

تخمین و پهنه بندی میزان کربن آلی خاک با استفاده از آنالیز عوارض زمین (مطالعه موردی: بخشی از اراضی شهرستان مشهد)

امیر لکزیان^{۱*} - محمود فاضلی سنگانی^۲ - علیرضا آستارائی^۳ - امیر فتوت^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۸

چکیده:

این مطالعه به منظور ارزیابی قابلیت استفاده از مشخصه‌های مشتق شده از مدل ارتفاع رقومی به عنوان متغیر کمکی برای تخمین کربن آلی خاک (SOC) و با به کارگیری آن‌ها در روش‌های مختلف آماری و زمین‌آماري طراحی شده است. مدل رگرسیون خطی (LR)، مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، کریجینگ معمولی (OK)، کوکریجینگ معمولی (CoK)، رگرسیون کریجینگ (RK) و کریجینگ با روند بیرونی (KED) به منظور پیش بینی توزیع مکانی SOC در منطقه‌ای به مساحت ۲۴۰۰ کیلومتر مربع در بخشی از اراضی شهرستان مشهد مورد استفاده قرار گرفتند. SOC برای ۲۰۰ نمونه خاک سطحی در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری و مشخصه‌های متناظر هر نقطه از روی مدل ارتفاع رقومی (DEM) با دقت ۱۰ متر استخراج شد. همبستگی بین SOC اندازه‌گیری شده و هر یک از مشخصه‌ها تعیین شد. تعداد ۱۶۰ داده برای مدل سازی و ۴۰ داده برای ارزیابی انتخاب و روش‌های مختلف تخمین به وسیله دو پارامتر ضریب تبیین (R^2) و میانگین خطای مطلق (MAE) حاصل از مقایسه داده‌های اندازه‌گیری و تخمینی، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌دار ولی نه چندان قوی بین مشخصه‌های عارضه‌ای و SOC وجود دارد. مقایسه تکنیک‌های مختلف تخمین نشان داد که در بین تکنیک‌های استفاده شده، روش KED زمانی که با شاخص خاصی به عنوان متغیر کمکی به کار گرفته شد بهترین کارایی (مقدار MAE معادل ۰/۱۸ درصد و R^2 برابر با ۰/۶۷) را داشت هرچند تفاوت چندانی با روش رگرسیون کریجینگ نداشت. همچنین بین نقشه‌های حاصل از روش‌های زمین‌آماري تفاوت نسبتاً کمی مشاهده شد در حالیکه این تفاوت با نقشه‌های حاصل از روش‌های LR و ANN محسوس بود. نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌کند که اگرچه بین SOC و مشخصه‌های عارضه‌ای زمین همبستگی معنی‌داری وجود دارد و می‌توان از آنها به عنوان متغیرهای کمکی برای تخمین SOC استفاده نمود، اما این همبستگی به میزانی که بتوان نقشه‌های دقیق ایجاد نمود کافی نیست و باید فاکتورهای مرتبط دیگر نیز که توزیع SOC را کنترل می‌کنند مورد توجه قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: مدل ارتفاع رقومی، مدل رگرسیونی، شبکه عصبی مصنوعی، زمین آمار

مقدمه

می‌گردد در قالب روش‌های مختلف می‌تواند گزینه مناسبی برای برآورد و تهیه نقشه‌های دقیق خصوصیات خاک باشد (۴، ۱۴ و ۱۸). این روش‌ها نیاز به نمونه برداری بصورت متراکم را کاهش داده و از این طریق تا حد زیادی در هزینه و وقت صرفه جویی می‌شود (۱۳). از آنجا که عامل پستی و بلندی از عوامل اصلی در تشکیل و تکامل خاک است (۱۱)، روابط فرآیند مداری بین ویژگی‌های عارضه‌ای زمین^۷ و خصوصیات خاک بویژه در مناطق با فیزیوگرافی تپه ماهوری وجود دارد و از این رو پیدا کردن همبستگی‌های تجربی با لندفرم‌ها بسیار رایج است (۱۷ و ۲۴). مدل سازی خاک-زمین نما^۸ که طی آن با

نقشه‌های دقیق خصوصیات خاک^۵ ابزار مهمی برای مدیریت دقیق مکانی خاک است که اغلب با استفاده از روش‌های مساحی سنتی که مستلزم صرف هزینه و وقت زیادی است، تهیه می‌گردد (۱۶). استفاده از داده‌های کمکی^۶ که دارای همبستگی مناسبی با خصوصیات خاک بوده و از طرفی با سهولت و تراکم بالایی فراهم

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب استاد، دانشجوی دکتری و دانشیاران گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
* - نویسنده مسئول:
(Email: alakzian@yahoo.com)

عظیم می تواند اثرات قابل توجهی بر سیکل کربن در مقیاس جهانی بگذارد (۲۶). لذا داشتن اطلاعات کافی از مقدار ذخیره کربن در خاک و توزیع مکانی و زمانی آن در مطالعات خاکشناسی و زیست محیطی اهمیت ویژه‌ای پیدا می کند. داده‌های حاصل از تحلیل عوارض زمین و مدل ارتفاع رقومی برای پیش بینی مقدار کربن خاک با استفاده از تخمین‌گرهای مختلف و در مقیاس‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۱، ۲، ۳، ۵، ۱۹ و ۲۶). در این تحقیق امکان استفاده از مشخصه‌های عارضه‌ای زمین به عنوان متغیر کمکی در برآورد و پهنه بندی میزان کربن آلی خاک و همچنین مقایسه تخمین‌گرهای مختلف آماری و زمین آماری در بخشی از اراضی شهرستان مشهد مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۲۴۰۰ کیلومتر مربع در استان خراسان رضوی، شهرستان مشهد و در محدوده ۵۹ درجه و ۳۴ دقیقه طول شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه شمالی واقع می‌گردد (شکل ۱). متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۲۵۰ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه هوای آن ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. منطقه مورد مطالعه به دلیل وسعت زیاد انواع تیپ اراضی را شامل می‌گردد، خاکهای این منطقه بیشتر در رده اریدی سول و اینسپتی سول قرار دارند و کاربری آنها کشت دیم، آبی و مرتع می باشد. بافت خاک اغلب لومی و سیلتی بوده، محدوده اسیدیته آن ۷/۵ تا ۸/۸ و هدایت الکتریکی خاک ها بین ۰/۵ تا ۷/۵ (دسی زیمنس بر متر) تغییر می کند.

نمونه برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی

تعداد ۲۰۰ نمونه سطحی (عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری) خاک در آبان ماه سال ۱۳۸۹ تهیه و موقعیت هر یک از نمونه‌ها با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد. پراکنش نمونه‌ها در منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه‌ها برای انجام آنالیزهای آزمایشگاهی به آزمایشگاه منتقل شده و پس از هواخشک شدن از الک ۲ میلیمتری عبور داده شد. پس از تعیین بافت و هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک، برای اندازه‌گیری میزان کربن آلی مقداری از خاک از الک ۰/۵ عبور داده شد و میزان کربن آلی خاک با استفاده از روش والکی بلک (۲۷) تعیین گردید.

تهیه مدل ارتفاع رقومی و آنالیز عوارض زمین

مدل ارتفاع رقومی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ تهیه شده از سازمان نقشه برداری با فاصله خطوط تراز برابر با ۲۰ متر با استفاده از نرم افزار Arc Map 9.3 (۷) در شبکه‌های رستری با

تحلیل عوارض زمین^۱ از مشخصه‌های عارضه‌ای (مانند ارتفاع، جهت شیب، انحناء و...) برای تخمین خصوصیات خاک استفاده می‌شود بطور موفقیت‌آمیزی در مقیاس‌های متفاوت برای پیش بینی تغییرات مکانی خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۱، ۲، ۶، ۸، ۱۰، ۱۴، ۱۶، ۲۲، ۲۳ و ۲۹).

پیچیدگی عوارض زمین به دلیل ماهیت مکانی سه بعدی و حتی گاه چهار بعدی (به دلیل وابستگی به زمان) باعث شده است تا سنجش و پایش عوارض زمین با شیوه سنتی که محدود به یک یا دو بعد است جای خود را به نمایش‌های سه بعدی و مشتقات مختلف آن با استفاده از مدل‌های ارتفاع رقومی^۲ (DEM) بدهد (۲۸). فناوری-های سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) ظرفیت پردازش تجزیه و تحلیل عوارض زمین را ارتقاء بخشیده‌اند و باعث بوجود آمدن اطلاعات مبنایی شده که امکان تهیه مدل ارتفاع رقومی دقیق و استخراج متغیرهای کمکی بصورت مجموعه مترامی از داده‌ها در مقیاس‌های مناسب را برای محققین فراهم نموده است (۲۸). بطوریکه تجزیه و تحلیل عوارض زمین و مطالعه تغییرات پستی و بلندی به عنوان وسیله‌ای جهت درک پیچیدگی‌های مکانی و زمانی فرآیندهای سطحی زمین نگریسته می‌شود (۱۲). علاوه بر آن در تخمین و برآورد خصوصیات خاک نیز در قالب روش‌های مختلف مدل سازی خاک-زمین نما مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۰)؛ تا جائیکه رشد و توسعه تکنیک‌های مربوط به پردازش‌های ارتفاعی موجب مطرح شدن پارادایم پهنه بندی رقومی خاک^۳ شده است (۲۸).

کارایی تجزیه و تحلیل عوارض زمین به عوامل مختلفی از جمله پیچیدگی لندفرم، قدرت تفکیک مدل ارتفاع رقومی مورد استفاده، کیفیت داده‌ها (به ویژه صحت آنها) بستگی دارد (۲۸). برآورد مناسب از خصوصیات خاک از این طریق نیز مستلزم نمونه‌برداری کافی، آنالیزهای دقیق، استفاده از متغیرهای کمکی مرتبط و روش‌های تخمین مناسب است (۱۳). تزریق اطلاعات موجود در متغیرهای کمکی برای برآورد خصوصیت اصلی مورد بررسی به روش‌های مختلفی همچون، مدل رگرسیونی، زمین آماری، شبکه عصبی مصنوعی و غیره صورت می‌گیرد که هر یک از این روش‌ها در شرایط خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۲ و ۲۰).

کربن آلی خاک به دلیل نقش مهمی که بر روی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌گذارد، در تعیین کیفیت خاک و ارزیابی آن فاکتور مهمی به شمار می‌رود (۱۹). از طرفی خاک مخزن عظیمی برای ذخیره کربن است و تغییرات میزان کربن در این مخزن

1- Terrain Analysis

2 -Digital Elevation Model

3 -Soil Digital Mapping

مقادیر متناظر هر یک از مشخصه‌ها در محل نقاط نمونه‌برداری از نقشه‌های رستری در محیط نرم افزار Arc Map استخراج گردید. علاوه بر آن برای استفاده از مشخصه‌ها به عنوان متغیر کمکی در روشهای زمین آماری مقادیر متناظر در محل گره‌های شبکه تخمین نیز استخراج گردید.

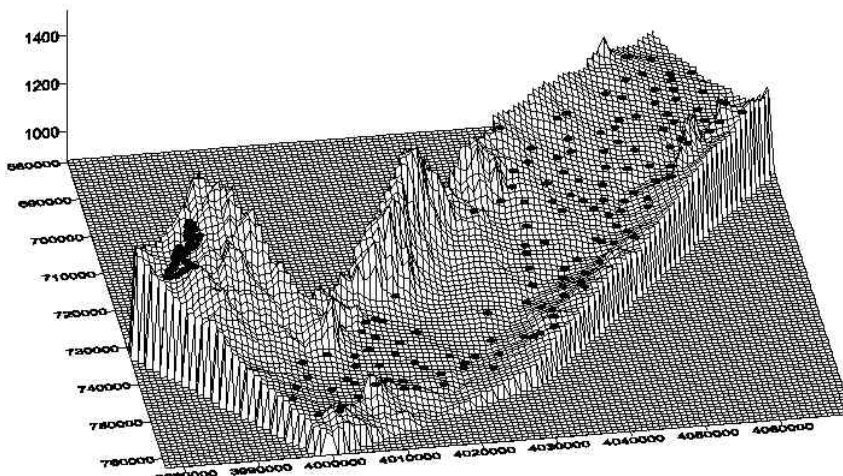
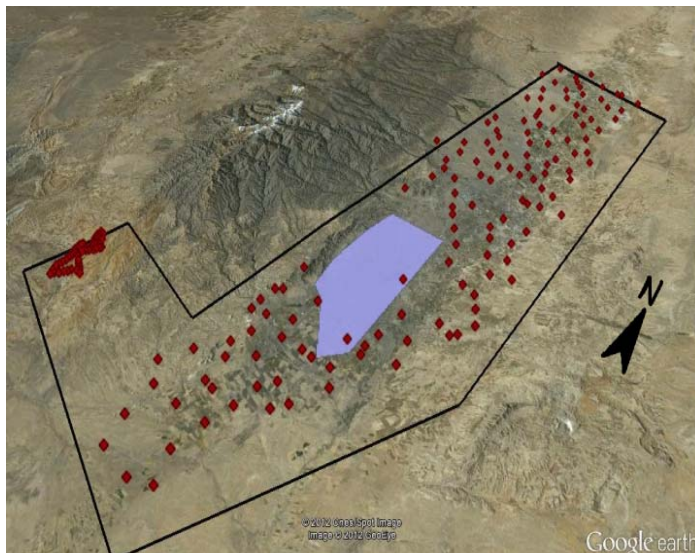
آنالیز داده‌ها و توسعه مدل‌ها

پس از تهیه مجموعه داده حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و استخراج شده از مدل ارتفاع رقومی، داده‌ها کنترل شده، آمارها تعیین و نرمال بودن داده‌ها در سطح اعتماد ۹۵٪ مورد بررسی قرار گرفت. مجموعه داده به دو زیر مجموعه شامل داده‌های مورد استفاده برای توسعه مدل (۷۵ درصد داده‌ها) و داده‌های اختصاص داده شده برای ارزیابی مدل‌ها (۲۵ درصد کل داده‌ها) تقسیم شد.

ابعاد سلول ۱۰×۱۰ متر تهیه گردید. مدل رقومی ارتفاع با فرمت رستری وارد محیط نرم افزار SAGA-GIS V. 2.0.8 (۲۵) شده و مشخصه‌های عارضه‌ای مختلف از آن مشتق شد.

مشخصه‌های عارضه‌ای به شاخص‌های اولیه و ثانویه (مرکب) تقسیم بندی می‌شوند. شاخص‌های اولیه که شامل ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، سطح ویژه حوزه، میانگین انحنای سطح زمین، انحنای مسطح و انحنای پروفیلی می‌باشند، مستقیماً از مدل ارتفاع رقومی محاسبه شده و شاخص‌های ثانویه (شاخص رطوبتی، شاخص قدرت جریان و شاخص انتقال رسوب) می‌باشند، از ترکیب شاخص‌های اولیه حاصل می‌شوند (۲۸).

لیست مشخصه‌های مورد استفاده به همراه تعریف و اهمیت آن در جدول ۱ آمده است. برای ایجاد مجموعه داده‌های متغیرهای کمکی با استفاده از شاخص‌های استخراج شده از مدل ارتفاع رقومی،



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و توزیع شبکه نمونه برداری بر روی آن

جدول ۱- مشخصه‌های عارضه‌ای مشتق شده از مدل ارتفاع رقومی مورد استفاده در این مطالعه

شاخص	معادل لاتین	واحد	اهمیت
ارتفاع	Elevation(E)	m	ارتفاع هر نقطه از سطح آبهای آزاد در نظر گرفته می شودو تأثیر گذار بر روی بسیاری از خصوصیات از جمله دما و فشار می باشد.
شیب	Slope (S)	%	سنجشی از تغییر ارتفاع در جهتی است که شدیدترین کاهش ارتفاع به وقوع می پیوندد. بر سرعت جریان و گنجایش رطوبتی خاک ، فرسایش و بسیاری دیگر از فرآیندهای محیطی تأثیر می گذارد.
منظر	Aspect (A)	Radian	بیانگر امتداد خطی است که شدیدترین میزان کاهش ارتفاع به وقوع می پیوندد. جهت برآورد تشعشع خورشیدی به کار گرفته می شود.
انحنای سطح زمین	Curvature (C)	1/m	شامل انحنای مسطح (Plan Curvature) و قائم (Curvature Profile) است که انحنای مسطح میزان تغییر منظر در امتداد یک کنتور و مشخصه‌ای از همگرایی و واگرایی توپوگرافیکی است. و انحنای قائم میزان تغییر شیب به سمت پایین خط جریان و تغییرات سرعت جریان را بیان می کند.
شاخص خیزی	Wetness Index (WI)	—	شاخصی از توزیع مکانی رطوبت خاک در طول زمین نما می باشد
شاخص قدرت جریان	Stream power index (SPI)	—	نمایشی از قدرت فرسایندهی جریان های سطحی است که با استفاده از سطح ویژه حوزه و درجه شیب محاسبه می شود.
طول شیب	Slope Length (LS)	—	بیانگر تأثیر طول شیب بر روی فرسایش خاک است.
سطح ویژه حوزه	Catchment area (CA)	m ² m ⁻¹	بیانگر سطحی از حوزه است که در زیر مجموعه کل حوزه تحت تأثیر خصوصیات توپوگرافیکی مشابه می باشد.
فاکتور دید آسمان	Sky View Factor (SVF)	—	فاکتوری است که نشان دهنده میزان دسترسی به نور و شرایط اتمسفری را نشان می دهد. و جزء پارامترهای خصوصیات روشنایی مشتق شده از مدل ارتفاع رقومی است.
نمایه همگرایی	Convergence Index (CI)	—	از خصوصیات مورفومتری و هندسی حوزه است که میزان تقرب و همگرایی را نشان می دهد.

مدل رگرسیونی

برای بررسی همبستگی بین مشخصه‌ها با یکدیگر و با مقادیر کربن آلی خاک ماتریس همبستگی محاسبه شد. روش رگرسیون چند متغیره گام به گام^۷ جهت انجام مدل سازی و استخراج مدل رگرسیونی ارتباط بین مشخصه‌های عارضه‌ای با کربن آلی خاک مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز همبستگی و رگرسیون با استفاده از نرم افزار مینیتب Minitab v.16 (۱۵) انجام شد.

مدل شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌هایی با توپولوژی پرسپترون چند لایه^۸ با قانون یادگیری پس انتشار پیش خور^۹ جهت پیدا کردن مدل شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. توپولوژی‌های مختلفی بر اساس تغییر تعداد مشخصه‌های عارضه‌ای در لایه ورودی، تعداد لایه های پنهان (۱) و (۲) و تعداد نرون‌ها در لایه پنهان برای تخمین کربن آلی خاک (به عنوان خروجی شبکه) مورد بررسی قرار گرفت. داده‌ها در دو گروه آموزش و تست قرار گرفته و برای توقف آموزش شبکه در نقطه بهینه

در این تحقیق از روشهای رگرسیون خطی^۱، مدل شبکه عصبی^۲، کریجینگ معمولی^۳، کوکریجینگ^۴، رگرسیون کریجینگ^۵ و کریجینگ با روند بیرونی^۶ برای تخمین کربن آلی خاک استفاده شد. در بین روش‌های استفاده شده، روش رگرسیون ساده‌ترین روش برای استفاده از اطلاعات متغیرهای کمکی در قالب رابطه‌ای متقن برای تخمین متغیر اصلی است. در مدل شبکه مصنوعی نیز از ارتباط بین متغیر اصلی و کمکی بصورت یک ارتباط نرم و غیرفیزیکی استفاده می شود. در روش‌های زمین آماری (کوکریجینگ، رگرسیون کریجینگ و کریجینگ با روند بیرونی) اطلاعات موجود در ارتباط فضایی متغیرها نیز برای درونیابی استفاده می شود ضمن اینکه در روش‌های زمین آماری که از متغیر کمکی نیز استفاده می کنند، هم از همبستگی بین متغیر اصلی و هم از ارتباط فضایی متغیر اصلی و کمکی برای تخمین استفاده می شود. کارایی هر یک از این روش‌ها بستگی به ماهیت داده‌ها و مورد مطالعه تغییر می کند (۱۳).

- 1-Linear Regression
- 2-Artificial Neural Network
- 3 - Ordinary Kriging
- 4 - Co-kriging
- 5 - Regression Kriging
- 6 - Kriging with External Drift

7- Stepwise regression

8 - Multi layer Preceptron

9 -Feed- Forward Back Propagation

برداشت شده زمینی برای میزان کربن آلی خاک به عنوان متغیر اصلی و مشخصه‌های مشتق شده از مدل رقومی ارتفاع در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که در این جدول دیده می‌شود، میانگین کربن آلی خاک در این منطقه حدود ۱ درصد است که نشان دهنده پایین بودن میزان کربن آلی خاک است. در عین حال بالا بودن ضریب تغییرات بیانگر وجود تغییرات مکانی زیاد این خصوصیت در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. ضریب تغییرات برای مشخصه‌های انحناء، شاخص قدرت جریان، سطح ویژه حوزه، شاخص همگرایی، شیب، منظر و طول شیب بیشتر از یک است که نشان دهنده تغییر پذیری زیاد این خصوصیات است. در مقابل مشخصه‌های ارتفاع، فاکتور دید آسمان و شاخص خیزی دارای ضریب تغییرات کم هستند. همچنین علت تفاوت دامنه تغییرات برای داده‌های زمینی مشخصه‌ها با دامنه موجود در شکل عدم پوشش شبکه نمونه برداری برای حدود بالا و پائین این مشخصه‌ها در محدوده مطالعاتی است هر چند فراوانی مقادیر بالا و پائین کم است.

همبستگی بین مشخصه‌های عارضه‌ای با یکدیگر و همچنین با میزان کربن آلی خاک محاسبه شد (جدول ۳). نتایج نشان می‌دهد که همبستگی معنی‌داری بین مشخصه‌های توپوگرافی مشتق شده از مدل ارتفاع رقومی با کربن آلی خاک وجود دارد. بطوریکه به جز شاخص قدرت جریان، سایر مشخصه‌ها همبستگی معنی‌داری با این خصوصیت خاک دارند. شاخص رطوبتی در این بین بالاترین ضریب همبستگی (۲ برابر با ۰/۵۳) را نشان داد. مشخصه‌های ارتفاع، فاکتور دید آسمان، شاخص رطوبتی، سطح ویژه حوزه و انحناء سطح زمین همبستگی مثبت و مشخصه‌های شیب، شاخص همگرایی طول شیب و منظر همبستگی منفی با میزان کربن آلی خاک از خود نشان دادند. این همبستگی‌ها اگرچه معنی‌دار هستند ولی میزان همبستگی‌ها شدید نیست که علت آن را می‌توان تأثیر فاکتورهای دیگر به جز فاکتورهای مربوط به توپوگرافی دانست. در مطالعه‌ای که ایوبی و علیزاده (۱) برای برآورد خصوصیات خاک با استفاده از اطلاعات حاصل از مدل رقومی ارتفاع انجام دادند پارامترهای ارتفاع، شیب، شاخص رطوبت، شاخص شدت جریان و شاخص رسوب همبستگی معنی‌داری با میزان ماده آلی نشان دادند. محققین وجود این همبستگی معنی‌دار را در مطالعات دیگر با ضرایب متفاوتی تأیید کرده‌اند (۲، ۵، ۸، ۱۹ و ۲۶).

مدل رگرسیونی

رابطه رگرسیونی بین میزان کربن آلی خاک و مشخصه‌های عارضه‌ای به روش رگرسیون گام به گام در سطح اعتماد ۰/۹۵، مورد بررسی قرار گرفت که بر طبق نتایج حاصل از آن، یک مدل رگرسیونی خطی چند متغیره که بصورت معادله شماره ۱ نشان داده شده است با مقدار ضریب تبیین برابر با ۰/۶۴ برای تخمین و ارزیابی

از معیار MAE و ضریب تبیین (R^2) داده‌های اعتبارسنجی تقاطعی^۱ استفاده شد. در نهایت بر اساس معیارهای ارزیابی و نتایج آنالیز حساسیت بهترین توپولوژی انتخاب گردید. کلیه شبکه‌های بررسی شده در محیط نرم افزاری NeuroSolution v.5 طراحی و اجرا شدند.

روشهای زمین آماری

روشهای زمین آماری مورد استفاده به منظور درونیابی میزان کربن آلی خاک در این تحقیق شامل روش کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، رگرسیون کریجینگ و کریجینگ با روند بیرونی است. که در اولین روش درونیابی از متغیر کمکی استفاده نمی‌شود و در سه روش دیگر از متغیرهای کمکی با الگوریتم‌های متفاوت برای تخمین متغیر اصلی استفاده می‌شود. آنالیزهای زمین آماری شامل تعیین مدل واریوگرام و درونیابی در نرم افزار GS+ v.9 (۹) انجام شد.

ارزیابی تخمین‌گرها

داده‌ها با استفاده از روش‌های رگرسیون، مدل شبکه عصبی، کریجینگ معمولی، کوکریجینگ معمولی، رگرسیون کریجینگ و کریجینگ با روند بیرونی درونیابی شدند. برای ارزیابی کارایی تخمین‌گرها مورد استفاده، پراکنش داده‌های تخمینی در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده در مجموعه داده‌های ارزیابی ترسیم و ضریب تبیین (R^2) و میانگین خطای مطلق (MAE) به عنوان معیار ارزیابی کارایی تخمین برای هر یک از روش‌های بکار برده شده تعیین گردید.

پهنه بندی

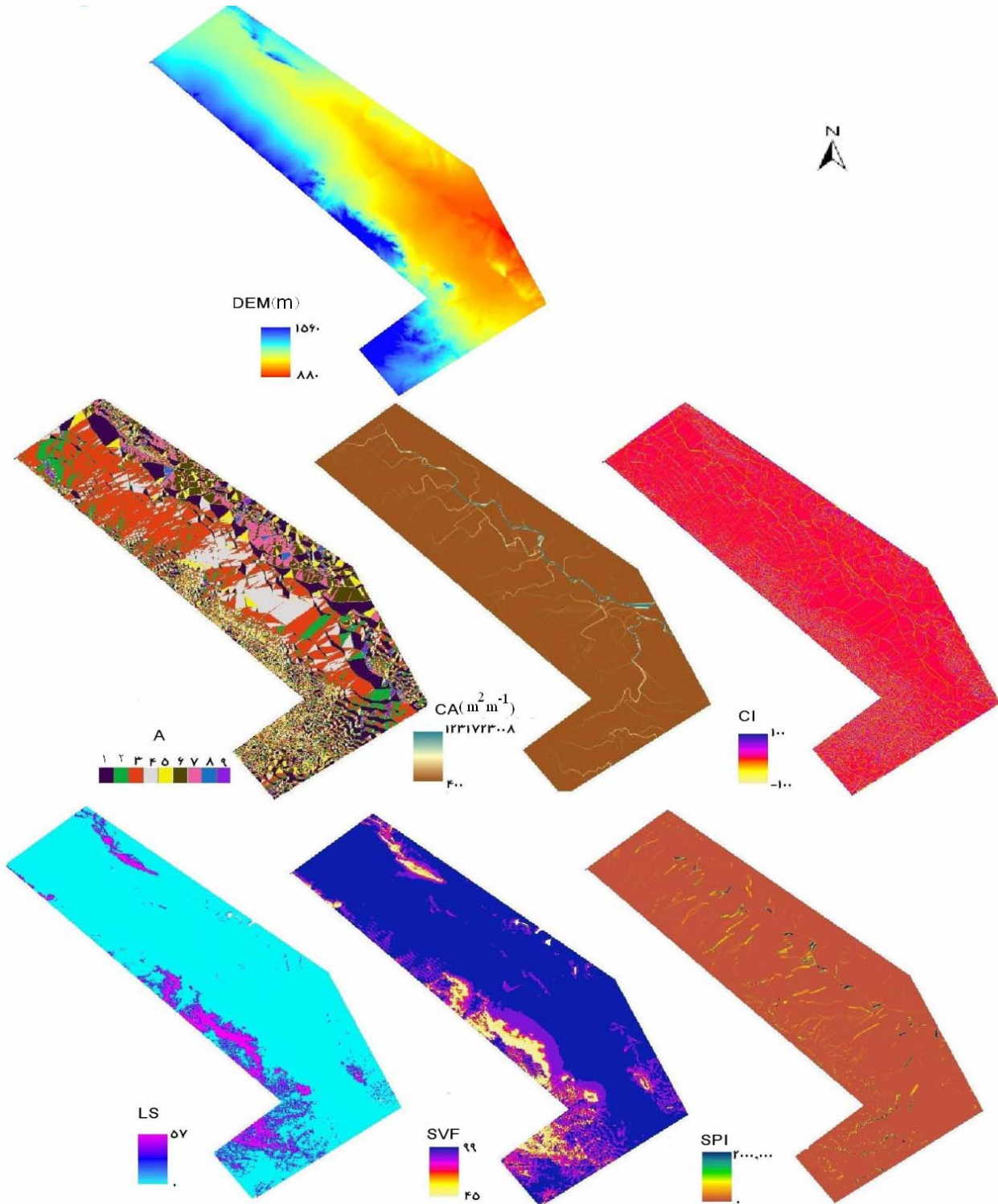
پهنه بندی میزان کربن آلی خاک با مدل رگرسیونی در نرم افزار Arc Map و با نسبت دادن ضریب مربوط به هر مشخصه موجود در مدل به لایه رستری آن انجام شد. داده‌های تخمین زده شده بوسیله مدل شبکه عصبی نیز وارد محیط نرم افزار Arc Map شده و در سطوح مشخص شده طبقه بندی شد. پهنه بندی با استفاده از روشهای زمین آماری نیز در نرم افزار GS+ انجام گرفت. در نهایت برای مقایسه گرافیکی پهنه بندی انجام شده دامنه تغییرات کربن آلی خاک در ۵ سطح و بصورت نقشه‌هایی با راهنمای واحد نشان داده شدند.

نتایج و بحث

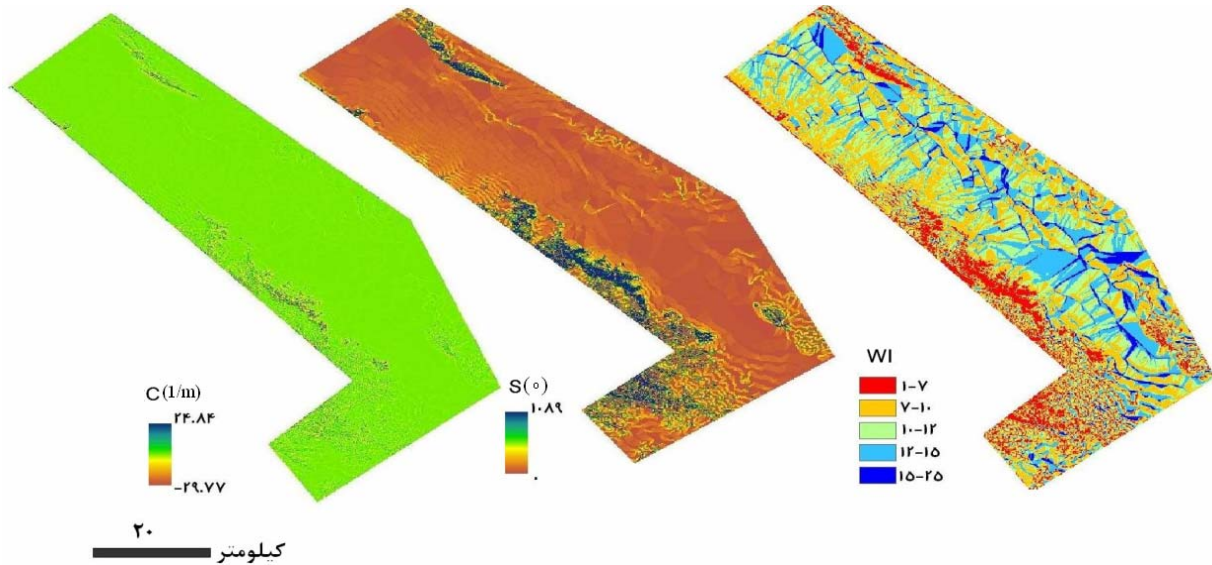
نقشه‌های رستری تهیه شده مدل ارتفاع رقومی و مشتقات آن در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین خلاصه آماری داده‌های

$$SOC = -1.0/22 + 0.0/38 (WI) + 0.0/01 (E) + 0.0/92 (SVF) + 0.0/24 (C) - 0.0/003 (A) \quad R^2 = 0.64 \quad (1)$$

مورد استفاده قرار گرفت. در این معادله از ۵ مشخصه شامل، شاخص خیزی، ارتفاع، فاکتور دید آسمان، انحناء و منظر برای تخمین کربن آلی خاک استفاده شده است.



شکل ۲- نقشه‌های رستری مدل ارتفاع رقومی و مشخصه‌های عارضه ای مشتق از آن



ادامه شکل ۲- نقشه‌های رستری مدل ارتفاع رقومی و مشخصه‌های عارضه ای مشتق از آن

جدول ۲- توصیف آماری کربن آلی خاک و مشخصه‌های مشتق از مدل ارتفاع رقومی (N=200)

شاخص	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
SOC	%	۰/۰۸	۲/۴۰	۱/۰۷	۰/۵۰	۰/۵۳
E	m	۹۲۲/۵۱	۱۳۶۰/۰۰	۱۱۴۵/۱۰	۱۳۱/۰۳	۰/۱۱
SVF	-	۹۳/۲۰	۹۹/۸۷	۹۸/۷۱	۱/۰۱	۰/۰۱
S	%	۰/۰۰	۱۲۶/۰۰	۸/۹۱	۱۴/۴۷	۱/۶۳
WI	-	۴/۰۰	۱۸/۰۰	۱۰/۹۴	۳/۰۳	۰/۲۸
CI	-	-۲۶/۰۰	۴۲/۰۰	۰/۷۱	۶/۴۸	۹/۱۷
LS	-	۰/۰۰	۳/۲۰	۰/۴۳	۰/۵۰	۱/۱۶
CA	m ² m ⁻¹	۴۰۰/۰۰	۱۴۸۶۵۴۷۷/۰۰	۳۷۸۵۲۱/۹۳	۱۳۹۵۴۲۷/۲۰	۳/۶۹
C	-	-۰/۷۱	۳/۰۴	۰/۰۱	۰/۲۷	۱۷/۵۸
SPI	-	۰/۰۰	۲۲۴۴۸۵/۰۰	۳۶۳۵/۰۰	۱۸۹۹۲/۱۳	۵/۲۲
A	-	۰/۰۰	۳۴۸/۵۹	۷۵/۱۸	۷۵/۶۸	۱/۰۱

طول شیب (LS) = Slope Length نمایه همگرایی = Convergence Index (CI) مدل ارتفاع رقومی ارتفاع = Digital Elevation Model (DEM)
 شیب (S) = Slope سطح ویژه حوزه = Catchment area (CA) فاکتور دید آسمان = Sky View Factor (SVF) منظر = Aspect (A)
 شاخص خیسگی = Wetness Index (WI) انحنای سطح زمین = Curvature (C) شاخص قدرت جریان = Stream power index (SPI)

حاصل شد. پیله ور و همکاران (۲) نیز با استفاده از یک مدل رگرسیونی شامل متغیرهای ارتفاع، شاخص رطوبت، انحنای سطح زمین و سطح ویژه حوزه توانستند ۶۰ درصد از تغییرات کربن آلی خاک را در منطقه مورد مطالعه پیش بینی نمایند. ایوبی و علیزاده (۱) نیز در مطالعه ای که در حوزه آبخیز مهر سبزواری انجام دادند مدل های رگرسیونی با ضرایب تبیین بین ۰/۲۸ تا ۰/۳۵ برای برآورد ماده آلی خاک سطحی با استفاده از متغیرهای مدل رقومی ارتفاع بدست آوردند. مقایسه نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که بسته به شرایط منطقه مورد مطالعه مشخصه‌های متفاوتی و با مقادیر R² مختلف مقدار کربن آلی خاک را پیش بینی می‌کنند.

در مطالعات مشابه دیگری، فلورینسکی و همکارانش (۸) از ۹ مشخصه ارتفاع، شیب، منظر، سطح ویژه حوزه، شاخص توپوگرافی، شاخص قدرت جریان، انحنای قائم، مسطح و میانگین برای بررسی رابطه رگرسیونی استفاده کردند. که در رابطه حاصل ۵ مشخصه شامل ارتفاع، شیب، سطح ویژه حوزه، انحنای قائم و مسطح ۰/۳۷ از تغییرات کربن را پیش بینی نمود (R² معادل ۰/۳۷)؛ مولر و پیرس (۱۹) نیز رابطه رگرسیونی با ۵ مشخصه اصلی توپوگرافی شامل شیب، ارتفاع، منظر، انحنای قائم و مسطح و با R² بین ۰/۶۶ تا ۰/۸۹ (بسته به مقیاس نمونه برداری) کربن آلی خاک را تخمین می‌زد، بدست آوردند که مقادیر بالاتر R² برای حالتی که تراکم نمونه برداری بیشتر بود

جدول ۳- همبستگی بین مشخصه‌های عارضه‌ای با یکدیگر و با کربن آلی خاک

	SOC	E	SVF	S	WI	CI	LS	CA	C	SPI	A
SOC	۱										
E	*.۰/۲۸	۱									
SVF	**-.۰/۳۹	**-.۰/۵۰	۱								
S	**-.۰/۴۲	*.۰/۳۲	**-.۰/۶۰	۱							
WI	**-.۰/۵۳	*.۰/۱۲	**-.۰/۳۰	**-.۰/۵۷	۱						
CI	*.۰/۱۱	*.۰/۰۸	-.۰/۰۲	*.۰/۱۴	**-.۰/۳۷	۱					
LS	*.۰/۱۳	**-.۰/۵۲	.۰/۶۰	*.۰/۶۰	*.۰/۲۷	*.۰/۱۳	۱				
CA	*.۰/۱۹	*.۰/۱۱	*.۰/۰۵	*.۰/۱۰	**-.۰/۴۴	*.۰/۱۶	-.۰/۰۹	۱			
C	*.۰/۲۱	.۰/۰۶	*.۰/۱۹	**-.۰/۳۴	*.۰/۱۵	*.۰/۳۰	*.۰/۲۶	-.۰/۰۵	۱		
SPI	.۰/۰۹	-.۰/۰۷	-.۰/۰۲	-.۰/۰۳	*.۰/۲۶	-.۰/۱۳	-.۰/۱۰	*.۰/۸۰	-.۰/۰۵	۱	
A	**-.۰/۳۴	-.۰/۰۸	-.۰/۰۸	*.۰/۳۳	*.۰/۳۷	.۰/۰۰	.۰/۰۳	.۰/۰۲	.۰/۰۱	*.۰/۱۵	۱

** در سطح ۱ درصد معنی دار * در سطح ۵ درصد معنی دار

Soil Organic Carbon (SOC): کربن آلی خاک Convergence Index(CI): نمایه همگرایی طول: Slope Length (LS) Aspect (A): منظر Sky View Factor (SVF): فاکتور دید آسمان Elevation(E): ارتفاع شیب: Slope (S) شیب Catchment area (CA): سطح ویژه حوزه: Stream power index (SPI): شاخص قدرت جریان Curvature (C): شاخص خمیسی: Wetness Index (WI): انحنای سطح زمین

جدول ۴- مقادیر MAE و R² برای توپولوژی‌های متفاوت برای نقطه بهینه در مرحله آموزش شبکه

R ²	MAE(%)	تابع انتقال	تکرار	تعداد نرون در لایه مخفی	تعداد لایه مخفی	توپولوژی
.۰/۸۲	.۰/۱۲	Log Sig	۴۸	۱۰	۱	۵ - ۱۰ - ۱

روش‌های زمین آماری

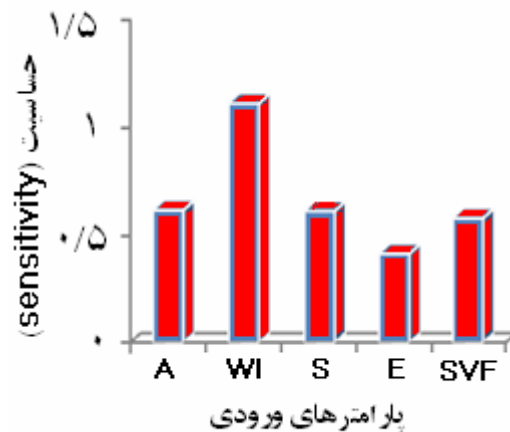
تغییرنماهای تجربی برای کربن آلی خاک به عنوان متغیر اصلی و شاخص خمیسی به دلیل همبستگی مناسب ($r > 0.5$) با کربن آلی خاک (۱۹) به عنوان متغیر کمکی محاسبه و بهترین مدل برازش داده شده بر آنها انتخاب گردید. به دلیل مشخص نبودن روند جهت دار مشخص در رویه واریوگرام^۱ مدل‌های همروند برازش داده شده بر این واریوگرام‌ها تعیین و پارامترهای نشان دهنده ساختار مکانی مشخص گردید که نتایج آن در جدول ۵ آمده است. بررسی ساختار مکانی کربن آلی خاک با مقدار اثر قطعه‌ای بالا و نسبت واریانس ساختاردار به کل ($C/(C_0+C)$) برابر با ۰/۵۲، نشان می‌دهد که الگوی ساختار مکانی کربن آلی خاک بر الگوی تصادفی آن غلبه چندانی ندارد و تقریباً نیمی از الگوی تغییرات مکانی دارای ساختار قابل تعیین با مدل برازش داده شده می‌باشد.

این در حالی است که مدل برازش شده بر واریوگرام تجربی نیز از ضریب تبیین بالایی برخوردار نیست. بررسی ساختار مکانی متغیر فرعی نیز نشان می‌دهد که سهم تغییرات تصادفی بیشتر از تغییرات ساختاردار در تعیین تغییرات مکانی است و لذا از ساختار مکانی ضعیفی برخوردار است.

مدل شبکه عصبی

به منظور تخمین کربن آلی خاک مدلی از شبکه عصبی (ساختار پرسپترون چندلایه) با ۵ متغیر ورودی (بر اساس نتایج حاصل از آنالیز حساسیت)، ۱۰ نرون در لایه پنهان و تابع محرک لوگ سیگموئیدی به عنوان ساختار بهینه انتخاب گردید. جدول ۴ مشخصات شبکه انتخاب شده را که دارای کمترین مقدار MAE و بالاترین مقدار R² در مرحله آموزش شبکه می‌باشد را نشان می‌دهد. آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ورودی شبکه به روش statsoft (۲) نیز انجام شد تا تأثیر پارامترهای ورودی بر میزان خروجی شبکه (کربن آلی خاک) بهتر نشان داده شود. نتایج آنالیز حساسیت برای ورودی‌های شبکه انتخابی در شکل ۳ آمده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد مدل شبکه عصبی بیشترین حساسیت را به شاخص رطوبتی از خود نشان می‌دهد. ضمن اینکه مشخصه‌های منظر، شیب و فاکتور دید آسمان حساسیت نزدیک به هم دارند و ارتفاع کمترین حساسیت را در بین پارامترهای ورودی نشان می‌دهد. در مطالعه‌ی پیله و همکاران (۲)، نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که بیشترین میزان حساسیت شبکه به پارامتر انحنای قائم می‌باشد؛ در حالیکه در این مطالعه بیشترین حساسیت به شاخص خمیسی نشان داده شد.

1 - Variogram surface



شکل ۳- نتایج آنالیز حساسیت برای پارامترهای ورودی

جدول ۵- پارامترهای مدل تغییرنمای کربن آلی خاک و شاخص شیبی و تغییرنمای مشترک این دو پارامتر

پارامتر	مدل انتخابی	اثر قطعه‌های (C ₀)	مقدار آستانه (Sill)	دامنه تأثیر (A)	نسبت واریانس (C/C ₀ +C)	R ²	باقیمانده مجموع مربعات (RSS)
SOC	نمایی	۰/۲۰	۰/۴۲	۴۱۰۰	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۰۴
WI	نمایی	۷/۷۰	۱۵/۱۰	۱۷۸۹۰	۰/۴۹	۰/۷۸	۲/۷
SOC× WI	نمایی	۱/۸۲	۳/۶۹	۲۲۳۰	۰/۵۰	۰/۷۴	۰/۳۱

همکاران (۲) مدل شبکه عصبی با استفاده از متغیرهای مدل رقمی ارتفاع توانست تا ۸۰ درصد از تغییرات میزان کربن آلی خاک را توجیه کند.

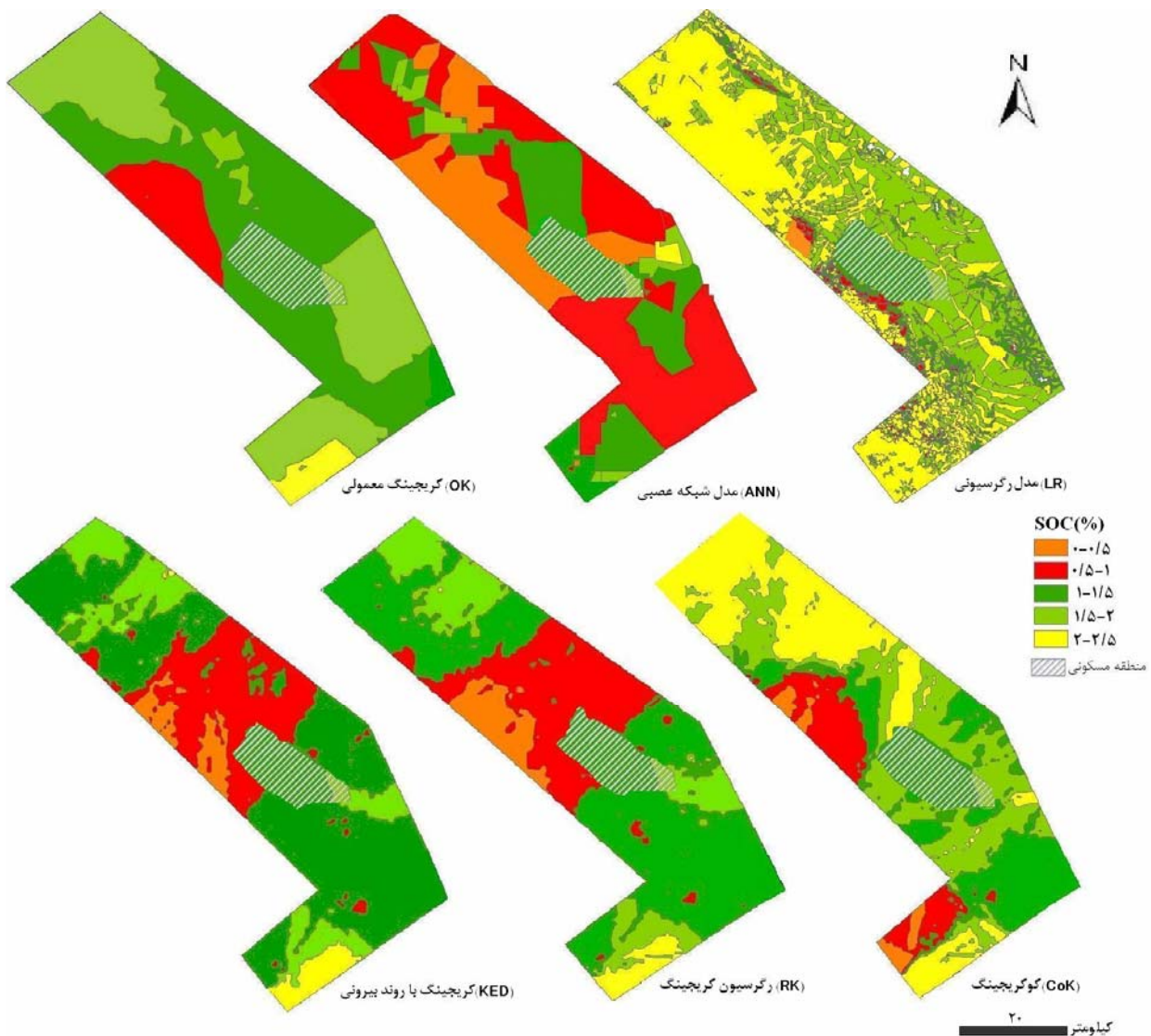
نتایج همچنین نشان می‌دهد که روش‌هایی که هم از رابطه رونددار و هم از رابطه ساختار فضایی استفاده کرده‌اند (رگرسیون کریجینگ و کریجینگ با روند بیرونی) عملکرد بهتری نسبت به سایر تخمین‌گرها داشته‌اند. روش کریجینگ با روند بیرونی به دلیل استفاده همزمان از رابطه متقن بین متغیر اصلی و وابسته و همچنین استفاده از اطلاعات موجود در ساختار فضایی متغیرها توانسته است برتری خود را در تخمین کربن آلی خاک بر سایر روش‌ها نشان دهد. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر کیفیت داده‌های کمکی تکنیکی که این داده‌ها در آن برای تخمین متغیر اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند نیز از عوامل مؤثر بر کارایی تخمین و پهنه بندی است (۲۰).

با توجه به معیارهای ارزیابی (مقدار MAE معادل ۰/۱۸ درصد و R² برابر با ۰/۶۷) می‌توان گفت که نقشه حاصل از پهنه‌بندی با روش کریجینگ با روند بیرونی (KED) مناسبترین الگوی پراکنش مکانی برای مقدار کربن آلی خاک را به نمایش گذاشته است. هیچکدام از روش‌ها نتوانسته‌اند بیانگر تغییرات مکانی با دقت‌های بالاتر بطوریکه بتوان از آن برای تهیه نقشه دقیق استفاده کرد، باشند.

شاخص خیزی در روش کوکریجینگ و کریجینگ با روند بیرونی به عنوان متغیر کمکی استفاده شد بنابراین واریوگرام مشترک بین این شاخص و کربن آلی خاک نیز محاسبه گردید که طبیعتاً این واریوگرام نیز ساختار مکانی قوی را نشان نمی‌دهد.

ارزیابی تخمین‌گرها

کیفیت تخمین هر یک از روش‌های به کارگرفته شده برای پیش‌بینی میزان کربن آلی خاک با استفاده از دو معیار میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R²) حاصل از پراکنش مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده در زیر مجموعه‌ی داده‌های ارزیابی (۴۰ داده) در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در بین تکنیک‌های استفاده شده برای تخمین کربن آلی روش کریجینگ با روند بیرونی هنگامیکه از شاخص خیزی به عنوان متغیر کمکی در آن استفاده شده است با داشتن بالاترین ضریب تبیین (R² معادل ۰/۶۷) و کمترین مقدار میانگین خطای مطلق (MAE برابر با ۰/۱۸ درصد)، بالاترین کارایی را داشته است و مدل رگرسیون خطی در تخمین کربن آلی خاک کمترین دقت را داشته است. اگرچه در این مطالعه مدل شبکه عصبی تخمین بهتری از میزان کربن آلی در مقایسه با مدل رگرسیونی، کریجینگ و کوکریجینگ داشته است اما فقط ۵۶ درصد تغییرات را توجیه می‌کند. در مطالعه پیله و و



شکل ۴- پهنه بندی کربن آلی خاک با روش‌های مختلف تخمین

شکل پهنه‌بندی مشابهت وجود دارد بطوریکه غالبیت با پهنه‌هایی است که در دامنه بین ۱ تا ۱/۵ درصد کربن آلی دارند. هر چند در روش کوکریجینگ مساحت پهنه‌های که نمایانگر مقادیر کربن ۲ تا ۲/۵ درصد هستند افزایش یافته است. همچنین تفاوت محسوسی بین روش‌های زمین‌آماري و مدل‌های رگرسیون و شبکه عصبی وجود دارد. بطوریکه در نقشه حاصل از تخمین با استفاده از مدل رگرسیونی غالبیت با پهنه‌های با مقادیر بالاتر است و با توجه به اینکه از نظر معیارهای ارزیابی نقشه حاصل از روش کریجینگ با روند بیرونی کیفیت بالاتری دارد، می‌توان گفت که مدل رگرسیونی بیش برآورد داشته است. عکس این قضیه در مورد پهنه بندی حاصل از مدل شبکه عصبی دیده می‌شود که در آن غالبیت با پهنه‌های دارای مقادیر کمتر

دلیل این امر این است که بخش دیگری از تغییرات ممکن است مربوط به اثر فاکتورهای غیر از توپوگرافی باشد. همچنین کیفیت و دقت مدل ارتفاع رقومی تهیه شده می‌تواند از عوامل اثر گذار بر کیفیت داده‌های کمکی و در نتیجه فرآیند تخمین باشد (۲۸).

پهنه بندی

پهنه بندی میزان کربن آلی خاک با هر یک از روش‌های تخمین پهنه بندی شد که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. مقایسه تصویری پهنه‌بندی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که دو روش رگرسیون کریجینگ و کریجینگ با روند بیرونی نتایج مشابهی را تولید نموده‌اند. ضمن اینکه بین کلیه روش‌های زمین‌آماري از نظر

همبستگی موجود بین متغیر اصلی و کمکی (که در اینجا مشخصه‌های عارضه‌ایست) در یک الگوریتم مناسب، کارآیی تخمین و پهنه‌بندی را در مقایسه با روش‌هایی که فقط از داده‌های میدانی استفاده می‌کنند، افزایش داد. به این ترتیب در شرایطی که امکان افزایش تراکم شبکه نمونه برداری با محدودیت روبروست برای تهیه نقشه‌های الگوی پراکنش مکانی متغیر اصلی از متغیر کمکی مناسب استفاده نمود.

با توجه به نتایج این مطالعه می‌توان گفت که هر چند وجود همبستگی بین مشخصه‌های حاصل از تحلیل عوارض زمین قابلیت استفاده از آنها را به عنوان متغیرهای کمکی در پیش بینی کربن آلی خاک به اثبات می‌رساند اما در بهترین حالت تجزیه و تحلیل عوارض زمین این نکته را باید در نظر گرفت که عواملی دیگر نیز در فرآیند تشکیل و تکامل خاک نقش دارند از اینرو نمی‌توان انتظار داشت که بتوان همه تغییرات را از این طریق پیش بینی نمود.

کربن آلی خاک است. مقایسه این نقشه‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم‌های تخمین مختلف می‌توانند منجر به نتایج مختلفی شده و آنچه که تعیین کننده در کیفیت نقشه‌های حاصل است توجه به معیارهای ارزیابی است.

نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد، همبستگی معنی داری بین اکثر مشخصه‌های عارضه‌ای با کربن آلی خاک وجود دارد و می‌توان از این شاخص‌ها به عنوان متغیر کمکی برای تخمین استفاده نمود. مقایسه کارآیی روش‌های تخمین مورد استفاده در این مطالعه نشان داد که روش کریجینگ با روند بیرونی به دلیل به کار بردن اطلاعات ساختار فضایی متغیر اصلی و همچنین استفاده از رابطه همبستگی موجود با متغیر کمکی (شاخص خیس) بیشترین کارآیی را دارد و می‌تواند مناسبترین الگوی پراکنش میزان کربن آلی خاک را در این منطقه نشان دهد. همچنین نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از رابطه

جدول ۶- مقایسه الگوریتم‌های مختلف برای تخمین میزان کربن آلی خاک

تخمین گر	الگوریتم و نحوه استفاده از اطلاعات متغیر کمکی برای تخمین	MAE	R ²
مدل رگرسیون خطی	استفاده از چند متغیر کمکی در قالب یک رابطه متقن	۰/۳۲	۰/۴۹
مدل شبکه عصبی	استفاده از چند متغیر کمکی در قالب یک رابطه نرم	۰/۲۹	۰/۵۶
کریجینگ معمولی	استفاده از اطلاعات ساختار مکانی متغیر اصلی	۰/۳۴	۰/۴۷
کوکریجینگ	استفاده از اطلاعات ساختار مکانی متغیر اصلی و کمکی	۰/۳۰	۰/۵۲
رگرسیون کریجینگ	استفاده از رابطه متقن و اطلاعات ساختار مکانی متغیر اصلی و کمکی	۰/۲۲	۰/۶۲
کریجینگ با روند بیرونی	استفاده از رابطه متقن و اطلاعات ساختار مکانی متغیر اصلی و کمکی	۰/۱۸	۰/۶۷

منابع

- ۱- ایوبی ش. و عزیزاده م. ۱۳۸۵. برآورد خصوصیات افق سطحی خاک با مدل رومی پستی و بلندی زمین (مطالعه موردی بخشی از حوزه آبخیز مهر سبزوار استان خراسان). نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ج. ۲، ص ۹۶-۸۵.
- ۲- پیله ور شهری ا.، ایوبی ش. و خادمی ح. ۱۳۸۹. مقایسه مدل شبکه عصبی و رگرسیون خطی چند متغیره در پیش بینی کربن آلی خاک به کمک داده های آنالیز سطح زمین (مطالعه موردی: منطقه ضرغام آباد سمیرم). نشریه آب و خاک. ج. ۲۴، ش. ۶، ص ۱۱۶۳-۱۱۵۱.
- 3- Arrouays D., Daroussin J., Kicin L., and Hassika P. 1998. Improving topsoil carbon storage prediction using a digital elevation model in temperate forest soils of France. *Soil Sci.* 163:103-108.
- 4- Ayoubi S., Pilehvar Shahri A., Mokhtari Karchegani P., and Sahrawat K.L. 2011. Application of Artificial Neural Network (ANN) to Predict Soil Organic Matter Using Remote Sensing Data in Two Ecosystems. *Biomass and remote sensing of biomass*. Published by InTech, Chapter 10: 181-196.
- 5- Chaplot V., Bernoux M., Walter C., Curmi P., and Herpin U. 2001. Soil carbon storage prediction in temperate hydromorphic soils using a morphologic index and digital elevation model. *Soil Sci.* 166:48-60.
- 6- Debella-Gilo M., Etzelmuller B., and Klakegg O. 2007. Digital Soil Mapping Using Digital Terrain Analysis and Statistical Modeling Integrated into GIS: Examples from Vestfold County of Norway *Proceedings, ScanGIS*. 237-253.
- 7- ESRI (Environmental Systems Resource Institute). 2009. ArcMap 9.3. ESRI, Redlands, California.
- 8- Florinsky I.V., Eilers R.G., Manning G.R., and Fuller L.G. 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environ. Modell. Software* 17:295-311.
- 9- Gamma Design Software. 2008. GS+ version 9. Geostatistics for the Environmental Sciences, LLC Plainwell, Michigan 49080.

- 10- Gessler P.E., Chadwick O.A., Chamran F., Althouse L.D., and Holmes K.W. 2000. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2046–2056.
- 11- Jenny H. 1941. *Factors of Soil Formation, A System of Quantitative Pedology*. Graw-Hill, New York.
- 12- McBratney A.B., Odeh I.O.A., Bishop T.F.A., Dunbar M.S., and Shatar T.M. 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*. 97:293–327.
- 13- McBratney A.B., Santos M.L.M., and Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*. 117(1-2): 3-52.
- 14- McKenzie N.J., and Ryan P.J. 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*. 89:67–94.
- 15- Minitab 16 Statistical Software. 2010. [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc. (www.minitab.com).
- 16- Moore I.D., Gessler P.E., Nielsen G.A., and Peterson G.A. 1993a. soil attributes prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:443–452.
- 17- Moore I.D., Gessler P.E., Nielsen G.A., and Peterson G.A. 1993b. soil-landscape continuum. p. 127–145. *In* R.G. Amundson et al. *J.* 57:443–452.
- 18- Moran C.J., and Bui E. 2002. Spatial data mining for enhanced soil map modelling. *International Journal of Geographical Information Science* 16:533– 549.
- 19- Mueller T.G., and Pierce F.J. 2003. Soil Carbon Maps: Enhancing Spatial Estimates with Simple Terrain Attributes at Multiple Scales. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:258–267.
- 20- Mueller T.G., Pierce F.J., Schabenberger O., and Warncke D.D. 2001. Map quality for site-specific fertility management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1547–1558.
- 21- Neuro solution for excel (version 5). 2005. NeuroDimension, Inc. (www.neurosolutions.com)
- 22- Odeh I.O.A., McBratney A.B., and Chittleborough D.J. 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*. 63:197–214.
- 23- Odeh I.O.A., McBratney A.B., and Slater B.K. 1997. Predicting soil properties from ancillary information: non-spatial models compared with geostatistical and combined methods. 5th International Geostatistics Congress, Wollongong, pp. 22– 27.
- 24- Park S.J., McSweeney K., and Lowery B. 2001. Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization. *Geoderma*. 103:249–272.
- 25- SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses). 2011. Version: 2.0.8.
- 26- Thompson J.A., and Kolka R.K. 2005. Soil Carbon Storage Estimation in a Forested Watershed using Quantitative Soil-Landscape Modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1086–1093.
- 27- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method, *Soil Sci.* 37: 29–38.
- 28- Wilson J.P, and Gallant J.C. 2000. *Tain analysis, principle and applications*. John Wiley and Sons, Inc. NY.
- 29- Ziadat F.M. 2005. Analyzing digital terrain attributes to predict soil attributes for a relatively large area. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1590–1599.

Estimation and Mapping Soil Organic Carbon content using Terrain Analysis (Case study: Mashhad, Iran)

A. Lakzian^{1*}- M. Fazeli Sangani²- A. Astarai³- A. Fotovat⁴

Received:29-08-2012

Accepted:27-01-2013

Abstract

This study was conducted to evaluate using terrain attributes derived from digital elevation model (DEM) as ancillary data to predict soil organic carbon (SOC) by implementing different statistical and geostatistical techniques. A linear regression model (LR), Artificial Neural Network model (ANN), ordinary kriging (OK), ordinary co-kriging (OCK), regression kriging (RK) and kriging with an external drift (KED) were performed to predict spatial distribution of SOC in an area of 2400 km² in mashhad, iran. The SOC was measured for 200 soil samples of the study area and their corresponding Terrain attributes value was extracted from derived from 10-m resolution DEM. correlation between measured SOC and individual terrain attributes was determined, the number of 160 data were used for model development and 40 as validation data set. Resulting maps of different interpolation methods were compared to evaluate map quality using MAE and R² criteria calculated from plotting measured versus estimated data. The results showed that there is a significant but not strong correlation between SOC and terrain attributes. The comparison of estimation techniques showed that the KED technique with wetness index as ancillary data has the best performance (MAE=0.18 %, R²=0.67) of all, but no significant difference with RK. There were modest differences between maps created with geostaistical technique but sensible difference with LR and ANN ones. The results of this study propose that although there is a significant correlation between SOC and terrain attributes therefore It can be use for enhancing the quality of map, but it is not able to express the spatial variability of SOC as it is necessary for detailed soil map. Because there is other factors controlling SOC spatial distribution

Keywords: Digital Elevation Model, Regression model, Artificial Neural Network, Geostatistics

1,2,3,4- Professor, PhD Student and Associate Professors of Soil Science Department, Agricultural College, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively

(*- Corresponding Author Email: alakzian@yahoo.com)