Archive of SID

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره هجدهم، شماره یک، بهار ۹۶

مقایسه روش‌های درون‌یابی مکانی جهت پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل

یونس سیفی[۱]

روح اله میرزایی[۲*]

rmirzaei@kashanu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۷ **تاریخ پذیرش:۹۴/۱۱/۱۴**

چکیده

زمینه و هدف: انتخاب روش درون‌یابی مناسب فاکتور مهمی در تحلیل سطح است و تحلیلی سخت در تحلیل زمین‌آماری محسوب می‌شود چون روش‌های مختلف درون‌یابی می‌تواند منجر به نتایج نهایی مختلف شود. از این رو، هدف این پژوهش، بررسی کارایی روش-های مختلف درون‌یابی در تعیین الگوی مکانی غلظت کادمیوم، روی و مس در خاک سطحی است.

روش بررسی: در مجموع ۱۳۵ نمونه خاک سطحی از شهرستان آران و بیدگل جمع‌آوری شد و غلظت کادمیوم، روی و مس در نمونه‌ها تعیین گردید؛ سپس با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی شامل کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، وزن‌دهی معکوس فاصله، چند جمله‌ای موضعی و توابع پایه شعاعی، تغییرات مکانی غلظت عناصر در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل ارزیابی شد. ارزیابی متقابل و آماره‌های MSE، MBE، RMSE، NSE و PBIAS به منظور صحت‌سنجی روش‌ها استفاده شد.

یافته‌ها: طبق نتایج ارزیابی متقابل روش کریجینگ معمولی (مدل کروی) دارای بهترین کارایی برای برآورد غلظت کادمیوم و مس و روش کریجینگ معمولی (مدل نمایی) دارای بهترین کارایی برای برآورد غلظت روی در خاک این منطقه بود. همچنین با افزایش توان وزن‌دهی در روش چند جمله‌ای موضعی (LPI)، برای عناصر کادمیوم و مس، صحت درون‌یابی افزایش و برای عنصر روی، صحت درون‌یابی کاهش یافت؛ در حالی‌که با افزایش توان وزن‌دهی در روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)[۳]، صحت درون‌یابی برای عناصر کادمیوم و روی کاهش و برای عنصر مس افزایش یافت.

بحث و نتیجه گیری: اگرچه تمام روش های آزموده شده دارای صحت پیش بینی غلظت میانگین فلزات بودند اما با توجه به شاخص های ارزیابی متقابل، روش کریجینگ عملکرد بهتری نسبت به سایر روش ها داشت.

واژه‌های کلیدی: درون‌یابی مکانی، زمین‌آمار، آلودگی خاک، فلزات سنگین، آران و بیدگل.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده منابع‌طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان. کاشان- ایران.

۲- استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع‌طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان. کاشان- ایران * (مسوول مکاتبات).

3- Inverse Distance Weighted

www.SID.ir

Archive of SID

J.Env. Sci. Tech., Vol 19, No.1, spring, 2017

Comparison of Spatial Interpolation Methods to Mapp Heavy Metals Concentrations in Surface Soil of Aran-O-Bidgol City

Younes seifi[1]
Rouhollah Mirzaei[2]
rmirzaei@kashanu.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Selecting a suitable interpolation method is a main factor of surface analysis and it is a difficult task in geostatistical analysis since different methods of interpolation can result in different surfaces and ultimately different results. Hence, the aim of this study is to evaluate the performance of different interpolation methods in determining the spatial concentration of Cd, Zn and Cu in the Surface soil of Aran-O-Bidgol City.

Method: A total of 135 surface soil (0-20 cm) samples were collected in the study area and the soil heavy metals concentrations were determined. The spatial distribution of heavy metals concentration in Surface Soil of Aran-O-Bidgol was evaluated using different interpolation methods including ordinary Kriging, CoKriging, Inverse Distance Weighting, Local Polynomials and Radial Basis Function. Cross validation and MSE, MBE, RMSE, NSE, PBIAS were applied to estimate their accuracy.

Findings: According to the results Ordinary Kriging (spherical model) had the best efficiency for estimating Cd and Cu concentrations and Ordinary Kriging (exponential model) had the best efficiency for estimating distribution pattern of Zn concentration in the soil of this region. The weight parameter has a significant influence on the accuracy of interpolation. The higher the order of local polynomial, the larger the accuracy of cross validation, whereas, the greater the weighting power of IDW for Cd and Zn, the greater error and larger accuracy of the interpolation will be for Cu.

Discussion and Conclusion: Although all of the considered interpolation methods had a high prediction accuracy of the mean content for soil heavy metals, but taking all cross validation indicators into consideration, Ordinary Kriging (OK) method shows a generally better performance than other methods.

Keywords: Spatial Interpolation, Geostatistics, Soil Pollution, Heavy Metals, Aran-O-Bidgos

1- MSc student, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran.
2-Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran*(Corresponding Author).

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

الگوی مکانی متغیرهای محیطی به طور فزاینده‌ای در مدیریت و علوم محیط‌زیست مورد نیاز است. این اطلاعات معمولاً به آسانی در دسترس نیستند و دستیابی به آنها مخصوصاً در مناطق کوهستانی یا مناطق دریایی عمیق بسیار سخت و هزینه‌بر است. توزیع مکانی متغیرهای محیطی اغلب از طریق منابع نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. با این حال، مدیران محیط-زیستی برای تصمیم‌گیری موثر و مطمئن، به داده‌های مکانی پیوسته از سراسر ناحیه مورد نظر نیاز دارند. بنابراین روش‌های درون‌یابی مکانی، برای تخمین متغیرهای محیطی در مکان‌های نمونه‌برداری نشده به ابزاری ضروری تبدیل شده‌اند. خصوصیات خاک از نقطه‌ای به نقطه دیگر دارای تغییرات مکانی هستند و این تغییرات ممکن است به شکل ذاتی (تفاوت در مواد مادری) و یا غیر ذاتی (تفاوت در مدیریت منابع خاکی) روی دهد (۱). دانستن خصوصیات خاک، به ویژه خصوصیاتی که از نظر تولید کشاورزی و مسائل اقتصادی مهم هستند، دارای اهمیت بسیار است (۲). با توجه به انباشت مستمر فلزات سنگین در خاک، بررسی توزیع غلظت عناصر سنگین جهت پایش آلودگی خاک و حفظ کیفیت محیط‌زیست ضروری است. تغییرپذیری خصوصیات خاک با این فرض که توزیع خصوصیات خاک در عرصه به صورت تصادفی است، اغلب توسط روش‌های آماری کلاسیک بیان می‌شود. در این روش‌ها نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری نمونه‌ها، مستقل از موقعیت فضایی آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین مقدار یک کمیت در یک نمونه هیچگونه اطلاعاتی درباره مقدار همان کمیت در نمونه‌های دیگر به فواصل مختلف ارائه نمی‌کند. در روش‌های زمین‌آمار می‌توان بین مقادیر یک کمیت در جامعه نمونه‌ها و فاصله و جهت قرار گرفتن نمونه‌ها نسبت به یکدیگر ارتباط برقرار کرد. بنابراین در این روش ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار مکانی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و در صورت وجود ساختار مکانی، تحلیل داده‌ها انجام می‌شود (۳). انتخاب یک روش درون‌یابی مناسب برای داده‌ها آسان نیست و برای رسیدن به سطح پیوسته، هنوز روش جامعی وجود ندارد و روش‌های درون‌یابی مکانی در حال تکامل هستند و نمی‌توان یک روش را برای هر منظور و هر منطقه تجویز کرد، چون عوامل مختلفی مانند: طراحی نمونه‌برداری و توزیع فضایی نمونه‌ها، ماهیت و کیفیت داده‌ها، ارتباط بین متغیرهای اولیه و ثانویه، ارتباطات بین فاکتورهای مختلف و موارد دیگری از جمله انتخاب مدل مناسب تغییرنما و اندازه شبکه‌ها روی صحت روش‌ها تأثیرگذار می-باشند (۴). به عبارت دیگر، هیچ پاسخ ساده‌ای در رابطه با انتخاب یک روش درون‌یابی مناسب وجود ندارد، چون " بهترین روش" فقط برای موقعیت‌های خاص است (۵). اکثر روش‌های درون‌یابی در مطالعات مربوط به پلات‌های آزمایشگاهی استفاده شده و به ندرت مطالعات وابسته به مقیاس‌های بزرگ گزارش شده است. به هر حال برای پیش‌بینی روند مکانی آلاینده‌ها، رسیدن به نتایج توزیع مکانی مناسب به وسیله فقط یک روش سنتی از درون‌یابی آن هم به وسیله داده‌های جدا از هم مشکل است که در بررسی‌های اخیر روش‌های گوناگون درون‌یابی برای سنجش توزیع مکانی فلزات سنگین خاک استفاده می‌شود (۶). در زمینه بررسی تغییرات مکانی خصوصیات خاک با استفاده از روش‌های درون‌یابی مکانی تحقیقات زیادی انجام شده است، اما نتایج به خوبی واضح و مشخص نیست. برخی از آن‌ها بیان داشتند که روش کریجینگ معمولی بهتر از سایر روش‌ها عمل می‌کند (۷، ۸، ۹، ۱۰)، درحالی‌که برخی دیگر نشان دادند که کریجینگ معمولی بهتر از سایر روش‌ها نیست (۱۱،۱۲،۱۳،۱۴).

هدف از درون‌یابی در علوم محیط‌زیست معمولاً تهیه نقشه‌هایی است در تصمیم‌گیری‌ها استفاده می‌شود، بنابراین دقت و صحت چنین نقشه‌هایی بر فرآیند تصمیم‌گیری اثرگذار می‌باشد. از این رو انتخاب روش درون‌یابی مناسب بسیار ضروری و مهم است. یکی از موارد بسیار مهم درون‌یابی در علوم محیط‌زیست، تهیه نقشه‌های پراکنش آلاینده‌ها در محیط‌های مختلف آب، هوا و خاک است. خروجی چنین نقشه‌هایی معمولاً برای تعیین مناطق آلوده و مناطق پرخطر استفاده می‌شود. با وجود این، مطالعات اندکی در ایران تا کنون به بررسی اثر انتخاب روش

www.SID.ir

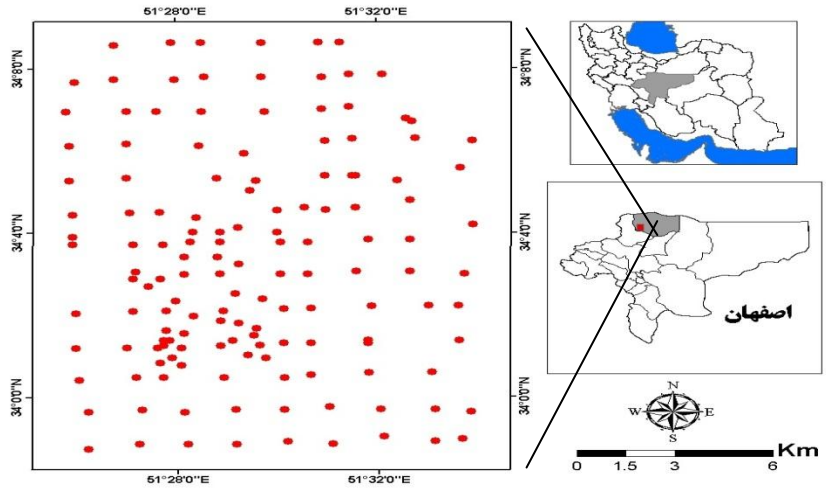
Archive of SID

درون‌یابی بر تعیین آلودگی محیط‌زیست پرداخته‌اند. با توجه مباحث ذکرشده، می‌توان گفت بررسی کارایی روش‌های مختلف درون‌یابی جهت پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی کمتر مدنظر بوده است. بنابراین مطالعه حاضر با هدف ارزیابی توانایی روش‌های درون‌یابی مکانی در بررسی تغییرات مکانی برخی فلزات سنگین در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل و معرفی بهترین روش، صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی، شهرستان آران و بیدگل واقع در شمالی ترین ناحیه استان اصفهان و در همسایگی شهرستان‌های کاشان، قم، نطنز و اردستان است (شکل۱). این شهرستان با مساحت ۶۰۵۱ کیلومتر مربع در طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و در حاشیه کویر مرکزی ایران قرار دارد. متوسط بارش سالیانه ۱۰۰ میلی‌متر و اقلیمی با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و خشک را دارا می‌باشد. ارتفاع متوسط شهر از سطح دریا ۹۱۲ متر می‌باشد. این شهرستان با ضریب خشکی ۵/۴ جزء منطقه فراخشک محسوب می‌گردد. عمده کاربری‌های این منطقه دربرگیرنده کاربری صنعتی، مسکونی، اراضی بدون پوشش، زراعت آبی و باغات، جاده‌ها و جنگل دست کاشت است. وجود صنایع گوناگون و کوره‌های آجرپزی متعدد از یک سو و زمین‌های کشاورزی از سوی دیگر، چهره‌ای صنعتی- کشاورزی به شهر داده است. اراضی کشاورزی شهرستان آران و بیدگل بالغ بر ۱۳۵۰۰هکتار است که از این میزان حدود ۲۰۰۰ هکتار اختصاص به کشت محصولات دائمی و باغی داشته و حدود ۱۱۵۰۰هکتار زیر کشت انواع محصولات زراعی قرار دارد. از جمله مهم‌ترین محصولات کشاورزی این شهرستان می‌توان به گندم، جو، پنبه، پسته، صیفی، علوفه و ذرت اشاره نمود.



شکل ۱- موقعیت شهرستان آران و بیدگل در استان اصفهان و نقاط نمونه‌برداری خاک در سطح شهرستان

Figure 1- The location of study area in Isfahan Province and the distribution of the soil samples

۲. نمونه‌برداری و آنالیز آزمایشگاهی

طی مطالعه میدانی ۱۳۵ نمونه خاک سطحی از تمام سطح شهرستان آران و بیدگل در سلول‌های هم‌اندازه و از محل تقاطع شبکه‌ها جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری به روش سیستماتیک شبکه‌ای صورت گرفت. پس از نقطه‌یابی توسط GPS، ۵ زیرنمونه از هر گروه شبکه از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری جمع-آوری شد، به این صورت که یک نمونه از نقطه تقاطع جمع-آوری شد و مابقی ۴ نمونه از ۴ قسمت به شعاع ۵۰ متری از

www.SID.ir

Archive of SID

نقطه مرکزی نمونه‌برداری برداشت شد. ۵ زیرنمونه با هم مخلوط شدند تا نمونه ترکیبی خاک به دست آید. در شکل(۱) موقعیت و تعداد نقاط نمونه‌گیری در منطقه مورد مطالعه آورده شده است. نمونه‌ها پس از خشک شدن در هوای آزاد (هوا خشک)، کوبیده شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس قسمتی از هر نمونه خاک، با مش ۱۰۰ الک شد. یک گرم از خاک الک شده با استفاده از ترکیب سه اسید HNO_3، HF و $HClO_4$ با نسبت ۳:۲:۵ هضم شد و سپس محلول به دست آمده پس از عبور از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ با استفاده از آب دیونیزه به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد (۱۵)؛ سپس غلظت عناصر کادمیم، روی و مس در نمونه‌های خاک با دستگاه جذب اتمی شعله (FAAS) مدل Shimadzu, AA-670 مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. خاک استاندارد SRM 2711 Montana II برای کنترل کیفیت و بررسی صحت اندازه‌گیری مقدار فلزات سنگین کل در نمونه‌ها استفاده شد. لازم به ذکر است در هنگام هضم به همراه هر گروه از نمونه‌ها یک نمونه شاهد تهیه و همراه با سایر نمونه‌ها مورد آنالیز قرار گرفت.

۳. روش‌های درون‌یابی

۳-۱.کریجینگ

کریجینگ یک روش برآورد زمین‌آماری است که بر پایه میانگین متحرک وزن‌دار استوار است. به طوری‌که می‌توان گفت این روش بهترین برآوردکننده خطی ناریب می‌باشد (۱۶). شرط ناریب بودن در سایر روش‌های تخمین، نظیر روش چندجمله‌ای و وزن‌دهی معکوس فاصله نیز اعمال می‌شود، ولی ویژگی کریجینگ آن است که در عین ناریب بودن، واریانس تخمین نیز در کمترین مقدار می‌باشد. بنابراین کریجینگ همراه هر تخمین، مقدار خطای آن را نیز می‌دهد که با استفاده از این ویژگی منحصر به فرد آن می‌توان قسمت‌های واجد خطای زیاد که برای کاهش خطا به داده‌های بیشتری نیاز دارند را مشخص نمود (۱۷). این برآورد کننده به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$z^*(x)= \sum_{i=1}^{n} \lambda i\, Z(xi) \qquad (۱)$$

در این معادله $z^*(x)$ تخمین مقدار متغیر z در نقطه x و λi وزن آماری اختصاص یافته به مقادیر z در نقطه x_i است. شرط استفاده از این تخمین‌گر آن است که متغیر z توزیع نرمال داشته باشد. در صورتی‌که متغیر مورد نظر توزیع نرمال نداشته باشد، باید از کریجینگ غیرخطی استفاده نمود، یا با استفاده از روش‌های تبدیل داده‌ها، توزیع متغیر مورد نظر را تبدیل به نرمال نمود (۱۶، ۱۷). در این پژوهش از تابع نیم تغییرنما جهت نشان دادن تغییرات یک متغیر با در نظر گرفتن فاصله استفاده شد که معادله آن به صورت زیر است:

$$(۲)\quad y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi+h)]^2$$

که در آن y(h) مقدار نیم تغییرنما در فاصله h، $Z(x_i+h)$ و $Z(x_i)$ مقدار متغیر در نقاط (x_i+h) و x_i، N(h) تعداد جفت نمونه‌های به‌کار رفته به ازای هر فاصله h می‌باشد. غالباً به 2y(h) واریوگرام و به y(h) سمی‌واریوگرام اطلاق می‌شود (۱۸). در این معادله مقدار تغییرنما وابسته به فاصله بین مقادیر یک متغیر ناحیه‌ای در دو نقطه است. اگر این مقدار وابسته به جهت نیز باشد، نیم تغییرنمای ناهمسانگرد و در غیر این صورت همسانگرد نامیده می‌شود. در این پژوهش از مدل‌های کروی[1]، نمایی[2]، گوسی[3]، خطی[4] و خطی دارای سقف[5] برای برازش نیم تغییرنما استفاده می‌شود.

۳-۲. کوکریجینگ

همان طوری که در آمار کلاسیک روش‌های چندمتغیره برای تخمین وجود دارد، در زمین‌آمار هم می‌توان از روش کوکریجینگ که بر اساس همبستگی بین داده‌ها عمل می‌کند، درون‌یابی را با دقت بیشتری انجام داد. در واقع تخمین‌گر کوکریجینگ همان کریجینگ توسعه یافته است که در آن متغیرهای ثانویه نیز لحاظ شده است. معادله کوکریجینگ به صورت زیر است (۱۷):

1- Spherical
2- Exponential
3- Gausian
4- Linear
5- Linear to sill

www.SID.ir

Archive of SID

(۳)

$$z^*(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda i \,.\, z(xi) \sum_{k=1}^{n} \lambda k \,.\, y(xk)$$

که در آن z*(xi) مقدار تخمین زده شده برای نقطه xi، λi وزن مربوط به متغیر z، λk وزن مربوط به متغیر کمکی y، z(xi) مقدار مشاهده شده متغیر اصلی و y(xk) مقدار مشاهده شده برای متغیر کمکی می‌باشد.

۳-۳. چند جمله‌ای موضعی

این روش حداقل مجذورات متناسب را بین نقاط شناسایی شده در محدوده بیضوی شکل، به عنوان وزن نقطه تخصیص می‌دهد. در این روش بر اساس ضریب تخصیص داده شده، با به‌دست آوردن رابطه درجه اول، دوم و یا سوم بین مقادیر متغیر در نقاط همسایگی x، y و z و حداقل‌سازی اطلاعات محاسبه شده، درون‌یابی صورت می‌گیرد (۱۹).

۳-۴. توابع پایه شعاعی

از جمله روش‌های درون‌یابی است که در آن سطح تخمین از مقادیر مشاهده‌ای عبور می‌کند. از خصوصیات این روش که حالتی از شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد، این است که مقادیر بیشتر از حداکثر مشاهده‌ای و یا کمتر از حداقل مشاهده‌ای در سطح تخمین وجود دارد. در روش وزن‌دهی معکوس فاصله نیز سطح تخمین از مقادیر مشاهده‌ای عبور می‌نماید، اما این روش هیچ‌گاه مقادیر بیشتر از حداکثر و کمتر از حداقل داده‌های مشاهده‌ای را تخمین نمی‌زند. روش تابع پایه شعاعی بر اساس پنج تابع مختلف درون‌یابی داده‌ها را انجام می‌دهد که هسته اصلی توابع، مجموع مقادیر مربعات (h^2+R^2) است که به ترتیب، R عامل هموار کننده[1] و h ترسیم ناهمسانگرد[2] مرتبط با فاصله نقاط هستند (۲۰). توابعی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارت از: چند ربعی[3]، چند ربعی معکوس[4] و نواری کم ضخامت[5] هستند.

۳-۵. وزن‌دهی معکوس فاصله

در این روش برای هر کدام از نقاط اندازه‌گیری شده، بر اساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول، وزن مشخصی در نظر گرفته می‌شود. سپس این اوزان توسط توان وزن‌دهی کنترل می‌شود، به طوری‌که توان‌های بزرگتر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان‌های کوچکتر وزن‌ها را به طور یکنواخت‌تری بین نقاط هم‌جوار توزیع می‌کنند. البته باید توجه داشت که این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله آنها را در نظر می‌گیرد، یعنی نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند دارای وزن یکسانی می‌باشند (۲۱). مقدار عامل وزنی با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\lambda i = \frac{Di^{-a}}{\sum_{i=1}^{n} Di^{-a}} \qquad (۴)$$

که در آن: λi وزن نقطه i ام، Di فاصله نقطه i ام تا نقطه مجهول و α معادل توان وزن‌دهی می‌باشد.

۴.۲. اعتبارسنجی روش‌های درون‌یابی

به منظور مقایسه روش‌های استفاده شده در این پژوهش و انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی، از روش اعتبارسنجی متقابل[6] استفاده شد. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای همه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به طوری‌که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. همچنین با استفاده از مدل‌های به‌دست آمده، در تعدادی از نقاطی که اندازه‌گیری وجود خواهد داشت، مقادیر تخمینی محاسبه می‌شود. در نهایت با توجه به مقادیر مشاهده شده و برآورد شده، دقت هر روش با توجه به معیارهای آماری میانگین مجذور خطا (MSE)، میانگین اریب خطا (MBE)، خطای برآورد ریشه دوم میانگین مربعات (RMSE)، شاخص کارایی Nash–Sutcliffe (NSE) و درصد اریب خطا (PBIAS) محاسبه گردید. مقدار این معیارها با استفاده از روابط ۵ تا ۹ به دست آمد:

1- Smoothing factor
2- Anisotropically rescaled factor
3- Multiquadric
4- Inverse multiquadric
5- Thin plate spline
6- Cross validation

www.SID.ir

Archive of SID

$$MSE = \frac{\sum[(z*(xi)-z(xi)]^2}{n} \quad (۵)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n} z*(xi)-Z(xi)}{n} \quad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[Z(xi) - Z*(xi)]^2} \quad (۷)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}[(z(xi)-z*(xi)]^2}{\sum_{i=1}^{n}[(z(xi)-o]^2} \quad (۸)$$

$$PBIAS = 100 . \frac{\sum_{i=1}^{n}(z(xi)-z*(xi)}{\sum_{i=1}^{n}(z(xi)} \quad (۹)$$

در این معادلات $z^*(x_i)$ مقدار برآورد شده در نقطه x_i، $z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه x_i، o میانگین مقادیر اندازه-گیری شده و n تعداد نقاط می‌باشد. در این تحقیق برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ و برای انجام تحلیل‌های زمین‌آماری از نرم‌افزارهای GS+ نسخه ۵/۱ و ArcGIS نسخه ۱۰/۱ استفاده شد.

نتایج و بحث

۱.۳. توصیف آماری داده‌ها

قبل از انجام محاسبات زمین‌آماری، نرمال بودن توزیع داده‌ها توسط آزمون کولموگروف- اسمیرنوف بررسی و مشخص شد که غلظت عناصر کادمیم و مس در خاک از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند، ولی غلظت عنصر روی در خاک توزیع نرمال ندارد. داده‌های این عنصر با روش لگاریتمی نرمال شدند. آمار توصیفی متغیرهای مورد مطالعه در جدول (۱) آمده است. همان طور که نتایج نشان می‌دهد مقدار کادمیم، روی و مس در منطقه مورد مطالعه به ترتیب از ۰/۳۰ تا ۱/۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۲۱/۵۰ تا ۱۶۵/۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۱/۴۵ تا ۳۵/۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم در نوسان می‌باشد. ضریب تغییرات غلظت کادمیم، روی و مس در منطقه به ترتیب: ۴۵/۲۵،۱ و ۴۳/۹ درصد می‌باشد، که نشان از تغییرپذیری متوسط غلظت کل فلزات مذکور در منطقه دارد. ضریب تغییرات کمتر از ۱۰ درصد نشان از تغییرپذیری کم و ضریب تغیرات بیشتر از ۹۰ درصد نشان از تغییرپذیری زیاد دارد (۲۲).

جدول ۱- خلاصه آماری غلظت کادمیم، روی و مس در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل (n=۱۳۵)

Table 1- Descriptive statistical summary of the total concentrations of Cd, Cu and Zn in the topsoils of Aran-O-Bidgol (n=135)

عنصر (میلی‌گرم/کیلوگرم)	میانگین	حداقل	حداکثر	واریانس	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)	چولگی	کشیدگی
کادمیم	۰/۷۲	۰/۳۰	۱/۱۵	۰/۰۳	۰/۱۸	۲۵	-۰/۱۸	-۰/۳۶
روی	۴۸/۵۹	۲۱/۵۰	۱۶۵/۷۵	۴۸۰/۶۹	۲۱/۹۲	۴۵/۱	۲/۷۹	۹/۷۰
مس	۱۴/۸۲	۱/۴۵	۳۵/۲۲	۴۲/۵۵	۶/۵۲	۴۳/۹	-۰/۱۴	۰/۱۶

۲.۳ برآورد غلظت عناصر با استفاده از روش‌های درون-یابی

برای بررسی وجود یا عدم وجود همبستگی مکانی غلظت فلزات مذکور در منطقه مورد مطالعه طبق روش کریجینگ معمولی، پس از برازش چندین مدل نیم تغییرنما، بر پایه آماره مجذور مربعات خطا (RSS) و حداکثر ضریب همبستگی (R^2)، برای فلزات کادمیم و مس، مدل کروی و برای فلز روی مدل نمایی به عنوان مناسب‌ترین مدل برگزیده شد (شکل ۲). پس از تهیه تغییرنمای سطحی متغیرها به منظور بررسی همسانگردی داده-ها، مشخص شد که متغیرها همسانگرد بوده و می‌توان در محاسبات بعدی از تغییرنمای همه‌جهته استفاده نمود. شکل (۲) تغییرنمای همه‌جهته متغیرهای کادمیم، روی و مس را نشان می‌دهد. علاوه بر این، مشخصات مربوط به این تغییرنماها (مدل برازش شده، شعاع تأثیر، آستانه، اثر قطعه‌ای و ...) در جدول (۲) نشان داده شده است. از بررسی نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه می‌توان نتیجه گرفت که هر سه متغیر مورد مطالعه

www.SID.ir

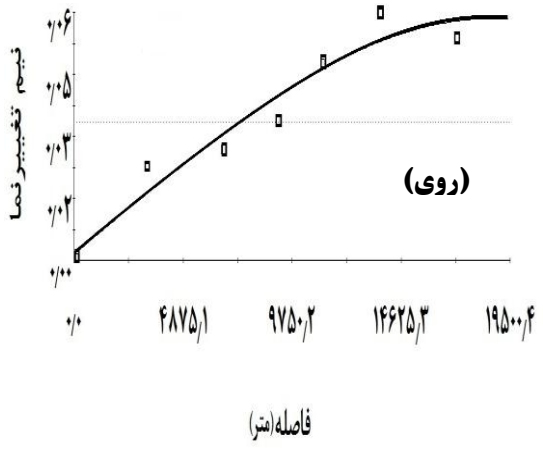
Archive of SID

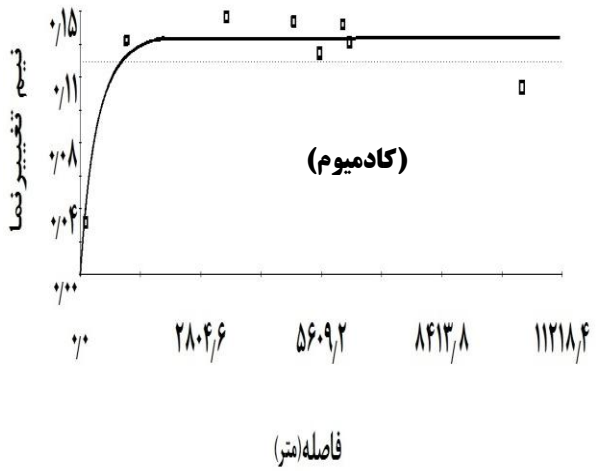
دارای ساختار مکانی (وابستگی مکانی) قوی می‌باشند، زیرا هرچه این نسبت کمتر باشد، نشان از آن دارد که ساختار مکانی بهتری برای متغیر وجود دارد. با توجه به نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه می‌توان گفت: اگر این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد، متغیر مورد نظر دارای ساختار مکانی قوی، بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ ساختار مکانی متوسط و هنگامی که بزرگتر از ۰/۷۵ باشد، ساختار مکانی ضعیف است (۲۳). این امر می‌تواند نشان‌دهنده غلبه بیشتر واریانس بخش ساختاری تغییرنما بر واریانس بخش تصادفی آن در مورد همه فلزات در تحقیق حاضر باشد که خود می‌تواند دلیلی بر مناسب بودن الگوی نمونه‌برداری، فواصل کوچک‌تر نمونه‌برداری و دقت نسبتاً مناسب تجزیه‌های آزمایشگاهی باشد. در این برازش مقدار اثر قطعه‌ای برای کادمیم ۰/۰۰۰۱، روی ۰/۰۰۰۱ و برای مس ۰/۰۰۱ به‌دست آمد. در حالت ایده‌ال باید مقدار اثر قطعه‌ای صفر باشد، اما در واقعیت نیم‌تغییرنماهای تجربی مقادیر بالاتر از صفر را نشان می‌دهند، که این به دلیل ظهور جزء تصادفی متغیر می‌باشد. اثر قطعه‌ای به علت وجود تغییرات در فواصل نمونه‌برداری و یا به دلیل خطای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری بروز می‌کند (۳).

جدول ۲- پارامترها و نتایج ارزیابی متقابل بهترین مدل‌های تغییرنمای برازش داده‌شده به غلظت عناصر

Table 2- Cross-validation performance and the best-fitted semivariogram models and their parameters for soil heavy metals

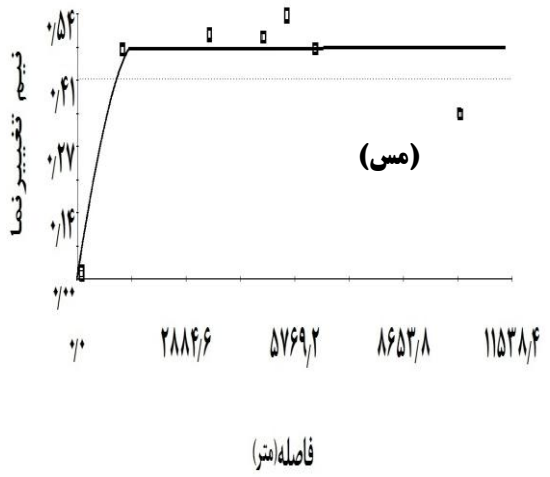
متغیر	مدل برازش شده	اثر قطعه‌ای	سقف	دامنه تأثیر (متر)	C/C_0+C	R^2	RSS	نسبت اثر قطعه‌ای به سقف	کلاس همبستگی مکانی
کادمیم	کروی	۰/۰۰۰۱	۰/۰۷۰	۳۳۴۵۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۴۴	۰/۰۰۱	قوی
روی	نمایی	۰/۰۰۰۱	۰/۱۳۴	۱۲۰۰	۰/۹۹	۰/۹۰	۱/۲۸	۰/۰۰۰۷	قوی
مس	کروی	۰/۰۰۱	۰/۴۶۹	۱۴۹۰	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۰۲۶	۰/۰۰۲	قوی





www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- تغییرنماهای تجربی غلظت عناصر کادمیوم، روی و مس در خاک سطحی

Figure 2- Experimental and fitted variogram models of the concentration of Cd, Cu and Zn in the surface soil

وجود همبستگی مناسب بین متغیرها لازمه روش کوکریجینگ است، به عبارت دیگر این روش در شرایطی می‌تواند کارایی داشته باشد که بین متغیر مورد نظر و متغیر وابسته همبستگی معنی‌داری وجود داشته باشد. در این تحقیق سه متغیر کادمیم، روی و مس به عنوان متغیر مستقل و سه متغیر pH، هدایت الکتریکی و درصد کربن آلی به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. نتایج محاسبه همبستگی خطی بین تمامی متغیرها به منظور تعیین بهترین متغیر کمکی در جدول (۳) ارائه شده است. همان طور که نتایج نشان می‌دهد، کربن آلی با کادمیم (در سطح ۰/۰۵)، روی (در سطح ۰/۰۱) و مس (در سطح ۰/۰۱) رابطه معنی‌داری داشته است. بنابراین درصد کربن آلی به عنوان متغیر کمکی مناسب برای کادمیم، روی و مس انتخاب شد. پس از انجام درون‌یابی‌ها با استفاده از روش‌های مورد نظر(کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، چند جمله‌ای موضعی، توابع پایه شعاعی و وزن‌دهی معکوس فاصله)، آماره-های ارزیابی صحت روش‌های درون‌یابی، برای متغیرها تعیین گردیدند. هرچه مقادیر میانگین مجذور خطا (MSE)، میانگین اریب خطا (MBE)، خطای برآورد ریشه دوم میانگین مربعات (RMSE) و درصد اریب خطا (PBIAS) به صفر نزدیک‌تر باشند، موید آن است که صحت درون‌یابی‌ها بیشتر بوده است (۱۳، ۲۴، ۲۵). همچنین هر چه مقدار شاخص کارایی (NSE) Nash–Sutcliffe به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده صحت بالای درون‌یابی‌ها می‌باشد (۲۴). مقایسه روش‌های درون‌یابی بر اساس این شاخص‌ها در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. در بین روش‌های مختلف درون‌یابی، روش کریجینگ معمولی (مدل کروی) برای عناصر کادمیم (RMSE=۰/۰۰۱۶) و مس (RMSE=۰/۰۳۹) و روش کریجینگ معمولی (مدل نمایی) برای عنصر روی (RMSE=۰/۹۷۸) دارای کمترین میزان خطا و انحراف بود. از بین ۱۴ روش مورد استفاده در این مطالعه، برای عناصر کادمیم، روی و مس، به ترتیب روش‌های کوکریجینگ (RMSE=۲/۴۶۴)، چندجمله‌ای موضعی (درجه۴) (RMSE=۱۳/۸۱) و وزن‌دهی معکوس فاصله (توان۱) (RMSE=۹/۴۲۲) بالاترین میزان خطا را نشان دادند و نامناسب‌ترین روش شناخته شدند (جدول۴). نتایج به‌دست آمده از جدول (۴) نشان می‌دهد که با افزایش توان وزن‌دهی در روش چند جمله‌ای موضعی، برای عناصر کادمیوم و مس صحت درون‌یابی افزایش و برای عنصر روی صحت درون‌یابی کاهش می‌یابد. در حالی‌که با افزایش توان وزن‌دهی در روش وزن‌دهی معکوس فاصله، صحت درون‌یابی برای عناصر کادمیوم و روی کاهش و برای عنصر مس افزایش می‌یابد. همچنین طبق نتایج به‌دست آمده از ارزیابی متقابل (جدول۴) رتبه‌بندی روش‌ها (کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، وزن‌دهی معکوس فاصله،

www.SID.ir

Archive of SID

توابع پایه شعاعی و چند جمله‌ای موضعی) بر اساس RMSE به قرار زیر است: برای عنصر کادمیوم پس از روش کریجینگ معمولی (مدل کروی)، به ترتیب روش‌های توابع پایه شعاعی (مدل چندربعی)، وزن‌دهی معکوس فاصله (توان۱)، چند جمله-ای موضعی (توان۴) و کوکریجینگ، برای عنصر روی پس از روش کریجینگ معمولی (مدل نمایی)، روش‌های توابع پایه شعاعی (مدل چندربعی)، کوکریجینگ، وزن‌دهی معکوس فاصله (توان۱) و چند جمله‌ای موضعی (توان۴)، برای عنصر مس پس از روش کریجینگ معمولی (مدل کروی)، روش‌های چند جمله‌ای موضعی (توان۴)، کوکریجینگ، توابع پایه شعاعی (مدل نواری کم ضخامت) و وزن‌دهی معکوس فاصله (توان۱) در رتبه-های بعدی قرار گرفتند.

روش‌های کریجینگ در تخمین توزیع مکانی فلزات سنگین خاک، پتانسیل بالایی دارند و به عنوان روش مناسب برای درون‌یابی و تهیه نقشه‌های آلاینده‌ها پیشنهاد شده‌اند (۲۶). این موضوع توسط مطالعات متعددی تاکنون تایید شده است از این جمله در آزمایشی، موسوی و همکاران (۲۷) برای پهنه‌بندی غلظت فلزات آنتیموان، مس و کروم از روش کریجینگ معمولی (مدل نمایی) و برای فلز آرسنیک از روش کریجینگ معمولی (مدل کروی) استفاده کردند. برای ارزیابی تغییرات مکانی برخی از فلزات سنگین در خاک سطحی استان گلستان، میرزایی و همکاران (۲۸) نیز از روش کریجینگ معمولی استفاده کردند، نتایج تحلیل زمین‌آماری نشان داد که مدل نمایی، دایره‌ای، نمایی و گوسی به ترتیب بهترین مدل برای تعیین تغییرپذیری مکانی کادمیم، آرسنیک، کروم و مس می‌باشد. همچنین در مطالعات لادو[1] و همکاران (۲۹)، دیانی و همکاران (۳۰)، خداکرمی و همکاران (۳۱) و محمودی و همکاران (۳۲) نیز از روش کریجینگ معمولی استفاده شد و نتایج قابل قبولی به-دست آمد. به نظر می‌رسد که روش مناسب زمین‌آماری در برآورد یک متغیر، به نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای تأثیرگذار بر آن بستگی دارد و نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر مناطق تعمیم داد (۲۱، ۳۳).

1-Lado

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۳- ضریب همبستگی خطی بین متغیرهای مطالعه شده

Table 3- Correlation coefficient matrix of variables in the studied soils

متغیر	Cd(mg kg^{-1})	Zn(mg kg^{-1})	Cu(mg kg^{-1})	pH	EC(dSm^{-1})	O.C(%)
Cd	۱					
Zn	۰/۲۳**	۱				
Cu	۰/۰۰	۰/۵۸**	۱			
PH	-۰/۰۶	-۰/۰۲	۰/۰۷	۱		
EC	۰/۱۵	-۰/۰۱	۰/۰۴	-۰/۱۹*	۱	
O.C	۰/۳۱*	۰/۳۹**	۰/۳۱**	-۰/۰۸	۰/۱۹*	۱

** همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ و * همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵

در نهایت بر اساس بهترین روش درون‌یابی (کریجینگ معمولی) نقشه پهنه‌بندی غلظت کادمیم، روی و مس در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل تهیه گردید (شکل ۳). همان طور که در نقشه‌ها مشخص است هر کدام از عناصر دارای الگوی پراکنش تقریباً متفاوتی در خاک سطحی منطقه می‌باشند. بیشترین غلظت‌های عناصر مس و روی بیشتر در بخش غرب و جنوب غربی منطقه مشاهده شده است درحالی‌که برای عنصر کادمیوم بیشترین غلظت‌ها در غرب و بخش مرکزی منطقه قابل مشاهده است. چنین الگوهایی بیشتر منطبق با شبکه حمل و نقل منطقه، مناطق صنعتی و وجود شهر کاشان است. به نظر می‌رسد کوره‌های آجرپزی بر افزایش غلظت کادمیوم در خاک سطحی بخش‌های مرکزی منطقه مطالعاتی نیز اثرگذار بوده‌اند.

www.SID.ir

جدول۴- نتایج ارزیابی روش‌های درون‌یابی در تخمین غلظت کادمیوم، روی و مس در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل

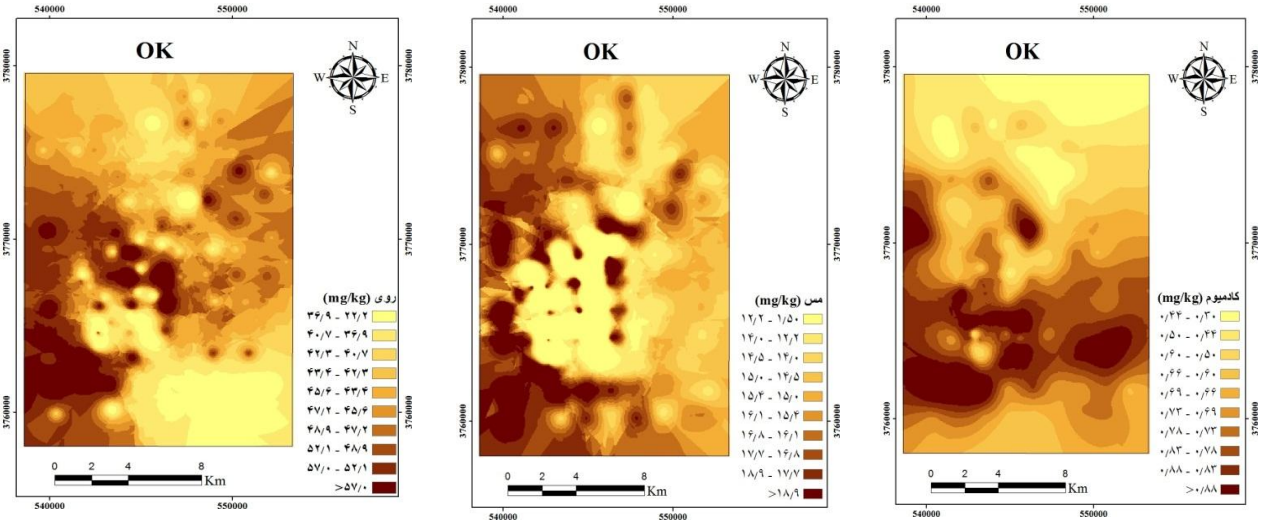
Table 4. Cross validation results of different interpolation methods to estimate of the concentrations of Cd, Cu and Zn in topsoil of Aran-O-Bidgol

روش		کریجینگ معمولی		کوکریجینگ	وزن‌دهی معکوس فاصله				توابع پایه شعاعی			چند جمله‌ای موضعی			
مدل تابع		کروی	نمایی		۱	۲	۳	۴	MQ	IMQ	TPS	۱	۲	۳	۴
MBE	Cd	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۸	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۹	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۲
	Zn	۰/۳۰۹	۰/۰۸۴	-۰/۲۴۸	-۰/۵۳۴	-۰/۷۶۹	-۰/۸۰۳	-۰/۶۹۱	-۰/۱۴۹	-۰/۱۵۴	-۰/۱۹۲	-۰/۷۶۶	۰/۲۵۳	-۰/۷۳۲	۱/۱۹۳
	Cu	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۷	۰/۰۳۱	-۰/۸۱۴	-۰/۷۶۶	-۰/۶۸۸	-۰/۶۰۹	-۰/۰۶۰	-۰/۷۱۴	۰/۰۴۰	۰/۵۸۶	-۰/۱۰۴	-۰/۰۶۶	۰/۰۲۸
RMSE	Cd	۰/۰۰۱۶	۱/۴۶۶	۲/۴۶۴	۰/۰۱۸	۰/۰۳۰	۰/۰۲۰	۰/۰۳۳	۰/۰۰۷	۰/۰۳۲	۰/۰۲۸	۰/۱۱۵	۰/۰۳۸	۰/۰۸۰	۰/۰۳۱
	Zn	۳/۵۷۷	۰/۹۷۸	۲/۸۷۵	۶/۱۸۷	۸/۹۰۱	۹/۳۰۲	۸/۰۰۴	۱/۷۲۸	۱/۷۹۳	۲/۲۲۲	۸/۸۷۱	۲/۹۳۶	۸/۴۸۳	۱۳/۸۱
	Cu	۰/۰۳۹	۰/۰۹۰	۰/۳۶۷	۹/۴۲۲	۸/۸۷۴	۷/۹۶۷	۷/۰۵۷	۰/۶۹۶	۸/۲۶۹	۰/۴۶۵	۶/۷۸۴	۱/۲۰۵	۰/۷۷۳	۰/۳۳۱
MSE	Cd	۲/۵۷۶	۲/۱۵۰	۶/۰۷۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱	۵/۵۶۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱
	Zn	۱۲/۸۰	۰/۹۵۸	۸/۲۶۷	۳۸/۲۸	۷۹/۲۴	۸۶/۵۲	۶۴/۰۶	۲/۹۸۸	۳/۲۱۷	۴/۹۴۰	۷۸/۷۰	۸/۶۲۵	۷۱/۹۷	۱۹۰/۷
	Cu	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	۰/۱۳۵	۸۸/۷۹	۷۸/۷۵	۶۳/۴۸	۴۹/۸۰	۰/۴۸۵	۶۸/۳۸	۰/۲۱۶	۴۶/۰۲	۱/۴۵۲	۰/۵۹۸	۰/۱۰۹
PBIAS	Cd	-۰/۰۰۱	-۰/۰۵۵	-۰/۰۹۳	-۰/۲۲۴	-۰/۰۰۲	۰/۲۴۷	۰/۴۰۵	-۰/۰۸۹	-۰/۳۸۷	-۰/۳۳۶	۱/۳۷۶	۰/۴۵۵	۰/۹۶۳	۰/۳۷۸
	Zn	-۰/۶۳۵	۰/۱۱۸	۰/۵۱۰	۱/۰۹۹	۱/۵۸۱	۱/۶۵۳	۱/۴۲۲	۰/۳۰۷	-۰/۱۷۳	۰/۳۹۵	۱/۵۷۶	-۰/۵۲۱	۱/۵۰۷	-۲/۴۵۴
	Cu	۰/۰۲۳	۰/۰۵۲	-۰/۲۱۴	۵/۵۰۰	۵/۱۸۰	۴/۶۵۱	۴/۱۱۹	۰/۴۰۶	۴/۸۲۷	-۰/۲۷۱	-۳/۹۵۹	۰/۷۰۳	۰/۴۵۱	-۰/۱۹۳
NSE	Cd	-۰/۱۵۱	-۲/۱۲۲	-۸/۸۱۵	-۴/۱۰۶	-۰/۴۴۰	-۵/۲۴۰	-۰/۶۶۶	-۷/۰۷۸	-۰/۵۲۶	-۰/۲۵۱	۰/۹۹۹	-۱/۱۰۱	-۷/۴۳۱	-۰/۴۵۵
	Zn	-۳/۱۰۳	-۰/۰۳۱	-۱/۶۵۰	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	-۸/۵۸۱	-۲/۰۷۲	-۰/۵۸۳	۰/۹۹۹	-۱/۷۶۵	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹
	Cu	-۰/۴۲۱	-۱/۸۴۰	-۳/۶۷۶	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	-۰/۶۷۸	۰/۹۹۷	-۶/۵۰۱	۰/۹۹۸	-۴/۰۲۴	-۱/۰۷۰	-۲/۷۹۲

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۳- نقشه توزیع مکانی غلظت کادمیوم، روی و مس در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل

Figure 3- Spatial distributions of Cd, Cu and Zn concentrations (mg kg^{-1}) in surface soils of Aran-O-Bidgol

طبق نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، روش کوکریجینگ برای عناصر مورد مطالعه کارایی ضعیفی نشان داده است، به طوری‌که از بین روش‌های استفاده شده در این پژوهش، روش کوکریجینگ برای عناصر روی و مس در رتبه سوم و برای عنصر کادمیوم در رتبه آخر قرار گرفته است. از آنجاکه وجود همبستگی بالا بین متغیرها می‌تواند باعث افزایش دقت روش کوکریجینگ شود؛ دلیل کارایی ضعیف روش کوکریجینگ در این مطالعه، می‌تواند همبستگی ضعیف بین متغیرهای مورد مطالعه باشد (۱۳، ۳۴). به طور کلی، روش‌های درون‌یابی تعیین می‌کنند که چگونه اطلاعات نمونه‌های مجزا به نقشه‌های پیوسته تبدیل می‌شوند. دقت درون‌یابی بستگی به این دارد که روش درون‌یابی چگونه تغییرپذیری مکانی و همبستگی خصوصیات خاک را نشان می‌دهد (۳۵). کریجینگ معمولی یک فیلتری است که جزئیات اطلاعات محلی را تعدیل می‌کند. در ناحیه‌ای با تغییرپذیری بالا که ارتباط مکانی ضعیف دارد، اثرات نرم‌سازی کریجینگ عادی خیلی نیرومندتر است (۳۶). صحت درون‌یابی مفهومی نسبی است، معیارها با اهداف درون‌یابی تغییر می‌کنند. دو هدف اصلی برای نقشه‌سازی آلودگی خاک، تحلیل الگوی مکانی آلودگی خاک و شناسایی مناطق آلوده است. در هدف تحلیل الگوی مکانی آلودگی، نتایج پیش‌بینی روند مکانی کلی آلودگی خاک تا حدامکان باید دقیق باشد. شکی نیست که کریجینگ عادی دارای بیش‌ترین توانایی به منظور پیش‌بینی روند کلی آلودگی خاک است. به هر حال در هدف شناسایی مناطق آلوده، نیاز است تا تکنیک‌های درون‌یابی خصوصیات محلی آلودگی خاک (به ویژه لکه‌های داغ و سرد محلی) را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند. مشخص است که تمام نتایج درون‌یابی دارای خطا هستند. شناسایی ناحیه‌ای به عنوان منطقه آلوده‌شده نباید انحصاراً متکی به نتایج درون‌یابی باشد. پیشنهاد می‌شود که زمینه طبیعی و فعالیت‌های انسانی قبل از تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود. عدم قطعیت در ارزیابی آلودگی عمدتاً در ناحیه‌ای با تغییرپذیری محلی زیاد رخ می‌دهد (۳۵). بنابراین نمونه‌برداری بیشتر در منطقه‌ای که دارای عدم قطعیت است توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که میان تمام روش‌های درون‌یابی استفاده شده، روش کریجینگ معمولی برای کادمیوم، مس و روی، بهترین تخمین‌گر در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل می‌باشد. از بین ۱۴روش مورد استفاده در این مطالعه، برای عناصر کادمیوم، روی و مس، به ترتیب روش‌های کوکریجینگ، چند جمله‌ای موضعی (درجه ۴) و وزن‌دهی معکوس فاصله (توان ۱) نامناسب‌ترین تخمین را جهت درون‌یابی این عناصر

www.SID.ir

Archive of SID

نشان دادند. این روش‌ها دارای بیشترین میزان خطا و انحراف و کمترین صحت برای تخمین عناصر مذکور بودند. همچنین با افزایش توان وزن‌دهی در روش چند جمله‌ای موضعی، برای عناصر کادمیوم و مس صحت درون‌یابی افزایش و برای عنصر روی صحت درون‌یابی کاهش یافت. درحالی‌که با افزایش توان وزن‌دهی در روش وزن‌دهی معکوس فاصله، صحت درون‌یابی برای عناصر کادمیوم و روی کاهش و برای عنصر مس افزایش یافت. با توجه به مطالعه صورت گرفته و نتایج به‌دست آمده و مقایسه آن با نتایج حاصل از پژوهش‌های دیگر، می‌توان گفت که روش‌های درون‌یابی مکانی به‌ویژه روش کریجینگ معمولی، از کارایی بسیاری در تخمین نقاط نامعلوم برخوردارند و نقشه-های حاصل می‌تواند ابزاری مناسب برای تصمیم‌گیری مدیران در بخش‌های گوناگون باشد. به‌طورکلی روش مناسب درون‌یابی مکانی در برآورد یک متغیر، به نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای تأثیرگذار بر آن بستگی دارد و نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر مناطق تعمیم داد. در پایان توصیه می‌شود تا کارایی سایر روش‌های درون‌یابی نیز مانند روش‌های ترکیبی، شبکه‌عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج فازی- عصبی در پهنه-بندی متغیرهای محیطی استفاده شود. همچنین اثر تعداد نقاط نمونه‌برداری و روش‌های مختلف برآورد غلظت زمینه در تخمین مناطق آلوده به فلزات سنگین در پژوهش‌های آتی استفاده شود.

سپاسگزاری

این مطالعه بخشی از طرح پژوهشی به شماره ۹۲۰۱۱۹۷۲ صندوق حمایت از پژوهشگران کشور (INFS) است. بدین وسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران کشور سپاسگزاری می‌شود.

منابع

۱. محمدزمانی، س.، ایوبی، ش.ا و خرمالی، ف. بررسی تغییرات مکانی خصوصیات خاک و عملکرد گندم در بخشی از اراضی زراعی سرخنکلاته استان گلستان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳۸۶، شماره ۴۰، صفحات ۷۹ تا ۹۲.

۲. ایوبی، ش. ا.، محمد زمانی، س و خرمالی، ف. برآورد مقدار ازت کل خاک به کمک ماده آلی و با استفاده از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و کریجینگ- رگرسیون در بخشی از اراضی زراعی سرخنکلاته استان گلستان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳۸۶، جلد ۱۴، صفحات ۷۸ تا ۸۷.

۳. حسنی پاک، علی اصغر. زمین‌آمار (ژئواستاتیستیک)، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۷، صفحه ۳۱۴.

4. Mueller T.G., Pierce F.J., Schabenberger O., and Warncke D.D. 2001. Map quality for site-specific fertility management. Soil Sci. Soc. Am. J, vol. 65, pp. 1547–1558.
5. Isaaks E.H., and Srivastava R.M. 1989. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York.
6. Hengl T. 2007. A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables. JRC Scientific and Technichal Reports. Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg.

۷. کاظمی پشت مساری، ح.، طهماسبی سروستانی، ز.، کامکار، ب.، شتایی، ش و صادقی، س. ارزیابی روش-های زمین‌آمار جهت تخمین و پهنه‌بندی عناصر غذایی پرمصرف اولیه در برخی اراضی کشاورزی استان گلستان. نشریه دانش آب و خاک، ۱۳۹۱، جلد ۲۲، شماره ۱، صفحات ۲۰۱- ۲۱۸.

۸. محمودی، ج.، زارعیان، ف.، جوادی، م. ر و خرسندی، ن. مقایسه کارایی چند روش زمین‌آماری برای تخمین برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۱۳۹۱، سال اول، شماره ۴، صفحات ۶۷- ۷۷.

www.SID.ir

Archive of SID

۹. موسوی فرد، س. م.، ممتاز، ح. ر و خداوردیلو، ح. کارایی برخی تخمین‌گرهای زمین‌آماری در میان‌یابی و پهنه‌بندی شماری از ویژگی‌های کیفی خاک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۱۳۹۲، سال دوم، شماره ۳، صفحات ۵۷- ۷۱.

10. Panagopoulos T., Jesus J., Antunes M.D.C., and Beltr J. 2006. Analysis of spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce. Europ J Agron, vol. 24, pp.1-10.

11. Chen T.B., Xie Y., Lei M., Yang J., Guo Q., Song B., and Zhou X. 2011. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation method: Accuracy and uncertainty analysis. Chemosphere, vol. 82, pp. 468-476.

12. Jiachun S., Haizhen W., Jianming X., Jianjun W., Xingmei L., and Haiping Z. 2007. Spatial distribution of heavy metal in soil: A case study of changing, China. Environ Geol, vol. 52, pp.1-10.

۱۳. نورزاده حداد، م.، مهدیان، م. ح و ملکوتی، م. ج. مقایسه کارایی برخی روش‌های زمین‌آماری به منظور بررسی پراکنش مکانی عناصر ریزمغذی در اراضی کشاورزی (مطالعه موردی: استان همدان). نشریه دانش آب و خاک، ۱۳۹۲، جلد ۲۳، شماره ۱، صفحات ۷۱- ۸۱.

14. Robinson T.P., and metternicht G. 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. computer and electronic in agriculter, vol. 50, pp. 97-108.

15. Li X.Y., Liu L.J., Wang Y.G., Luo G.P., Chen X., Yang X.L., GAO B., and He X.Y. 2012. Integrated assessment of heavy metal contamination in sediments from a coastal industrial basin. NE China, PLoS One.

۱۶. محمدی، ج. پدومتری، آمار مکانی. نشر پلک، ۱۳۸۵، جلد دوم، صفحه ۴۵۳.

۱۷. حسنی پاک، علی اصغر. زمین‌آمار (ژئواستاتیستیک)، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۶، صفحه ۳۱۴.

۱۸. سمیعی، م.، کرمی، م و زارع، ل. ارزیابی روش‌های زمین‌آماری در پراکنش مکانی هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در دشت فیروزآباد، اولین همایش ملی حفاظت و برنامه‌ریزی محیط‌زیست، ۳ اسفندماه ۱۳۹۱.

19. Ruppert D.1996. Local polynomial regression and its applications in environmental statistics.

20. School of Operations Research and Industrial Engineering, Cornell University, New York.

21. Carlson R.E., and Foley T.A. 1991. The parameter R^2 in multiquadric interpolation. Computers and Mathematic Apply, vol. 21, pp. 29-42.

۲۲. تقی‌زاده مهرجردی، ر. ا.، زارعیان جهرمی، م.، محمودی، ش.، حیدری، ا و سرمدیان، ف. بررسی روش‌های درون‌یابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۳۸۷، سال ۲، شماره ۵، صفحات ۶۳ تا ۷۰.

23. Zhang X.Y., Sui Y.Y., Zhang X.D., Meng., and Herbert, K. S.J. 2007.

www.SID.ir

Archive of SID

Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. Pedosphere, vol. 17(1), pp.19–29.

24. Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., Turco R.F., and Konopka A.E. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Sci Soc Am J, vol. 58, pp.1501-1511.
25. Paul D.W., Peter F., Florian W., Shamita K., and Karl S. 2012. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. Journal of Hydrology,vol. 464–465, pp.388–400.
26. Silvio J.G., Jonathan AL., Dennis W.H., Yann P., Jean C., and Jacques G. 2014. Mapping soil hydraulic conductivity and matric potential for water management of cranberry: Characterisation and spatial interpolation methods. biosystems engineering, vol. 128, pp.29-40.
27. Juang K.W., Lee D.Y., and Ellsworth T. R. 2001. Using rank-order geostatistics for special
28. interpolation of highly skewed data in heavy metal contaminated site. J. Environ. Qual, vol. 30, pp.894-903.

۲۹. موسوی، ا.، سفیانیان، ع.، میرغفاری، ن و خداکرمی، ل. بررسی توزیع مکانی برخی فلزات سنگین در خاکهای استان همدان. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، ۱۳۹۰، الف، جلد ۲۵، شماره ۴، صفحات ۳۲۳ تا ۳۳۶.

۳۰. میرزایی، ر.، اسماعیلی ساری، ع.، قربانی، ه.، حافظی مقدس، ن.، همامی، م. ر و رضایی، ح. ر. پیش‌بینی توزیع مکانی کادمیوم، آرسنیک، کروم و مس در خاک سطحی استان گلستان. مجله پژوهش‌های محیط‌زیست، ۱۳۹۲، سال ۴، شماره ۷، صفحات ۳۵ تا ۴۴.

31. Lado L.R., Hengl T., and Reuter H.I. 2008. Heavy metal in European soils: A geostatistical analysis of the foregs Geochemical database. Geoderma, vol. 148, pp.189-199.

۳۲. دیانی، م.، محمدی، ج و نادری، م. تجزیه و تحلیل زمین‌آماری غلظت سرب، روی و کادمیوم در خاک-های حومه سپاهان‌شهر واقع در جنوب اصفهان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۱۳۸۸، جلد ۲۳، شماره ۴، صفحات ۶۷ تا ۷۶.

۳۳. خداکرمی، ل.، سفیانیان، ع.، میرغفاری، ن.، افیونی، م و گلشاهی، ا. پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین کروم، کبالت و نیکل در خاک‌های سه زیر حوزه آبخیز استان همدان با استفاده از فناوری‌های GIS و زمین‌آمار. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۳۹۰، سال ۱۵، شماره ۵۸، صفحات ۲۴۳ تا ۲۵۴.

۳۴. محمودی، ش.، محمدی، ج و نادری، م. توزیع آماری و مکانی برخی عناصر سنگین در کلاس‌های اندازه‌ای ذرات خاک سطحی جنوب شهر اصفهان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۳۹۲، جلد ۲۰، شماره ۲، صفحات ۱ تا ۲۲.

۳۵. دلبری، م.، خیاط خلقی، م و مهدیان، م. ح. ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در مناطق شیب آب و پشت آب پایین دشت سیستان. مجله علوم کشاورزی ایران، ۱۳۸۳، جلد ۳۵، شماره ۱، صفحات ۱ تا ۱۳.

۳۶. جعفری، م.، عسگری، ح. م.، معظمی، م.، بی نیاز، م و طهمورث، م. بررسی توزیع مکانی برخی از خصوصیات خاک با کاربرد روش‌های زمین آماری. مجله پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی، ۱۳۸۷، شماره ۸۰، صفحات ۱۷۷ تا ۱۸۵.

www.SID.ir

Archive of SID

37. Xie Y., Chen T., Lei M., Yang J., Guo Q., Song B., and Zhou X. 2011. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. Chemosphere, vol. 82, pp.468–476.

38. Goovaerts P. 2000. Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria. Geoderma, vol. 97, pp.165–186.

www.SID.ir