

## پراکنش مکانی برخی از فلزات سنگین در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک در منطقه کفه مور، استان کرمان

محبوبه طیبی\*، مهدی نادری و جهانگرد محمدی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۲۲)

### چکیده

این پژوهش با هدف مطالعه چگونگی توزیع غلظت برخی فلزات سنگین در کلاس‌های مختلف اندازه‌ای ذرات خاک و بررسی تغییرات مکانی آنها در منطقه کفه مور، استان کرمان صورت گرفت. در این منطقه، معدن سنگ آهن گل‌گهر واقع شده است. برای این منظور ۱۲۰ نمونه خاک سطحی (۰ تا ۱۰ سانتی‌متر) به صورت مرکب و تصادفی برداشته شد و ذرات خاک در اندازه ۲ - ۰/۵، ۰/۲۵ - ۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵ - ۰/۰۷۵، ۰/۰۷۵ - ۰/۰۵ و کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر جدا و غلظت کل فلزات سنگین شامل آهن، منگنز، مس، روی، سرب و نیکل در هر کلاس پس از تیمار نمونه‌های خاک با اسید نیتریک ۴ نرمال توسط دستگاه جذب اتمی تعیین گردید و پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین به روش کریجینگ معمولی انجام شد. نتایج نشان دادند که با کاهش اندازه ذرات غلظت فلزات سنگین افزایش یافت. به طوری که میانگین غلظت در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۰/۰۵ برای آهن، منگنز، مس، روی، سرب و نیکل به ترتیب ۲/۱۳، ۱/۷۰، ۴/۷۹، ۲/۴۳، ۱/۴۲، ۳/۴۷ برابر بیشتر از میانگین غلظت در کلاس اندازه‌ای ۲ - ۰/۵ میلی‌متر بود. پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین به روش کریجینگ نیز نشان داد که با فاصله گرفتن از معدن فلزات سنگین کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، تغییرپذیری مکانی، فلزات سنگین، کریجینگ، کلاس اندازه ذرات خاک

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mahtayebi@yahoo.com

## مقدمه

در دهه‌های اخیر توسعه صنعت، کشاورزی و فعالیت‌هایی چون معدن‌کاری، ذوب فلزات و استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها در کشاورزی منجر به افزایش غلظت فلزات در خاک شده است (۶). فلزات سنگین یکی از مضرترین آلاینده‌های زیست محیطی هستند که در مجموع اثرات زیست محیطی آنها از اثرات زباله‌های آلی و مواد رادیواکتیو برای محیط زیست بیشتر است. (۲۳). به همین دلیل آلودگی خاک به فلزات سنگین به‌عنوان یکی از مشکلات زیست محیطی پیشروی بشر، مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است.

به‌دست آوردن اطلاعات ویژگی‌های خاک و وضعیت آلودگی آنها نیازمند عملیات صحرائی و آزمایشگاهی و همچنین صرف وقت و هزینه زیادی است، بنابراین اگر با تعداد محدودی نمونه‌برداری و اندازه‌گیری، به‌روشی امکان تعمیم به کل منطقه وجود داشته باشد، در وقت و هزینه‌ها صرفه‌جویی قابل توجهی صورت خواهد گرفت. در این زمینه روش‌های زمین‌آماری می‌تواند بسیار مؤثر باشد. در واقع یکی از راهکارهای تجزیه و تحلیل‌های مکانی داده‌های ژئوشیمیایی محیطی، استفاده از روش‌های میانمایی برای مطالعه الگوی توزیع مکانی این داده‌ها و تهیه نقشه‌های مورد نظر می‌باشد (۱۵).

کاربرد زمین‌آمار در خاکشناسی از اواخر دهه ۷۰ میلادی توسط کمپل آغاز شد (۱۰). در ایران زمین‌آمار اولین بار توسط حاج‌رسولی‌ها و همکاران به‌منظور تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی شوری خاک استفاده شد (۱۳). در سال‌های اخیر کاربرد این راهکار توسط پژوهشگران افزایش یافته است. به‌عنوان مثال کیسو و همکاران (۲۴)، خاندوزی و همکاران (۱۶)، لیسو و همکاران (۱۸)، ژائو و همکاران (۳۳)، مری‌ام و همکاران (۲۲)، لی و فنگ (۱۷)، یانگ و همکاران (۳۱) و رودری گویز و همکاران (۲۶) در مطالعات خود از زمین‌آمار برای تهیه نقشه‌های توزیع غلظت فلزات سنگین استفاده کردند.

از آنجا که اندازه ذرات خاک نقش اساسی در جذب، ظرفیت نگهداری آب، ساختمان، تغذیه گیاه و تثبیت فلزات

سنگین دارند بنابراین بررسی توزیع اندازه ذرات خاک بر ویژگی‌های جذبی آنها خاک بسیار مهم است (۲۱). همچنین فلزات سنگین به‌صورت ترجیحی جذب ذرات ریز می‌شوند بنابراین اطلاع از توزیع اندازه ذرات علاوه بر تعیین نقشه‌های آلودگی خاک، برای انجام عملیات اصلاحی ضروری است (۲۵). بیشتر مطالعات تجمع ترجیحی فلزات سنگین را در بخش ریز ذرات خاک نشان می‌دهند (۵ و ۲۰). این ذرات به‌دلیل سطح ویژه بالاتر و همچنین وجود کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن، منگنز و آلومینیوم دارای توانایی بیشتری در نگهداری فلزات سنگین می‌باشند (۸ و ۲۰). یاو و همکاران با بررسی اندازه ذرات مرتبط با فلزات سنگین در رسوبات معلق رود زرد به این نتیجه رسیدند که غلظت فلزات سنگین با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد بنابراین بیشتر آلودگی‌ها توسط ذرات معلق به دریای بوهای منتقل می‌شود (۳۲). سارلک نیز به بررسی اندازه ذرات خاک مرتبط با فلزات سنگین در خاک‌های زراعی اهواز پرداخت و نشان داد فلزات سنگین در اندازه ذرات کوچک‌تر افزایش می‌یابد (۲۷). در مطالعه انجام شده توسط مانژیویا و همکاران اثر توزیع اندازه ذرات رس و سیلت که اجزای بافت خاک هستند بر مقدار جذب مس، سرب و روی در یک خاک چرنوزوم بررسی شده است (۲۱). نتایج آنها نشان می‌دهد میزان جذب مس، سرب و روی به‌ترتیب در خاک‌های لومی رسی، لومی و شنی لومی کاهش می‌یابد. بنابراین با کاهش نسبت اجزا ریز خاک، جذب فلزات توسط خاک و دامنه تثبیت آنها بر روی سطح ذرات خاک کاهش می‌یابد. همچنین مطالعات محمودی و همکاران بر روی کلاس‌های مختلف اندازه‌ای ذرات خاک‌های سطحی جنوب شهر اصفهان نشان داد که با کاهش اندازه ذرات خاک، غلظت فلزات سنگین (روی، سرب و کادمیوم) افزایش می‌یابد (۲).

منطقه کفه مور استان کرمان دارای خاک‌های متنوع از لحاظ شوری و قلیائیت، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. همچنین از نظر فیزیوگرافی، توپوگرافی بسیار متنوع است. در این منطقه، معدن سنگ آهن گل‌هر واقع شده است که در حال

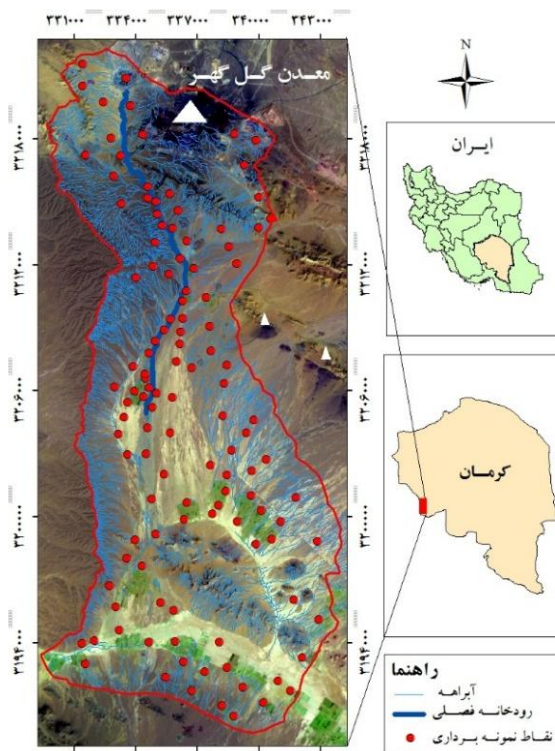
کل فلزات سنگین و تعیین تغییرات مکانی غلظت فلزات در کلاس‌های اندازه مختلف ذرات خاک می‌باشد.

## مواد و روش اجرا

### بررسی ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۲۹۵۳۳ هکتار در ۶۰ کیلومتری جنوب غرب سیرجان در مسیر جاده شیراز- سیرجان بین طول‌های جغرافیایی ۵۵° ۱۵' تا ۵۵° ۲۵' و عرض‌های جغرافیایی ۲۸° ۵۱' تا ۲۹° ۱۱' قرار گرفته است (شکل ۱). ناحیه معدنی سنگ آهن گل‌گهر در شمال آن واقع شده است. در این منطقه کشاورزی، باغداری و دامداری رواج دارد و بیشتر محصولات آن شامل پسته، گندم، جو، یونجه و زیتون می‌باشد. اقلیم منطقه مورد مطالعه خشک و بیابانی و میانگین بارندگی سالانه ۱۷۲ میلی‌متر، حداقل درجه حرارت ۱۲°C- و حداکثر آن ۴۲°C است. رژیم حرارتی منطقه ترمیک و رژیم رطوبتی آن اریدیک و جهت باد غالب در این ناحیه، جنوب غربی می‌باشد.

با پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، پهنه خاک‌ها و مناطق آلوده شده شناسایی و با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، کاربری اراضی، توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاع (DEM) و به روش هایپرکیوب (Latin Hypercube) محل نقاط نمونه‌برداری در محیط نرم‌افزار R مشخص گردید. روش هایپرکیوب یک روش آماری برای انتخاب تصادفی محل نمونه‌ها، براساس تنوع فاکتورهای مستقل محیطی است (۷). سپس ۱۲۰ نمونه خاک به صورت مرکب و از اختلاط ۴ نمونه خاک از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری از سطح خاک برداشته شد. برای تعیین محل دقیق نمونه‌برداری‌ها از دستگاه GPS استفاده گردید. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک کردن، توسط چکش پلاستیکی خرد و ذرات خاک در ۶ کلاس اندازه‌ای ۰/۵-۲، ۰/۵-۰/۲۵، ۰/۲۵-۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵، ۰/۰۷۵-۰/۰۵، ۰/۰۵-۰/۰۲۵ و کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر از طریق عملیات همزمان تکان دادن توسط دستگاه شیکر و ساطع نمودن امواج ماورای صوت توسط دستگاه تراسونیک به مدت یک ساعت و سپس،



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در کشور

### و استان کرمان

حاضر یکی از بزرگترین معادن روباز در سطح کشور می‌باشد و به‌طور گسترده مواد معدنی آن از عمقی بسیار پایین‌تر از تراز سطح آب زیرزمینی منطقه، استخراج می‌گردد. پراکنش آهن و فلزات سنگین موجود در کانی‌های آهن در طی فرآیند استخراج، استحصال و حمل منجر به آلودگی خاک، گیاهان زراعی و مرتعی مورد چرای حیوانات و آب‌های سطحی و زیرزمینی را شده و نگرانی‌هایی در مورد احتمال تأثیر بر سلامتی ساکنین منطقه به‌وجود آورده است. با توجه به نقش اندازه ذرات خاک در میزان فرسایش‌پذیری و انتقال ذرات خاک به‌همراه مواد آلوده کننده متصل به آنها، با باد و آب به مناطق دیگر می‌توان با تعیین پتانسیل هر یک از ذرات خاک در نگهداری فلزات سنگین و تعیین نقش آنها در بروز سمیت در محیط با اعمال مدیریت‌های مناسب نسبت به رفع مشکل اقدام نمود. بنابراین هدف اصلی از این مطالعه، تعیین توزیع غلظت

چنانچه این نسبت کمتر از ۲۵ گردد، نشان‌دهنده همبستگی مکانی قوی و اگر این نسبت بین ۲۵ تا ۷۵ باشد بیانگر همبستگی مکانی متوسط و مقادیر بزرگتر از ۷۵ نشان‌دهنده وابستگی مکانی ضعیف می‌باشد (۹). بعد از برآزش مدل به تغییرنما و تعیین پارامترهای مدل، برای بررسی اعتبار تغییرنما و درستی آن، مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی توسط روش کریجینگ جک نایف در نرم‌افزار Geoeas مقایسه شدند و شاخص‌های میانگین خطا و میانگین مربعات خطا و درصد میانگین مربعات خطا محاسبه شدند. در نهایت نقشه متغیرهای مورد بررسی در کلاس‌های اندازه‌ای تعیین شده به روش کریجینگ معمولی در ArcGIS9.2 رسم گردید.

## نتایج و بحث

### تجزیه و تحلیل اطلاعات آزمایشگاهی

خلاصه آماری غلظت کل فلزات آهن، منگنز، مس، روی، سرب و نیکل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در کلاس اندازه ذرات ۰/۵-۲، ۰/۵-۰/۲۵، ۰/۲۵-۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵، ۰/۰۷۵-۰/۰۵ و کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر در جدول (۱) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب تغییرات آهن در کلاس اندازه ذرات ۰/۵-۲، ۰/۵-۰/۲۵، ۰/۲۵-۰/۰۷۵، ۰/۰۷۵-۰/۰۵ میلی‌متر کمتر از ۵۰ درصد می‌باشد که بیانگر عدم تغییرپذیری زیاد این ویژگی در منطقه مورد مطالعه است. در بین فلزات سنگین، سرب دارای ضریب تغییرات بزرگتر از ۵۰ درصد در تمام کلاس‌های اندازه ذرات و منگنز دارای ضریب تغییرات کوچک‌تر از ۵۰ درصد در تمام کلاس‌های اندازه ذرات می‌باشند. ضریب تغییرات بزرگتر از ۵۰ درصد برای روی در کلاس اندازه ذرات ۰/۲۵-۰/۰۵ میلی‌متر، برای نیکل در کلاس اندازه ذرات ۰/۵-۲، ۰/۰۷۵-۰/۰۲۵ میلی‌متر و برای مس در کلاس اندازه ذرات ۰/۵-۲، ۰/۰۲۵-۰/۰۷۵، ۰/۰۷۵-۰/۰۵ میلی‌متر و کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر وجود دارد. در حالی که مس در کلاس اندازه ۰/۰۷۵-۰/۰۵ میلی‌متر دارای بیشترین ضریب تغییرات (۱۰۰/۲۹) و منگنز در کلاس اندازه

غریبال نمودن توسط الک‌های با اندازه‌های مورد نظر جدا شدند. غلظت کل فلزات سنگین شامل Ni، Pb، Zn، Mn، Cu، Fe پس از تیمار نمونه‌های خاک با اسید نیتریک ۴ نرمال به روش اسپوزیتو و همکاران با استفاده از دستگاه جذب اتمی (GBC، ۹۳۲) اندازه‌گیری شد (۲۸).

به‌منظور ارزیابی اثر کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک بر غلظت فلزات سنگین در خاک و تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار SAS ۹ استفاده گردید. آنالیز واریانس به صورت طرح کاملاً تصادفی با ۶ تیمار (شش کلاس اندازه ذرات خاک) و درجه آزادی ۵ و ۱۲۰ تکرار در نظر گرفته شد. مقایسه آماری میانگین غلظت فلزات با استفاده از آزمون LSD فیشر در سطح احتمال ۹۵ درصد و بررسی توزیع آماری داده‌ها به وسیله آزمون کولموگروف-اسمیرنوف انجام شد. برای تعیین الگوی تغییرپذیری مکانی غلظت فلزات در کلاس‌های اندازه ذرات خاک تغییرنمای داده‌ها محاسبه و مدل مناسب به آن برآزش داده شد. هدف اصلی از محاسبه واریوگرام این است که بتوان تغییرپذیری متغیر را نسبت به فاصله مکانی یا زمانی شناخت، برای این کار لازم است مجموع مربع تفاضل زوج نقاطی که به فاصله معلوم h از یکدیگر قرار دارند محاسبه و در مقابل h رسم گردد (۱۲) براساس معادله [۱].

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad [1]$$

که در این معادله N(h) تعداد جفت نمونه‌های جدا شده در فاصله گام h، مقدار متغیر اندازه‌گیری شده در نقطه i و Z(x<sub>i</sub>+h) مقدار متغیر اندازه‌گیری شده در موقعیت مکانی i+h می‌باشد (۱). برای انجام بررسی تغییرنمای هر یک از متغیرها، بعد از نرمال‌سازی داده‌ها و بررسی همسانگردی و ناهمسانگردی تغییرات مکانی متغیرها، تغییرنمای هر یک از متغیرها توسط نرم‌افزار Variowin ۲/۲۱ رسم گردید و مناسب‌ترین مدل به آنها برآزش داده شد و پارامترهای آستانه، اثر قطعه‌ای و دامنه تأثیر به دست آمد. به‌منظور بررسی وضعیت ساختار مکانی، از معیار نسبت همبستگی که از تقسیم اثر قطعه‌ای به آستانه (C<sub>0</sub>/C+C<sub>0</sub>) محاسبه می‌گردد، استفاده شد.

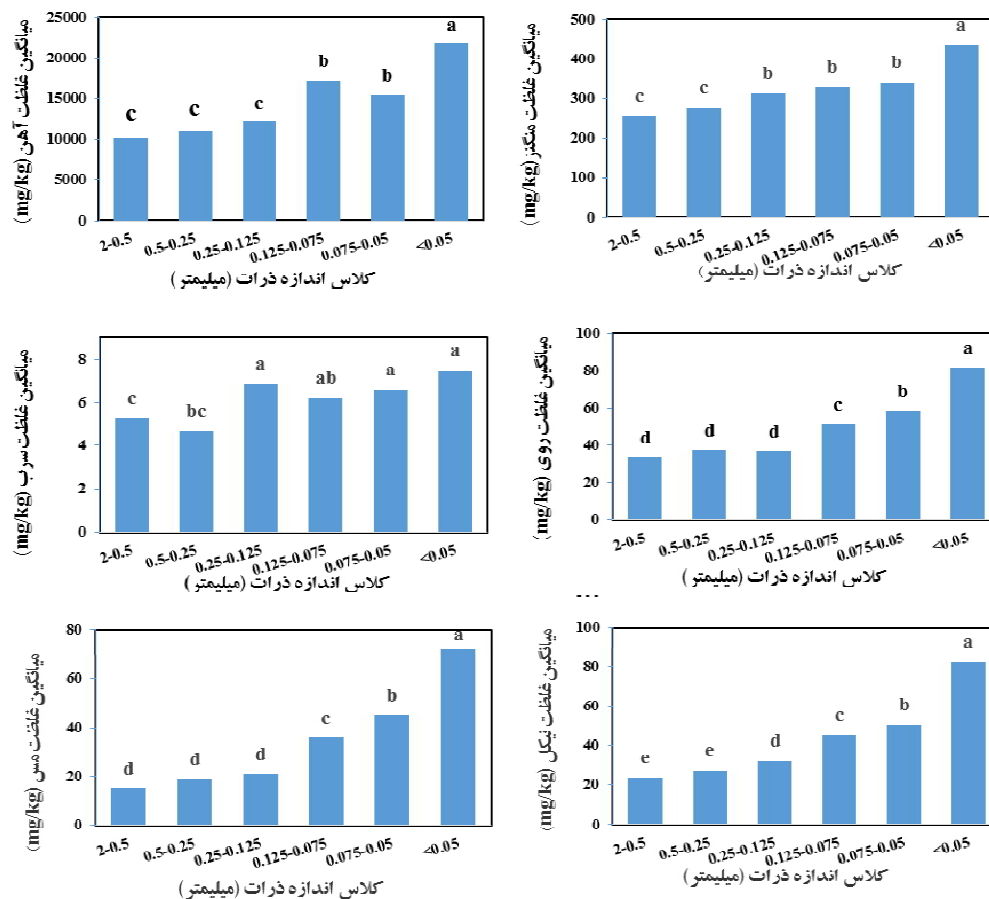
جدول ۱. خلاصه آماری غلظت کل آهن، منگنز، مس، روی، سرب و نیکل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات (میلی‌متر)

| متغیر                     | حداقل   | حداکثر   | میانگین  | میان     | چولگی | کشیدگی | انحراف استاندارد | ضریب تغییرات (%) |
|---------------------------|---------|----------|----------|----------|-------|--------|------------------|------------------|
| Fe <sub>2-0.5</sub>       | ۱۱۴۵/۴۲ | ۲۲۵۹۵    | ۱۰۲۱۸/۷۷ | ۹۴۳۲/۲۵  | ۰/۸۹  | ۰/۴۳   | ۴۹۳۷/۸۵          | ۴۸/۳۲            |
| Fe <sub>0.5-0.25</sub>    | ۱       | ۲۲۶۹۷/۵۰ | ۱۰۹۲۲/۸۹ | ۱۱۴۵۳/۷۵ | ۰/۱۲  | -۰/۲۷  | ۵۰۲۰/۵۱          | ۴۵/۹۶            |
| Fe <sub>0.25-0.125</sub>  | ۲۳۷۵    | ۲۰۶۲۵    | ۱۲۱۳۱/۱۳ | ۱۲۲۶۸/۷۵ | ۰     | -۰/۶۱  | ۴۴۹۵/۸۶          | ۳۷/۰۶            |
| Fe <sub>0.125-0.075</sub> | ۴۵۴۲/۵۰ | ۳۰۹۸۸/۳۰ | ۱۵۴۰۵    | ۱۵۲۹۶    | ۰/۴۳  | ۰/۵۴   | ۵۴۰۹/۴۵          | ۳۵/۱۱            |
| Fe <sub>0.075-0.05</sub>  | ۱۷۲۵    | ۳۷۲۶۳/۴۲ | ۱۵۴۷۸/۹۷ | ۱۴۵۹۵    | ۰/۷۰  | ۰/۴۹   | ۶۸۶۱/۴۲          | ۴۴/۳۳            |
| Fe <sub>&lt;0.05</sub>    | ۶۰۹۲/۵۰ | ۶۸۱۹۳    | ۲۱۸۷۶/۵۸ | ۱۹۷۹۰    | ۲/۱۱  | ۴/۶۴   | ۱۲۸۱۳/۸۹         | ۵۸/۵۷            |
| Mn <sub>2-0.5</sub>       | ۵۸/۴۵   | ۶۹۷/۵۰   | ۲۵۶/۳۸   | ۲۳۰/۴۸   | ۱/۲۰  | ۱/۷۰   | ۱۱۰/۶۶           | ۴۳/۱۶            |
| Mn <sub>0.5-0.25</sub>    | ۲۳/۷۰   | ۹۳۱/۸۹   | ۲۷۷/۵۵   | ۲۵۴/۳۵   | ۱/۴۹  | ۴/۶۶   | ۱۳۱/۳۴           | ۴۷/۳۲            |
| Mn <sub>0.25-0.125</sub>  | ۱۰۳/۴۵  | ۹۹۹/۱۰   | ۳۱۴/۰۵   | ۳۱۶/۶۹   | ۲/۰۲  | ۷/۲۴   | ۱۴۳/۵۵           | ۴۵/۷۱            |
| Mn <sub>0.125-0.075</sub> | ۱۵۵/۹۰  | ۶۶۲      | ۳۲۷/۵۹   | ۳۳۰/۴۵   | ۰/۶۵  | -۰/۳۴  | ۱۲۳/۸۲           | ۳۷/۸۰            |
| Mn <sub>0.075-0.05</sub>  | ۱۱۱/۹۵  | ۹۶۰/۲۷   | ۳۴۰/۷۸   | ۳۲۴      | ۱/۵۱  | ۲/۹۴   | ۱۶۶/۸۹           | ۴۸/۹۷            |
| Mn <sub>&lt;0.05</sub>    | ۴۳/۲۰   | ۷۵۳/۶۰   | ۴۳۶/۲۹   | ۴۶۷/۴۰   | -۰/۸۶ | ۰/۹۲   | ۱۱۶/۱۰           | ۲۶/۶۱            |
| Cu <sub>2-0.5</sub>       | ۱/۱۱    | ۵۸/۵۰    | ۱۵/۰۷    | ۱۲/۹۵    | ۱/۸۹  | ۵/۳۴   | ۹/۰۳             | ۵۹/۹۵            |
| Cu <sub>0.5-0.25</sub>    | ۰/۱     | ۱۳۹/۸۰   | ۱۸/۹۴    | ۱۶/۳۵    | ۵/۳۹  | ۴۰/۵۲  | ۱۴/۶۷            | ۷۷/۴۶            |
| Cu <sub>0.25-0.125</sub>  | ۱       | ۴۹/۸۵    | ۲۱/۰۶    | ۱۸/۹۳    | ۰/۷۹  | ۰/۳۴   | ۱۰/۰۱            | ۴۷/۵۵            |
| Cu <sub>0.125-0.075</sub> | ۱۰      | ۱۷۵      | ۳۵/۷۷    | ۲۶/۸۵    | ۲/۶۷  | ۹/۵۹   | ۲۴/۴۳            | ۶۸/۲۸            |
| Cu <sub>0.075-0.05</sub>  | ۱۳/۳۵   | ۳۲۷/۸۰   | ۴۵/۱۷    | ۲۹/۸۳    | ۳/۸۸  | ۱۸/۵۸  | ۴۵/۳۱            | ۱۰۰/۲۹           |
| Cu <sub>&lt;0.05</sub>    | ۲۲/۱۵   | ۲۴۹/۵۰   | ۷۲/۱۶    | ۵۳/۷۸    | ۱/۹۰  | ۳/۱۴   | ۴۶/۰۹            | ۶۳/۸۷            |
| Zn <sub>2-0.5</sub>       | ۹/۱۳    | ۹۰/۹۵    | ۳۳/۵۶    | ۲۹/۴۰    | ۱/۳۷  | ۲/۱۲   | ۱۵/۸۳            | ۴۷/۱۶            |
| Zn <sub>0.5-0.25</sub>    | ۴/۶۵    | ۳۶۶/۷۸   | ۳۷/۴۴    | ۳۰/۱۵    | ۷/۳۴  | ۶۵/۴۷  | ۳۵/۳۰            | ۹۴/۲۸            |
| Zn <sub>0.25-0.125</sub>  | ۱۱/۸۰   | ۷۶/۶۵    | ۳۷/۱۷    | ۳۴/۹۰    | ۰/۵۷  | ۰/۲۳   | ۱۲/۵۸            | ۳۳/۸۵            |
| Zn <sub>0.125-0.075</sub> | ۱۹/۹۰   | ۱۱۹/۱۳   | ۵۱/۶۵    | ۴۸/۹۸    | ۱/۴۵  | ۳/۳۴   | ۱۶/۲۱            | ۳۱/۳۹            |
| Zn <sub>0.075-0.05</sub>  | ۱۳/۸۰   | ۹۹/۲۰    | ۵۸/۶۱    | ۵۵/۵۸    | ۰/۴۰  | ۰/۲۹   | ۱۷/۰۱            | ۲۹/۰۲            |
| Zn <sub>&lt;0.05</sub>    | ۳۴/۴۵   | ۳۹۵/۴۰   | ۸۱/۶۷    | ۷۹/۸۵    | ۶/۴۰  | ۵۷/۴۰  | ۳۴/۵۸            | ۴۲/۳۴            |
| Pb <sub>2-0.5</sub>       | ۰/۱۲    | ۴۵/۹۵    | ۵/۲۷     | ۳/۷۳     | ۴/۲۷  | ۲۳/۲۳  | ۶/۱۸             | ۱۱۷/۴            |
| Pb <sub>0.5-0.25</sub>    | ۰/۱     | ۱۹/۹۵    | ۴/۶۶     | ۳/۹۳     | ۰/۸۵  | ۰/۳۴   | ۴/۳۲             | ۹۲/۶۶            |
| Pb <sub>0.25-0.125</sub>  | ۱       | ۲۶/۴۰    | ۶/۸۸     | ۶/۳۰     | ۱/۲۳  | ۲/۶۲   | ۴/۸۸             | ۷۰/۹۳            |
| Pb <sub>0.125-0.075</sub> | ۰/۱۰    | ۱۷/۳۵    | ۶/۱۹     | ۶/۵۰     | ۰/۴۳  | -۰/۱۲  | ۳/۷۳             | ۶۰/۳۲            |
| Pb <sub>0.075-0.05</sub>  | ۰/۱۱    | ۴۱       | ۶/۵۹     | ۵/۷۵     | ۲/۴۲  | ۱۰/۶۲  | ۵/۷۱             | ۸۶/۶۷            |
| Pb <sub>&lt;0.05</sub>    | ۰/۱۰    | ۱۹/۷۰    | ۷/۴۹     | ۵/۳۵     | ۰/۶۹  | -۰/۸۸  | ۵/۸۰             | ۷۷/۴۳            |
| Ni <sub>2-0.5</sub>       | ۵/۲۵    | ۸۷/۱۵    | ۲۳/۶۹    | ۲۰/۶۸    | ۲/۴۳  | ۸/۱۱   | ۱۳/۱۸            | ۵۵/۶۴            |
| Ni <sub>0.5-0.25</sub>    | ۱/۲۰    | ۹۵/۰۵    | ۲۷/۵۳    | ۲۵/۱۳    | ۱/۹۱  | ۵/۱۵   | ۱۴/۹۵            | ۵۴/۳۱            |
| Ni <sub>0.25-0.125</sub>  | ۱/۸۰    | ۸۴/۹۵    | ۳۲/۲۸    | ۳۱/۵۰    | ۰/۷۰  | ۲/۳۲   | ۱۲/۷۱            | ۳۹/۳۹            |
| Ni <sub>0.125-0.075</sub> | ۵/۱۰    | ۹۴       | ۴۵/۱۴    | ۴۵/۱۸    | ۰/۰۷  | ۰/۶۵   | ۱۶/۶۲            | ۳۶/۸۳            |
| Ni <sub>0.075-0.05</sub>  | ۹       | ۹۳/۷۰    | ۵۰/۵۹    | ۵۲/۶۰    | -۰/۴۵ | ۰/۵۴   | ۱۷/۰۷            | ۳۳/۷۴            |
| Ni <sub>&lt;0.05</sub>    | ۳۷/۰۵   | ۱۴۹/۳۰   | ۸۲/۲۷    | ۸۲/۱۸    | ۰/۳۳  | -۰/۰۹  | ۲۱/۹۸            | ۲۶/۷۲            |

کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر وجود داشت (جدول ۱) که نشان می‌دهد با کاهش اندازه ذرات غلظت فلزات افزایش می‌یابد، البته برای سرب نوساناتی مشاهده گردید و کمترین غلظت در

ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر دارای کمترین ضریب تغییرات (۲۶/۶۱) می‌باشد.

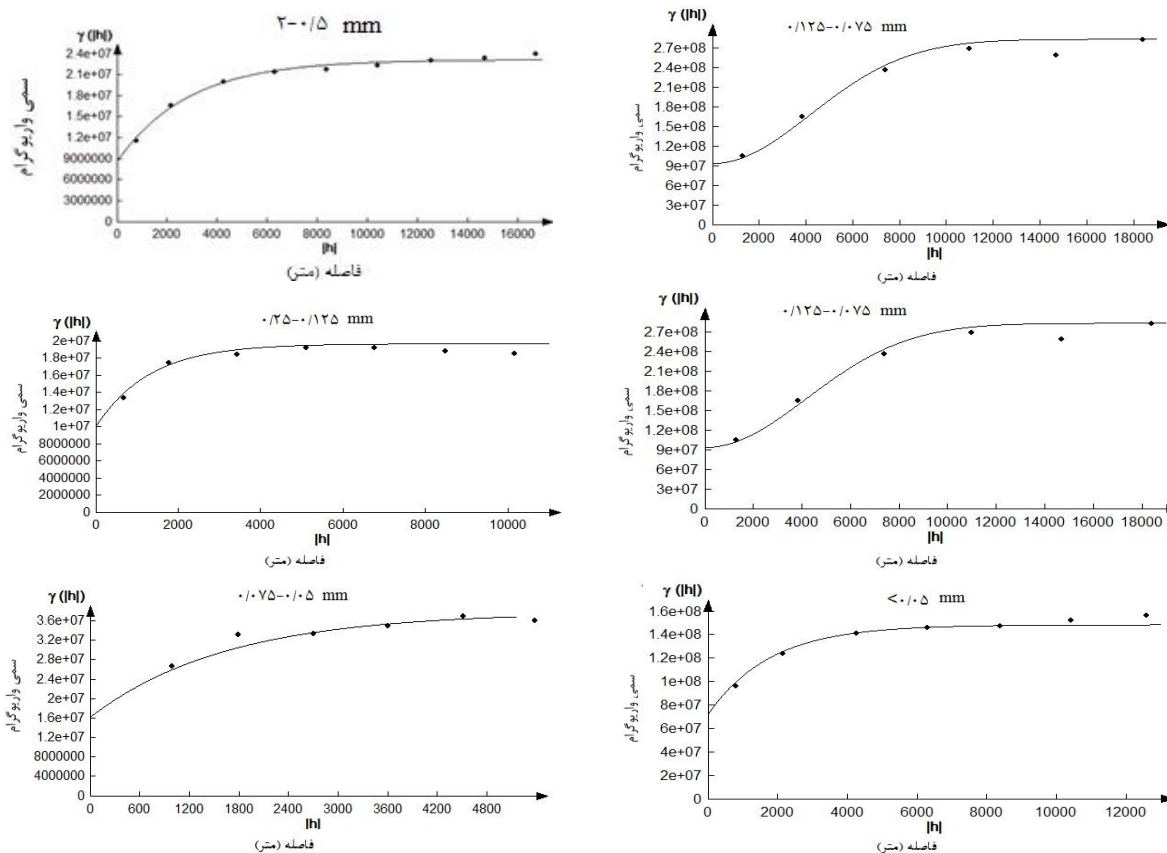
حداکثر میانگین برای تمامی فلزات در کلاس ذرات ریز



شکل ۲. میانگین غلظت کل فازات سنگین در کلاس‌های مختلف اندازه‌های ذرات خاک (ستون‌های دارای حروف مشترک از نظر آماری در سطح احتمال آماری ۵ درصد براساس آزمون LSD فیشر دارای اختلاف معنی‌دار نیستند)

اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بین کلاس‌های اندازه‌های ۲-۰/۵ و ۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر و ۰/۲۵-۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵ و ۰/۰۷۵-۰/۰۵ وجود ندارد. برای مس و روی بین کلاس‌های اندازه‌های ۲-۰/۵، ۰/۲۵-۰/۱۲۵ و ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵ میلی‌متر و همچنین برای سرب در بین کلاس‌های اندازه‌های ۲-۰/۵ و ۰/۲۵-۰/۱۲۵ میلی‌متر، کلاس‌های اندازه‌های ۰/۲۵-۰/۱۲۵ و ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵ و کلاس‌های اندازه‌های ۰/۲۵-۰/۱۲۵ میلی‌متر اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. برای نیکل نیز در بین کلاس‌های اندازه‌های ۲-۰/۵ و ۰/۲۵-۰/۱۲۵ میلی‌متر وجود ندارد. (شکل ۲). محمودی و همکاران با مطالعه خاک‌های آلوده منطقه جنوب شهر اصفهان نیز گزارش کردند که میانگین

کلاس اندازه ۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر به‌دست آمد. نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد که تفاوت کلاس‌های اندازه ذرات خاک از نظر غلظت کل عناصر سنگین آهن، منگنز، مس، روی، سرب و نیکل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) معنی‌دار است. مقایسه آماری میانگین غلظت فلزات با استفاده از آزمون LSD فیشر در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد میانگین غلظت تمامی فلزات مورد مطالعه در کلاس ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری با سایر کلاس‌های اندازه ذرات داشت. مقایسه میانگین غلظت آهن نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین کلاس‌های اندازه‌های ۲-۰/۵، ۰/۲۵-۰/۱۲۵ و ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵ میلی‌متر و بین کلاس‌های اندازه‌های ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵ و ۰/۰۷۵-۰/۰۵ وجود ندارد، برای منگنز نیز



شکل ۳. تغییرنمای آهن در کلاس‌های مختلف اندازه‌ای ذرات خاک

### توزیع مکانی فلزات سنگین در کلاس‌های مختلف اندازه ذرات خاک

برای تعیین توزیع مکانی غلظت فلزات سنگین در کلاس‌های اندازه ذرات خاک ابتدا نرمال بودن داده‌ها بررسی گردید. با توجه به نتایج آماری جدول (۱) و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف تنها توزیع آهن در کلاس اندازه ذرات ۰/۲۵-۰/۱۲۵، ۰/۰۷۵-۰/۰۵ و توزیع نیکل در کلاس اندازه ذرات ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵ و کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر نرمال بود و سایر فلزات از توزیع نرمال برخوردار نبودند. همچنین قبل از اقدام به مدل‌سازی تغییرنا وجود و عدم وجود روند برای هر یک از فلزات در هر ۶ کلاس اندازه ذرات مورد بررسی قرارگرفت و مدل‌های رگرسیونی و ضریب همبستگی هر یک محاسبه گردید. نتایج نشان داد که برای هیچ یک از فلزات در هر ۶ کلاس اندازه ذرات روند خاصی وجود ندارد. پس از روند، اقدام به بررسی ناهمسان‌گردی در ساختار و

غلظت فلزات روی و سرب در کلاس ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری با سایر کلاس‌های اندازه ذرات دارد اما، میانگین غلظت کادمیوم در کلاس‌های اندازه‌ای مختلف ذرات خاک اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصدی از خود نشان نداد (۲). دیگر محققین در سایر نقاط نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. وی و همکاران غلظت فلزات سنگین را در کلاس‌های مختلف اندازه‌ای ذرات خاک را بررسی و بیان نمودند که بیشترین غلظت فلزات سنگین در جز کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر وجود دارد. یاو و همکاران (۳۲) نشان دادند که ۷۸ تا ۸۲ درصد فلزات سنگین در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۰/۰۱۶ میلی‌متر تجمع یافتند (۳۰). بررسی‌های هرنگرن و همکاران و آکوستا و همکاران نیز نشان داد که بیشترین غلظت فلزات سنگین در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۰/۰۱۶ میلی‌متر وجود داشته است (۴ و ۱۴).

اندازه نمونه انتخابی از مجموعه داده‌های اصلی به اندازه کافی بزرگ بوده است که بتواند خصوصیات کل داده‌های اصلی را آشکار سازد. مومنی و لوپز-گرانادوز و همکاران نیز نتایج مشابهی به دست آورده‌اند (۳ و ۱۹). برای بررسی وضعیت ساختار مکانی، از معیار درصد نسبت همبستگی که از تقسیم اثر قطعه‌ای به آستانه ( $C_0/C + C_0$ ) محاسبه می‌گردد، استفاده شد. مگنز در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر، مس در کلاس اندازه‌ای ۰/۰۷۵-۰/۱۲۵، ۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر و سرب در کلاس اندازه‌ای ۰/۱۲۵-۰/۲۵ میلی‌متر دارای همبستگی مکانی قوی می‌باشند و سایر متغیرها دارای همبستگی متوسط می‌باشند. همچنین بررسی تغییرنا نشان می‌دهد که دامنه تأثیر تغییرنا از حدود ۲۵۷۹/۵۵ متر برای نیکل در کلاس اندازه‌ای ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵ تا حدود ۱۰۷۶۵/۵ متر برای مس در کلاس اندازه‌ای ۰/۲۵-۰/۵ در نوسان می‌باشد.

به‌طور کلی دامنه تأثیر، فاصله‌ای است که در ماورای آن نمونه‌ها برهم تأثیری نداشته و یا وابستگی نشان نمی‌دهند و آنها را می‌توان مستقل از یکدیگر فرض نمود. در واقع هر چه دامنه تأثیر بزرگتر باشد ساختار مکانی گسترده‌تر است و می‌توان با استفاده از داده‌های فواصل دورتر برای تخمین متغیر مورد نظر با به‌کارگیری روش‌های زمین‌آماری استفاده کرد به‌عبارت دیگر، هر چه این دامنه گسترده‌تر باشد، به تعداد نمونه کمتری برای تخمین نیاز است. می‌توان از پارامتر دامنه به‌عنوان شاخصی برای تعیین کوچک‌ترین واحد مناسب برای نقشه‌برداری ویژگی‌های مکانی استفاده کرد (۱۲). همچنین مقایسه دامنه‌ها در هر کلاس اندازه‌ای نشان داد که دامنه تغییرپذیری هر در کلاس ذرات ریزتر تا حدودی بیشتر از ذرات درشت‌تر می‌باشد که محمودی و همکاران این امر را به دلیل پدیده ترقیق اتمسفری و نقش باد در گسترش و پراکنده نمودن ذرات ریزتر و حمل آن تا مسافت‌های بیشتر در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر می‌دانند (۲).

با توجه به اینکه غلظت فلزات سنگین در سطح هر منطقه

الگوی تغییرات مکانی از طریق محاسبه و تحلیل تغییرنا شد. که تحلیل کیفی تغییرنا بیانگر توزیع مکانی به نسبت همسان‌گرد همه متغیرهای مورد مطالعه بود. سپس برای تخمین ویژگی‌های خاک با روش کریجینگ برای هر ویژگی، مناسب‌ترین مدل تغییرنا انتخاب و برازش داده شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که تغییرناهای آهن در کلاس اندازه‌ای ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵، روی در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر از مدل گوسی، مگنز در کلاس اندازه ذرات ۰/۵-۲، مس در کلاس اندازه‌ای ۰/۲۵-۰/۵، ۰/۵-۲، ۰/۱۲۵-۰/۲۵ میلی‌متر، روی در کلاس اندازه‌ای ۰/۰۷۵-۰/۲۵ میلی‌متر، سرب در کلاس اندازه‌ای ۰/۲۵-۰/۵ میلی‌متر و نیکل در کلاس اندازه ۰/۵-۲ میلی‌متر از مدل کروی و سایر ویژگی‌ها از مدل نمایی پیروی می‌نمایند (جدول ۲) مری‌ام و همکاران نیز برای بررسی تغییرات مکانی عناصر سنگین نیکل و سرب از مدل نمایی و عناصر کبالت، کادمیوم، سرب، کروم و مس از مدل گوسی استفاده کردند (۲۲). ژائو و همکاران نیز مدل کروی را برای تعیین تغییرات مکانی عناصر کادمیوم، نیکل، سرب و مدل نمایی را برای تعیین تغییرات مکانی عناصر مس، و روی توصیه نمودند (۳۳).

اثر قطعه‌ای برای آهن و مگنز در کلاس اندازه‌ای ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵ میلی‌متر، مس و نیکل در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر، روی در کلاس اندازه‌ای ۰/۵-۲ میلی‌متر و سرب در کلاس اندازه‌ای ۰/۰۷۵-۰/۰۵ میلی‌متر بیشتر از سایر پارامترها می‌باشد، این امر نشان دهنده آن است که فلزات مذکور در این کلاس‌های اندازه‌ای دارای تغییرپذیری مکانی زیادی در فواصل نزدیک هستند. اثر قطعه‌ای بزرگ نشان‌دهنده آن است که نمونه برداری اضافی متغیر مورد نظر در فواصل کوتاه‌تر و به مقدار بیشتر لازم می‌باشد تا وابستگی مکانی را تعیین کند و در نتیجه نقشه‌هایی با کیفیت و دقت بالاتری را ارائه دهد. در اکثر ویژگی‌های خاک، آستانه (Sill)، تخمین خوبی از واریانس ارائه می‌دهد که نمایانگر برقراری فرضیات پایایی در داده‌هاست. این امر نشان‌دهنده آن است که

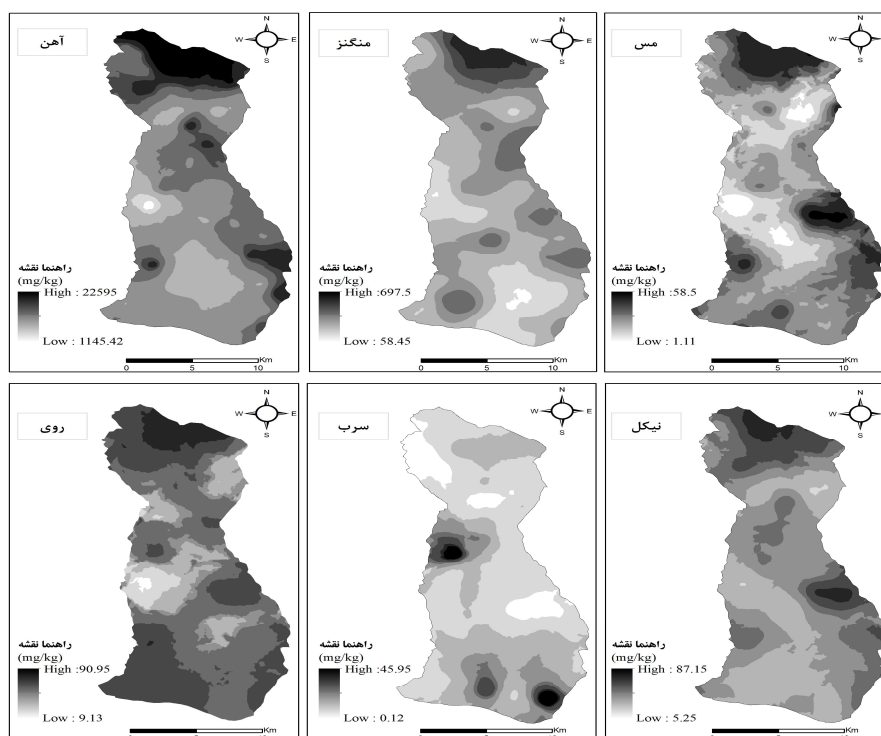


جدول ۲. پارامترهای تغییرنمای آهن، منگنز، مس، روی، سرب و نیکل در کلاس‌های اندازه‌ای ۲-۰/۵، ۰/۵-۰/۲۵، ۰/۲۵-۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵-۰/۰۷۵، ۰/۰۷۵-۰/۰۵ و کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر

| ویژگی خاک                 | مدل   | اثرقطعه ای (C.)      | دامنه (m) | آستانه (C)           | درصد همبستگی مکانی | کلاس وابستگی مکانی |
|---------------------------|-------|----------------------|-----------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Fe <sub>۲-۰/۵</sub>       | نمایی | ۸/۷۵×۱۰ <sup>۶</sup> | ۸۵۰۰      | ۱/۴۵×۱۰ <sup>۷</sup> | ۳۷/۶۳              | متوسط              |
| Fe <sub>۰/۵-۰/۲۵</sub>    | نمایی | ۱/۳×۱۰ <sup>۷</sup>  | ۵۹۷۸      | ۱/۰۷×۱۰ <sup>۷</sup> | ۵۴/۸۵              | متوسط              |
| Fe <sub>۰/۲۵-۰/۱۲۵</sub>  | نمایی | ۱/۰۹×۱۰ <sup>۷</sup> | ۳۸۹۲/۵۳   | ۹/۶۶×۱۰ <sup>۶</sup> | ۵۳/۰۱              | متوسط              |
| Fe <sub>۰/۱۲۵-۰/۰۷۵</sub> | گوسی  | ۹/۴۷×۱۰ <sup>۷</sup> | ۱۰۲۰۱/۷   | ۱/۹×۱۰ <sup>۸</sup>  | ۳۳/۲۶              | متوسط              |
| Fe <sub>۰/۰۷۵-۰/۰۵</sub>  | نمایی | ۱/۵×۱۰ <sup>۷</sup>  | ۴۹۳۴/۸۸   | ۲/۱۶×۱۰ <sup>۷</sup> | ۴۰/۹۸              | متوسط              |
| Fe <sub>&lt;۰/۰۵</sub>    | نمایی | ۷/۲۷×۱۰ <sup>۷</sup> | ۵۳۰۶/۱۷   | ۷/۶۳×۱۰ <sup>۷</sup> | ۴۸/۷۹              | متوسط              |
| Mn <sub>۲-۰/۵</sub>       | کروی  | ۴۹۴۰                 | ۴۹۴۰      | ۶۸۹۰                 | ۴۱/۷۵              | متوسط              |
| Mn <sub>۰/۵-۰/۲۵</sub>    | نمایی | ۹۸۸۹/۲               | ۵۱۷۰      | ۶۷۲۲/۴               | ۵۹/۵۳              | متوسط              |
| Mn <sub>۰/۲۵-۰/۱۲۵</sub>  | نمایی | ۵۳۶۹/۷               | ۴۹۱۶/۵    | ۱۵۱۴۱/۷              | ۲۶/۱۷              | متوسط              |
| Mn <sub>۰/۱۲۵-۰/۰۷۵</sub> | نمایی | ۱۰۲۸۲/۷              | ۳۸۵۲/۲    | ۴۷۹۶/۸               | ۶۸/۱۹              | متوسط              |
| Mn <sub>۰/۰۷۵-۰/۰۵</sub>  | نمایی | ۷۷۴۲/۹۳              | ۶۳۸۲/۲    | ۱۴۸۳۴/۴              | ۳۴/۲۹              | متوسط              |
| Mn <sub>&lt;۰/۰۵</sub>    | نمایی | ۲۴۴۸/۶               | ۳۸۹۵/۴۴   | ۹۴۷۷/۰۷              | ۲۰/۵۳              | قوی                |
| Cu <sub>۲-۰/۵</sub>       | کروی  | ۴۸/۶                 | ۲۷۴۶/۸۸   | ۲۹/۷۵                | ۶۲/۰۳              | متوسط              |
| Cu <sub>۰/۵-۰/۲۵</sub>    | کروی  | ۵۳/۶۹                | ۱۰۷۶۵/۵   | ۱۶۵/۳۲               | ۲۴/۵۱              | قوی                |
| Cu <sub>۰/۲۵-۰/۱۲۵</sub>  | کروی  | ۳۱/۷۳                | ۵۳۸۱/۷۶   | ۶۳/۱                 | ۳۳/۴۶              | متوسط              |
| Cu <sub>۰/۱۲۵-۰/۰۷۵</sub> | نمایی | ۱۳۰/۱۶               | ۵۶۳۳/۰۴   | ۴۳۰/۲۸               | ۲۳/۲۲              | قوی                |
| Cu <sub>۰/۰۷۵-۰/۰۵</sub>  | کروی  | ۴۴۶/۱۱               | ۹۵۲۰      | ۱۴۲۷/۵۸              | ۲۳/۸۱              | قوی                |
| Cu <sub>&lt;۰/۰۵</sub>    | نمایی | ۷۳۷/۶۶               | ۵۵۵۴/۳۲   | ۱۰۵۴/۶۸              | ۴۱/۱۶              | متوسط              |
| Zn <sub>۲-۰/۵</sub>       | کروی  | ۱۷۴/۶۴               | ۳۱۸۷/۸    | ۷۲/۰۴                | ۷۰/۵۱              | متوسط              |
| Zn <sub>۰/۵-۰/۲۵</sub>    | کروی  | ۱۴۵/۶۴               | ۸۴۸۹/۸۷   | ۹۵۱/۳۸               | ۱۳/۲۸              | قوی                |
| Zn <sub>۰/۲۵-۰/۱۲۵</sub>  | نمایی | ۹۴/۴۳                | ۳۰۸۹/۲۴   | ۶۵/۳۱                | ۵۹/۱۱              | متوسط              |
| Zn <sub>۰/۱۲۵-۰/۰۷۵</sub> | نمایی | ۱۵۴/۲۹               | ۳۵۹۱/۸۷   | ۸۲/۶۶                | ۶۵/۱۲              | متوسط              |
| Zn <sub>۰/۰۷۵-۰/۰۵</sub>  | نمایی | ۹۱/۵۵                | ۳۷۱۲/۸    | ۱۸۳                  | ۳۳/۳۵              | متوسط              |
| Zn <sub>&lt;۰/۰۵</sub>    | گوسین | ۱۲۱/۹۶               | ۲۷۲۵/۶۸   | ۹۷۴/۲                | ۱۱/۱۳              | قوی                |
| Pb <sub>۲-۰/۵</sub>       | نمایی | ۱۵/۰۱                | ۷۲۰۰      | ۱۹/۰۴                | ۴۴/۰۸              | متوسط              |
| Pb <sub>۰/۵-۰/۲۵</sub>    | کروی  | ۶/۳۷                 | ۴۹۷۹/۳۳   | ۱۱/۴۶                | ۳۵/۷۳              | متوسط              |
| Pb <sub>۰/۲۵-۰/۱۲۵</sub>  | نمایی | ۶/۱۷                 | ۳۹۰۶/۱    | ۳۶/۱۵                | ۱۴/۵۸              | قوی                |
| Pb <sub>۰/۱۲۵-۰/۰۷۵</sub> | نمایی | ۶/۴۴                 | ۶۷۱۰      | ۶/۹۹                 | ۴۷/۹۵              | متوسط              |
| Pb <sub>۰/۰۷۵-۰/۰۵</sub>  | نمایی | ۱۸/۸۶                | ۴۰۵۰      | ۱۱/۴۲                | ۶۲/۲۹              | متوسط              |
| Pb <sub>&lt;۰/۰۵</sub>    | نمایی | ۱۵/۹۹                | ۲۹۰۱/۴۴   | ۱۶/۵۱                | ۴۹/۲               | متوسط              |
| Ni <sub>۲-۰/۵</sub>       | کروی  | ۹۷/۳۱                | ۳۴۸۰      | ۷۱/۳۱                | ۵۷/۷۱              | متوسط              |
| Ni <sub>۰/۵-۰/۲۵</sub>    | نمایی | ۱۳۷/۷۶               | ۵۵۶۴      | ۹۸/۸۵                | ۵۸/۲۲              | متوسط              |
| Ni <sub>۰/۲۵-۰/۱۲۵</sub>  | نمایی | ۱۰۴/۰۸               | ۵۹۹۲/۸    | ۷۰/۸۸                | ۵۹/۴۹              | متوسط              |
| Ni <sub>۰/۱۲۵-۰/۰۷۵</sub> | نمایی | ۱۳۱/۴۳               | ۲۵۷۹/۵۵   | ۱۳۶/۶۹               | ۴۹/۰۲              | متوسط              |
| Ni <sub>۰/۰۷۵-۰/۰۵</sub>  | نمایی | ۱۹۴/۹۵               | ۳۶۱۸/۶    | ۸۶/۳۵                | ۶۹/۳۰              | متوسط              |
| Ni <sub>&lt;۰/۰۵</sub>    | نمایی | ۲۵۵/۲۸               | ۵۳۰۶/۱۷   | ۲۳۰/۶۹               | ۵۲/۵۳              | متوسط              |

باشد. این شناخت و اطلاعات با پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های غلظت فلزات سنگین به‌وجود می‌آید. پس از بهینه‌سازی پارامترهای تخمین‌گر کریجینگ، پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین

بسیار متنوع و دارای ناهمگونی است، بنابراین شناخت روند و محل تغییرات خاک در سطح منطقه با استفاده از تکنولوژی‌های مدرن می‌تواند در نحوه مدیریت و اقدامات حفاظتی بسیار مؤثر



شکل ۴. پهنه‌بندی غلظت کل فلزات آهن، منگنز، مس، روی، سرب و نیکل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در کلاس اندازه ذرات ۲-۵/۰ میلی‌متر

آبراهه که از طرف معدن و از سمت شمال غربی به سمت مرکز امتداد دارد باعث انتقال بسیاری از آلودگی‌ها به سمت پایین دست منطقه گردیده است (شکل ۱). براساس نقشه زمین شناسی منطقه، فرسایش سنگ‌های حاوی آهن و سایر آلاینده‌ها در کوه‌های قسمت شرقی منطقه منجر به توسعه آلودگی در نواحی شرقی منطقه شده است. همچنین باد غالب منطقه که به سمت جنوب غربی می‌باشد می‌تواند عامل پراکنش آهن و دیگر آلاینده‌ها از روی سطح رسوبات ذخیره شده در پشت سدهای رسوبگیر در بخش‌های جنوبی منطقه شده باشد و این روند برای سایر فلزات سنگین نیز تا حدودی مشهود می‌باشد (شکل ۴). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود توزیع مکانی متغیرها از الگوی مشابه‌ای پیروی می‌کنند به طوری که غلظت فلزات سنگین با فاصله گرفتن از نقاط معدنی کاهش می‌یابد البته با توجه به توزیع ارتفاعی، مدیریت اراضی، انتقال ذرات توسط رودخانه که از طرف معدن و از شمال غرب به سمت مرکز امتداد دارد و همچنین جهت باد غالب در منطقه، تغییرات

برای هر ۶ کلاس اندازه‌های ذرات خاک صورت گرفت (شکل ۴). نتایج نشان داد که بالاترین مقدار آهن در هر ۶ کلاس اندازه‌ای در نواحی شمالی و برخی نقاط شرقی و کمترین مقدار آن در قسمت‌های جنوبی منطقه واقع شده است. سایر فلزات نیز تقریباً روندی مشابه با آهن دارند به جز سرب که در نقاط جنوبی و غربی دارای بیشترین مقدار است (شکل ۴). با توجه به اینکه در این نقاط، زمین‌های کشاورزی گسترش یافته‌اند احتمال افزایش غلظت سرب به واسطه عملیات کشاورزی در اثر مصرف سموم وجود دارد. همچنین ممکن است منشا آلودگی در خارج از حوضه آبخیز کفه مور باشد و عواملی چون باد و یا آب‌های زیرزمینی آلوده که برای کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند عامل این مشاهده باشند، در این زمینه جای تحقیق وجود دارد. هر چند به طور کلی میانگین سرب در منطقه پایین است.

وجود ارتفاعاتی در جنوب معدن مانع از ایجاد یک الگوی تغییر پذیری مکانی منظم در منطقه شده است اما وجود یک

نتایج اهمیت اندازه ذرات در ارزیابی خطر آلودگی خاک در مناطق صنعتی را نشان می‌دهد.

پهنه‌بندی و بررسی حضور روند غلظت فلزات سنگین برای هر ۶ کلاس اندازه‌ای ذرات خاک نشان داد که با فاصله گرفتن از منطقه معدنی گل‌گهر غلظت فلزات سنگین کاهش می‌یابد. حد آستانه آلودگی خاک براساس دستورالعمل کیفی محیط زیست کانادا (۲۰۰۷) تعیین شد که براساس این دستورالعمل مسیرهای مختلف ورود این آلاینده‌ها به بدن انسان جذب پوستی، استنشاق ریزگردها، بلعیدن مستقیم و غیرمستقیم عناصر از خاک می‌باشد (۱۱). این دستورالعمل حد آستانه منگنز، مس، روی، سرب، نیکل را به ترتیب ۱۵۰۰، ۶۳، ۲۰۰، ۱۴۰، ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در نظر گرفته است و برای آهن از میانگین غلظت آن در کل پوسته زمین، ۴۷۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم استفاده شد (۲۹). بر این اساس پهنه‌بندی آلاینده‌ها در بخش کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر نشان داد که ۱۱۱۸۲/۴۳ هکتار از مساحت کل منطقه دارای غلظت آهن بالاتر از حد آستانه بودند و برای منگنز، مس، روی، سرب، نیکل به ترتیب صفر، ۲۴۰۶۴/۷۳، ۱۰۰/۲۰، صفر و ۲۹۵۳۳ هکتار از منطقه دارای غلظت بالاتر از حد آستانه در کلاس ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر می‌باشند. در حالی که در توده خاک تنها برای آهن، مس و نیکل به ترتیب ۷۴۱۹/۵۷، ۴۵۰۰/۱۵، ۳۵۸۸/۹۸ هکتار از کل منطقه دارای غلظت بالاتر از حد آستانه هستند. بنابراین ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر در منطقه مورد مطالعه دارای خطر بیشتری برای سلامتی انسان هستند. آهن، مس و نیکل از فلزاتی هستند که در این منطقه بیشترین آلودگی را دارند.

در این ناحیه معدن کاری‌های گسترده، تخلیه پساب‌های معادن به درون حوضچه‌ها و سدهای رسوب‌گیر منجر به آلودگی خاک‌های مجاور شده است. همچنین پراکنش فلزات در فرآیند استخراج، توسط باد و نیز نشت آب‌های آلوده و نفوذ به درون آب‌های سطحی و زیرزمینی باعث ایجاد آلودگی خاک‌های منطقه گردیده است. بنابراین انجام اقدامات حفاظتی

غلظت کاملاً منظم نمی‌باشد. برای آهن یک الگوی تغییرپذیری مکانی مشترک و مشابه بر روی تمامی نقشه‌ها وجود دارد که حداکثر آلودگی در مجاورت معدن یعنی منبع آلودگی وجود داشته و با فاصله گرفتن از آنها آلودگی کاهش می‌یابد. برای تمامی فلزات با کاهش اندازه ذرات خاک با فاصله گرفتن از منابع آلودگی، آلودگی افزایش یافته است که علت آن را می‌توان به انتقال آسان این ذرات توسط باد و آب دانست. نتایج مطالعات مری‌ام و همکاران نیز نشان داد که با افزایش فاصله از پسماندهای معدنی، آلودگی کاهش می‌یابد و باد عامل انتقال فلزات سنگین از پسماندهای معدنی و آلودگی خاک‌های مورد مطالعه این محققین بوده است و خاک‌های در جهت باد غالب از سمت پسماندها دارای فلزات سنگین بیشتری است (۲۲).

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش اندازه ذرات خاک غلظت فلزات سنگین افزایش یافته است به طوری که میانگین غلظت در کلاس اندازه‌ای کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر برای آهن ۲/۱۳ برابر، برای منگنز ۱/۷۰ برابر، برای مس ۴/۷۹ برابر، برای روی ۲/۴۳ برابر، برای سرب ۱/۴۲ برابر و برای نیکل ۳/۴۷ برابر بیشتر از میانگین غلظت در کلاس اندازه‌ای ۲-۰/۵ میلی‌متر به دست آمد. میزان کل رس در نمونه‌های خاک از ۴/۸۸ تا ۳۲/۵۲ درصد و غلظت کل آهن در کل توده خاک از ۴۴۳۶/۲۵ تا ۲۷۱۳۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است و میانگین pH خاک ۷/۷۴ می‌باشد. با توجه به این نتایج می‌توان تجمع ترجیحی در ذرات ریزتر را به سطح ویژه بالاتر و به احتمال زیاد وجود کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن که دارای توانایی بالاتری در نگهداری فلزات سنگین می‌باشند نسبت داد. بنابراین وجود فلزات سنگین در کلاس‌های اندازه‌ای ریز خاک می‌تواند ناشی از جذب سطحی و جزء ساختاری کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن باشد. با توجه به اینکه ذرات ریزتر بیشترین خطر را برای سلامتی انسان به دلیل استنشاق و انتقال به بدن توسط بلع دهانی و تماس پوستی ایجاد می‌نمایند بنابراین این

از جمله ایجاد سیستم‌های انحراف مسیر پساب‌ها و سیستم‌های زهکشی به مناطق غیرمسکونی و غیر کشاورزی ضرورت دارد. همچنین تثبیت خاک و ایجاد بادشکن جهت جلوگیری از آلودگی زمین‌های کشاورزی و برای حفظ سلامتی ساکنین منطقه پیشنهاد می‌گردد.

## منابع مورد استفاده

۱. محمدی، ج. ۱۳۸۴. *ژئومتریک (آمار مکانی)*. انتشارات پلک، تهران.
۲. محمودی، ش.، ج. محمدی و م. نادری. ۱۳۹۲. توزیع آماری و مکانی برخی عناصر سنگین در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک سطحی جنوب شهر اصفهان. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک* ۲۰(۲): ۱-۲۲.
۳. مومنی، ع. ۱۳۷۴. مدل سازی ساختار مکانی متغییر حاصلخیزی و مواد آلی خاک به عنوان مبنایی برای اعمال کشاورزی دقیق در دشت مرودشت، ایران. *مجله علوم خاک و آب، ویژه خاکشناسی و ارزیابی اراضی* ۱: ۱-۱۲.
4. Acosta, J. A., A. Faz Cano, J. M. Arocena, F. Debela and S. Martinez-Martinez. 2009. Distribution of metals in soil particle size fractions and its implication to risk assessment of playgrounds in Murcia City (Spain). *Geoderma*. 149: 101-109.
5. Ajmone-Marsan, F., M. Biasioli, T. Kralj, H. Grcman, C. M. Davidson, A. S. Hursthouse, L. Madrid and S. Rodrigues. 2008. Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities. *Environ. Pollut.* 152: 73-81.
6. Anjaneyulu, E., M. Ramgopal, G. Narasimha and M. Balaji. 2011. Effect of pig iron slag articles on soil physico-chemical, biological and enzyme Activities. *IJEE*. 2(2): 161-165.
7. Brungard, C. W. and J. L. Boettinger. 2010. Conditioned Latin Hypercube Sampling: Optimal sample size for digital soil mapping of arid rangelands in Utah, USA. PP. 67-75. *In: Boettinger J. L., A. C. Moore, S. Kienast-Brown D. W. Howell and A. E. Hartemink (Eds.), Digital soil mapping: progress in soil science 2. Part 2. Research*. Springer Dordrecht, Netherlands.
8. Cai, Y., J. C. Cabrera, M. Georgiadis and K. Jayachandran. 2002. Assessment of arsenic mobility in the soils of some golf courses in South Florida. *Sci. Total. Environ.* 291: 123-134.
9. Cambardella, C. A., T. B. Moorman, J. M. Novak, T. B. Parkin, D. I. Karlen, R. F. Turco and A. E. Konopka. 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
10. Campbell, J. B. 1978. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 460-464.
11. Canadian Council of Ministers of the Environment. 2007. Excerpt from Publication No. 1299, ISBN, pp. 34.
12. Goovaerts, P. 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J. Hydrol.* 228:113-129.
13. Hajrasuliha, Sh., N. Baniabassi, J. Metthey and D. R. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil sampling for salinity studies in southwest Iran. *Irrigation Sci.* 1: 197- 208.
14. Herngren, L., A. Goonetilleke and G. A. Ayoko. 2006. Analysis of heavy metals in road-deposited sediments. *Anal. Chim. Acta.* 571: 270-278.
15. 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 changing, China *Environ. Geol.* 52: 1-10.
16. Khanduzi, F., A. Parizanganeh and A. Zamani. 2015. Application of multivariate statistics and geostatistical techniques to identify the spatial variability of heavy metals in groundwater resources. *CJES*. 13(4): 333-347.
17. Li, X. and L. Feng. 2012. Multivariate and geostatistical analyzes of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China. *Atmos. Environ.* 47:58-65.
18. Liu B., X. Ma, S. Ai, S. Zhu, Zhang W, Zhang Y. 2016. Spatial distribution and source identification of heavy metals in soils under different land uses in a sewage irrigation region, northwest China. *J. Soils Sediments* 16(5):1547-1556.
19. Lopez-Granados, F., M. Jurado-Exposito, S. Atenciano, A. Garcia-Ferrer, M. S. De la Orden and L. Garcia-Torres. 2002. Spatial variability of agriculture soil parameters in southern Span. *Plant Soil* 246: 97-105.
20. Luo, X., S. Yu and X. Li. 2011. Distribution, availability and sources of trace metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong: Implications for assessing the risk to human health. *Environ. Pollut.* 159: 1317-1326.

21. Mandzhieva, S., T. Minikina, D. P. T. Bauer and S. Sushkova. 2014. The role of soils particle-size fractions in the adsorption of heavy metals. *Eurasian J. Soil Sci.* 3: 197-205.
22. Meriem, L., D. Ahmad, B. Bouamar, E. H. Hassan, M. Rachid and T. Meryem. 2015. Spatial distribution of soil heavy metals in the Zaida mine (Morocco) based on Geostatistical Methods. *Int. J. Adv. Res.* 3(7): 337-349.
23. Nriag, J. O. and J. M. Pacyna. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature.* 333: 134-39.
24. Qi, J., H. Zhang, X. Li, J. Lu, G. Zhang. 2016. Concentrations, spatial distribution, and risk assessment of soil heavy metals in a Zn-Pb mine district in southern China. *Environ. Monit. Assess.* 188:1-11.
25. Ratha, D. S. and B. K. Sahu. 1993. Source and distribution of metals in urban soil of Bombay, India, using multivariate statistical techniques. *Environ. Geol.* 22: 276-285.
26. Rodriguez, M. J. A., A. M. Lopez and C. J. M. Grau. 2006. Heavy metal contents in agricultural topsoils in Ebro basin (Spain). Application of multivariate geostatistical methods to study spatial variations. *Environ. Pollut.* 144: 1001-1012.
27. Sarlak, M. R. 2015. Characterization of the particle size fraction associated heavy metals in arable soils from Ahwaz size, Iran. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 4(7): 65-75.
28. Sposito, G. L., J. Lund and A. C. Chang. 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. Am. J.* 46: 260-265.
29. Turekian, K. K. and K. H. Wedepohl. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Am. Bull.* 72: 175-191.
30. Wei, M., J. Chen, Zh. Sun, C. Lv and W. Cai. 2015. Distribution of heavy metals in different size fractions of agricultural soils closer to mining area and its relationship to TOC and Eh. *WC New Tech*, 15-17 July, Spain.
31. Yang, P., M. Renzhao, H. Shao and Y. Gao. 2009. The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang piedmont plain, China *C. R. Biol.* 332: 558-566.
32. Yao, O., X. Wang, H. Jian, H. Chen and Z. Yu. 2015. Characterization of the particle size fraction associated with heavy metals in suspended sediments of the yellow river. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12: 6725-6744.
33. Zhao, K., W. Fu, Z. Ye and C. Zhang. 2015. Contamination and spatial variation of heavy metals in the soil-rice system in nanxun county, Southeastern China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12: 1577-1594.

## Spatial Distribution of Some Heavy Metals in Different Soil Particle Size Fractions in Kafe Moor, Kerman Province, Iran

M. Tayebi\*, M. Naderi and J. Mohammadi<sup>1</sup>

(Received: Jan. 13-2016 ; Accepted: Nov. 12-2016)

### Abstract

The aim of this work was to study distribution of some heavy metals in different soil particle-size fractions and to assess their spatial distribution. The study was carried out in Kafe Moor (Kerman, Iran) where the Gol-Gohar Iron Mine is located. One hundred twenty composite soil samples were randomly collected and transferred to the laboratory in bags. After air-drying, the samples were fractionated into six classes including 2- 0.5, 0.5-0.25, 0.25-0.125, 0.125- 0.075, 0.075-0.05 and <0.05 mm. Elemental concentrations (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb and Ni) were determined using acid digestion method (HNO<sub>3</sub>, 4.0 N) and an atomic absorption spectrophotometer in each class. Ordinary Kriging technique was used for predicting spatial distribution of heavy metals. The results showed that content of metals in soil increased with decreasing particle size. The results also showed that the concentration of Fe, Mn, Cu, Zn, Pb and Ni in <0.05 mm size fraction were 2.13, 1.70, 4.79, 2.43, 1.42, and 3.47 times higher than in 2-0.05 mm size fraction, respectively. In addition, mapping the concentrations of heavy metals with kriging showed that metals pollution decreased with increasing distance from mines area.

**Keywords:** Heavy metals, Kriging, soil particle size, Soil pollution, Spatial variability.

---

1. Dept. of Soil Sci., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: mahtayebi@yahoo.com