

برآورد مکانی ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک با استفاده از داده‌های طیفی و رقومی

کمال خسروی اقدم^۱، نفیسه یغمائیان مهابادی^۲، حسن رضانیپور^{۳*}، سالار رضاییپور^۴، زهره مصلح^۵

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳)

چکیده

موجودیت خاک وابسته به پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن است. ذخیره کربن آلی خاک یکی از عوامل کلیدی خاک است که تغییرات آن بر روی تمامی این پارامترها اثر دارد. در این راستا، این تحقیق به منظور پهنه‌بندی ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک در بخشی از حوضه آبخیز سیمینهرود انجام شد. نمونه‌برداری از خاک با استفاده از روش مکعب لاتین مشروط در ۲۱۰ نقطه از عمق ۳۰-۰ سانتی متری خاک سطحی انجام و مقدار کربن آلی خاک اندازه‌گیری شد. سپس، ذخیره کربن آلی خاک تعیین گردید. در مرحله بعد، مدل جنگل تصادفی اجرا و پارامترهای مؤثر برای تخمین ذخیره کربن آلی خاک شناسایی شد (در این مرحله جهت مدل‌سازی ذخیره کربن آلی خاک از شاخص بازتابش طیفی استاندارد شده و داده‌های استخراجی از مدل رقومی ارتفاعی استفاده شد). در انتها، روش جنگل تصادفی ۱۰۰ بار اجرا شد و پهنه‌بندی مقادیر بیشترین (صدک ۹۵)، کمترین (صدک ۵) و میانگین ذخیره کربن آلی خاک برای هر پیکسل با قدرت تفکیک مکانی ۳۰×۳۰ متر به دست آمد. جهت به دست آوردن ضریب تغییرات با ضریب اطمینان ۹۰ درصد، صدک ۹۵ و ۵ درصد از هم کسر شد و ضریب تغییرات با استفاده از تقسیم آن به میانگین به دست آمد. نتایج نشان داد که ضریب دقت (R^2) مدل جنگل تصادفی ۰/۸۱ و ضرایب صحت شامل RMSE و MAE به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۳۴ (kg m^{-2}) می‌باشد. نتایج پهنه‌بندی ضریب تغییرات برای مقدار ذخیره کربن آلی خاک منطقه مورد مطالعه نشان داد که مقدار تغییرات این پارامتر بین ۳/۹-۵۵ درصد متغیر می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از پهنه‌بندی ضریب تغییرات منطقه مورد مطالعه، میانگین بیشترین و کمترین میزان تغییرات در کاربری زراعت دیم و مراتع مشاهده شد. احتمالاً کشت مداوم و بازگشت کم ماده آلی در زراعت دیم، باعث افزایش ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک در کاربری زراعت دیم شده است.

واژه‌های کلیدی: جنگل تصادفی، زراعت دیم، مدل رقومی ارتفاع، مکعب لاتین مشروط چندگانه

خسروی اقدم ک.، یغمائیان مهابادی ن.، رضانیپور ح.، رضاییپور س.، مصلح ز. ۱۴۰۱. برآورد مکانی ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک با استفاده از داده‌های طیفی و رقومی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۰، شماره ۳، صفحه: ۹۰-۱۰۳.

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۴- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۵- استادیار پژوهشی، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

* پست الکترونیک: hasramezanpour@yahoo.com

مقدمه

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک، مقدار ماده آلی^۱ و به تبع آن مقدار ذخیره کربن آلی خاک^۲ است که علاوه بر اهمیت آن از لحاظ کشاورزی، پیوند عمیقی با رفتار و ویژگی‌های تولیدی خاک مانند فراهم نمودن عناصر غذایی برای گیاهان، نگه‌داشت آب، پایش آلاینده‌ها، پایداری در برابر تخریب فیزیکی و ساخت فرآورده‌های گیاهی دارد (Maia et al., 2010). مواد آلی، ترکیبات کربنی تولید شده به‌وسیله گیاهان، جانوران و ریز جانداران در مراحل مختلف تجزیه می‌باشند که سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی، حاصلخیزی و بیولوژیکی خاک می‌شود (Gou et al., 2017)؛ بنابراین تغییر در فراوانی و ترکیب این ماده حیاتی، اثرات اساسی روی فرآیندهای که در هر سیستم رخ می‌دهد، دارد. در این راستا، ذخیره و تثبیت این ماده در خاک، نقش اساسی در کمک به بقاء و رویش گیاهان در سیستم‌های خاکی خواهد داشت (Wood et al., 2016). به‌طور کلی، بیان شده است که مقدار ماده آلی خاک، کلید بهبود ویژگی‌های فیزیکی، حاصلخیزی و باوری خاک‌ها است (Hong et al., 2019).

با وجود کارکردهای حیاتی ماده آلی در فرآیندهای خاک، هنوز درک درستی از مقدار ذخیره کربن آلی خاک در کاربری‌های مختلف، شیب و اقلیم‌های گوناگون وجود ندارد؛ بنابراین نیاز به انجام مدل‌سازی، تخمین مقدار ذخیره کربن آلی خاک وجود دارد (Keskin et al., 2019). شکل‌گیری ویژگی‌های خاک‌ها از قبیل ماده آلی خاک در طول زمین‌نما وابسته به فاکتورهای خاکساز (CLOPRT) می‌باشد (Paustian et al., 1997a). استفاده از این روش به‌دلیل سختی نمونه‌برداری‌ها و پیمایش‌های زیاد زمینی، یکی از مشکلات اساسی در مطالعات کربن آلی خاک می‌باشد (Kunkel et al., 2019). در این راستا، جهت حل نسبی این مشکل و افزایش دقت مطالعات ذخیره کربن آلی خاک، روش‌های نقشه‌برداری رقومی^۳ بر مبنای مدل SCORPAN توسعه یافته‌اند (McBratney et al., 2003) و بسیاری از محققان از متغیرهای محیطی استخراجی از مدل‌های رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌ای بر مبنای

مدل SCORPAN بهره گرفته و ذخیره کربن آلی خاک را تخمین زده و آن را مدل‌سازی کرده‌اند (Gomes et al., 2019; Guo et al., 2019; Wang et al., 2019; Zhang et al., 2020).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک مقدار کربن آلی خاک شاخصی مهمی برای تعیین کیفیت خاک می‌باشد؛ زیرا در این مناطق مقدار ورودی کربن به‌دلیل پوشش گیاهی ضعیف یا متوسط ناچیز تا متوسط می‌باشد (Chen et al., 2010). در این راستا، مطالعه ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک می‌تواند راهی مفید برای اطلاع از تغییرات مکانی این ویژگی مهم خاک باشد (Gomes et al., 2019).

حوضه آبخیز سیمینه‌رود یکی از بزرگترین و پراهمیت‌ترین زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه و شمالغرب ایران می‌باشد. قسمت اعظم کاربری این حوضه به کشاورزی دیم اختصاص دارد که میزان بازگشت ماده آلی به خاک در این کاربری به‌دلیل برداشت زیاد از زمین‌های زراعی به‌شدت متغیر است. بنابراین، آگاهی از میزان تغییرات ذخیره کربن آلی خاک می‌تواند به رشد کشاورزی در این منطقه بسیار کمک کند. در این راستا، این مطالعه با هدف به‌دست آوردن توزیع مکانی ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک با استفاده از داده‌های بازتابش طیفی^۴ استاندارد شده و داده‌های استخراجی از مدل رقومی ارتفاع^۵ در بخشی از حوضه آبخیز سیمینه‌رود انجام شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

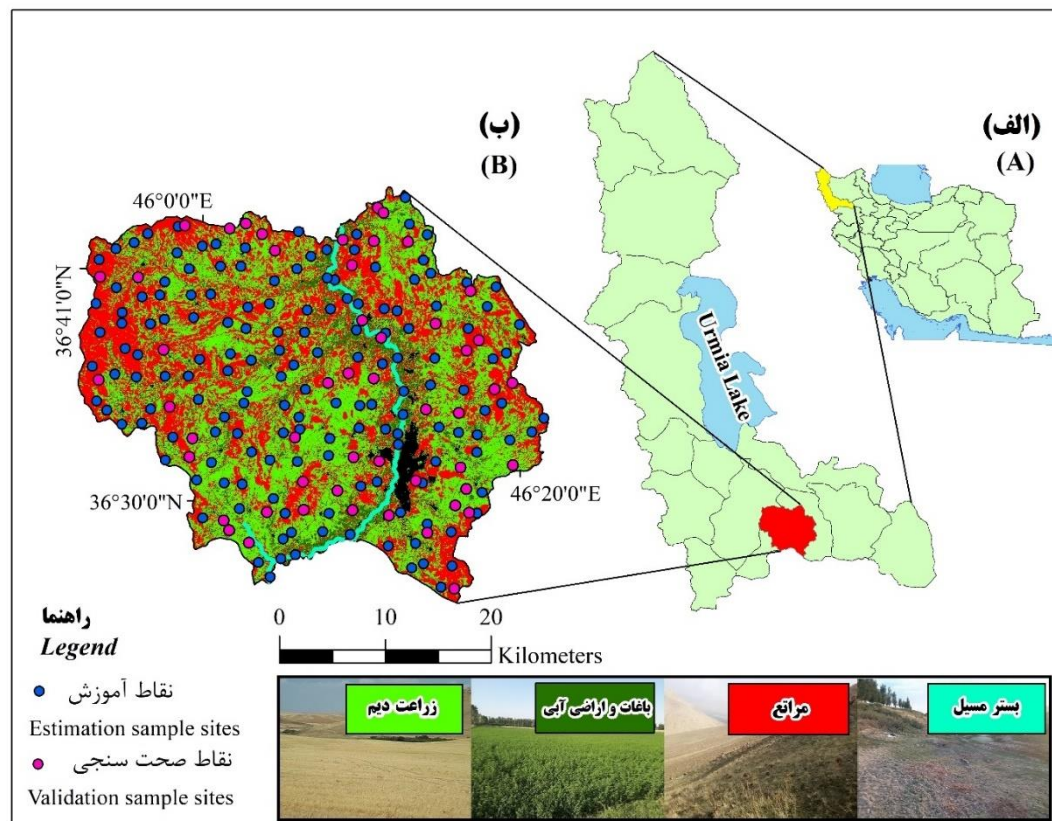
این پژوهش در بخشی از حوضه آبخیز سیمینه‌رود (یکی از زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه) به مساحت تقریبی $1/14 \times 10^2$ کیلومتر مربع در بین طول شرقی $45^{\circ}52'00''$ تا $46^{\circ}23'00''$ و عرض شمالی $36^{\circ}24'00''$ تا $36^{\circ}46'00''$ در شمالغرب ایران انجام شد (شکل ۱). بر مبنای مدل رقومی ارتفاع و نقشه توپوگرافی منطقه، کمترین ارتفاع منطقه مورد مطالعه ۱۳۱۱ و بیشترین ارتفاع آن ۲۲۲۴ متر از سطح دریا می‌باشد. جهت شیب این منطقه، دارای انواع مختلف

4. Spectral Reflection
5. Digital elevation model

1. Organic matter
2. Soil Organic Carbon (SOC) stocks
3. Soil Digital Mapping (DSM)

رده‌های انتی‌سولز و انسپتی‌سولز قرار می‌گیرند؛ همچنین برخی از اراضی مرتفع این منطقه به شکل اراضی متفرقه مانند بیرون‌زدگی سنگی می‌باشد (موسسه تحقیقات خاک و آب، ۱۳۷۹).

جهت جغرافیایی و سیمای اراضی پست تا پیچیده می‌باشد؛ همچنین شیب منطقه، ۲ تا بیش از ۶۰ درصد با میانگین ۱۵/۲ درصد می‌باشد. خاک‌های این منطقه با داشتن افق‌های مشخصه عمقی کلسیک و کمبیک، در



شکل ۱- نمایی اجمالی از موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان (الف) و منطقه مورد مطالعه، کاربری اراضی و نقاط نمونه برداری (ب)

Figure.1. The overview of the study area in IRAN and West Azerbaijan provenance (A), Land uses map, and sampling points design (B)

(2002) برای غلبه بر این مشکل اغلب از ضریب تصحیح ۱/۳۲ برای تعدیل بازیابی کامل کربن آلی استفاده گردید (رابطه ۱).

$$\text{Corrected \% OC} = \text{Measured \% OC} \times 1.32 \quad (1)$$

جهت اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری از روش سیلندر استفاده شد. چون سنگریزه قادر به نگاه‌داری ذخیره کربن آلی خاک نمی‌باشد سنگریزه آن حذف شد تا وزن مخصوص ظاهری واقعی خاک به دست آید (Tian *et al.*, 2009). جهت حذف سنگریزه در ابتدا وزن مخصوص ظاهری نمونه‌های برداشتی به وسیله سیلندر، اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، تمامی نمونه‌ها شستشو شدند و مقدار

اندازه‌گیری ذخیره کربن آلی خاک و حذف خطای اندازه‌گیری ذخیره کربن آلی خاک

بعد از انجام نمونه‌برداری و هوا خشک کردن، نمونه خاک-ها جهت همگن‌سازی از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند و کربن آلی خاک با استفاده از روش والکلی-بلاک اندازه‌گیری شد (Nelson and Sommers, 1982). تحقیقات نشان داده است که بازیابی کربن آلی خاک به روش والکلی-بلاک به طور متوسط ۷۶ درصد است زیرا در ترکیبات آلی، کربن آلی به حالت احیا وجود دارد و می‌تواند اکسید شده و به CO_2 تبدیل شود. ولی کربنات‌ها (کربن‌های معدنی) خود به حالت اکسید وجود دارند و در واکنش‌های اکسیداسیون و احیا شرکت نمی‌کنند (Schumacher,)

استخراج شدند و همبستگی پیرسون (در سطح ۵ درصد) بین باندهای تصاویر ماهواره و مقدار ذخیره کربن آلی خاک به دست آمد. جهت کاهش مقدار داده‌ها، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی روی باندها دارای همبستگی معنادار با مقدار کربن آلی خاک انجام شد. لازم به ذکر است که با استفاده از رابطه ۴، مؤلفه اصلی با بیشترین همبستگی انتخاب و استاندارد سازی شد (Khosravi Aqdam *et al.*, 2021). این مراحل با استفاده از نرم‌افزارهای Arc GIS، ENVI و افزونه XL STAT نرم‌افزار Excel انجام شدند.

$$Z_{PC_i} = \frac{PC_i - \overline{PC_i}}{\sigma_{PC_i}} \quad (4)$$

در این رابطه $\overline{PC_i}$ و σ_{PC_i} به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد داده‌های PC_i و Z_{PC_i} مؤلفه اصلی استاندارد شده می‌باشند.

نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم بیشترین احتمال^۸ (Richards, 1986) تهیه شد. طبقه‌بندی نقشه کاربری اراضی به روش نظارت شده با کنترل ۱۰۰ نقطه زمینی از کاربری‌های مختلف و ۲۰۰ نقطه در نرم افزار Google earth انجام شد (Chi *et al.*, 2008). بر این اساس، کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه به چهار دسته بستر مسیل، دیم‌کاری، مراتع و باغات و اراضی آبی طبقه‌بندی شدند (شکل ۱-ب).

جهت طراحی شبکه نمونه‌برداری از روش مکعب لاتین مشروط چندگانه^۹ استفاده شد. در بسیاری از منابع، شیب، جهت شیب و کاربری اراضی به عنوان شاخص‌های محیطی مؤثر روی ذخیره کربن آلی خاک شناخته شده‌اند (Zhu *et al.*, 2019)؛ به همین دلیل این پارامترها به عنوان ورودی به روش مکعب لاتین مشروط چندگانه انتخاب شدند. با استفاده از این روش، تعداد ۲۱۰ نقطه با تراکم $0.184 \text{ (n/km}^2\text{)}$ جهت نمونه‌برداری از خاک‌های سطحی در داخل محیط نرم افزار R-Studio انتخاب شد (Minasny *et al.*, 2013). مکان‌های نمونه‌برداری با خطای ± 3 متر به وسیله Garmin GPS-Montana 680 شناسایی شدند و نمونه خاک‌ها از محل‌های تعیین‌شده

سنگریزه جدا شدند و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک و توزین شدند و مقدار آن از وزن اولیه اندازه‌گیری شده کسر شد و دوباره وزن مخصوص ظاهری واقعی خاک به دست آید. بعد از حذف سنگریزه باید عمق خاک با حذف سنگریزه نیز محاسبه می‌شد که برای این کار عمق معادل از رابطه ۲ محاسبه شد (Ellert *et al.*, 2002). سپس، مقدار ذخیره کربن آلی خاک با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد (Deng *et al.*, 2014).

$$h_i = \frac{D \times Bd_{\min}}{Bd_i} \quad (2)$$

$$SOC_D = \sum_n^i SOC_i \times Bd_i \times h_i \times 10 \quad (3)$$

در این روابط، h_i ، عمق معادل محاسبه شده برای نمونه i بر حسب متر، D ، عددی ثابت است که وابسته به عمق در نمونه-برداری اولیه است و همان ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. Bd_{\min} وزن مخصوص ظاهری مربوط به کم چگال‌ترین (فاقد سنگریزه) خاک بررسی شده در بین نمونه‌ها بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب، Bd_i وزن مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده (با حذف سنگریزه نمونه i)، SOC_D ، ذخیره کربن آلی خاک بر حسب Kg/m^2 و SOC_i مقدار کربن آلی خاک می‌باشد.

تهیه مدل رقومی ارتفاع، تصاویر ماهواره‌ای و انجام تصحیحات، تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه و طراحی شبکه نمونه‌برداری

در این تحقیق، مدل رقومی ارتفاعی^۱ و تصاویر ماهواره‌ای^۲ منطقه مورد مطالعه (برای ماه May سال ۲۰۱۹)، از پایگاه داده سازمان زمین شناسی آمریکا^۳ تهیه شدند (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). پیش‌پردازش‌ها شامل حذف خطای‌های مدل رقومی ارتفاع، تصحیحات رادیومتریک^۴ و هندسی^۵ تصاویر ماهواره‌ای به ترتیب در نرم‌افزارهای SAGA-GIS و ENVI انجام شد. بعد از انجام تصحیحات، شاخص‌های سرزمین^۶ (جدول ۱) با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در نرم‌افزار SAGA-GIS استخراج شدند (Guo *et al.*, 2019).

در این تحقیق بعد از انجام تصحیحات روی تصاویر ماهواره‌ای، مقادیر پیکسلی^۷ در نقاط نمونه‌برداری

6. Terrain attributes
7. Digital Number
8. Maximum likelihood Algorithm
9. Multiple Conditioned Latin Hypercube Method (cLHM)

1. Digital Elevation Model (DEM)
2. Satellite images
3. United States Geological Survey (USGS)
4. Radiometric calibration
5. Geometric calibration

برداشت شدند. جهت حذف خطای جی پی اس، نمونه- برداری از خاک با استفاده از روش برداشت در پنج نقطه^۱ با فاصله ۳ متر از عمق ۰-۳۰ سانتی متری خاک سطحی انجام شد (Jin *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2020). قابل ذکر است که کلیه نمونه‌ها در فاصله زمانی ۱ مرداد ماه تا ۱۰ شهریور ماه ۱۳۹۸ برداشت شدند.

جدول ۱- برخی از شاخص‌های سرزمین مؤثر در تخمین مکانی کربن آلی خاک (Guo *et al.*, 2019)

Table 1. The list of terrain attributes for predict SOC stocks

Terrain attributes	Symbol	Brief description	Unit
Digital elevation model	<i>DEM</i>	Digital elevation model	m
Slope	<i>slope</i>	Maximum rate of change between cells and neighbors	Degree
Aspect	<i>aspect</i>	Direction of the steepest slope from the north	Degree
Plan curvature	<i>hcurv</i>	Curvature of contour drawn through the grid point	m ⁻¹
Profile curvature	<i>vcurv</i>	Curvature of the surface in the direction of steepest descent	m ⁻¹
Terrain Ruggedness	<i>ruggedness</i>	The elevation difference between adjacent cells of a digital elevation grid	Non-dimensional
Convexity Surface	<i>convexity</i>	Terrain Surface Convexity	Non-dimensional
Convergence Index	<i>convergence</i>	The index of convergence/divergence for overland flow	%
Topographical wetness index	<i>twi</i>	calculates slope and specific catchment area based topographic wetness index	Non-dimensional
Channel Network Base Level	<i>chnl base</i>	Channel Network Base Level	m
Vertical Distance to Channel Network	<i>chnl alti</i>	Vertical Distance to Channel Network	m
Valley depth	<i>vall depth</i>	The relative height difference to the immediate adjacent channel lines	m
Relative Slope Position	<i>rsp</i>	Relative Slope Position	[0- 1]
Slope Height	<i>slph</i>	The relative height difference to the immediate adjacent crest lines	m
Normalized height	<i>normalh</i>	Normalized height allots value 1 to the highest and value 0 to the lowest position within a reference area	%
Standardized height	<i>standh</i>	Standardized height is the product of normalized height multiplied by absolute height	m
Mid-Slope Position	<i>midslppst</i>	A classification of the slope position in both valley and crest directions	Non-dimensional
Texture	<i>texture</i>	Terrain surface texture	Non-dimensional
MRVBF	<i>mrvbf</i>	MRVBF is designed to identify areas of deposited material in flat valley bottoms	Non-dimensional
MRRTF	<i>mrrtf</i>	A topographic index designed to identify high flat areas at a range of scales.	Non-dimensional
Slope length	<i>ls</i>	Slope length (LS) factor calculates the slope length as used by USLE	m

تخمین توزیع مکانی ضریب تغییرات^۱

مدل سازی و پهنه‌بندی ذخیره کربن آلی خاک با استفاده از روش جنگل تصادفی انجام شد. در این مرحله از شاخص‌های سرزمین استخراجی از مدل رقومی ارتفاع و شاخص استاندارد شده بازتابش طیفی ماهواره لندست ۸ جهت مدل‌سازی و تخمین توزیع مکانی ذخیره کربن آلی خاک استفاده شد. جهت انجام این مرحله، در ابتدا مدل جنگل تصادفی در نرم‌افزار SAS-JMP انجام شد و پارمترهای مؤثر جهت تخمین ذخیره کربن آلی خاک شناسایی شدند. در مرحله بعد جهت پهنه‌بندی ذخیره کربن آلی خاک مدل جنگل تصادفی صد مرحله (100RAN) به صورت تصادفی (0.75 % train and 0.25 % test) در نرم‌افزار R-Studio اجرا شد. سپس، از هر پیکسل صد نقشه حاصل، میانگین گرفته شد و میانگین برای هر پیکسل بدست آمد و این نقشه به عنوان نقشه میانگین^۲ توزیع کربن آلی خاک در نظر گرفته شد. در مرحله بعدی، براساس صد نقشه محاسبه شده، برای هر پیکسل، مقدار صدک ۵ درصد (به عنوان کمترین^۳) و صدک ۹۵ درصد (به عنوان بیشترین^۴) برای هر پیکسل محاسبه شد و انحراف بین صدک ۵ و ۹۵ (با فاصله اطمینان ۹۰ درصد) به دست آمد. در نهایت انحراف بین ۵ و ۹۵ درصد به عنوان انحراف معیار در نظر گرفته شد و بر میانگین هر پیکسل، تقسیم شد و ضریب تغییرات هر پیکسل در نظر گرفته شد و نقشه ضریب تغییرات به دست آمد (Gomes et al., 2019). ضریب تغییرات، پارامتری قابل توجه برای بیان تنوع ویژگی‌های خاک است. مقادیر ۰-۱۵ درصد ضریب تغییرات به عنوان تغییرپذیری کم، ۱۵-۳۵ درصد تغییرپذیری متوسط و بالاتر از ۳۵ درصد به عنوان تغییرپذیری بالا بیان شده است (Wei et al., 2008). بنابراین، ضریب تغییرات بالای ۳۵ درصد می‌تواند نشان دهنده تغییرات زیاد ذخیره کربن آلی خاک و گویای این واقعیت باشد که مناطق دارای ضریب تغییرات بالا نیازمند مدیریت بیشتر می‌باشند.

اعتبار سنجی پیش‌بینی مدل جنگل تصادفی در

تخمین ضریب تغییرات ذخیره کربن

اعتبار سنجی روش‌های یادگیری ماشین به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. در بسیاری از منابع توصیه شده است که برای ارزیابی کاملاً تصادفی مدل‌های مورد استفاده، از داده‌های اضافی مستقل از داده‌های مدل‌سازی استفاده شود. در این زمینه توصیه شده است که از یک طرح نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده استفاده شود و داده‌ها به دو دسته آموزش و صحت‌سنجی طبقه‌بندی شوند که از داده‌های آموزش برای مدل‌سازی و از داده‌های صحت‌سنجی برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شود (Malone et al., 2017). بر این اساس، در این تحقیق از این روش برای صحت‌سنجی پهنه‌بندی مقادیر ذخیره کربن آلی خاک مدل جنگل تصادفی استفاده شد. در این تحقیق از شاخص‌های صحت‌سنجی شامل میانگین مربع خطا^۵ (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا^۶ (MAE) و شاخص دقت R^۲ به ترتیب روابط ۵ تا ۷ استفاده شد (Kuhn and Johnson, 2013).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - M_i|}{n} \quad (6)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i) \times (M_i - \bar{M}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}_i)^2}} \right)^2 \quad (7)$$

در این روابط O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، M_i مقادیر پیش‌بینی شده، \bar{O}_i مقادیر متوسط اندازه‌گیری شده و \bar{M}_i مقادیر متوسط پیش‌بینی شده می‌باشد.

نتایج و بحث

بررسی همبستگی شاخص‌های سرزمین و شاخص استاندارد شده بازتابش طیفی با مقدار ذخیره کربن آلی خاک

نتایج همبستگی پیرسون (در سطح ۵ درصد) مقدار ذخیره کربن آلی خاک با شاخص‌های سرزمین استخراجی از مدل رقومی ارتفاع نشان داد که مقدار

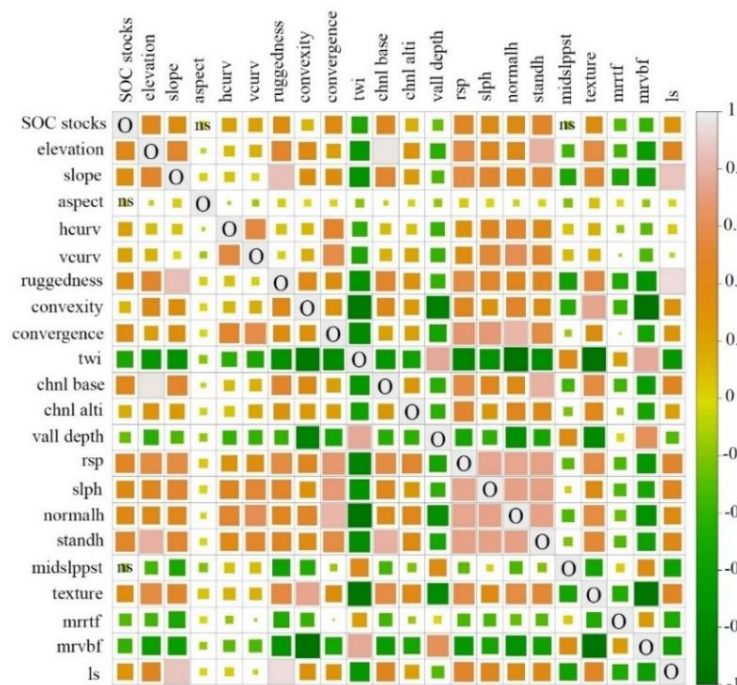
5. Root Mean Square Error (RMSE)
6. Mean Absolute Error (MAE)
7. Coefficient of Determination (R2)

1. Coefficient of Variation (CV)
2. Mean
3. Lower
4. Upper

ذخیره کربن آلی خاک با مقادیر پیکسلی باندهای (محدوده مرئی^۱، مادون قرمز نزدیک^۲ و مادون قرمز کوتاه^۳ - باندهای ۲ تا ۷) ماهواره لندست ۸ همبستگی معناداری (در سطح ۵ درصد) دارد. ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2020) بیان کردند که با استفاده از محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک به خوبی می‌توان مقدار ذخیره کربن آلی خاک سطحی را پیش‌بینی کرد. بعد از به‌دست آوردن همبستگی بین باندهای تصاویر ماهواره لندست ۸ با مقدار ذخیره کربن آلی خاک، تجزیه به مؤلفه اصلی انجام شد. نتایج تجزیه به مؤلفه اصلی نشان داد که PCA1 و PCA2 حدود ۹۲/۰۴ درصد تغییرات را بیان می‌کند (شکل ۳). با توجه به اینکه بین PCA2 و مقدار ذخیره کربن آلی خاک رابطه معنی‌داری برقرار نشد؛ بنابراین PCA1 به‌عنوان مؤلفه اصلی برای مراحل بعدی انتخاب شد (جدول ۲). در مرحله بعد، PCA1 مطابق با رابطه ۴ استاندارد شد و شاخص استاندارد شده بازتابش طیفی^۴ (ZPC1) به‌دست آمد. در انتها، مقادیر بازتابش طیفی استاندارد شده به مقادیر ماده آلی اندازه‌گیری شده تبدیل شد.

ذخیره کربن آلی خاک با تمامی شاخص‌های سرزمین استخراجی از مدل رقومی ارتفاع به جز جهت شیب و موقعیت میانی شیب همبسته می‌باشد (شکل ۲). اگر چه قانون ثابتی برای تعیین همبستگی شاخص‌های سرزمین با مقدار ذخیره کربن آلی خاک وجود ندارد؛ ولی سیمای اراضی پیچیده، باعث ایجاد تفاوت در ارتباط شاخص‌های سرزمین با مقدار ذخیره کربن آلی خاک در مناطق مختلف خواهد شد (Hengl, 2006). بنابراین، بدیهی است، تفاوت در ارتباط معنی‌دار بین شاخص‌های سرزمین می‌تواند ناشی از تفاوت در وضعیت ناهماهنگ طبیعت و تفاوت در خصوصیات نقاط نمونه‌برداری می‌باشند (Zhao *et al.*, 2014). در نتیجه، نمی‌توان با قطعیت بیان کرد که کدام یک از این شاخص‌ها در تمامی مناطق برای برآورد ذخیره کربن آلی خاک کارآمد یا ناکارآمد هستند، اما آنچه مسلم است این است که شاخص‌های سرزمین، ویژگی‌های دردسترس، مفید و ارزان برای برآورد مقدار ذخیره کربن آلی خاک می‌باشند (Guo *et al.*, 2019).

بررسی همبستگی پیرسون بین ذخیره کربن آلی خاک و بازتابش طیفی تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که مقدار



شکل ۲- همبستگی پیرسون (در سطح ۵ درصد) بین ویژگی‌های سرزمین با مقدار ذخیره کربن آلی خاک

Figure 2. Correlation coefficients between SOC stocks with terrain attributes (Significant correlation at 0.05 level)

3. Short-wave Infrared (SWIR)

4. Standardized Spectral Reflectance (ZPC1)

1. Visible (VIS)

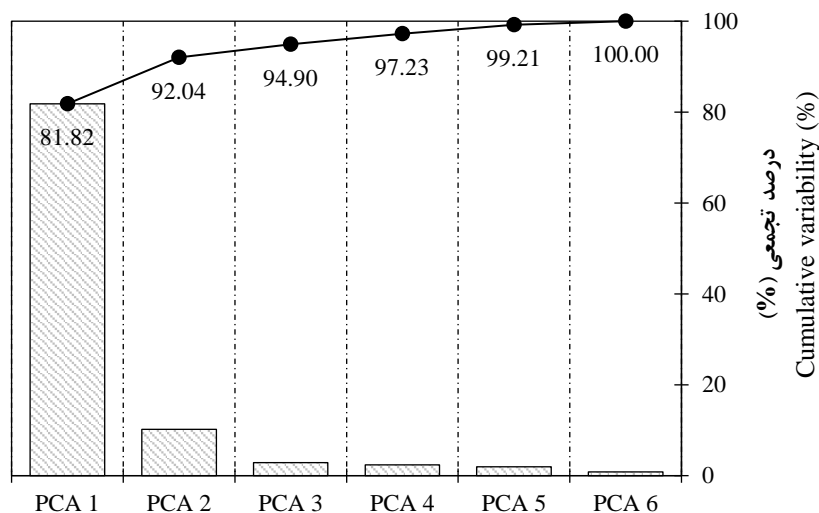
2. Near infrared (NIR)

جدول ۲- همبستگی پیرسون بین مقدار ذخیره کربن آلی خاک PCA1 و PCA2 داده‌های سنجش از دور

Table 1. Pearson correlation between SOC stocks with PC1 and PC2 developed among remote sensing data

Parameter	PCA 1	PCA 2
SOC stocks (kg m ⁻²)	-0.537**	-0.140 ^{ns}

** Significant correlation at 0.01 level.

^{ns} Not significant.

شکل ۳- تجزیه به مؤلفه‌های اصلی داده‌های انعکاسی باندهای مختلف تصاویر ماهواره لندست ۸ (سنجده OLI)

Figure 3. Principal component's analysis of reflectance data of various bands of Landsat 8 satellite (OLI sensor)

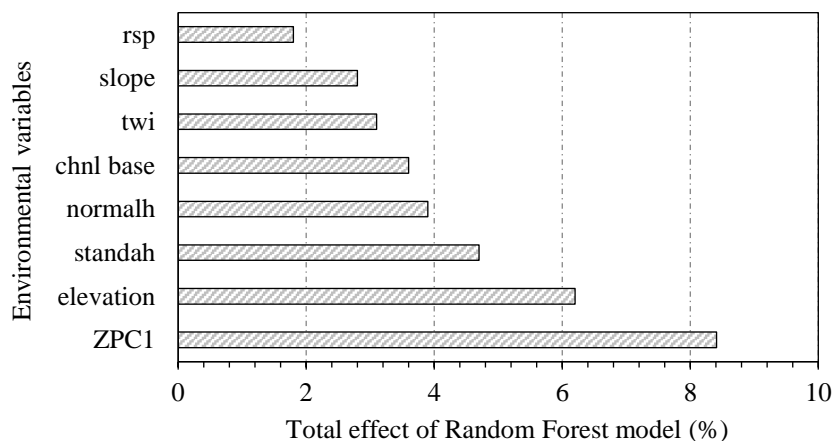
مدل‌سازی ذخیره کربن آلی خاک

بعد از بررسی ارتباط ذخیره کربن آلی خاک با شاخص طیفی استاندارد شده و شاخص‌های سرزمین، ذخیره کربن آلی خاک با استفاده از مدل جنگل تصادفی مدل‌سازی شد. نتایج حاصل از این مدل نشان داد که از بین عوامل محیطی، ۸ پارامتر به عنوان مؤثرترین عوامل برای مدل‌سازی ذخیره کربن آلی خاک انتخاب شدند. این عوامل شامل شاخص استاندارد شده بازتابش طیفی (ZPC1)، ارتفاع، ارتفاع استاندارد (standh)، ارتفاع نرمال (normalh)، شبکه ابراهه اصلی (chnl base)، شیب (slope)، شاخص خیسی توپوگرافی (twi) و موقعیت وابسته به شیب (rsp) بود (شکل ۴). در این مدل، بیشتر اهمیت برای شاخص استاندارد شده بازتابش طیفی (ZPC1) و کمترین اهمیت برای موقعیت وابسته به شیب (rsp) به دست آمد. بر طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق، مشخص شد که مدل جنگل تصادفی از شاخص استاندارد شده بازتابش طیفی (ZPC1)، پارامترهای

وابسته به ارتفاع، شاخص‌های وابسته به شیب و شاخص خیسی توپوگرافی برای پیش‌بینی ذخیره کربن آلی خاک استفاده کرده است. ونگ و همکاران (Wang *et al.*, 2018) بیان کردند که ماده آلی خاک دارای ترکیبات پیچیده‌ای هستند که به خوبی در محدوده طیف بازتابشی قابل تشخیص هستند؛ همچنین ارتفاع، یکی از اصلی‌ترین فاکتورهای محیطی مؤثر بر مقدار ذخیره کربن آلی خاک می‌باشد. با افزایش ارتفاع، دما کاهش یافته و میزان بارش افزایش می‌یابد؛ در نتیجه باعث کاهش فعالیت ریزجانداران کاهش می‌یابد. به تبع کاهش فعالیت ریزجانداران خاکزی، تجزیه و مصرف مواد آلی در خاک کاهش خواهد یافت. اثر متعامل کاهش دما و افزایش بارش به دلیل افزایش ارتفاع، باعث تجمع هوموس در خاک‌ها می‌شود (Ma *et al.*, 2016). همچنین، شیب و پارامترهای وابسته به شیب به طور معناداری مقدار ذخیره کربن آلی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در شیب‌های بالا به دلیل وجود فرسایش زیاد، ماده آلی به

می‌دهد. ذرات ریز ماده آلی که توسط فرسایش به پایین انتقال می‌یابند در پای شیب تجمع پیدا کرده و موجب افزایش مقدار ذخیره کربن آلی خاک می‌شوند (Zhu *et al.*, 2019)

پایین انتقال پیدا می‌کند؛ ولی قطعات بزرگتر ماده آلی در شیب‌های بالاتر به جا مانده و می‌توانند موجب افزایش مقدار ماده آلی در شیب‌های بالاتر شوند؛ همچنین موقعیت قرارگیری شیب یکی از عوامل مهمی است که مقدار کربن آلی خاک را تحت تأثیر قرار



شکل ۴- اثر کلی هر یک از پارامترهای (%) مدل جنگل تصادفی برای تخمین ذخیره کربن آلی خاک

Figure 4. Total effect (%) of each parameter on estimating SOC stocks by Random Forest model

نتایج دقت (R^2) و صحت‌سنجی (شامل RMSE و MAD) مدل‌سازی مقدار ذخیره کربن آلی خاک با استفاده از مدل جنگل تصادفی نشان داد که دقت این مدل (R^2) ۰/۷۷ و معیارهای صحت این مدل RMSE و MAD به ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۳۰ (kg/m^2) می‌باشد (جدول ۳).

نتایج دقت (R^2) و صحت‌سنجی (شامل RMSE و MAD) مدل‌سازی مقدار ذخیره کربن آلی خاک با استفاده از مدل جنگل تصادفی نشان داد که دقت این مدل (R^2) برای داده‌های آموزش ۰/۸۱ درصد و معیارهای صحت شامل RMSE و MAD به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۳۲

جدول ۳- مقادیر ضرایب دقت و صحت برای مدل جنگل تصادفی

Table 3. Calibration and validation indices of SOC stocks by Random Forest model

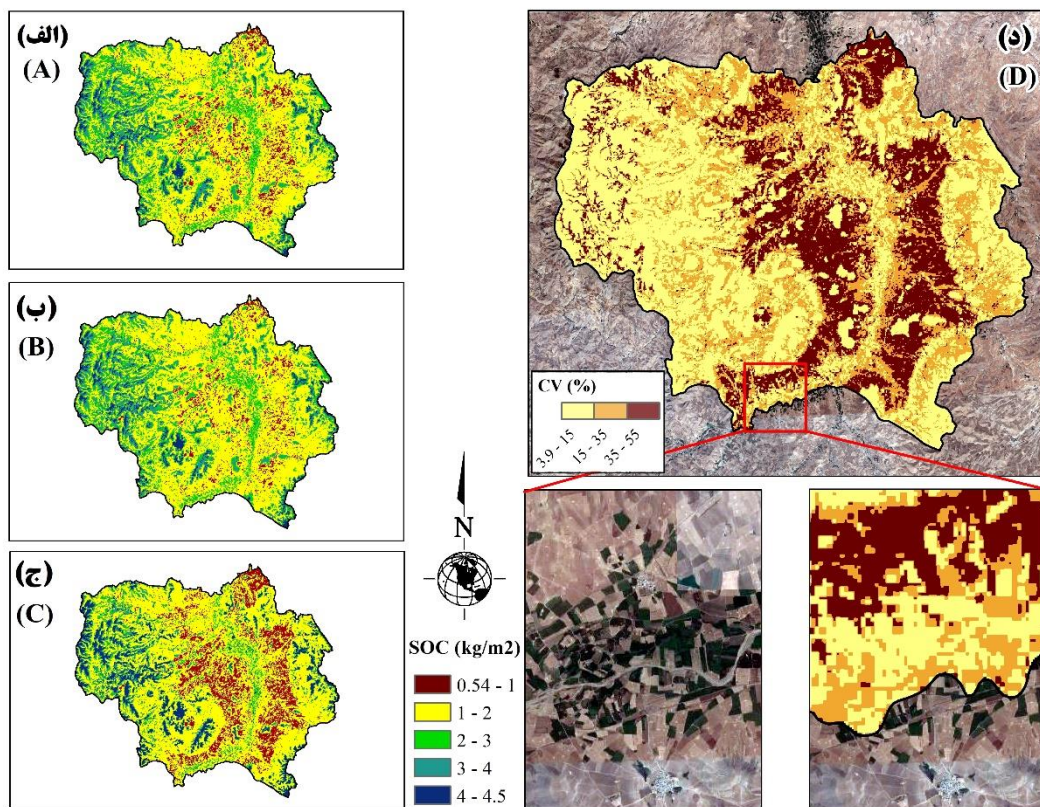
Total points	N = 210	R^2	RMSE (kg/m^2)	MAE (kg/m^2)
Training points	$210 \times 0.75 = 158$	0.81	0.44	0.34
Testing points	$210 \times 0.25 = 52$	0.73	0.55	0.45

پیکسل منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد. در نهایت با استفاده از روش یاد شده، پهنه‌بندی ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک به دست آمد. نتایج پهنه‌بندی ضریب تغییرات منطقه مورد مطالعه نشان داد که مقدار ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک منطقه مورد مطالعه بین ۳/۹-۵۵ درصد متغیر می‌باشد (شکل ۵ - ۵).

پهنه‌بندی مقادیر بیشترین، میانگین و کمترین مقدار ذخیره کربن آلی خاک و به دست آوردن توزیع مکانی ضریب تغییرات کربن آلی خاک برای تخمین مقادیر بیشترین، میانگین و کمترین مقدار ذخیره کربن آلی خاک به روشی که بیان شد، مدل جنگل تصادفی ۱۰۰ مرتبه اجرا شد و مقادیر بیشترین (شکل ۵ - الف)، میانگین (شکل ۵ - ب) و کمترین (شکل ۵ - ج) مقدار ذخیره کربن آلی خاک برای هر

ذخیره کربن آلی خاک است (Babu *et al.*, 2020). همچنین تغییر کاربری اراضی با تخریب ساختمان خاک و افزایش دسترسی ریزجانداران به ترکیبات آلی می‌تواند منجر به تشدید سرعت تجزیه بقایای آلی شود. همچنین، با توجه به تفاوت ویژگی‌های گوناگون بخش‌های متفاوت کربن آلی و ناهمسان بودن دوره بازگشت آن‌ها، انتظار می‌رود که تغییر کاربری اراضی نتایج گوناگونی بر بخش‌های کربن آلی داشته باشد. از این میان می‌توان گفت که بخش‌های ناپایدار کربن آلی بیشتر دستخوش تغییرات ناشی از تبدیل اراضی قرار می‌گیرند (Hussain *et al.*, 2019)؛ بنابراین با کارگیری شیوه‌های درست مدیریتی می‌توان باعث کاهش هدر رفت مقدار ذخیره کربن آلی خاک در این کاربری‌ها شود (Sharma *et al.*, 2009).

مقایسه ضریب تغییرات منطقه مورد مطالعه با کاربری ارائه شده در شکل ۱ نشان داد که مناطقی از محدوده مورد مطالعه که تحت کاربری کشاورزی قرار دارند، دارای بیشترین ضریب تغییرات هستند و مناطقی که تحت کاربری مراتع هستند، دارای کمترین مقدار ضریب تغییرات هستند (شکل ۵ - د). باسیل دوش و همکاران (Basile-Doelsch *et al.*, 2009) بیان کردند که تغییرات کاربری اراضی به منظور کشاورزی، مواد آلی پایدار اولیه در سطح زمین را ناپایدار خواهد کرد و شرایط را برای تخلیه خاک از کربن آلی فراهم می‌کند. شخم زدن، اندوخته‌های ذخیره کربن آلی را که محافظت شده‌اند در دسترس ریزجانداران خاکزی قرار می‌دهد و سرعت تجزیه زیستی آن‌ها را افزایش می‌دهد. بنابراین، مدیریت کاربری اراضی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پویایی



شکل ۵- پهنه‌بندی مقادیر بیشترین (۹۵ درصد) (الف)، میانگین (ب)، کمترین (۵ درصد) (ج) و ضریب تغییرات (د) حاصل از صد

بار اجرا کردن مدل جنگل تصادفی

Figure 5. The spatial distribution of SOC stocks (A), Upper 95% (B), mean (C), lower 5% (D), and Coefficient of Variation (E) of the 100 predictions with Random Forest model.

مقایسه ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی در کاربری‌های مختلف منطقه مورد مطالعه نشان داد که میانگین

ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک در کاربری‌های مختلف منطقه مورد مطالعه

اولیه به دلیل شخم‌های پی در پی سطح زمین، ناپایدار خواهند شد و شرایط برای تخلیه خاک از کربن آلی فراهم می‌شود. شخم زدن، اندوخته‌های ذخیره کربن آلی را که محافظت شده‌اند در دسترس ریزجانداران قرار داده و سرعت تجزیه زیستی آن‌ها را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، در اراضی کشاورزی دسترسی بیشتر ریزجانداران به ترکیبات آلی به دلیل فرآیندهای کشت کار می‌تواند منجر به تشدید سرعت تجزیه بقایای آلی شود (Balesdent *et al.*, 2000). بررسی اثرات کاربری اراضی و مدیریت بر کیفیت مواد آلی به علت سرشت ناهمگون آن‌ها، نیازمند رسیدگی همزمان کمی و کیفی مواد آلی در بخش‌های مختلف می‌باشد (Ladd *et al.*, 1993). بنابراین مدیریت کاربری اراضی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر روی تغییرات ذخیره کربن آلی خاک است (Babu *et al.*, 2020)؛ در نتیجه به کارگیری شیوه‌های درست مدیریتی می‌توان باعث کاهش تغییرات مقدار ذخیره کربن آلی خاک شود (Sun *et al.*, 2021).

بیشترین ضریب تغییرات (۳/۹-۵۵ درصد) در زراعت‌های دیم و کمترین ضریب تغییرات (۲۴/۶۹ درصد) در کاربری‌های مراتع رخ داده است (جدول ۴). ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2019) مقدار ذخیره کربن آلی خاک در شمال استان جیانگ‌سو چین در کاربری‌های مختلف بررسی و مدل‌سازی کردند؛ نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که مقدار ذخیره کربن آلی خاک در کاربری‌های مختلف تغییرات متفاوتی را نشان می‌دهد و بسته به نوع کاربری مقدار ذخیره کربن آلی خاک متفاوت است؛ نتایج کلی این تحقیق نشان داد که مقدار ذخیره کربن آلی خاک در کاربری مراتع بیشترین مقدار می‌باشد زیرا عملیات کشت و کار در کاربری زراعی باعث خروج کربن آلی از خاک می‌شود؛ بنابراین مقدار ذخیره کربن آلی خاک در مراتع بیشتر از زمین‌های کشاورزی می‌باشد و میزان تغییرات در این کاربری نسبت به مراتع بیشتر است. باسیل دوش و همکاران (Basile-Doelsch *et al.*, 2009) بیان کردند که در اراضی کشاورزی، مواد آلی پایدار

جدول ۴- ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک در کاربری‌های مختلف
Table 4. CV (%) variation of SOC stocks in different land uses

Land use	Mean of CV (%)	Area (%)
Grasslands	5.65	43.08
watercourse	21.65	5.92
Gardens and irrigated farming	10.19	5.85
Dry farming	24.69	43.01
Urban	-	2.14

نتیجه‌گیری کلی

پاسخ بازتابش طیف الکترومغناطیس به تغییرات کربن آلی خاک باشد. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد که میزان ضریب تغییرات در کاربری دیم‌کاری در مقایسه با دیگر کاربری‌ها بیشتر است. ضریب تغییرات بیشتر در این کاربری، نشان دهنده این است که میزان تخریب خاک در این کاربری نسبت به دیگری کاربری‌ها بیشتر است و نیازمند مدیریت مناسب‌تر برای جلوگیری از تخریب خاک و به تبع آن، تخریب زمین‌های کشاورزی می‌باشد.

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که شاخص‌های سرزمین به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع و شاخص بازتابش طیفی می‌تواند با دقت مناسبی میزان ضریب تغییرات ذخیره کربن آلی خاک را پیش‌بینی کنند، همچنین مشخص شده که شاخص استاندارد شده بازتابش طیفی استاندارد شده، مناسب‌ترین شاخص برای مطالعه تغییرات مکانی ضریب تغییرات مکانی ذخیره کربن آلی خاک می‌باشد. این موضوع می‌تواند ناشی از

Reference

- Babu S., Mohapatra K., Yadav G.S., Lal R., Singh R., Avasthe R., Das A., Chandra P., Gudade B., Kumar A. 2020. Soil carbon dynamics in diverse organic land use systems in North Eastern Himalayan ecosystem of India. *Catena*. 194, 104785.
- Balesdent J., Chenu C., Balabane M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and tillage research*. 53(3-4), 215-230.
- Basile-Doelsch I., Brun T., Borschneck D., Masion A., Marol C., Balesdent J. 2009. Effect of landuse on organic matter stabilized in organomineral complexes: A study combining density fractionation, mineralogy and $\delta^{13}C$. *Geoderma*. 151(3-4), 77-86.
- Chen D., Zhang J., Chen J. 2010. Adsorption of methyl tert-butyl ether using granular activated carbon: Equilibrium and kinetic analysis. *International Journal of Environmental Science & Technology*. 7(2), 235-242.
- Chi M., Feng R., Bruzzone L. 2008. Classification of hyperspectral remote-sensing data with primal SVM for small-sized training dataset problem. *Advances in space research*. 41(11), 1793-1799.
- Deng L., Sweeney S., Shangguan Z. 2014. Long-Term Effects of Natural Enclosure: Carbon Stocks, Sequestration Rates and Potential for Grassland Ecosystems in the Loess Plateau. *CLEAN–Soil, Air, Water*. 42(5), 617-625.
- Ellert B., Janzen H., Entz T. 2002. Assessment of a method to measure temporal change in soil carbon storage. *Soil Science Society of America Journal*. 66(5), 1687-1695.
- Gomes L.C., Faria R.M., de Souza E., Veloso G.V., Schaefer C.E.G., Fernandes Filho E.I. 2019. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma*. 340, 337-350.
- Guo L., Zhao C., Zhang H., Chen Y., Linderman M., Zhang Q., Liu Y. 2017. Comparisons of spatial and non-spatial models for predicting soil carbon content based on visible and near-infrared spectral technology. *Geoderma*. 285, 280-292.
- Guo Z., Adhikari K., Chellasamy M., Greve M.B., Owens P.R., Greve M.H. 2019. Selection of terrain attributes and its scale dependency on soil organic carbon prediction. *Geoderma*. 340, 303-312.
- Hengl T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers & geosciences*. 32(9), 1283-1298.
- Hong Y., Chen S., Liu Y., Zhang Y., Yu L., Chen Y., Liu Y., Cheng H., Liu Y. 2019. Combination of fractional order derivative and memory-based learning algorithm to improve the estimation accuracy of soil organic matter by visible and near-infrared spectroscopy. *Catena*. 174, 104-116.
- Hussain S., Sharma V., Arya V.M., Sharma K.R., Rao C.S. 2019. Total organic and inorganic carbon in soils under different land use/land cover systems in the foothill Himalayas. *Catena*. 182, 104104.
- Iranian soil and water institute. 1991. Iranian soil map (1:1000.000).
- Jin X., Li Z., Yang G., Yang H., Feng H., Xu X., Wang J., Li X., Luo J. 2017. Winter wheat yield estimation based on multi-source medium resolution optical and radar imaging data and the AquaCrop model using the particle swarm optimization algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 126, 24-37.
- Keskin H., Grunwald S., Harris W.G. 2019. Digital mapping of soil carbon fractions with machine learning. *Geoderma*. 339, 40-58.
- Khosravi Aqdam K., Miran N., Mohammadi Khajelou Y., Khosravi Aqdam M., Asadzadeh F., Mosleh Z. 2021. Predicting the spatial distribution of soil mineral particles using OLI sensor in northwest of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 193(6), 377.
- Kuhn M., Johnson K. 2013. Applied predictive modeling, 26. *Springer*.
- Kunkel V., Hancock G., Wells T. 2019. Large catchment-scale spatiotemporal distribution of soil organic carbon. *Geoderma*. 334, 175-185.
- Ladd J., Foster R., Skjemstad J. 1993. Soil structure: carbon and nitrogen metabolism. *Soil Structure/Soil Biota Interrelationships*. 401-434.
- Ma K., Zhang Y., Tang S., Liu J. 2016. Spatial distribution of soil organic carbon in the Zoige alpine wetland, northeastern Qinghai–Tibet Plateau. *Catena*. 144, 102-108.
- Maia S.M., Ogle S.M., Cerri C.C., Cerri C.E. 2010. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. *Soil and Tillage Research*. 106(2), 177-184.

- Malone B.P., Minasny B., McBratney A.B., 2017. Using R for digital soil mapping, 35. *Springer*.
- McBratney A.B., Santos M.M., Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*. 117(1-2), 3-52.
- Minasny B., McBratney A.B., Malone B.P., Wheeler I. 2013. Digital mapping of soil carbon. *Advances in agronomy*. 118, 1-47.
- Nelson D., Sommers L.E. 1983. Total carbon, organic carbon and organic matter. Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties 9, 539-579.
- Paustian K., Collins H.P., Paul E.A. 2019. Management controls on soil carbon, Soil organic matter in temperate agroecosystems. CRC Press, pp. 15-49.
- Richards J.A. 1986. Error correction and registration of image data, Remote Sensing Digital Image Analysis. *Springer*. pp. 33-68.
- Schumacher B.A. 2002. Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments.
- Sharma V., Mir S.H., Arora S. 2009. Assessment of fertility status of erosion prone soils of Jammu Siwaliks. *Journal of Soil and Water Conservation*. 8(1), 37-41.
- Sun X.-L., Minasny B., Wang H.-L., Zhao Y.-G., Zhang G.-L., Wu Y.-J. 2021. Spatiotemporal modelling of soil organic matter changes in Jiangsu, China between 1980 and 2006 using INLA-SPDE. *Geoderma*. 384, 114808.
- Tian G., Granato T., Cox A., Pietz R., Carlson Jr C., Abedin Z. 2009. Soil carbon sequestration resulting from long-term application of biosolids for land reclamation. *Journal of Environmental Quality*. 38(1), 61-74.
- Wang B., Waters C., Orgill S., Gray J., Cowie A., Clark A., Li Liu D. 2018. High resolution mapping of soil organic carbon stocks using remote sensing variables in the semi-arid rangelands of eastern Australia. *Science of the Total Environment*. 630, 367-378.
- Wang S., Fan J., Zhong H., Li Y., Zhu H., Qiao Y., Zhang H. 2019. A multi-factor weighted regression approach for estimating the spatial distribution of soil organic carbon in grasslands. *Catena*. 174, 248-258.
- Wei J.-B., Xiao D.-N., Zeng H., Fu Y.-K. 2008. Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China. *Environmental geology*. 53(8), 1663-1672.
- Wood S.A., Sokol N., Bell C.W., Bradford M.A., Naeem S., Wallenstein M.D., Palm C.A. 2016. Opposing effects of different soil organic matter fractions on crop yields. *Ecological Applications*. 26(7), 2072-2085.
- Zhang Z., Ding J., Wang J., Ge X. 2020. Prediction of soil organic matter in northwestern China using fractional-order derivative spectroscopy and modified normalized difference indices. *Catena*. 185, 104257.
- Zhao M., Yue T., Zhao N., Sun X., Zhang X. 2014. Combining LPJ-GUESS and HASM to simulate the spatial distribution of forest vegetation carbon stock in China. *Journal of Geographical Sciences*. 24(2), 249-268.
- Zhu M., Feng Q., Qin Y., Cao J., Zhang M., Liu W., Deo R.C., Zhang C., Li R., Li B. 2019. The role of topography in shaping the spatial patterns of soil organic carbon. *Catena*. 176, 296-305.

Spatial Estimation of Coefficient of Variation of Soil Organic Carbon Stocks Using Spectral and Digital Data

Kamal Khosravi Aqdam¹, Nafiseh Yaghmaeian Mahabadi², Hassan Ramezanzpour^{3*}, Salar Rezapour⁴, Zohreh Mosleh⁵

(Received: July 2021 Accepted: August 2021)

Abstract

Soil entities depends on its physical, chemical, and biological characteristics. Soil organic carbon (SOC) stocks is one of the main factors whose variations affect all these parameters. So, this study was performed for mapping the coefficient of variations (CV) of SOC stocks in some parts of the Simineh Roud watershed. Soil sampling performed using the Latin Hypercube method (cLHm) at 210 points from 0 to 30 cm of the soil surface, and the organic carbon was measured, then SOC stocks was calculated. In the next step, using Random Forest (RF) model the effective parameters were calculated (in this step, to model the SOC stocks, standardized spectral reflectance index and extracted data from digital elevation model were used). Finally, RF model was performed 100 times, as well as mapping of the values of upper (95th %), lower (5th %), and average SOC stocks for each pixel with a spatial resolution of 30×30 m was obtained. To obtain the CV with a confidence coefficient of 90%, the percentile of 95% and 5% were subtracted. The CV was obtained by dividing it by the mean. The results showed that the accuracy coefficient (R^2) for modeling SOC stocks by the RF model was 0.81 and the mean accuracy coefficients including RMSE and MAE were 0.44 and 0.34 (kg/m^2), respectively. Also, the results of CV mapping for the amount of SOC stocks in the study area showed that the amount of variation of this parameter varies between 3.9- 55%. Based on the results of the CV mapping of the study area, the most and lowest variations were observed in dry farming and grasslands, respectively. Probably, continuous cultivation and low return of organic matter in dry farming have increased the CV of SOC stocks in dry farming use.

Keywords: Digital elevation model, Dry farming, Latin Hypercube method, Random Forest

Khosravi Aqdam K, Yaghmaeian Mahabadi N, Ramezanzpour H, Rezapour S, Mosleh Z. 2022. Spatial estimation of coefficient of variation of soil organic carbon stocks using spectral and digital data. *Applied Soil Research*, 10(3): 90-103.

1. Ph.D. Graduated, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan

2. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan

3. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan

4. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural, Urmia University

5. Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, IRAN

* Corresponding Author Email: hasramezanzpour@yahoo.com