تهیه نقشه کربن آلی خاک با استفاده از خصوصیات توپوگرافی و زمین‌آمار در بخشی از منطقه توشن، استان گلستان

صدیقه ملکی[1]، فرهاد خرمالی و علیرضا کریمی

دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ elymaleki@yahoo.com

استاد گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ khormali@yahoo.com

استادیار علوم خاک، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ karimi-a@um.ac.ir

دریافت: 91/12/27 و پذیرش: 92/11/21

چکیده

وجود تغییرات مکانی در خصوصیات خاک امری طبیعی می‌باشد و شناخت این تغییرات به ویژه در اراضی کشاورزی جهت برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت امری اجتناب ناپذیر است. مدیریت صحیح عملیات کشاورزی و حفظ مواد آلی خاک، از جمله عوامل مهم در کشاورزی پایدار می‌باشند. این تحقیق برای تخمین مکانی کربن آلی خاک با استفاده از شاخص‌های توپوگرافی و روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) در بخشی از اراضی شیب‌دار و لسی منطقه توشن، استان گلستان صورت گرفته است. به‌منظور انجام این مطالعه 135 نمونه به روش سیستماتیک تصادفی از عمق 20-0 سانتی‌متری برداشت شد. نتایج نشان داد که کوکریجینگ معمولی با شاخص خیسی (TWI) به‌عنوان متغیر کمکی با کمترین مقدار خطا نسبت به دو روش کریجینگ و روش وزن‌دهی معکوس فاصله، برآورد دقیق‌تری از کربن آلی خاک ارایه داد که دلیل آن همبستگی مکانی بالای کربن آلی خاک با متغیر TWI می‌باشد. نقشه درون‌یابی شده کربن آلی کل موقعیت شیب نشان داد که با افزایش ارتفاع و درجه شیب مقدار کربن آلی خاک کمتر شده است. نسبت همبستگی مکانی کربن آلی برای موقعیت‌های مختلف شیب متفاوت بود که این الگوها کاملا به ساختار توپوگرافی وابسته بودند

واژه‌های کلیدی: شاخص خیسی، کریجینگ، کربن آلی خاک، وزن‌دهی معکوس فاصله

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: گرگان، پردیس دانشگاه علوم کشاورزی و منابع‌طبیعی گرگان، دانشکده مهندسی آب و خاک، گروه مهندسی علوم خاک

مقدمه

وجود تغییرات مکانی در خصوصیات خاک امری طبیعی می‌باشد، ولی شناخت این تغییرات به ویژه در اراضی کشاورزی جهت برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت امری اجتناب ناپذیر است. آگاهی از این امر برای بهبود در سودآوری و نیل به بهره‌وری پایدار ضروری می‌باشد. خصوصیات خاک دارای تغییرات مکانی و زمانی در مقیاس‌های کوچک تا مقیاس‌های بزرگ می‌باشند که عوامل طبیعی (عوامل خاک‌سازی) و عوامل انسانی نظیر؛ عملیات مدیریتی خاک، کوددهی و تناوب زراعی کنترل کننده این تغییرات هستند (کوئین و زانگ، 2002؛ و گادوین و میلر، 2003). به اعتقاد بوسان و کیجیو (2003) درک بهتر تأثیر عواملی مانند مدیریت و دستیابی به عملیات زراعی مناسب، مشخص کردن و کمی کردن غیریکنواختی و تغییرپذیری خصوصیات خاک لازم است.

مقدار ماده آلی نقش کلیدی در تعیین رفتار فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌ها داشته و آگاهی از وضعیت و توزیع آن برای استفاده بهینه و پایدار از خاک ضروری است (ولایوتام، 2000). لذا تهیه نقشه‌ی پراکنش این جزء مهم خاک می‌تواند بصیرت بهتری برای انجام مدیریت در منطقه به کاربران بدهد. گرونوالد (2009) گزارش کرده است که حدود 31/1% از مطالعات نقشه‌برداری خاک برای تهیه نقشه کربن آلی خاک، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفیت خاک، صورت گرفته است. با توجه به اهمیت کربن آلی خاک، ارائه تکنیک‌های سریع، غیرمستقیم، قابل اطمینان و دقیق برای اندازه‌گیری تغییرات میزان کربن خاک در پاسخ به تغییرات مدیریت روی زمین‌های مختلف مورد نیاز می‌باشند (هونگ و همکاران، 2007).

ویژگی‌های خاک در نقاط مجاور هم، شباهت بیشتری دارند و با افزایش فاصله، این شباهت کم می‌شود که نشان‌دهنده وجود ارتباط مکانی می‌باشد. این واقعیت زیربنای روش‌های زمین‌آماری تعیین نقشه پراکنش ویژگی‌های خاک است. مزیت استفاده از زمین‌آمار این است که، زمین‌آمار برخلاف آمار کلاسیک علاوه بر مقدار عنصر مورد بررسی موقعیت مکانی آن را نیز مورد تحلیل قرار داده و امکان محاسبه‌ی خطای تخمین را فراهم می‌آورد (محمدی، 1377). نخستین تجربه‌های به کارگیری زمین آمار در علوم خاک، تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی pH و میزان شن خاک توسط کمپبل (1978) و مک‌برتنی و وبستر (1983) بوده است. مطالعات زیادی نشان از قابلیت زمین‌آمار در ترکیب با تکنیک‌های سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور برای تخمین کربن آلی خاک و استفاده از نتایج به‌دست آمده برای مدیریت اراضی دارد (چونفا و همکاران، 2009؛ فلورنسکی، 2005؛ و هونگ و همکاران، 2007).

استفاده از متغیرهای توپوگرافی به عنوان متغیرهای کمکی برای برآورد خصوصیات خاک توسط محققین مختلف مورد توجه قرار گرفته است. متغیرهای کمکی استخراج شده از نقشه‌های رقومی پستی و بلندی، معمولاً جهت بهبود تخمین مکانی خصوصیات خاکی استفاده شده است (ویلسون و گالانت،2000). هربست و همکاران (2006) در تخمین خصوصیات هیدرولیکی خاک با استفاده از ویژگی‌های توپوگرافی دریافتند که استفاده از متغیرهای توپوگرافی بعنوان متغیر کمکی در روش‌های زمین‌آماری می‌تواند تا 15 درصد دقت کار را نسبت به زمانی‌که از متغیر کمکی استفاده نمی‌شود، افزایش دهد.

اسچوانگارت و جارمر (2011) نیز از روش‌های زمین آمار و مدل رقومی پستی و بلندی، برای تعیین ارتباط الگوی مکانی کربن آلی خاک با توپوگرافی استفاده کردند. این محققان مشاهده کردند که تغییرات مکانی در مقیاس کوچک، در اراضی با شیب‌های تند و بستر دره‌ها زیاد بوده، در حالی که پراکندگی کربن آلی خاک در مناطق پایه‌ای نسبتاً همگن بود. همچنین، یک روند مثبت تجمع کربن آلی خاک با افزایش شاخص خیسی در اراضی با درجه شیب شدید مشاهده شد که به تجمع آب و ذرات ریز خاک در این مناطق نسبت داده می‌شود. چن و همکاران (2008) ارتباط بین کربن آلی خاک و ویژگی‌های توپوگرافی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که شاخص خیسی می‌تواند به عنوان یک پیش‌بینی کننده در تهیه نقشه کربن‌آلی خاک استفاده شود. پی‌آی و همکاران (2010) نیز جهت تهیه نقشه کربن آلی خاک در منطقه هشان چین از روش‌های مختلف زمین‌آمار با استفاده از خصوصیات توپوگرافی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نقشه تهیه شده به روش کوکریجینگ با استفاده از متغیر کمکی TWI دقت بیشتری خواهد داشت. آن‌ها دلیل این امر را همبستگی بالای TWI با کربن آلی خاک دانسته و معتقدند از آن‌جایی که TWI توانایی قوی برای توصیف رطوبت در منطقه دارد، توانسته پراکنش کربن آلی را بخوبی نشان دهد.

اراضی شیب‌دار لسی استان گلستان به‌دلیل، عمیق بودن خاک، شکل منحصر بفرد زمین‌نما، تغییر کاربری وسیع از جنگلی تا زراعی و فرسایش شدید دارای اهمیت خاصی هستند. اکوسیستم بسیار شکننده این اراضی، که شدیداً به تغییرات کاربری اراضی حساس هستند، نقش

اساسی در ذخیره کربن آلی منطقه ایفا می‌نماید. به منظور حفظ و مدیریت ذخایر کربن آلی، توسعه کشاورزی پایدار، حفاظت و بازیابی اکوسیستم‌های موجود در این اراضی، بررسی تغییرات مکانی کربن آلی خاک ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این تحقیق مقایسه سه تخمین‌گر کریجینگ، وزن‌دهی معکوس فاصله[1] و کوکریجینگ با استفاده از خصوصیات توپوگرافی به‌عنوان متغیر کمکی، جهت پهنه‌بندی کربن آلی در منطقه توشن استان گلستان بود.

مواد و روش‌ها

حوضه توشن یکی از زیر حوضه‌های بزرگ قره‌سو در استان گلستان است که در طول جغرافیایی ´16 °54 تا ´26 °54 و عرض جغرافیایی ´43 °36 تا ´51 °36 و در حدواسط حوضه زیارت و حوضه آبخیز انجیرآب در غرب شهرستان گرگان واقع شده است، این حوضه از نظر جغرافیایی در محدوده البرز مرکزی و در زون گرگان– رشت می‌باشد (شکل 1). میانگین دمای سالانه 16 درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای حداقل و حداکثر سالانه به‌ترتیب 8 و 23/3 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه کل حوضه برابر با 652 میلی‌متر و ارتفاع متوسط حوضه 397 متر می‌باشد. بیشترین ارتفاع 1500 متر و کمترین آن 40 متر می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی، حدود 54/1 درصد حوضه از رسوبات لسی، 32/8% از سنگ‌های شیست، 6/8% از ماسه سنگ و 6/3% از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های مطالعه شده در منطقه توشن به ترتیب زریک (Xeric) و ترمیک (Thermic) می‌باشد.

بخشی از اراضی شیب‌دار لسی حوزه به مساحت تقریبی 12 هکتار انتخاب شد و 135 نمونه به روش سیستماتیک تصادفی از عمق 20-0 سانتی‌متری برداشت شدند (شکل 1). کلیه نمونه‌ها هوا خشک گردیده و پس از کوبیده شدن از الک 0/5 میلی‌متر عبور داده شدند. کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون توسط دی‌کرومات پتاسیم (والکلی و بلاک، 1934) اندازه‌گیری شد.

محاسبه شاخص‌های پستی و بلندی

مدل رقومی ارتفاع منطقه با میان‌یابی خطوط میزان نقشه توپوگرافی رقومی با مقیاس 1:25000 در محیط GIS و در پیکسل‌هایی به ابعاد 10×10 متر تهیه شد. خصوصیات توپوگرافی با استفاده از نرم‌افزارهای 2.05 TAS[2] و ArcGIS9.3 از مدل رقومی ارتفاع تعیین گردیدند (جدول 1).

توصیف آماری داده‌ها

به منظور بررسی چگونگی توزیع داده‌ها و دستیابی به خلاصه‌ای از اطلاعات آماری هر خصوصیت، توزیع فراوانی با کمک ویژگی‌های آن شامل میانگین، میانه، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی توسط نرم‌افزارSPSS مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی آزمون نرمال بودن توزیع متغیرها از آزمون کولموگروف -اسمیرونوف استفاده شد. به منظور بررسی روابط بین کربن آلی خاک با ویژگی‌های توپوگرافی از ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید.

آنالیزهای زمین آماری

آنالیز همبستگی مکانی و ابزار تحقیق در شرایط صدق فرضیات پایایی، تغییرنما[3] است. سمی واریانس در یک فاصله تفکیک مشخص به وسیله تابع زیر تخمین زده می‌شود (برگس و وبستر، 1980).

(1)

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

که در این معادله، عبارت $\gamma(h)$را تغییرنما می‌گویند. تغییرنما یک تابع برداری است که در آن فاصله و جهت نقش دارند. بنابراین تغییرنما ابزاری است که تغییرات فاصله‌ای یک متغیر خاص را نشان می‌دهد. تداوم و پیوستگی متغیر مورد مطالعه در آهنگ افزایش $\gamma(x)$ نسبت به مقادیر مختلف h منعکس می‌شود. بنابراین دامنه همبستگی مکانی متغیر با کمک تغییرنما مشخص می‌شود. هر چقدر متغیر مورد مطالعه دارای تغییرپذیری بیشتری باشد دامنه همبستگی مکانی آن کاهش خواهد یافت (کوئین و زانگ، 2002). هر تغییرنما با پارامترهای آن یعنی اثر قطعه‌ای[4]، دامنه تاثیر[5] و سقف[6] تغییرنما مشخص می‌شود. جهت محاسبه و ترسیم تغییرنما از Variowin 2.2 مورد استفاده قرار گرفت و برای تشخیص ناهمسانگردی در این تحقیق از تغییرنمای سطحی[7] استفاده شد.

روش‌های مختلف میان‌یابی

در این پژوهش از روش‌های زمین‌آماری کریجینگ، کوکریجینگ و IDW جهت پهنه‌بندی کربن آلی استفاده

1. IDW

2. Terrain Analysis System
3. Variogram
4. Nugget effect
5. Range
6. Sill
7. Variogram Surface

گردید. ویژگی‌های توپوگرافی محاسبه شده در جدول 1 به‌عنوان متغیر کمکی در کوکریجینگ استفاده شد.

معیار ارزیابی

به منظور مقایسه روش‌های مورد استفاده در این پژوهش و انتخاب مناسب‌ترین روش زمین‌آمار، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای همه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به طوری که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. در این مطالعه از پارامترهای میانگین خطا و مجذور میانگین مربعات خطا استفاده شد. معیار ME هر چقدر به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر روش می‌باشد؛ برای انتخاب یک روش درون‌یابی از بین روش‌های مختلف لازم است روشی انتخاب گردد که خطای کمتری داشته باشد.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n} [Z^*(Xi) - Z(Xi)]}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Z^*(Xi) - Z(Xi))2}{n}} \quad (3)$$

که در این دو معادله Z*(xi) مقدار برآوردی در نقطه iام و Z (xi) مقدار مشاهده‌ای برای نقطه‌ی iام می‌باشد. پس از تعیین بهترین مدل، از نرم افزار ArcGIS 9.3 جهت ترسیم نقشه استفاده گردید.

نتایج و بحث

براساس ارتباط بین کربن آلی خاک با ویژگی‌های توپوگرافی (جدول 2) پارامتر با ضریب همبستگی بالاتر به عنوان متغیر کمکی برای روش کوکریجینگ در نظر گرفته شد. با توجه به جدول2، TWI بیشترین ضریب همبستگی را با کربن آلی نشان می‌دهد، از این رو از TWI به عنوان متغیر کمکی برای روش درون‌یابی کوکریجینگ استفاده شد. TWI در مطالعات زیادی به منظور تخمین مکانی ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولوژیکی و شیمیایی خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (وسترن، 2004؛ و ولن و گندولفی، 2002). همبستگی مثبت بالای بین TWI با درصد ماده آلی نشان دهنده افزایش در ظرفیت نگهداشت آب در مناطق با TWI زیاد، در نتیجه پوشش گیاهی بیشتر و به دنبال آن ماده آلی بیشتر در خاک است. پی‌آی و همکاران (2010) نیز نشان دادند که در بین خصوصیات توپوگرافی مختلف که از مدل رقومی پستی و بلندی استخراج شده بودند، شاخص خیسی همبستگی بالاتری با کربن آلی خاک دارد و از این رو برای روش کوکریجینگ به عنوان متغیر کمکی در نظر گرفته شد. اما هنگل و همکاران (2003) بین کربن آلی با شاخص‌هایی از قبیل ارتفاع، درجه حرارت سطحی (STI) و TWI رابطه همبستگی خطی برقرار نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که کربن آلی بیشترین همیستگی را با ارتفاع دارد، آن‌ها از این پارامتر بعنوان متغیر کمکی استفاده نمودند.

Elevation=(Elv) .Plan curvature (PlanC)= .انحنای افقی Profile curvature= (ProfC). Tangential curvature= (tangC). Slope= (Slp). SPI= قدرت جریان .شاخص =TWI . شاخص انتقال رسوب =LS. شاخص کربن آلی =OCخیسی

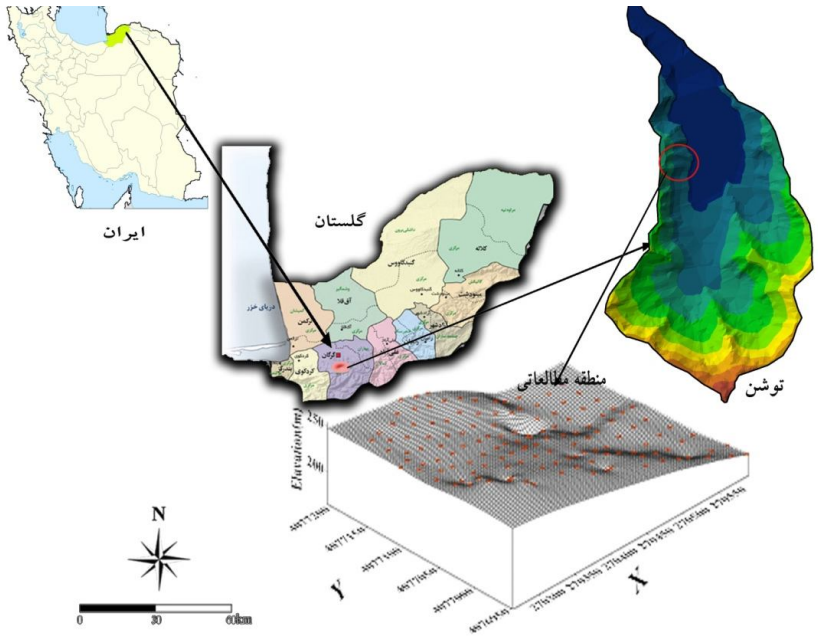
وضعیت توزیع داده‌ها برای کارهای آماری و از جمله زمین‌آمار از اهمیت قابل توجه‌ای برخوردار می‌باشد. در صورت نرمال بودن یا نزدیک به نرمال بودن توزیع داده‌ها، روش‌های تخمین مورد استفاده در زمین آمار از دقت بالایی برخوردار خواهند بود. توصیف آماری کربن آلی خاک و TWI در جدول 3 خلاصه شده است. آزمون نرمالیته داده‌ها به وسیله آزمون کولموگروف - اسمیرنوف نشان داد که هر دو متغیر از توزیع نرمال برخوردار هستند. به‌علاوه مقادیر چولگی ارائه شده در جدول 3 نیز نتایج آزمون نرمالیته را تأیید می‌نماید.

در شکل2 تغییرنمای سطحی کربن آلی خاک و TWI آورده شده است. نظر به تقارن تغییرنمای سطحی، متغیرها همسانگرد هستند؛ این نتیجه موید آن است که تغییرپذیری این متغیرها در جهات مختلف یکسان است و می‌توان از تغییرنمای همه جهته[1] برای محاسبات بعدی استفاده نمود.

پارامترهای تغییرنمای کربن آلی خاک و مدل‌های برازش شده به آن‌ها در جدول 4 خلاصه شده است. شکل 3 (الف) تغییرنمای همه جهته کربن آلی را در منطقه نشان می‌دهد. مدل برازش شده برای این پارامتر مدل نمایی می‌باشد. با توجه به جدول 4 کربن آلی در کل منطقه مورد مطالعه دارای نسبت همبستگی متوسط و دامنه تأثیر 101/2 متر می‌باشد. مدل برازش شده برای TWI مدل کروی می‌باشد (شکل 3 (ب)). TWI با توجه به جدول 4 دارای نسبت همبستگی قوی و دامنه تأثیر 132 متر می‌باشد.

بررسی تغییرنما تجربی نشان داد که کربن آلی خاک و TWI در منطقه دارای همبستگی مکانی می‌باشند. وجود ساختار مکانی برای بیشتر متغیرهای خاکی در مقیاس مزرعه و تپه ماهوری در مطالعات بسیاری نشان داده شده است (یو و همکاران، 2006؛ اسچوانگارت و جارمر، 2011؛ و وانگ و همکاران، 2009).

1. Omni directional



شکل 1- موقعیت حوضه توشن در ایران و استان گلستان

جدول 1- تعریف برخی متغیرهای توپوگرافی (مور،1993؛ اندرنی و وود، 2003؛ و فلورنسکی، 2005)

خصوصیت توپوگرافی	واحد	تعریف	فرمول محاسباتی
ارتفاع (Elevation)	M	ارتفاع نسبت به سطح دریا	-
شیب (Slope)	%	زاویه بین سطح تماس و سطح افقی در یک نقطه در سطح زمین	$Slp = \sqrt{(\frac{\partial Z}{\partial X})2 + (\frac{\partial Z}{\partial Y})2}$
جهت شیب (Aspect)	RAD	بیشترین سرعت تغییر در ارتفاع در هر سلول از DEM	$ASP = \arctan((\partial Z/\partial y)/(\partial Z/\partial X))$
انحنای قائم (Profile Curvature)	1/m	انحنا در صفحه عمودی خط جریان است، بیان‌گر اندازه افزایش و کاهش سرعت جریان است، بنابراین در جریان آب و انتقال رسوب موثر می‌باشد.	$PROFC = -\left(\frac{G^2D + 2.G.H.F + H^2.E}{(G^2 + H^2)(1 + G^2 + H^2)^{1.5}}\right)$
انحنای افقی (Plan Curvature)	1/m	انحنا در صفحه افقی یک خط کنتور. نشان‌دهنده‌ی انحراف جریان مواد و بیان‌گر اندازه همگرایی و واگرایی جریان می‌باشد.	$PLANC = -\left(\frac{H^2..D - 2.G.H.F + G^2.E}{(G^2 + H^2)^{1.5}}\right)$
انحنای مماسی Tangential) (Curvature	1/m	خمیدگی در سطح شیب‌دار عمود بر جریان و رویه توپوگرافی، بیان‌گر اندازه همگرایی و واگرایی جریان می‌باشد.	$TangC = \left(\frac{H^2..D - 2.G.H.F + G^2.E}{(G^2 + H^2)^{0.5}}\right)$
شاخص خیسی (TWI)	-	پارامتری که توزیع مکانی منطقه اشباع و مقدار آب خاک در زمین‌نما را بیان می‌کند. به طور کلی این شاخص گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه (بر حسب A_s) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین دست (بر حسب tanβ به عنوان شیب هیدرولیکی تقریبی) توصیف می‌کند.	$TWI = Ln(As/\tan\beta)$
شاخص قدرت جریان (SPI)	-	نشان‌دهنده مقدار قدرت فرسایندگی جریان‌های سطحی و حاصلضرب مساحت ویژه آبخیز و شیب است.	$SPI = A_s \tan\beta$
شاخص حمل رسوب (STI)	-	نمایانگر فرآیندهای فرسایش و رسوب در زمین‌نما بوده و اثر توپوگرافی را بر فرسایش نشان می‌دهد.	$STI=(A_s/22.13)^m(Sin\beta/0.0896)^n$

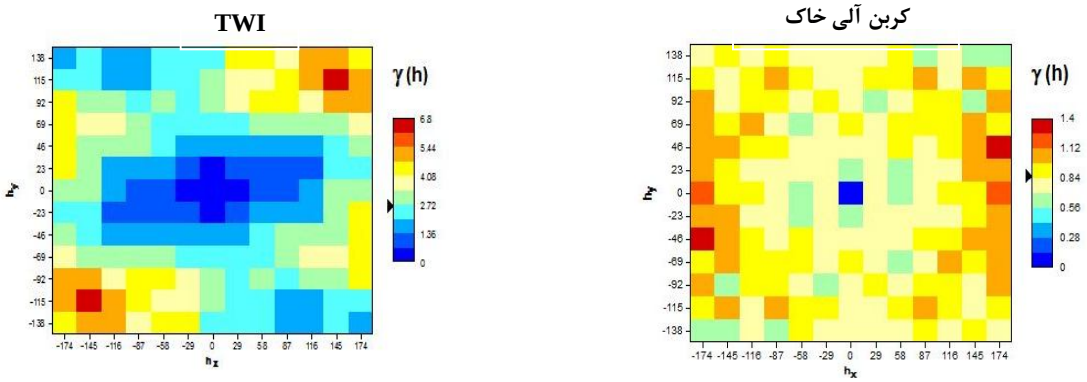
جدول 2- ضرایب همبستگی بین کربن آلی خاک با ویژگی‌های توپوگرافی

	Elv	PlanC	ProfC	TangC	SPI	LS	Slp	TWI
OC	-.263**	.253**	.110	.192*	.041	-.042	-.310**	.44**

* همبستگی معنی‌دار در سطح 5 درصد، **همبستگی معنی‌دار در سطح 1 درصد

جدول 3- توصیف آماری ویژگی‌های خاک

پارامتر	واحد	حداقل	حداکثر	میانه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغیرات	چولگی	کشیدگی
OC	(%)	0/117	3/9	1/32	1/574	0/93	0/59	0/584	-0/565
TWI	-	4/6	11/7	6/13	6/59	1/64	0/24	0/41	1/607

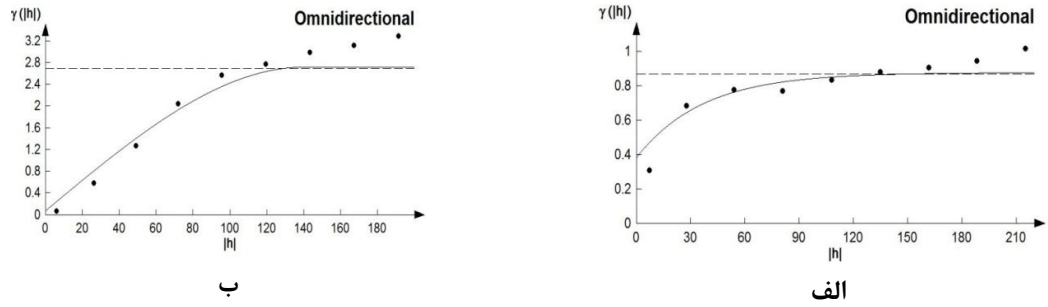


شکل 2- تغییرنمای سطحی کربن آلی خاک و TWI

جدول 4- پارامترهای تغییرنما و معیارهای انتخاب مدل برای کربن آلی خاک و TWI

پارامتر	مدل	اثر قطعه‌ای	سقف	حداکثر دامنه تأثیر (m)	نسبت همبستگی (%)	کلاس همبستگی*
OC	نمایی	0/387	0/495	101/2	43/8	M
TWI	کروی	0/081	2/64	132	2/9	S

* کلاس همبستگی: S (قوی)، M (متوسط) و W (ضعیف)



شکل 3- نیم تغییرنمای همه جهته کربن آلی (الف) و نیم تغییرنمای همه جهته TWI (ب)

مقادیر ME و RMSE مقدار اریبی را نشان می‌دهند که در حالت ایده‌آل بایستی صفر باشند. مقادیر مثبت یا منفی قابل توجه آن‌ها به ترتیب نشان دهنده‌ی برآورد بیشتر یا کمتر از مقدار واقعی هستند. باتوجه به جدول 5 مقادیر مثبت ME در روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ به همراه روش IDW نشان دهنده این است که این روش‌های تخمین مقادیری بیشتر از مقدار واقعی را پیش‌بینی کرده‌اند. مقایسه بین سه روش مورد نظر نشان می‌دهد که روش کوکریجینگ نسبت به دو روش دیگر دارای خطای کمتر، و روش IDW دارای خطای بیشتری می‌باشد. روش‌های تخمینی کریجینگ قوی‌تر از IDW می‌باشند، شاید میزان خطای بیشتر در روش IDW به این علت است که وزن‌دهی در این روش به صورت بسیار ساده انجام می‌گیرد و دارای یک اثر محلی است و با افزایش فاصله کاهش می‌یابد، ولی در روش کریجینگ وزن‌ها از روش خبره‌تری بدست می‌آیند (ایساک و اسریواستاوا، 1989). لو و وانگ (2008) گزارش کردند وقتی که وابستگی مکانی پارامتر مورد بررسی ضعیف بوده، و یا از نظر تعداد داده محدودیت وجود دارد، IDW می‌تواند یک جایگزین مناسب برای روش‌های مختلف تخمین کریجینگ باشد. با توجه به جدول 5، روش کریجینگ و کوکریجینگ گسسته مقدار ME نزدیک به روش IDW دارند. شاید دلیل این امر این باشد که روش گسسته، تخمین‌گر غیر خطی است و در شرایطی که توزیع داده‌ها پیچیده باشد و برازش آن‌ها توسط توزیع‌های آماری دشوار باشد، می‌تواند به کار گرفته شود و نتایج بهتری نشان دهد (چیت سازان و همکاران، 1387؛ و مدنی، 1373).

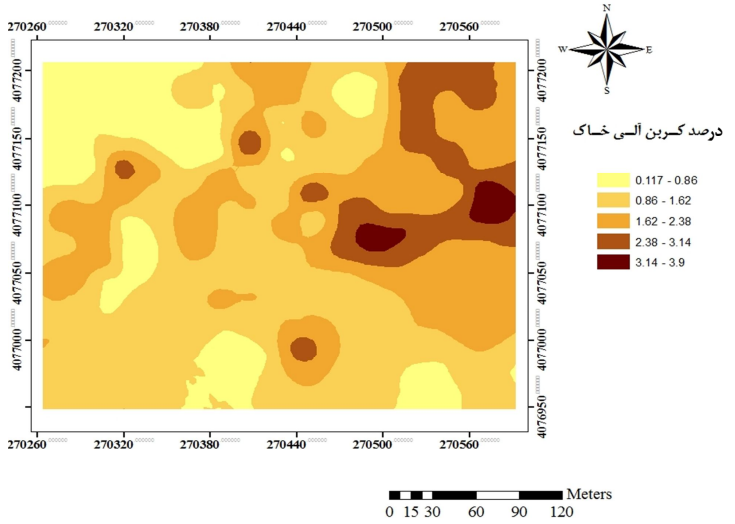
در بین روش‌های مختلف کریجینگ، روش کریجینگ معمولی نیز خطای کمتری دارد. زیرا در این روش، مقادیر نقطه مجهول از مقادیر نقاط معلوم اطراف و از یک مدل تغییرنما بدست می‌آید. در صورتی‌که در روش کریجینگ ساده، میانگین داده‌ها معلوم و مستقل از مختصات در نظر گرفته می‌شوند از این جهت دقت کمتری نسبت به کریجینگ معمولی دارد (ایساک و اسریواستاوا، 1989). همچنین مقایسه روش‌های مختلف کوکریجینگ نشان می‌دهد که روش تخمین کوکریجینگ معمولی برای پهنه‌بندی کربن آلی کل منطقه دارای دقت بیشتری است. اگرچه بین روش کریجینگ معمولی با کوکریجینگ تفاوت بسیار زیادی نیست، که شاید به خاطر نمونه‌برداری متراکم و فواصل کم نمونه‌برداری باشد. اما لازم به ذکر است که یکی از مشکلات اساسی در برآورد تغییرنما و میان‌یابی به روش کریجینگ تعداد زیاد نمونه‌های خاک می‌باشد، از طرفی هزینه‌های زیاد جمع‌آوری نمونه‌های خاک، غیرقابل دسترس بودن برخی نقاط منطقه مورد بررسی و هزینه‌های سنگین تجزیه نمونه‌های خاک و همچنین بررسی ویژگی‌های خاک از جنبه‌های مختلف (پایش و پهنه‌بندی) به طور مستقیم وقت‌گیر، پرهزینه و دشوار است. بنابراین تخمین خصوصیات مهم خاک در راستای انجام مدیریت دقیق، مخصوصاً در مورد پارامترهای پرهزینه ما را ناگزیر به استفاده از متغیرهای کمکی می‌نماید و استفاده از روش کوکریجینگ در این مواقع به خاطر داشتن متغیر کمکی قدرت بیشتری در جهت تخمین نسبت به سایر روش‌ها دارد.

نتایج این تحقیق با نتایج پی‌آی و همکاران (2010) که از روش‌های مختلف زمین‌آماری برای درون‌یابی کربن آلی استفاده کردند، همسو می‌باشد. نتایج آن‌ها نشان داد بین روش‌های مختلف درون‌یابی، روش کوکریجینگ با متغیر کمکی TWI بهترین دقت را داشته است. این نتیجه به آن علت است که متغیر ثانویه (TWI) با متغیر اصلی (کربن آلی خاک) دارای همبستگی مکانی بالایی بوده که این امر منجر به کاهش واریانس تخمین شده است. همچنین سولیوان و همکاران (2005) روش‌های زمین‌آماری کریجینگ و کوکریجینگ را برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک از جمله کربن کل خاک با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره IKONOS و ویژگی‌های توپوگرافی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که روش کوکریجینگ با داشتن متغیر کمکی، دقت بیشتری نسبت به روش کریجینگ دارد. گو و همکاران (2009) نیز در مطالعه خود به منظور پیش‌بینی مقدار ماده آلی با استفاده از ویژگی‌های توپوگرافی در حوضه آبریز سین چوان چین بین مقدار ماده آلی خاک با شیب زمین‌نما (r = -0/57) و شاخص خیسی (r = 0/30) همبستگی معنی‌دار گزارش کردند. این همبستگی‌ها نشان از مقدار ماده آلی بیشتر در مکان‌های با شیب ملایم و ذخیره رطوبتی بالاتر دارد.

شکل 5 نقشه درون‌یابی شده درصد کربن آلی خاک در منطقه مطالعاتی، توسط روش کوکریجینگ معمولی را نشان می‌دهد، در این شکل بیشترین میزان کربن آلی در موقعیت‌های پایین شیب می‌باشد. بالا بودن میزان کربن آلی در قسمت‌های پایین شیب بدلیل ورود کربن آلی با مواد فرسایش یافته است، در حالی‌که مقادیر کمتر کربن آلی در موقعیت‌های بالاتر با شیب زیاد می‌باشد.

جدول 5- نتایج روش‌های گوناگون تخمین کربن آلی در منطقه

پارامتر	تخمین‌گر	روش تخمین	متغیر کمکی	ME	RMSE
کربن آلی	کریجینگ	معمولی	-	0/0064	0/8251
		ساده	-	0/0132	0/8298
		جهانی	-	0/0064	0/8251
		گسسته	-	0/051	0/8284
	کوکریجینگ	معمولی	TWI	.0/0059	0/8712
		ساده		0./0068	0/89
		جهانی		.0/0059	0/8712
		گسسته		0./063	0/842
	IDW	توان 1	-	0/024	0/8194
		توان 2	-	0/044	0/80
		توان 3	-	0/052	0/82



شکل 5- نقشه میان‌یابی شده درصد کربن آلی خاک توسط روش کوکریجینگ معمولی با استفاده از متغیر کمکی TWI

نتیجه‌گیری کلی

ذخایر کربن آلی در موقعیت‌های مختلف شیب‌دار منطقه مورد مطالعه، ناهمگنی مکانی گسترده‌ای را نشان دادند که به وجود فرآیندهای ژئومورفیک در این اراضی نسبت داده می‌شود. با افزایش ارتفاع و درجه شیب میزان کربن آلی خاک کاهش، و از قسمت‌های بالای شیب به سطوح پایین شیب افزایش می‌یابد.

همانطور که نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از متغیر کمکی نظیر TWI برای تخمین کربن آلی کل خاک به واسطه همبستگی بالای این دو، منجربه تخمین‌های بهتری نسبت به دو روش دیگر شده است. در تخمین کربن آلی خاک در کل تپه ماهوری کوکریجینگ معمولی با متغیر کمکی TWI با داشتن مقادیر ME برابر با 0/0059 نسبت به دو روش کریجینگ و روش وزن‌دهی معکوس فاصله نتایج بهتری ارایه می‌دهد. بطور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان از شاخص‌های توپوگرافی به عنوان متغیرهای کمکی در تخمین خصوصیات خاکی استفاده نمود. که این متغیرها نمونه‌ای از روش‌های غیرمستقیم، کم هزینه و قابل اعتماد برای پیش‌بینی کربن آلی خاک و یا دیگر خصوصیات خاکی پرهزینه محسوب می‌شوند.

فهرست منابع:

1. چیت سازان، م.، ک. رنگزن.، م.ص. درانی‌نژاد؛ و ، ا. تقی‌زاده. 1387. پهنه‌بندی هیدروشیمیایی عناصر کمیاب آرسنیک، آهن و منگنز در آبخوان آبرفتی میداوود، خوزستان با استاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). همایش ژئوماتیک 87، سازمان نقشه‌برداری، تهران.
2. مدنی، ح. 1373. مبانی زمین آمار. انتشارات دانشگاه امیر کبیر. 659 ص.
3. محمدی، ج. 1377. مطالعات تغییرات مکانی شوری خاک در منطقه رامهرمز (خوزستان) با استفاده از نظریه ژئواستاتیک-کریجینگ. مجلله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. 2: 49-64.
4. Bosun, S.Z; and Z. Qiguo. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical, china. Geoderma. 115:85-99.
5. Burgess, T.M; and R. Webster. 1980. Optimal interpolation and isarthmic mapping of soil properties: I the semi-variogram and punctual kriging. Journal of Soil Science. 31: 315- 331.
6. Campbell, J.B. 1978. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineation of two soil mapping units. Journal of Soil Science. 32: 1028-1032.
7. Chen, F., L.T. West; D.E. Kissel; R.Clark; and W. Adkins. 2008. Field-scale mapping of soil organic carbon with soil-landscape modeling. P. 294- 301. Proceedings of the 8th international symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences, Shanghai, P. R. China.
8. Chunfa, W., W. Jiaping; L. Yongming; Z. Limin; and D. Stephen. 2009. Spatial prediction of soil organic matter content using cokriging with remotely sensed data. Soil Science Society of America Journal. 73:1202-1208.
9. Endreny, T.A., and E.F. Wood. 2003. Maximizing spatial congruence of observed and DEM-delineated overland flow networks. International Journal of Geographical Information Science. 17: 699-713.
10. Florinsky, I.V. 2005. Artificial lineaments in digital terrain modeling: can operators of topographic variables cause them? Mathematical Geology. 37: 357-372.
11. Godwin, R.J., and P.C.H. Miller. 2003. A review of the technologies for mapping within-field variability. Biosyststems Engineering. 84:393-407.
12. Grunwald, S. 2009. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. Geoderma. 152: 195-207.
13. Guo, P.T., H.B. Liu; and W. Wu. 2009. Spatial prediction of soil organic matter using terrain attributes in a hilly area. International Conference on Environmental Science and Information Application Technology,Wuhan, CHINA. 3:759-762.
14. Hengel, T., D.G. Rossiter; and A. Stein. 2003. Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps. Australian Journal of Soil Research. 41: 1403-1422.
15. Herbst, M., B. Diekkruger; and H. Vereecken. 2006. Geostatistical co-regionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes. Geoderma. 132: 206-221.
16. Huang, X; S. Senthilkumar; A. Kravchenko. K. Thelen; and J. Qi. 2007. Total carbon mapping in glacial till soils using near-infrared spectroscopy, landsat imagery and topographical information. Geoderma.141: 34-42.
17. Issaks, E.H., and R.M. Srivastava. 1989. Applied Geostatistics. Newyork, Oxford University Press.
18. Lu, G.Y. and D.W. Wong. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. Computers and Geosciences. 34: 1044-1055.

19. McBratney, A.B. and R. Webster. 1983. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: Vco-regionalization and multiple sampling strategy. Journal of soil Science. 34: 137-162.
20. Moore, I.D., P.E. Gessler; and G.A. Nielson. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. Soil Science Society of America Journal. 57:443-452.
21. Pei, T., C. Qin; A. Zhu; L. Yang; M. Luo; B. Li; and C. Zhou. 2010. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. Ecological Indicators. 10: 610-619.
22. Schwanghart, W., and T. Jarmer. 2011. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography - A case study from south-eastern Spain. Geomorphology. 126: 252- 263.
23. Sullivan, D.G., J.N. Shaw; and D. Rickman. 2005. IKONOS imagery to estimate surface soil property variability in two Alabama physiographies. Soil and Water Management and Conservation. 69: 1789-1798.
24. Wang, Y., X.C. Zhang; J.L. Zhang; and S.J. Li. 2009. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the loess plateau. Pedosphere. 19: 486-495.
25. Walkley, A. and I.A. Black. 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.
26. Western, A.W. 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. Journal of Hydrology. 286: 113-134.
27. Whelan, M.J. and C. Gandolfi. 2002. Modeling of spatial controls on denitrification at the landscape scale. Hydrological Processes. 16: 1437-1450.
28. Wilson, J.P. and J. C. Gallant. 2000. Terrain Analysis. Wiley and Sons, New York.
29. Quine, T.A. and Y. Zhang. 2002. An investigation of spatial variation in soil erosion, soil properties and crop production within an agricultural field in Devon, U.K. Journal of soil and water conservation. 57: 50-60.
30. Velayutham, M. 2000. Organic carbon stock in soil of India. Global Climate Change and Tropical. Ecosystem. 28:71- 95.
31. Yang, P., R.. Mao; H. Shao; and Y. Gao. 2009. An investigation on the Distribution of eight hazardous heavy metals in the suburban farmland of China. Journal of Hazardous Materials. 167: 1246-1251.
32. Yoo, K., R.. Amundson; A. Heimsath; and M. Dietrich. 2006. Spatial patterns: of soil organic carbon on hillslopes integrating geomorphic processes and the biological C cycle. Geoderma. 130: 47-65.