

پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین کروم، کبالت و نیکل در خاک‌های سه زیر حوزه آبخیز استان همدان با استفاده از فناوری‌های GIS و زمین آمار

لقمان خدا کرمی^{۱*}، علیرضا سفیانیان^۱، نوراله میرغفاری^۱، مجید افیونی^۲ و امین گلشاهی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۳۰)

چکیده

در میان آلاینده‌های محیطی، فلزات سنگین به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و اثرات فیزیولوژیکی که بر موجودات زنده در غلظت‌های کم دارند، از اهمیت خاصی برخوردارند. این عناصر به دلیل تحرک کم به مرور در خاک انباشته می‌شوند. انباشت این عناصر در خاک در نهایت باعث ورود آنها به چرخه غذایی و تهدید سلامت انسان و سایر موجودات می‌شود. لذا بررسی توزیع غلظت عناصر سنگین جهت پایش آلودگی خاک و حفظ کیفیت محیط زیست ضروری است. این تحقیق با هدف بررسی اثر کاربری اراضی کشاورزی و زمین‌شناسی بر میزان غلظت فلزات سنگین و نقشه پهنه‌بندی آلودگی خاک با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده، سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین آمار انجام گرفت. با استفاده از روش نمونه‌برداری سیستماتیک تصادفی طبقه‌بندی شده، تعداد ۱۳۵ نمونه خاک سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متری) از منطقه‌ای به وسعت ۷۲۶۲ کیلومتر مربع جمع‌آوری و غلظت کل عناصر نیکل، کروم و کبالت و خصوصیات خاک شامل pH، ماده آلی و بافت آنها اندازه‌گیری شد. میانگین غلظت عناصر $\text{Ni}: 63/1 \pm 17/7$ ، $\text{Co}: 17/6 \pm 3/5$ ، $\text{Cr}: 88/9 \pm 22/7$ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد و میانگین اسیدیته ۷/۸ می‌باشد که نشان‌دهنده قلیایی بودن خاک منطقه مورد مطالعه است. برای پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین از روش‌های زمین آمار استفاده شد و با کمک آنالیز همبستگی مکانی، مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی با استفاده از توابع قدرمطلق میانگین خطا و میانگین اریبی خطا انتخاب گردید. نقشه پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین کروم، کبالت و نیکل با استفاده از روش کریجینگ معمولی و مدل نمایی تهیه شد. تجزیه و تحلیل نقشه پهنه‌بندی فلزات سنگین با کمک نقشه‌های زمین‌شناسی و کاربری اراضی نشان داد که پراکنش عناصر کروم، کبالت و نیکل با طبقات زمین‌شناسی مطابقت دارد. اما با الگوی کشاورزی مطابقت نداشت. از سوی دیگر با بررسی غلظت نمونه‌های واقع در مناطق بکر و دور از دسترس انسان به تفکیک طبقات سنگ بستر، مشخص شد در سنگ بسترهای شیل، ماسه سنگ، سنگ دگرگونی و سنگ آهک به‌طور طبیعی غلظت این عناصر بالا می‌باشد. یافته‌های این تحقیق اطلاعات مناسبی را در مورد توزیع غلظت فلزات سنگین کروم، کبالت و نیکل در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌کند که می‌تواند به فرآیندهای پایش و ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در اراضی کشاورزی منطقه مورد بررسی کمک کند.

واژه‌های کلیدی: زمین آمار، GIS، آلودگی خاک، فلزات سنگین، کریجینگ معمولی

۱. به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیاران و دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. استاد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: loghman.kh@gmail.com

مقدمه

تأمین امنیت غذایی جمعیت در حال رشد جهان با توجه به محدود بودن منابع زمین و به نحوی که کمترین تأثیر را بر محیط زیست آن بگذارد، یکی از مباحث بسیار مهم بشمار می‌رود. افزایش فعالیت‌های صنعتی توأم با تولید آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین یکی از مشکلات جدی و در حال گسترش پیش روی انسان عصر حاضر است (۳). دو منبع برای آلودگی فلزات سنگین خاک وجود دارند: منابع طبیعی و منابع انسانی. منابع طبیعی شامل ورود فلزات سنگین از طریق فرسایش مواد مادری خاک بوده و بنابراین با زمین‌شناسی منطقه مرتبط می‌باشد. صنایع آهن و فولاد، معدن‌کاری، حمل و نقل جاده‌ای، سوزاندن پسماند و به ویژه استفاده از کودها و مواد شیمیایی در کشاورزی از منابع انسانی بسیار مهم ورود فلزات سنگین به خاک و آب در اکوسیستم‌های سطحی هستند (۱۳، ۱۴ و ۲۹). استفاده از کودها و مواد شیمیایی در اراضی کشاورزی منجر به افزایش غلظت فلزات سنگینی مثل کروم، کبالت، کروم، کادمیوم، سرب، مس و روی شده و باعث افزایش غلظت فلزات سنگین در این مناطق می‌شود (۱۹).

آلودگی فلزات سنگین نه تنها به‌طور مستقیم بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، کاهش فعالیت بیولوژیکی و کاهش دستیابی زیستی مواد مغذی خاک تأثیر می‌گذارد، بلکه هم‌چنین خطر جدی برای سلامتی انسان از طریق ورود در زنجیره غذایی و امنیت زیست محیطی از طریق نفوذ در آبهای زیرزمینی محسوب می‌شوند (۸). علی‌رغم تفاوت‌هایی که در رفتار عناصر سنگین از لحاظ تحرک و قابلیت جذب آنها در خاک وجود دارد، در اغلب موارد میزان خروج آنها از طریق آبشویی و یا جذب به‌وسیله گیاهان نسبت به میزان ورود آنها به خاک بسیار کمتر است. این امر موجب انباشته شدن تدریجی عناصر در خاک می‌شود. روند انباشت عناصر سنگین در خاک بسیار کند بوده و اثرات آن پس از دهها سال قابل تشخیص است. به دلیل فرآیند انباشت عناصر تقریباً یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است که در درازمدت موجب کاهش کیفیت خاک و در نهایت تخریب

اراضی کشاورزی می‌شود (۱). بنابراین برای نیل به توسعه پایدار خصوصاً در بخش کشاورزی جمع‌آوری اطلاعات پایه زیست محیطی برای منابع حیاتی از جمله خاک ضروری است. در این راستا، بررسی وضعیت آلودگی خاک به فلزات سنگین در مناطقی که بواسطه ساختار زمین‌شناسی ویژه، فعالیت‌های صنعتی و یا کشاورزی احتمال انباشت فلزات سنگین در خاک وجود دارد، ضروری است. به دلیل وسعت مکانی و مشکلات مرتبط با نمونه‌های جمع‌آوری شده برای تعیین مناطق آلوده و مناطق در معرض آلودگی، استفاده از روش‌های زمین آمار بسیار مفیدند (۱۶ و ۲۵). روش‌های کریجینگ برای تعیین توزیع مکانی فلزات سنگین خاک، پتانسیل بالایی دارند و هم‌چنین به عنوان روش مناسبی برای درون‌یابی و تهیه نقشه‌های آلاینده‌ها پیشنهاد شده‌اند (۱۷ و ۲۸).

مطالعات متعددی در کشورهای مختلف برای درون‌یابی و تعیین توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین در خاک وجود دارد. لادو و همکاران (۲۰۰۸) مدل‌سازی توزیع هشت فلز سنگین حساس را (آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، جیوه، نیکل، سرب و روی) در خاک‌های سطحی اروپا با استفاده از ۱۵۸۸ نمونه زمین مرجع شده و روش کریجینگ- رگرسیون، انجام دادند و صحت پیشگویی‌ها، با استفاده از روش تعیین اعتبار (cross validation)، ارزیابی شد (۱۹). جیاکن و همکاران (۲۰۰۷) تغییرات مکانی عناصر Hg, Cd, Pb, Cu, As, Cr را در چانگزینگ استان ژیبانگ در چین با بررسی ۶۵۵ نمونه خاک تعیین کردند. آنها فنون زمین آمار و GIS را به‌کار بردند و از کریجینگ لوگ نرمال و کریجینگ معمولی برای نقشه‌سازی As, Cu, Pb, Hg استفاده کردند (۱۷). هم‌چنین جوانگ و همکاران (۲۰۰۱) و رودرگوز و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعات خود از زمین آمار برای تهیه نقشه‌های توزیع غلظت فلزات سنگین استفاده کردند (۱۷ و ۲۴). بقائی و همکاران (۱۳۸۶) برای بررسی تغییرات مکانی سرب و نیکل خاک در اطراف دو قطب صنعتی منطقه مرکزی استان اصفهان (ذوب‌آهن و مبارکه) از روش‌های زمین آمار استفاده کردند (۲). هم‌چنین امینی و

و همدان است (شکل ۱). کاربری‌های عمده این منطقه کشاورزی می‌باشد به گونه‌ای که بخش عمده زمین‌های کشاورزی استان همدان در این منطقه واقع شده است. ۳۳/۴ درصد از وسعت منطقه مورد مطالعه مربوط به کاربری کشاورزی می‌باشد و محصولات غالب منطقه شامل گندم، جو یونجه و سیب‌زمینی می‌باشند. نقشه کاربری اراضی و الگوی کشت به عنوان اطلاعات پایه برای بررسی و مطالعه آلودگی خاک ضروری می‌باشد. در این مطالعه از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای IRS-P6 از سنجنده AWIFS سال ۱۳۸۷ برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی و الگوی کشت استفاده شد. بعد از انجام تصحیحات هندسی و تصحیحات اتمسفریک و همچنین تعیین مراحل فنولوژی رشد محصولات عمده منطقه مورد مطالعه (گندم، جو، یونجه، سیب‌زمینی و باغ و قلمستان)، با استفاده از روش طبقه‌بندی فازی تصاویر طبقه‌بندی و نقشه کاربری اراضی با کاپای ۰/۸۸ و دقت ۹۰٪ به دست آمد (شکل ۲). حداقل ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۶۷۹ متر و حداکثر ارتفاع از سطح دریا ۲۹۳۳ متر است. تشکیلات زمین‌شناسی غالب در منطقه شامل تراس‌های آبرفتی مربوط به دوره زمین‌شناسی کواترنری و همین‌طور تشکیلات آهک اوربیتالین و شیل و مارل مربوط به اواخر دوره کرتاسه و ماسه سنگ دگرگون شده مربوط به دوره ژوراسیک و گدازه‌های آندزیتی و سنگ آهک ریفی مربوط به اوایل نئوژن و اواخر پالئوژن می‌باشد، (شکل ۲) (نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی) (۶ و ۷). خاک‌های منطقه خاک‌های کم عمق تا نیمه عمیق سنگریزه‌دار سبک تا متوسط همراه با تجمع مقداری مواد آهکی می‌باشد (۶ و ۷). بافت خاک منطقه مورد مطالعه به‌طور عمده لومی رسی و لومی است.

روش نمونه‌برداری

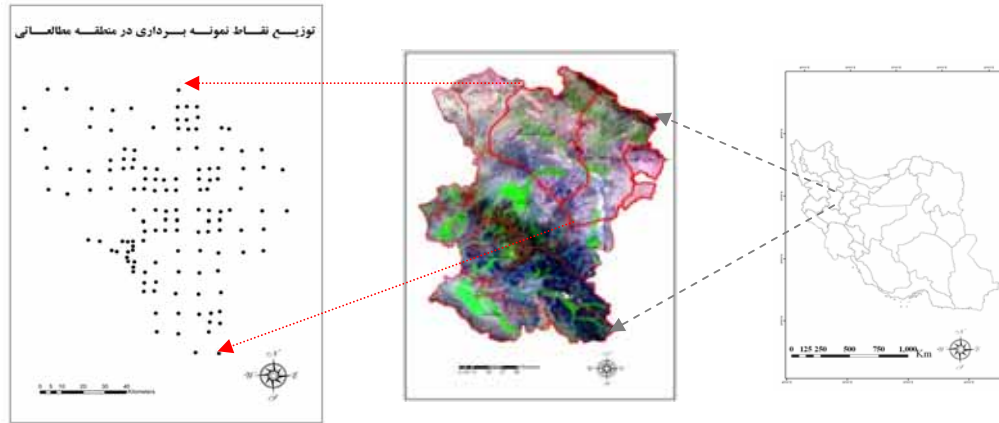
نمونه‌برداری خاک براساس روش سیستماتیک تصادفی انجام گرفت. برای این کار ابتدا منطقه مورد مطالعه به شبکه‌های ۵×۵ کیلومتر تقسیم‌بندی شد. براساس شناختی که از منطقه حاصل

همکاران (۱۳۸۵) مدل‌سازی توازن جرمی عناصر کادمیوم و سرب در زمین‌های زراعی منطقه اصفهان را مورد مطالعه قرار دادند (۱). بنابراین استفاده از زمین‌آمار علاوه بر توصیف تغییرات مکانی و زمانی داده‌ها قادر به تهیه نقشه‌های کمی توزیع آلودگی با حداقل واریانس ممکن می‌باشد. این روش‌ها امکان کمی نمودن توزیع مکانی غلظت عناصر را فراهم می‌کند. نقشه‌های مشخص‌کننده مناطق آلوده به فلزات سنگین و یا در معرض خطر آلودگی می‌تواند اطلاعات مهمی را در زمینه انتخاب و یافتن مناطق مناسب جهت کاربری‌های استفاده از سرزمین یا پاکسازی خاک در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد. هدف از این مطالعه، تعیین توزیع مکانی فلزات سنگین کروم، کبالت و نیکل در خاک سه حوزه آبخیز کبودرآهنگ، رزن-قهاوند و خونجین-تلخاب در استان همدان با استفاده از تکنیک‌های GIS و روش‌های زمین‌آمار و بررسی تأثیرات ساختارهای زمین‌شناسی و کاربری اراضی بر روی غلظت این فلزات در خاک می‌باشد. منطقه مورد مطالعه از مراکز عمده کشاورزی استان همدان به شمار می‌آید. این سه عنصر در اکثر مطالعات مربوط به توزیع مکانی فلزات سنگین در خاک مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند (۲، ۱۷ و ۱۹). از سوی دیگر با توجه به ساختار زمین‌شناسی ویژه استان همدان احتمال بالا بودن کروم، کبالت و نیکل در خاک سطحی این منطقه بالا می‌باشد.

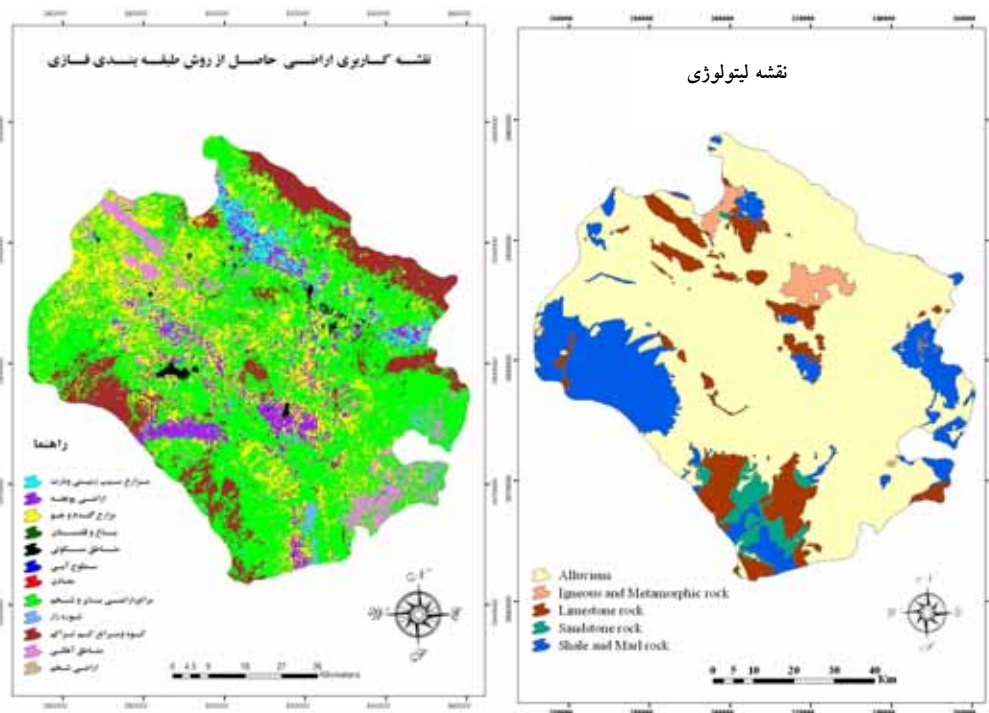
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحتی در حدود ۷۲۶۲ کیلومتر مربع بین طول‌های جغرافیایی در سیستم متریک ۲۵۱۰۵۴ تا ۳۶۰۷۷۸ و عرض‌های جغرافیایی در سیستم متریک ۳۸۴۵۰۴۸ تا ۳۹۵۶۶۵۶ در استان همدان واقع شده و شامل سه زیرحوزه کبودرآهنگ، رزن و خونجان می‌باشد. بیشترین وسعت منطقه مورد مطالعه در دو زیرحوزه کبودرآهنگ و رزن قرار گرفته و شامل شهرستان‌های رزن، کبودرآهنگ و بخشی از شهرستان‌های بهار



شکل ۱. موقعیت جغرافیای منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی و نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

واقع در مناطق نظامی، قلعه‌ها و مکان‌های غیرقابل دسترس صرف‌نظر شد. در مجموع تعداد ۱۳۵ نمونه از کل منطقه برداشت گردید. نمونه‌برداری به شیوه مرکب انجام شد بدین ترتیب که در موقعیت نمونه‌برداری یک پلات ۲۰×۲۰ متر (ماکروپلات) زده و داخل آن به صورت ۷ سه پلات ۳×۳ متر (میکروپلات) زده شد، سپس از داخل هر میکروپلات تعداد ۵ نمونه خاک به

شده بود مناطقی که شدت استفاده از زمین زیاد بود فاصله شبکه‌ها ۲/۵ × ۲/۵ کیلومتر و در مناطقی که شدت استفاده از زمین کمتر بود و هم‌چنین براساس تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی مناطقی که صعب‌العبور بودند فاصله شبکه‌ها ۱۰×۱۰ کیلومتر انتخاب و محل تلاقی شبکه‌ها به عنوان موقعیت نقاط نمونه‌برداری انتخاب شد. از نمونه‌برداری نقاط

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad [1]$$

که در آن:

$$Z^*(x_0) = \text{مقدار تخمین کمیت در نقطه مجهول } x_0$$

$$\lambda_i = \text{وزن یا اهمیت نمونه } i \text{ ام}$$

$$Z(x_i) = \text{مقدار کمیت در نمونه } i \text{ ام}$$

در این تحقیق از روش کریجینگ معمولی برای بررسی توزیع غلظت فلزات سنگین کبالت، کروم و نیکل استفاده شد. برای مطالعه تطبیقی و ارزیابی میزان دقت نقشه‌ها از تکنیک جک نایف و توابع میانگین خطای انحراف (Mean Bias Error) و میانگین مطلق خطا (Mean Absolute Error) که از روش‌های معتبر ارزیابی در این زمینه می‌باشند استفاده شد.

نتایج و بحث

توصیف آماری داده‌ها

توصیف آماری غلظت عناصر سنگین و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در نمونه‌های برداشت شده از منطقه مطالعاتی در جدول ۱ خلاصه شده است. ضریب تغییرات غلظت عناصر کروم، کبالت و نیکل کمتر از ۵۰ درصد می‌باشد که بیانگر عدم وجود تغییرات خیلی زیاد غلظت این عناصر در منطقه مورد مطالعه است (۱). در بین عناصر مورد مطالعه کبالت دارای کمترین ضریب تغییرات و نیکل بیشترین می‌باشد. نتایج آزمون کولوموگروف-اسمیرنوف (جدول ۲) نشان می‌دهد که غلظت این عناصر دارای توزیع نرمال می‌باشند. نمودار جعبه‌ای نشان داد که در توزیع غلظت نمونه‌های مربوط به عنصر نیکل یک داده غیرمعمول وجود دارد و برای سایر عناصر داده پرت وجود نداشت. وجود مقادیر غیرعادی می‌تواند منجر به گسستگی داده‌ها شود که این ممکن است منجر به نقض تئوری زمین آمار شود. داده‌هایی که خارج از دامنه $(\bar{x} \pm 3sd)$ بودند، به عنوان مقادیر غیرعادی در نظر گرفته شد که \bar{x} نشان‌دهنده مقدار میانگین برای هر فلز سنگین است و sd انحراف معیار آنها است. برای تصحیح داده‌ها، داده‌های پرتی که از مقدار $(\pm 3sd \bar{x})$

صورت ضربداری از عمق ۲۰-۵ سانتی‌متر برداشت و پس از مخلوط کردن آنها یک نمونه مرکب به وزن حدود ۲ کیلوگرم برداشت شد.

تجزیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

نمونه‌های خاک هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند و برای آنالیز آماده گردیدند. بافت خاک (درصد شن، سیلت و رس)، به روش هیدرومتری و درصد مواد آلی به روش تیتراسیون با استفاده از فرسولفات آمونیوم و دی کرومات پتاسیم و اسید سولفوریک غلیظ، EC به وسیله EC متر و pH پتانسیومتر در گل اشباع خاک با استفاده از pH متر اندازه‌گیری شد (۱۸ و ۲۷). عصاره‌گیری برای تعیین غلظت کل فلزات سنگین در خاک نیز با استفاده از HCl و HNO₃ صورت گرفت (۹). غلظت کل عناصر سنگین کروم، کبالت و نیکل با استفاده از دستگاه ICP-MS در آزمایشگاه شیمی مؤسسه تحقیقات پیشرفته فرآوری مواد معدنی ایران، اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل‌های آماری

برای بررسی توزیع و تست نرمال بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد، از آماره کلموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. در صورت نرمال نبودن توزیع داده‌ها، از روش تبدیل لگاریتم برای نرمال کردن آن استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون بین فلزات سنگین با یکدیگر و با سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک محاسبه شد. هم‌چنین با استفاده از نمودار جعبه‌ای، داده‌های خارج از رده شناسایی و تصحیح شدند.

تجزیه و تحلیل‌های زمین آماری

برای بررسی تغییرات مکانی و برآورد غلظت فلزات سنگین از روش میانبایی کریجینگ در محیط نرم‌افزار ArcGIS 9.3 استفاده شد. روش عمومی محاسبه کریجینگ براساس معادله ۱ و به شرح زیر می‌باشد (۵):

جدول ۱. توصیف آماری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

پارامترهای خاک	حداقل	حداکثر	میانگین	دامنه	میانه	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
کبالت (mg/kg)	۸/۱	۲۷	۱۷/۶	۱۸/۹	۱۸	۳/۵	۲۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۲
کروم (mg/kg)	۳۰	۱۴۰	۸۶/۹	۱۱۰	۸۸	۲۲/۷	۲۶/۱	۰/۰۲	-۰/۴
نیکل (mg/kg)	۲۶	۱۱۰	۶۳/۱	۸۴	۶۳	۱۷/۷	۲۸/۰۳	۰/۲۶	۰/۳
اسیدیته	۷/۲	۸/۴	۷/۸	۱/۱	۷/۸	۰/۲	۲/۸	۰/۰۹	۰/۲
درصد ماده آلی (%)	۰/۰۳	۲/۷	۰/۶	۲/۷	۰/۶	۰/۵	۷۹/۷	۱/۸	۳/۷

فلزات سنگین برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم و مواد آلی برحسب درصد می‌باشد.

جدول ۲. توزیع غلظت فلزات سنگین در خاک منطقه مورد مطالعه (آزمون کولموگروف-اسمیرنوف)

	کبالت	نیکل	کروم
Kolmogorov-Smirnov Z	۰/۹۴	۰/۵۵	۰/۷۸
Asymp. Sig. (2-tailed)	۰/۳۳۷	۰/۹۱۸	۰/۵۶

نتیجه رسیدند، فلزاتی که همبستگی قوی با هم دارند احتمالاً منابع آلاینده یکسانی دارند (۲۹). هم‌چنین امینی در مطالعه خود همبستگی بین فلزات سنگین سرب، کادمیوم، مس و کبالت خاک را ناشی از ورود این عناصر از طریق منبع مشترک دانست (۱).

توزیع مکانی فلزات سنگین

نتایج آنالیز همبستگی مکانی (جدول ۴) نشان می‌دهد برای تمام متغیرها میانگین خطای تخمین (Mean) و میانگین مجذور خطای کاهش یافته (Root-Mean-Square Standardized) به ترتیب به مقدار ایده‌آل که صفر و یک است، نزدیک شده است. این موضوع نشان‌دهنده دقت بالای تخمین انجام شده است. نتایج واریوگرام‌های تجربی و مدل‌های برازش داده شده بر داده‌های فلزات سنگین نشان می‌دهد که عناصر مورد بررسی با مدل نمایی منطبق شدند (جدول ۴). در شکل ۳ واریوگرام‌های ترسیم شده آمده است. هم‌چنین برای ارزیابی روش‌های

تجاوز کرده بودند با بیشینه یا کمینه مقادیر کمتر از $(\bar{x} \pm 3sd)$ در مجموعه داده‌های خام اولیه جایگزین شدند. هاگان پکی و پیریرا و همکاران نیز در مطالعات خود برای نمایش توزیع داده‌ها و مشخص نمودن داده‌های پرت از آنالیز نمودار جعبه‌ای استفاده کردند (۲۲ و ۲۳). هم‌چنین هاگان پکی نیز در مطالعه خود برای تصحیح داده‌های پرت از این روش استفاده کرد (۲۲). نتایج ضریب همبستگی پیرسون (جدول ۳) نشان می‌دهد که همبستگی بین عناصر مورد مطالعه بیشتر از ۰/۶ می‌باشد که دارای همبستگی قوی و بسیار قوی می‌باشند (۲۶). اما همبستگی فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی (اسیدیته، درصد ماده آلی و درصد رس) با فلزات سنگین معنی‌دار نمی‌باشد. همبستگی بالا بین عناصر می‌تواند ناشی از ورود این عناصر از طریق منابع مشترک مانند ورود از طریق فعالیت‌های کشاورزی و ورود از طریق اتمسفر و یا از طریق مواد مادری خاک باشد. در مطالعه انجام شده توسط گورهان و همکاران نیز همبستگی بین فلزات سنگین را از روش ضریب همبستگی پیرسون محاسبه و به این

جدول ۳. ضریب همبستگی پیرسون بین فلزات سنگین و سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک

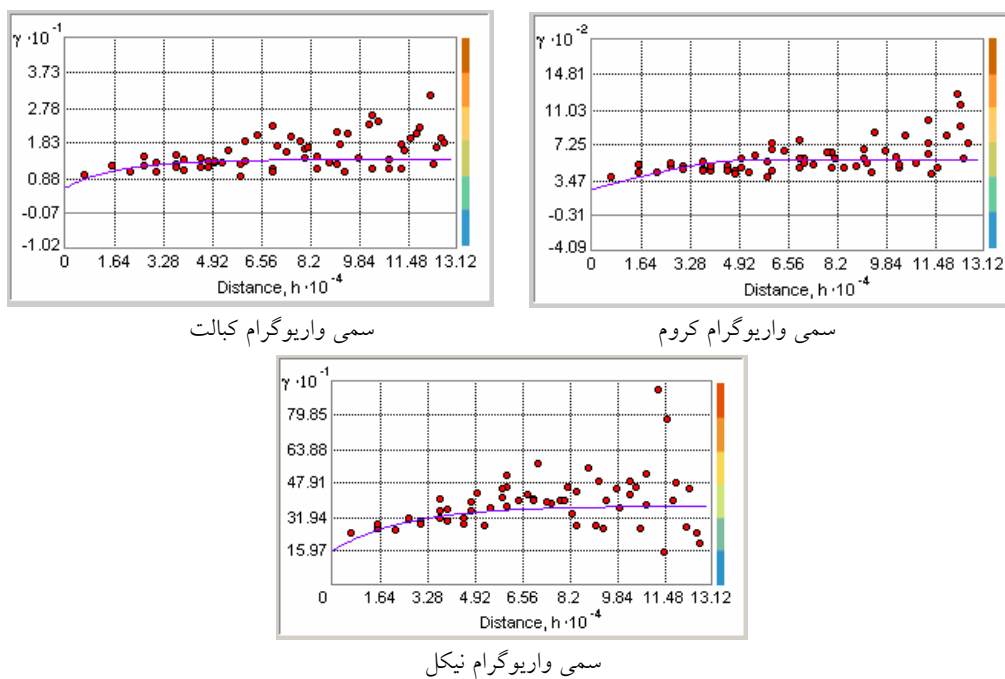
متغیرها	کبالت	کروم	نیکل	اسیدیته	درصد مواد آلی	درصد رس
کبالت	۱					
کروم	۰/۷۹۸**	۱				
نیکل	۰/۷۷۸**	۰/۹۰۷**	۱			
اسیدیته	-۰/۰۳۶	-۰/۰۶۰	-۰/۰۲۴	۱		
ماده آلی	-۰/۰۲۵	۰/۰۶۴	۰/۰۵۲	۰/۰۳۶	۱	
رس	-۰/۰۲۸	۰/۰۱۲	-۰/۰۰۹	۰/۱۸۸*	۰/۱۹۸*	۱

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ درصد * معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ درصد

جدول ۴. نتایج آنالیز همبستگی مکانی متغیرها، مدل‌های برازش داده شده به داده‌های مورد مطالعه

عناصر	روش درونیابی	مدل	C ₀	C ₀ +C	Mean	RMSS	MAE	MBE
نیکل	کریجینگ معمولی	نمایی	۱۵۷	۳۶۹/۸	۰/۰۰۱۳	۱/۱۴	۱۲/۵	۰/۰۰۱۵
کبالت	کریجینگ معمولی	نمایی	۵/۹۶	۱۳/۷	۰/۰۰۰۱	۱/۰۲	۲/۵	۰/۰۰۸۹
کروم	کریجینگ معمولی	نمایی	۲۲۶	۵۵۹	۰/۰۰۰۳	۱/۰۳	۱۱/۲	۰/۰۰۰۶

RMSS (مجدور خطای کاهش یافته)، Mean (میانگین خطای تخمین)، C₀ (اثر قطعه ای)، C₀+C (حد آستانه)، MAE (قدر مطلق میانگین خطا)، MBE (میانگین اریبی خطا)



شکل ۳. واریوگرام‌های تجربی و مدل‌های برازش داده شده بر داده‌های فلزات سنگین (کروم، کبالت و نیکل)

رگرسیون، دارای صحت بالاتری از کریجینگ معمولی نیست (۱۹).

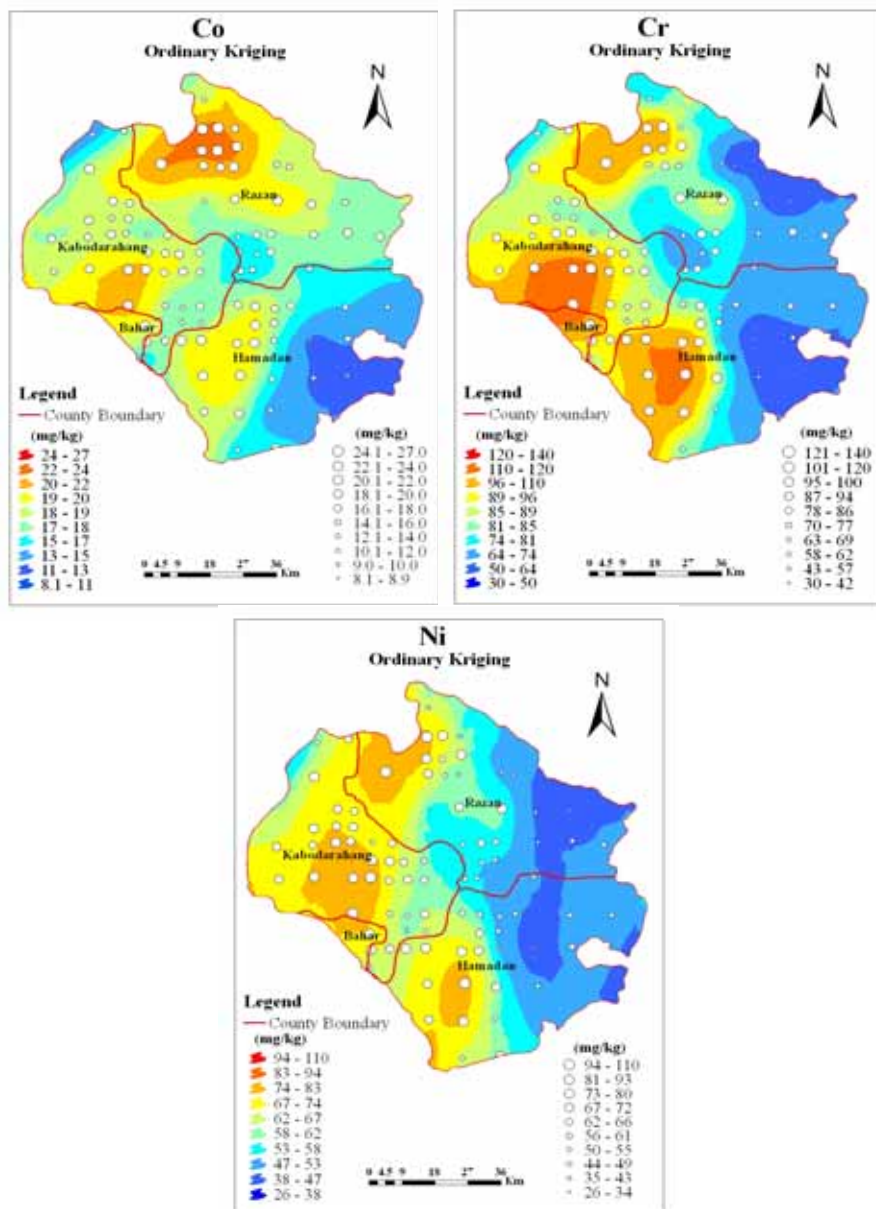
نقشه‌های پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین

نقشه توزیع غلظت کل کروم در خاک سطحی در شکل ۴ آمده است. حداقل مقدار غلظت کروم ۳۰ و حداکثر ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. بالاترین توزیع غلظت کروم در خاک منطقه مورد مطالعه بین ۱۴۰-۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد، که به صورت لکه‌هایی در جنوب منطقه (محدوده شهرستان‌های همدان، بهار و کیودرآهنگ) و شمال غرب منطقه (محدوده شهرستان‌های رزن و کیودرآهنگ) بر روی سنگ بستر شیل و مارل، ماسه سنگ، سنگ آهک و سنگ آذرین واقع شده است. براساس مطالعات انجام شده، در سنگ بستر آذرین، شیل و ماسه سنگ به‌طور طبیعی مقدار غلظت کروم به ترتیب ۹۰، ۳۵ و ۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (۱۰). هم‌چنین در این مطالعه برای برآورد غلظت زمینه فلزات سنگین، میانگین مقدار غلظت فلزات مورد مطالعه در مناطق بکر و دست نخورده برای هر کدام از سنگ‌های بستر محاسبه شد.

در این روش ابتدا نقاط نمونه‌برداری خاک واقع در مناطق بکر و دست نخورده از قبیل مراتع بکر، مناطق به دور از فعالیت‌های انسانی را مشخص نموده و سپس با روی هم‌گذاری آنها با نقشه زمین‌شناسی میانگین هر عنصر در سنگ‌های بستر محاسبه شد (جدول ۵). بررسی غلظت زمینه عنصر کروم نشان داد در سنگ بسترهای شیل و مارل، ماسه سنگ، سنگ آهک و سنگ آذرین غلظت این عنصر بالا می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد عامل مؤثر در افزایش غلظت عنصر کروم در خاک منطقه مطالعه، مواد مادری می‌باشد. در مطالعات انجام شده توسط فاجینلی و همکاران، لئو و همکاران، میکو و همکاران، ایناکو و همکاران و لادو و همکاران برای تعیین منابع فلزات سنگین در خاک به این نتیجه رسیدند که غلظت عنصر کروم در خاک توسط سنگ بستر کنترل می‌شود (۱۱، ۱۵، ۱۹، ۲۰ و ۲۱). مطابق نقشه پراکنش غلظت کل کبالت در خاک سطحی (شکل ۴) در منطقه مورد مطالعه حداقل مقدار غلظت کبالت ۸/۱

درون‌یابی از توابع قدرمطلق میانگین خطا (Mean Absolute Error) و میانگین اریبی خطا (Mean Bias Error) استفاده شد که به ترتیب دقت و انحراف مدل را نشان می‌دهند. به این صورت که قدر مطلق میانگین خطا، قدر مطلق میانگین اختلاف بین مقدار غلظت اندازه‌گیری شده و برآورد شده را نشان می‌دهد و هر چه این مقدار به صفر نزدیکتر باشد میزان دقت فضایی روش بیشتر است. از طرف دیگر میانگین بایاس، میانگین اختلاف بین مقدار غلظت اندازه‌گیری شده و برآورد شده را نشان می‌دهد که هر چه این میانگین کوچکتر باشد نشان‌دهنده اختلاف کمتر بین مقدار مشاهده شده و مقدار برآورد شده بوده و انحراف مدل کمتر است. نتایج ارزیابی روش‌های درون‌یابی با استفاده از تابع MAE و MBE در جدول ۴ آمده است. بعد از بررسی استحکام ساختار فضایی متغیرها با استفاده از نسبت (C_0/C_0+C) یعنی نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه مشخص شد که عناصر مورد مطالعه دارای ساختار فضایی قوی هستند. هرچه این نسبت از ۰/۵ کمتر باشد نشان‌دهنده وجود ساختار فضایی قوی می‌باشد. بنابراین برای درون‌یابی این متغیرها از روش کریجینگ استفاده شد.

بعد از ارزیابی روش‌های مختلف کریجینگ، از مدل کریجینگ معمولی به عنوان مناسب‌ترین روش درون‌یابی استفاده شد. جیاکن و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه خود از تکنیک‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ لگاریتم نرمال برای تهیه نقشه‌های الگوی مکانی عناصر (کروم، جیوه، سرب، آرسنیک، کادمیوم و مس) استفاده کردند و نتایج آنها نشان داد که کادمیوم با مدل خطی، کروم با مدل نمایی و دیگر فلزات سنگین (جیوه، سرب، مس و آرسنیک) با مدل کروی منطبق هستند. آنها از تابع $C_0/C+C_0$ به عنوان معیاری برای بررسی ساختار فضایی متغیرها استفاده کردند (۱۶). در مطالعه انجام شده توسط لادو و همکاران (۲۰۰۸) از تکنیک کریجینگ رگرسیون برای درون‌یابی فلزات سنگین مورد مطالعه استفاده شد آنها در این مطالعه از روش ارزیابی جک نایف برای اعتباریابی روش درون‌یابی استفاده کردند و نتایج ارزیابی نشان داد که کریجینگ



شکل ۴. نقشه توزیع غلظت فلزات سنگین کروم، کبالت و نیکل

جدول ۵. غلظت زمینه موجود در سنگ بستر در منطقه مورد مطالعه (برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم)

سنگ بستر					آلوویوم	فلز
مارل و شیل	ماسه سنگ	سنگ آهک	سنگ‌های آذرین و دگرگونی	سنگ بستر		
۱۹/۲	۱۸/۲	۱۹	۲۱	۱۵/۹	کبالت	
۹۹/۹	۹۹/۲	۱۰۶/۳	۱۰۱/۱	۸۳/۶	کروم	
۷۱/۳	۷۴/۱	۷۲/۳	۶۹/۵	۵۷/۷	نیکل	

کبودرآهنگ) و شمال غرب منطقه (محدوده شهرستان‌های کبودرآهنگ و رزن) مشاهده می‌شود که بر روی سنگ بستر شیل، ماسه سنگ و سنگ آهک واقع شده است. در سنگ‌های بستر شیل و ماسه سنگ به‌طور طبیعی مقدار غلظت نیکل به‌ترتیب برابر است با ۹۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (۱۰). هم‌چنین بررسی غلظت زمینه نیکل نشان داد که در سنگ بسترهای مذکور غلظت این عنصر بالا می‌باشد (جدول ۵). با توجه به عدم وجود صنایع در منطقه مطالعاتی به نظر می‌رسد که عامل مؤثر بر افزایش غلظت این عنصر در منطقه مورد مطالعه، ساختار زمین‌شناسی باشد. در مطالعات انجام شده توسط فاجینلی و همکاران، لئو و همکاران، میکو و همکاران و لادو و همکاران برای تعیین منابع فلزات سنگین در خاک به این نتیجه رسیدند که غلظت عنصر نیکل در خاک توسط سنگ بستر کنترل می‌شود (۱۱، ۱۵، ۱۹ و ۲۱).

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر نشان داد سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین‌آمار از قابلیت بالایی برای بررسی توزیع مکانی و پهنه‌بندی آلاینده‌ها و ارزیابی منشأ و منبع آلودگی خاک برخوردار است. بالاترین توزیع غلظت کروم در خاک منطقه مورد مطالعه بین ۱۴۰-۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد، که به‌صورت لکه‌هایی در جنوب منطقه (محدوده شهرستان‌های همدان، بهار و کبودرآهنگ) و شمال غرب منطقه (محدوده شهرستان‌های رزن و کبودرآهنگ) بر روی سنگ بستر شیل و مارل، ماسه سنگ، سنگ آهک و سنگ آذرین واقع شده است. بیشترین غلظت عنصر کبالت در خاک منطقه مورد مطالعه در دامنه ۲۷-۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد، که در جنوب غرب (محدوده شهرستان بهار) و شمال غرب منطقه (محدوده شهرستان‌های رزن و کبودرآهنگ) که بر روی سنگ بستر شیل و مارل، ماسه سنگ، سنگ آهک و سنگ آذرین و دگرگونی واقع شده است. هم‌چنین حداکثر مقدار غلظت نیکل در خاک بین ۱۱۰-۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد که به‌صورت سه لکه در جنوب

و حداکثر ۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. بالاترین غلظت کبالت در خاک منطقه مورد مطالعه در دامنه ۲۷-۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد، که در جنوب غرب (محدوده شهرستان بهار) و شمال غرب منطقه (محدوده شهرستان‌های رزن و کبودرآهنگ) که بر روی سنگ بستر شیل و مارل، ماسه سنگ، سنگ آهک و سنگ آذرین و دگرگونی واقع شده است. براساس مطالعات انجام شده، در سنگ بستر آذرین و شیل به‌طور طبیعی مقدار غلظت کبالت به ترتیب ۱۵۰ و ۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (۱۰). هم‌چنین با بررسی غلظت زمینه کبالت، مشخص شد که در سنگ بسترهای مذکور غلظت این عنصر بالا می‌باشد (جدول ۵). از سوی دیگر در مناطقی که بالاترین مقدار غلظت کبالت وجود دارد به‌طور بی‌رویه از کودهای شیمیایی و حیوانی استفاده می‌شود. از سوی دیگر منابع انسانی که باعث ورود کبالت به محیط زیست می‌شوند شامل فعالیت‌های صنعتی از جمله کارخانه فولاد، فعالیت‌های کشاورزی (مصرف سم و کودهای شیمیایی)، معدن‌کاری (معدن سرب، آهن و غیره)، سوختن زغال‌سنگ و صنایع رنگرزی می‌باشد (۱۰).

با توجه به عدم وجود صنایع به نظر می‌رسد عامل اصلی بالا بودن غلظت این عنصر در منطقه مورد مطالعه، ساختار زمین‌شناسی باشد. اما تجمع این عنصر در اثر مصرف غیراصولی کود در زمین‌های کشاورزی به دلیل وجود کبالت در ترکیب شیمیایی کودهای اوره، فسفات و پتاس دور از انتظار نیست (۱۱). در مطالعه انجام شده توسط فاجینلی و همکاران و میکو و همکاران برای تعیین منابع فلزات سنگین در خاک به این نتیجه رسیدند که غلظت عنصر کبالت در خاک توسط سنگ بستر کنترل می‌شود (۱۱ و ۲۱). براساس توزیع غلظت کل نیکل در خاک سطحی منطقه مورد مطالعه (شکل ۴) حداقل مقدار غلظت نیکل ۲۶ و حداکثر ۱۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. بالاترین مقدار غلظت نیکل در خاک بین ۱۱۰-۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد که به‌صورت سه لکه در جنوب (محدوده شهرستان همدان)، جنوب غرب (محدوده شهرستان‌های بهار و

طبیعی فلزات سنگین خاک است. ولی با توجه به اینکه منطقه مطالعه یک ناحیه کشاورزی است احتمال افزایش غلظت فلزات سنگین خاک به واسطه عملیات کشاورزی در اثر مصرف بالای کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی و به دلیل وجود این عناصر در ساختار کودهای شیمیایی نیز وجود دارد (۱۱).

سیاسگزاری

از دفتر آلودگی آب و خاک سازمان حفاظت محیط زیست و معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان برای مساعدت و همکاری در انجام این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

(محدوده شهرستان همدان)، جنوب غرب (محدوده شهرستان‌های بهار و کبودرآهنگ) و شمال غرب منطقه (محدوده شهرستان‌های کبودرآهنگ و رزن) مشاهده می‌شود که بر روی سنگ بستر شیل، ماسه سنگ و سنگ آهک واقع شده است. از سوی دیگر با بررسی غلظت نمونه‌های واقع در مناطق بکر و دور از دسترس انسان به تفکیک طبقات سنگ بستر، مشخص شد در سنگ بسترهای شیل، ماسه سنگ، سنگ دگرگونی و سنگ آهک به‌طور طبیعی غلظت این عناصر بالا می‌باشد. بنابراین با استفاده از تجزیه و تحلیل نقشه پهنه‌بندی فلزات سنگین به کمک نقشه‌های زمین‌شناسی و نقشه کاربری اراضی به نظر می‌رسد مواد مادری عامل اصلی بالا بودن غلظت

منابع مورد استفاده

۱. امینی، م.م.، افیونی و ح.خادمی. ۱۳۸۵. مدل‌سازی توازن جرمی عناصر کادمیوم و سرب در زمین‌های زراعی منطقه اصفهان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۰(۴):۷۷-۸۹.
۲. بقائی، ا.، ح. خادمی و ج. محمدی. ۱۳۸۶. تجزیه و تحلیل زمین آماری تغییرات مکانی سرب و نیکل در اطراف دو کارخانه ذوب فلز در منطقه اصفهان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۴(۲):۱۱-۲۰.
۳. ترابیان، ع. و م. مهجوری. ۱۳۸۱. بررسی اثر آبیاری با فاضلاب بر روی جذب فلزات سنگین به‌وسیله سبزی‌های برگ‌ی جنوب تهران. مجله علوم خاک و آب ۱۶(۲): ۱۸۹-۱۹۶.
۴. محمدی، ج. ۱۳۸۵. پدومتری، آمار کلاسیک (تک متغیره و چند متغیره). انتشارات پلک، تهران.
۵. محمدی، ج. ۱۳۸۵. آمار مکانی. انتشارات پلک، تهران.
۶. مطالعات مکان‌یابی محل دفن و دفع پسماندهای ویژه در استان همدان، ۱۳۸۶. گزارشات هواشناسی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، خاک شناسی، تکتونیک- لرزه‌خیزی و تلفیق با GIS. معاونت پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
۷. مطالعات مکان‌یابی محل دفن و دفع پسماندهای ویژه در استان همدان، ۱۳۸۶. مطالعات هواشناسی. جلد اول، معاونت پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
8. Boisson, J., A. Ruttens, M. Mench and J. Vangronsveld. 1999. Evaluation of hydroxyapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soils. Part 1. Influence of hydroxyapatite on metal exchange ability in soil, plant growth and plant metal accumulation. Environ. Pollut. 104: 225-233.
9. Cao H. F., A. C. Chang and A. L. Page. 1984. Heavy metal contents of sludge-treated soils as determined by three extraction procedures. J. Environ. Qual. 13:632-634.
10. De vos, W., M.J. Batista, A. Demetriades, M.J. Duris, J. Lexa, J. Lis, K. Sina and P.J. O' Connor. 2005. Metallogenic Mineral Provinces and World Class Ore Deposits in Europe. In: Salminen, R. et al. (Ed.), Geochemical Atlas of Europe. Part 1. Background Information, Methodology and Maps, by Geological Survey of Finland. [Online] Availability.
11. Facchinelli, A., E. Sacchi and L. Mallen. 2001. Multivariate statistical and GIS -based approach to identify heavy metal sources in soils. Environ. Pollut. 114: 323-324

12. Giorgio S., G. Senesi, N. Baldassarre, A. Senesi and B. Radina. 1999. Trace element inputs in to soils by anthropogenic activities and implications for human health. *Chemosphere* 39(2): 343-377.
13. Hansen, E., C. Lassen, F. Stuer-Lauridsen and F. Kjølholt. 2002. Heavy Metals in Waste. European Commission DG ENV.E3, Project ENV.E.3, ETU/200/0058, Final Report.
14. Hutton, M., C. de Meeûs. 2001. Analysis and conclusions from Member States' Assessment of the risk to health and the environment from cadmium in fertilisers. Final report European Commission - Enterprise DG, Environmental Resource Management.
15. Inácio, M., V. Pereira and M. Pinto. 2008. The soil geochemical atlas of Portugal: overview and applications. *J. Geochem. Explor.* 98: 22–33.
16. Jiachun, S., W. Haizhen, X. Jianming, W. Jianjun, L. Xingmei and Z. Haiping. 2007. Spatial distribution of heavy metal in soil: A case study of changing, China. *Environ Geol.* 52:1-10.
17. Juang, K. W., D. Y. Lee and T. R. Ellsworth. 2001. Using rank-order geostatistics for spatial interpolation of highly skewed data in heavy metal contaminated site. *J. Environ. Qual.* 30:894-903.
18. Klute, A. 1986. *Methods of Soil Analysis. Part I, Physical and Mineralogical Methods.* 2nd ed., Soil Science Society of America Inc., Wisconsin, USA.
19. Lado, L. R., T. Hengl and H. I. Reuter. 2008. Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma* 148:189-199.
20. Luo, W., T. Wang, Y. Lu, J.P. Giesy, Y. Shi, Y. Zheng, Y. Xing and G. Wu. 2007. Landscape ecology of the Guanting Reservoir, Beijing, China: Multivariate and geostatistical analyses of metals in soils. *Environ. Pollut.* 146 :567_576.
21. Mico, C., L. Recatala, V. Peris and J. Sa´nchez. 2006. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere* 65:863–872.
22. Pekey, H. 2006. The distribution and sources of heavy metals in Izmit Bay surface sediments affected by a polluted stream. *Marine Pollut. Bull.* 52: 1197–1208.
23. Pereira, V., M. Inácio and M. Pinto. 2008. The soil geochemical atlas of Portugal overview and applications. *J. Geochem. Explor.* 98: 22–33.
24. Rodriguez, L., E. Ruiz, J. A. Azcarate and J. Rincon. 2009. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailing and soils around a Pb-Zn mine in Spain. *J. Environ. Manage.* 90:1106-1116.
25. Sengupta, A. K. 2002. *Environmental separation of heavy metals.* Lewis Publisher.
26. Swan, A.R.H., M. Sndilands and V. McCabe. 1996. *Introduction to Geological Data Analysis.* Backkwill Science, pp. 446.
27. Weaver, R. W., J. S. Angle and P. S. Bottomley. 1994. *Methods of Soil Analysis, Microbiological and Biochemical Properties, Part II,* Soil Science of America Inc., Wisconsin, USA.
28. Webster, R. and T. M. Burges. 2002. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties III-changing drift and universal kriging. *J. Soil Sci.* 31:505-524.
29. 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.