

مقایسه روش های درون یابی مکانی جهت پهنه بندی غلظت فلزات سنگین در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل

یونس سیفی^۱

روح اله میرزایی^{۲*}

rmirzaei@kashanu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۷

چکیده

زمینه و هدف: انتخاب روش درون یابی مناسب فاکتور مهمی در تحلیل سطح است و تحلیلی سخت در تحلیل زمین آماری محسوب می شود چون روش های مختلف درون یابی می تواند منجر به نتایج نهایی مختلف شود. از این رو، هدف این پژوهش، بررسی کارایی روش های مختلف درون یابی 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 جمع آوری شد و غلظت کادمیوم، روی و مس در نمونه ها تعیین گردید؛ سپس با استفاده از روش های مختلف درون یابی شامل کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، وزن دهی معکوس فاصله، چند جمله ای موضعی و توابع پایه شعاعی، تغییرات مکانی غلظت عناصر در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل ارزیابی شد. ارزیابی متقابل و آماره های MSE، MBE، RMSE، NSE و PBIAS به منظور صحت سنجی روش ها استفاده شد.

یافته ها: 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 وزن دهی در روش چند جمله ای موضعی (LPI)، برای عناصر کادمیوم و مس، صحت درون یابی افزایش و برای عنصر روی، صحت درون یابی کاهش یافت؛ در حالی که با افزایش توان وزن دهی در روش وزن دهی معکوس فاصله^۳ (IDW)، صحت درون یابی 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.

واژه های کلیدی: درون یابی مکانی، زمین آمار، آلودگی خاک، فلزات سنگین، آران و بیدگل.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان. کاشان- ایران.

۲- استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان. کاشان- ایران * (مسئول مکاتبات).

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

Younes seifi¹

Rouhollah Mirzaei²

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).

مقدمه

مکانی در حال تکامل هستند و نمی توان یک روش را برای هر منظر و هر منطقه تجویز کرد، چون عوامل مختلفی مانند : طراحی نمونه برداری و توزیع فضایی نمونه ها، ماهیت و کیفیت داده ها، ارتباط بین متغیرهای اولیه و ثانویه، ارتباطات بین فاکتورهای مختلف و موارد دیگری از جمله انتخاب مدل مناسب تغییرنا و اندازه شبکه ها روی صحت روش ها تأثیرگذار می باشد (۴). به عبارت دیگر، هیچ پاسخ ساده ای در رابطه با انتخاب یک روش درون یابی مناسب وجود ندارد، چون " بهترین روش " فقط برای موقعیت های خاص است (۵). اکثر روش های درون یابی در مطالعات مربوط به پلات های آزمایشگاهی استفاده شده و به ندرت مطالعات وابسته به مقیاس های بزرگ گزارش شده است. به هر حال برای پیش بینی روند مکانی آلاینده ها، رسیدن به نتایج توزیع مکانی مناسب به وسیله فقط یک روش سنتی از درون یابی آن هم به وسیله داده های جدا از هم مشکل است که در بررسی های اخیر روش های گوناگون درون یابی برای سنجش توزیع مکانی فلزات سنگین خاک استفاده می شود (۶). در زمینه بررسی تغییرات مکانی خصوصیات خاک با استفاده از روش های درون یابی مکانی تحقیقات زیادی انجام شده است، اما نتایج به خوبی واضح و مشخص نیست . برخی از آن ها بیان داشتند که روش کریجینگ معمولی بهتر از سایر روش ها عمل می کند (۷، ۸، ۹، ۱۰)، در حالی که برخی دیگر نشان دادند که کریجینگ معمولی بهتر از سایر روش ها نیست (۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴).

هدف از درون یابی در علوم محیط زیست معمولاً تهیه نقشه هایی است در تصمیم گیری ها استفاده می شود، بنابراین دقت و صحت چنین نقشه هایی بفرآیند تصمیم گیری اثرگذار می باشد. از این رو انتخاب روش درون یابی مناسب بسیار ضروری و مهم است . یکی از موارد بسیار مهم درون یابی در علوم محیط زیست، تهیه نقشه های پراکنش آلاینده ها در محیط های مختلف آب، هوا و خاک است . خروجی چنین نقشه هایی معمولاً برای تعیین مناطق آلوده و مناطق پرخطر استفاده می شود. با وجود این، مطالعات اندکی در ایران تا کنون به بررسی اثر انتخاب روش

الگوی مکانی متغیرهای محیطی به طور فزاینده ای در مدیریت و علوم محیط زیست 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 هزینه بر است. توزیع مکانی متغیرهای محیطی اغلب از طریق منابع نقطه ای اندازه گیری می شود. با این حال، مدیران محیط زیستی برای تصمیم گیری موثر و مطمئن، به داده های مکانی پیوسته از سراسر ناحیه مورد نظر نیاز دارند . بنابراین روش های درون یابی مکانی، برای تخمین متغیرهای محیطی در مکان های نمونه برداری نشده به ابزاری ضروری تبدیل شده اند. خصوصیات خاک از نقطه ای 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 خصوصیات 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 محیط زیست ضروری است . تغییرپذیری خصوصیات خاک با این فرض که توزیع خصوصیات خاک در عرصه به صورت تصادفی است، اغلب توسط روش های آماری کلاسیک بیان می شود. در این روش ها نتایج به دست آمده از اندازه گیری نمونه ها، مستقل از موقعیت فضایی آنها مورد بررسی قرار می گیرد. بنابراین مقدار یک کمیت در یک نمونه هیچگونه اطلاعاتی درباره مقدار همان کمیت در نمونه های دیگر به فواصل مختلف ارائه نمی کند. در روش های زمین آمار می توان بین مقادیر یک کمیت در جامعه نمونه ها و فاصله و جهت قرار گرفتن نمونه ها نسبت به یکدیگر ارتباط برقرار کرد . بنابراین در این روش ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار مکانی بین داده ها پرداخته می شود و در صورت وجود ساختار مکانی، تحلیل داده ها انجام می شود (۳). انتخاب یک روش درون یابی مناسب برای داده ها آسان نیست و برای رسیدن به سطح پیوسته، هنوز روش جامعی وجود ندارد و روش های درون یابی

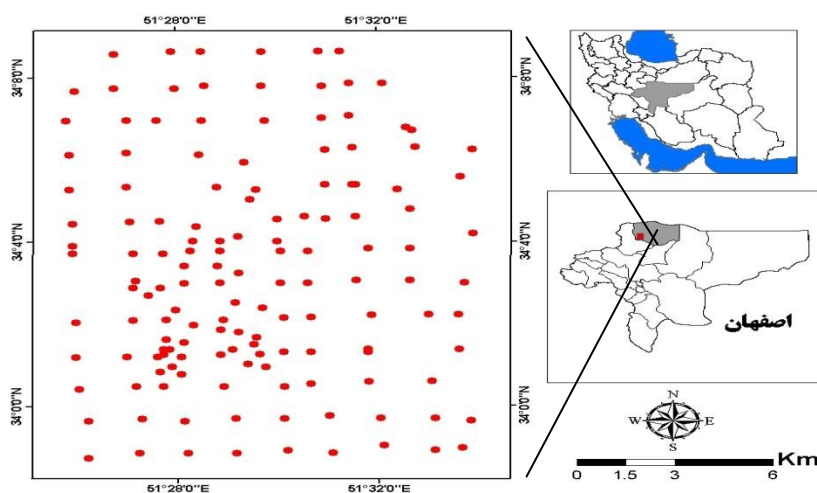
عرض شمالی و در حاشیه کویر مرکزی ایران قرار دارد. متوسط بارش سالیانه ۱۰۰ میلی‌متر و اقلیمی با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و خشک را دارا می‌باشد. ارتفاع متوسط شهر از سطح دریا ۹۱۲ متر می‌باشد. این شهرستان با ضریب خشکی ۵/۴ جزء منطقه فراخشک محسوب می‌گردد. عمده کاربری‌های این منطقه دربرگیرنده کاربری 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 ۱۳۵۰۰ هکتار است که از این میزان حدود ۲۰۰۰ هکتار اختصاص به کشت محصولات دائمی و باغی داشته و حدود ۱۱۵۰۰ هکتار 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.

درون‌یابی بر تعیین آلودگی محیط زیست پرداخته‌اند. با توجه مباحث ذکرشده، می‌توان گفت بررسی کارایی روش‌های مختلف درون‌یابی جهت پهنه بندی 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 شمالی‌ترین ناحیه استان اصفهان و در همسایگی شهرستان‌های کاشان، قم، نطنز و اردستان است (شکل ۱). 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



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
شبکه‌ای صورت گرفت. پس از نقطه‌یابی توسط GPS، ۵ زیرنمونه از هر گروه شبکه از عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری جمع‌آوری شد، به این صورت که یک نمونه از نقطه تقاطع جمع‌آوری شد و مابقی ۴ نمونه از ۴ قسمت به شعاع ۵۰ متری از

۵. 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

در این معادله $Z^*(x)$ تخمین مقدار متغیر Z در نقطه x و λ_i وزن آماری اخ تصاص یافته به مقادیر Z در نقطه x_i است. شرط استفاده از این تخمین گر آن است که متغیر Z توزیع نرمال داشته باشد. در صورتی که متغیر مورد نظر توزیع نرمال نداشته باشد، باید از کریجینگ غیرخطی استفاده نمود، یا با استفاده از روش های تبدیل داده ها، توزیع متغیر مورد نظر را تبدیل به نرمال نمود (۱۶، ۱۷). در این پژوهش از تابع نیم تغییرنا جهت نشان دادن تغییرات یک متغیر با در نظر گرفتن فاصله استفاده شد که معادله آن به صورت زیر است:

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

که در آن $y(h)$ مقدار نیم تغییرنا 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 نمونه های به کار رفته به ازای هر فاصله h می باشد. غالباً به $2y(h)$ واریوگرام و به $y(h)$ سمی واریوگرام اطلاق می شود (۱۸). در این معادله مقدار تغییرنا وابسته به فاصله بین مقادیر یک متغیر ناحیه ای در دو نقطه است. اگر این مقدار وابسته به جهت نیز باشد، نیم تغییرنمای ناهمسانگرد و در غیر این صورت همسانگرد نامیده می شود. در این پژوهش از مدل های کروی^۱، نمایی^۲، گوسی^۳، خطی^۴ و خطی دارای سقف^۵ برای برازش نیم تغییرنا استفاده می شود.

۳-۲. کوکریجینگ

همان طوری که در آمار کلاسیک روش های چندمتغیره برای تخمین وجود دارد، در زمین آمار هم می توان از روش کوکریجینگ که بر اساس همبستگی بین داده ها عمل می کند، درون یابی را با دقت بیشتری انجام داد. در واقع تخمین گر کوکریجینگ همان کریجینگ توسعه یافته است که در آن متغیرهای ثانویه نیز لحاظ شده است. معادله کوکریجینگ به صورت زیر است (۱۷):

نقطه مرکزی نمونه برداری برداشت شد. ۵ زیرنمونه با هم مخلوط شدند تا نمونه ترکیبی خاک به دست آید. در شکل (۱) موقعیت و تعداد نقاط نمونه گیری در منطقه مورد مطالعه آورده شده است. نمونه ها پس از خشک شدن در هوای آزاد (هوا خشک)، کوبیده شده و از الک ۲ میلی متری 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 میلی لیتر رسانده شد (۱۵)؛ سپس غلظت عناصر کادمیم، روی و مس در نمونه های خاک با دستگاه جذب اتمی شعله (FAAS) مدل Shimadzu، AA-670 مورد اندازه گیری قرار گرفت. خاک استاندارد SRM 2711 Montana II برای کنترل کیفیت و بررسی صحت اندازه گیری مقدار فلزات سنگین کل در نمونه ها استفاده شد. لازم به ذکر است در هنگام هضم به همراه هر گروه از نمونه ها یک نمونه شاهد تهیه و همراه با سایر نمونه ها مورد آنالیز قرار گرفت.

۳. روش های درون یابی

۳-۱. کریجینگ

کریجینگ یک روش برآورد زمین آماری است که بر پایه میانگین متحرک وزن دار استوار است. به طوری که می توان گفت این روش بهترین برآورد کننده خطی نارایب می باشد (۱۶). شرط نارایب بودن در سایر روش های تخمین، نظیر روش چندجمله ای و وزن دهی معکوس فاصله نیز اعمال می شود، ولی ویژگی کریجینگ آن است که در عین نارایب بودن، واریانس تخمین نیز در کمترین مقدار می باشد. بنابراین کریجینگ همراه هر تخمین، مقدار خطای آن را نیز می دهد که با استفاده از این ویژگی منحصر به فرد آن می توان قسمت های واجد خطای زیاد که برای کاهش خطا به داده های بیشتری نیاز دارند را مشخص نمود (۱۷). این برآورد کننده به صورت زیر تعریف می شود:

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

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

(۳)

$$z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i) \sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot y(x_k)$$

که در آن $z^*(x_i)$ مقدار تخمین زده شده برای نقطه x_i ، λ_i وزن مربوط به متغیر z ، λ_k وزن مربوط به متغیر کمکی y ، $z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر اصلی و $y(x_k)$ 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 به دست آوردن رابطه درجه اول، دوم و یا سوم بین مقادیر متغیر در نقاط همسایگی x ، y و z و حداقل سازی 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 هموارکننده^۱ و h ترسیم ناهمسانگرد^۲ مرتبط با فاصله نقاط هستند (۲۰). توابعی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارت از: چند ربعی^۳، چند ربعی معکوس^۴ و نواری کم ضخامت^۵ 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 طوری که توان‌های بزرگتر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان‌های کوچکتر وزن‌ها را به طور یکنواخت تری 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.

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\alpha}} \quad (4)$$

که در آن λ_i وزن نقطه i ام، D_i 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^۶ 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 طوری که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. همچنین با استفاده از مدل‌های به دست 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

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

$$MSE = \frac{\sum [(z^*(xi) - z(xi))^2]}{n} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n z^*(xi) - z(xi)}{n} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(xi) - Z^*(xi)]^2} \quad (7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(z(xi) - z^*(xi))^2]}{\sum_{i=1}^n [(z(xi) - 0)^2]} \quad (8)$$

$$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (z(xi) - z^*(xi))}{\sum_{i=1}^n (z(xi))} \quad (9)$$

در این معادلات $Z^*(X_i)$ مقدار برآورد شده در نقطه X_i ، $Z(X_i)$ مقدار اندازه گیری شده در نقطه X_i ، 0 میانگین مقادیر اندازه گیری شده و n تعداد نقاط می باشد. در این تحقیق برای انجام تحلیل های آماری از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ و برای انجام تحلیل های زمین آماری از نرم افزارهای GS+ نسخه ۵/۱ و ArcGIS نسخه ۱۰/۱ استفاده شد.

نتایج و بحث

۱.۳. توصیف آماری داده ها

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 (میلی گرم/کیلوگرم)	میانگین	حد اقل	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 روش های 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 هم بستگی (R^2)، برای فلزات کادمیم و مس، مدل کروی و برای فلز روی مدل نمایی به عنوان مناسب ترین مدل برگزیده شد (شکل ۲). پس از تهیه

تغییرنمای سطحی متغیرها به منظور بررسی همسانگردی داده ها، مشخص شد که متغیرها همسانگرد بوده و می توان در محاسبات بعدی از تغییرنمای هم جهته استفاده نمود. شکل (۲) تغییرنمای همه جهته متغیرهای کادمیم، روی و مس را نشان می دهد. علاوه بر این، مشخصات مربوط به این تغییرنماها (مدل برازش شده، شعاع تأثیر، آستانه، اثر قطعه ای و ...) در جدول (۲) نشان داده شده است. از بررسی نسبت اثر قطعه ای به آستانه می توان نتیجه گرفت که هر سه متغیر مورد مطالعه

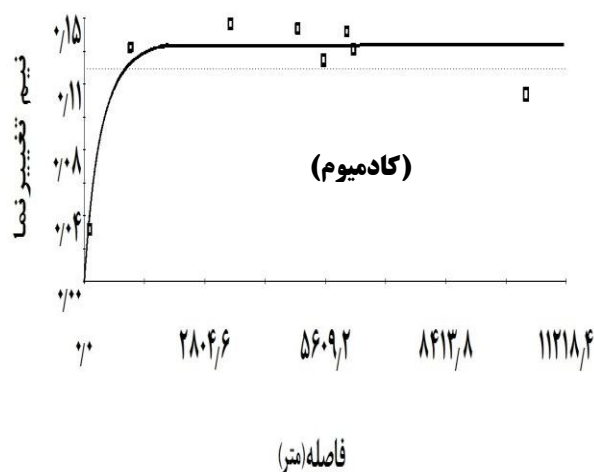
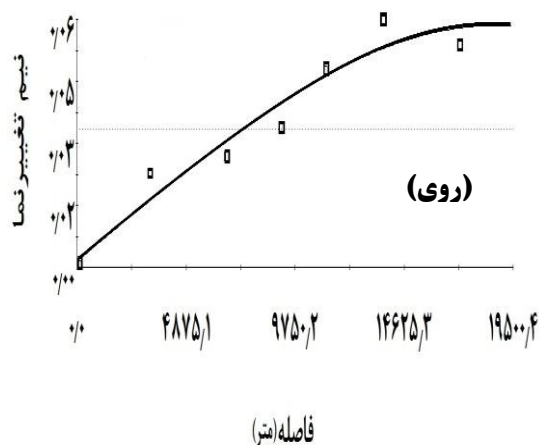
می‌تواند دلیلی بر مناسب بودن الگوی نمونه برداری، فواصل کوچک‌تر نمونه برداری و دقت نسبتاً مناسب تجزیه های آزمایشگاهی باشد. در این برازش مقدار اثر قطعه ای برای کادمیم $0/0001$ ، روی $0/0001$ و برای مس $0/001$ به دست آمد. در حالت ایده ال باید مقدار اثر قطعه ای صفر باشد، اما در واقعیت نیم تغییرنماهای تجربی مقادیر بالاتر از صفر را نشان می‌دهند، که این به دلیل ظهور جزء تصادفی متغیر می‌باشد. اثر قطعه‌ای به علت وجود تغییرات در فواصل نمونه برداری و یا به دلیل خطای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری بروز می‌کند (۳).

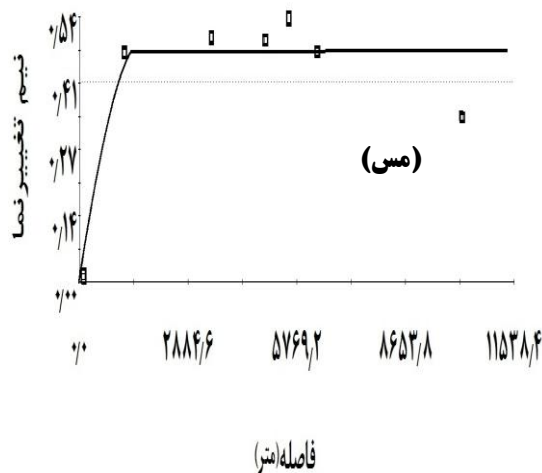
دارای ساختار مکانی (وابستگی مکانی) قوی می‌باشند، زیرا هرچه این نسبت کمتر باشد، نشان از آن دارد که ساختار مکانی بهتری برای متغیر وجود دارد. با توجه به نسبت اثر قطعه ای به آستانه می‌توان گفت: اگر این نسبت کمتر از $0/25$ باشد، متغیر مورد نظر دارای ساختار مکانی قوی، بین $0/25$ تا $0/75$ ساختار مکانی متوسط و هنگامی که بزرگتر از $0/75$ باشد، ساختار مکانی ضعیف است (۲۳). این امر می‌تواند نشان دهنده غلبه بیشتر واریانس بخش ساختاری تغییرنما بر واریانس بخش تصادفی آن در مورد همه فلزات در تحقیق حاضر باشد که خود

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	$0/0001$	$0/070$	۳۳۴۵۰	$0/99$	$0/99$	$1/44$	$0/001$	قوی
روی	نمایی	$0/0001$	$0/134$	۱۲۰۰	$0/99$	$0/90$	$1/28$	$0/0007$	قوی
مس	کروی	$0/001$	$0/469$	۱۴۹۰	$0/99$	$0/93$	$0/026$	$0/002$	قوی





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

Nash-Sutcliffe به یک نزدیک تر باشد، نشان دهنده صحت بالای درون یابی ها می باشد (۲۴). مقایسه روش های درون یابی بر اساس این شاخص ها در جدول (۴) نشان داده شده اند. در بین روش های مختلف درون یابی، روش کریجینگ معمولی (مدل کروی) برای عناصر کادمیم ($RMSE=0/0016$) و مس ($RMSE=0/039$) و روش کریجینگ معمولی (مدل نمایی) برای عنصر روی ($RMSE=0/978$) دارای کمترین میزان خطا و انحراف بود. از بین ۱۴ روش مورد استفاده در این مطالعه، برای عناصر کادمیم، روی و مس، به ترتیب روش های کوکریجینگ ($RMSE=2/464$)، چند جمله ای موضعی (درجه ۴) ($RMSE=13/81$) و وزن دهی معکوس فاصله (توان ۱) ($RMSE=9/422$) بالاترین میزان خطا را نشان دادند و نامناسب ترین روش شناخته شدند (جدول ۴). نتایج به دست آمده از جدول (۴) نشان می دهد که با افزایش توان وزن دهی در روش چند جمله ای موضعی، برای عناصر کادمیوم و مس صحت درون یابی افزایش و برای عنصر روی صحت درون یابی کاهش می یابد. در حالی که با افزایش توان وزن دهی در روش وزن دهی معکوس فاصله، صحت درون یابی برای عناصر کادمیوم و روی کاهش و برای عنصر مس افزایش می یابد. همچنین طبق نتایج به دست آمده از ارزیابی متقابل (جدول ۴) رتبه بندی روش ها (کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، وزن دهی معکوس فاصله،

وجود همبستگی مناسب بین متغیرها لازمه روش کوکریجینگ است، به عبارت دیگر این روش در شرایطی می تواند کارایی داشته باشد که بین متغیر مورد نظر و متغیر وابسته همبستگی معنی داری 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 می دهد، کربن آلی با کادمیم (در سطح ۰/۰۵)، روی (در سطح ۰/۰۱) و مس (در سطح ۰/۰۱) رابطه معنی داری داشته است. بنابراین درصد کربن آلی به عنوان متغیر کمکی مناسب برای کادمیم، روی و مس انتخاب شد. پس از انجام درون یابی ها با استفاده از روش های مورد نظر (کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، چند جمله ای موضعی، توابع پایه شعاعی و وزن دهی معکوس فاصله)، آماره های ارزیابی صحت روش های درون یابی، برای متغیرها تعیین گردیدند. هرچه مقادیر میانگین مجذور خطا (MSE)، میانگین اربیب خطا (MBE)، خطای برآورد ریشه دوم میانگین مربعات (RMSE) و درصد اربیب خطا (PBIAS) به صفر نزدیک تر باشند، موید آن است که صحت درون یابی ها بیشتر بوده است (۱۳، ۲۴، ۲۵). همچنین هر چه مقدار شاخص کارایی (NSE)

جمله در آزمایشی، موسوی و همکاران (۲۷) برای پهنه بندی 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 زمین آماری نشان داد که مدل نمایی، دایره ای، نمایی و گوسی به ترتیب بهترین مدل برای تعیین تغییرپذیری مکانی کادمیم، آرسنیک، کروم و مس می باشد. همچنین در مطالعات لادو^۱ و همکاران (۲۹)، دپانی 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 می رسد که روش مناسب زمین آماری در برآورد یک متغیر، به نوع متغیر و عوامل منطقه ای تأثیرگذار بر آن بستگی دارد و نمی توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر مناطق تعمیم داد (۲۱، ۳۳).

توابع پایه شعاعی و چند جمله ای موضعی) بر اساس RMSE به قرار زیر است: برای عنصر کادمیم پس از روش کریجینگ معمولی (مدل کروی)، به ترتیب روش های توابع پایه شعاعی (مدل چندربعی)، وزن دهی معکوس فاصله (توان ۱)، چند جمله ای موضعی (توان ۴) و کوکریجینگ، برای عنصر روی پس از روش کریجینگ معمولی (مدل نمایی)، روش های توابع پایه شعاعی (مدل چندربعی)، کوکریجینگ، وزن دهی معکوس فاصله (توان ۱) و چند جمله ای موضعی (توان ۴)، برای عنصر مس پس از روش کریجینگ معمولی (مدل کروی)، روش های چند جمله ای موضعی (توان ۴)، کوکریجینگ، توابع پایه شعاعی (مدل نواری کم ضخامت) و وزن دهی معکوس فاصله (توان ۱) در رتبه های بعدی قرار گرفتند.

روش های کریجینگ در تخمین توزیع مکانی فلزات سنگین خاک، پتانسیل بالایی دارند و به عنوان روش مناسب برای درون یابی و تهیه نقشه های آلاینده ها پیشنهاد شده اند (۲۶). این موضوع توسط مطالعات متعددی تاکنون تایید شده است از این

جدول ۳- ضریب همبستگی خطی بین متغیرهای مطالعه شده

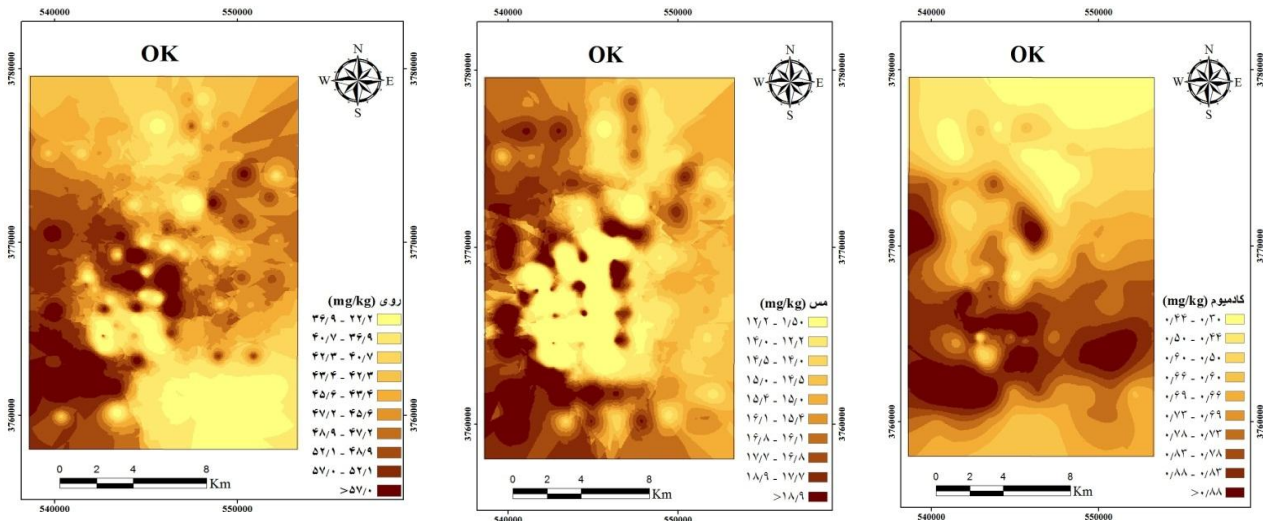
Table 3. Correlation coefficient matrix of variables in the studied soils

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

** همبستگی معنی دار در سطح ۰/۰۱ و * همبستگی معنی دار در سطح ۰/۰۵

جنوب غربی منطقه مشاهده شده است درحالی که برای عنصر کادمیوم بیشترین غلظت ها 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 می رسد کوره های آجرپزی بر افزایش غلظت کادمیوم در خاک سطحی بخش های مرکزی منطقه مطالعاتی نیز اثر گذار بوده اند.

در نهایت بر اساس بهترین روش درون یابی (کریجینگ معمولی) نقشه پهنه بندی غلظت کادمیوم، روی و مس در خاک سطحی شهرستان آران و بیدگل تهیه گردید (شکل ۳). همان طور که در نقشه ها مشخص است هر کدام از عناصر دارای الگوی پراکنش تقریباً متفاوتی در خاک سطحی منطقه می باشند. بیشترین غلظت های عناصر مس و روی بیشتر در بخش غرب و



شکل ۳- 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

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 نلیج درون‌یابی دارای خطا هستند. شناسایی ناحیه‌ای به عنوان منطقه آلوده شده 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 ۱۴ روش مورد استفاده در این مطالعه، برای عناصر کادمیوم، روی و مس، به ترتیب روش‌های کوکریجینگ، چند جمله‌ای موضعی (درجه ۴) و وزن دهی معکوس فاصله (توان ۱) نامناسب‌ترین تخمین را جهت درون‌یابی این عناصر

طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش، روش کوکریجینگ برای عناصر مورد مطالعه کارایی ضعیفی نشان داده است، به طوری که 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 کوکریجی نگ 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 نیرومند تر 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 حد امکان باید دقیق باشد.

مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳۸۶، شماره ۴۰، صفحات ۷۹ تا ۹۲.

۲. ایوبی، ش. ا.، محمد زمانی، س و خر مالی، ف. برآورد مقدار ازت کل خاک به کمک ماده آلی و با استفاده از روش های 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. زمین آمار (ژئواستاتستیک)، 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 Technical Reports. Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg.

۷. کاظمی پشت مساری، ح.، طهماسبی سروسنایی، ز.، کامکار، ب.، شتایی، ش و صادقی، س. ارزیابی روش های زمین آمار جهت تخمین و پهنه بندی 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 زمین آماری برای تخمین برخی ویژگی های فیزیکی خاک. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۱۳۹۱، سال اول، شماره ۴، صفحات ۶۷-۷۷.

نشان دادند. این روش ها دارای بیشترین میزان خطا و انحراف و کمترین صحت برای تخمین عناصر مذکور بودند. همچنین افزایش توان وزن دهی در روش چند جمله ای موضعی، برای عناصر کادمیوم و مس صحت درون یابی افزایش و برای عنصر روی صحت درون یابی کاهش یافت. درحالی که با افزایش توان وزن دهی در روش وزن دهی معکوس فاصله، صحت درون یابی برای عناصر کادمیوم و روی کاهش و برای عنصر مس افزایش یافت. با توجه به مطالعه صورت گرفته و نتایج به دست آمده و مقایسه آن با نتایج حاصل از پژوهش های دیگر، می توان گفت که روش های درون یابی مکانی به ویژه روش کریجینگ معمولی، از کارایی بسیاری در تخمین نقاط نامعلوم برخوردارند و نقشه های حاصل می تواند ابزاری مناسب برای تصمیم گیری مدیران در بخش های گوناگون باشد. به طور کلی روش مناسب درون یابی مکانی در برآورد یک متغیر، به نوع متغیر و عوامل منطقه ای تأثیرگذار بر آن بستگی دارد و نمی توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر مناطق تعمیم داد. در پایان توصیه می شود تا کارایی سایر روش های درون یابی نیز مانند روش های ترکیبی، شبکه عصبی مصنوعی، سرهم استنتاج فازی- عصبی در پهنه بندی متغیرهای محیطی استفاده شود. همچنین اثر تعداد نقاط نمونه برداری و روش های مختلف برآورد غلظت زمینه در تخمین مناطق آلوده به فلزات سنگین در پژوهش های 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 سپاسگزار می شود.

منابع

۱. محمد زمانی، س.، ایوبی، ش. ا. و خر مالی، ف. بررسی تغییرات مکانی خصوصیات خاک و عملکرد گندم در بخشی از اراضی زراعی سرخنکلاته استان گلستان.

- 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. زمین آمار (ژئواستاتیسیتیک)، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۶، صفحه ۳۱۴.
۱۸. سمیعی، م.، کرمی، م و زارع، ل. ارزیابی روش های زمین آماری در پراکنش مکانی هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در دشت فیروزآباد، اولین همایش ملی حفاظت و برنامه ریزی محیط زیست، 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. تقی زاده مهرجردی، ر. ا.، زارعیان جهرمی، م.، محمودی، ش.، حیدری، ا و سرمیدیان، ف. بررسی روش های درون یابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی های کیفی آب های 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. موسوی فرد، س. م.، ممتاز، ح. ر و خداوردیلو، ح. کارایی برخی تخمین گرهای زمین آماری در میان یابی و پهنه بندی شماری از ویژگی های 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 روش های زمین آماری 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

محیط زیست، 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 foreg Geochemical database. *Geoderma*, vol. 148, pp.189-199.
۳۲. دیانی، م.، محمدی، ج و نادری، م. تجزیه و تحلیل زمین آماری غلظت سرب، روی و کادمیوم در خاک های حومه سپاهان شهر 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. پهنه بندی غلظت فلزات سنگین کروم، کبالت و نیکل در خاک های سه زیر حوزه آبخیز استان همدان با استفاده از فناوری های GIS و زمین آمار. *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 کلاس های اندازه ای ذرات خاک سطحی جنوب شهر اصفهان. *مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک*، ۱۳۹۲، جلد ۲۰، شماره ۲، صفحات ۱ تا ۲۲.
۳۵. دلبری، م.، خیاط خلقی، م و مهدیان، م. ح. ارزیابی روش های زمین آمار 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 روش های زمین آماری. *مجله پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی*، ۱۳۸۷، شماره ۸۰، صفحات ۱۷۷ تا ۱۸۵.
- 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 پژوهش های خاک (علوم آب و آب)*، ۱۳۹۰، الف، جلد ۲۵، شماره ۴، صفحات ۳۲۳ تا ۳۳۶.
۳۰. میرزایی، ر.، اسماعیلی ساری، ع.، قربانی، ه.، حافظی مقدس، ن.، همای، م. ر و رضایی، ح. ر. پیش بینی توزیع مکانی کادمیوم، آرسنیک، کروم و مس در خاک سطحی استان گلستان. *مجله پژوهش های*

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