

مقایسه برخی روش‌های زمین‌آماری و تلفیق آنها با توابع تبدیلی در پهنه‌بندی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک

سلیمان میرزائی^{۱*}، فرخ اسدزاده^۲، علی اصغر ذوالفقاری^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵

چکیده

ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) یکی از مشخصه‌های مهم خاک در جذب و رهاسازی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و برآورد پتانسیل خطر فلزات سنگین و برخی آلاینده‌های آلی است. آگاهی از چگونگی الگوی پراکنش مکانی CEC به منظور مدیریت پایدار اکوسیستم، دارای اهمیت ویژه‌ای است. هدف از این پژوهش، تعیین مناسب‌ترین روش میانجی برای پهنه‌بندی CEC در خاک‌های زراعی بخشی از استان گیلان بود. بدین منظور، ۱۵۳ نمونه از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری خاک برداشت و میزان رس، کربن آلی و CEC خاک اندازه‌گیری شد و میان‌یابی با استفاده از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ، رگرسیون کریجینگ و فازی کریجینگ با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام گرفت. نتایج نشان داد که روش‌های هیبریدی نظیر روش رگرسیون کریجینگ و فازی کریجینگ در مقایسه با سایر تخمین‌گرها، (به ترتیب با RMSE ۱/۰۲ و ۱/۲) دقت بیشتری داشت. در مقایسه بین دو روش فوق، روش رگرسیون کریجینگ با توجه به خطای کمتر، توانایی بیشتری در برآورد الگوی پراکنش CEC از خود نشان داد. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش تعداد داده‌ها با استفاده از توابع تبدیلی مناسب (ایجاد شده با استفاده از ANFIS)، سبب افزایش دقت تخمین گردید. در کل، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از توابع تبدیلی مناسب و ادغام آن با روش پهنه‌بندی مطلوب، کمک موثری در برآورد دقیق‌تر CEC در منطقه مورد مطالعه نمود.

واژه‌های کلیدی: درون‌یابی، رگرسیون کریجینگ، فازی کریجینگ، توابع تبدیلی خاک

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد (مکاتبه کننده)

۲- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳- استادیار دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان

*پست الکترونیک: salman_mirzaee@yahoo.com

مقدمه

خاک نتیجه برهم‌کنش پیچیده‌ای میان فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که با شدت‌های متفاوت و در مقیاس‌های مختلف بر یکدیگر اثر می‌کنند (Santra *et al.*, 2008). ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC¹) یکی از ویژگی‌های شیمیایی خاک است و در جذب و رهاسازی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و برآورد پتانسیل خطر فلزات سنگین و برخی آلاینده‌های آلی کاتیونی نقش موثری دارد (Manrique *et al.*, 1991). اثرات تلفیقی فرآیندهای مختلف، تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های مختلف خاک را رقم می‌زنند (Hengl *et al.*, 2007). اطلاع صحیح و دقیق از الگوی تغییرات مکانی اراضی در راستای بهره‌برداری اصولی از خاک به عنوان یکی از منابع مهم انرژی می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد (Miao *et al.*, 2006).

روش‌های میان‌یابی و تعیین الگوی پراکنش مکانی، به کمک زمین‌آمار بسیار متنوع بوده که از بین آن‌ها می‌توان به روش‌های کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ اشاره کرد (Ayobi *et al.*, 2007). هر یک از روش‌های یادشده بسته به الگوی همبستگی مکانی متغیر مورد مطالعه، می‌توانند پراکنش مکانی آن متغیر را بهتر برآورد کند. برای نمونه، امینی و همکاران (Amini *et al.*, 2002) میزان کلر موجود در خاک مناطق جنوب شرق اصفهان را با استفاده از روش‌های زمین‌آماری مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از EC به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ دقت برآوردها را به طور قابل ملاحظه‌ای بالا می‌برد. در همین راستا، رابینسون و مترنیکت (Robinson & Metternicht, 2006) اظهار داشتند که هیچ روشی غیر از روش‌های زمین‌آماری قادر به تولید نقشه‌های خصوصیات پیوسته خاک‌ها نیستند. آن‌ها نشان داد که کریجینگ در تخمین pH خاک سطحی، کوکریجینگ در تعیین EC خاک سطحی و روش عکس فاصله در تعیین pH خاک عمقی و روش اسپلاین در تعیین مواد آلی روش‌های مناسبی هستند.

تار و همکاران (Tarr *et al.*, 2005) با استفاده از روش کوکریجینگ اقدام به تهیه نقشه شوری خاک نمودند و متغیرهای کمکی مختلفی نظیر مقدار رس، کلسیم محلول، منیزیم محلول، عمق افق آرجیلیک و عمق سنگ

بستر را مورد آزمون قرار دادند. این پژوهشگران مقدار رس را به عنوان بهترین متغیر کمکی برای برآورد شوری در روش کوکریجینگ، معرفی نمودند. کیلیک و همکاران (Kilic *et al.*, 2012) با استفاده از روش کریجینگ اقدام به مدل‌سازی الگوی پراکنش مکانی CEC خاک نموده و کارایی روش یادشده را مطلوب ارزیابی کردند. آن‌ها برای ویژگی‌های مختلف خاک شعاع تاثیر مکانی ۱۰ تا ۳۱۰ متر را گزارش نموده‌اند. ونگ و همکاران (Wang *et al.*, 2008) نیز به بررسی تغییرات مکانی مقادیر CEC خاک-های تخت کشت چای در سیچوان چین پرداختند. نتایج نشان داد که شعاع تاثیر مکانی مقادیر CEC خاک حدود ۳۱۱ متر است. همچنین، این پژوهشگران گزارش نمودند که در مقیاس‌های مکانی کوچک، تغییرات مکانی پارامتر یادشده دارای ناهمسان‌گردی بوده و در جهت شیب تغییرات بیشتری دارد. آن‌ها روش کریجینگ معمولی را به عنوان یک روش مطلوب برای بررسی تغییرات مکانی CEC معرفی نمودند. لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2014) طی پژوهشی از روش کوکریجینگ برای برآورد تغییرات مکانی CEC استفاده کرده و نیم‌تغییرنمای مدل کروی را برای تبیین تغییرات واریانس مقادیر CEC خاک در اراضی شالیزاری مناسب ارزیابی کردند.

به هر حال، مرور منابع نشان داد که روش‌های مختلف میان‌یابی کارایی متفاوتی در برآورد متغیرهای مختلف خاک دارند. لذا، هدف از این پژوهش، بررسی کارایی روش‌های زمین‌آماری شامل کوکریجینگ، کریجینگ، فازی کریجینگ و رگرسیون کریجینگ در تعیین الگوی پراکنش مکانی CEC بود. همچنین، امکان استفاده از توابع تبدیلی مناسب برای CEC و روش برگزیده پهنه-بندی به منظور افزایش دقت برآورد الگوی مکانی پراکنش CEC در برخی از خاک‌های استان گیلان مورد بررسی قرار گرفت.

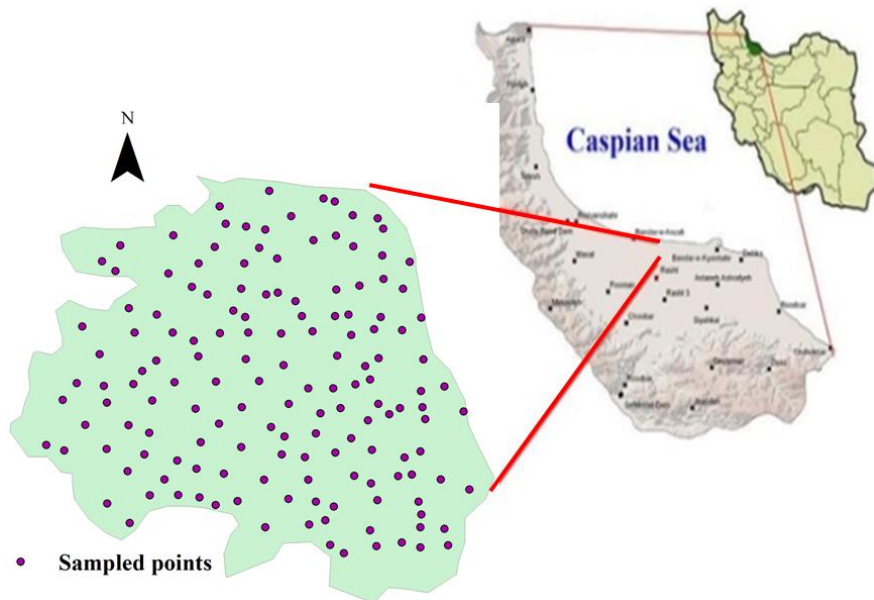
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در شمال شهرستان رشت به مساحت تقریبی ۲۴۳۰۰ هکتار واقع شده و شامل اراضی جلگه‌ای است. بالاترین نقطه ارتفاعی آن حدود ۴۰ متر و پایین‌ترین ارتفاع آن ۲۸- متر از سطح دریاهای آزاد واقع شده است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۱۲۹۴ میلی‌متر است. عمده‌ترین کاربری منطقه شالیزار به صورت غرقابی

1 - Cation Exchange Capacity

است. خاک‌های محدوده مطالعاتی از نظر رده‌بندی براساس طبقه‌بندی جامع آمریکایی (Soil Taxonomy, USDA, 2014) در سه رده آلفی‌سول، اینسپتی‌سول و انتی‌سول قرار گرفتند.

است. خاک‌های محدوده مطالعاتی از نظر رده‌بندی براساس طبقه‌بندی جامع آمریکایی (Soil Taxonomy, USDA, 2014) در سه رده آلفی‌سول، اینسپتی‌سول و انتی‌سول قرار گرفتند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه همراه با الگوی پراکنش نقاط نمونه‌برداری

Figure 1- Geographic location of study area with distribution pattern of sampling points

پارامتر اثر قطعه‌ای، حد آستانه و دامنه موثر است. اثر قطعه‌ای بیان‌کننده مولفه غیرساختاری (تصادفی) واریانس است. حد آستانه تقریبی از واریانس کل را ارائه نموده و مقدار دامنه بیان‌گر فاصله‌ای است که در ماورای آن نمونه‌ها را می‌توان مستقل از یکدیگر به حساب آورد (Mohammadi, 2006). نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه را می‌توان برای ارزیابی ساختار مکانی داده‌ها مورد بررسی قرار داد. وقتی این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد، متغیر مورد نظر دارای ساختار مکانی قوی است، بین ۰/۲۵-۰/۷۵ ساختار مکانی متوسط بوده و هنگامی که بزرگتر از ۰/۷۵ باشد، ساختار مکانی ضعیف است (Shi et al., 2007).

کریجینگ تکنیکی است که با به کارگیری خصوصیات ساختاری تغییرنا و مقادیر اولیه، برآوردهای بهینه و ناریب از متغیرها را در مکان‌های نمونه‌برداری نشده ارائه می‌کند. تخمین‌گر کریجینگ براساس رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda Z(x_i) \quad (2)$$

نمونه‌برداری از ۱۵۳ نقطه و به صورت تصادفی انجام گرفت. از این تعداد، ۱۲۱ نقطه به‌عنوان نقاط آموزشی (برای استفاده در روش ANFIS^۲) و ۳۲ نقطه به‌عنوان نقاط کنترلی انتخاب شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، کربن آلی به روش والکلی و بلک (Nelson & Sommers, 1986) و CEC خاک به روش باور (Bower et al., 1952) اندازه‌گیری گردیدند. در شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و الگوی پراکنش نقاط نمونه‌برداری ارائه شده است.

به منظور تشریح پیوستگی مکانی، نیم تغییرنا مربوط به متغیرهای مورد نظر از طریق رابطه (۱) محاسبه گردید.

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

که در آن: $\gamma(h)$ مقدار نیم تغییرنا برای جفت نقاطی که به فاصله h از هم قرار دارند، $n(h)$ تعداد زوج نقاطی که به فاصله h از هم قرار دارند، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر x و $Z(x_i+h)$ مقدار مشاهده شده متغیر که به فاصله h از x قرار دارد. به طور کلی، یک نیم‌تغییرنا دارای سه

که در آن: $z(so)$ مقدار متغیر مورد نظر در نقطه مفروض، $e(so)$ مقدار باقیمانده حاصل از مدل رگرسیونی در نقطه مفروض، $m(so)$ مقدار حاصل از مدل رگرسیونی در نقطه مفروض، β_k ضریب ثابت مدل رگرسیونی در نقطه مفروض η_k مقادیر متغیرهای کمکی در نقطه مفروض و λ_i وزن-های روش کریجینگ معمولی است.

در روش فازی کریجینگ^۵ که یکی از روش‌های درون‌یابی هیبرید است، به طور همزمان از دو روش کریجینگ و تئوری مجموعه‌های فازی استفاده می‌شود. در این روش، داده‌های اندازه‌گیری شده دقیق (اعداد فازی) به همراه تخمین‌های غیردقیق استفاده می‌شوند. در بیشتر مطالعات برای فازی‌سازی داده‌های غیردقیق، از توابع عضویت مثلثی (شکل ۲- الف) استفاده می‌شود (Rahimi & Saghfian, 2007). اعداد دقیق نیز به صورت اعداد فازی تعریف می‌شوند. با این تفاوت که در مقادیر برابر با خود عدد، تابع عضویت برابر با یک و در بقیه مقادیر برابر با صفر خواهد بود (شکل ۲- ب). در این روش پس از تبدیل داده‌ها به اعداد فازی، محاسبات نیم‌تغییرنا صورت می‌گیرد. برای انجام محاسبات ابتدا با استفاده از آلفا برش، یک بازه $[a, b]$ برای هر عدد فازی به دست می‌آید. سپس، محاسبات برای هر عدد با استفاده از این بازه صورت می‌گیرد. پس از محاسبه نیم‌تغییرنا فازی، مدل نیم‌تغییرنا تئوریک بر روی آن برازش داده شد. برای برازش مدل تئوریک نیم‌تغییرنا بر روی داده‌های فازی از نرم افزار FUZZEK، استفاده شد.

که در آن: Z^* تخمین مقدار متغیر Z در نقطه x_0 و λ_i وزن‌های آماری اختصاص یافته به مقادیر Z در نقاط x_i به کار رفته در کریجینگ است (Ayobi et al., 2007). در بعضی مواقع ممکن است که از یک متغیر، به‌دلایلی مانند مشکل بودن نمونه‌گیری و یا گران بودن اندازه‌گیری آزمایشگاهی، به اندازه کافی نمونه‌برداری نشده باشد و بر این اساس نتوان برآورد آماری را با دقت مورد نظر انجام داد. در چنین مواردی، می‌توان با در نظر گرفتن همبستگی مکانی بین این متغیر و متغیر دیگری که از آن به‌خوبی نمونه‌برداری شده است، با استفاده از روش میان‌یابی کوکریجینگ تخمین را اصلاح و دقت آن را بالا برد. در روش کوکریجینگ از تغییرنمای عرضی یا دو جانبه^۳ استفاده می‌شود (رابطه ۳).

$$\gamma_{12} = \frac{1}{2} N(h) \sum [Z_1(x_i) - Z_1(x_i + h)] \times [Z_2(x_i) - Z_2(x_i + h)] \quad (3)$$

در معادله (۴) در میان‌یابی نقاط نامعلوم از وزن‌های محاسبه شده با استفاده از تغییرنمای عرضی و تغییرنمای اولیه دو متغیر استفاده می‌شود.

$$Z^*(x_0) = \sum \lambda_{1i} Z_1(x_i) + \sum \lambda_{2j} Z_2(x_j) \quad (4)$$

که در آن: λ_{1i} و λ_{2j} وزن‌های آماری مربوط به متغیرهای Z_1 و Z_2 است (۲).

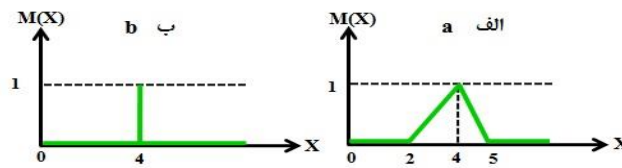
روش میان‌یابی رگرسیون کریجینگ^۴ استفاده از تکنیک هیبرید (دوتایی) در مدل‌سازی و تعیین الگوی پراکنش خصوصیات خاک برای اولین بار توسط اده و همکاران (Odeh et al., 1995) معرفی شد و سپس توسط لارک و بکت (Lark & Beckett, 1998) مورد تأیید قرار گرفت. در این روش مدل رگرسیونی (رگرسیونی چند متغیره خطی) بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی برقرار می‌شود. سپس با استفاده از کریجینگ معمولی، باقیمانده‌های مدل رگرسیونی پهنه‌بندی می‌شوند. در نهایت با ترکیب مقادیر باقیمانده‌های برآورد شده از روش کریجینگ و مدل رگرسیونی، متغیر مورد نظر در نقاط مختلف برآورد می‌شود. رابطه کلی مورد استفاده در این روش به شکل زیر است:

$$z(so) = m(so) + e(so) \rightarrow \sum_{k=0}^p \beta_k \cdot \eta_k(so) + \sum_{i=0}^n \lambda_i \cdot v(s_i) \quad (5)$$

³ - Cross-variogram

⁴ - Regression kriging

⁵ - Fuzzy kriging



شکل ۲- الف) عدد فازی ۴ با تابع عضویت مثلثی و ب) نحوه تعریف اعداد Crisp به صورت فازی
Figure 2-a) fuzzy Number 4 with triangular membership function
b) definition of crisp number as fuzzy

کاهش در RMSE با استفاده از روش‌های دیگر محاسبه می‌شود.

نتایج و بحث

توصیف آماری میزان رس، کربن آلی و CEC در نمونه‌های برداشت شده از منطقه مطالعاتی در جدول (۱) خلاصه شده است. ضریب تغییرات مقادیر رس و CEC کمتر از ۵۰ درصد است که بیانگر عدم وجود تغییرات خیلی زیاد این ویژگی‌ها در منطقه مورد مطالعه است. در بین ویژگی‌های مورد مطالعه، CEC و کربن آلی به ترتیب دارای کمترین و بیشترین ضریب تغییرات است. اولین گام در استفاده از روش‌های زمین‌آماري نوع کریجینگ، بررسی نرمال بودن داده‌هاست. این بررسی می‌تواند با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و یا با توجه به مقدار شاخص چولگی داده‌ها انجام گیرد. در صورتی که شاخص چولگی کمتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها نرمال بوده و به همان شکل می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. ولی اگر این شاخص بیش از ۰/۵ باشد، داده‌ها فاقد توزیع نرمال بوده و برای استفاده در روش‌های زمین‌آماري باید به طریقی (لگاریتم‌گیری و یا استفاده از ریشه دوم داده‌ها) نرمال شوند. (Robinson & Metternicht, 2006). نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۸ و همچنین بررسی مقادیر چولگی پارامترها نشان داد که توزیع فراوانی مقادیر CEC و رس نرمال بود، ولی کربن آلی فاقد توزیع نرمال است که برای نرمال‌سازی کربن آلی از روش ریشه دوم استفاده شد.

در این پژوهش از نمایه‌های میانگین مربعات خطا (بیان‌گر دقت میانگین برآورد است و شدت خطای منتظره را نشان می‌دهد) (رابطه ۶) و خطای میانگین (برای تعیین اریب و تمایل به کم یا بیش برآورد) (رابطه ۷) به منظور ارزیابی روش‌های میان‌یابی متفاوت استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (6)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (7)$$

که در این معادلات: P بیان‌گر مقادیر تخمینی، O مقادیر واقعی CEC و n تعداد داده‌ها است. برای ترسیم واریوگرام‌ها و پهنه‌بندی با روش‌های مختلف از نرم افزار ArcGIS 9.3 استفاده شد.

بعد از مشخص شدن بهترین روش میان‌یابی با توجه RMSE و ME، از روش برتر برای بررسی امکان بهره‌گیری از بهترین توابع تبدیلی (ایجاد شده بوسیله ANFIS) به منظور افزایش تعداد داده‌ها و کاهش خطای تخمین استفاده می‌گردد. لذا روش فوق در دو حالت (الف) با حذف تصادفی تعدادی از داده‌ها (داده‌های آزمون^۶ شامل ۳۲ داده) و انجام مجدد روش با داده‌های باقی‌مانده (داده-های آموزشی^۷ شامل ۱۲۱ داده) و (ب) برآورد داده‌های حذف شده با استفاده از ANFIS و کاربرد مجدد روش پهنه‌بندی برای مجموع داده‌های آموزشی و داده‌های برآورد شده با استفاده از ANFIS (۱۵۳ داده)، مورد استفاده قرار گرفت. برای مقایسه روش‌ها از شاخص درصد کاهش در RMSE استفاده شد. این شاخص به این صورت به دست می‌آید که ابتدا روشی که دارای بالاترین RMSE است، به عنوان مبنا قرار می‌گیرد و سپس میزان درصد

8- Kolmogrov-Smirnov

6 - Test
7 - Train

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های خاک

Table 1- Statistic description of soil properties

| چولگی (Skewness) | ضریب تغییرات (CV%) | انحراف معیار (SD) | میانگین (mean) | حداکثر (max) | حداقل (min) | ویژگی‌های خاک (Soil properties) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|----------------|--|
| -0.06 | 32.04 | 11.60 | 36.2 | 61.6 | 12.2 | رس (%) Clay |
| 0.83 | 67.50 | 0.81 | 1.2 | 3.12 | 0.04 | کربن آلی (%) Organic carbon |
| -0.18 | 6.94 | 1.52 | 21.9 | 25.4 | 18.9 | ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol ⁺ kg ⁻¹) |

با توجه به این که وجود داده‌های پرت منجر به گسستگی داده‌ها می‌شود، این امر می‌تواند موجب نقض تئوری زمین‌آمار شود. در این پژوهش داده‌هایی که خارج از دامنه $(\bar{X} \pm 3SD)$ بودند، به عنوان داده‌های پرت تشخیص داده شدند. \bar{X} نشان دهنده مقدار میانگین ویژگی‌های خاک و SD انحراف معیار آنها است.

با توجه به این که وجود داده‌های پرت منجر به گسستگی داده‌ها می‌شود، این امر می‌تواند موجب نقض تئوری زمین‌آمار شود. در این پژوهش داده‌هایی که خارج از دامنه $(\bar{X} \pm 3SD)$ بودند، به عنوان داده‌های پرت تشخیص داده شدند. \bar{X} نشان دهنده مقدار میانگین ویژگی‌های خاک و SD انحراف معیار آنها است.

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مورد مطالعه

Table 2- Pearson correlation coefficient between studied properties

| ظرفیت تبادل کاتیونی CEC | کربن آلی Organic carbon | رس Clay | ویژگی‌های خاک Soil properties |
|----------------------------|----------------------------|------------|----------------------------------|
| - | - | 1 | رس Clay |
| - | 1 | -0.02 | کربن آلی Organic carbon |
| 1 | 0.51** | 0.59** | ظرفیت تبادل کاتیونی CEC |

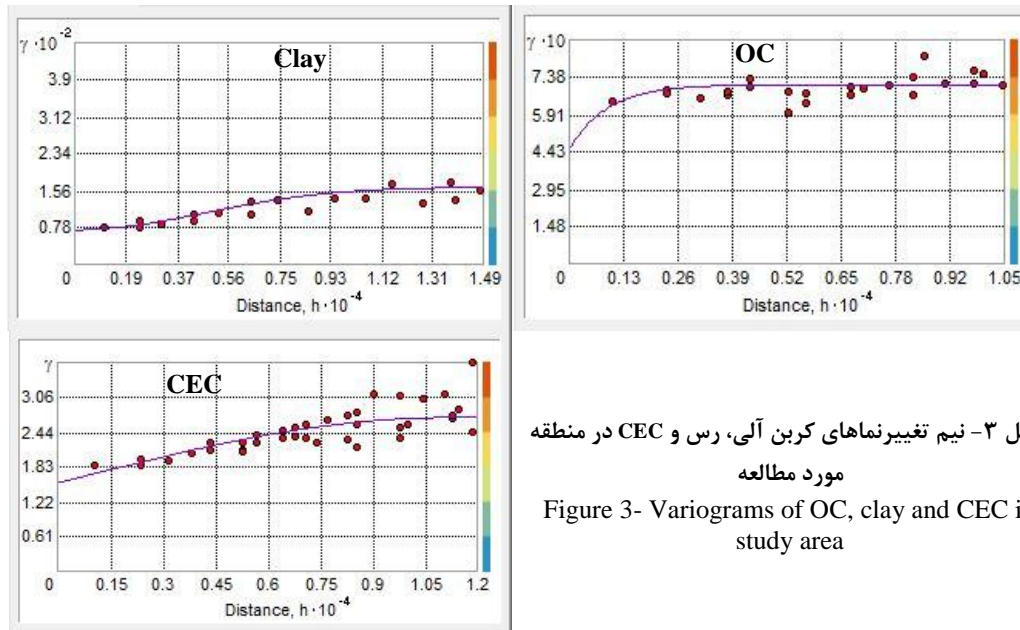
وسیله روش کریجینگ معمولی برای متغیر کربن آلی است. نتایج واریوگرام‌های تجربی نشان می‌دهد که متغیرهای رس و کربن آلی و CEC به ترتیب به مدل‌های گوسی، نمایی و کروی منطبق شدند. بدین معنی که میزان رس خاک دارای تغییرپذیری مکانی بسیار تدریجی و کربن آلی و CEC خاک دارای رفتار خطی در نزدیکی مبدأ مختصات بوده، ولی آهنگ صعود در نیم تغییرنمای کروی بیشتر از نمایی است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از تغییرات توپوگرافی، آبخوبی و ... باشد. در شکل (۳) واریوگرام‌ها و در شکل (۴) الگوی پراکنش با استفاده از روش کریجینگ معمولی برای متغیرهای فوق نشان داده شده است. همچنین، استحکام ساختار مکانی متغیرها با استفاده از نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه (C_0/C_0+C) بررسی شد (جدول ۳) و نتایج نشان داد که نیم تغییرنمای برازش داده شده به متغیرهای مورد مطالعه، از وابستگی مکانی متوسطی برخوردار است $(C_0/C_0+C < 0.75)$.

در کل، دو داده پرت و غیرمعمول در میان داده‌های CEC وجود داشت که با مقادیر کمینه و بیشینه در مجموعه داده‌های خام اولیه جایگزین شدند. پکی (Pekey, 2006) نیز در مطالعه خود برای تصحیح داده‌های پرت از این روش استفاده کرد. همچنین، نتایج ضریب همبستگی پیرسون (جدول ۲) نشان می‌دهد که همبستگی بین CEC با میزان رس خاک بیشتر از کربن آلی است. آنالیزهای واریوگرام در جهات مختلف نشان داد که در منطقه مطالعاتی تغییرات ویژگی‌های مورد بررسی دارای رفتار مشابهی بوده و فاقد ناهمسان‌گردی است. بنابراین، در ادامه آنالیزهای زمین‌آمار از واریوگرام‌های چند جهته استفاده شد. نتایج آنالیز همبستگی مکانی با استفاده از روش کریجینگ معمولی نشان می‌دهد که حداقل مقادیر آماره‌های ME و RMSE (به ترتیب ۰/۰۰۷ و ۰/۸۳) برای متغیر کربن آلی و مقدار بیشینه آماره‌های ME و RMSE (به ترتیب ۰/۰۳۶ و ۹/۴۶) برای متغیر رس به دست آمد (جدول ۳). این موضوع نشان‌دهنده دقت بالا تخمین به-

جدول ۳- پارامترهای نیم تغییرنما و شاخص‌های ارزیابی روش کریجینگ معمولی

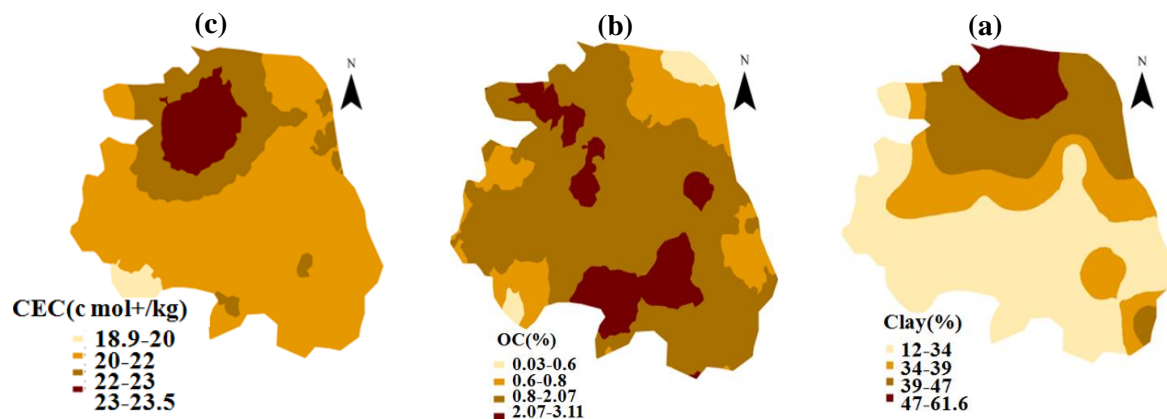
Table 3- Variogram parameters and evaluator indices of ordinary kriging

| ME | RMSE | $C_0/(C_0+C)$ | C_0+C | C_0 | دامنه (کیلومتر) (Range, km) | مدل (Model) | ویژگی‌های خاک (Soil properties) |
|-------|------|---------------|---------|-------|--------------------------------|---------------------|--|
| 0.036 | 9.46 | 0.446 | 162.8 | 72.7 | 11.5 | گوسی (Gaussian) | رس (%) Clay |
| 0.007 | 0.83 | 0.635 | 0.708 | 0.45 | 2.70 | نمایی (Exponential) | کربن آلی (%) Organic carbon |
| 0.018 | 1.48 | 0.570 | 2.700 | 1.55 | 11.0 | کروی (Spherical) | ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol ⁺ kg ⁻¹) |



شکل ۳- نیم تغییرنماهای کربن آلی، رس و CEC در منطقه مورد مطالعه

Figure 3- Variograms of OC, clay and CEC in study area



شکل ۴- نقشه پراکنش رس، (b) کربن آلی و (c) CEC با استفاده از روش کریجینگ معمولی

Figure 4- The map of distribution of clay (a), OC (b) and CEC (c) using ordinary kriging

همبستگی بالای دو متغیر (۰/۵۹) رس و CEC از نظر آماری هماهنگ بوده و از این طریق قابل توجیه است. در این پژوهش، علاوه بر محاسبه واریوگرام‌های منفرد به روش کریجینگ، اقدام به محاسبه و برازش واریوگرام‌های

در مقایسه و تطابق بین نقشه‌های کریجینگ معمولی (شکل ۴) تهیه شده برای متغیرهای رس، CEC و کربن آلی، مشخص شد که نقشه رس و CEC نسبت به نقشه کربن آلی و CEC، مشابهت بیشتری دارند. که این امر با

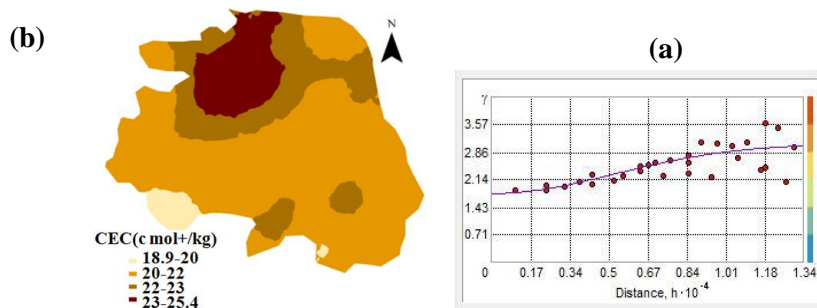
استفاده شد. در این روش، ابتدا تعدادی از داده‌ها که اختلاف آن‌ها با میانگین داده‌ها بیشتر از دو برابر انحراف معیار داده‌ها بود، به عنوان داده‌های دارای عدم قطعیت بالا تشخیص داده شده و با استفاده از توابع عضویت مثلثی، فازی شد. دامنه مورد نظر برای توابع عضویت، با توجه به انحراف معیار متغیر مورد بررسی (CEC) انتخاب شد. سپس، مدل تئوریک نیم تغییرنا بر روی داده‌های فازی برازش شد که در شکل ۶-الف ارائه شده است. بعد یک شبکه بندی منظم (۱۰×۱۰ با ۸۳ نقطه در درون منطقه) بر روی منطقه انجام شد (شکل ۶-ب) و پهنه-بندی آن با کریجینگ معمولی صورت گرفت. بر این اساس، مقادیر RMSE و ME نیز به ترتیب ۱/۲ و ۰/۱۵ به دست آمد.

دو جانبه بین متغیر رس و CEC شد. با توجه به اینکه مقدار رس همبستگی بالاتری با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در مطالعه حاضر داشت (جدول ۲)، لذا از رس به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ استفاده شد. واریوگرام دوجانبه رس و CEC به همراه الگوی پراکنش با استفاده از روش کوکریجینگ در شکل (۵) برای متغیر CEC آمده است. نتایج نشان داد که با وجود برابر بودن مقادیر همبستگی مکانی و آماره ME تخمین‌گرهای کریجینگ و کوکریجینگ، آماره RMSE متفاوتی حاصل شد (جدول ۴). براساس شاخص فوق استفاده از متغیر رس در روش کوکریجینگ موجب بهبود تخمین شده است. در ادامه به منظور تعیین الگوی پراکنش مکانی CEC از یک روش زمین‌آماري دیگر تحت عنوان فازی کریجینگ

جدول ۴- پارامترهای نیم تغییرنا مربوط به CEC به روش کوکریجینگ با استفاده از متغیر کمکی رس

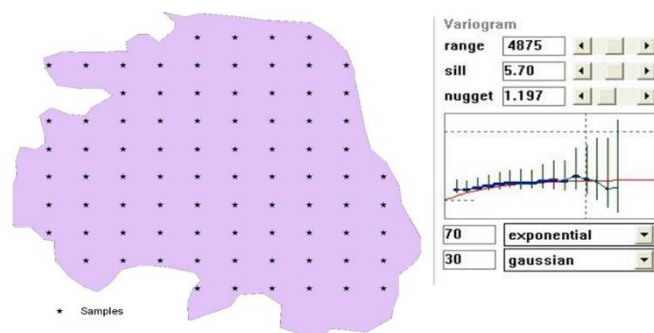
Table 4- Variogram parameters of CEC for Cokriging using clay auxiliary variable

| ME | RMSE | $C_0/(C_0+C)$ | C_0+C | C_0 | دامنه (کیلومتر) (Range, km) | مدل (Model) | ویژگی‌های خاک (Soil properties) |
|-------|------|---------------|---------|-------|--------------------------------|--------------------|--|
| 0.018 | 1.45 | 0.57 | 3.07 | 1.77 | 12.9 | گوسی (Gaussian) | ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol ⁺ kg ⁻¹) (CEC) |



شکل ۵. (a) واریوگرام و (a) نقشه پراکنش CEC به روش کوکریجینگ

Figure 5. Variogram and distribution map of CEC prepared with Co-Kriging



شکل ۶. نیم تغییرنا و شبکه بندی منظم (۱۰×۱۰ با ۸۳ نقطه) انجام شده بر روی منطقه

Figure 6. Variogram and Regularity grid (10×10 with 83 points) in study area

رس در روش کوکریجینگ موجب بهبود تخمین شده است.

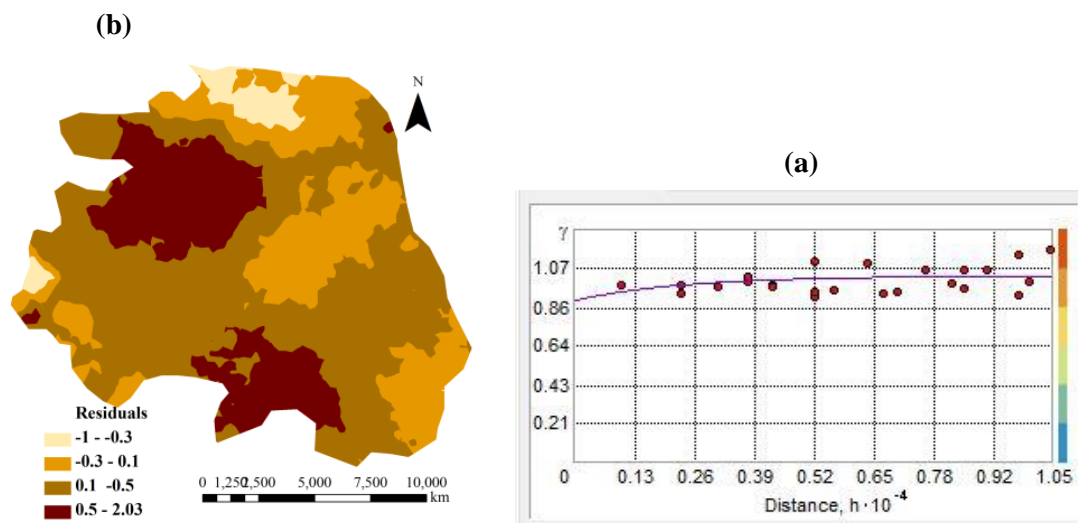
در ادامه به منظور تعیین الگوی پراکنش مکانی CEC از یک روش زمین‌آماري دیگر تحت عنوان فازی کوریجینگ استفاده شد. در این روش، ابتدا تعدادی از داده‌ها که اختلاف آن‌ها با میانگین داده‌ها بیشتر از دو برابر انحراف معیار داده‌ها بود، به عنوان داده‌های دارای عدم قطعیت بالا تشخیص داده شده و با استفاده از توابع عضویت مثلثی، فازی شد. دامنه مورد نظر برای توابع عضویت، توجه به انحراف معیار متغیر مورد بررسی (CEC) انتخاب شد. سپس، مدل تئوریکي نیم تغییرنا بر روی داده‌های فازی برازش شد که در شکل ۶-الف ارائه شده است. بعد یک شبکه بندی منظم (۱۰×۱۰) با ۸۳ نقطه در درون منطقه) بر روی منطقه انجام شد (شکل ۶-ب) و پهنه-بندی آن با کوریجینگ معمولی صورت گرفت. بر این اساس، مقادیر RMSE و ME نیز به ترتیب ۱/۲ و ۰/۱۵ به دست آمد.

در مقایسه و تطابق بین نقشه‌های کوریجینگ معمولی (شکل ۴) تهیه شده برای متغیرهای رس، CEC و کربن آلی، مشخص شد که نقشه رس و CEC نسبت به نقشه کربن آلی و CEC، مشابهت بیشتری دارند. که این امر با همبستگی بالای دو متغیر (۰/۵۹) رس و CEC از نظر آماری هماهنگ بوده و از این طریق قابل توجیه است. در این پژوهش، علاوه بر محاسبه واریوگرام‌های منفرد به روش کوریجینگ، اقدام به محاسبه و برازش واریوگرام‌های دو جانبه بین متغیر رس و CEC شد. با توجه به اینکه مقدار رس همبستگی بالاتری با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در مطالعه حاضر داشت (جدول ۲)، لذا از رس به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ استفاده شد. واریوگرام دوجانبه رس و CEC به همراه الگوی پراکنش با استفاده از روش کوکریجینگ در شکل (۵) برای متغیر CEC آمده است. نتایج نشان داد که با وجود برابر بودن مقادیر همبستگی مکانی و آماره ME تخمین‌گرهای کوریجینگ و کوکریجینگ، آماره RMSE متفاوتی حاصل شد (جدول ۴). براساس شاخص فوق استفاده از متغیر

جدول ۵- پارامترهای نیم تغییرنا برای پهنه‌بندی باقیمانده‌های مدل رگرسیونی CEC

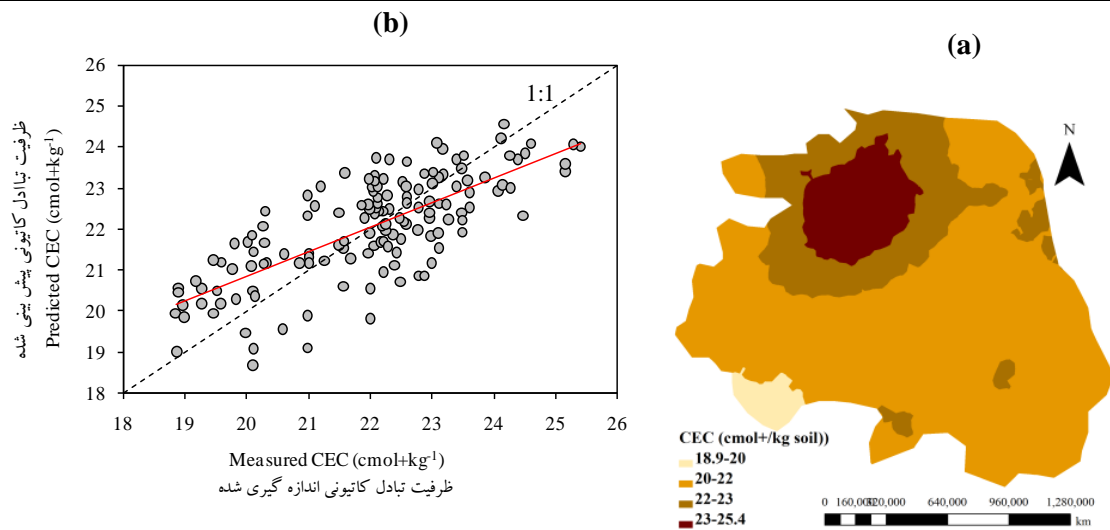
Table 5- Variogram parameters for mapping of residuals in CEC regression model

| ME | RMSE | $C_0/(C_0+C)$ | C_0+C | C_0 | دامنه (کیلومتر) (Range, km) | مدل (Model) | ویژگی‌های خاک (Soil properties) |
|--------|------|---------------|---------|-------|--------------------------------|---------------------|---|
| -0.021 | 1.02 | 0.86 | 1.026 | 0.89 | 7.01 | کروی (Spherical) | باقیمانده‌های رگرسیون (Regression residuals) |



شکل ۷- (a) نیم تغییرنا و (b) الگوی پراکنش باقیمانده‌های مدل رگرسیونی CEC

Figure 7- Variogram and distribution pattern of residuals in CEC regression model



شکل ۸- (a) نقشه پراکنش CEC و (b) رابطه بین CEC اندازه گیری و برآورد شده در روش رگرسیون کریجینگ
Figure 8- the distribution map of CEC (a) and CEC predicted and measured (b) in regression kriging method

رگرسیون کریجینگ برای پهنه‌بندی کربن کل، نیتروژن کل و درصد سیلت خاک به ترتیب ۱۴، ۱۳ و ۱۰ درصد نسبت به کریجینگ کمتر است. آنها همچنین عنوان کردند که با استفاده از این روش می‌توان بدون ارتکاب خطای قابل توجهی، تراکم نمونه‌برداری را کم کرد. الدیری و گارسیا (Eldeiry & Garcia, 2009) نیز گزارش کردند که روش رگرسیون کریجینگ در برآورد شوری خاک در مقایسه با روش کوکریجینگ کارایی بالاتری داشت. هگداس (Hegedus, 2006) نیز نشان داد که تلفیق روش کریجینگ با تئوری مجموعه‌های فازی، به خصوص در شرایط صحرایی که داده‌های در دسترس عدم قطعیت بالایی دارند، سبب بهبود نتایج مدیریتی می‌شود. به طوری که بین نقشه‌های عملکرد محصولات و نقشه حاصلخیزی خاک تهیه شده به روش فازی کریجینگ همخوانی بالایی وجود داشت و این نقشه توانست ۸۸ تا ۹۷ درصد از تغییرات عملکرد را برآورد کند.

با توجه به کارایی روش رگرسیون کریجینگ، از این روش برای بررسی امکان بهره‌گیری از بهترین توابع تبدیلی (ایجاد شده بوسیله ANFIS) به منظور افزایش تعداد داده‌ها و کاهش خطای تخمین استفاده شد. نتایج مربوط به شاخص‌های خطا و میزان درصد کاهش RMSE در هر روش نسبت به روشی که حداکثر RMSE را داشته است، در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج مقایسه روش‌ها نشان می‌دهد که افزایش تعداد داده‌ها از ۱۲۱ به ۱۵۳ با استفاده از توابع تبدیلی ایجاد شده به وسیله ANFIS توانسته مقدار خطا را نسبت به حالتی که تعداد داده کمتر بوده است (داده‌های آموزشی با ۱۲۱ داده)، کاهش دهد.

به عبارت دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از توابع تبدیلی و افزایش تعداد داده‌ها و سپس انجام روش‌های درون‌یابی، می‌تواند سبب کاهش خطا شود. به‌طور مشابه سامفلث و داتمان (Sumfleth & Duttman, 2008) نشان دادند که خطای روش

جدول ۶- نتایج مربوط به شاخص‌های خطا و میزان درصد کاهش RMSE در روش‌های مختلف

Table 6. Results of error index and percentage of RMSE reduction in different methods

| درصد کاهش RMSE (Percentage of RMSE reduction) | مقدار کاهش RMSE (Reduction of RMSE) | RMSE | ME | روش‌های میان‌یابی (Interpolation methods) |
|---|---|------|--------|--|
| 3.29 | 0.032 | 1.48 | 0.018 | کریجینگ (Kriging) |
| 4.60 | 0.046 | 1.45 | 0.018 | کوکریجینگ (Cokriging) |
| 21.05 | 0.210 | 1.20 | 0.025 | فازی کریجینگ (Fuzzy kriging) |
| 32.23 | 0.322 | 1.03 | 0.035 | رگرسیون کریجینگ با داده‌های آموزشی (RK Tr.D) (Regression kriging with train data) |
| 33.42 | 0.334 | 1.01 | -0.03 | رگرسیون کریجینگ با داده‌های ANFIS (ANFIS) (Regression kriging with ANFIS data) |
| 36.84 | 0.368 | 1.02 | -0.014 | رگرسیون کریجینگ (Regression kriging) |

نتیجه‌گیری کلی

در مقایسه با سایر روش‌ها داشته است. همچنین افزایش تعداد داده‌ها با استفاده از بهترین توابع تبدیلی (ایجاد شده توسط ANFIS)، سبب افزایش دقت تخمین گردیده است. در مجموع می‌توان گفت که ادغام بهترین توابع تبدیلی و بهترین روش پهنه‌بندی، کمک شایانی به پیش‌بینی دقیق CEC در منطقه مورد مطالعه نموده است. برای تخمین CEC احتمالاً تعیین نوع رس، سطح ویژه و نوع ماده آلی بتواند در تخمین و یا تفسیر بهتر نتایج کمک کند.

نتایج این تحقیق نشان داد که در مجموع استفاده از روش‌های هیبرید نظیر دو روش رگرسیون کریجینگ و فازی کریجینگ در مقایسه با سایر روش‌ها، سبب کاهش محسوسی در خطای تخمین گردیده است. ولی در مقایسه بین این دو روش نیز می‌توان گفت که روش رگرسیون کریجینگ با توجه به خطای کمتر، توانایی بیشتری در پیش‌بینی الگوی پراکنش CEC در منطقه مورد مطالعه

References

- Amini M., Khademi H. and Fathianpour N. 2002. A comparison of kriging and cokriging techniques in estimating Cl concentration in soil. *Iranian Journal Agriculture Science*, 33(4): 741-748. (in Persian)
- Ayobi Sh., Mohammad Zamani S. and Khormali F. 2007. Prediction total N by organic matter content using some geostatistic approaches in part of farm land of Sorkhankalateh, Golestan Province. *Journal Agriculture Sciences and Natural Resource*, 14(4): 1-10. (in Persian)
- Bower C.A., Reitmeir R.F. and Fireman, M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Sci*, 73: 251-261.
- Burrough P. and McDonnell R. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, Oxford, 333p.
- Eldeiry A. and Garcia L.A. 2009. Comparison of regression kriging and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images. *Hydrology Days*, pp. 27-37.
- Gee G.W. and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. In: Klute A. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*. Part 1. Agronomy Handbook No 9, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI, pp. 383-411.
- Hesse P.R. 1971. A text Book of Soil Chemical Analysis. John Marry Ltd., London, 555p.
- Hegedus F.M. 2006. Applying fuzzy logic and neural networks to database evaluation in precision agriculture. PhD Dissertation, University of West-Hungary, 90p.
- Hengl T., Heuvelink G.B.M. and Rossiter D.G. 2007. About regression- kriging: From equations to case studies. *Computers and Geosciences*, 33: 1301-1315.
- Kilic K., Kilic S. and Kociyigit R. 2012. Assessment of spatial variability of soil properties in areas under different land use. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18 (5): 722-732.
- Lark R.M. and Beckett P.H.T. 1998. A geostatistical descriptor of the spatial distribution of soil classes and its use in predicting the purity of possible soil map units. *Geoderma*, 83: 243-267.

- Liu Z., Zhou W., Shen J., He P., Lei Q. and Liang G. 2014. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in South China. *Geoderma*, 235: 39-47.
- Manrique L.A., Jones C.A., and Dyke P.T. 1991. Predicting cation exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55:787-794.
- Miao Y., Mulla D.J. and Robert P.C. 2006. Spatial variability of soil properties, corn quality and yield in two Illinois, USA fields: implications for precision corn management. *Precision Agriculture*, 7: 5-20.
- Mohammadi J. 2006. Pedometrics (Vol 2: Spatial Statistic). Pelk Press. Tehran, 435p. (In Persian)
- Nelson D.W. and Sommers L.P. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page A.L. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2, Agronomy Handbook No 9*, American Society of Agronomy and Soil Sci. Soc. Amer. Madison, WI, pp. 539-579.
- Odeh I.O.A., McBratney A.B. and Chittleborough D.J. 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: Heterotypic cokriging and regression-kriging. *Geoderma*, 67: 215-226.
- Pekey H. 2006. The distribution and sources of heavy metals in Izmit Bay surface sediments affected by a polluted stream. *Marine Pollution Bulletin*, 52: 1197-1208.
- Rahimi Bandarabadi S. and Saghfian B. 2007. Estimation of spatial distribution of rainfall using fuzzy package theory. *Iranian Water Resources Research*, 3(2): 73-85. (in Persian)
- Robinson T.P. and Metternicht G. 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computer and Electronics in Agriculture*, 50: 97-108.
- Sumfleth K. and Duttman R. 2008. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological Indicators*, 8:485-501.
- Santra Y., Chopra U.K. and Chakraborty D. 2008. Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in agriculture farm. *Current Science*, 95: 473-482.
- Shi J., Wang H., Xu J., Wu J., Liu X., Zhu H. and Yu C. 2007. Spatial distribution of heavy metals in soils: A case study of Changxing, China. *Environmental Geology*, 52: 1-10.
- Sumfleth K. and Duttman R. 2008. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological Indicators*, 8: 485-501.
- Tarr A.B., Moor K.J., Bullock D.G. and Dixon P.M. 2005. Improving Map Accuracy of Soil Variables Using Soil Electrical Conductivity as a Covariate. *Precision Agriculture*, 6: 255-270.
- Wang Y., Feng N., Zhang X. and Liao G. 2008. Spatial variability of soil cation exchange capacity in hilly tea plantation Soils under different sampling scales. *Agricultural Sciences in China*, 7(1):96-103.

Comparison of some geostatistical methods and incorporation of them with Pedotransfer functions for mapping cation exchange capacity

Salman Mirzaee^{1*}, Farrokh Asadzadeh², Ali Asghar Zolphaghari³

(Received: February 2016

Accepted: October 2016)

Abstract

Cation Exchange Capacity (CEC) is one of important characteristics of soil in absorption and desorption of plant nutrients and prediction of potential of heavy metals hazards and some of organic contaminants. Knowing spatial patterns of CEC for sustainable management of ecosystems, has special importance. The objective of this research was to determine the best interpolation methods for prediction of CEC in some of agricultural soils in Guilan province. 153 surface soil samples from 0-15 cm were collected and their clay, Organic carbon and CEC were measured. Interpolation methods including kriging, cokriging, fuzzy kriging and regression kriging have been done using GIS. Results showed that the hybrid methods including regression kriging and fuzzy kriging, respectively with RMSE values of 1.02 and 1.2, significantly reduced the error of prediction compared with the other methods. In addition, between these two mentioned methods, regarding to lower error, the regression kriging had more efficiency in prediction of CEC distribution pattern. The results also revealed that increasing the number of data by means of the best pedotransfer functions (created by ANFIS) will enhance the accuracy of prediction. In general, combination of the best pedotransfer functions with the best interpolation method increased the accuracy of CEC prediction in the study area.

Keywords: Interpolation, Regression Kriging, Fuzzy kriging, Soil Pedotransfer Function

1- Ph. D student, Department of Soil Science, Shahrekord University, Iran

2- Assistant Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Iran

Corresponding author: salman_mirzaee@yahoo.com