

ارزیابی روش‌های مختلف نقشه برداری رقومی برای پیش‌بینی کربن آلی خاک در عمق‌های مختلف (مطالعه‌ی موردی: دشت شهرکرد، استان چهارمحال و بختیاری)

زهره مصلح^۱، اعظم جعفری^۲، محمدحسن صالحی^۳، عیسی اسفندیارپور بروجنی^۴، عبدالمحمد محنت کش^۵
۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک دانشگاه شهرکرد، ۲- استاد گروه خاک دانشگاه شهرکرد، ۳- استادیار گروه خاک دانشگاه باهنر کرمان، ۴- استادیار گروه خاک دانشگاه ولیعصر رفسنجان، ۵- عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی شهرکرد

چکیده

به منظور بررسی کارایی روش‌های مختلف نقشه برداری رقومی برای پیش‌بینی کربن آلی در عمق‌های مختلف خاک دشت شهرکرد استان چهارمحال و بختیاری، ۱۲۰ خاک رخ با فواصل تقریبی ۷۵۰ متر حفر، تشریح و از تمامی افق‌های ژنتیکی آن‌ها نمونه برداری صورت گرفت. سپس، میانگین وزنی میزان کربن آلی برای چهار عمق صفر تا ۲۵، ۲۵ تا ۵۰، ۵۰ تا ۷۵ و ۷۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر محاسبه گردید. پیش‌بینی کربن آلی در هر عمق با استفاده از مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون درختی توسعه یافته، خطی تعمیم یافته و خطی چندمتغیره انجام شد. نتایج نشان داد که کارایی مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی میزان کربن آلی خاک در هر یک از عمق‌های مورد مطالعه، یکسان می‌باشد. در تمامی مدل‌ها، جذر میانگین مربع خطا از سطح به عمق کاهش یافت. همچنین در تمامی عمق‌ها، اجزای سرزمین مهم‌ترین پارامترهای محیطی در بیان تغییرات کربن آلی بودند. ماهیت ویژگی مورد بررسی و تعداد نمونه‌ها می‌توانند بر صحت نتایج مؤثر باشند.

واژه‌های کلیدی: اجزای سرزمین، شبکه‌ی عصبی مصنوعی، مدل‌های رگرسیونی

مقدمه

با توجه به اینکه تغییرپذیری ویژگی‌های خاک بر نتایج ارزیابی تناسب اراضی تأثیرگذار هستند اطلاعات کافی و دقیق از ویژگی‌های خاک و تغییرات آن‌ها می‌تواند گامی جدید در راستای بهره‌وری مناسب از اراضی باشد. نقشه‌ی خاک از جمله مهم‌ترین منابع اطلاعاتی است که برای بهبود طبقه‌بندی تناسب اراضی و آمایش سرزمین به کار برده می‌شود (Van Ranst et al., ۱۹۹۶). در این راستا نقشه برداری رقومی خاک، به عنوان یکی از فنون جدید نقشه برداری، با بررسی تغییرات پیوسته‌ی خاک، تلاش می‌کند تا بر اساس پارامترهای محیطی که به سادگی قابل دست‌یابی هستند؛ کلاس‌های خاک یا ویژگی‌های آن را با دقت بالا پیش‌بینی کند. در این روش، برای کاهش وقت و هزینه، پیش‌بینی مکانی خاک‌ها و ویژگی‌های آن‌ها بر اساس ارتباط با پارامترهای محیطی انجام می‌شود و در این زمینه، مدل‌های مختلفی مانند رگرسیون لاجیستیک، شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون درختی توسعه یافته استفاده می‌شوند. یکی از موضوعات مهم در تکنیک نقشه برداری رقومی، مدل مورد استفاده برای ارتباط دادن پارامترهای محیطی با ویژگی مورد بررسی می‌باشد (Brungard et al., ۲۰۱۵). همچنین کاربرد موفقیت‌آمیز نقشه برداری رقومی خاک به میزان داده‌های موجود از منطقه‌ی مطالعاتی و پارامترهای محیطی استفاده شده در مدل بستگی دارد (Stoorvogel et al., ۲۰۰۹).

کربن آلی خاک تأثیر زیادی بر سایر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک دارد و از شاخص‌های مهم کیفیت خاک محسوب می‌شود (Dexter et al., ۲۰۰۸). به همین دلیل، اطلاع از میزان و چگونگی تغییرات کربن آلی خاک برای ارزیابی کیفیت و مدیریت بهینه‌ی خاک، سودمند خواهد بود. آدهیکاری و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات کربن آلی خاک را در پنج عمق (صفر تا ۵، ۵ تا ۱۵، ۱۵ تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر) با استفاده از مدل رگرسیون کریجینگ و بر اساس اطلاعات بارندگی، شاخص خیس، ارتفاع، نقشه‌ی خاک، نقشه‌ی زمین‌شناسی و کاربری منطقه، مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که میزان بارندگی و نوع کاربری از مهم‌ترین عوامل در پیش‌بینی تغییرات کربن آلی هستند. گریم و همکاران (۲۰۰۸) تغییرات کربن آلی خاک را در عمق‌های مختلف (صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) با استفاده از مدل جنگل‌های تصادفی بررسی کردند و نشان دادند که اجزای سرزمین (شیب، شاخص توپوگرافی)، تغییرات کربن آلی را در خاک سطحی به خوبی توصیف می‌کنند. در ایران، مطالعات اندکی در رابطه با مقایسه‌ی روش‌های نقشه برداری رقومی ویژگی‌های خاک در عمق‌های مختلف خاک انجام شده است و اکثر مطالعات در مناطقی با تغییرپذیری زیاد فاکتورهای خاک‌سازی انجام گرفته‌اند. از طرفی، تغییرات کربن آلی خاک در مناطق مسطح در عمق‌های مختلف و با استفاده از روش‌های گوناگون مدل‌سازی رقومی، مورد توجه کافی قرار نگرفته است. این در حالی است که برای ارزیابی تناسب اراضی برای بیش‌تر گیاهان زراعی، نیاز به اطلاعات دقیق از میزان کربن آلی خاک تا عمق یک متر می‌باشد. در پژوهش حاضر، کارایی روش‌های مختلف نقشه برداری رقومی به منظور پیش‌بینی کربن آلی خاک در عمق‌های مختلف در دشت شهرکرد استان چهارمحال و بختیاری مورد مقایسه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه با مساحت تقریبی ۸۸۰۰ هکتار شامل بخشی از اراضی دشت شهرکرد می‌باشد که بین طول‌های جغرافیایی ۵۲°۵۰ تا ۵۹°۵۰ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۱۳°۳۲ تا ۲۳°۳۲ شمالی قرار گرفته است. میانگین بارندگی و دمای سالانه‌ی منطقه، به ترتیب ۳۲۲ میلی‌متر و ۵/۱۲ درجه‌ی سلسیوس و میانگین ارتفاع این منطقه از سطح دریا ۲۰۵۰ متر می‌باشد. بر اساس مطالعات خاکشناسی نیمه‌تفصیلی (Rossiter, ۲۰۰۰)، ۱۲۰ خاک رخ با فواصل تقریبی ۷۵۰ متر، حفر گردید و از تمامی افق‌های ژنتیکی آن‌ها نمونه‌برداری صورت گرفت. نمونه‌های خاک، پس از هواخشک شدن در محیط آزمایشگاه، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. برای تمامی افق‌ها، کربن آلی به روش سوزاندن تر (Walkley and Black, ۱۹۳۴) تعیین گردید و پس از آن با استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی، میزان کربن آلی برای چهار عمق صفر تا ۲۵، ۲۵ تا ۵۰، ۵۰ تا ۷۵ و ۷۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر محاسبه گردید.

برای پیش‌بینی میزان کربن آلی خاک در عمق‌های مختلف، پارامترهای محیطی مختلفی در این پژوهش استفاده شدند. با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با تفکیک مکانی ۳۰ متر (تهیه‌شده از وب‌سایت مدل رقومی ارتفاع جهانی استر) ویژگی‌های اولیه و ثانویه‌ی مدل رقومی ارتفاع شامل درصد شیب، جهت شیب، انحنای خالص، انحنای نیم‌رخ، انحنای سطحی، جهت جریان، تجمع جریان، تابش مستقیم، مدت تابش، تابش پخشیده، شاخص قدرت جریان، شاخص خبسی و شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا تعیین گردیدند. شاخص‌های سنجش از دور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ (سال ۲۰۱۴) به‌دست آمدند. همچنین نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه (با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰)، نقشه‌ی خاک موجود در منطقه (با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰) و نقشه‌ی ژئومورفولوژی منطقه به‌عنوان لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده قرار گرفتند.

در نهایت، مطابق با اندازه‌ی پیکسلی پیشنهاد شده برای نقشه‌برداری در سطح نیمه‌تفصیلی (McBratney et al., ۲۰۰۳)، تمامی پارامترهای کمکی به نقشه‌هایی با اندازه‌ی پیکسل ۵۰ متر تبدیل شدند و با برآزش مدل‌های مختلف شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون درختی توسعه‌یافته، مدل خطی تعمیم‌یافته و مدل خطی چندمتغیره بر پارامترهای محیطی و همچنین اطلاعات کربن آلی در نرم‌افزار R، مهم‌ترین پارامترهای محیطی در پیش‌بینی میزان کربن آلی خاک برای هر عمق تعیین گردیدند و نقشه‌های توزیع مکانی کربن آلی در عمق‌های مختلف تهیه شدند.

داده‌ها به داده‌های آموزشی (۸۰ درصد) و اعتبارسنجی (۲۰ درصد) تقسیم شدند. پس از آن با مقایسه‌ی داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده، با استفاده از شاخص‌های جذر میانگین مربع خطا و میانگین خطا، صحت مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی کربن آلی در عمق‌های مختلف تعیین و مقایسه گردید.

نتایج و بحث

میانگین کربن آلی از ۰۶/۱ درصد در خاک سطحی تا ۴۲/۰ درصد در عمق ۷۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر متغیر است که نشان‌دهنده‌ی کاهش میزان کربن آلی خاک با عمق می‌باشد و پایین‌ترین عمق، کم‌ترین تغییرپذیری کربن آلی را دارد (جدول ۱). نتایج مدل‌سازی نشان داد که کارایی مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی میزان کربن آلی خاک در هر یک از عمق‌های مورد مطالعه، یکسان می‌باشد و تفاوت در مقادیر جذر میانگین مربع خطا و میانگین خطا برای مدل‌های مختلف از نظر آماری (در سطح احتمال یک درصد) معنی‌دار نیست. بنابراین، می‌توان بیان نمود که در این پژوهش، نوع مدل استفاده‌شده تأثیری در صحت پیش‌بینی نداشته است (جدول ۲).

نتایج بیانگر این است که در تمامی عمق‌ها، در بین پارامترهای محیطی (لایه‌های اطلاعاتی) مورد مطالعه، اجزای سرزمین تأثیر بسیار زیادی در پیش‌بینی کربن آلی دارند (جدول ۳). تأثیر اجزای سرزمین در یک منطقه‌ی مسطح حائز اهمیت است. همچنین نتایج این پژوهش حاکی از آن است که برای پیش‌بینی کربن آلی خاک در عمق‌های مختلف، صرف‌نظر از نوع مدل بکار برده شده، ارتفاع، تابش پخشیده و شاخص کربنات، مهم‌ترین پارامترها در پیش‌بینی کربن آلی خاک می‌باشند و اجزای سرزمین حتی در عمق‌های پایین نیز می‌توانند نقش مهمی در پیش‌بینی کربن آلی خاک ایفا نمایند. اجزای سرزمین با تأثیر بر درجه حرارت و میزان رطوبت، توزیع مکانی خاک و ویژگی‌های آن را کنترل می‌کنند و تابش پخشیده با تأثیری که در کنترل دما دارد می‌تواند بر میزان پوشش گیاهی مؤثر باشد (Marques and Mora, ۱۹۹۲).

جدول ۱. برخی از پارامترهای آماری کربن آلی اندازه‌گیری شده در عمق‌های مختلف خاک

عمق (سانتی‌متر)	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
۲۵-۰	۰/۸۰	۸/۳	۰/۶۱	۷/۰	۰/۶۶
۵۰-۲۵	۰/۸۰	۰/۳	۶۵/۰	۴۸/۰	۰/۷۳
۷۵-۵۰	۱۲/۰	۶/۲	۴۹/۰	۳۳/۰	۰/۶۷
۱۰۰-۷۵	۱۲/۰	۴۴/۱	۴۲/۰	۲۴/۰	۰/۵۷

جدول ۲. معیارهای ارزیابی صحت پیش بینی مدل ها در عمق های مختلف

مدل های مورد استفاده								عمق (سانتی متر)
ANN		MLR		BRT		GLM		
میانگین خطا	جذر میانگین مربع خطا	میانگین خطا	جذر میانگین مربع خطا	میانگین خطا	جذر میانگین مربع خطا	میانگین خطا	جذر میانگین مربع خطا	
-۲۴/۰	۵۵/۰	-۲۱/۰	۵۰/۰	-۲۰/۰	۵۳/۰	-۲۱/۰	۵۰/۰	۲۵-۰
-۰۵/۰	۳/۰	-۰۷/۰	۳۲/۰	-۱/۰	۳۱/۰	-۰۵/۰	۲۸/۰	۵۰-۲۵
-۰۹/۰	۲۵/۰	-۰۹/۰	۲۵/۰	-۰۸/۰	۲۷/۰	-۰۷/۰	۲۵/۰	۷۵-۵۰
-۰۹/۰	۱۸/۰	-۰۸/۰	۲۱/۰	۰۷/۰	۲۲/۰	-۰۸/۰	۱۹/۰	۱۰۰-۷۵

GLM: مدل خطی تعمیم یافته، BRT: مدل رگرسیون درختی توسعه یافته، MLR: مدل خطی چند متغیره و ANN: مدل شبکه عصبی مصنوعی

جدول ۳. پارامترهای محیطی انتخاب شده توسط هر مدل برای پیش بینی کربن آلی خاک در عمق های مختلف

مدل های مورد استفاده				عمق (سانتی متر)
ANN	MLR	BRT	GLM	
تابش پخشیده، ارتفاع و شاخص قدرت جریان	ارتفاع و شاخص کربنات	ارتفاع، شاخص کربنات و تابش پخشیده	ارتفاع و شاخص کربنات	۲۵-۰
شاخص کربنات و شاخص رس	شاخص همواری دره با درجه ای تفکیک بالا، ارتفاع و شاخص کربنات	ارتفاع، شاخص کربنات و تابش پخشیده	ارتفاع، شاخص کربنات و تابش پخشیده	۵۰-۲۵
ارتفاع و شاخص خیسی	شاخص همواری دره با درجه ای تفکیک بالا، ارتفاع و مدت تابش	ارتفاع، شاخص کربنات و تابش پخشیده	ارتفاع و تابش پخشیده	۷۵-۵۰
شاخص خیسی و شاخص همواری دره با درجه ای تفکیک بالا	انحنای خالص، انحنای نیم رخ و انحنای سطحی	ارتفاع، شاخص کربنات و تابش پخشیده	ارتفاع، شاخص کربنات و تابش پخشیده	۱۰۰-۷۵

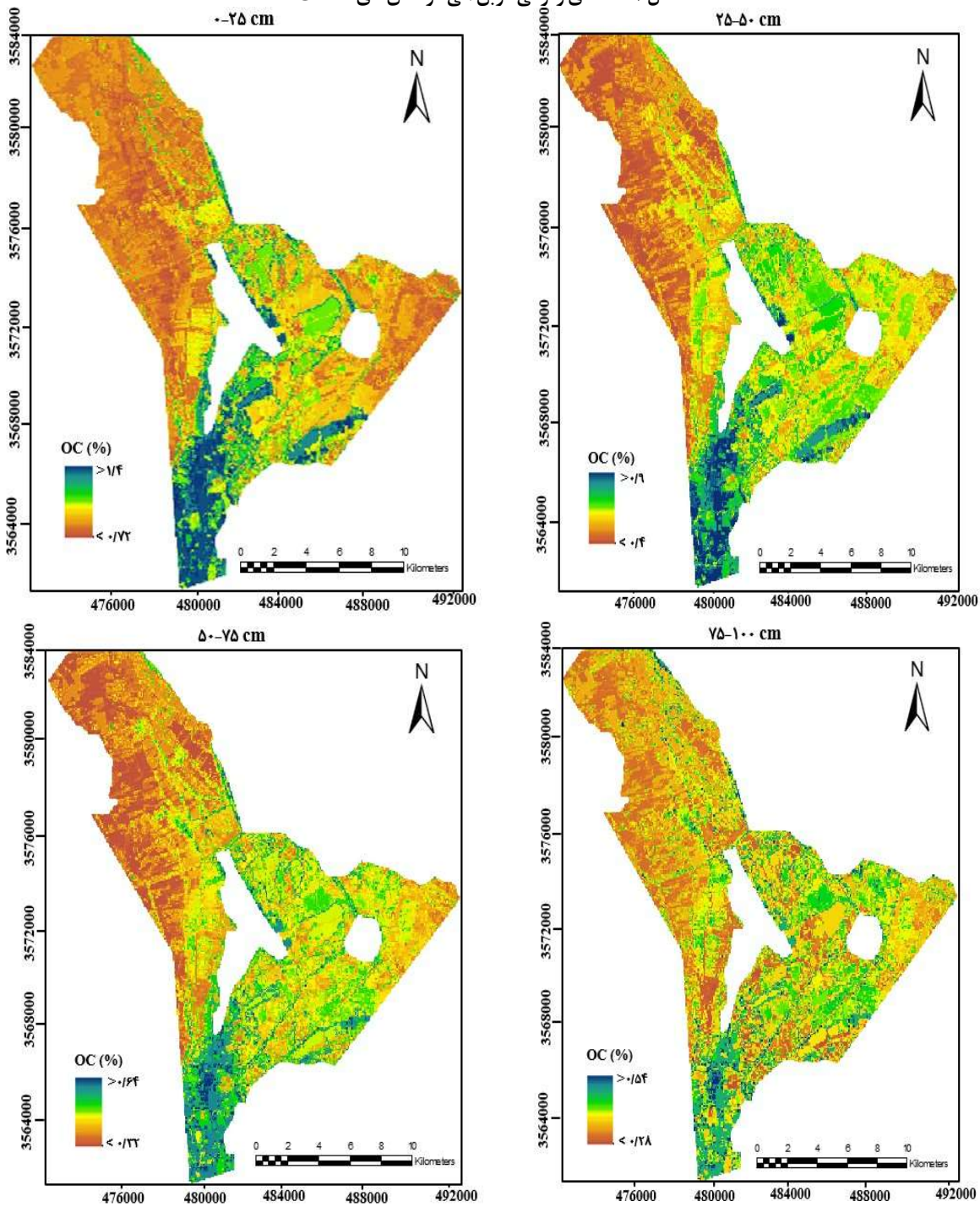
GLM: مدل خطی تعمیم یافته، BRT: مدل رگرسیون درختی توسعه یافته، MLR: مدل خطی چند متغیره و ANN: مدل شبکه عصبی مصنوعی

در تمامی مدل ها، جذر میانگین مربع خطا از سطح به عمق کاهش می یابد و بیشترین و کمترین صحت پیش بینی به ترتیب، مربوط به عمق ۷۵ تا ۱۰۰ و صفر تا ۲۵ سانتی متر است (جدول ۲). با توجه به تغییرپذیری زیاد کربن آلی در سطح خاک و این که میزان این ویژگی در لایه های سطحی خاک به طور قابل توجهی تحت تاثیر مدیریت است (Farquharson *et al.*, ۲۰۰۳) به نظر می رسد که پارامترهای محیطی به خوبی نتوانسته اند ارتباط زیادی با میزان کربن آلی در سطح خاک داشته باشند. ویژگی های سطحی خاک به میزان زیادی متأثر از نوع مدیریت هستند و عمق های پایین تر خاک می توانند ارتباط خوبی با اجزای سرزمین برقرار کنند (Moore *et al.*, ۱۹۹۲). ارتفاع، شیب و نوع خاک، مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار در پیش بینی کربن آلی خاک در دانمارک بوده اند (Bou Kheir *et al.*, ۲۰۱۰). درجی و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که ارتفاع مهم ترین فاکتور در پیش بینی کربن آلی خاک تا عمق یک متر بوده و با افزایش عمق، جذر میانگین مربع خطا و ضریب تبیین کاهش یافته است.

به دلیل مشابه بودن نقشه های پیش بینی حاصل از مدل های مختلف فقط نقشه های رقوم کربن آلی برای عمق های مختلف توسط مدل رگرسیون درختی توسعه یافته در شکل ۱ آورده شده اند. نقشه ها نشان می دهند که در تمامی عمق ها، بیشترین میزان کربن آلی مربوط به قسمت های جنوبی (کم ارتفاع ترین مناطق) منطقه ای مورد مطالعه می باشد. معمولاً در مناطق کم ارتفاع (اراضی پست) تجمع آب بیش تر است. بنابراین، اکسیژن کمتری برای تجزیه ی بقایای گیاهی وجود دارد و در نتیجه، سرعت تولید مواد آلی از سرعت تجزیه ی آن ها بیش تر است (Alan Nath, ۲۰۰۶).

بر اساس نتایج به دست آمده می توان بیان نمود که در منطقه ای مورد مطالعه، تأثیر پارامترهای محیطی انتخاب شده برای پیش بینی، به مراتب بیش تر از نوع مدل استفاده شده می باشد. بنابراین، به نظر می رسد که شناخت و آگاهی کارشناس از منطقه ای مورد مطالعه برای انتخاب پارامترهای محیطی که بتوانند تغییرات ویژگی های مورد بررسی را نشان دهند؛ سهم بسیار مهمی در صحت نتایج حاصل از روش نقشه برداری رقوم دارد. هر چند که ماهیت ویژگی مورد بررسی، میزان داده های استفاده شده برای آموزش مدل و اینکه تا چه میزان پارامترهای محیطی بتوانند تغییرات را توجیه نمایند از مسائل مهم در استفاده از روش های نوین می باشند که می توانند صحت نتایج را تحت تأثیر قرار دهند. پیشنهاد می گردد که روش نقشه برداری رقوم برای پیش بینی کربن آلی خاک در مناطق دیگر، با سایر مدل ها و با تراکم بیش تر نمونه نیز انجام گردد تا با اطمینان بیش تری بتوان در مورد تأثیر نوع مدل و کارایی آن برای پیش بینی کربن آلی خاک در عمق های مختلف اظهار نظر نمود.

شکل ۱. نقشه‌ی رقوم‌ی کربن آلی در عمق‌های مختلف





چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - پیدایش، رده بندی، ارزیابی خاک و زمین نما

منابع

- Adhikari K., Hartemink A.E., Minasny B., Bou Kheir R. and Greve M.B. ۲۰۱۴. Digital mapping of soil organic carbon contents and stocks in Denmark. PLOS ONE, ۹: ۱-۱۳.
- Alan Nath D. ۲۰۰۶. Soil landscape modeling in the Northwest Iowa plains. Retrospective Theses and Dissertations. pp. ۸۸۶.
- Bou Kheir R., Greve M.H., Bocher PK., Greve M.B. and Larsen R. ۲۰۱۰. Predictive mapping of soil organic carbon in wet cultivated lands using classification-tree based models: the case study of Denmark. Journal of Environmental Management, ۹۱: ۵۰-۶۰.
- Brungard C.W., Boettinger J.L., Duniway M.C., Wills S.A., Edwards T. ۲۰۱۵. Machine learning for predicting soil classes in three semi-arid landscapes. Geoderma, ۲۳۹-۲۴۰: ۶۸-۸۳
- Dexter A.R., Richard G., Arrouays D., Czyz E.A., Jolivet C. and Duval O. ۲۰۰۸. Complexed organic matter controls soil physical properties. Geoderma, ۱۴۴: ۶۲۰-۶۲۷.
- Dorji T., Odeh O.A., Field D.J. and Baillie I.C. ۲۰۱۴. Digital soil mapping of soil organic carbon stocks under different land use and land cover types in montane ecosystems, Eastern Himalayas. Forest Ecology and Management, ۳۱۸: ۹۱-۱۰۲.
- Farquharson R.J., Schwenke G.D., Mullen J.D. ۲۰۰۳. Should we manage soil organic carbon in Vertosols in the northern grains region of Australia? Australian Journal of Experimental Agriculture, ۴۳: ۲۶۱-۲۷۰.
- Grimm R., Behrens T., Marker M. and Elsenbeer H. ۲۰۰۸. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island: Digital soil mapping using RandomForests analysis. Geoderma, ۱۴۶: ۱۰۲-۱۱۳.
- Marques M.A. and Mora E. ۱۹۹۲. The influence of aspect on runoff and soil loss in a Mediterranean burnt forest (Spain). Catena, ۱۹: ۳۳۳- ۳۴۳.
- McBratney A.B., Mendonc M.L. and Minasny B. ۲۰۰۳. On digital soil mapping. Geoderma, ۱۱۷: ۳- ۵۲.
- Moore I.D., Gessler P.E., Nielsen G.A. and Peterson G.A. ۱۹۹۳. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Science Society America Journal. ۵۷: ۴۴۳-۴۵۲.
- Rossiter D.G. ۲۰۰۰. Methodology for Soil Resource Inventories. Soil Science Division, International institute for Aerospace Survey & Earth Science (ITC).
- Stoorvogel J., Kempen J., Heuvelink B. and Bruin S. ۲۰۰۹. Implementation and evaluation of existing knowledge for digital soil mapping in Senegal. Geoderma, ۱۴۹: ۱۶۱-۱۷۰.
- Van Ranst E. Tang H. Groenemam R. and Sinthurahat S. ۱۹۹۶. Application of fuzzy logic to land suitability for rubber production in peninsular Thailand. Geoderma, ۷۰: ۱-۱۹.
- Walkley A. and Black I.A. ۱۹۳۴. An examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromic acid in soil analysis. Soil Science Society of America Journal, ۷۹: ۴۵۹-۴۶۵.

Abstract

To investigate the ability of different techniques of digital soil mapping (DSM) to predict organic carbon (OC) at different depths in the Shahrekord plain of Chaharmahal-Va-Bakhtiari province, ۱۲۰ pedons with approximate distance of ۷۵۰ m were excavated, described and soil samples were taken from different genetic horizons. The OC values calculated at depths of ۰-۲۵, ۲۵-۵۰, ۵۰-۷۵ and ۷۵-۱۰۰ cm. Artificial neural networks, boosted regression tree, generalized linear and multiple linear regressions were used to predict OC. Results showed that different models had the same ability for prediction of OC in all depths. For all of the models, RMSE values showed a decreasing trend with depth. Also, results indicated that terrain attributes are the main auxiliary information to explain OC variation for all depths. The estimation accuracy can be influenced by the variability of soil properties and sampling density.