

عوامل مؤثر بر پهنه‌بندی آلودگی خاک به فلزات سنگین در دشت سیرجان- استان کرمان

مهدی نادری خوراسگانی^{۱*}، طاهره آذریگ^۲ و جهانگرد محمدی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱۸)

چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین مسائلی است که سلامتی انسان را به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تهدید می‌کند. این پژوهش با اهداف پهنه‌بندی گسترش برخی عناصر سنگین در خاک‌های بخشی از شهرستان سیرجان، استان کرمان، مطالعه اثر عوامل طبیعی بر توزیع عناصر سنگین و ارزیابی خطر اکولوژیک غلظت عناصر سنگین خاک انجام شد. طی یک فعالیت میدانی ۱۲۰ نمونه مرکب خاک سطحی از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری جمع‌آوری شدند. ویژگی‌های خاک‌ها نظیر اجزای بافت خاک، pH، هدایت الکتریکی، مواد آلی و غلظت کل عناصر سنگین (Fe, Cu, Zn, Cd, Pb) به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. پهنه‌بندی اجزای بافت خاک و عناصر به روش کریجینگ معمولی انجام شد. نتایج، همبستگی مثبت و معنی‌داری را بین اجزای بافت خاک (رس، سیلت) و غلظت Cu و Fe کل خاک‌ها نشان داد. جهت باد غالب در منطقه و توزیع مکانی Fe, Cu, Zn به‌طور قوی احتمال اینکه منشأ این فلزات غبار باشد را تایید می‌کنند. نتایج نشان دادند که منابع سه عنصر Fe, Cu و Zn از منابع عناصر Pb و Cd متفاوت هستند. بیشترین غلظت‌های Fe, Cu و Zn در جنوب منطقه وجود داشت و غلظت‌ها در راستای خلاف جهت باد افزایش می‌یابند در حالی که بیشترین غلظت Pb و Cd در شمال منطقه مطالعاتی بود. شاخص ترکیبی آلودگی نمودار آشکار کرد که خاک‌های منطقه از نظر آلودگی به Cd پاک، آلودگی به Fe, Pb و Cu کم و آلودگی به Zn در حد متوسط است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، رسوبات بادی، منشأ آلاینده‌های خاک، پهنه‌بندی آلاینده‌های خاک

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران.

۲. دانش‌آموخته گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: khnaderi@yahoo.com

مقدمه

فلزات سنگین از مهم‌ترین آلاینده‌های خاک هستند که به‌طور طبیعی در غلظت‌های کم در خاک‌ها و سنگ‌ها یافت می‌شوند، اما فعالیت‌های انسانی سبب افزایش مقادیر رهاسازی و انتشار آنها در محیط‌زیست شده است (۲۲). آلاینده‌های فلزات سنگین نه تنها به‌طور مستقیم بر خصوصیات شیمیایی خاک مؤثرند، بلکه به‌طور غیرمستقیم خطری جدی برای سلامت انسان محسوب می‌شوند (۲۹). سرطان‌زایی عناصر سنگین را لی و همکاران (۱۱) در بخش‌هایی از چین به کمک شاخص تجمع زمینی (Geoaccumulation Index) همراه با توصیه‌های آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US Environmental Protection Agency) بررسی کردند. این پژوهشگران مهم‌ترین خطر آلودگی زیست‌محیطی را در چین ناشی از عناصر Cu, Ni, As, Hg, Zn و Pb معرفی و کنترل معادن تنگستن، منگنز، سرب-روی و آنتیموان را از اولیت‌های دفع خطر آلودگی اعلام کردند.

منابع عمده فلزات سنگین در خاک‌ها عبارت‌اند از مواد مادری و فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاری، صنایع، حمل و نقل جاده‌ای، سوزاندن پسماندها، کودهای شیمیایی و سموم (۹). ژانگ و همکاران (۲۹) فعالیت‌های معدنی، آبیاری با پساب، فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی را منابع عمده کادمیم در سیستم‌های کشاورزی گندم-ذرت در ۸۵ نقطه از کشور چین معرفی و مدلی را برای پیش‌بینی غلظت این عنصر در این دو گیاه ارائه کردند.

یانگ و همکاران (۲۸) خطر عناصر سنگین برای سلامتی انسان را به روش‌های آماری (رگرسیون و خوشه‌بندی)، شاخص‌های نمورو (Nemerow) و خطر پتانسیل اکولوژیک (Potential Ecological Risk Index) بررسی و گزارش کردند که تعداد وسایل نقلیه موتوری همبستگی بالایی با غلظت آلاینده‌ها داشتند. دینگ و همکاران (۱) نشان دادند که نواحی اطراف معادن به‌شدت آلوده هستند و از میان عواملی مثل شیب، ارتفاع، جهت باد و فاصله از رودخانه‌ها، بادهای دائمی بیشترین تأثیر را بر گسترش آلاینده‌ها داشتند و غلظت عناصر سنگین

خاک‌ها در راستای خلاف جهت باد افزایش می‌یافت. دراگوچ و همکاران (۲) غلظت عناصر سنگین اطراف کارخانه‌های فولاد در صربستان را اندازه‌گیری و گزارش کردند که غلظت عناصر سنگین آن خاک‌ها از غلظت عناصر سنگین در اراضی بدون کشت بیشتر بود. همچنین آنالیزهای آماری خوشه‌بندی و فاکتورها نشان دادند که طول و عرض جغرافیایی و فاصله از معادن رابطه مستقیمی با غلظت آلاینده‌ها در خاک‌ها دارند و پهنه‌بندی زمین آماری عناصر سنگین، تأثیر باد را بر گسترش آنها به‌خوبی نشان داد.

استفاده از زمین آمار برای تهیه نقشه پراکنش املاح و عناصر در مطالعات بسیاری گزارش شده است (۶، ۱۴، ۲۴). کیو و همکاران (۲۰) برای شناسایی منبع فلزات سنگین در خاک با استفاده از روش‌های زمین آماری، آنالیز رگرسیون چندمتغیره و اطلاعات ۱۲۴ نمونه خاک در منطقه حائل شهری-روستایی ووهان (Wuhan) چین به مساحت ۳۱ km² غلظت منگنز، مس، روی، سرب، کادمیم، کروم، نیکل و کبالت را پهنه‌بندی کردند.

یانگ و همکاران (۲۷) در پژوهشی غلظت عناصر سنگین مس، روی، کروم، نیکل، سرب، کادمیم، جیوه و آرسنیک را در خاک اندازه‌گیری کردند و تغییرات مکانی آن عناصر سنگین در کشتزارهای کوهپایه‌ای بررسی کردند. این پژوهشگران درون‌یابی عناصر را با استفاده از فناوری‌های زمین‌آمار انجام دادند و گزارش کردند که فقط کادمیم به‌دلیل فعالیت‌های انسانی و محیطی بیشتر از حد مجاز بود.

خداکرمی و همکاران (۷) در استان همدان آلودگی‌های غیرنقطه‌ای مس، روی و آرسنیک را بررسی و نقشه پتانسیل آلودگی خاک به این عناصر را با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و زمین‌آمار تهیه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که عناصر روی و مس منشأ زمین‌شناسی و کشاورزی دارند و عنصر آرسنیک از مواد مادری منشأ می‌گیرد ولی فعالیت‌های کشاورزی به‌دلیل مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی باعث افزایش هر چه بیشتر این عناصر در خاک می‌شود (۷). استفاده

از تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماری و رگرسیون چندمتغیره توزیع مکانی کروم، نیکل، مس، روی و سرب در ۱۱۴ خاک کشاورزی منطقه دهوی در شمال شرق چین نشان داد که فعالیت‌های انسانی سبب غنی‌شدگی خاک با عناصر سرب و مس شده است ولی غلظت کروم، نیکل و روی تحت تأثیر مواد مادری خاک هستند (۲۳).

باتوجه به وجود معادن متعدد در همسایگی شهرستان سیرجان در استان کرمان ضروری است که وضعیت عناصر سنگین در اراضی این شهرستان بررسی شود. اهداف این پژوهش عبارت بودند از: (۱) پهنه‌بندی عناصر سنگین آهن، مس، روی، کادمیم و سرب در اراضی کشاورزی بخشی از دشت سیرجان، (۲) مطالعه نقش عوامل طبیعی بر توزیع عناصر سنگین و (۳) ارزیابی خطر غلظت اکولوژیک عناصر سنگین خاک.

نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌برداری از خاک‌ها به روش سیستماتیک در شبکه ۱۰۰۰×۱۰۰۰ متر و سه نقطه تعیین شده همراه صورت گرفت. بدین منظور موقعیت ۱۲۰ نقطه برای نمونه‌برداری روی نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مشخص شدند و طی عملیات میدانی به کمک سامانه موقعیت جهانی (GPS) موقعیت نمونه‌ها در منطقه شناسایی شد. نمونه‌های مرکب از خاک سطحی (۰-۱۵ سانتی‌متر) جمع‌آوری شدند، به‌طوری که سه نمونه در سه راس یک مثلث به فاصله ۳۰ متر و یک نقطه (مشخص شده در شبکه سیستماتیک) در مرکز مثلث برداشته شدند (شکل ۳).

مقادیر مساوی از خاک‌های چهار نقطه خوب با هم مخلوط شدند و در نهایت یک نمونه مرکب از آنها به‌دست آمد. در مرحله بعد نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند و پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری نسبت به تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی اقدام شد.

pH نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه pH متر (مدل Metrohm) در عصاره حاصل از نسبت ۱:۲ خاک و آب اندازه‌گیری شد (۴). هدایت الکتریکی خاک‌ها با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (مدل Metrohm) در نسبت ۱:۲ خاک و آب اندازه‌گیری شد (۲۱). مواد آلی به روش اکسیداسیون تر (۱۷) و اجزای بافت خاک به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شدند (۴). منیزیم و کلسیم محلول به روش

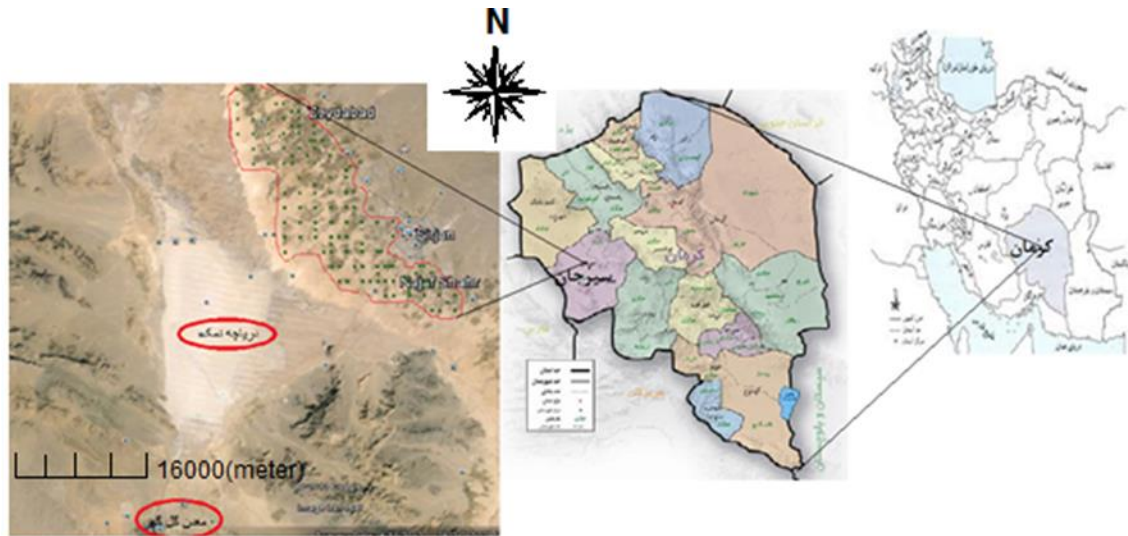
از تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماری و رگرسیون چندمتغیره توزیع مکانی کروم، نیکل، مس، روی و سرب در ۱۱۴ خاک کشاورزی منطقه دهوی در شمال شرق چین نشان داد که فعالیت‌های انسانی سبب غنی‌شدگی خاک با عناصر سرب و مس شده است ولی غلظت کروم، نیکل و روی تحت تأثیر مواد مادری خاک هستند (۲۳).

باتوجه به وجود معادن متعدد در همسایگی شهرستان سیرجان در استان کرمان ضروری است که وضعیت عناصر سنگین در اراضی این شهرستان بررسی شود. اهداف این پژوهش عبارت بودند از: (۱) پهنه‌بندی عناصر سنگین آهن، مس، روی، کادمیم و سرب در اراضی کشاورزی بخشی از دشت سیرجان، (۲) مطالعه نقش عوامل طبیعی بر توزیع عناصر سنگین و (۳) ارزیابی خطر غلظت اکولوژیک عناصر سنگین خاک.

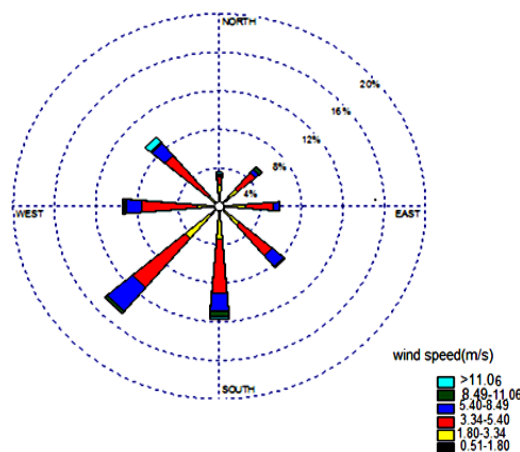
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

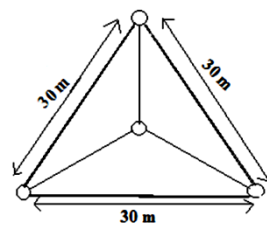
این پژوهش در بخشی از دشت سیرجان واقع در غرب شهرستان سیرجان، استان کرمان در عرض جغرافیایی ۲۹°۲۱' تا ۲۹°۳۷' و طول جغرافیایی ۵۵°۲۶' تا ۵۵°۴۴' با وسعت ۴۰۰۰۰ هکتار انجام شد (شکل ۱). حوضه آبخیز سیرجان زیرحوضه آبخیز مرکزی ایران است و از نظر زمین‌شناسی در ناحیه سندانج- سیرجان قرار دارد. بخش سطحی اغلب از نوع مخروط‌افکنه‌های جوان و رسوبات بادی است. وسعت کل حوضه ۱۲۵۲۷ کیلومترمربع است که ۶۵۸۳ کیلومترمربع آن را دشت و ۵۹۴۴ کیلومترمربع آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. کاربری اراضی به‌طور عمده زراعی (گندم و جو) آبی و مساحت محدودی به باغ اختصاص داده شده است. بیشترین ارتفاع حوضه ۳۸۱۳ متر (در ارتفاعات شمال شرقی) و کمترین آن برابر با ۱۶۵۰ متر از سطح دریا (در کویر غربی، کفه نمک) و ارتفاع متوسط دشت ۱۷۷۰ متر از سطح دریا است. میانگین بارندگی و درجه حرارت سالیانه منطقه به ترتیب



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی (محدوده با خطوط قرمز) و مکان‌های نمونه‌برداری در کشور، استان کرمان و شهرستان سیرجان (محل نقاط مرجع در شرق و خارج از منطقه مشخص شده‌اند).



شکل ۲. گلباد متوسط سالانه شهرستان سیرجان



شکل ۳. شمای نمونه‌برداری مرکب

عناصر سنگین (آهن، مس، روی، سرب و کادمیم) مقدار ۱۲/۵ میلی‌لیتر اسیدنیتریک ۴ مولار به ۲ گرم خاک اضافه شد و مخلوط یک شب (۱۲ ساعت) در ۸۰ درجه سانتی‌گراد در

کمپلکسومتري (۱۰) و سدیم محلول در عصاره ۱:۲ خاک به آب به کمک فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد (۸). غلظت کلر به روش موهر (۴) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری غلظت کل

میانگین خطا (ME) و ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE) باید در کمترین مقدار خود باشند. در این پژوهش با سعی و خطا مناسب‌ترین الگوی متغیرهای مورد مطالعه تعیین شد.

خطر آلودگی

برای بررسی کمیت خطر آلودگی و آگاهی از پتانسیل خطر آلودگی در منطقه از شاخص جامع ترکیب شده نمودار (Nemerow) استفاده شد و رابطه ۱ این شاخص را نشان می‌دهد (۱۸، ۱۳). مزیت این شاخص این است که خطر آلودگی با استفاده از همه‌ی فلزات مورد مطالعه در منطقه تعیین می‌شود. بر اساس این شاخص سطح آلودگی خاک به ۵ طبقه تقسیم می‌شود. این طبقات عبارت‌اند از: $P_{ij} < 0.7$ غیر آلوده، $0.7 < P_{ij} < 1$ کمی آلوده، $1 < P_{ij} < 2$ آلودگی متوسط، $2 < P_{ij} < 3$ بسیار آلوده و $3 < P_{ij}$ آلودگی شدید.

$$P_{ij} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\max C_i}{S_{ij}}\right) + (1/n \sum C_i / S_{ij})^2}{2}} \quad (1)$$

در این رابطه P_{ij} ، C_i و S_{ij} به ترتیب معرف شاخص جامع آلودگی، غلظت فلز اندازه‌گیری شده در هر نمونه و غلظت فلز مرجع (غلظت زمینه) هستند.

برای تعیین غلظت فلز زمینه، مناطقی در حاشیه منطقه که سابقه کشاورزی نداشتند در نظر گرفته شدند و ۵ نمونه خاک مرکب سطحی از آنها برداشت شد. نمونه‌ها پس از خشک شدن با چکش چوبی خرد و از الک پلاستیکی ۲ میلی‌متری عبور داده شد. هضم نمونه‌ها در اسیدنیتریک ۴ مولار انجام شد (۲۳) و غلظت عناصر به کمک دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری و به‌عنوان غلظت زمینه استفاده شد.

نتایج و بحث

خلاصه آماره‌های توصیفی متغیرهای مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. ضریب تغییرات عناصر سنگین سرب، آهن، مس و روی بسیار کم ولی این ضریب برای کادمیم بسیار بیشتر بود. کم بودن ضریب تغییرات بر اساس طبقه‌بندی ویلدینگ و درس

حمام ماری نگهداری (۲۳) و غلظت عناصر محلول در عصاره حاصل به کمک دستگاه جذب اتمی مدل *GBC 932 plus* اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در دو تکرار تهیه و به‌وسیله دستگاه خوانده شدند و میانگین آنها به میلی‌گرم در کیلوگرم (پی‌پی‌ام) خاک تبدیل شدند و برای تجزیه و تحلیل آماری استفاده شد. برای اندازه‌گیری نسبت جذب سدیم (*Sodium Adsorption Ratio*) غلظت عناصر سدیم، کلسیم و منیزیم محلول در نسبت خاک به آب ۱:۲ نمونه‌ها اندازه‌گیری و از تقسیم غلظت سدیم به ریشه دوم مجموع غلظت کلسیم و منیزیم نسبت جذب سدیم محاسبه شد.

پهنه‌بندی عناصر

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار *Statistica 6.0* و بررسی ساختار مکانی داده‌ها و محاسبه نیمه‌تغییرنا با استفاده از نرم‌افزارهای *Geo-EAS* و *Variowin* انجام شد. به‌منظور پهنه‌بندی خصوصیات مورد مطالعه روش کریجینگ معمولی استفاده شد و با استفاده از بسته نرم‌افزار *Surfer 9* نقشه‌های کریجینگ و خطای تخمین ترسیم شدند.

شدت و درجه وابستگی مکانی یک متغیر ناحیه‌ای از طریق تقسیم اثر قطعه‌ای به واریانس کل یا حد آستانه محاسبه می‌شود. اگر این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد متغیر دارای کلاس وابستگی مکانی قوی، نسبت بین ۲۵ تا ۷۵ درصد نشان‌دهنده وابستگی مکانی متوسط و در شرایطی که این نسبت بیش از ۷۵ درصد باشد متغیر دارای کلاس وابستگی مکانی ضعیفی است. از آزمون کولوموگروف-اسمیرنوف برای بررسی توزیع نرمال داده‌ها استفاده شد. پس از اطمینان از عدم وجود ناهمسان‌گردی (*Anisotropy*) اقدام به محاسبه و ترسیم واریوگرام‌های تجربی چندسویه شد (۱۶).

از روش جک نایف در برآورد پارامترهای تغییرنا استفاده شد. ابتدا مدل تغییرنمای مورد مطالعه تخمین زده شد، آن‌گاه مدل حاصل برای تخمین به‌کار رفت. در ادامه با آنالیزهای خطای تخمین صحت الگوی برازش شده بررسی شد. الگوی برازش یافته نباید موجب خطای نظام‌دار شود، به‌عبارت دیگر

جدول ۱. خلاصه آماری متغیرهای مورد مطالعه

متغیر	واحد	میانگین	میانه	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی	کمینه	بیشینه
pH	—	۷/۶۷	۷/۷۱	۰/۴۳	۰/۰۵	-۰/۱۲	-۰/۲۹	۶/۴۶	۸/۷۱
مواد آلی	%	۱/۵۹	۱/۵۴	۰/۷۴	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۴۵	۰/۰۳	۴/۰۳
شن	%	۵۰/۱۸	۴۸/۷۴	۱۳/۹۶	۰/۲۷	۰/۲۴	-۰/۳۱	۲۱/۵۶	۸۳/۰۰
سیلت	%	۲۸/۳۴	۲۸/۶۲	۱۰/۲۰	۰/۳۵	۰/۰۶	-۰/۳۶	۶/۳۲	۵۷/۳۲
رس	%	۲۱/۴۷	۲۰/۳۶	۸/۱۹	۰/۳۸	۱/۰۱	۲/۰۷	۵/۵۶	۵۶/۳۲
سرب	mg kg ⁻¹	۱۸/۳۹	۱۸/۹۵	۵/۵	۰/۲۹	-۰/۴۸	-۰/۲۴	۶/۸۵	۲۹/۳۷
کادمیم	mg kg ⁻¹	۱/۶۴	۱/۹۷	۰/۷۴	۲/۲۱	-۰/۷۱	-۰/۹۳	۰/۱۵	۲/۵۳
آهن	mg kg ⁻¹	۷۳۹۳/۰۴	۷۲۵۸/۷۵	۱۵۶۲/۱۱	۰/۲۱	۰/۶۲	-۰/۳۳	۴۸۷/۲۵	۱۱۵۶۷/۵
مس	mg kg ⁻¹	۱۳/۵۱	۱۳/۰۱	۳/۳۷	۰/۲۴	۰/۱۰	۰/۶	۳/۳۵	۲۲/۱۲
روی	mg kg ⁻¹	۳۰/۸۱	۲۸/۵۷	۲۲/۴	۰/۷۲	۹/۰۲	۹۲/۱۷	۱/۶۵	۲۵۹/۰۵

جدول ۲: نتایج آزمون کولوموگروف-اسمیرنوف برای مشخصه‌های مورد مطالعه خاک

متغیر	K-S value	p-value	متغیر	K-S value	p-value
pH	۰/۶۱۹	۰/۸۳۸	Cd	۲/۴۶۴	۰/۰۰۰
EC	۱/۵۷۵	۰/۰۱۴	Pb	۰/۹۱۰	۰/۳۷۹
SAR	۴/۰۰۳	۰/۰۰۰	Zn	۰/۸۸۶	۰/۴۱۳
مواد آلی	۰/۶۲۲	۰/۸۳۳	Cl	۲/۳۱۵	۰/۰۰۰
شن	۰/۷۳۵	۰/۶۵۲	Cu	۰/۷۷۷	۰/۵۸۲
سیلت	۰/۸۰۱	۰/۵۴۳	Fe	۰/۵۹۲	۰/۸۷۴
رس	۰/۹۳۶	۰/۳۴۵			

جدول ۳ ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بخش سیلت و رس خاک‌ها همبستگی مثبت و معنی‌داری را با عناصر سنگین آهن و مس نشان می‌دهند. همچنین مواد آلی خاک با سیلت همبستگی معنی‌داری دارد. باتوجه به اینکه بخش عمده غبار (Dust) را سیلت، رس و کمی مواد آلی تشکیل می‌دهد (۱۹) احتمال اینکه این عناصر سنگین همراه غبار وارد منطقه شده باشند وجود دارد. گلباد منطقه (شکل ۳) نشان می‌دهد که جهت باد غالب منطقه از سمت جنوب غربی است. وجود معادن گل‌گهر در جنوب غربی منطقه مطالعاتی می‌تواند منشأ این آلاینده‌ها باشد. رودریگرز و

(۲۵) نشان‌دهنده یکنواختی نسبی تغییرات متغیرهای مورد مطالعه در سطح منطقه مطالعاتی است. بررسی مقادیر چولگی و کشیدگی (جدول ۱) و نتایج آزمون کولوموگروف-اسمیرنوف (جدول ۲) نشان دادند که توزیع داده‌های pH، ماده آلی، درصد شن، سیلت، رس و سرب نرمال ولی مقادیر غلظت کادمیم انحراف از توزیع نرمال را نشان داد بنابراین داده‌های این عنصر به لگاریتم طبیعی تبدیل شدند. توزیع نرمال داده‌ها، شرط لازم و ضروری پردازش زمین‌آماري نیست اما در صورت نرمال بودن داده‌ها تخمین‌های زمین‌آماري از دقت بیشتری برخوردارند (۱۶).

جدول ۳. ضریب همبستگی پیرسون بین اجزای ذرات و ویژگیهای شیمیایی نمونه های خاک

سرب	کادمیم	روی	مس	آهن	SAR	کلر	منیزیم	سدیم	کلسیم	ماده آلی	رس	سیلت	شن	pH	EC
۰/۰۸۱ ^{ns}	۰/۱۹*	۰/۰۸ ^{ns}	-۰/۰۷ ^{ns}	۰/۱۲ ^{ns}	۰/۶۴**	۰/۸۶**	۰/۶۶**	۰/۷۷**	۰/۰۶ ^{ns}	۰/۰۶ ^{ns}	۰/۱۲ ^{ns}	۰/۳۴**	-۰/۳۲**	-۰/۳۴**	۱
-۰/۰۴ ^{ns}	-۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۸ ^{ns}	-۰/۰۱ ^{ns}	-۰/۰۵ ^{ns}	-۰/۰۱ ^{ns}	-۰/۰۳ ^{**}	-۰/۰۳ ^{**}	-۰/۰۱ ^{ns}	-۰/۰۱ ^{ns}	-۰/۰۱ ^{ns}	۰/۱۴ ^{ns}	-۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۱	
۰/۰۵ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	-۰/۰۸*	-۰/۰۴**	-۰/۰۲۹**	-۰/۰۳ ^{**}	-۰/۰۳۵**	-۰/۰۱۸*	-۰/۰۳۱**	-۰/۰۳۱**	-۰/۰۳۱**	-۰/۰۶۹**	-۰/۰۸۱**	۱		
۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۵ ^{ns}	۰/۱۲ ^{ns}	۰/۱۹*	۰/۲۵**	۰/۲۶**	۰/۳۲**	۰/۳۰**	۰/۳۲**	۰/۳۵**	۰/۳۵**	۰/۱۴ ^{ns}	۱			
-۰/۰۱۲ ^{ns}	-۰/۰۲۲*	۰/۱۵ ^{ns}	۰/۲۵**	۰/۱۹*	۰/۱۹*	۰/۱۷ ^{ns}	-۰/۰۶ ^{ns}	۰/۱۳ ^{ns}	۰/۰۹ ^{ns}	۰/۰۹ ^{ns}	۱				
۰/۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۹ ^{ns}	۰/۱۹*	۰/۴۰**	۰/۰۷ ^{ns}	۰/۶۱*	۰/۰۷ ^{ns}	۰/۱۳ ^{ns}	۰/۱۹*	۱ ^{ns}	۱					
۰/۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۹ ^{ns}	۰/۱۹*	۰/۴۰**	۰/۰۷ ^{ns}	۰/۶۱*	۰/۰۷ ^{ns}	۰/۱۳ ^{ns}	۰/۱۹*	۱	۱					
۰/۰۸ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۸ ^{ns}	۰/۹۶**	۰/۷۶**	۰/۴۵**	۱							
۰/۰۹ ^{ns}	۰/۰۱۶ ^{ns}	۰/۱۲ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۱۱ ^{ns}	۰/۲۵**	۰/۵۷**	۱								
۰/۱۹*	۰/۰۲۲*	۰/۰۹ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۰/۰۵ ^{ns}	۰/۶۷**	۱									
۰/۰۵ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۵ ^{ns}	۰/۰۶ ^{ns}	۱										
-۰/۰۴۹**	-۰/۰۴۵**	۰/۳۳**	۰/۲۳**	۱											
۰/۰۶ ^{ns}	-۰/۰۳ ^{ns}	۰/۴۳**	۱												
-۰/۰۱ ^{ns}	-۰/۰۱۶ ^{ns}	۱													
۰/۸۹*	۱														
۱															

ns و ** به ترتیب معنی دار در سطح 0.05 P ، معنی دار در سطح 0.01 P و غیر معنی دار می باشند.

دو عنصر ممکن است منشأ یکسانی داشته باشند. این دو عنصر همبستگی منفی و متوسطی را با آهن نشان دادند و با عناصر روی و مس همبستگی معنی داری نداشتند. همبستگی منفی و معنی دار نشان دهنده تفاوت منشأ فلزات از یکدیگر است (۵، ۱۲، ۲۶). بنابراین امکان اینکه دو فلز سرب و کادمیم منشأ متفاوتی از سه عنصر آهن، مس و روی داشته باشند وجود دارد. شکل های ۴ و ۵ پهنه بندی غلظت دو عنصر سرب و کادمیم را در منطقه نشان می دهد. بیشترین غلظت دو عنصر سرب و کادمیم در شمال و شمال غرب منطقه است و به تدریج به سمت جنوب منطقه از غلظت این دو عنصر کاسته می شود.

شدیدترین سرعت باد از سمت شمال غرب منطقه است ($< 11/06$ متر بر ثانیه) و احتمال اینکه باد عامل انتقال رسوبات بادی آلوده به این دو عنصر باشد وجود دارد. برای اطمینان بیشتر جست و جوی منابع سرب و کادمیم در شمال غربی منطقه مطالعاتی توصیه می شود.

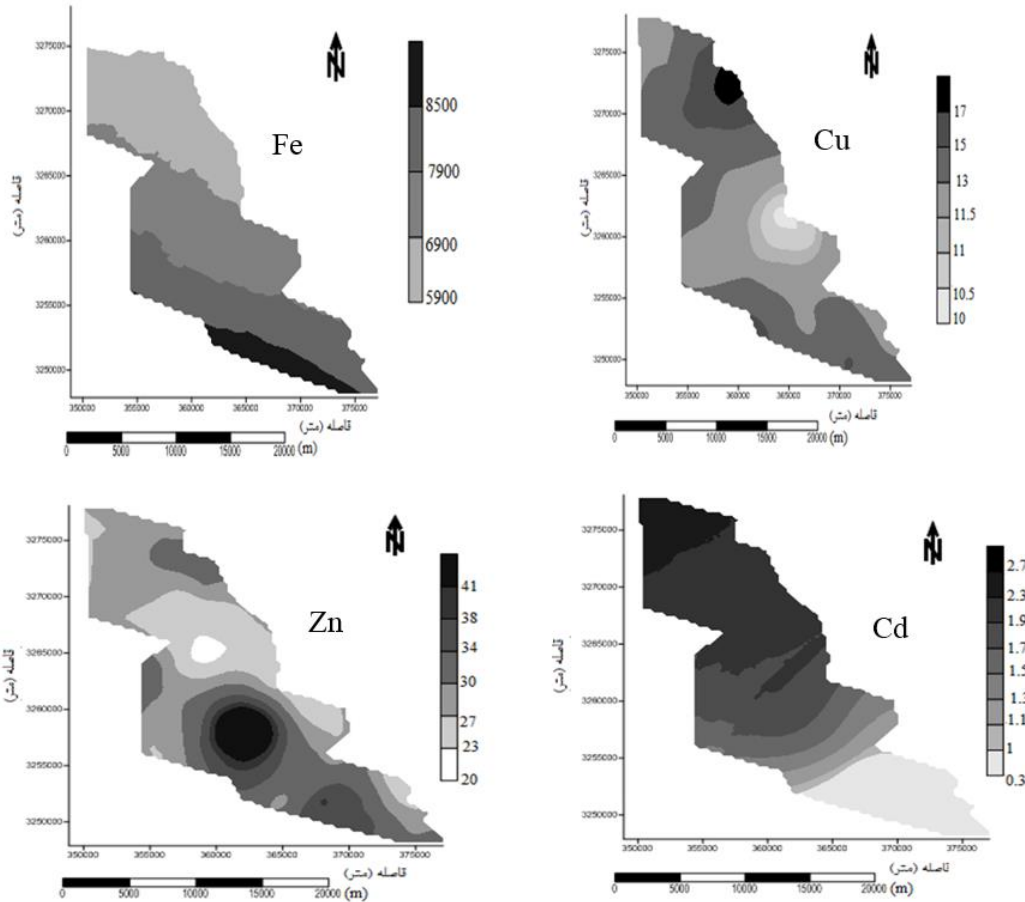
باتوجه به نقشه های حاصل از میان یابی به روش کریجینگ بیشترین غلظت سرب و کادمیم در قسمت شمال غربی منطقه بود (شکل ۴ و ۵). کیو و همکاران (۲۰) نیز برای شناسایی منابع فلزات سنگین در خاک از روش های زمین آماری استفاده کردند. این پژوهشگران غلظت منگنز، مس، روی، سرب، کادمیم، کروم، نیکل و کبالت را در ۱۲۴ نمونه خاک تعیین و نقشه های توزیع مکانی آنها را با استفاده از کریجینگ معمولی ترسیم و گزارش کردند که نقشه های زمین آماری در شناسایی منابع آلودگی مفید بوده است. دراگوویچ و همکاران (۲) نیز گزارش کردند که پهنه بندی کریجینگ در شناسایی منابع آلاینده بسیار مفید هستند و تأثیر باد بر گسترش عناصر سنگین آلاینده را در کشور صربستان به کمک پهنه بندی کریجینگ نشان دادند.

جدول ۴ پارامترهای کنترل تغییرنماهای اجزای بافت خاک و عناصر سنگین را نشان می دهد. برای اجزای بافت خاک و عناصر مس و روی مدل کرووی است. این مدل این موضوع

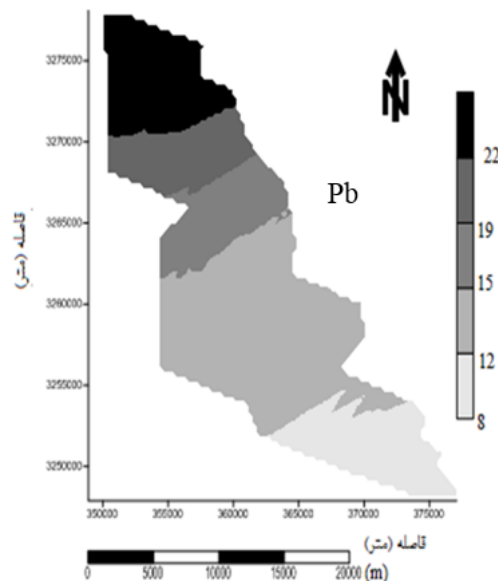
همکاران (۲۱) گزارش کردند که همبستگی معنی دار اجزای بافت خاک با عناصر سنگین نشان دهنده تأثیر فرایندهای پدوژنیک و مواد مادری بر غلظت فلزات سنگین است. بنابراین ورود غبار و بادرفت ها (Aeolians) به منطقه در درازمدت امکان دارد عامل آلودگی خاک های منطقه به فلزات سنگین آهن و مس باشد. شواهد زمین شناسی نیز نشان می دهد که از دیرباز منطقه تحت تأثیر باد و بادرفت بوده است و از نظر زمین شناسی منطقه جزئی از زیرحوضه فلات مرکزی ایران در ناحیه گسل سنندج- سیرجان قرار دارد و بخش سطحی آن را مخروط افکنه های جوان همراه با ماسه بادی و رس تشکیل می دهد.

دینگ و همکاران (۱) نیز گزارش کردند که باد در گسترش عناصر سنگین و آلودگی مناطق اطراف معادن در چین نقش با اهمیتی داشته است. غلظت عنصر روی نیز همبستگی معنی داری را با غلظت عناصر آهن و مس نشان داد (جدول ۳). همبستگی بالای این سه عنصر با هم نشان می داد که ممکن است سه عنصر روی، آهن و مس از منابع مشترکی ناشی شده باشند. از سوی دیگر مواد آلی و عنصر روی همبستگی معنی داری را با هم نشان دادند (جدول ۳). این موضوع امکان وجود پیوند شیمیایی عنصر روی و مواد آلی را نشان داد. میکو و همکاران (۱۵) نیز از مطالعات خود در اراضی کشاورزی جنوب شرقی اسپانیا گزارش کردند که غلظت مس با میزان مواد آلی خاک همبستگی مثبت و معنی داری داشته است. شکل ۴ توزیع غلظت آهن، مس و روی را در خاک های منطقه مطالعاتی نشان می دهد. بیشترین غلظت آهن، مس و روی در جنوب غربی منطقه دیده شد و با افزایش فاصله از جنوب از غلظت این عناصر کاسته شده است. روند افزایش غلظت سه عنصر آهن، مس و روی نیز خلاف جهت باد غالب منطقه بود. البته غلظت مس در نواحی مرکزی منطقه نیز بیشتر بود که نشان دهنده نیاز به مطالعات بیشتر در مورد آن عنصر است.

همبستگی مثبت، قوی و معنی داری بین غلظت کادمیم و سرب نمونه های خاک ($P < 0/05$, $r = 0/89$) نشان داد که این



شکل ۴. پهنه‌بندی غلظت کل عناصر (mg kg⁻¹soil) آهن، مس، روی، کادمیم در خاک‌های سطحی منطقه (محور طولی و عرضی نقشه‌ها طول و عرض جغرافیایی منطقه را بر اساس سیستم متریک UTM نشان می‌دهند)



شکل ۵. پهنه‌بندی غلظت کل سرب (mg kg⁻¹soil) در خاک‌های سطحی منطقه (محور طولی و عرضی نقشه‌ها طول و عرض جغرافیایی منطقه را بر اساس سیستم متریک UTM نشان می‌دهد)

جدول ۴. پارامترهای کنترل اعتبار تغییرنماهای متغیرهای مورد بررسی

متغیر	مدل	دامنه	سقف	اثر قطعه‌ای	همبستگی مکانی (%)	کلاس همبستگی مکانی
شن (%)	کروی	۳۰۰۰	۱۸۹	۱۰۰/۰۰	۵۲	متوسط
سیلت (%)	کروی	۶۰۰۰	۱۰۸	۷۵/۰۰	۶۹	متوسط
رس (%)	کروی	۴۰۰۰	۶۹/۶	۲۸/۰۰	۴۰	متوسط
کادمیم (mg kg^{-1})	نمایی	۱۵۴۰۰	۰/۵۳	۰/۰۶	۱۱	قوی
سرب (mg kg^{-1})	نمایی	۱۶۰۰۰	۳۰	۷/۵۰	۲۵	قوی
آهن (mg kg^{-1})	نمایی	۱۵۰۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲	۵۰	متوسط
مس (mg kg^{-1})	کروی	۱۵۰۰۰	۱۳/۰۰	۷/۰۰	۵۳	متوسط
روی (mg kg^{-1})	کروی	۸۰۰۰	۰/۲۲	۰/۱۳	۶۰	متوسط

جدول ۵. پارامترهای مدل‌های تغییرنما

متغیر	کمترین نقاط در دامنه جستجو	بیشترین نقاط در دامنه جستجو	شعاع دامنه جستجو (متر)	میانگین تخمین خطا	ریشه میانگین مجذور خطا	Z-score
شن (%)	۱	۱۵	۹۰۰۰	۰/۰۰۸	۱۳/۲۷۶	۰/۹۸۲
سیلت (%)	۱	۱۹	۱۴۰۰۰	۰/۱۱۷	۹/۹۲۳	۱/۰۰۲
رس (%)	۱	۱۵	۱۰۰۰۰	۰/۰۳۳	۷/۵۴۲	۰/۹۹۴
کادمیم کل (mg/kg)	۱	۱۴	۳۰۰۰	۰/۰۰۳	۰/۳۱۰	-۰/۰۰۹
سرب کل (mg/kg)	۱	۲۱	۴۰۰۰	۰/۰۱۶	۲/۵۵۰	-۰/۰۰۶
آهن کل (mg/kg)	۱	۸	۱۷۲۰۰	-۰/۰۰۱	۰/۱۳۵	۰/۰۰۹
مس کل (mg/kg)	۱	۸	۱۱۰۰۰	-۰/۰۰۰	۳/۱۳۸	۱/۰۳۹
روی کل (mg/kg)	۱	۱۶	۱۷۲۰۰	۰/۰۰۲	۰/۳۴۳	۱/۰۷۰

نمونه‌برداری بعدی در منطقه برای بررسی تغییرات مکانی این عناصر می‌توان در فواصل بیشتری (تا ۱۵۰۰۰ متر) نمونه‌برداری را انجام داد و با نمونه‌های بسیار کمتری تغییرات مکانی این عناصر را بررسی کرد. سقف نیمه‌تغییرنماها نشان‌دهنده میزان واریانس داده‌هاست و همان‌طور که جدول ۴ نشان می‌دهد مقادیر این پارامتر برای اجزای بافت خاک نسبت به مقادیر مرتبط با عناصر سنگین بسیار زیاد است. اثر قطعه‌ای نیز که

را نشان می‌دهد که همبستگی مکانی بین مقادیر این متغیرها در فواصل نزدیک بسیار قوی است و در فواصل دور این همبستگی مکانی کاهش می‌یابد. در مورد عناصر کادمیم، سرب و آهن مدل‌های نمایی توزیع آنها را نشان می‌دهد و بدین معناست که همبستگی مکانی در فواصل بسیار بیشتر هم وجود دارد. دامنه نیمه‌تغییرنماها برای عناصر کادمیم، سرب، آهن و مس در کمترین حالت ۱۵۰۰۰ متر است و نشان می‌دهد که در

عنصر روی شاخص نمورو برابر ۲/۴۱ است و منطقه در کلاس ۴ با آلودگی متوسط طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به جدول ۳ همبستگی متوسط و معنی‌دار عنصر روی با غلظت آهن و مس در نمونه‌های خاک امکان همراه بودن این سه عنصر و داشتن منشأ مشترک برای آنها وجود دارد.

نتیجه‌گیری

تجزیه‌های آماری و زمین‌آماری نشان دادند که عناصر سنگین آهن، مس و روی به احتمال قوی منابع یکسانی دارند. افزایش غلظت این عناصر در خاک‌های منطقه خلاف جریان باد تداعی‌کننده تأثیر عامل فرساینده باد در گسترش آلاینده‌ها در منطقه است. همبستگی بالای عناصر سنگین با بخش ریز اجزای بافت خاک (رس و سیلت) نیز احتمال آلودگی غبار را به عناصر سنگین نشان می‌دهد. پهنه‌بندی سه عنصر آهن، مس و روی نیز نشان‌دهنده وجود منابعی از این سه عنصر در جنوب‌غربی منطقه مطالعاتی است. بیشترین غلظت عناصر سرب و کادمیم در شمال‌غرب منطقه دیده شد. وجود بادهای شدید از سمت شمال‌غرب منطقه می‌تواند عامل گسترش آلودگی خاک‌ها با این دو عنصر باشد. نتایج ضرورت تثبیت خاک، احیای اراضی معادن رهاشده، جستجوی کانون‌های سرب و کادمیم در شمال و شمال شرقی منطقه و جلوگیری از فرسایش بادی و آبی را برای جلوگیری از گسترش آلاینده‌ها نشان می‌دهند.

نشان‌دهنده واریانس و میزان خطا در فواصل نزدیک است روندی شبیه سقف را نشان می‌دهد و برای اجزای بافت خاک به صورت قابل توجهی زیاد است. همبستگی مکانی از طریق نسبت اثر قطعه‌ای به مجموع اثر قطعه‌ای و سقف اندازه‌گیری شد. جدول ۴ نشان می‌دهد که همبستگی مکانی برای کلیه متغیرها متوسط تا قوی است، بنابراین نیمه‌تغییرنماهای برآورد شده معتبر و نقشه‌های تهیه شده به روش کریجینگ که با استفاده از نیمه‌تغییر نماها تهیه شده‌اند نیز منطقی و معتبر هستند.

جدول ۵ نشان می‌دهد که مقادیر میانگین خطای تخمین برای کلیه ویژگی‌های خاک کم و بیان‌گر ناریب بودن تخمین‌ها و کیفیت مناسب پهنه‌بندی به روش کریجینگ است. همچنین کم بودن میانگین مجذور خطا نیز بیان‌گر دقت قابل قبول تخمین است. جدول شماره ۵ همچنین نشان می‌دهد که وابستگی مکانی سه عنصر آهن، روی و مس متوسط است و آماره‌های میانگین تخمین خطا (Mean Estimation Error, MEE) و ریشه میانگین مجذور خطا (Root Mean Square Error, RMSE) برای پهنه‌بندی این سه عنصر بسیار کم هستند. نتایج نشان دادند که شاخص جامع فاکتور آلودگی نمورو برای عنصر کادمیم ۰/۷۵ است و در کلاس آلودگی ۲ یا پاک قرار می‌گیرد. این شاخص برای عنصر سرب ۱/۰۱ است و منطقه از نظر آلودگی سرب در کلاس ۳ با آلودگی کم قرار دارد. شاخص نمورو برای آهن و مس به ترتیب ۱/۷۹ و ۱/۷۶ است و منطقه از نظر این دو عنصر هم در کلاس ۳ با آلودگی کم قرار می‌گیرد ولی برای

منابع مورد استفاده

- Ding, Q. G., Cheng, Y. Wang and D. Zhuang. 2017. Effects of natural factors on spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions. *Science of The Total Environment* 578: 577-585
- Dragovic, R., B. Gajic, G. Dragovic, M., Miodrag Dordevich, M Dordevic, N. Mihailovic and A. Onjia. 2014. Assessment of the impacts of geographical factors on the spatial distribution of heavy metals in soils around the steel production facility in Smederevo (Serbia). *Journal of The Cleaner Production* 84: 550-562.
- Ghildyal, B. P. and R. P. Tripathi. 2005. Soil physics (2nd Ed.). Rajkamal electric press, India.
- Hip, B. W. and G. W. Langdale. 1982. Use of a solid-state chloride electrode for chloride determinations in soil extracts. *Soil Science and plant Analysis* 27: 237-240.
- Jiachun, S., W. Haizen, X. Jianming, W. Jiaanjun, L. Xingmei, Z. Haiping and Y. Chunlan. 2007. Spatial distribution of heavy metals in soil: a case study of Changxing, China. *Environmental Geology* 52: 1- 10.
- Juang, K. W. and D. Y. Lee. 2001. Comparison of three nonparametric kriging methods for delineating heavy metal contaminated soils. *Journal of Environmental Quality* 29: 197-205.

7. Khodakarami, L., A. R. Sofyanian, A. Mohammaditofiq and N. Mirghafari. 2011. Study soil heavy metal Zn, Cu and Ar concentrations using GIS and RS techniques (Case study: Kabodarahang, Razan and Khanjin, Talkhab Catchment, Hamadan Province). *Journal of Applied RS and GIS Techniques in Natural Resource Sciences* 2(1): 79-88. (In Farsi)
8. Knudsen, D., G. A. Peterson and P. F. Pratt. 1982. Lithium, Sodium and Potassium, pp. 255-246. In: A. L. page, R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical analysis*. American society of Agronomy, Inc and soil science society of Amerca, Inc. Madison, WI.
9. 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.
10. Lanyon, L. E. and W. Heald. 1982. Magnesium, Calcium, Strontium and Barium pp.247- 262. In: page A. L. Miller R. H. and Keeney D.R. (Eds). *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical analysis*. American society of Agronomy, Inc and soil science society of America, Inc. Madison, WI,
11. Li, Z., Z. Ma, T. J. Van der Kuijp, Z. Yuan and L. Huang. 2014. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health assessment. *Science of the Total Environment* 15: 843-853.
12. Li, J., M. He, W. Han and Y. Gu. 2009. Analysis and assessment on heavy metal sources in the coastal soils developed from alluvial deposits using multivariate statistical methods. *Journal of Hazardous Materials* 164: 976- 981.
13. Li, J., and Heap, A. D. 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Australia, Record 2008/23*, 137-145.
14. Liao G. L., D. X. Liao and Q. M. Li. 2008. Heavy metals contamination characteristics in soil of different mining activity zones. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China* 18: 207- 211.
15. McBratney, A. B., M. L. Mendonca Santos and B. Minasny. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117:3- 52.
16. Mico, C., L. Recatala, M. Peris and J. Sanchez. 2006. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of a European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere* 65: 863-872.
17. Mohammadi, J. 1996. *Pedometri 2 (Spatial Statistics)*, Pelk Publication Co., Tehran, Iran. (In Farsi)
18. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 539- 579. In: A. L. page, R. Miller and D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical analysis*. American society of Agronomy, Inc and soil science society of Amerca, Inc. Madison, WI.
19. Nemerow, N. L. 1985. *Stream, Lake, estuary and ocean pollution*. Van Nostrand Reinhold Publishing Co. New York.
20. Pye, K. 1987. *Aeolian and dust deposits*. Academic Press London.
21. Qu, M. K., W. D. Li, C. R. Zhang, S. Q. Wang, Y. Yang and L. Y. He. 2013. Source rapprochement of heavy metals in soils using multivariate statistics and geostatistics. *Pedosphere* 23: 437-444.
22. Rodrigues J.A., N. Nanos, J. M. Grav and L. Gil. 2008. Multiscale analysis of heavy metal content in Spanish agricultural topsoils. *Chemosphere* 70: 1085- 1096.
23. Sposito, G., L. J. Land and A. C. Chang. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended sewage sludge: I. fractionation of Ni, Cu, Cd, Pb in solid phases. *Soil Science Society America* 46: 260- 264.
24. Sun, C., J. Liu, Y. Wang, L. Sun and H. Yu. 2013. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China. *Chemosphere* 92: 517-523.
25. Walter, C., and B. McBratney. 2001. Spatial predication of topsoil salinity in the Chelif Valley, Algeria using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area varoigram. *Australian Journal of Soil Research* 39: 248- 259.
26. Wilding, L. P and L. R. Dress. 1983. Spatial variability and pedology. pp. 83-116. In: L. P. Wilding, N. E. Smeck and G. F. Hall (Eds.), *Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions*. USA.
27. Yalcin, M. G., A. Tumuklu, M. Sonmez and D. S. Erdag. 2010. Application of multivariate statistical approach to identify heavy metal sources in bottom soil of the Seyhan river (Adana), Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment* 164: 311- 322.
28. Yang, P., R. Mao, H. Shao and Y. Gao Yunfeng. 2009. The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China. *Comtes Rendus Biologies* 332: 558-566.
29. Yang, L., G. Zhu, H. Pan, P. Shi, J. Li, Y. Liu and H. Tong. 2017. Surface dust heavy metal in the major cities of China. *Earth Science* 76: 1-14.
30. Zhuang, Z., Q. Wang, A. Giovanna NinoSavala, Y. Wan, H. Li, A. Hubert Schweiger, A. Fangmeier and J. Franzaring. 2023. Source-specific risk assessment for cadmium in wheat and maize toward an enrichment model for China. *Journal of Environmental Science*. Vol. 125: 723-734.

Assessment of Effective Factors on Soil Pollution by Heavy Metals in a Part of Sirjan Plain, Kerman Province, Iran

M. Naderi Khorasgani^{1*}, T. Azarbeig² and J. Mohammadi¹

(Received: November 30-2022 ; Accepted: May 8-2023)

Abstract

Soil pollution by heavy metals is a significant issue that threatens human health directly and indirectly. The objectives of this research were to map the extension of some heavy metals in soils of a part of Sirjan Plain, Kerman province, to study the role of natural agents on the distribution of heavy metals, and to assess the risk of soil heavy metal concentration for human health. 120 surficial (0-15 cm) compound soil samples were collected during fieldwork. Soil characteristics like soil texture components, pH, electrical conductivity, organic matter, and total soil heavy metal (Fe, Cu, Zn, Cd, and Pb) concentrations were measured using standard protocols. The mapping of soil texture components and heavy metals was done by the usual Kriging method. Results indicated significant correlation coefficients between soil texture components (silt and clay) and total soil Fe and Cu concentrations. Dominant wind direction and spatial distribution of Fe, Cu, and Zn strongly induced the possible dust-born origin of such elements. Results revealed that the sources of Fe, Cu, and Zn were different from those of Cd and Pb. Maximum soil Fe, Cu, and Zn concentrations were in the southern part of the study area, increasing in an upwind direction while for Cd and Pb, maximum soil concentrations were in the northern part of the study area. The Nemerow integrated pollution index revealed that soils were clean for Cd, lowly polluted for Fe, Pb, and Cu, and moderately polluted for Zn.

Keywords: Soil pollution, Aeolians, Soil contaminant origin, Soil contaminant mapping

-
1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Chaharmahal Va Bakhtiari Province, Iran.
 2. Postgraduate student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Chaharmahal Va Bakhtiari Province, Iran.

*: Corresponding author, Email: khnaderi@yahoo.com