



سال بیست و دوم، شماره ۸۰
زمستان ۱۴۰۱، صفحات ۱۴۹-۱۳۵

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه علمی فضای جغرافیایی

DOI:10.52547/GeoSpa.22.4.135

نوشین شاهین زاده^۱

* کامران محسنی فر^۲

تیمور بابایی نژاد^۳

نوید قنواتی^۴

بررسی کارایی روش‌های زمین آماری در پایش و پهنه‌بندی تغییرات مکانی برخی خصوصیات شیمیایی خاک

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵

چکیده

پراکنش خصوصیات شیمیایی خاک و میزان تغییرات آن‌ها، از عواملی هستند که در تولید پایدار، اهمیت ویژه‌ای دارند. روش‌های اندازه‌گیری این ویژگی‌ها که عمدتاً از طریق آزمون خاک امکان‌پذیر می‌باشد، آن‌هم در سطحی وسیع، بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است. یکی از روش‌هایی که به منظور پایش وضعیت این ویژگی‌ها و نیز کاهش هزینه‌های نمونه‌برداری در سطح وسیع استفاده می‌شود، درون‌یابی است. درون‌یابی روش‌های متعددی دارد که هر روش در شرایطی خاص دقت متفاوتی دارد. در این تحقیق دقت سه روش معمول درون‌یابی به منظور درون‌یابی برخی فاکتورهای شیمیایی خاک‌های اراضی کشاورزی استان خوزستان بررسی شده‌اند. متغیرهای مورد نظر در این تحقیق شامل نیتروژن کل (TN)، پتاسیم قابل جذب (AK)، فسفر قابل جذب (AP)، کربنات کلسیم (CaCO₃)، درصد کربن آلی (OC)، هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) می‌باشند که در ۲۷۰ نمونه خاک اندازه‌گیری شدند. روش‌های میان‌یابی به کار رفته نیز شامل کریجینگ معمولی (OK)، میانگین متحرک وزن‌دار (IDW) و توابع شعاعی (RBF) بوده است. برای انتخاب روش مناسب، از معیارهای آماری دقت (MAE)، انحراف (MBE) و مجذور میانگین خطا (RMSE) استفاده شد. بررسی نتایج واریوگرافی نشان داد که ساختار مکانی (نسبت همبستگی) فسفر (۰/۲۴۳) و پتاسیم (۰/۱۵۹) قابل جذب، قوی، نیتروژن کل ضعیف (خطای اندازه‌گیری ۰/۸۱۶) و بقیه پارامترها

۱- گروه خاکشناسی، پردیس علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. اهواز، ایران.

E-Mail: mohsenifar@live.com

* ۲- گروه خاکشناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. (نویسنده مسئول).

۳- گروه خاکشناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۴- گروه خاکشناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

ساختار مکانی متوسطی داشتند. بر اساس نتایج این جدول می‌توان روش کریجینگ معمولی با مدل نمایی را بهترین و دقیق‌ترین روش ($MAE=0/0715$ و $RMSE=0/0890$ و $MBE=-0/0006$ و $R2=0/912$) برای درون‌یابی نیتروژن کل دانست. این در حالی است که بهترین روش برای درون‌یابی کربن آلی، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب، کربنات کلسیم، اسیدپته و هدایت الکتریکی خاک به ترتیب RBF، کریجینگ معمولی (با مدل کروی)، کریجینگ معمولی (با مدل کروی)، RBF، کریجینگ معمولی (با مدل نمایی) و RBF بوده است. نتایج نشان داد که روش IDW روش مناسبی برای درون‌یابی هیچکدام از پارامترها نبود. از نقشه‌های تهیه شده به وضوح می‌توان عدم یکنواختی کوددهی‌ها را مشاهده نمود به نحوی که میزان فسفر قابل جذب در بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه بیش‌تر ولی میزان پتاسیم قابل جذب در بخش‌های شمالی و مرکزی منطقه مورد مطالعه بیش‌تر بوده است. در حالی که در بخش شرقی و غربی منطقه مورد مطالعه و در جاهایی که میزان pH بالای ۷/۷ است، میزان کربنات کلسیم خاک‌ها در بالاترین حد خود یعنی ۴۶ الی ۴۹ درصد می‌باشد. تهیه نقشه‌های با دقت مناسب به وسیله روش‌های زمین‌آماری برای پارامترهایی که وابستگی مکانی خوبی دارند، روشی مناسب برای پایش و مدیریت اراضی در سطح کلان می‌باشد.

کلید واژه‌ها: پراکنش مکانی، پهنه‌بندی، خصوصیات شیمیایی خاک، درون‌یابی، زمین‌آمار.

مقدمه

بررسی پراکنش مکانی خصوصیات شیمیایی خاک‌ها، در اراضی کشاورزی از اهمیت زیادی برخوردار است. بررسی این خصوصیات در مباحث کشاورزی دقیق و مسائل مربوط به مدیریت و برنامه‌ریزی کلان در کشاورزی اهمیت به‌سزایی دارد (Quine and Zhang, 2002). تغییرپذیری خصوصیات خاک‌ها در مقیاس‌های مختلف، فرآیندی کاملاً طبیعی است (Lamsal et al., 2009) و بررسی کمی این تغییرات به منظور مدیریت کودی و تغذیه‌ای، کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی (Bosun and Qiguo, 2003; Yemefack et al., 2005)، بالا بردن بازده تولیدات کشاورزی و نیل به کشاورزی پایدار، امری ضروری است (Yamagishi et al., 2003). به منظور مدیریت بهینه تغذیه خاک نیاز به دانستن این خصوصیات می‌باشد، لیکن از آن‌جا که اندازه‌گیری این ویژگی‌ها در آزمایشگاه و آن هم برای یک سطح وسیع، بسیار هزینه‌بر است، نیاز به برآورد توزیع مکانی آن‌ها می‌باشد (Panagopoulos et al., 2000). یکی از مهم‌ترین ابزارها به منظور پیش‌بینی مکانی خصوصیات خاک‌های کشاورزی، زمین‌آمار (Geostatistic) است (Robinson and Metternicht, 2006). در این راستا در گذشته تحقیقات نسبتاً خوبی انجام گرفته است. Jafarinia and Akbarinia (2014) تغییرات مکانی چند ویژگی آب و خاک را بررسی نمودند و نهایتاً مشخص شد روش کریجینگ بهترین نتیجه را برای درون‌یابی و تهیه نقشه در این خصوص داشته است. Nourzadeh Haddad and Bybordi (2014) به منظور مدیریت عناصر ریزمغذی در سطح وسیع از روش‌های زمین‌آماری استفاده نمودند و اذعان داشتند که مدل‌های کروی و نمایی بهترین نتایج را برای برازش تغییرنمای عناصر مورد بررسی ارائه نمودند.

Bai et al (2018) با استفاده از تکنیک زمین‌آمار کیفیت آب‌های زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که پارامترهای سختی کل، منیزیم، کلسیم و اسیدیته با استفاده از روش تخمین گر توابع شعاعی و پارامتر سدیم با استفاده از روش عکس فاصله و پارامتر کل مواد جامد محلول با استفاده از کریجینگ نمایی و نیترات با استفاده از کریجینگ معمولی کم ترین مقدار ریشه دوم میانگین مربع خطا را داشته است. (Gholami et al (2020) با بررسی خصوصیات خاک در اراضی شرق کارون به این نتیجه رسیدند که برای ترسیم واریوگرام‌های کریجینگ پارامترهای شن، سیلت، رس، کربنات کلسیم، ظرفیت تبادل کاتیونی، نسبت جذب سدیم، مدل گوسی، برای کربن آلی، مدل نمایی، برای نیترون کل و فسفر قابل جذب، مدل کروی مناسب بوده است. (Wang et al (2019) با استفاده از زمین‌آمار توزیع اندازه ذرات را در خاک‌های معدنی بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که این روش می‌تواند برآورد خوبی از توزیع اندازه ذرات در تمامی انواع خاک‌هایی که نمونه‌های کمی در آن‌ها مورد آزمایش قرار گرفته، داشته باشد لذا این مطالعه با هدف ارزیابی دقت سه روش زمین‌آماري کریجینگ معمولی^۵، وزندهی معکوس فاصله^۶ و توابع شعاعی^۷، به منظور تعیین توزیع مکانی و پهنه‌بندی برخی خصوصیات شیمیایی خاک در استان خوزستان انجام گردیده است. این خصوصیات شامل نیتروژن کل (TN)، پتاسیم قابل جذب (AK)، فسفر قابل جذب (AP)، کربنات کلسیم (CaCO₃)، درصد کربن آلی (OC)، هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) بوده است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد نظر در موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲ دقیقه و ۵۶ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه و ۶ ثانیه عرض شمالی و ۴۸ درجه ۳۴ دقیقه و ۱۲ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه و ۲ ثانیه طول شرقی قرار دارد و وسعت آن ۲۳۸۰۴/۸۶ هکتار می‌باشد. این اراضی شامل اراضی کشاورزی بوده که با نمونه برداری تصادفی و مطالعات صحرائی ۲۷۰ نمونه خاک مرکب تهیه و فاکتورهای مورد نظر در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. برای تهیه هر نمونه مرکب، چهار نمونه ۱۰۰۰ گرمی تهیه و از ترکیب آنها یک نمونه ۱۰۰۰ گرمی تهیه شد. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه و پراکنش نقاط نمونه‌برداری شده را نمایش می‌دهد.

خصوصیات شیمیایی مورد نظر

خصوصیات شیمیایی مورد نظر در این تحقیق شامل خصوصیات شامل نیتروژن کل (TN)، پتاسیم قابل جذب (AK)، فسفر قابل جذب (AP)، کربنات کلسیم (CaCO₃)، درصد کربن آلی (OC)، هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) بوده است. علاوه بر EC و pH که دو فاکتور مهم و تاثیرگذارند بر عملکرد گیاه هستند، نیتروژن، فسفر و پتاسیم از مهم‌ترین عناصر ضروری پرمصرف برای رشد گیاه به‌شمار می‌روند (Xing et al., 2007). این

5- Ordinary Kriging

6- Inverse Distance Weighted

7- Radials Basic Functions

خصوصیات به عنوان متغیرهای مستقل لحاظ و در نقاط نمونه برداری شده اندازه گیری شدند. همچنین به منظور بررسی بیش تر خصوصیات خاک های مدنظر، درصد مواد آلی و آهک نیز اندازه گیری شد. در این راستا پتانسیل قابل تبادل به روش فلیم فتومتر، نیتروژن کل با روش کجلدال، درصد کربن آلی با روش و الکی-بلک، فسفر قابل جذب با روش اولسون و آهک با روش تیتراسیون در نمونه های خاک اندازه گیری شد. سپس با استفاده از روش های زمین آماری انتخاب شده، خصوصیات یاد شده برای تمام سطح منطقه مورد مطالعه درون یابی شده اند.

آنالیزهای آماری و زمین آماری

نیم تغییرنما اساسی ترین مبحث در زمین آمار است که برای توصیف ارتباط مکانی یک متغیر به کار می رود. نیم تغییرنما، کمیتی برداری است که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه گیری شده را بر حسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و با توجه به جهت و فاصله آن نشان می دهد (Goovaerts, 2000):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن: $N(h)$ ، تعداد جفت نمونه های به کار رفته در محاسبه $\gamma(h)$ که در فاصله h از هم قرار دارند، $Z(x_i)$ ، مقدار مشاهده شده، $Z(x_i+h)$ ، مقدار مشاهده شده که به فاصله h از $Z(x_i)$ قرار دارد. در یک شبکه منظم، فاصله مورد نظر برای محاسبه نیم تغییرنما، فاصله بین نمونه ها می باشد. چهار مدلی که در این تحقیق برای تعیین بهترین مدل تئوری نیم تغییرنما بررسی شد شامل کروی^۸، نمائی^۹، دایره ای^{۱۰} و گوسی^{۱۱} می باشد. روش های زمین آماری که در این تحقیق مدنظر قرار گرفت شامل میانگین متحرک وزندار، توابع شعاعی، کریجینگ معمولی بود. روش میانگین متحرک وزندار روشی ساده برای تخمین داده ها است. در این روش، برای برآورد یک متغیر در یک نقطه مشخص، به داده های معلوم اطراف، وزن های مختلفی که متناسب با عکس فاصله آن ها تا داده مجهول است، لحاظ می گردد. معادله زیر چگونگی برآورد متغیر مجهول را نشان می دهد (Robinson and Metternicht, 2005):

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^\alpha}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\alpha}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

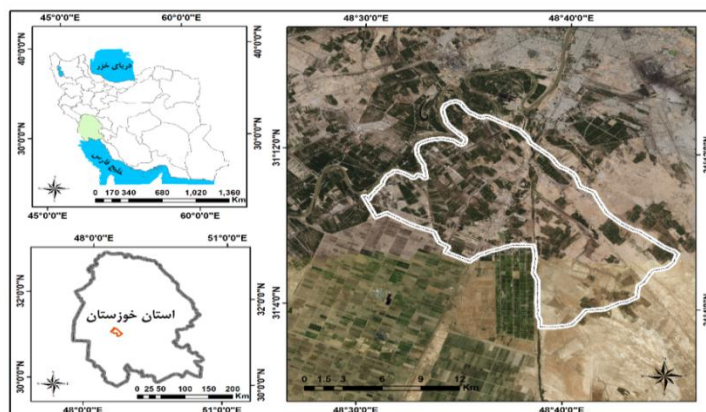
که در آن: Z^* ، مقدار برآورد شده، Z_i ، مقدار متغیر مشاهده شده در اطراف نقطه مورد نظر، d_i ، فاصله بین نقطه مشاهده شده تا نقطه مورد تخمین، α ، توان معادله است که می تواند صحیح و یا غیر صحیح باشد و n ، تعداد نقاط مشاهده شده می باشد. در این روش، به نقاط نزدیک تر وزن بیش تری داده می شود. در واقع هر چه مقدار مشاهده شده به نقطه مجهول نزدیک تر باشد، نقش بیش تری در برآورد ایفا می کند.

8- Spherical

9- Exponential

10- Circular

11- Gaussian



شکل ۱: نقشه منطقه مورد مطالعه و پراکنش نقاط نمونه‌برداری شده

Figure 1: Map of the study area and sampling point distribution

اساس درونیابی با توابع شعاعی در واقع، در حداقل بودن مقدار انحنای است که تحت شرایط (۱) سطح منحنی باید دقیقاً از درون نقاط مورد نظر بگذرد و (۲) مجموع مربعات خطا برای تمامی نقاطی که منحنی از آن‌ها گذشته، حداقل باشد، شرط آن هم این است که خطای درونیابی برای هر یک از این نقاط حداقل باشد، به دست می‌آید. یعنی فاصله خط منحنی تا نقاط در کم‌ترین مقدارش باشد. در این تحقیق از روش کششی استفاده شد که از رابطه زیر به دست می‌آید (Taboada et al., 2008):

$$R(r) = \frac{1}{2\pi\phi^2} \left[\ln\left(\frac{r\phi}{2}\right) + c + k_0(r\phi) \right] \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن: ϕ^2 ، پارامتری که خط منحنی از آن می‌گذرد، r ، فاصله بین نقطه و نمونه، k_0 ، تابع Bessel تغییر داده شده و C مقدار ثابت (۰/۵۷۷۲۱۵) می‌باشد.

کریجینگ به عنوان تابعی خطی از مجموع مشاهدات واقع در همسایگی نقطه مورد تخمین، می‌باشد. کریجینگ یک تخمینگر خطی نارایب با کم‌ترین واریانس به صورت زیر است:

$$Z^*(x_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن: $Z^*(x_i)$ ، مقدار تخمینی متغیر، λ_i ، وزن نمونه i ام، n ، تعداد مشاهدات و $Z(x_i)$ ، مقدار مشاهده شده متغیر می‌باشد. یکی از روش‌هایی که به طور معمول برای ارزیابی دقت روش‌های زمین‌آماري به کار می‌رود، ارزیابی متقابل^{۱۲} است. در این روش، یکی از داده‌ها حذف و از داده‌های باقی‌مانده برای برآورد مقدار داده‌های حذف شده، استفاده می‌شود. بر اساس روش ارزیابی متقابل در این تحقیق از معیار دقت^{۱۳}، معیار انحراف^{۱۴} MBE و مجذور میانگین خطا^{۱۵} ($RMSE$) استفاده شد. روابط این شاخص‌ها به صورت زیر است (Mohamadzamani et al 2007):

12- Cross-Validation

13- Mean Absolute Error

14- Mean Bias Error

15- Root mean square error

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z^*(x_i) - z(x_i)| \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i)) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z(x_i) - z'(x_i)\}^2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن‌ها: $Z^*(x_i)$ ، مقدار تخمین زده شده برای نقطه x_i ، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده برای نقطه x_i و $N=n$ ، تعداد داده‌ها می‌باشند. به منظور بررسی داده‌ها از نظر آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. همچنین برای بررسی ساختار مکانی داده‌های اندازه‌گیری شده، واریوگرام همه‌جهته مربوط به متغیرها با استفاده از نرم‌افزار GS+ ترسیم شد.

بحث و یافته‌ها

با توجه به چولگی و کشیدگی این داده‌ها، مشخص شد که داده‌های مورد نظر دارای توزیع نرمال نیستند. به منظور نرمال‌سازی داده‌های مورد نظر، بعد از حذف داده‌های پرت از لگاریتم‌گیری و روش کاکس-باکس استفاده شد. ویژگی‌های آماری داده‌ها پس از نرمال شدن در جدول (۱) آمده است. همچنین دو تست نرمالیتی کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک روی داده‌ها انجام که نتایج آن حاکی از نرمال شدن داده‌ها در اثر لگاریتم‌گیری بود. همچنین واریوگرام مربوط به هر متغیر در شکل (۲) نشان داده شده است.

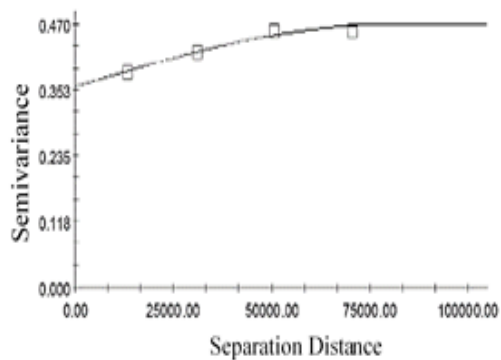
جدول ۱- خلاصه آماری داده‌های مورد استفاده

Table 1- Statistical summary of the data used

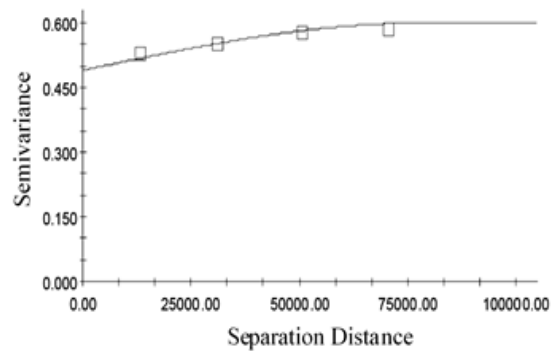
| ویژگی | واحد | میانگین | میانه | واریانس | چولگی | کشیدگی | دامنه | ضریب تغییرات (%) | کمینه | بیشینه |
|-----------------|---------------------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|------------------|-------|--------|
| نیترژن کل | % | ۰/۳۷ | ۰/۳۳ | ۱۰/۶۵ | ۰/۱۱ | -۱/۳۰ | ۰/۵۵ | ۲۶/۵۷ | ۰/۲۵ | ۰/۸۰ |
| درصد کربن آلی | % | ۰/۵۲ | ۰/۵۰ | ۰/۰۲ | ۰/۲۲ | -۰/۵۸ | ۰/۷۲ | ۱۴/۶۳ | ۰/۲۲ | ۰/۹۰ |
| فسفر قابل جذب | Mg kg ⁻¹ | ۸/۸۹ | ۸/۷۸ | ۰/۰۹ | ۰/۰۴ | -۱/۰۶ | ۶/۲۰ | ۱۵/۵۴ | ۵/۹۰ | ۱۲/۱۰ |
| پتاسیم قابل جذب | Mg kg ⁻¹ | ۲۰۹ | ۱۸۷ | ۱/۴۰ | -۰/۹۸ | ۱/۳۲ | ۲۸۳ | ۱۲/۴۹ | ۱۱۲ | ۳۹۵ |
| کربنات کلسیم | % | ۴۷ | ۴۸ | ۱/۵۰ | -۰/۲۱ | ۱/۰۲ | ۹ | ۲/۴۲ | ۴۲ | ۵۱ |
| پی اچ | - | ۷/۶۵ | ۷/۸۲ | ۱/۲۳ | ۰/۸۳ | -۰/۳۲ | ۰/۹۲ | ۱/۸۵ | ۷/۳۰ | ۸/۲ |
| هدایت الکتریکی | Ds m ⁻¹ | ۷۱/۳۵ | ۸۹ | ۲۰۳/۹۷ | ۰/۴۷ | ۰/۳۳ | ۷۷/۱۲ | ۵۷/۴۷ | ۴۲ | ۱۲۹/۱۲ |

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۱) میزان نیترژن کل در منطقه مورد مطالعه از ۰/۲۵ درصد تا ۰/۸۰ درصد متغیر بوده است و ضریب تغییرات نسبتاً بالایی (۲۶/۵۷) داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان پراکنندگی داده‌ها در سطح منطقه نسبتاً زیاد بوده است. این موضوع برای EC روندی شدیدتر داشته است و دامنه تغییرات هدایت الکتریکی از ۴۲ تا ۱۲۹ دسی زیمنس بر متر و ضریب تغییرات بیش از ۵۷ درصد گزارش شده

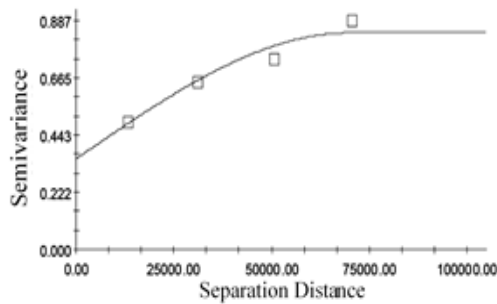
است. همچنین درصد کربن آلی در تمامی سطح منطقه مورد مطالعه بین ۰/۲۲ تا ۰/۹۰ درصد بوده است. با توجه به نوع کاربری منطقه مورد مطالعه ضریب تغییرات نسبتاً مشابه برای پتاسیم قابل جذب (۱۲/۴۹)، فسفر قابل جذب (۱۵/۵۴) و درصد کربن آلی (۱۴/۷۳) منطقی به نظر می‌رسد. میزان اسیدیته و درصد کربنات کلسیم با ضریب پراکندگی به ترتیب با ۱/۸۵ و ۲/۴۲ درصد، کم‌ترین میزان پراکندگی داده‌ها را در سطح منطقه مورد مطالعه داشتند.



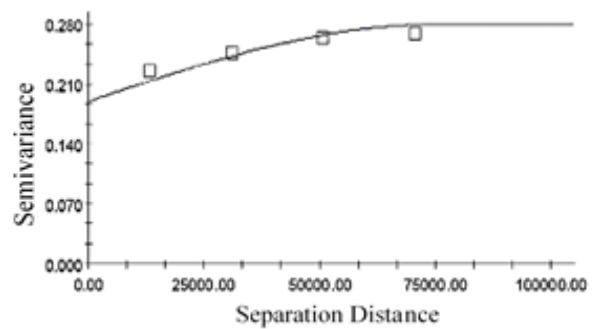
درصد کربن آلی (ب)



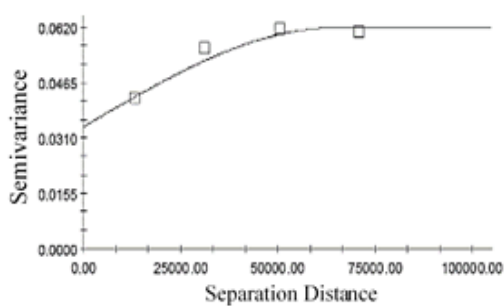
نیتروژن کل (الف)



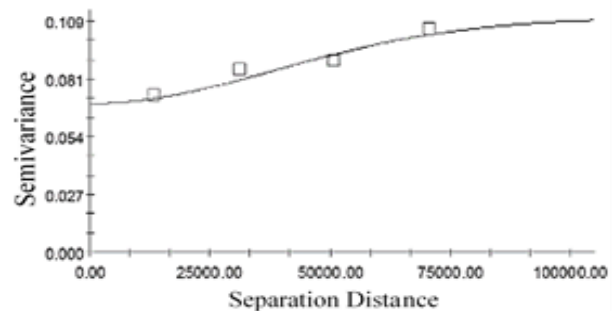
پتاسیم قابل جذب (ت)



فسفر قابل جذب (پ)



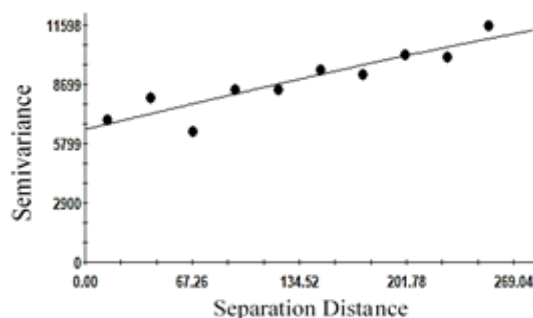
اسیدیته (ج)



درصد کربنات کلسیم (ث)

شکل ۲: واریوگرام ویژگی‌های خاک

Figure 2: Variogram of soil properties



ادامه شکل ۱: واریوگرام ویژگی‌های خاک

Continue of Figure 2: Variogram of soil properties

جدول ۱- مشخصه‌های واریوگرام‌ها و مدل‌های برازش شده آن‌ها

Table 2- the characteristic of variograms and fitted models

| نسبت همبستگی | خطای اندازه‌گیری ^{۱۷} | RSS ^{۱۶} | R ^۲ | $\frac{C}{C_0 + C}$ | اثر قطعه‌ای (C ₀) | آستانه (C ₀ +C) | شعاع تاثیر (Km) | مدل | نوع ویژگی |
|--------------|--------------------------------|-------------------|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------|------|---------------------------|
| ضعیف | ۰/۸۱۶ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۹۹۴ | ۰/۱۸۳ | ۰/۴۹۰ | ۰/۶۰۰ | ۷۸ | کروی | (mg Kg ⁻¹) TN |
| متوسط | ۰/۶۲۹ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۹۶۳ | ۰/۳۷۰ | ۰/۳۵۹ | ۰/۵۷۰ | ۷۹ | کروی | (%)OC |
| قوی | ۰/۲۴۳ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۹۴ | ۰/۷۵۶ | ۰/۱۹۰ | ۰/۷۸۰ | ۷۵ | کروی | (mg Kg ⁻¹) AP |
| قوی | ۰/۱۵۹ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۹۴۳ | ۰/۸۴۰ | ۰/۱۵۰ | ۰/۹۴۰ | ۷۰ | کروی | (mg Kg ⁻¹) AK |
| متوسط | ۰/۵۴۸ | ۰/۰۰۰ | ۰/۹۴۹ | ۰/۴۵۲ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۶۲ | ۵۵ | کروی | CaCO ₃ |
| متوسط | ۰/۳۶۶ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۹۴۱ | ۰/۳۶۴ | ۰/۰۷۰ | ۰/۱۱۰ | ۶۵ | گوسی | pH |
| متوسط | ۰/۵۱۰ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۹۸۲ | ۰/۴۸۹ | ۰/۰۵۰ | ۰/۰۹۸ | ۶۶ | کروی | (dSm ⁻¹) EC |

دامنه تاثیر در جدول (۲) در واقع میانگینی از دو قطر یک بیضی مفروض در اطراف نقطه نمونه برداری شده می‌باشد. همان‌طور که از نتایج واریوگرافی مشخص است، دامنه تاثیر برای نیتروژن کل، درصد کربن آلی، فسفر قابل جذب، درصد کربنات کلسیم، اسیدیته و هدایت الکتریکی به ترتیب ۷۸، ۷۹، ۷۵، ۷۰، ۵۵، ۶۵ و ۶۶ کیلومتر بوده است. خطای اندازه‌گیری که در واقع نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه واریوگرام است، نشان‌دهنده میزان ساختار مکانی پارامتر مورد نظر است. بر این اساس اگر این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد، ساختار مکانی قوی، بین ۰/۲۵-۰/۷۵ ساختار مکانی متوسط و اگر بیش از ۰/۷۵ باشد، ساختار مکانی ضعیف تلقی می‌گردد (۱۷). براساس این طبقه‌بندی، ساختار مکانی (نسبت همبستگی) فسفر (۰/۲۴۳) و پتاسیم (۰/۱۵۹) قابل جذب، قوی، نیتروژن کل ضعیف (خطای اندازه‌گیری ۰/۸۱۶) و بقیه پارامترها ساختار مکانی متوسطی داشتند. بر اساس نتایج این جدول، بهترین مدل‌های برازش شده برای نیتروژن کل، درصد کربن آلی، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب، درصد کربنات کلسیم و هدایت الکتریکی مدل کروی و برای اسیدیته خاک مدل گوسی بوده است.

16- Root standard square error

17- Nugget Effect/Sill

جدول ۲- نتایج ارزیابی دقت روش‌های زمین‌آماری برای ویژگی‌های خاک

Table 3- The results of precision evaluation of interpolation method for soil properties

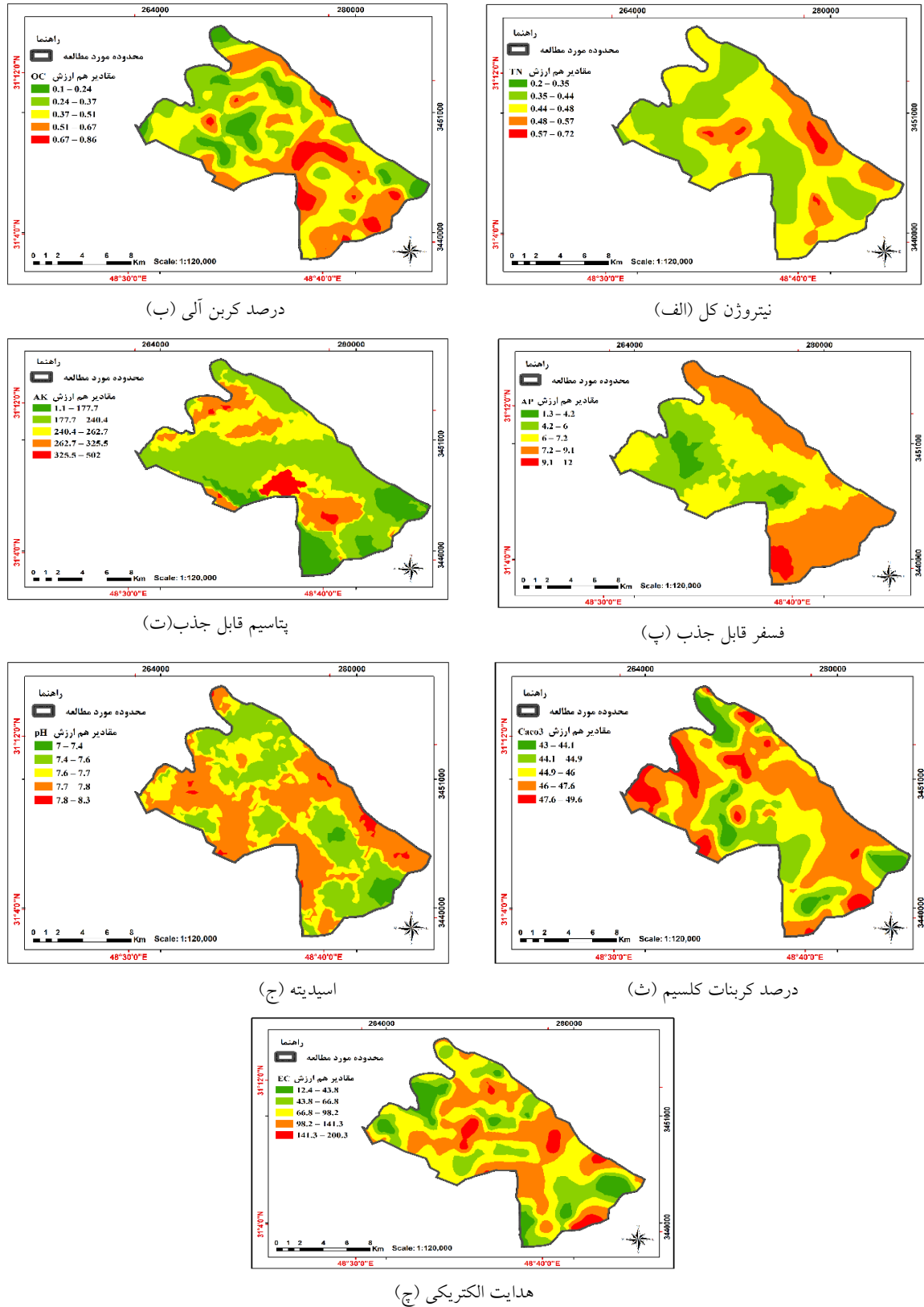
| نتایج ارزیابی متقابل | | | | الگو - تابع | روش | TN | |
|----------------------|--------|--------|---------|-------------|-----|----|-------------------|
| R2 | RMSE | MAE | MBE | | | | |
| ۰/۸۷۹ | ۰/۰۸۹۰ | ۰/۰۷۱۶ | -۰/۰۰۰۶ | خطی | OK | TN | |
| ۰/۸۹۹ | ۰/۰۸۹۲ | ۰/۰۷۱۹ | -۰/۰۰۰۸ | کروی | | | |
| ۰/۹۱۲ | ۰/۰۸۹۷ | ۰/۰۷۱۵ | -۰/۰۰۰۶ | نمایی | | | |
| ۰/۸۷۹ | ۰/۰۸۹۹ | ۰/۰۷۱۷ | -۰/۰۰۰۶ | گوسین | | | |
| ۰/۸۹۲ | ۰/۰۹۶۴ | ۰/۰۷۶۲ | -۰/۰۰۰۴ | IDW | | | |
| ۰/۸۸۳ | ۰/۰۹۱۵ | ۰/۰۷۳۱ | -۰/۰۰۰۷ | RBF | | | |
| نتایج ارزیابی متقابل | | | | الگو - تابع | روش | | OC |
| R2 | RMSE | MAE | MBE | | | | |
| ۰/۸۹۰ | ۰/۱۸۸۶ | ۰/۱۵۵ | ۰/۰۰۳۰ | خطی | OK | OC | |
| ۰/۸۱۲ | ۰/۱۸۸۳ | ۰/۱۵۴۸ | ۰/۰۰۳۳ | کروی | | | |
| ۰/۸۷۲ | ۰/۱۸۸۸ | ۰/۱۵۴۹ | ۰/۰۰۳۳ | نمایی | | | |
| ۰/۸۹۲ | ۰/۱۸۸۹ | ۰/۱۵۳۳ | ۰/۰۰۱۰ | گوسین | | | |
| ۰/۸۷۹ | ۰/۲۰۰۹ | ۰/۱۶۳۴ | ۰/۰۰۰۳ | IDW | | | |
| ۰/۹۸۵ | ۰/۱۶۸۹ | ۰/۱۲۵۰ | ۰/۰۰۰۹ | RBF | | | |
| نتایج ارزیابی متقابل | | | | الگو - تابع | روش | | AP |
| R2 | RMSE | MAE | MBE | | | | |
| ۰/۳۸ | ۹/۹۲۵ | ۱/۷۴۴ | -۰/۰۱۰ | خطی | OK | AP | |
| ۰/۹۵ | ۹/۰۲۰ | ۱/۶۳۰ | -۰/۰۰۹ | کروی | | | |
| ۰/۶۲ | ۹/۶۱۳ | ۱/۷۴۰ | -۰/۰۰۳ | نمایی | | | |
| ۰/۷۹ | ۹/۶۰۵ | ۱/۷۱۲ | -۰/۰۱۲ | گوسین | | | |
| ۰/۸۴ | ۹/۱۱ | ۱/۸۳۲ | -۰/۰۰۶ | IDW | | | |
| ۰/۳۵۴ | ۹۲/۶۳ | ۱/۸۰۰ | -۰/۰۰۳ | RBF | | | |
| نتایج ارزیابی متقابل | | | | الگو - تابع | روش | | AK |
| R2 | RMSE | MAE | MBE | | | | |
| ۰/۸۴۴ | ۲/۱۲۹ | ۱/۷۴۴ | -۰/۰۰۳ | خطی | OK | AK | |
| ۰/۹۳۲ | ۲/۰۵۸ | ۱/۶۴۰ | -۰/۰۰۶ | کروی | | | |
| ۰/۸۳۷ | ۲/۱۳۰ | ۱/۷۳۰ | -۰/۰۱۲ | نمایی | | | |
| ۰/۸۵۴ | ۲/۱۳۰ | ۱/۷۱۲ | -۰/۰۰۳ | گوسین | | | |
| ۰/۴۸ | ۲/۲۷۰ | ۱/۷۴۴ | -۰/۰۰۳ | IDW | | | |
| ۰/۶۵ | ۲/۱۶۸ | ۱/۷۳۲ | -۰/۰۰۳ | RBF | | | |
| نتایج ارزیابی متقابل | | | | الگو - تابع | روش | | CaCO ₃ |
| R2 | RMSE | MAE | MBE | | | | |
| ۰/۲۵ | ۱/۶۳۱ | ۱/۳۴۸ | -۰/۰۱۳ | خطی | OK | | |

ادامه جدول ۳- نتایج ارزیابی دقت روش‌های زمین‌آماری برای ویژگی‌های خاک

Continue of table 3- The results of precision evaluation of interpolation method for soil properties

| نتایج ارزیابی متقابل | | | | الگو - تابع | روش | pH | |
|----------------------|-------|-------|---------|-------------|-----|----|----|
| R2 | RMSE | MAE | MBE | | | | |
| ۰/۶۷ | ۱/۶۵۱ | ۱/۳۲۷ | -۰/۰۱۲۶ | کروی | OK | | |
| ۰/۳۶۵ | ۱/۶۵۳ | ۱/۳۲۹ | -۰/۰۱۰۵ | نمایی | | | |
| ۰/۳۴۸ | ۱/۶۴۰ | ۱/۳۱۵ | -۰/۰۴۱۴ | گوسین | | | |
| | | | | IDW | | | |
| | | | | RBF | | | |
| نتایج ارزیابی متقابل | | | | الگو - تابع | روش | | EC |
| R2 | RMSE | MAE | MBE | | | | |
| ۰/۸۳ | ۰/۳۰۹ | ۰/۲۴۶ | -۰/۰۱ | خطی | OK | | |
| ۰/۷۱ | ۰/۳۰۸ | ۰/۲۴۱ | -۰/۰۱۰۲ | کروی | | | |
| ۰/۸۷ | ۰/۲۹۵ | ۰/۲۳۳ | -۰/۰۰۸۹ | نمایی | | | |
| ۰/۸۴ | ۰/۳۱ | ۰/۲۴۷ | -۰/۰۰۹۵ | گوسین | | | |
| | | | | IDW | | | |
| | | | | RBF | | | |
| نتایج ارزیابی متقابل | | | | الگو - تابع | روش | EC | |
| R2 | RMSE | MAE | MBE | | | | |
| ۰/۳۰ | ۴۴/۰۴ | ۳۵/۷۵ | -۰/۸۹۹ | خطی | OK | | |
| ۰/۳۱ | ۴۴/۰۳ | ۳۵/۷۴ | -۰/۹۰۰ | کروی | | | |
| ۰/۳۱ | ۴۳/۹۲ | ۳۵/۶۲ | -۰/۷۲۰ | نمایی | | | |
| ۰/۲۲ | ۴۴/۰۱ | ۳۵/۷۲ | -۰/۹۰۳ | گوسین | | | |
| | | | | IDW | | | |
| | | | | RBF | | | |

بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول (۳) می‌توان روش‌های مختلف زمین‌آماری استفاده شده در این تحقیق را با هم مقایسه نمود. لازم به ذکر است که علاوه بر روش‌های ذکر شده، روش کوکریجینگ هم بررسی شد ولی به دلیل میزان همبستگی کم پارامترها با هم و عدم امکان استفاده از متغیر کمکی، نتایج این روش در این تحقیق ارائه نشد. بر اساس نتایج این جدول می‌توان روش کوریجینگ معمولی با مدل نمایی را بهترین و دقیق‌ترین روش ($R2=0/912$ و $MAE=0/0715$ و $RMSE=0/0890$ و $MBE=-0/0006$) برای درون‌یابی نیتروژن کل دانست. این در حالی است که بهترین روش برای درون‌یابی کربن آلی، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب، کربنات کلسیم، اسیدیته و هدایت الکتریکی خاک به ترتیب RBF، کوریجینگ معمولی (با مدل کروی)، کوریجینگ معمولی (با مدل کروی)، RBF، کوریجینگ معمولی (با مدل نمایی) و RBF بوده است. بنابراین روش IDW در هیچ‌کدام از پارامترهای خاک روش برتر جهت درون‌یابی و تهیه نقشه پهنه‌بندی انتخاب نشد. بر اساس نتایج این جدول، نقشه‌های پهنه‌بندی هر کدام از پارامترهای مورد بررسی با استفاده از دقیق‌ترین روش درون‌یابی تهیه شد (شکل ۳).



شکل ۲: نقشه پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

Figure 3: Zoning map of soil properties in study area

در شکل (۳) نقشه‌های پهنه‌بندی هر کدام از پارامترهای خاک ارائه شده است. بر این اساس میتوان مشاهده نمود که در بخش شرقی و غربی منطقه مورد مطالعه و در جاهایی که میزان pH بالای ۷/۷ است، میزان کربنات کلسیم خاک‌ها در بالاترین حد خود یعنی ۴۶ الی ۴۹ درصد می‌باشد. همچنین بخش‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه EC بیش‌تری نسبت به سایر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه دارد. با توجه به اینکه عمده اراضی مورد بررسی در این منطقه شامل زمین‌های کشاورزی بوده است، از نقشه‌های تهیه شده به وضوح می‌توان عدم یکنواختی کوددهی‌ها را مشاهده نمود. بر این اساس میزان فسفر قابل جذب در بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه بیش‌تر ولی میزان پتاسیم قابل جذب در بخش‌های شمالی و مرکزی منطقه مورد مطالعه بیش‌تر بوده است.

بحث و یافته‌ها

از بررسی نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات هر کدام از پارامترهای اندازه‌گیری شده در سطح خاک منطقه مورد مطالعه رفتار بسیار متفاوتی داشته است. این روند تغییرات را می‌توان به مدیریت اراضی، نوع کشت، مدیریت کوددهی و ویژگی‌های ذاتی خاک منطقه مرتبط دانست. از نظر طبقه‌بندی، می‌توان خاک‌های تمام منطقه را بواسطه داشتن درصد بالای کربنات کلسیم، آهکی دانست. براساس مطالعات واریوگرافی صورت گرفته، ساختار مکانی (نسبت همبستگی) فسفر و پتاسیم قابل جذب، قوی، نیتروژن کل ضعیف و بقیه پارامترها ساختار مکانی متوسطی داشتند. خطای اندازه‌گیری کم که می‌تواند به دلیل ضریب تغییرات پایین داده‌های مربوط به آن پارامتر در سطح خاک منطقه باشد، کارایی نقشه زمین‌آماری تهیه شده آن را برای تصمیم‌گیری‌های کلان مدیریتی قوت می‌بخشد. بنابراین پارامترهایی که دارای ساختار مکانی قوی، ضریب پراکندگی بالا و ضرایب خطای MAE, RMSE و MBE کم‌تری داشته باشند، نقشه‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتری خواهند داشت. بر این اساس پارامترهایی مثل فسفر و پتاسیم قابل جذب بهترین ساختار مکانی و دقیق‌ترین نقشه‌ها را در سطح منطقه مورد مطالعه داشته‌اند.

از بررسی و مقایسه نتایج نهایی این تحقیق با تحقیقات مشابه می‌توان نتیجه گرفت که در برخی موارد نتایج با تحقیقات دیگر تشابه و در برخی دیگر تفاوت‌هایی وجود داشته است. به عنوان مثال (Gholami et al (2020 به این نتیجه رسیدند که برای ترسیم واریوگرام‌های کریجینگ پارامترهای کربنات کلسیم، مدل گوسی، برای کربن آلی، مدل نمایی و برای نیتروژن کل و فسفر قابل جذب، مدل کروی مناسب بوده و برای تهیه نقشه روش کریجینگ بهترین نتایج را داشته است. این در حالی است که در تحقیق حاضر بهترین مدل‌ها برای نیتروژن کل و فسفر به ترتیب نمایی و کروی بوده و بهترین روش برای درون‌یابی آن‌ها روش کریجینگ بوده است. همچنین بهترین روش درون‌یابی برای درصد کربن آلی و کربنات کلسیم، RBF بوده است.

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی عناصر گوناگون در خاک یکی از مهم‌ترین روش‌های مدیریت کلان اراضی محسوب می‌گردد. بدیهی است هرچه دقت تهیه اینگونه نقشه‌ها بیش‌تر باشد، نتایج تصمیم‌گیری‌ها دقیق‌تر خواهد بود. مطالعات زمین‌آماری کمک شایانی به تهیه نقشه‌های با دقت مشخص می‌کند و می‌تواند تکنیکی بسیار مهم در مدیریت کلان اراضی تلقی گردد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از سازمان آب و برق خوزستان که نهایت همکاری را در این پژوهش داشتند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- Bai, M., Haghizade, A., tahmasebipour, N., (2018), "Spatial Variations of quality Groundwater use Geostatistical Method", *Geographic Space Journal*, 18 (63): 147-164. [In Persian].
- Bosun, S. Z., Qiguo, Z., (2003), "Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical, China", *Geoderma*, 115: 85-99.
- Gholami, A., Valipour, P., NourzadeHadad, M., (2020), "Performance Evaluation of geostatistics methods on the zoning of soil chemical properties (Case study: Karun East area)", *Geographic Space Journal*, 20 (69): 1-15. [In Persian].
- Goovaerts, P., (2000), "Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria", *Geoderma*, 97 (3-4): 165-186.
- Lamsal, S., Bliss, C. M., Graetz, D. A., (2009), "Geospatial Mapping of Soil Nitrate-Nitrogen Distribution Under a Mixed-Land Use System", *Pedosphere*, 19 (4): 434-445.
- Mohammad Zamani, S., Ayoubi, Sh., Khormali, F., (2007), "Spatial Variability of Wheat Yield and Soil Properties in a Selected Agricultural Land of Sorkhankalateh", *JWSS*, 11 (40): 79-92. [In Persian].
- Panagopoulos, T., Jesus, J., Antunes, M. D. C., Beltr, J., (2006), "Analysis of spatial interpolation for optimizing management of a stalinized field cultivated with lettuce", *Europ. J. Agronomy*, 24: 1-10.
- Quine, T. A., Zhang, Y., (2002), "An investigation of spatial variation in soil erosion, soil properties and crop production within an agricultural field in Devon, U. K.", *Journal of Soil and Water Conservation*, 57: 50-60.
- Robinson, T. P., Metternicht, G., (2005), "Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps", *Agricultural Systems*, 85: 19-41.
- Robinson, T. P., Metternicht, G., (2006), "Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties", *Computers and Electronics in Agriculture*, 50: 97-108.
- Shi, W., Liu, J., Du, Z., Song, Y., Chen, C., Yue, T., (2009), "Surface modelling of soil pH", *Geoderma*, 150:13-119.
- Sun, B., Zhou, SL., and Zhao, QG., (2003), "Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China", *Geoderma*, 115 (1): 85-99.
- Taboada, J., Rivas, T., Saavedra, A., Ordóñez, C., Bastante, F., and Giráldez, E., (2008), Evaluation of the reserve of a granite deposit by fuzzy kriging, *Engineering Geology*, 99: 23-30.
- Wang, J., Zhang, J., Feng, Y., (2019), "Characterizing the spatial variability of soil particle size distribution in an underground coal mining area: An approach combining multi-fractal theory and geostatistics", *Geoderma*, 176: 94-103.
- Xing-Yi, Z., Yue-Yu, S., Xu-Dong, Z., Kai, M., Herbert, SJ., (2007), "Spatial variability of nutrient properties in black soil of Northeast China", *Pedosphere*, 17 (1): 19-29.
- Yamagishi, J., Nakamoto, T., Richner. W., (2003), "Stability of spatial variability of wheat and maize biomass in a small field managed under two contrasting tillage systems over 3 years", *Field Crop Res*, 81: 95-108.

- Yemefack, M., Rossiter, D. G., Njomgang, R., (2005), "Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon", *Geoderma* 125: 117-143.