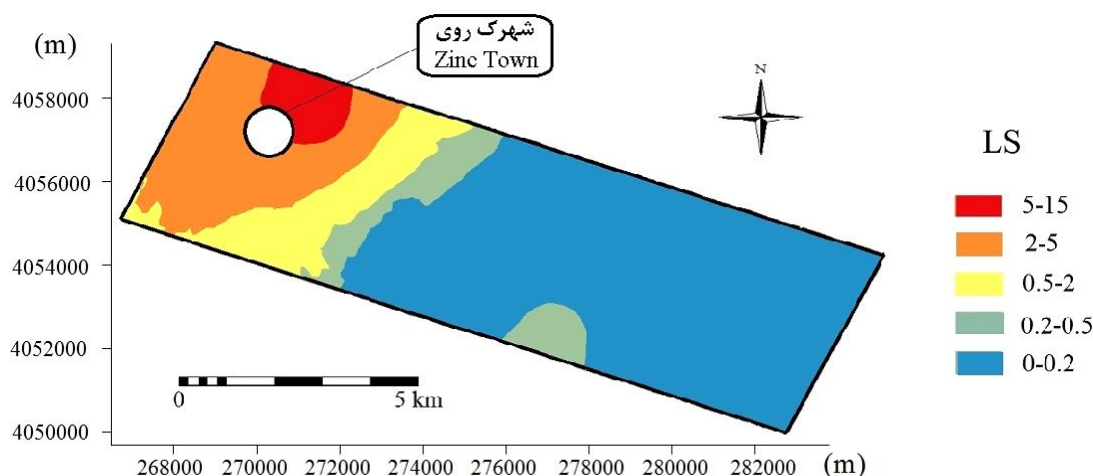


شکل ۳- نقشه‌های پهنه‌بندی غلظت کل فلزات سنگین در خاک‌های منطقه مورد مطالعه.

Figure 3. Spatial distribution of total concentration of HMs in the studied soils.

مختلف طبيعي و انساني مسئول در پراكنش اين آلاينده‌ها در خاك، مقادير عددي آن‌ها تغييرات شديدی در خاك دارد (۱۴). در اين راستا، استفاده از راهكاری كه بتواند ضمن استانداردسازی مقادير متفاوت عناصر مختلف، اثرات تركيبی آن‌ها را در رقم زدن كيفيت كلي خاك منعكس نمايد، سودمند است. شكل ۴، نقشه پهنه‌بندی پراكنش مكاني امتيازهای محدودیتی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

با توجه به مطالب ذكرشده پيرامون تفاوت‌های موجود در حدود تغييرپذیری متغيرهای مورد مطالعه و هم‌چنين تفاوت در استانداردهای آلودگی و پاكَسازی خاك برای عناصر مختلف، تفكيك نواحی دچار شدت‌های مختلف آلودگی به يك يا چند عنصر سنگين از طريق بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی تك‌عنصری، میسر نیست. اين در حالی است كه تقريباً در همه موارد، فلزات سنگين همراه با يكديگر در محیط خاك يافت می‌شوند و در پی وجود منابع



شكل ۴- نقشه پهنه‌بندی امتيازهای محدودیتی تجمعی فلزات سنگين در خاك‌های منطقه مورد مطالعه.

Figure 4. Spatial distribution of accumulated limitation scores of HMs in the studied soils.

بخش‌های مشخصی از منطقه و تنزل كيفيت اراضي اين بخش‌ها است. مطابق با اين اظهارات، پری‌زنگنه و همكاران (۲۰۱۰) انتقال فلزات سنگين در قالب ذرات كوچك موجود در پسماندها و ضايعات صنعتی كارخانه‌های شهرک روی از طريق باد يا جريانات سطحی آب و فاضلاب‌های صنعتی را يك روند محتمل در تجمع بیش از حد فلزات سنگين روی، سرب و كادميم در اراضي اطراف شهرک می‌دانند (۲۴). هم‌چنين، دامنه تغييرات مقادير عددي امتيازهای محدودیتی تجمعی بسیار بالا است (شكل ۴). چنين موضوعی می‌تواند شاهدهی ديگر بر کنترل توزيع

الگوی تغييرات مكاني امتيازهای محدودیتی تجمعی فلزات سنگين در منطقه مطالعاتی شباهت زيادی به الگوی توزيع عناصر مورد بررسی دارد (شكل ۴). به‌نحوی‌كه پهنه‌های دارای بیش‌ترین مقادير اين شاخص نیز در اراضي مجاور شهرک تخصصی روی مشاهده می‌شوند و با افزايش فاصله از اين نواحی، از مقادير امتيازهای محدودیتی تجمعی كاسته می‌شود. اين مشاهده بدان مفهوم است كه شهرک صنعتی روی نه‌تنها توزيع مكاني عناصر آلاينده در منطقه را کنترل می‌كند، بلكه عامل اصلی فراتر رفتن غلظت عناصر از حدود مجاز و گاهی خطرناك، در

به صورت نمایی افزایش می‌یابد. جدول ۴ مساحت اختصاص یافته به هر یک از پهنه‌های تفکیک شده در نقشه توزیع مکانی امتیازهای محدودیتی تجمعی فلزات سنگین و درصد نسبی متناظر با آن را نشان می‌دهد.

مکانی عناصر آلاینده مورد بررسی توسط فعالیت‌های صنعتی قلمداد گردد؛ چرا که با توجه به طریقه محاسبه این شاخص (رابطه ۱)، وقتی در مکان مشخصی، غلظت یک یا چند عنصر سنگین از حدود مجاز آن‌ها فزونی یابد، مقادیر این شاخص نیز

جدول ۴- مساحت اختصاص یافته به هر یک از طبقه‌های امتیازهای محدودیتی تجمعی فلزات سنگین و درصد نسبی متناظر با آن‌ها.

**Table 4. Assigned area to classes of accumulated limitation scores of HMs and their relative percentage.**

درصد نسبی Relative percentage	مساحت (هکتار) Area (ha)	امتیازهای محدودیتی Limitation scores
61.3	4366.9	0.0 – 0.2
6.4	454.3	0.2 – 0.5
8.2	582.4	0.5 – 2
19.5	1392.9	2 – 5
4.6	325.4	5 – 15

مهم‌ترین مزیت استفاده از راهکار امتیازهای محدودیتی، آن است که به دلیل استاندارد بودن این امتیازها، آن‌ها برای متغیرهای مختلف که در دامنه‌های متفاوتی از مقادیر یافت می‌شوند، قابل جمع هستند (۳۱). این خصوصیت منحصر به فرد سیستم امتیازدهی محدودیتی، موجب شده است که این راهکار برای تجمیع اثرات متغیرهایی با حدود تغییرپذیری متفاوت و گاهی غیرهم‌جنس، مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد (۱۵). به دلیل خاصیت جمع‌پذیری و قابلیت کاربرد در ترسیم نواحی دارای بیش‌ترین آلودگی کلی خاک، این روش قادر به انعکاس هم‌زمان اثرات چندین آلاینده بر کیفیت خاک است. چنین تجسمی در تلفیق نقشه‌های تک‌عنصری از فلزات آلاینده مفید است؛ به نحوی که با در اختیار داشتن نقشه آلودگی کلی خاک، به راحتی می‌توان پهنه‌های نامناسب برای انواع کاربری‌ها را شناسایی نمود (۲۷).

بیش‌تر مساحت محدوده مورد مطالعه از لحاظ مجموع امتیازهای محدودیتی، مقادیر نسبتاً اندکی را شامل می‌شود (جدول ۴)؛ به گونه‌ای که امتیازهای محدودیتی تجمعی در بیش از ۷۵ درصد از مساحت منطقه، مقادیری برابر با دو یا کم‌تر دارند. از این رو، می‌توان بیان نمود که مشکل آلودگی خاک به فلزات سنگین روی، سرب و کادمیم در عمده اراضی منطقه وجود ندارد و این بخش از اراضی برای انواع بهره‌وری‌ها مناسب است. از سوی دیگر، مشاهده پهنه‌های دارای حداکثر امتیازهای محدودیتی در اطراف شهرک روی، نشان از پتانسیل این شهرک در ایجاد خطرات زیست‌محیطی مرتبط با تجمع آلاینده‌ها در خاک دارد (شکل ۴). از این رو، به کارگیری شیوه‌های نوین مدیریتی برای کنترل گسترش آلودگی به فلزات سنگین در خاک‌های منطقه در راستای بهره‌وری پایدار از اراضی حاصلخیز زراعی اطراف شهرک صنعتی تخصصی روی، ضروری می‌نماید.

### نتيجه گيري

بر اساس استانداردهای آلودگی کشور، میانگین مقادير عناصر روی و کادميم در خاکهای منطقه مورد مطالعه پایین تر از حدود مجاز و میانگین مقادير عنصر سرب تقريباً دو برابر حد مجاز ارائه شده برای این عنصر است. الگوی توزيع مکانی عناصر مورد بررسی، شباهت زیادی با یکدیگر و با متغير ترکیبی امتیازهای محدودیتی داشتند و همگی از مدل کروی پیروی می نمودند. مقادير شاخص امتیازهای محدودیتی تجمعی نیز همانند مقادير فلزات سنگین روی، سرب و کادميم، دارای تغییرات مکانی فراوانی در منطقه مطالعاتی بود. با توجه به تفاوت حدود آستانه مجاز و خطر ساز عناصر مختلف در خاک، نقشه های پهنه بندی تک عنصری آنها، از کارایی کافی برای انعکاس دقیق خطر آلودگی خاکهای منطقه مورد مطالعه به این عناصر، برخوردار نبود. پهنه های خاکی دارای بیشترین

غلظت هر سه فلز سنگین و در نتیجه دارای بالاترین مقادير امتیازهای محدودیتی، در اراضی مجاور شهرک روی مشاهده شدند. بنابراین، می توان بیان نمود که شهرک روی، عامل اصلی کنترل توزيع مکانی فلزات سنگین روی، سرب و کادميم در خاکهای منطقه مطالعاتی است. نظر به دشواری های انطباق نقشه های پهنه بندی عناصر سنگین دارای حدود تغییر پذیری متفاوت و استنباط مفهومی واحد از آنها، استفاده از راهکار امتیازدهی محدودیتی، کارایی لازم برای استاندارد سازی مقادير متفاوت عناصر مختلف و انعکاس اثرات ترکیبی آنها در رقم زدن آلودگی کلی خاک را نشان داد.

### سياستگزارى

از دانشگاه زنجان به خاطر حمایت های مالی این پژوهش سياستگزارى می نمایم.

### منابع

1. Amini, M., Afyuni, M., Fathianpour, N., Khademi, H., and Fluhler, H. 2005. Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation. *Geoderma*. 124: 3-4. 223-233.
2. Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., and Konopka, A.E. 1994. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
3. Cui, Y.J., Zhu, Y.G., Zhai, R.H., Chen, D.Y., Huang, Y.Z., Qiu, Y., and Liang, J.Z. 2004. Transfer of met metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China. *Environ. Int.* 30: 785-791.
4. Dankoub, Z., Ayoubi, S., Khademi, H., and Lu, S.G. 2012. Spatial distribution of magnetic properties and selected heavy metals in calcareous soils as affected by land use in the Isfahan region, Central Iran. *Pedosphere*. 22: 1. 33-47.
5. Department of Environment, Islamic Republic of Iran. 2013. Soil resources quality standards and its directions. (In Persian)
6. Doelsch, E., Macary, H.S., and Kerchove, V.V. 2006. Sources of very high heavy metal content in soils of volcanic island (La Re'union). *J. Geochem. Explor.* 88: 194-197.
7. Farahmandkia, Z., Mehrasbi, M.R., Sekhawatju, M.S., Hasanalizadeh, A.Sh., and Ramezanzadeh, Z. 2010. Study of heavy metals in the atmospheric deposition in Zanjan, Iran. *Iran. J. Health Environ.* 2: 4. 240-249. (In Persian)
8. Fotovat, A., and Halajnia, A. 2013. The effect of compost and sewage sludge applications on the distribution of cadmium, lead and nickel in two calcareous soils. *J. Soil Manage. Sust. Prod.* 3: 2. 115-131. (In Persian)
9. Fu, F., and Wang, Q. 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J. Environ. Manag.* 92: 407-418.

10. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. P 383-411, In: A. Klute (Ed.), Methods of soil analysis, Part 1, American Society of Agronomy, Madison.
11. Hanesch, M., Scholger, R., and Dekkers, M.J. 2001. The application of fuzzy c-means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites. Phys. Chem. Earth. 26: 11-12. 885-891.
12. Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., and Stein, A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. Geoderma. 120: 75-93.
13. Juang, K.W., Chen, Y.S., and Lee, D.Y. 2003. Using sequential simulation to assess the uncertainty of delineating heavy metal contaminated soils. Environ. Pollut. 127: 229-238.
14. Kabata-Pendias, A. 2010. Trace Elements in Soils and Plants. CRC press, Boca Raton, New York, 400p.
15. Kalogirou, S. 2002. Expert systems and GIS: an application of land suitability evaluation. Comput. Environ. Urban Syst. 26: 89-112.
16. Karami, M., Afyuni, M., Rezajnejad, Y., and Schulin, R. 2009. Heavy metal uptake by wheat from a sewage sludge-amended calcareous soil. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 83: 51-61.
17. Loeppert, R.H., and Suarez, D.L. 1996. Carbonate and gypsum. P 437-474, In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis, Part 3, American Society of Agronomy, Madison.
18. Maas, S., Scheifler, R., Benslama, M., Crini, N., Lucot, E., Brahmia, Z., Benyacoub, S., and Giraudoux, P. 2010. Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. Environ. Pollut. 158: 2294-2301.
19. Mansoorfar, K. 2013. Statistical methods. Tehran Univ. Press, 412p.
20. Mico, C., Recatala, L., Peris, M., and Sanchez, J. 2006. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. Chemosphere. 65: 863-872.
21. Mostert, M.M.R., Ayoko, G.A., and Kokot, S. 2010. Application of chemometrics to analysis of soil pollutants. Trend. Anal. Chem. 29: 5. 430-445.
22. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 961-1010, In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis, Part 3, American Society of Agronomy, Madison.
23. Nemati, H., and Bostani, A.A. 2014. Assessment of lead and cadmium uptake by tomato plant in the presence of PGPR and arbuscular Mycorrhizal fungi. J. Soil Manage. Sust. Prod. 4: 1. 219-233. (In Persian)
24. Parizanganeh, A., Hajisoltani, P., and Zamani, A. 2010. Assessment of heavy metal pollution in surficial soils surrounding Zinc Industrial Complex in Zanjan-Iran. Procedia Environ. Sci. 2: 162-166.
25. Qu, M.K., Li, W.D., Zhang, C.R., Wang, S.Q., Yang, Y., and He, L.Y. 2013. Source apportionment of heavy metals in soils using multivariate statistics and geostatistics. Pedosphere. 23: 437-444.
26. Romic, M., and Romic, D. 2003. Heavy metals distribution in agricultural topsoils in urban areas. Environ. Geol. 43: 795-805.
27. Romic, M., Hengl, T., Romic, D., and Husnjak, S. 2007. Representing soil pollution by heavy metals using continuous limitation scores. Comput. Geosci. 33: 1316-1326.
28. Semsar, H., Fotovat, A., Lakzian, A., Khorassani, R., and Mahdikhani Moghaddam, E. 2011. The effect of heavy metals (lead, nickel and cadmium) and cow manure on population changes of indigenous soil nematodes. J. Soil Manage. Sust. Prod. 1: 2. 119-136. (In Persian)
29. Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy, 12<sup>th</sup> edition. NRCS, USDA, USA.
30. Sposito, G., Lund, L.J., and Chang, A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases. Soil Sci. Soc. Amr. J. 46: 260-264.
31. Triantafylis, J., Ward, W.T., and McBratney, A.B. 2001. Land suitability assessment in the Namoi Valley of Australia, using a continuous model. Soil Res. 39: 273-290.

32. Webster, R., and Oliver, M.A. 2007. Geostatistics for environmental scientists. John Wiley and Sons, Chichester, 315p.
33. Yang, P., Mao, R., Shao, H., and Gao, Y. 2009. The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China. *Comptes. Rendus. Biol.* 32: 6. 558-566.



## Mapping the overall soil pollution by heavy metals using limitation scores

\*Y. Safari<sup>1</sup>, M.A. Delavar<sup>2</sup>, I. Esfandiarpour Borujeni<sup>3</sup>, M.H. Salehi<sup>4</sup>  
and H.R. Owliaie<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science, University of Zanjan and Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Shahrood University of Technology, <sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, University of Zanjan, <sup>3</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, <sup>4</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Shahrekord University, <sup>5</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science, University of Yasouj  
Received: 05/18/2015; Accepted: 11/15/2015

### Abstract

**Background and Objectives:** Considering progressive growth of industry and technology, the accumulation of environmental contaminants, especially heavy metals (HMs) in the soil is of increasing worldwide concern about the probable soil pollution risks. Due to the multiplicity of the HMs' sources, these serious elements are usually found along with each other in the soil. Therefore, the precise evaluation of the environmental pollution risks needs all of the existing pollutants to be concomitantly assessed. Representing overall soil pollution in the Zanjan Zinc Specialized Industrial Town (briefly Zinc Town) in this study, single-element maps of heavy metals were incorporated using cumulative limitation scores (LS).

**Materials and Methods:** In the present study, 85 topsoil samples (0-20 cm) using a regular grid sampling pattern were collected and total contents of Zn, Pb and Cd were measured for each soil sample using atomic absorption spectroscopy. Assessing the spatial structure of studied elements, their contents were interpolated using ordinary kriging method in ArcGIS 10.1 software. Assessing the pollution risk of studied elements, the total concentration of heavy metals is first transformed to LSs using the exponential transfer function determined by using two threshold values: permissible concentration and seriously polluted soil. Calculated cumulative LSs for studied elements were considered as an environmental variable and its values were interpolated and classified.

**Results:** Mapping the total concentration of Zn, Pb and Cd revealed that elevated soil HMs concentrations were mostly found in the northwest of studied area, i.e. lands located surrounding the Zinc Town. Increasing the distance from the industrial source of pollution, pollution intensity decreased gradually. It seems that Zinc Town is the main factor which controls the spatial distribution of Zn, Pb and Cd in the studied soils. Although the observed and estimated values for the total concentration of Zn were higher than Pb and Cd, its values did not exceed its maximum permissible value in Iranian soils; whereas the total concentration of Pb and Cd in sizeable parts of the studied area exceeded their national maximum permissible concentration and in some parts of the area located around the Zinc Town, exceeded than the seriously pollution threshold value. Mapping the spatial distribution of LSs showed that elevated soil LSs were mostly found in the lands located surrounding the Zinc Town. Therefore, it can be concluded that Zinc Town not only controls the spatial distribution of pollutant elements in the area, but also is the main factor which causes the HMs concentration to be exceeded than their maximum permissible or even seriously pollution threshold values in some parts of the studied area and finally, lower the land quality in these areas.

**Conclusion:** Totally, industrial activities related to Zn production caused to simultaneous entrance of several heavy metals to the adjacent soils and lead to degradation of the lands in studied area. The interpolated heavy metal values were observed in the very different range for each specific element, as different threshold values. These caused some difficulties to perceive the soil pollution risk just by single-element maps of heavy metals. Since the limitation scores are standardized and can be summed for different variables, this technique is capable to represent the contemporaneous effects of several pollutants on the soil quality.

**Keywords:** Environmental risk assessment, Limitation score, Spatial variability, Zanjan Zinc Specialized Town

\* Corresponding Author; Email: [yasersafari@znu.ac.ir](mailto:yasersafari@znu.ac.ir)