

## پهنه‌بندی احتمال کمبود و فزونی کربن آلی و فسفر قابل جذب خاک با استفاده از کریجینگ شاخص

شاهرخ فاتحی<sup>۱\*</sup>، امیر کیوان کفاشی<sup>۲</sup>، غلامحسین احمدی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۵)

### چکیده

در مدیریت بهینه و پایدار اراضی کشاورزی، تهیه نقشه تخمین احتمال ویژگی‌های خاک از جمله کربن آلی و عناصر غذایی مبتنی بر مقادیر کمتر یا بیشتر از یک حد آستانه از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از راه‌های تهیه چنین نقشه‌هایی استفاده از روش‌های زمین‌آمار ناپارامتری مانند کریجینگ شاخص می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از کریجینگ شاخص، نقشه احتمال کمبود و فزونی کربن آلی و فسفر قابل جذب خاک برای بخشی از اراضی ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسلام آباد غرب واقع در استان کرمانشاه تهیه گردید. به منظور اجرای این پژوهش از داده‌های میراثی خاک شامل ۲۱۷ نمونه خاک سطحی (عمق ۳۰-۰ سانتیمتر) با فواصل نمونه‌برداری ۵۰ متر استفاده شد. پس از پردازش‌های اولیه آماری، تغییرنمای شاخص بر اساس مقادیر آستانه ۱/۲ درصد برای کربن آلی و ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای فسفر قابل جذب محاسبه گردید و بر مبنای جمع باقیمانده مربعات خطای متر، مدل نمائی به عنوان بهترین مدل برازش یافته بر تغییرنمای شاخص تعیین شد. داده‌های اعتبارسنجی، از روش حذف یک داده و اجرای مدل به دست آمد. سپس برای ارزیابی کارایی کریجینگ شاخص، منحنی مشخصه عامل گیرنده ترسیم و مساحت زیر منحنی محاسبه گردید. مساحت زیر منحنی مشخصه عامل گیرنده به ترتیب برای فسفر قابل جذب و کربن آلی ۰/۷۹۵۶ و ۰/۸۰۰۵ به دست آمد که نشان می‌دهد کریجینگ شاخص در تخمین این متغیرها نسبتاً خوب عمل نموده است. بطور کلی می‌توان ذکر نمود کاربرد کود بر اساس نقشه‌های احتمال خصوصیات حاصلخیزی خاک، سبب کاهش هزینه و افزایش تولید پایدار می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** تغییرنمای شاخص، حد آستانه منحنی مشخصه عامل گیرنده، ویژگی‌های خاک

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران (مکاتبه کننده)

۲- عضو هیات علمی، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران

\*پست الکترونیک: [shahrokh.fatehi@gmail.com](mailto:shahrokh.fatehi@gmail.com)

## مقدمه

در تهیه نقشه‌های رقومی ویژگی‌های خاک عمدتاً از کریجینگ معمولی استفاده می‌شود. این گونه نقشه‌ها به صورت نقشه‌های منحنی میزان یا رستری تهیه شده که پیوستگی ویژگی‌های خاک را با استفاده از خطوط میزان و یا پیکسل نشان می‌دهند و برای اتخاذ تصمیم‌گیری‌های مدیریتی می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند (Lark & Ferguson, 2004). اکثر این تصمیمات بر اساس مقادیر بحرانی ویژگی‌های خاک یا عناصر غذایی خاک صورت می‌گیرد. معمولاً توصیه‌های کودی بر اساس مقادیر غلظت آستانه عناصر غذایی در خاک انجام می‌گیرد. به عنوان مثال در شرایط کرمانشاه مقدار فسفر قابل جذب در خاک به میزان کمتر از ۱۵ میلی‌گرم به عنوان آستانه کمبود این عنصر برای تغذیه گیاه در نظر گرفته می‌شود (Olfati, 1996) و مقدار کربن آلی کمتر از ۱/۲ درصد کیفیت پایین خاک‌های کشاورزی را نشان می‌دهد (Banaie et al., 2005). از طرفی، در ارزیابی تناسب اراضی برای یک گیاه خاص، کلاس‌های تناسب اراضی بر اساس حد بالا و پایین ویژگی‌های خاک تعیین می‌شوند. به عنوان مثال مقدار کربن آلی کمتر از ۰/۸ درصد، بین ۰/۸ تا ۲ درصد و بیشتر از ۲ درصد به ترتیب کلاس‌های تناسب اراضی نسبتاً مناسب (S3)، مناسب (S2) و خیلی مناسب (S1) را نشان می‌دهند. بنابراین، تهیه نقشه‌های تخمین ویژگی‌های خاک بر اساس آستانه‌های مختلف می‌تواند هم در مدیریت بهینه مصرف کود و ارزیابی تناسب اراضی مورد استفاده قرار گیرد. هنگامیکه یک کاربر اراضی بخواهد نقشه تخمین ویژگی خاک حاصل از کریجینگ معمولی را با توجه به برخی مقادیر آستانه بحرانی تفسیر کند، عدم قطعیت این برآوردها اهمیت می‌یابد. زمانیکه میانگین غلظت برآورد شده‌ی یک عنصر غذایی بر مصرف یا ریزمغذی در یک نقطه کمتر از یک حد آستانه باشد احتمال دارد مقدار واقعی آن عنصر غذایی از حد آستانه بیشتر باشد. این عدم قطعیت می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری نادرست برای مصرف کود در جایی شود که هیچگونه پاسخ عملکردی سودآوری به دنبال نخواهد داشت. البته عکس این رویداد هم می‌تواند صادق باشد. از آنجا که تصمیم‌گیری‌های مدیریتی بر اساس تخمین‌های همراه با عدم قطعیت است، بنابراین پذیرش ریسک این خطاها

اجتناب‌ناپذیر خواهد بود اما، در صورتی که این نوع خطاها کمی‌سازی شوند به طور مؤثر می‌توان ریسک استفاده از نقشه‌های تخمین را مدیریت نمود. در این وضعیت، نقشه‌ای که در آن احتمال تجاوز غلظت عناصر غذایی از یک حد آستانه برآورد شده باشد، مفیدتر از نقشه تخمینی خواهد بود که فقط مقدار تخمین غلظت عناصر غذایی را نشان می‌دهد (Lark & Ferguson, 2004).

دو نوع تکنیک کریجینگ، برای حل این مسئله وجود دارد که در دسته‌ی زمین آمار غیرخطی قرار می‌گیرند. اولین روش کریجینگ شاخص<sup>۱</sup> است. در این روش متغیر هدف پیوسته به یک متغیر شاخص گسسته (دو دوئی<sup>۲</sup>) تبدیل می‌شود (Goovaerts, 1997; Rossiter, 2012).

دومین تکنیک شامل تبدیل غیرخطی داده‌ها به یک متغیر پیوسته (گوسی) است که به آن کریجینگ گسسته<sup>۳</sup> می‌گویند (Webster & Oliver, 2001). در این جا بعد از این که بر روی داده‌ها یک تبدیل غیرخطی انجام گردد، برای تولید نقشه تخمیناز، تخمینگر کریجینگ معمولی استفاده می‌شود.

لارک و فرگوسن (Lark & Ferguson, 2004) از کریجینگ شاخص و گسسته برای پهنه‌بندی ریسک فسفر قابل جذب خاک استفاده نمودند. نتایج اعتبارسنجی نشان داد این دو تکنیک مشابه هم عمل نموده و ترجیحی بر یکدیگر ندارند. وانی و همکاران (Wanie et al., 2013) برای پهنه‌بندی عناصر ریزمغذی شامل آهن، روی، مس و منگنز در اراضی کشاورزی کاپورای کشمیر، تکنیک‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص را مورد استفاده قرار دادند و بر اهمیت کریجینگ شاخص در نشان دادن نواحی نیازمند مدیریت ویژه مکانی<sup>۴</sup> عناصر غذایی، تأکید نمودند.

از کریجینگ شاخص به طور گسترده برای تهیه نقشه احتمال کیفیت آب‌های زیرزمینی (Arsalan, 2012; Goovaerts et al, 1997; Shury, 2014; Delbari et al., 2014)، ویژگی‌های خاک مانند کربن آلی (Greve et al., 2010) و آلودگی خاک (Chu et al., 2010; Lin et al., 2010) استفاده شده است.

هدف از اجرای این پژوهش، تهیه نقشه احتمال کمبود و فزونی فسفر قابل جذب و مقدار کربن آلی خاک با استفاده

3-Disjunctive kriging  
4-Site specific

1-Indicator kriging  
2-Binary

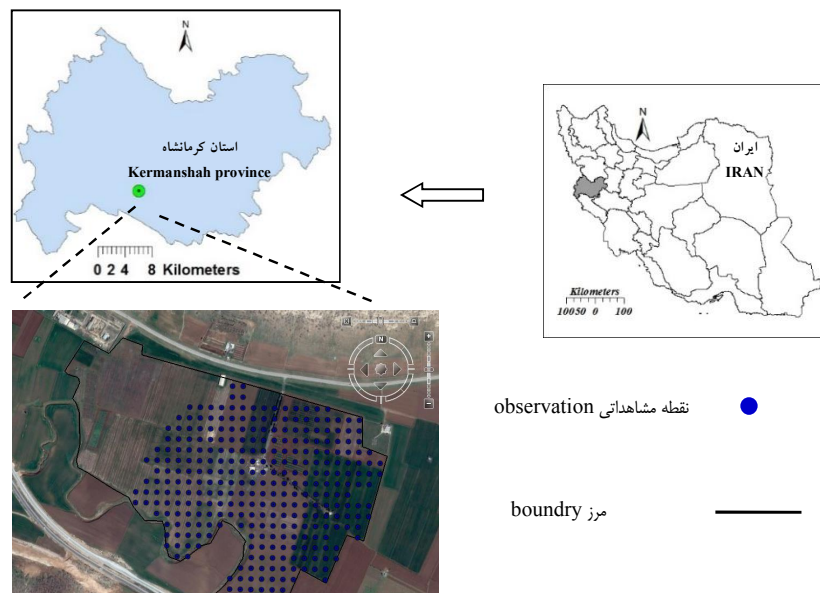
آبرفتی جوان با بافت ریز مربوط به دوره کواترنری قرار گرفته است (Ghaemi, 2005). بر اساس کلید رده‌بندی آمریکایی (2014)، زیررده‌های تیپیک کلسی زریپتزا<sup>۱</sup> ۸۲/۷ درصد و ورتیک هاپلوزریپتزا<sup>۲</sup> ۱۷/۳ درصد خاک‌های محدوده مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند (Khoshfetrat, 1998).

از داده‌های میرائی خاک شامل ۲۱۷ نمونه خاک سطحی (عمق ۰-۳۰ سانتیمتر) با فواصل نمونه‌برداری ۵۰ متر استفاده گردید (Fatehi, 2012). این داده‌ها در بخشی از اراضی ایستگاه که مزارع تحقیقاتی در آن متمرکز بوده، جمع‌آوری شده‌اند (شکل ۱). درصد کربن آلی آن‌ها با روش سوزانیدن تر (Walkley & Black, 1934) و فسفر قابل-جذب به روش اولسن (Olsen *et al.*, 1954) اندازه‌گیری شده است.

از کریجینگ شاخص در شرایط زراعت آبی در اراضی تحقیقات کشاورزی اسلام آباد غرب بود.

### مواد و روش‌ها

**مشخصات عمومی ناحیه‌ی مورد مطالعه و نمونه‌برداری**  
ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسلام آباد غرب با وسعت حدود ۵۲/۴ هکتار در ۵ کیلومتری غرب شهرستان اسلام آباد غرب واقع در استان کرمانشاه و حد فاصل مختصات جغرافیائی "۲۷ ۱۶° تا "۲۸ ۱۶° طول شرقی و "۷ ۱۶° تا "۴۰ ۷° عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). میانگین دمای سالانه‌ی هوا ۱۵ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی سالانه ۴۹۸/۴ میلیمتر است. سازندهای زمین-شناسی اطراف محدوده مطالعاتی آسماری-شهبازان می-باشد که عمدتاً از سنگ آهک و آهک دولومیتی تشکیل شده‌اند و ایستگاه تحقیقاتی مورد مطالعه بر روی رسوبات



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه همراه با مکان‌های نمونه‌برداری

Figure 1- Location of study area with sampling

$$\Omega_c(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(x) \leq z_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

حال می‌توان گفت که :

$$\text{prob}[Z(x) \leq z_c] = E[\Omega_c(x)] = G[Z(x), z_c] = 1 - \text{prob}[Z(x) > z_c] \quad (3)$$

در این معادله  $\text{prob}[Z(x) \leq z_c]$  و  $E[\Omega_c(x)]$  به ترتیب به معنی احتمال و امید ریاضی ترم‌های داخل براکت می‌باشد و  $G[Z(x), z_c]$  تابع توزیع تجمعی  $Z(x)$  در مقدار آستانه  $z_c$  است. قاعده کلی در کریجینگ شاخص این است که احتمال شرطی این که متغیر  $Z(x)$  کمتر یا معادل با حد آستانه  $z_c$  باشد با استفاده از کریجینگ تخمین زده شود. مراحل انجام این روش به شرح زیر می‌باشد:

یک مجموعه از داده‌های متغیر  $Z$  با استفاده از روابط مذکور به متغیر شاخص  $\omega(x)$  تبدیل می‌شوند. سپس تغییرنمای تابع تصادفی  $\Omega_c(x)$  با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{\gamma}_{\Omega_c(x)}(h) = \frac{1}{2M_h} \sum_{i=1}^{M_h} \{\omega_c(x_i) - \omega_c(x_i + h)\}^2 \quad (4)$$

در اینجا  $M_h$  تعداد جفت نقاطی است که توسط گام یا فاصله  $h$  از هم جدا شده‌اند. پس از برازش مدل مناسب تغییرنما، با استفاده از کریجینگ شاخص، تخمین شاخص در هر نقطه با استفاده از شاخص‌های واقع در همسایگی آن انجام می‌شود.

$$\hat{\Omega}(x_0, z_c) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * \omega(x_i, z_c) \quad (5)$$

نتایج حاصل از اجرای کریجینگ شاخص، مقادیری بین صفر تا یک خواهد بود که احتمال وقوع متغیر در کمتر یا بیشتر از حد آستانه را نشان می‌دهند. عدم وقوع یا مشاهده مقادیر یک متغیر مساوی یا زیر حد آستانه برابر با یک خواهد بود و برعکس (Goovaerts, 1997).

در این مطالعه از بسته نرم‌افزاری  $\text{gstat-1.0.19}$  در محیط  $R$ ، برای تعیین ساختار مکانی داده‌های فسفر قابل جذب و کربن آلی، ترسیم تغییرنمای شاخص و برازش مدل تغییرنما و تهیه نقشه کریجینگ شاخص استفاده شد.

#### اعتبارسنجی دوجانبه<sup>۸</sup>

در شرایطی که زمان و بودجه کافی برای برداشت نمونه وجود نداشته باشد، بهترین گزینه برای اعتبارسنجی مدل،

#### تجزیه و تحلیل آماری و زمین‌آمار

در ابتدا، آماره‌های توصیفی برای متغیرهای فسفر قابل جذب خاک و درصد کربن آلی شامل میانگین، میانه، حداقل، حداکثر، واریانس، انحراف استاندارد، چولگی، کشیدگی، ضریب تغییرات و آزمون نرمال بودن شاپیرو-ویلک<sup>۱</sup> (Shapiro & Wilk, 1965) تعیین گردیدند. سپس، برای کربن آلی مقدار آستانه  $1/2$  درصد در نظر گرفته شد (Banaie et al., 2005) و به داده‌های کمتر از آن کد صفر و داده‌های مساوی یا بیشتر از این مقدار آستانه، کد یک اختصاص یافت. همچنین این عملیات بر روی داده‌های فسفر قابل جذب خاک با توجه به حد بحرانی  $15$  میلی‌گرم بر کیلوگرم انجام شد (Olfati, 1996). در مرحله بعد تغییرنمای شاخص تجربی محاسبه و ترسیم گردید. از میان مدل‌های مدور<sup>۲</sup>، کروی<sup>۳</sup>، نمایی<sup>۴</sup>، کروی پنج بعدی<sup>۵</sup>، با استفاده از حداقل مقدار جمع مربعات باقیمانده<sup>۶</sup> بهترین مدل برازش یافته بر تغییرنما تعیین شد. سپس از پارامترهای مدل انتخابی شامل اثر قطعه‌ای، دامنه و آستانه برای تهیه نقشه کریجینگ شاخص ویژگی‌های مورد مطالعه خاک استفاده شد. در زیر تئوری کریجینگ شاخص برای تولید نقشه احتمال متغیرهای هدف، به اختصار شرح داده شده است.

#### کریجینگ شاخص

کریجینگ شاخص با متغیرهای شاخص سروکار دارد. در پژوهش حاضر از روش ناپارامتریک استفاده شده است که مستقیماً احتمال وقوع شاخص‌ها را پهنه‌بندی می‌نماید (Rossiter & Loza, 2012).

ویژگی خاک  $Z$  در محل  $x$  دارای مقدار  $Z(x)$  است. در زمین-آمار با این متغیر به عنوان یک تابع تصادفی  $Z(x)$  رفتار می‌شود. تبدیل شاخص متغیر  $Z$  می‌تواند به صورت زیر بیان شود: اگر مقدار  $Z(x)$  برابر یا کمتر از یک حد آستانه  $z_c$  باشد عدد یک  $\omega(x) = 1$  به آن تعلق می‌گیرد در غیر این صورت مقدار  $\omega(x)$  برابر با صفر خواهد بود.

$$\omega(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } z(x) \leq z_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

در زمین‌آمار شاخص  $\omega(x)$  می‌تواند به عنوان یک تحقیقی از تابع تصادفی  $\Omega_c(x)$  باشد:

5-Penta-spherical  
6-Gaussian model  
7-Residual sum of squares  
8-Cross-validation

1-Shapiro - Wilk  
2-Circular model  
3-Spherical model  
4-Exponential model

منحنی مشخصه عامل گیرنده در سیستم سنتی عبارت است از: عالی: ۱-۰/۹، خوب: ۰/۸-۰/۹، نسبتاً خوب: ۰/۸-۰/۷، ضعیف: ۰/۶-۰/۷ و بد: ۰/۵-۰/۶ (Rossiter & Loza, 2012). در این پژوهش برای محاسبه‌ی مساحت زیر منحنی مشخصه عامل گیرنده<sup>۵</sup> از بسته نرم‌افزاری pROC-1.8 در محیط R استفاده شد.

### نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل آماری نشان می‌دهد که ضریب تغییرپذیری کربن آلی خاک ۱۷ درصد و ضریب تغییرپذیری فسفر قابل-جذب ۳۶ درصد می‌باشد (جدول ۲). گومز و گارسیا (Gomes & Garcia, 2002) ضریب تغییرات در چهار دسته تغییرپذیری کم (کمتر از ۰/۱۰)، متوسط (۰/۱۰-۰/۲۰)، زیاد (۰/۲۰-۰/۳۰) و خیلی زیاد (بیش از ۰/۳۰) طبقه‌بندی نمودند. بر این اساس کربن آلی دارای تغییرپذیری متوسط و مقدار فسفر قابل‌جذب خاک دارای تغییرپذیری زیاد می‌باشد. با توجه به ثابت بودن سیستم کشت و شرایط اقلیمی و مواد مادری، بخش مهمی از این تغییرپذیری‌ها را می‌توان به تنوع کشت و مدیریت کوددهی مختلف در ایستگاه تحقیقات کشاورزی نسبت داد (Olfati, 1996; Fatehi, 2012). نتایج مندرج در جدول ۲ و شکل‌های ۲-ب) و ۲-ث) نشان می‌دهند که کربن آلی و فسفر قابل‌جذب خاک از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند و هر دو، دارای توزیع با چولگی مثبت هستند. آزمون نرمال شاپیرو-ویلک نیز این موضوع را تأیید می‌کند. از آنجا که مقادیر میانگین و میانه در هر دو متغیر نزدیک به هم هستند می‌توان گفت که توزیع آنها نزدیک به نرمال است. بنابراین برای مراحل بعدی تحقیق، از داده‌های اصلی استفاده شد و از تبدیل لگاریتمی یا ریشه دوم داده‌ها خودداری گردید. لازم به ذکر است که کریجینگ شاخص فرض نرمال بودن داده‌ها را در نظر نمی‌گیرد (Goovaerts, 1997). شکل ۲-الف) نشان می‌دهد که مقادیر مختلف کربن آلی خاک در سرتاسر ناحیه مورد مطالعه توزیع یافته است اما شکل ۲-ت) تجمع بالای مقادیر فسفر خاک در بخش مرکزی ایستگاه تحقیقاتی را نشان می‌دهد که دلیل آن مدیریت کوددهی متفاوت در مزارع ایستگاه است.

روش اعتبارسنجی دوجانبه حذف یک داده<sup>۱</sup> است. بدین صورت که مقدار متغیر هدف در نقطه مشاهداتی به طور موقت از مجموعه داده‌ها کنار گذاشته شده و سپس با استفاده از تخمین‌گر کریجینگ شاخص و مقدار متغیر در سایر نقاط مشاهداتی، مقدار متغیر هدف (احتمال حضور در دامنه صفر تا یک) در آن نقطه تخمین زده می‌شود. این عمل در تمام نقاط مشاهداتی انجام شده و در نهایت یک دسته داده تخمین متغیر هدف در محل نقاط مشاهداتی به دست می‌آید که برای ارزیابی با دسته داده‌های مشاهده‌ای (واقعی) مورد مقایسه قرار می‌گیرند (Lark & Ferguson, 2004). سپس از منحنی مشخصه عامل گیرنده<sup>۲</sup> برای ارزیابی مدل‌هایی مانند کریجینگ شاخص که متغیر پاسخ آن‌ها دودویی (کمتر و بالاتر از حد آستانه) است و نتایج اجرای مدل به صورت مقادیر بین صفر و ۱ می‌باشد، استفاده می‌شود (Rossiter & Loza, 2012).

### تجزیه و تحلیل منحنی مشخصه عامل گیرنده

منحنی مشخصه عامل گیرنده، یک نموداری است که موفقیت یک مدل را در تخمین متغیرهای هدف اندازه‌گیری می‌کند. برای ترسیم منحنی مشخصه عامل گیرنده، عملکرد مدل در تمام آستانه‌ها (۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ...، ۱) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Fawcett, 2006).

منحنی مشخصه عامل گیرنده، از ترسیم حساسیت<sup>۳</sup> (مثبت-های واقعی به کل مثبت‌ها) در مقابل نسبتی از متغیر زیر حد آستانه که به طور صحیح تخمین زده نشده‌اند (مثبت-های کاذب) یا به عبارتی ۱-ویژگی<sup>۴</sup> به دست می‌آید. در اینجا، ویژگی به مفهوم نسبت منفی‌های واقعی به مجموع منفی‌های واقعی و مثبت‌های کاذب می‌باشد (جدول ۱). نزدیک‌تر شدن منحنی به قطر، دقت کم مدل را نشان می‌دهد. قطر بیانگر حالت تصادفی است یعنی در هر آستانه‌ای شانس تخمین یک مثبت واقعی معادل یک مثبت کاذب است. مقدار مساحت زیر منحنی برابر با مقدار ۰/۵، نشان می‌دهد که مدل فاقد صحت است و مقدار برابر ۱ حاکی از صحت کامل مدل می‌باشد. راهنمای طبقه‌بندی مساحت زیر

4-specificity  
5-Area under the receiver operating characteristic curve(AUC)

1-Leave-one-out cross-validation  
2-Receiver operating characteristic  
3-Sensitivity

و ۲-ج) که به ترتیب مربوط به کربن آلی خاک و فسفر قابل جذب خاک است در هیچ جهتی رنگ‌های نقشه رستری ثابت نمانده است که عدم وجود ناهمسانگردی برای این متغیرها را نشان می‌دهد.

ارزیابی اولیه داده‌ها نشان می‌دهد که ۶۷ درصد داده‌های مشاهده‌ای فسفر قابل جذب خاک زیر حد بحرانی ۱۵ میلی-گرم بر کیلوگرم قرار دارند و در مورد کربن آلی خاک ۷۶ درصد نقاط مشاهده‌ای دارای کربن آلی کمتر از ۱/۲ درصد می‌باشند. در تغییرنمای رویه‌ای ارائه شده در شکل ۲-پ)

جدول ۱- ماتریس درهمی و روابط مرسوم می‌که از طریق آن محاسبه می‌شود  
Figure 1- Confusion matrix and common equations calculated from it

تخمین prediction	مشاهده واقعی True observation		جمع کل (total)	روابط (Equations)
	حضور (کمتر از حد آستانه) Presence (less than threshold limit)	عدم حضور (بیشتر از حد آستانه) absences (less than threshold limit)		
حضور (کمتر از حد آستانه) Presence (less than threshold limit)	TP = مثبت‌های واقعی (True positives)	FP = مثبت‌های کاذب (False positives)	TP+FP	Sensitivity = $\frac{TP}{TP+FP}$ True Positive rate = Sensivity
عدم حضور (بیشتر از حد آستانه) absences (less than threshold limit)	FN = منفی‌های کاذب (False negatives)	TN = منفی‌های واقعی (True negatives)	TN+FN	specificity = $\frac{TN}{FP+TN}$ False positive rate = 1 - Specificity
جمع کل (total)	TP+FN	FP+TN	N=TP+FP+TN+FN	False Positive rate = $\frac{FP}{FP+TN}$

و جنوب غرب مزارع ایستگاه بیشتر است و احتمال برابر با یک، بیانگر حضور مقدار کربن آلی کمتر از حد آستانه ۱/۲ درصد است. با بیشترین احتمال، مقادیر کربن آلی کمتر از حد آستانه در شرق و شمال شرق و غرب ایستگاه مشاهده می‌شود. سیستم کشت آبی و مدیریت کوددهی بهینه، مهم‌ترین عوامل افزایش کربن آلی خاک در این بخش از اراضی ایستگاه تحقیقاتی مورد مطالعه هستند. در بخش مرکزی ایستگاه، مقادیر فسفر قابل جذب بیشتر از حد بحرانی توزیع یافته است که نیاز به کوددهی ندارند. در این بخش از مزارع ایستگاه احتمال وجود مقادیر کمتر از حد بحرانی ۱۵ پی-پی‌ام نزدیک به صفر می‌باشد (شکل ۳-ث). نظر به این که نقشه تخمین احتمال، به ویژه در اراضی واقع در غرب ایستگاه، مقادیر نزدیک به یک را نشان می‌دهد لذا در این محدوده از مزارع ایستگاه احتمال کمبود فسفر قابل جذب وجود دارد.

منحنی مشخصه عامل گیرنده، معیار مناسبی برای بررسی کارایی مدل‌های مانند لاجستیک رگرسیون و کریجینگ شاخص است که متغیرهای آنها دودویی بوده و نتایج مدل-ساز با این روش‌ها در دامنه ۰ و ۱ قرار می‌گیرند و در واقع

پس از ترسیم تغییرنمای شاخص برای کربن آلی و فسفر قابل جذب خاک (شکل ۳-الف و ۳-ت)، مدل‌های مدور، کروی، کروی پنج بعدی، نمایی و گوسی بر آن‌ها برازش یافت. در جدول ۳ مشاهده می‌گردد برای هر دو ویژگی خاک مورد مطالعه، پایین‌ترین مقدار جمع مربعات باقیمانده به مدل نمایی اختصاص یافته است. بنابراین، مدل مذکور به عنوان بهترین مدل برای استخراج پارامترهای ساختار مکانی و تهیه نقشه کریجینگ شاخص انتخاب شد. بر اساس تقسیم‌بندی کامباردلا و همکاران (Cambardella et al., 1994)، این مدل انتخاب شده دارای وابستگی مکانی نسبتاً قوی است زیرا نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه‌ی کل در هر دو متغیر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد قرار دارد (جدول ۴).

**نتایج کریجینگ شاخص:** پس از استخراج پارامترهای تغییرنمای شاخص (جدول ۴)، با استفاده از تخمینگر کریجینگ، نقشه‌ی تخمین احتمال حضور مقادیر کربن آلی و فسفر قابل جذب خاک کمتر یا بیشتر از حد آستانه تعریف شده برای آنها تهیه گردید. اگر به شکل ۳-ب توجه شود مقادیر نزدیک به صفر، احتمال حضور مقادیر کربن آلی بیشتر از ۱/۲ درصد را نشان می‌دهد که توزیع آنها در جنوب

کریجینگ شاخص در تخمین احتمال حضور کربن آلی و فسفر قابل جذب در کمتر یا بیشتر از آستانه‌های تعریف شده، کارایی نسبتاً خوب تا خوبی از خود نشان داده است (Rossiter, 2012). مقایسه ساختار مکانی و مساحت زیر منحنی مشخصه عامل گیرنده نشان می‌دهد در مورد کربن آلی که ساختار مکانی تغییرنمای شاخص آن (نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه ۰/۴۳) نسبت به فسفر قابل جذب (نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه ۰/۵۱) کمی قویتر است، مقدار مساحت زیر منحنی مشخصه عامل گیرنده نیز کمی بیشتر به دست آمده است (جدول ۳).

احتمال حضور و عدم حضور یک متغیر را نشان می‌دهند (Rossiter & Loza, 2012; Pontius & Schneider, 2001; Lin *et al.*, 2010). در این تحقیق با استفاده از روش حذف یک داده و اجرای تخمین‌گر کریجینگ برای ۲۱۷ داده واقعی، به همین تعداد داده تخمین به دست آمد. سپس با استفاده از این مجموعه از داده‌های واقعی و تخمین، منحنی مشخصه عامل گیرنده ترسیم گردید (شکل ۳-پ و شکل ۳-ج) مساحت زیر منحنی برای فسفر قابل جذب خاک ۰/۷۹۶ و برای کربن آلی خاک ۰/۸۰۰ به دست آمد. مقادیر مساحت زیر منحنی مشخصه عامل این ویژگی‌های خاک در دامنه ۰/۷ تا ۰/۸ قرار گرفته است که نشان می‌دهد

جدول ۲- پارامترهای آماری کربن آلی و فسفر قابل جذب خاک

فسفر قابل جذب available phosphorus (mg kg <sup>-1</sup> )	کربن آلی Organic carbon (%)	متغیر variable واحد unit
3.2	0.55	حداقل minimum
36.8	1.86	حداکثر maximum
13.8	1.07	میانگین maximum
12.8	1.05	میانه Median
4.94	0.1859	انحراف معیار standard deviation
36	17	ضریب تغییرات coefficient variable
1.12	0.73	چولگی skewness
1.94	1.71	کشیدگی kurtosis
0.00000017	0.000049	آزمون شاپیرو-ویلک *Shapiro – Wilk test

\*p-value&lt;0.05

جدول ۳- جمع مربعات باقیمانده برای مدل‌های نظری برازش یافته بر تغییرنمای شاخص کربن آلی و فسفر قابل جذب خاک

Table 2- Residual sum of squares for fitted models on indicator variograms of soil organic carbon and available phosphorus

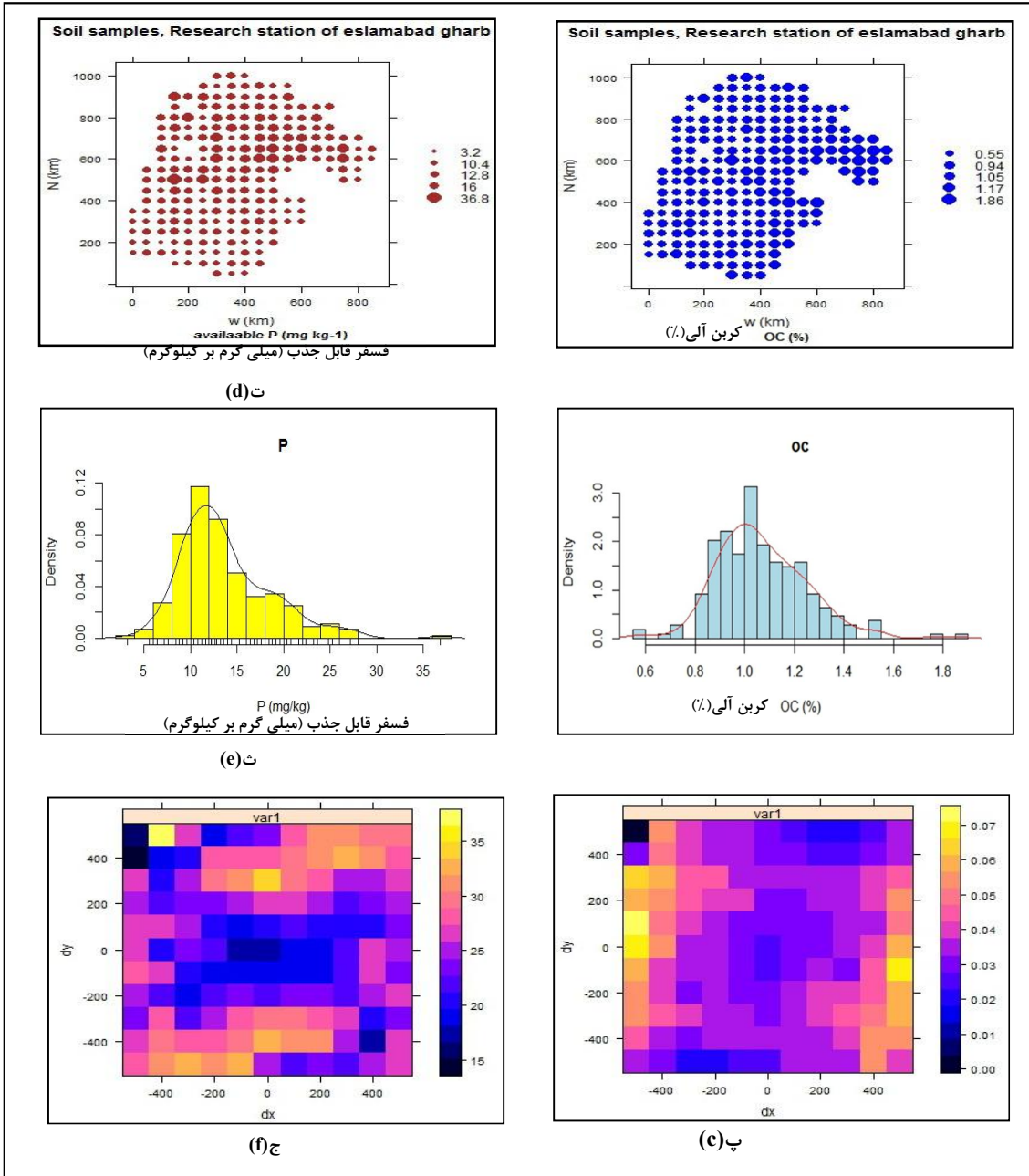
جمع مربعات باقیمانده Residual sum of squares					متغیر variable
گوسی Gaussian	کروی پنج بعدی Penta-spherical	نمایی Exponential	کروی Spherical	مدور Circular	
0.0000117	0.00000512	0.00000413	0.000005635	0.00000625	فسفر قابل جذب available phosphorus
0.0000229	0.0000188	0.0000101	0.0000215	0.0000247	کربن آلی Organic carbon

شاخص و داده‌های حاصل از سنجنده‌ی القایی الکترومغناطیسی<sup>۱</sup> (EM38DD) برای تخمین احتمال وقوع لنزهای رسی در خاک‌های شنی جنگلی استفاده نمودند و ارزیابی مدل آن‌ها، مقدار مساحت زیر منحنی مشخصه عامل را ۰/۷۷ نشان داد. این نتایج نشان می‌دهند که کریجینگ

لین و همکاران (Lin *et al.*, 2010) در ارزیابی اجرای مدل کریجینگ شاخص بر روی فلزات سنگین سرب، کروم، روی و نیکل مقدار مساحت زیر منحنی مشخصه عامل گیرنده را بین ۰/۷۹۱ تا ۰/۸۳۷ بدست آوردند. در پژوهشی دیگر، کاکس و همکاران (Cockx *et al.*, 2007) از کریجینگ

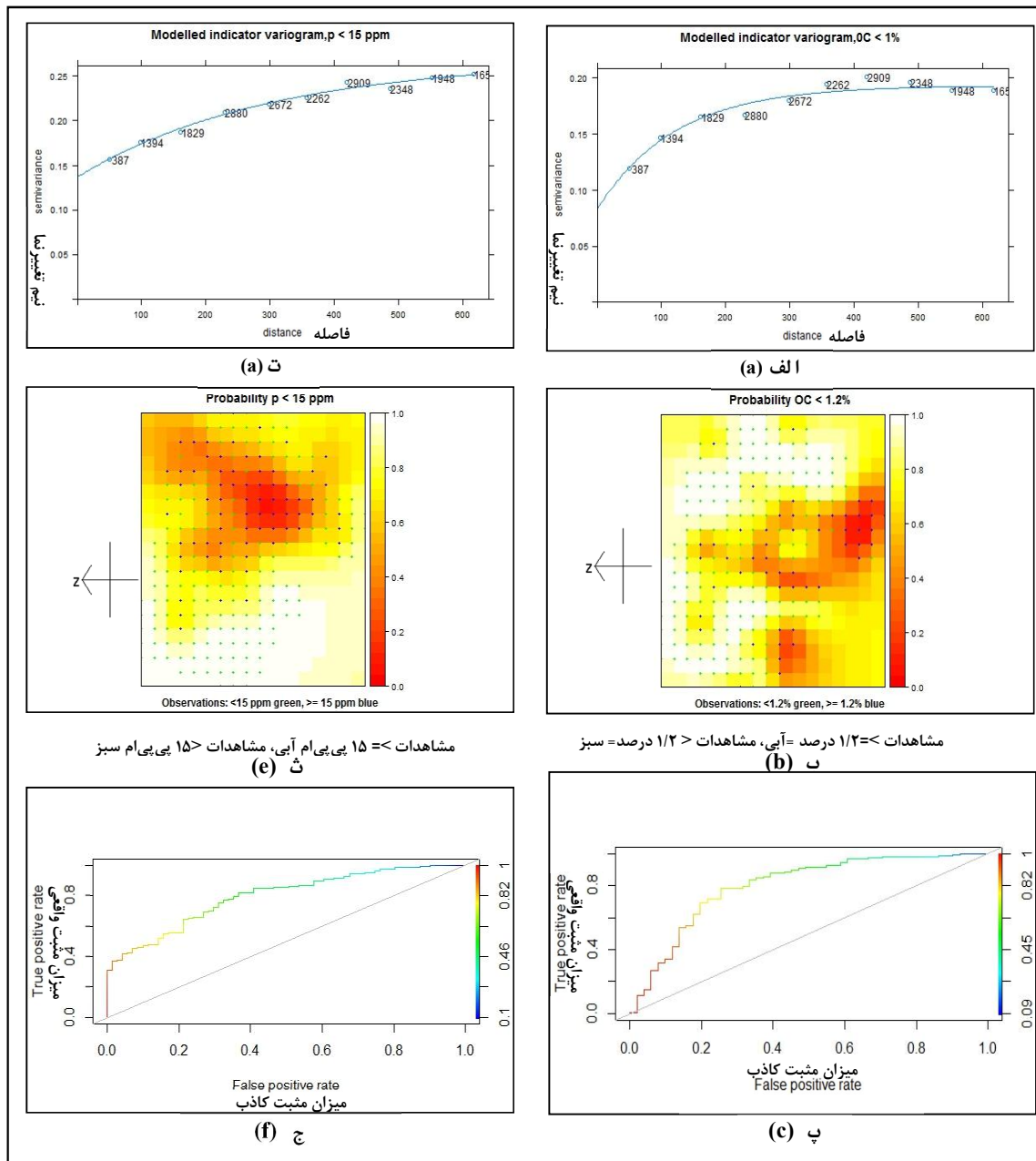
1-Electromagnetic induction sensor

شاخص در تهیه نقشه احتمال ویژگی‌های مختلف خاک از کارایی خوبی برخوردار است و با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.



شکل ۲- الف) نقشه توزیع مقادیر کربن آلی خاک در فضای جغرافیایی، ب) هیستوگرام کربن آلی، پ) تغییرنمای رویه‌ای کربن آلی، ت) نقشه توزیع مقادیر فسفر قابل جذب خاک در فضای جغرافیایی، ث) هیستوگرام فسفر قابل جذب، ج) تغییرنمای رویه‌ای فسفر قابل جذب Figure 2-a) post plot of soil organic carbon, b) The histograms of soil organic carbon, c) surface variogram of soil organic carbon, d) post plot of available phosphorus the histograms of available phosphorus, e) The histograms of available phosphorus, f) surface variogram of available phosphorus





شکل ۳- الف) واریوگرام شاخص کربن آلی خاک، ب) نقشه پیش‌بینی احتمال کربن آلی برای حد آستانه کمتر از ۱/۲ درصد، پ) منحنی گیرنده مشخصه عامل کربن آلی، ت) واریوگرام شاخص فسفر قابل جذب، ث) نقشه پیش‌بینی احتمال فسفر قابل جذب برای حد آستانه ۱۵ پی‌پی‌ام، ج) منحنی گیرنده مشخصه عامل فسفر قابل جذب

Figure 3-a) Indicator variogram of soil organic carbon, b) Probability map of predicted soil organic carbon for 1.2% threshold limit, c) receiver operating characteristic (ROC) plot of soil organic carbon, d) Indicator variogram of available phosphorus, e) Probability map of predicted available phosphorus carbon for 15 ppm threshold limit, f) Receiver operating characteristic (ROC) plot of available phosphorus

جدول ۴- پارامترهای تغییرنمای شاخص متغیر فسفر قابل جذب و کربن آلی خاک

Table 3- parameters of indicator variogram models for soil available phosphors and organic carbon

نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه کل $\frac{c_0}{c_0 + c}$	مدل نیم تغییرنما Variogram model	حد آستانه‌ی جزئی Partial sill (c)	دامنه (متر) Range (m)	اثر قطعه‌ای Nugget (c <sub>0</sub> )	گام (متر) Lag (m)	متغیر variable
0.51	نمایی exponential	0.13	298.2	0.137	65	فسفر قابل جذب available phosphorus
0.43	نمایی exponential	0.11	121.6	0.083	65	کربن آلی Organic carbon

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق روش کریجینگ شاخص برای تهیه نقشه احتمال کربن آلی و فسفر قابل جذب خاک به کار رفت. آنچه مسلم است این گونه نقشه‌ها با درصدی از احتمال، کمبود یک عنصر غذایی یا یک ویژگی خاک مانند کربن آلی که برای پایداری و عملکرد گیاه ضروری است را نشان می‌دهند. بنابراین چون عدم قطعیت کمبود این ویژگی به شکل احتمال بیان شده است، به راحتی می‌توان با اطمینان به رفع کمبود ویژگی‌های مذکور با مصرف کود فسفره و کود آلی مناسب اقدام نمود. همچنین این نقشه‌ها را می‌توان به

عنوان مبنایی برای پایش تغییرات عناصر غذایی و کربن آلی خاک در ایستگاه تحقیقاتی مذکور در طی سال‌های آتی در نظر گرفت و از این طریق عوامل مؤثر بر تغییرات این ویژگی‌ها را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار داد. توصیه می‌گردد در تهیه نقشه احتمال ویژگی‌هایی از خاک که در اجرای مدیریت بهینه و پایدار اراضی مؤثرند، علاوه بر کریجینگ شاخص از مدل‌های زمین‌آماری و آماری دیگری مانند کریجینگ بیزی و لاجستیک رگرسیون استفاده شود تا بتوان مناسب‌ترین مدل تخمین احتمال کمبود و فزونی عناصر غذایی را از میان مدل‌های مختلف شناسایی نمود.

### Reference

- Arslan H. 2012. Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: The case of Bafra Plain, Turkey. *Agricultural Water Management*, 113: 57- 63.
- Banaie M.H., Momeni A., Baybordi M., and Malakoti M.J. 2005. Soils of Iran. Sana Publications, Tehran, Iran, 486p. (In Persian)
- Cambardella C.A., Boorman 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 Science Society American Journal*, 58: 1501-1511.
- Chu H.J., Lin Y.P., Jang C.S., and Chang T.K. 2010. Delineating the hazard zone of multiple soil pollutants by multivariate indicator kriging and conditioned Latin hypercube sampling. *Geoderma*, 158: 242-251.
- Cockx L., Meirvenne M.V., and DeVos B. 2007. Using the EM38DD soil sensor to delineate clay lenses in a sandy forest soil. *Soil Science Society American Journal*, 71: 1314-1322.
- Delbari M., Amiri M., and Motlagh M.B. 2014. Assessing groundwater quality for irrigation using indicator kriging method. *Applied Water Science*, 5: 1-11.
- Fatehi S.H. 2012. Spatial variability of organic carbon, available potassium and phosphorous in Eslamabad-Gharb agriculture research station, Kermanshah province. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 97: 29-38. (In Persian)
- Fawcett T. 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27: 861-874.
- Ghaemi J. 2005. Geology map of Kernered, scale: 1:100000, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.
- Gomes F.P., and Garcia C.H. 2002. Estatrstica Aplicada an Experimentos Agronomicos e Florestais. FEALQ: Piracicaba, 309p. (In Portuguese)

- Goovaerts P. 1997. Geo-statistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York, 783p.
- Goovaerts P., Webster R., and Dubois J.P. 1997. Assessing the risk of soil contamination in the Swiss Jura using indicator geo-statistics. *Environmental and Ecological Statistics*, 4(1): 31-48.
- Greve M.H., Greve M.B., Bou Kheir R., Bocher P.K., Larsen R., and McCloy K. 2010. Comparing Decision Tree Modeling and Indicator Kriging for Mapping the Extent of Organic Soils in Denmark. In: Boettinger J. et al., (Ed.), Digital Soil Mapping - Bridging Research Environmental Application & Operation. *Springer Netherlands*, pp. 267-280.
- Khosh fetrat G.R. 1998. Semi Detailed Soil Survey and Land Classification for Irrigation in Eslamabade-Gharb Research Station. *Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)*, Tehran, Iran, 35p. (In Persian).
- Lark P.M., and Ferguson R.B. 2004. Mapping risk of soil nutrient deficiency or excess by disjunctive and indicator kriging. *Geoderma*, 118: 39-53.
- Lin Y.P., Cheng B.Y., Shyu G.S., and Chang T.K. 2010. Combining a finite mixture distribution model with indicator kriging to delineate and map the spatial patterns of soil heavy metal pollution in Chunghua County, central Taiwan. *Environmental Pollution*, 158: 235-244.
- Olfati M. 1996. Study of Soil Fertility in Eslamabade-Gharb Research Station. Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kermanshah, Iran, 15p. (In Persian)
- Olsen S. R., Cole C.V., Watanabe F.S., and Dean L. 1954. Estimation of Available Phosphorous in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. USDA, Cire. 939, U. S. Gover. Prin. Office, Washington DC.
- Pontius J.R.G., and Schneider L.C. 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture Ecosystem Environment*, 85:239-248.
- Rossiter D.G. 2012. Applied Geo-statistics, Exercise 7: Geo-statistical risk mapping. ITC, Enschede, the Netherland, 38p.
- Rossiter D.G., and Loza A.V. 2012. Technical note: Analyzing Land Cover Change with Logistic Regression in R (Version 2.2, First version April 2004). ITC, Enschede, the Netherland. 67p.
- Shapiro S.S., and Wilk M.B. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52: 591-611.
- Triantafilis J., Odeh I.O.A., Warr B., and Ahmed M.F. 2004. Mapping of salinity risk in the lower Namoi valley using non-linear kriging methods. *Agricultural Water Management*, 69: 203-231.
- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
- Wani M.A., Wani J.A., Bhat M.A., Kirmani N.A., Wani Z.M., and Bhat S.N. 2013. Mapping of soil micronutrients in Kashmir agricultural landscape using ordinary Kriging and indicator approach. *Journal of Indian Society Remote Sensing*, 41(2): 319-329.
- Webster R., and Oliver M.A. 2001. Geo-statistics for Environmental Scientists. John Wiley & Sons, Chichester, 271p.

## Probability mapping of Deficiency or Excess of Soil Available Phosphorous and Organic Carbon by Indicator Kriging

Shahrokh Fatehi<sup>1\*</sup>, Amir Kaivan Kafashi<sup>2</sup>, Gholam Hossein Ahmadi<sup>2</sup>

(Received: July 2016

Accepted: December 2016)

### Abstract

Probability mapping of soil properties including soil organic carbon and nutrients based on threshold values play important role in optimum land management and sustainable agriculture development. Mapping based on critical limits need to use non parametric geo-statistics methods such as kriging indicator. In this study, using indicator kriging, probability map of deficiency or excess of soil available phosphorous and organic carbon was prepared in part of Eslamabad-e Gharb agriculture research station in Kermanshah province. The soil legacy data including 217 surface soil samples on an almost regular grid, about 50 m apart was used to perform research. After preliminary statistical processing, indicator variogram was drawn based on threshold values 1.2% and 15 ppm for soil organic carbon and available phosphorous, respectively. Exponential model as the best model fitted to indicator variogram was selected based on minimum residual sum of squares. The necessary data for validation was achieved through leave-one-out cross-validation (LOOCV). For assessing the performance of indicator kriging, the area under the curve (AUC) of receiver operating characteristic (ROC) was used. Area under the ROC curve for phosphorus and soil organic carbon was 0.796 and 0.800, respectively. These results indicated that the indicator kriging have relatively good performance in predicting these variables. In general, it can be said that using fertilizer based on probability maps of soil fertility properties lead to reduce cost and increase sustainable food production.

**Keywords:** Indicator variogram, Receiver operating characteristic curve, Soil properties, Threshold values

1- Research Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran

2- Staff Scientific Member, Seed and Plant Improvement Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran

\* Corresponding Author Email: [shahrokh.fatehi@gmail.com](mailto:shahrokh.fatehi@gmail.com)