نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دوم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۲

ISSN 2251-7480

کارآیی برخی تخمین‌گرهای زمین‌آماری در میان‌یابی و پهنه‌بندی شماری از ویژگی‌های کیفی خاک

سیده محبوبه موسوی فرد[۱]، حمید رضا ممتاز[۲*] و حبیب خداوردیلو[۳]

۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد خاک‌شناسی؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه ارومیه

۲*) استادیار گروه علوم خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه ارومیه؛ نویسنده مسئول مکاتبات: h.momtaz@urmia.ac.ir

۳) استادیار گروه علوم خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۹/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

چکیده

طراحی و اجرای برنامه‌های حفاظت خاک نیازمند پهنه‌بندی دقیق و بهینه ویژگی‌های خاک است. از جمله عوامل بسیار موثر در پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک، روش درون‌یابی کاربردی است. هدف از این پژوهش، ارزیابی کارایی شماری از روش‌های رایج درون‌یابی به منظور تخمین و پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های کیفی خاک سطحی شامل درصد رس، هدایت الکتریکی، درصد کربنات کلسیم معادل و کربن‌آلی در اراضی زراعی منطقه نقده واقع در استان آذربایجان غربی با مساحتی حدود ۸۳۰۰ هکتار بود. به این منظور تعداد ۲۸۲ نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ سانتیمتری) به صورت تصادفی جمع‌آوری و مورد تجزیه آزمایشگاهی قرار گرفت. روش‌های قطعی (توابع پایه شعاعی و چند جمله‌ای فراگیر) و زمین آماری (کریجینگ معمولی) به منظور پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک بکار گرفته شدند. هدایت الکتریکی بیشترین (۹۰/۱۴) و رس کمترین (۲۸/۹۷) میزان تغییرپذیری را نشان دادند. مدل‌های نمایی، گوسی و کروی بر تغییرنماهای تجربی برازش داده شدند. رس و هدایت الکتریکی با مدل نمایی، کربنات کلسیم معادل با مدل گوسی و کربن‌آلی با مدل کروی بهترین برازش را داشتند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ معمولی دارای کمترین مقدار شاخص توازن خطا– واریانس (BVTO) برای تخمین مقدار رس، شوری، آهک و کربن‌آلی بود و روش توابع پایه شعاعی با مدل نواری کم ضخامت بیشترین مقدار خطا را در برآورد این متغیرها داشت. در نهایت با در نظر گرفتن بهترین روش درون‌یابی، نقشه‌های پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک در محیط GIS تهیه گردید.

واژه‌های کلیدی: ویژگی‌های کیفی خاک؛ زمین‌آمار؛ روش‌های درون‌یابی؛ کریجینگ

مقدمه

کشاورزی دقیق و مدیریت زراعی بهینه، مستلزم تهیه نقشه‌ها و پهنه‌بندی دقیق و صحیح ویژگی‌های خاک است. ویژگی‌های خاک در زمان و مکان دارای تغییرپذیری فراوانی می‌باشند (Ghorbani-Dashtaki *et al.*, 2009; Ghorbani-Dashtaki *et al.*, 2010; Khodaverdiloo *et al.*, 2011؛ محمودی و همکاران، ۱۳۹۱؛ کرمی و همکاران، ۱۳۹۱) از جمله عواملی که دقت و صحت پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک را در تهیه نقشه‌های مدیریتی تحت تأثیر قرار می‌دهد، تعداد نمونه‌های خاک و روش درون‌یابی بکار گرفته شده در تخمین متغیر مورد نظر می‌باشد. روش‌های درون‌یابی غالباً برای تعیین الگوی توزیع ویژگی‌های خاک در مقیاس‌های مختلف به کار می‌روند که در اغلب موارد تعداد داده‌ها زیاد بوده و دارای وابستگی مکانی می‌باشد.

وظیفه اصلی این روش‌ها تعیین مقدار کمیّت مورد نظر در مناطق نامعلوم می‌باشد که به آن پهنه‌بندی یا درون‌یابی مکانی نیز گفته می‌شود (Hengl *et al.*, 2004). به طور کلی می‌توان گفت که روش زمین‌آمار به تجزیه و تحلیل متغیرهایی می‌پردازد که دارای ساختار مکانی بوده و یا به عبارتی بین مقادیر، فاصله و جهت قرار گرفتن مقادیر ارتباط مکانی وجود دارد (حسنی‌پاک ۱۳۸٦). ابزار اصلی تجزیه و تحلیل ساختار مکانی بین مقادیر یک متغیر نیم‌تغییرنما نام دارد که بر اساس فاصله بین نمونه‌ها می‌باشد (محمدی ۱۳۸۵). از بین روش‌های مرسوم درون‌یابی، کریجینگ روشی دقیق، زمان‌بر و پیچیده است در حالیکه روش‌هایی چون وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)[1] و توابع پایه شعاعی[2] آسان، سریع و انعطاف‌پذیر هستند (Rusu and Rusu, 2006 ; Orr, 1999). در زمینه مقایسه تکنیک‌های درون‌یابی مطالعات پرشماری صورت گرفته است. برای نمونه Pereira و همکاران (۲۰۱۰) در پهنه بندی ازت کل موجود در خاکستر نشان داد که در میان تمام روش‌های به کار رفته، روش توابع پایه شعاعی از نوع چند ربعی[3] دقیق‌ترین روش و وزن‌دهی عکس فاصله با توان پنج کم‌دقّت‌ترین روش درون‌یابی بود.

گل‌محمدی و همکاران (۱۳۸۷) برای محاسبه مقادیر ضریب رواناب در محل ایستگاه‌های آب‌سنجی، از روش کریجینگ معمولی (OK)[4] و روش کریجینگ ساده[5]، همراه با روش توابع پایه شعاعی با مدل‌های مختلف از جمله نواری کاملاً منظم[6]، چند ربعی، چند ربعی معکوس[7]، نواری با کشش کم ضخامت[8] و نواری با ضخامت کم[9] استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که در روش کریجینگ معمولی، مدل گوسین، در روش کریجینگ ساده مدل دایره‌ای و در روش توابع پایه شعاعی، تابع نواری کاملاً منظم کمترین مقدار خطا را در درون‌یابی مقادیر ضریب رواناب دارا بودند.

بررسی‌های پرشماری که برای بیان الگوی پراکنش مکانی pH با دو روش OK و IDW صورت گرفته، نشان داده‌اند که روش کریجینگ دارای صحت پیش‌بینی بیشتری نسبت به وزن‌دهی عکس فاصله می‌باشد (Zimback, 2003 ؛Bucene and Laslett *et al.*, 1987).

Zimmerman و همکاران (۱۹۹۹) در تخمین میزان ارتفاع، صرف نظر از نوع لندفرم و الگوی نمونه‌گیری، نشان دادند که روش کریجینگ بهتر از IDW عمل نمود.

Leenaers و همکارن (۱۹۹۰) در تخمین مقدار روی خاک، روش کریجینگ را خیلی بهتر از روش وزن‌دهی عکس فاصله معرفی نمودند. البته بسیاری از پژوهشگران دیگر از جمله Weber و Englund (۱۹۹٤) روش وزن‌دهی عکس فاصله را نسبت به سایر روش‌ها از جمله کریجینگ، برتر معرفی نموده‌اند. Gotway و همکاران (۱۹۹٦) نیز در پهنه‌بندی کربن‌آلی کل خاک نتایجی مشابه بدست آوردند. معروفی و همکاران (۱۳۸۸) در تخمین میزان هدایت الکتریکی و pH زه‌آب‌های آبراهه‌ای دشت همدان، روش‌های چندجمله‌ای موضعی و وزن‌دهی عکس فاصله را به ترتیب بهترین الگو و روش توابع پایه شعاعی را به عنوان نامناسب‌ترین الگو برای تخمین هدایت الکتریکی و pH زه‌آب‌های منطقه معرفی نمودند. سرمدیان و همکاران (۱۳۸۸) در بررسی کارآیی روش‌های زمین‌آماری به منظور پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های خاک در منطقه اخترآباد نشان دادند که برای پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک به دلیل ساختار مکانی قوی داده‌ها، روش کریجینگ بر روش وزن‌دهی عکس فاصله برتری داشت. Kravchenko (۲۰۰۳) خاطر نشان کرد که صرف نظر از مقدار ضریب تغییرات، ویژگی‌هایی از خاک که دارای ساختار مکانی قوی بودند نسبت به آنهایی که ساختار مکانی ضعیف داشتند، با دقت بیشتری پهنه‌بندی شدند و روش کریجینگ فقط برای

[1] Inverse Distance Weighting
[2] Radial Basis Function (RBF)
[3] Multiquadric (MTQ)
[4] Ordinary Kriging
[5] Simple Kriging
[6] Completely Regularized Spline
[7] Inverse Multiquadric (IMTQ)
[8] Spline with Tension
[9] Thin Plate Spline (TPS)

مجموعه داده‌هایی که به حد کافی بزرگ بودند دقیق‌تر از روش وزن‌دهی عکس فاصله عمل نمود در حالیکه برای داده‌هایی که فاقد تغییرنمای منطقی بودند، دقت کافی را نشان نداد. Robinson و Metternicht (۲۰۰۶) در بررسی خود نشان دادند که کریجینگ معمولی برای درون‌یابی pH خاک سطحی، کریجینگ معمولی لوگ‌نرمال برای شوری خاک سطحی و روش وزن‌دهی عکس فاصله برای pH خاک زیرسطحی به عنوان مناسب‌ترین روش‌های درون‌یابی می‌باشند. شایان ذکر است که روش بهینه و مناسب جهت برآورد و تخمین متغیرهای مختلف خاک می‌تواند بسته به نوع متغیر و عوامل متعددی همچون ناهمگن بودن منطقه از لحاظ متغیرهای مورد مطالعه، فواصل نمونه‌برداری و وجود روند فرق کند (Ghorbani-Dashtaki *et al.*, 2009). بنابراین از آنجاییکه انتخاب روش زمین‌آماری مناسب در برآورد یک متغیر بستگی به نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای تأثیرگذار دارد، نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر نقاط تعمیم داد.

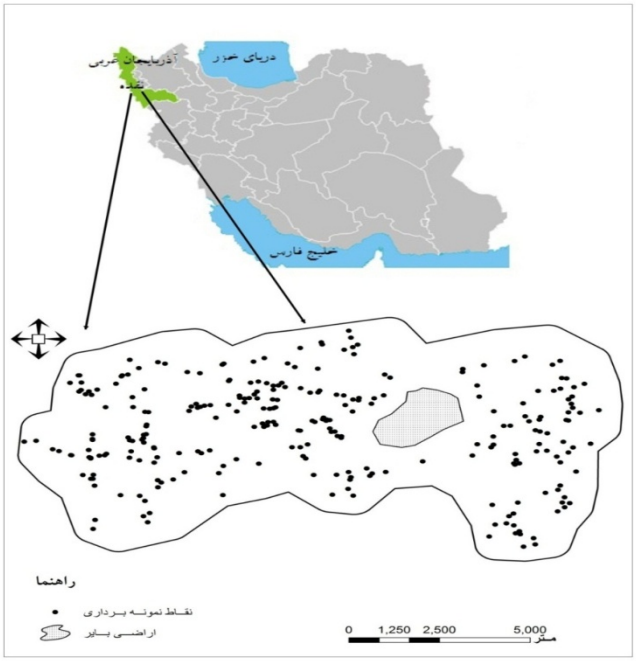
با توجه به اینکه خاک‌های کشورمان از نظر موادآلی فقیرند، افزایش ماده آلی به منظور حفظ حاصلخیزی و تداوم فعالیت موجودات زنده خاکزی ضروری است. موادآلی عموماً مقدار آب موجود در خاک در حالت ظرفیت مزرعه و همچنین مقدار آب قابل استفاده در خاکهای شنی را افزایش داده و تهویه خاکهای رسی را با افزایش خاکدانه‌سازی و در نتیجه ایجاد خلل و فرج بزرگتر، زیادتر می‌کنند. کربن آلی به عنوان مهمترین مشخصه کیفی خاک، محور اصلی کشاورزی پایدار و حفظ زیست بوم خاک می‌باشد و پراکندگی آن بیش از هر متغیر دیگری وابسته به وضعیت مدیریتی خاک است. درصد کربنات کلسیم معادل نیز در خاک‌های آهکی کشور ما اهمیت زیادی دارد، زیرا در خاک‌های آهکی به دلیل بالا بودن pH، فعالیت میکروارگانیسم‌ها و جذب عناصر غذایی شدیداً تحت تأثیر قرار می‌گیرد. شوری با کاهش آب قابل استفاده گیاه، تأثیر زیادی بر رشد گیاه به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک می‌گذارد، به همین دلیل بررسی توزیع مکانی هدایت الکتریکی در اراضی زراعی اهمیت بسزایی دارد.

هدف از این بررسی مقایسه کارآیی شماری از روش‌های متداول درون‌یابی از جمله کریجینگ معمولی، چندجمله‌ای فراگیر (درجه یک و درجه دو)، توابع پایه شعاعی (چند ربعی، چند ربعی معکوس و نواری کم ضخامت) به منظور تخمین و پهنه‌بندی برخی از ویژگی‌های موثر در حاصلخیزی خاک سطحی از جمله درصد رس، هدایت الکتریکی، درصد کربنات کلسیم معادل و درصد مواد آلی در اراضی زراعی منطقه نقده واقع در استان آذربایجان غربی بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، دشت نقده واقع در قسمت شرقی شهرستان نقده از استان آذربایجان غربی با وسعت ۸۳۰۰ هکتار بود. این دشت بین طول‌های جغرافیایی "۳۰ ′۲٤ ˚٤٥ و"۳۰ ′۳۵ ˚٤٥ شرقی و عرض جغرافیایی "۳۰ ′۵۳ ˚۳٦ و "۳۰ ′۵۸ ˚۳٦ شمالی قرار دارد. ارتفاع دشت نقده ۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ متر و رژیم رطوبتی و حرارتی آن به ترتیب زریک و ترمیک می‌باشد. تعداد ۲۸۲ نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) به صورت تصادفی جمع‌آوری شدند. الگوی نمونه‌برداری و موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است. برای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، نمونه‌های خاک ابتدا هوا خشک و سپس از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. بافت با روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، هدایت الکتریکی(EC) در عصارهٔ اشباع (Page, 1982)، درصد کربنات کلسیم معادل با روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک یک‌نرمال و تیتراسیون با هیدروکسید سدیم (Nelson, 1982)، و اندازه‌گیری کربن‌آلی به روش والکلی و بلاک (Nelson and Sommers, 1982) انجام شد.

روش‌های زمین‌آماری



شکل ۱- موقعیت کلی منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری شده

پیش از انجام محاسبات زمین آماری، آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها در محیط نرم افزار SPSS صورت گرفت. برای این کار از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد.

پس از پیش‌پردازش آماری داده‌ها از جمله محاسبات میانگین، چولگی، ضریب تغییرات و آزمون نرمال بودن داده‌ها و تبدیل داده‌های غیر نرمال به نرمال، تجزیه و تحلیل همبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده که بصورت واریانس بیان می‌شود، از طریق میانگین اختلاف مربعات جفت داده‌ها بر اساس فرمول زیر محاسبه شد (Goovaerts, 1999; Chaplot *et al.*, 2006; Luo *et al.*, 2008):

$$\hat{\gamma}(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}(Z(x_i)-Z(x_i+h))^2$$

$\gamma(h)$: نیم تغییرنما برای N جفت داده که با فاصله h از هم جدا شده‌اند.

در میان روش‌های زمین‌آماری، کریجینگ یک روش درون‌یابی خطی است که بهترین تخمین‌های خطی نااریب را برای مقادیری که در فضا گسترده‌اند، فراهم می‌کند (Wu *et al.*, 2008). تخمین‌های کریجینگ به عنوان مجموع وزن‌دار شده مقدار ویژگی نمونه‌های مجاور محاسبه می‌گردد. بنابراین اگر داده‌ها خیلی در فضا گسترده باشند، نقاطی که به نقطه مورد تخمین نزدیک‌تر هستند نسبت به آن‌هایی که دورترند، وزن بیشتری دریافت می‌کنند (Cressie, 1990). کریجینگ یک میانگین متحرک وزن‌دار است و به صورت زیر تعریف می‌شود (Pang *et al.*, 2011):

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

$$\sum_{i=1}^{n}\lambda_i=1$$

$Z^*(x_0)$: مقدار تخمین زده شده، λ_i: وزنی که به نمونه $Z(x_i)$: مقدار نمونه iاُم تعلق می‌گیرد و

هر تابع تغییرنما از سه مولفه اصلی تشکیل شده است. در یک تغییرنما با افزایش فاصله، مقدار تغییرنما به تدریج تا فاصله معینی افزایش می‌یابد و در بیشتر از آن فاصله به

حد ثابتی می‌رسد، که آن را حد آستانه[1] گویند (Trangmar et al., 1985). به فاصله‌ای که در آن مقدار تغییرنما به حد ثابت و مشخص خود می‌رسد، اصطلاحاً دامنه موثر[2] گویند. در ماورای این فاصله نمونه‌ها دیگر برهم اثر ندارند و مقادیر مشاهده یا نمونه‌برداری شده مستقل از یکدیگرند. از نظر تئوری مقدار تغییرنما به ازاء h= 0 باید به حداقل مقدار خود، یعنی به صفر تنزل کند. در عمل تغییرنماهای تجربی از چنین شرایطی پیروی نمی‌کنند. به مقدار تغییرنما در h= 0 اثر قطعه‌ای[3] گویند. عوامل مختلفی مانند خطاهای نمونه‌برداری و آزمایشگاهی و تغییرات کوتاه دامنه مشخصه مورد مطالعه در فواصل کوتاه‌تر از کوتاه‌ترین فاصله نمونه‌برداری و سایر تغییرات غیرقابل پیش‌بینی، باعث جهش اولیه تغییرنمای تجربی و غیرپیوستگی آن در مبدأ مختصات می‌شود (حسنی پاک، ۱۳۸٦). نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه، معیاری از درجه همبستگی مکانی است. بر اساس تقسیم‌بندی Shi et al., (۲۰۰۷) هرگاه این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد، متغیر مورد نظر دارای ساختار مکانی قوی است، اگر بین ۰/۲۵–۰/۷۵ باشد ساختار مکانی متوسط و مادامیکه این نسبت بزرگتر از ۰/۷۵ باشد ساختار مکانی ضعیف را نشان می‌دهد. گفتنی است که در حالت ایده‌آل، مقدار اثر قطعه‌ای باید برابر با صفر باشد.

توابع پایه شعاعی

توابع پایه شعاعی از جمله روش‌های درون‌یابی است که در آن سطح تخمین از مقادیر مشاهده‌ای عبور می‌کند. از خصوصیات این روش که حالتی از شبکه عصبی مصنوعی[4] می‌باشد، این است که توان برون‌یابی دارد. توابع توابع پایه شعاعی براساس پنج تابع مختلف درون‌یابی اطلاعات را انجام می‌دهند که هسته اصلی توابع، مجموع مقادیر مجذورات (h^2+R^2) می‌باشد. مقادیر R و h به ترتیب، فاکتور هموار کننده[5] و فاکتور ترسیم ناهمسانگرد مربوط به فاصله نقطه تا گره[6] می‌باشند (Carlson and Foley 1991). توابع پایه شعاعی درون‌یاب‌های قطعی سریعی هستند که به صورت دقیق بوده و نسبت به روش IDW انعطاف‌پذیرتر می‌باشند. این روش مشابه با روش‌های بکار رفته در شبیه‌سازی‌های زمین آماری می‌باشد با این تفاوت که در آن مدل‌سازی تغییرنما وجود ندارد. در این پژوهش از روش توابع پایه شعاعی با توابع چند ربعی معکوس (IMTQ)، چند ربعی (MTQ) و نواری کم ضخامت (TPS) استفاده شد.

چند جمله‌ای فراگیر

این روش یک تکنیک درون‌یابی فراگیر است که جزء روش‌های قطعی سریع بوده و بسیار مناسب برای سطوحی است که به آهستگی و تدریجی تغییر می‌کنند. در این روش از طریق یک تابع ریاضی چند جمله‌ای، سطحی نرم به داده‌های نقطه‌ای ورودی برازش داده می‌شود (Yilmaz, 2007؛Luo et al., 2008).

فرمول چند جمله ای درجه یک

$$Z(x_i,y_i)=\beta_0+\beta_1x_i+\beta_2y_i+\varepsilon(x_i,y_i)$$

فرمول چند جمله ای درجه دو

$$Z(x_i,y_i)=\beta_0+\beta_1x_i+\beta_2y_i+\beta_3{x_i}^2+\beta_4{y_i}^2+\beta_5x_i,y_i+\varepsilon(x_i,y_i)$$

روش‌های اعتبارسنجی

از روش جک‌نایف برای اعتبارسنجی برآوردهای حاصل از روش‌های میان‌یابی استفاده شد. این روش بر این اساس استوار است که در هر مرحله یکی از نقاط معلوم حذف می‌شود و آنگاه مقدار آن با توجه به نقاط مجاور برآورد می‌گردد. سپس مقدار واقعی به محل واقعی خود برگردانده می‌شود و با حذف نقطه‌ای دیگر این عمل تکرار می‌شود (حسنی‌پاک ۱۳۸٦). با تکرار این عمل برای همه

[1] Sill
[2] Effective Range
[3] Nugget Effect
[4] Artificial Neural Network
[5] Smoothing factor
[6] Anisotropically rescaled factor

نقاط، مجموعه‌ای از برآوردها در کنار مقادیر اندازه‌گیری بدست می‌آید و دقت و اعتبار برآوردها آزموده می‌شود.

به‌منظور ارزیابی مناسب روش‌های تخمین‌گر می‌بایست از چندین شاخص مختلف ارزیابی به طور همزمان استفاده شود (Moreels ؛ Huang *et al.*, 2003؛ Whitmore, 1991 *et al.*, 2003). در این پژوهش کیفیت برآورد ویژگی‌های مورد بررسی با سه شاخص مکمل شامل میانگین خطا[1] (MD)، انحراف معیار خطا[2] (SDD) و شاخص توازن خطا–واریانس[3] (BVTO) تعیین شد. برای کسب اطلاعات بیشتر پیرامون شاخص‌های اعتبارسنجی یاد شده می‌توان به De Vos et al., (۲۰۰۵) مراجعه نمود. مقایسه نهایی اعتبار روش‌های میان‌یابی بر اساس BVTO انجام گردید. برای مقادیر بزرگ N مقدار BVTO برابر با مجموع MD^2 (انحراف) و SDD^2 (واریانس) است (De Vos *et al.*, 2005):

$$BVTO = MD^2 + \frac{N-1}{N} SSD^2$$

در واقع هر تلاشی برای کاستن خطا با افزایش واریانس خطا همراه خواهد بود و بالعکس. لذا باید توازنی بین این دو نیاز متضاد (یعنی خطای کم و واریانس اندک در خطا) برقرار شود تا مناسب‌ترین برازش بدست آید (Baker and Ellison, 2008؛ Botula *et al.*, 2012). در مقایسات مختلف، کمترین مقدار شاخص BVTO بیانگر بهترین حالت این توازن است (Botula *et al.*, 2012).

نتایج و بحث

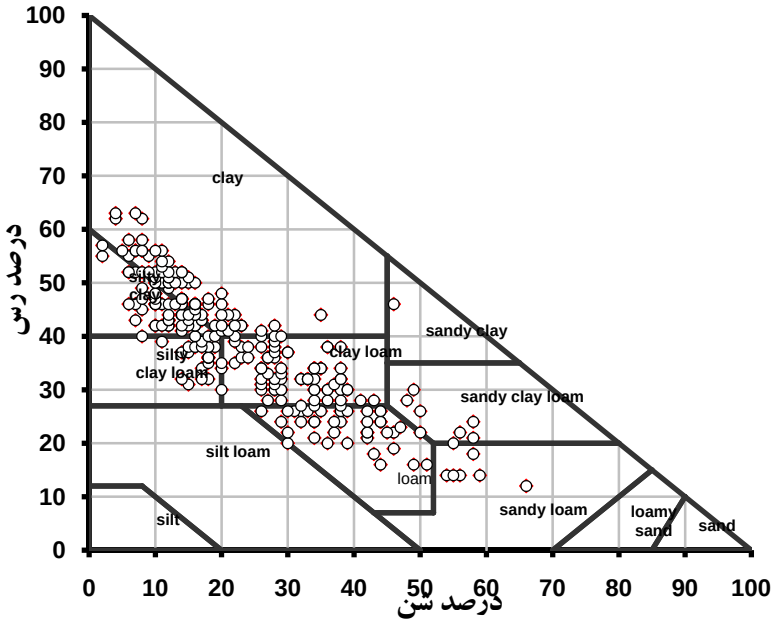
توصیف آماری داده‌ها

پیش‌پردازش داده‌ها نشان داد که متغیر رس توزیع نرمال داشت درحالیکه متغیرهای شوری، کربنات کلسیم معادل و کربن‌آلی توزیع نرمال نداشتند و با تبدیل لگاریتمی نرمال شدند. جدول ۱ آماره‌های توصیفی ویژگی‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. متوسط مقدار رس در خاک‌ها حدود ۳۸ درصد بود و تغییرپذیری متوسطی داشت (CV =٪۲۹). خاک‌های سطحی مورد مطالعه عمدتاً دارای کلاس بافت خاک متوسط تا سنگین از نوع لوم‌رسی تا رسی‌سیلتی و رسی بوده که نشانگر ظرفیت مطلوب خاک این منطقه در نگهداشت آب و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه می‌باشد (شکل ۲). میانگین هدایت الکتریکی خاک‌ها حدود ۱/۰ دسی‌زیمنس بر متر بوده که به موجب آن خاک‌های مورد بررسی منطقه مورد مطالعه جزء خاک‌های غیرشور (EC <٤ dS/m) تلقی می‌شوند. میانگین مقدار کربنات کلسیم معادل خاک‌ها حدود ۱۷٪ بود که بر این اساس خاک‌های مورد مطالعه اراضی زراعی منطقه نقده در گروه خاک‌های آهکی (CaCO3 >۱۵٪) قرار می‌گیرند. مقدار کربن‌آلی خاک‌های منطقه عموماً اندک با میانگین ۱/۳۹ بود. بر پایه جدول ۱، درجه شوری و کربنات کلسیم معادل خاک به ترتیب با ضریب تغییرات ۹۰/۱٤ و ٥٦/۱٥ درصد بیشترین تغییرپذیری را در منطقه داشت که بر مبنای طبقه‌بندی Wilding (۱۹۸۵) در گروه متغیرهایی با تغییرپذیری بالا قرار می‌گیرند، درحالیکه متغیرهای رس و کربن‌آلی دارای تغییرپذیری متوسط بودند (۳٥ >CV> ۱٥). تغییرپذیری بالای هدایت الکتریکی و کربنات کلسیم معادل خاک‌های سطحی را احتمالاً می‌توان به تفاوت در کیفیت آب آبیاری و الگوی کوددهی در بخش‌های مختلف و همچنین غیر یکنواخت بودن جنس مواد مادری در منطقه مورد مطالعه نسبت داد.

[1] Mean Difference
[2] Standard Deviation of Differences
[3] Bias-Variance Trade-Off

جدول ۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای مورد مطالعه در منطقه نقده

متغیر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف‌معیار	چولگی	کشیدگی	ضریب‌تغییرات (٪)
رس (٪)	۱۲	٦۳	۳۷/۹۵	۱۰/۹۹	-۰/۱۰	-۰/٦۵	۲۸/۹۷
هدایت‌الکتریکی(dS/m)	۰/۳۷	۸/۹۷	۱/۰۱	۰/۹۱	۵/۸۸	٤۲/۳۳	۹۰/۱٤
کربنات کلسیم معادل (٪)	۱/۵	۵٦/۳	۱۷/۰۳	۹/۵٦	۰/۹۹	۱/۰۷	۵٦/۱۵
کربن‌آلی (٪)	۰/۳۷	۲/۸۲	۱/۳۹	۰/٤۱	۰/۵۰	۰/۷۸	۲۹/۹۸



شکل ۲- پراکنش کلاس بافت خاک سطحی نقاط نمونه‌برداری شده در منطقه نقده.

تجزیه تحلیل همبستگی مکانی

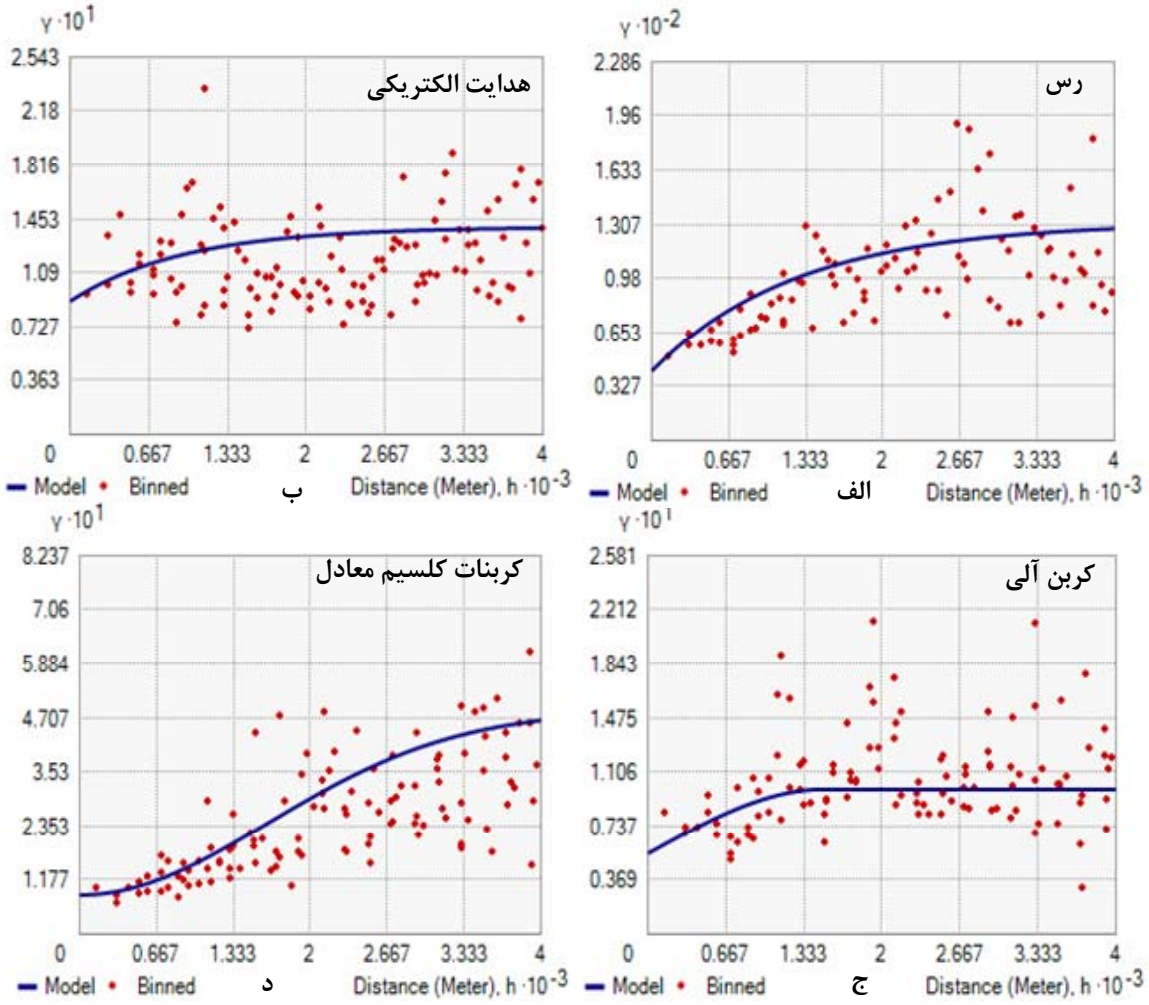
از بین مدل‌های مختلف نیم‌تغییرنما، مدل نمایی بهترین برازش را بر نیم‌تغییرنمای تجربی متغیر رس داشت (شکل ۳ الف). Gokalp و همکاران (۲۰۱۰) نیز در بررسی‌های زمین‌آماری خود، مدل نمایی را در بیان ساختار همبستگی مکانی متغیر رس تواناتر یافتند. مولفه‌های نیم‌تغییرنمای متغیر رس در جدول ۲ ارائه شده است. نسبت همبستگی مکانی (نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه) متغیر رس در منطقه مطالعاتی ۳۱ درصد بود که طبق گروه‌بندی یاد شده (Shi *et al.*, 2007) دارای همبستگی متوسط می‌باشد.

در تجزیه و تحلیل مکانی متغیر شوری مدل نمایی بر نیم‌تغییرنمای آن برازش داده شد (شکل ۳ ب). سرمدیان و همکاران (۱۳۸۸) نیز در بررسی‌های زمین‌آماری خود بهترین مدل برازش یافته بر واریوگرام متغیر شوری را مدل نمایی بدست آوردند. مولفه‌های نیم‌تغییرنمای متغیر شوری نیز در جدول ۲ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دامنه تأثیر شوری ۲۹۰۰ متر می‌باشد. نسبت همبستگی این متغیر ۰/٦٤ بود و به همین دلیل کلاس همبستگی آن متوسط می‌باشد. افزون بر عوامل ذاتی و پدوژنیک، کوددهی و آبیاری از جمله عواملی هستند که بر تغییرپذیری دامنه همبستگی تأثیرگذارند (Cahn *et al.*, 1994).

مدل گوسی به عنوان بهترین مدل بر نیم‌تغییرنمای تجربی متغیر کربنات کلسیم معادل برازش داده شد (شکل

۳ ج). نسبت اثر قطعه‌ای به سقف (۰/۱۷) نشانگر وجود ساختار مکانی قوی و قابل قبول برای متغیر مورد نظر در منطقه مورد مطالعه است. اثر قطعه‌ای این متغیر ۰/۰۸۵ و دامنه تأثیر آن ۳۵۰۰ متر بود (جدول ۲).

مدل کروی بر نیم‌تغییر نمای تجربی کربن‌آلی در منطقه مطالعاتی برازش داده شد (شکل ۳ د). پارامترهای این مدل در جدول ۲ قابل مشاهده است. اثر قطعه‌ای و حد آستانه متغیر کربن‌آلی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۰/۰۵۵، ۰/۰۹ و دامنه تأثیر آن برابر با ۱۵۰۰ متر بود. نسبت همبستگی کربن‌آلی ۰/۵۵ بود که در کلاس همبستگی متوسط قرار می‌گیرد. Su *et al.*, (۲۰۰٤) نیز ضمن بررسی تغییرات مکانی برخی خصوصیات خاک با استفاده از کریجینگ در بخشی از استان شاندونگ کشور چین، برای این متغیر همبستگی مکانی ضعیف بدست آوردند.



شکل ۳- نیم‌تغییرنماهای متغیرهای مورد مطالعه در منطقه نقده.

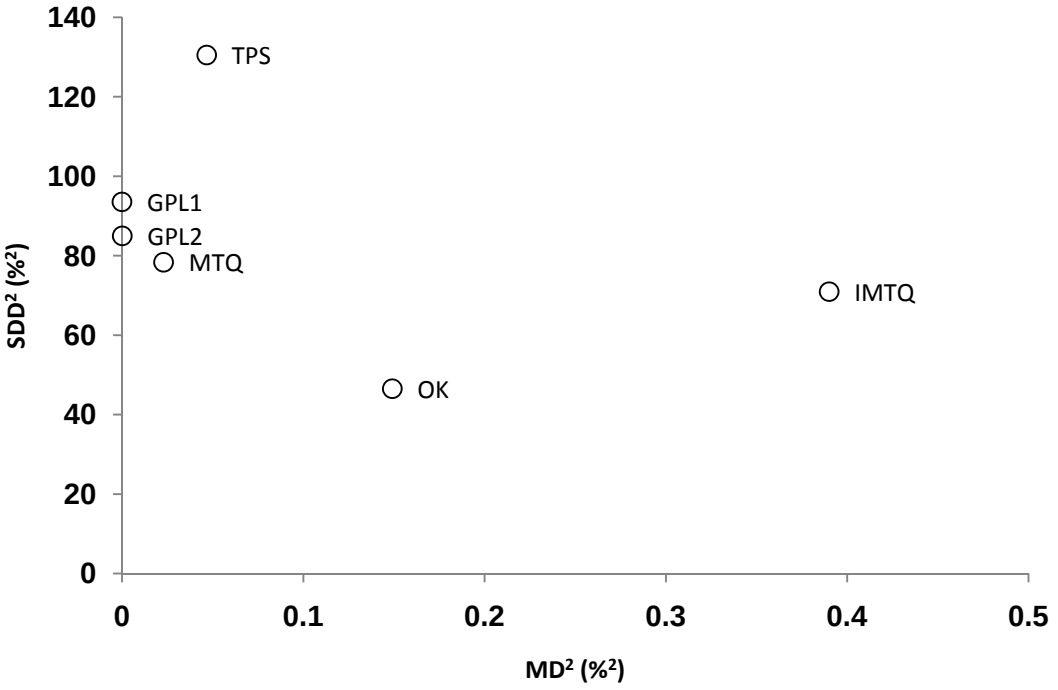
جدول ۲- پارامترهای نیم‌تغییرنمای تجربی متغیرهای مورد مطالعه در منطقه نقده

متغیر	مدل‌نیم‌تغییرنما	اثرقطعه‌ای	سقف	دامنه	نسبت‌همبستگی	کلاس‌همبستگی
رس	نمایی	۴۲	۱۳۲	۳۸۰۰	۰/۳۱	متوسط
هدایت‌الکتریکی	نمایی	۰/۰۹	۰/۱۴	۲۹۰۰	۰/۶۴	متوسط
آهک	گوسی	۰/۰۸۵	۰/۴۸	۳۵۰۰	۰/۱۷	قوی
کربن‌آلی	کروی	۰/۰۵۵	۰/۰۹	۱۵۰۰	۰/۵۵	متوسط

انتخاب بهترین روش درون‌یابی

نتایج مربوط به تجزیه و تحلیل‌های زمین آماری مربوط به شش روش مورد استفاده در جدول ۳ نشان داده شده است. روش کریجینگ معمولی (OK) بهترین الگو برای تهیه نقشه پهنه‌بندی متغیر رس در منطقه مطالعاتی است (جدول ۳). همانطور که پیش‌تر گفته شد باید توازنی بین مقدار خطا و واریانس خطا برقرار شود تا مناسب‌ترین برازش بدست آید و کمترین مقدار شاخص BVTO، بیانگر بهترین حالت این توازن است (Botula *et al.*, 2012). برای نمونه توازن نسبی بین مقدار و واریانس خطا برای متغیر رس در شکل ٤ آمده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، روش کریجینگ معمولی (OK) برای رس به طور نسبی هم مقدار خطای (MD2) پایین‌تر و هم واریانس خطای (SDD2) کمتری نسبت به سایر روش‌ها دارد و لذا کمترین مقدار BVTO (٤٦/٤٥) را داشته و مناسب‌ترین روش برای درون‌یابی مقدار رس شناسایی شد. از طرفی روش توابع پایه شعاعی با مدل نواری کم ضخامت (TPS) با داشتن بیشترین میزان انحراف معیار خطا (برابر با ۸/۲۸) و نیز BVTO (برابر با ٦٨/٥٥) به عنوان نامناسب‌ترین روش درون‌یابی برای رس در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد.

با اینکه مقدار نسبی خطا (MD) در همه روش‌های مورد استفاده برای تمام ویژگی‌ها کمابیش یکسان و قابل مقایسه با همدیگر بود، واریانس خطا (SDD) در روش کریجینگ کمتر از سایر روش‌ها بود (جدول ۳). لذا، بر اساس عامل توازن مقدار واریانس–خطا (BVTO)، در منطقه مطالعاتی روش کریجینگ به عنوان بهترین الگو برای درون‌یابی سایر ویژگی‌های مورد مطالعه (هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل و کربن آلی) نیز شناخته شد (جدول ۳). بطور کلی روش توابع پایه شعاعی با مدل نواری کم ضخامت نامناسب‌ترین روش تشخیص داده شد (جدول ۳).



شکل٤– توازن بین مقدار خطا (MD^2) و واریانس خطا (SDD^2) در روش‌های OK، MTQ، IMTQ، TPS، GPL1 و GPL2 به منظور درونیابی مقدار رس

جدول ۳- نتایج ارزیابی روش‌های زمین آماری در تخمین متغیرهای مورد مطالعه خاک در اراضی کشاورزی منطقه نقده

روش	مدل	متغیر	MD	SDD	BVTO
کریجینگ	نمایی	رس	-۰/۳۸	٦/۸۱	٤٦/٤٥
	نمایی	هدایت‌الکتریکی	۰/۰۰	۰/۲٥	۰/۰٦
	گوسی	آهک	-۰/٥۹	٤/۷٦	۲۳/۰۱
	کروی	کربن‌آلی	-۰/۰۳	۰/۲٦	۰/۰۷
توابع پایه شعاعی	چند ربعی	رس	-۰/۱٥	۸/۸٥	۷۸/۰٤
		هدایت‌الکتریکی	-۰/۰۸	۰/۳۸	۰/۱٤
		آهک	-۰/۰٦	٦/۲۸	۳۹/۳۰
		کربن‌آلی	۰/۰۰	۰/٤۳	۰/۱۸
	چندربعی‌معکوس	رس	۰/٦۲	۸/٤۲	۷۱/۰٥
		هدایت‌الکتریکی	۰/۰۰	۰/۳۲	۰/۱۰
		آهک	-۰/۰۸	٥/۹۱	۳٤/۸۲
		کربن‌آلی	۰/۰۰	۰/۳۹	۰/۱٥
	نواری‌کم‌ضخامت	رس	۰/۳٥	۸/۲۸	٦۸/٥٥
		هدایت‌الکتریکی	۰/۰۰	۰/٥۲	۰/۲۷
		آهک	۰/٤٤	۹/۳۲	۸٦/۸۳
		کربن‌آلی	۰/۰٤	۰/۹۰	۰/۸۱
چندجمله‌ای فراگیر	درجه یک	رس	۰/۰۰	۹/٦۷	۹۳/۱۸
		هدایت‌الکتریکی	۰/۰۰	۰/۳۲	۰/۱۰
		آهک	۰/۰۰	۷/٦۲	٥۷/۹۰
		کربن‌آلی	۰/۰۰	۰/٤۲	۰/۱۷
	درجه دو	رس	۰/۰۱	۹/۲۱	۸٤/٦٥
		هدایت‌الکتریکی	۰/۰۰	۰/۳۲	۰/۱۰
		آهک	۰/۰۰	٦/٦٥	٤٤/۱٦
		کربن‌آلی	۰/۰۰	۰/٤۰	۰/۱٦

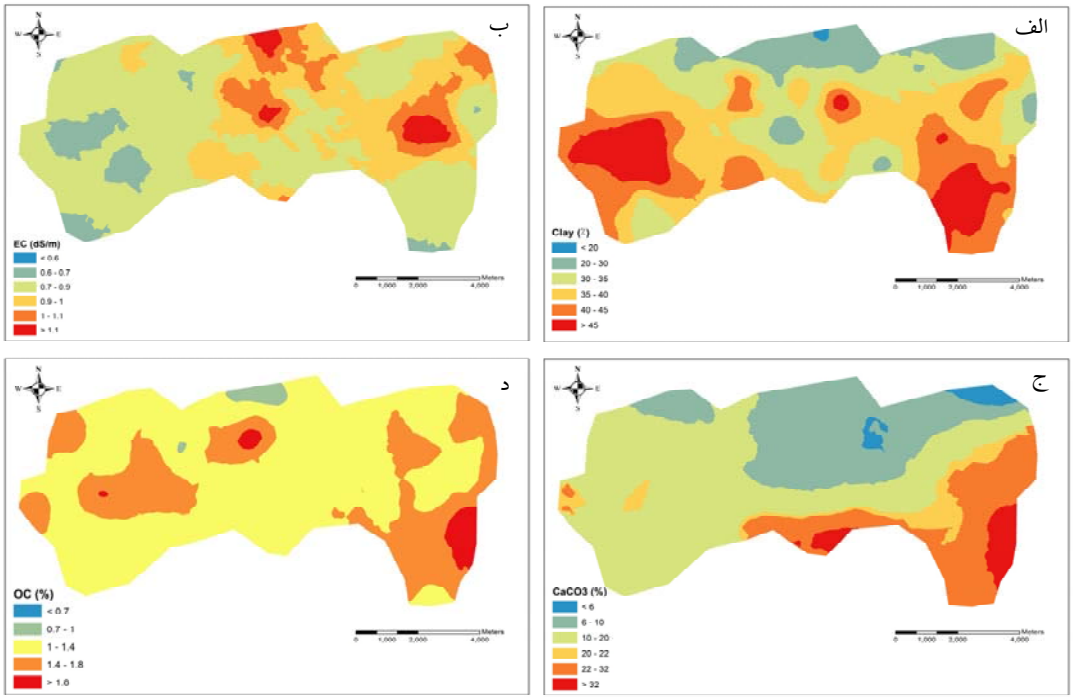
تهیه نقشه پهنه‌بندی خصوصیات حاصلخیزی خاک

شکل ٥-الف نقشه‌پهنه‌بندی متغیر رس را به روش کریجینگ معمولی نشان می‌دهد. نکته مورد توجه این است که در واحدهای اراضی سال‌هاست تغییر کاربری صورت گرفته و مراتع به اراضی زراعی تبدیل شده است. از طرفی ارتفاع از نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه به سمت شمال کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر قسمت‌های جنوبی که ارتفاع بیشتری دارند، به اراضی پست در نیمه شمالی منتهی می‌شوند. نقشه توزیع رس نشان می‌دهد که توزیع رس به سمت جنوب شرق افزایش می‌یابد، همچنین بخش غربی منطقه مطالعاتی مقدار رس بالایی دارد در حالیکه تعداد چند لکه غنی از رس در بخش‌های شمالی دیده می‌شود. میزان رس در بخش‌های میانی منطقه مطالعاتی متوسط بود. فرض بر این است که مناطقی با میزان رس بالاتر به واسطه دشت دامنه‌ای آبرفتی و تأثیر فرآیندهایی مانند فرسایش بوجود آمده‌اند. لندفرم دشت دامنه‌ای آبرفتی بخاطر تجمع رسوبات ریز دارای مقدار رس بیشتری بوده که جریان آب اراضی بالادست سبب انتقال آنها به این قسمت می‌شود.

شکل ٥-ب الگوی توزیع مکانی مقدار هدایت الکتریکی را نمایش می‌دهد. انتظار می‌رود منطقه مطالعاتی

که از قسمت شمال شرق در ۲۰ کیلومتری دریاچه ارومیه (بزرگترین دریاچه شور دنیا) قرار دارد، متأثر از شوری این دریاچه گردد. لیکن نقشه پهنه‌بندی شوری منطقه نشان داد کـه شـوری اراضی در منطـقه مطالـعه شده کـم بـوده (۱/۰۱dS/m) و محدودیتی برای رشد طبیعی گیاهان بوجود نمی‌آورد. تنها شمال شرق منطقه نسبت به سایر قسمت‌ها به نسبت شوری بالاتری داشت. شوری نسبتاً بالا در این منطقه می‌توان ناشی از اثر آبیاری با آب با کیفیت نامناسب‌تر به دلیل همسایگی بیشتر با دریاچه و فرونهشت املاح بادرفت از از سمت دریاچه ارومیه باشد. با این حال، خاک‌های این بخش از منطقه نیز به طور کلی شور نیستند (شکل ۵-ب). دلیل این امر را می‌توان به تأثیر لندفرم دشت آبرفتی رودخانه‌ای و برجای گذاشتن رسوبات درشت بافت در قسمت سطحی خاک با زهکشی خوب نسبت داد که با آبشویی املاح به اعماق، شوری خاک را کاهش داده است.

نقشه میزان کربنات کلسیم معادل در منطقه مطالعاتی در شکل ۵-ج نشانگر آهکی بودن خاک‌های منطقه مورد مطالعه (۶۵٪-۱/۵٪) می‌باشد. بر پایه این شکل مقدار آهک در قسمت‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه بسیار بالاست (۲۵٪ ≤) که دلیلی بر وجود خاک‌های بسیار آهکی است. این امر اساساً مربوط به وجود فاکتورهای طبیعی مانند مواد مادری می‌شود. چرا که حاشیه جنوب شرقی محدوده مطالعاتی اساساً از سنگ آهک و دولومیت تشکیل شده بود، در حالیکه در حاشیه جنوب غرب منطقه گرانیت غالب بود.



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی متغیرهای مورد مطالعه خاک با استفاده از بهترین روش مورد ارزیابی (کریجینگ معمولی). الف- متغیر رس ب- متغیر شوری ج- متغیر کربنات کلسیم معادل د- متغیر کربن آلی

مقدار آهک در بخش‌های مرکزی و غربی متوسط بود (۲۵٪- ۱۰٪) در حالی‌که بخش‌های شمالی منطقه حاوی مقدار کمی آهک بودند (۱۰٪ ≥) . یکی از علل وجود آهک کم در بخش‌های شمالی منطقه مطالعاتی می‌تواند وجود ذرات درشت بافت خاک و زهکشی خوب و متعاقباً آبشویی آهک به اعماق پروفیل باشد.

نحوه توزیع کربن‌آلی در خاک‌های سطحی منطقه مطالعاتی در شکل ۵-د قابل مشاهده می‌باشد. با در نظر گرفتن معیار ۱/۵ درصد برای کربن‌آلی توزیع اندازه این

متغیر در اراضی زراعی منطقه مطالعاتی متوسط تا کم است اما مقدارش در بخش‌های شرقی و جنوب شرق و بطور موضعی در بخش مرکزی کمی بیشتر است که احتمالاً مربوط به سابقه وجود اراضی باغی و جنگل پیش از احداث زمین‌های زراعی (تغییر کاربری) در این منطقه می‌باشد. مقدار کربن آلی در شرق و بخش مرکزی نسبت به سایر مناطق، بیشتر بود. دلیل این امر، ارتفاع کم و پستی منطقه در قسمت شمالی بوده که پیامد آن زهکشی ناقص خاک است. در اینصورت به علت تهویه ناقص خاک و کمبود اکسیژن فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی خاک کاهش یافته در نتیجه تجزیه مواد آلی کند و سبب تجمع آن‌ها می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شش روش درون‌یابی مختلف برای تعیین بهترین تخمینگر متغیرهای رس، شوری، کربنات کلسیم معادل و کربن‌آلی در اراضی کشاورزی منطقه نقده مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت. معیارهای ارزیابی خطا شامل میانگین خطا (MD)، انحراف معیار خطا (SDD) و شاخص توازن خطا– واریانس (BVTO) بودند. بر اساس این معیارها روش کریجینگ معمولی با بیشترین صحت درون‌یابی و کمترین مقدار خطا و انحراف، به عنوان بهترین روش میان‌یابی و روش توابع پایه شعاعی با مدل نواری کم ضخامت به عنوان نامناسب‌ترین روش درون‌یابی برای متغیرهای رس، شوری، کربنات کلسیم معادل و کربن‌آلی در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شدند. از نکات مهم در نمونه‌برداری، انتخاب فاصله مناسب نمونه‌ها از یکدیگر است تا علاوه بر افزایش دقت نقشه‌های حاصله، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که انتخاب فاصله ۱۵۰۰ تا ۳۸۰۰ متر برای ویژگی‌های مورد بررسی خاک‌های این منطقه می‌تواند مناسب باشد. همبستگی مکانی متوسط همه خصوصیات خاک به جز کربنات کلسیم معادل نتیجه عوامل خارجی و مدیریتی مانند آبیاری، کوددهی مکرر و غیره می‌باشد که بر تغییرات مکانی این متغیرها اثر گذار است. بررسی نقشه‌های پراکنش مکانی رس نشان داد که هم‌خوانی نسبتاً مناسبی بین مقدار رس، آهک و کربن‌آلی وجود دارد، به نحوی‌که در نیمه شرقی مقدار رس نسبت به نیمه غربی بیشتر است. متناسب با میزان رس، آهک خاک هم در نیمه شرقی بیشتر از نیمه غربی است. علت این‌که بخش‌هایی از نواحی مرکزی منطقه حاوی کربن‌آلی زیادی است، احتمالاً به سابقه وجود جنگل یا باغ پیش از زراعت (تغییر کاربری) برمی‌گردد.

فهرست منابع

حسنی پاک، ع. ۱۳۸٦ . زمین آمار (ژئواستاتیستیک). انتشارات دانشگاه تهران. چاپ دوم. ۳۱٤ صفحه.

سرمدیان، ف. و تقی زاده مهرجردی، ر. ۱۳۸۸. بررسی کارایی روش‌های زمین آماری به منظور پهنه‌بندی برخی از ویژگی‌های خاک در منطقه اخترآباد. مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، ٦۲ (۳): ۳۳۸-۳۷۷.

کرمی، ع.، همایی، م.، بای‌بوردی، م.، محمودیان شوشتری، م. و دوات گر، ن. ۱۳۹۱. پراکنش مکانی پارامترهای نفوذ آب به خاک در مقیاس ناحیه‌ای. دانش آب و خاک (دانش کشاورزی)، ۲۲ (۱): ۱۷-۳۱.

گلمحمدی، گ.، معروفی، ص. و محمدی، ک. ۱۳۸۷. منطقه‌ای نمودن ضریب رواناب در استان همدان با استفاده از روش‌های زمین آماری و GIS. علوم آب و خاک-علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۲ (٤٦): ٥١٤-٥٠١.

محمدی، ج. ۱۳۸۵. پدومتری، آمار مکانی. جلد دوم. نشر پلک. ٤٥۳ صفحه.

محمودی، ج.، زارعیان، ف.، جوادی، م. و خرسندی، ن. ۱۳۹۱. مقایسه کارایی چند روش زمین آماری برای تخمین برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک. حفاظت منابع آب و خاک، ۱ (٤): ٦٧-٧٧.

معروفی، ص.، ترنجیان، ا. و زارع ابیانه، ح. ۱۳۸۸. ارزیابی روش‌های زمین آمار جهت تخمین هدایت الکتریکی و pH زه‌آب‌های آبراهه‌ای دشت همدان- بهار. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱٦ (۲): ۱۸۷-۱٦۹.

Baker, L., and Ellison, D. 2008. The wisdom of crowds ensembles and modules in environmental modelling. Geoderma, 147: 1–7.

Botula, Y.D., Cornelis, W.M., Baert, G., and Van Ranst, E. 2012. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). Agricultural Water Management, 111: 1–10.

Bucene, L.C., and Zimback, C.R.L. 2003. Comparison of methods of interpolation and spatial analysis of pH data in Botucatu, SP. IRRIGA. 8(1): 21-28.

Cahn, M.D., Hummel, JW., and Brouer, B.H. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. Soil Science Society of America Journal, 58:1240-1248.

Carlson, R.E., and Foley, T.A. 1991. The parameter R^2 in multiquadric interpolation. Computers & Mathematics with Applications, 21(9): 29-42.

Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédois, S., Silvera, N., and Phachomphon, K. 2006. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. Geomorphology, 77(1): 126-141.

Cressie, N. 1990. The origins of kriging. Mathematical Geology, 22(3): 239-252.

De Vos, B., Van Meirvenne, M., Quataert, P., Deckers, J., Muys, B. 2005. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. Soil Science Society American Journal, 69: 500–510.

Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. In: A. Klute (Ed.), methods of soil analysis. Part 1. Second Edition. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. Pp. 404-407.

Ghorbani-Dashtaki, S., Homaee, M. and Khodaverdiloo. H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. Soil Use and Management, 26(1):68-74.

Ghorbani-Dashtaki, S., Homaee, M. and Mahdian, M.H. 2009. Site Dependence performance of infiltration Models. Water Resources Management, 23: 2777-2790.

Gokalp, Z., Basaran, M., Uzun, O., and Serin, Y. 2010. Spatial analysis of some physical soil properties in a saline and alkaline grassland soil of Kayseri, Turkey. Afr. J. Agric. Res 5, 1127-1137.

Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. Geoderma 89(1): 1-45.

Gotway, C.A., Hergert, G.W., Ferguson, R.B., and Peterson, T.A. 1996. Comparison of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. Soil Science Society of America Journal, 60 (4): 1237-1247.

Hengl, T., Heuvelink, G., and Stein, A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. Geoderma, 120 (1): 75-93.

Huang, S., Yang, Y., Wang, Y. 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. In: Amaro, A., Reed, D., Soares, P. (Eds.), Modelling Forest Systems. CABI Publishing, Cambridge, MA, pp. 271–293.

Khodaverdiloo, H., Homaee, M., van Genuchten, M.Th. and Ghorbani Dashtaki, S. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. Journal of Hydrology, 399:356-361.

Kravchenko, A. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. Soil Science Society of America Journal, 67(5): 1564-1571.

Laslett, G., McBratney, A., Pahl, P.J., and Hutchinson, M. 1987. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. Journal of Soil Science, 38 (2): 325-341.

Leenaers, H., Okx, J., and Burrough, P. 1990. Comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution. Catena, 17 (6): 535-550.

Luo, W., Taylor, M., and Parker, S. 2008. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. International Journal of Climatology, 8 (7): 947-959.

Moreels, E., De Neve, S., Hofman, G., Van Meirvenne, M. 2003. Simulating nitrate leaching in bare fallow soils. A model comparison. Nutr. Cycling Agroecosyst, 67: 137–144.

Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum. Part2: Chemical and Microbiological Properties. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeny, D.R. (Editors). Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America: Madison, Wisconsin, pp. 180–197.

Nelson, D.W., Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, A.L.,

Orr, M.J.L. 1999. Recent advances in radial basis function networks. Relatório técnico, Centre for Cognitive Science, University of Edinburgh.

Page, A.L. 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties,

American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.

Pang, S., Li, T.X., Zhang, X.F., Wang, Y.D., and Yu, H.Y. 2011. Spatial variability of cropland lead and its influencing factors: A case study in Shuangliu county, Sichuan province, China. Geoderma, 162:223–230.

Pereira, P., Úbeda, X., and Baltrėnaitė, E. 2010. Mapping total nitrogen in ash after a wildland fire: a microplot analysis. Ekologija, 56 (3): 144-152.

Robinson, T., and Metternicht, G. 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. Computers and Electronics in Agriculture, 50 (2): 97-108.

Rusu, C., and Rusu, V. 2006. Radial Basis Functions Versus Geostatistics in Spatial Interpolations. Artificial Intelligence in Theory and Practice, 119-128.

Shi, J., Wang, H., Xu, J., Wu, J., Liu, X., Zhu, H., and Yu, Ch. 2007. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. Environment Geology, 52:1–10.

Su, W., YiMin, N., XiaoJie, H., and XiGang, Z. 2004. Study on spatial variability of soil nutrients in Beima town of Shandong Province by using Kriging mrthod. Journal of Anhui Agriculture University. 31 (1): 76-81.

Trangmar, B.B., Yost, R.S., and Uehara, G. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy, 38: 45-94.

Weber, D.D., and Englund, E.J. 1994. Evaluation and comparison of spatial interpolators II. Mathematical Geology, 26(5): 589-603.

Whitmore, A.P. 1991. A method for assessing the goodness of computer simulation of soil processes. J. Soil Sci. 42, 289–299.

Wilding, L.P. 1985. Spatial variability: Its documentation, accommodation, and implication to soil survey. Pp. 166-194. In: Nielsen DR, and Bouma J (eds.). Soil Spatial Variability, Wageningen, the Netherlands.

Wu, C., Wu, J., Luo, Y., Zhang, H., and Teng, Y. 2008. Statistical and geoestatistical characterization of heavy metal concentrations in a contaminated area taking into account soil map units. Geoderma, 144(1-2): 171-179.

Yilmaz, H.M. 2007. The effect of interpolation methods in surface definition: an experimental study. Earth Surface Processes and Landforms, 32(9): 1346-1361.

Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A., and Armstrong, M.P. 1999. An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. Mathematical Geology, 31 (4): 375-390.

ISSN 2251-7480

Efficiency of some geostatistical estimators for interpolation and mapping some soil quality properties

Seyedeh Mahbube Mousavifard[1], Hamid Reza Momtaz [2*] and Habib Khodaverdiloo[3]

1) M.Sc. of Soil Science, College of Agriculture, University of Urmia, Iran
2*) Assistant Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, University of Urmia, Iran,
Corresponding author email: h.momtaz@urmia.ac.ir
3) Assistant Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, University of Urmia, Iran

Received: 23-11-2012 Accepted: 11-03-2013

Abstract

For design and implementation of soil conservation programs, accurate and optimized mapping of soil properties is required. The type of interpolation method is one of the most important issue involved in mapping soil properties. Six ordinary methods of spatial interpolation were compared to determine their suitability for estimating some quality properties of topsoil including clay content, electrical conductivity, equivalent calcium carbonate and organic carbon in the Naqade region farmlands located in west Azerbaijan. The area of study region was about 8300 ha. For this purpose, 282 topsoil samples were collected randomly and tested for laboratory analysis. Deterministic methods (radial basis function and global polynomial interpolation) as well as geostatistical estimators (ordinary Kriging) were utilized to map related soil properties. The highest and lowest CV was obtained for EC and clay content variables, respectively. For clay and electrical conductivity, the exponential model, for equivalent calcium carbonate the Gaussian model, and for organic carbon the spherical were the best fitting models to calculate the experimental variogram. According to the results, the ordinary Kriging approach characterized with the minimum error indicator of bias-variance trade-off (BVTO) for evaluating clay, electrical conductivity, equivalent calcium carbonate and organic carbon. The thin plat spline model of radial basis function showed the maximum error in assessment of studied attributes. Eventually, the interpolation maps were generated regard to the most appropriate interpolators.

Keywords: geostatistics; interpolation techniques; Kriging; soil quality properties