



دانشگاه گسترده زراعت و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره سوم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

مدل‌سازی محتوای کربن آلی خاک بر اساس شاخص‌های توپوگرافی و ویژگی‌های خاک کشت‌زارهای دیم گندم

*فاطمه بابائی^۱، علی‌رضا واعظی^۲ و مهدی طاهری^۳

^۱دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان، آدانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان،

^۲استادیار و هیأت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان

تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۷

چکیده

سابقه و هدف: کربن آلی خاک از عوامل مهمی است که بر کیفیت خاک، آب و اتمسفر مؤثر است. محتوای کربن آلی خاک تابعی از اثرات متقابل اقلیم، پوشش گیاهی، زهکشی، مدیریت زراعی، کاربری اراضی و ویژگی‌های خاک از جمله بافت خاک، نوع کانی و ساختمان خاک است. درصد شیب و موقعیت‌های مختلف توپوگرافی بر حفظ رطوبت خاک و ایجاد شرایط مناسب برای استقرار گیاهی و در نتیجه میزان انباشته شدن و تجزیه کربن آلی خاک مؤثر می‌باشند. در میان اثر ویژگی‌های خاک بر کربن آلی خاک، بیش‌ترین پژوهش بر بررسی اثر اجزای بافت خاک صورت گرفته و نتایج متفاوتی در این خصوص گزارش شده است. هدف از این پژوهش ارائه مدل رگرسیونی است که با استفاده از شاخص‌های توپوگرافی و ویژگی‌های خاک، کربن آلی خاک را در کشت‌زارهای دیم واقع در منطقه نیمه خشک برآورد نماید.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش ۱۱۰ نمونه خاک به‌صورت تصادفی در سه تکرار از مزارع دیم گندم شهرستان خدابنده واقع در جنوب استان زنجان در سال ۱۳۹۲ تهیه شد. شاخص‌های توپوگرافی شامل درصد شیب، شاخص خیزی، همواری بستر دره دارای چند قدرت تفکیک و انحنای قائم، افقی، عمومی، حداقل و حداکثر با استفاده از مدل ارتفاع رقومی با قدرت تفکیک ۹۰ متر در ۹۰ متر به‌دست آمدند. ویژگی‌های خاک شامل شن، سیلت و رس، pH، گل اشباع و محتوای کربن آلی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. در صورت عدم تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال از روش تبدیل جانسون استفاده شد. با به‌کارگیری روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی، مدلی برای بیان تغییرات محتوای کربن آلی خاک ($n=80$) ارائه شد. روش اعتبارسنجی تقاطعی به‌صورت جداسازی تکی برای انتخاب بهترین مدل براساس تعداد مؤلفه‌های اصلی به‌کار رفت. سپس، مدل انتخاب شده با استفاده از مجموعه جدیدی از داده‌ها ($n=30$) مورد ارزیابی قرار گرفت. کل فرآیند ارائه مدل و آزمون آن در سه تکرار به‌صورت گروه‌بندی داده‌ها در قالب داده‌های مدل و آزمون آن صورت گرفت.

یافته‌ها: در میان شاخص‌های توپوگرافی کربن آلی خاک بیش‌ترین همبستگی را به‌ترتیب با مقادیر نرمال‌شده شاخص خیزی ($r=0/5901, P<0/01$)، تندی شیب ($r=-0/37, P<0/01$) و انحنای حداکثر ($r=-0/34, P<0/01$) داشت. کربن

* مسئول مکاتبه: fbabaei_a@yahoo.com

آلی خاک بیش‌ترین همبستگی را با میزان شن ($r = -0.68$, $P < 0.01$)، رس ($r = 0.64$, $P < 0.01$) و سیلت ($P < 0.01$)، نشان داد. ویژگی‌های شاخص خیسی، شیب و انحنای حداکثر نرمال شده، هم‌چنین سیلت و رس برای مدل‌سازی تغییرات کربن آلی به روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی به‌کار رفتند. اعتبارسنجی تقاطعی نشان داد که در هر سه تکرار مدل دومؤلفه‌ای به‌ترتیب به‌طور میانگین قادر به توجیه حدود ۵۷ درصد ($P < 0.01$) و ۵۳ درصد ($P < 0.01$) از واریانس متغیرهای ورودی و خروجی مدل بودند. به‌طور میانگین، مقادیر $RMSE$ و R^2 برای آزمون مدل ارائه شده به‌ترتیب برابر ۰/۲۶ درصد و ۰/۵۵ ($P < 0.01$) بود.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کربن آلی خاک‌ها در کشت‌زارهای مختلف بیش‌تر تحت تأثیر اجزای بافت خاک قرار داشت به‌طوری‌که سیلت و رس قادر به توجیه ۳۲ درصد از تغییرات محتوی کربن آلی خاک بودند. در گام بعدی شاخص‌های توپوگرافی قرار داشت که در این میان، شاخص خیسی نرمال شده در کنار شیب و انحنای حداکثر نرمال شده قادر به توجیه ۲۱ درصد از تغییرات محتوی کربن آلی خاک بود. مدل رگرسیونی حداقل مربعات جزئی نشان داد که مدل دومؤلفه‌ای به‌طور معنی‌داری قابلیت توجیه ۵۳ درصد از تغییرات کربن آلی را در اراضی گندم داریم دارد. از این مدل می‌توان برای برآورد محتوای کربن آلی خاک در کشت‌زارهای دیم منطقه استفاده کرد. بررسی تأثیر سایر متغیرها مانند ویژگی‌های نیم‌رخی خاک، پیشینه مدیریتی خاک و پیشینه مدیریتی زراعی می‌تواند در ارائه مدلی بهتر سودمند واقع گردد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی تقاطعی به‌صورت جداسازی تکی، انحنای حداکثر، رگرسیون، شاخص خیسی

مقدمه

تأثیر منفی بر وضعیت آب‌های سطحی می‌گردد (۳۱، ۳۹). هم‌چنین تجزیه آن در خاک منجر به آزاد شدن گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن و افزایش دمای جهانی می‌گردد (۸، ۱۵). از این‌رو، مطالعه وضعیت کربن آلی در خاک حائز اهمیت به‌نظر می‌رسد. مقدار کربن آلی در خاک تابعی از اثرات متقابل اقلیم، پوشش گیاهی، زهکشی، مدیریت زراعی و کاربری اراضی و ویژگی‌های ذاتی خاک از جمله بافت خاک، نوع کانی و ساختمان خاک است (۳۲). یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های پژوهشگران بررسی عوامل مؤثر بر میزان کربن آلی خاک‌ها در شرایط و مقیاس‌های مختلف است (۴، ۲).

توپوگرافی یکی از عوامل مهم بر میزان کربن آلی در خاک می‌باشد. توپوگرافی از عوامل مهم خاک‌سازی است که علاوه بر فرآیندهای تشکیل خاک، فرسایش خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد

کربن آلی خاک عاملی مهم است که بر سلامت و کیفیت خاک^۱، بارخیزی^۲ آن، اکوسیستم‌های آبی و گرمایش جهانی^۳ مؤثر می‌باشد (۲۱). این جزء آلی خاک مهم‌ترین شاخص کیفیت خاک است که با تأثیر بر برخی از ویژگی‌های خاک، در بهبود کیفیت خاک از نقطه‌نظر تولید محصول و حفاظت خاک و آب نقش ایفاء می‌کند. کربن آلی از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب، ظرفیت تبادل کاتیونی و عناصر غذایی منجر به بهبود استقرار گیاه می‌گردد (۳۱). هم‌چنین این ماده با افزایش خاکدانه‌سازی منجر به بهبود وضعیت فیزیکی خاک، نفوذپذیری و کاهش رواناب و فرسایش می‌گردد (۱۳). به هر حال شستشو و هدررفت کربن آلی منجر به کاهش کیفیت خاک و

- 1- Soil quality
- 2- Soil productivity
- 3- Global warming

تحت یک اقلیم، پوشش گیاهی و توپوگرافی در سه تکرار و عمق ۱ متری انجام دادند رابطه خطی معنی‌داری بین ماده آلی و مجموع سیلت و رس در اعماق مختلف خاک را گزارش نمودند (۴۲). در پژوهشی، پرویزی و همکاران (۲۰۱۰) در اراضی دیم حوضه آبخیز مرگ واقع در جنوب‌شرقی کرمانشاه، اثر شاخص‌های مختلف را بر محتوای کربن آلی بررسی کردند. شیب، انحنای توپوگرافی، رس، سیلت و شن در پژوهش آن‌ها همبستگی معنی‌داری با میزان کربن آلی نشان ندادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در اراضی دیم مناطق نیمه‌خشک، متغیرهای مدیریتی بیش‌تر از سایر عوامل (ویژگی‌های فیزیکی خاک و خصوصیات هندسی زمین) تغییرات کربن آلی خاک را توجیه می‌کنند (۲۹). اورایان و همکاران (۲۰۱۵) نیز با استفاده از مدل تجزیه به مؤلفه‌های اصلی^۲ (PCA) و رگرسیون خطی گزارش کردند که میزان رس خاک قادر به توجیه ۵۲ درصد از تغییرات کربن آلی خاک است (۲۶). در پژوهش دیگری لیو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش آنالیز کاهشی^۳ (RDA) ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیکی خاک به‌ویژه میزان سیلت را از عوامل تعیین‌کننده میزان ماده آلی خاک در مراتع جنوب‌شرق چین دانسته‌اند (۲۲). کنادل و همکاران (۲۰۱۵) نیز با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۴ (PLSR) بافت خاک را از عوامل مؤثر بر میزان ماده آلی خاک دانسته‌اند (۱۸).

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه عبارت از کشتزارهای دیم واقع در محدوده شهرستان خدابنده در جنوب استان زنجان بود. میانگین بارندگی سالانه در منطقه ۴۱۱ میلی‌متر و

(۶). برآوردها نشان می‌دهد که فرسایش آبی خاک در مقیاس جهانی منجر به جابه‌جایی حدود ۱ گیگا تن کربن آلی در سال است (۳۳). از سوی دیگر توپوگرافی با تأثیر بر میزان رطوبت و دما بر تجزیه کربن آلی خاک اثر می‌گذارد (۹). از این‌رو، توپوگرافی به‌عنوان یکی از عوامل مهم منطقه‌ای مؤثر بر تغییرات کربن آلی خاک می‌تواند در نظر گرفته شود. ویسمیر و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که تندی شیب با میزان کربن آلی خاک دارای همبستگی منفی معنی‌دار است (۴۰). همچنین پی و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که شاخص خیزی توپوگرافی^۱ با میزان ماده آلی خاک همبستگی دارد (۳۰). این عامل که یکی از شاخص‌های توپوگرافی است، توازن بین میزان رطوبت خاک و زهکشی در مقیاس محلی را نشان می‌دهد. بیلندی و همکاران (۲۰۱۴) نیز نشان دادند که شاخص خیزی دارای همبستگی مکانی بالایی با میزان ماده آلی بود. نقشه‌های درون‌یابی حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد که با افزایش درجه شیب مقدار کربن آلی خاک کاهش می‌یابد (۵).

در میان اثر ویژگی‌های خاک بر کربن آلی خاک، بیش‌ترین پژوهش در زمینه تأثیر بافت خاک بر تغییرات کربن آلی خاک انجام گرفته و نتایج متفاوتی در این خصوص گزارش شده است. بافت و به‌عبارت بهتر توزیع اندازه ذرات خاک بر میزان آب، عناصر غذایی قابل‌دسترس برای گیاه، شرایط فیزیکی مناسب برای استقرار آن و غالب عوامل مؤثر بر رشد گیاه تأثیر به‌سزایی دارد (۷). در پژوهشی پارتون و همکاران (۱۹۸۷) گزارش کردند که بافت خاک و رطوبت خاک به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده میزان ماده آلی در مقیاس منطقه‌ای شناخته شده‌اند (۲۸). در پژوهشی که زین و همکاران (۲۰۰۵) در سه خاک به‌شدت هوازده (شنی، لومی و رسی) در برزیل

2- Principal component analysis
3- Redundancy analysis
4- Partial least square regression

1- Topographic wetness index

۴) **انحنای قائم**^۷: شدت تغییرات شیب که منجر به تشدید اثر ثقل شده و معیاری است از تضعیف و تشدید جریان ناشی از ثقل. مقدار مثبت و منفی آن به ترتیب نشان‌دهنده تشدید و تضعیف جریان عرضی داخل خاک است و در شدت رسوب‌گذاری، فرسایش و ژئومورفولوژی تعیین‌کننده است.

۵) **انحنای افقی**^۸: شدت تغییرات جهت شیب در راستای خطوط تراز که معیاری از همگرایی و واگرایی جریان است. مقدار مثبت و منفی آن به ترتیب نشان‌دهنده واگرایی و همگرایی عرضی جریان آب است و بر رطوبت و ویژگی‌های خاک تأثیرگذار است.

۶) **انحنای کلی**^۹: انحنای سطح است که مقدار صفر آن نشان‌دهنده سطح مسطح و یا سطحی است که تحدب یک سمت در نقطه مورد نظر با تقعر سمت دیگر در تعادل است.

۷) **انحنای حداقل**^{۱۰}: مقادیر مثبت آن بیانگر تپه و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده دره‌ها است.

۸) **انحنای حداکثر**^{۱۱}: مقادیر مثبت آن دال بر حضور پشته‌ها یا تحدب و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده جوی‌ها یا تقعر است. انحنای حداقل و حداکثر بر میزان فرسایش و رسوب‌گذاری و رطوبت خاک مؤثر هستند.

۹) **همواری بستر دره دارای چند قدرت تفکیک**^{۱۲}: معیاری از مناطق رسوب‌گذاری شده است که دره‌ها پستر و هموارتر از نواحی اطراف است. مقادیر صفر نشان‌دهنده عوارض سطحی فرسایش یافته و مقادیر یک و بزرگ‌تر از آن نشان‌دهنده مناطق رسوب‌گذاری است.

میانگین دمای سالانه ۱۰/۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط ارتفاع آن از سطح دریای آزاد ۲۰۵۰ متر است (۲۷). خاک‌ها مطابق با روش رده‌بندی آمریکایی (۳۸)، اغلب در تحت رده اورتنز^۱، فلوونترز^۲ و زرپترز^۳ قرار دارند. برای بررسی تغییرات کربن آلی خاک، ۱۱۰ کشت‌زار دیم گندم در محدوده منطقه مطالعاتی در سال ۱۳۹۲ انتخاب گردید. کشت‌زارهای مورد بررسی بر اساس تنوع خصوصیات توپوگرافی و تفاوت‌های ممکن در خصوصیات خاک انتخاب شدند. مختصات جغرافیایی مکان‌های انتخابی با حضور در محل با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی^۴ (GPS) تعیین شد (شکل ۱).

مطالعات، اندازه‌گیری‌های صحرائی و نمونه‌برداری خاک: وضعیت توپوگرافی شهرستان خداآبند در شکل ۱ آورده شده است. شاخص‌های توپوگرافی شامل مورد بررسی شامل موارد ذیل بود (۱۴):

۱) **درصد شیب**^۵: بر سرعت جریان‌های سطحی و زیرزمینی، شدت رواناب و بارندگی رسیده به سطح، پوشش گیاهی، ژئومورفولوژی، رطوبت خاک و کلاس تناسب اراضی مؤثر است.

۲) **جهت شیب**^۶: جهت شیب معیاری از جهت جریان‌های ثقلی است.

۳) **شاخص خیسی**: معیاری است از جریان آب بالادست رسیده به نقطه موردنظر با شیب خاص. در بیان این مفهوم شیب به‌عنوان معیاری از جریان عرضی در نقطه موردنظر است. این شاخص در میزان رطوبت خاک و فرآیندهای هیدرولوژیکی تعیین‌کننده است.

7- Profile curvature
8- Plan curvature
9- Total curvature
10- Minimal curvature
11- Maximal curvature
12- Multi-resolution Valley Bottom Flatness

1- Orthents
2- Fluvents
3- Xerepts
4- Global Positioning System
5- Slope steepness
6- Slope aspect

شپیرو- ویلک^۶ است. آزمون کولموگروف- اسمیرنوف برای تعداد نمونه بیش از ۲۰۰۰ عدد به کار می‌رود. آزمون اندرسن- دارلینگ و آزمون رایان جویئر نسبت به کولموگروف- اسمیرنوف در شناسایی عدم تبعیت توزیع‌های دارای کشیدگی از توزیع نرمال قابلیت بیشتری دارند و این در حالی است که آزمون رایان- جویئر نسبت به هر دو روش در شناسایی توزیع‌های نرمالی که دارای داده‌های پرت هستند توانایی بسیار بیشتری دارد. از این رو در این پژوهش آزمون رایان- جویئر به کار رفت (۳۶).

در صورت عدم تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال، از روش تبدیل جانسون^۷ استفاده شد. این روش بسیار قدرتمند بوده و قادر است که مجموعه داده‌هایی را که دارای مقادیر صفر و منفی هستند، نیز نرمال کند (۱۷). با استفاده از روش همبستگی پیرسون، همبستگی بین تمام متغیرها در ۸۰ داده بررسی شد و متغیرهایی که دارای همبستگی معنی‌دار با میزان کربن آلی خاک در حداقل سطح آماری ۹۵ درصد ($P < 0.05$) بودند، به‌عنوان ورودی‌های روش PLSR انتخاب شدند از جمله مزیت‌های مدل PLSR عدم نیاز آن به تعداد نمونه بالا و همین‌طور رفع هم‌خطی و یا همبستگی بالای بین داده‌های ورودی است که ممکن است منجر به ایجاد خطا در برآورد متغیر خروجی می‌گردد (۱۸، ۴۱). بدین منظور، داده‌های ۱۱۰ کشت‌زار مورد بررسی، سه بار به‌صورت تصادفی به دو بخش شامل ۸۰ داده برای ارائه مدل‌سازی و اعتبارسنجی آن به روش اعتبارسنجی تقاطعی به‌صورت جداسازی تکی^۸ (LOOCV) و ۳۰ داده برای آزمون مدل تفکیک شد. اعتبارسنجی تقاطعی زمانی که با PLSR همراه می‌شود امکان انتخاب تعداد مؤلفه‌های مدل PLSR را فراهم می‌سازد و در واقع یکی از روش‌های برآورد دقت

شاخص‌های مذکور با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی^۱ (DEM) تعیین شدند. مدل رقومی ارتفاعی از رادار رفت و برگشتی مأموریت توپوگرافی^۲ SRTM با قدرت تفکیک ۹۰ متر در خط استوا (۱۴) با استفاده از نرم‌افزار SAGA نسخه ۲/۱/۴ و ArcGIS نسخه ۱۰/۳ استخراج گردید.

نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در سه تکرار به‌صورت تصادفی از هر کشت‌زار برداشت گردید. تکرارها در هر مزرعه از بالاست، بخش میانی و پایین‌دست مزرعه و با رعایت فاصله طولی حدود ۳۰ متر برداشته شد. در انتخاب این فاصله هدف این بود که فاصله نقاط بیش‌تر از اندازه یک بعد سلول تصویر مدل رقومی ارتفاعی باشد.

مطالعات آزمایشگاهی: در مجموع ۳۳۰ نمونه خاک برای انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل گردید. در نمونه‌های خاک، درصد شن، سیلت و رس به روش هیدرومتر (۱۶)، رطوبت اشباع به روش گل اشباع (۳۴)، واکنش خاک (pH) در گل اشباع (۲۳) و مقدار کربن آلی (OC) به روش سوزاندن تر (۲۵) اندازه‌گیری شدند.

روش آماری تجزیه و تحلیل داده‌ها: ابتدا متغیرهای ورودی شامل شاخص‌های توپوگرافی و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک از نظر نرمال بودن با استفاده از آزمون رایان- جویئر^۳ بررسی شد. در این آزمون، به هنگام بررسی توزیع نرمال متغیر مورد نظر، چنانچه میزان P-value توزیع بیش‌تر از ۰/۱ باشد توزیع متغیر مورد نظر از تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کند. این آزمون به همراه آزمون اندرسن- دارلینگ^۴ و کولموگروف- اسمیرنوف^۵، آزمون‌های توزیع نرمال در نرم‌افزار مینی‌تب تشکیل می‌دهند و مشابه آزمون

- 1- Digital elevation model
- 2- Shuttle Radar Topography Mission
- 3- Ryan-Joiner
- 4- Anderson-Darling
- 5- Kolmogorov- Smirnov

- 6- Shapiro-Wilk
- 7- Johnson transformation
- 8- Leave one out cross validation

آزمون مدل استفاده شد. از ترسیم، ضریب تبیین (R^2) و مجذور میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) برای بررسی دقت ارزیابی استفاده شد. مقدار RMSE به صورت زیر مورد محاسبه قرار گرفت:

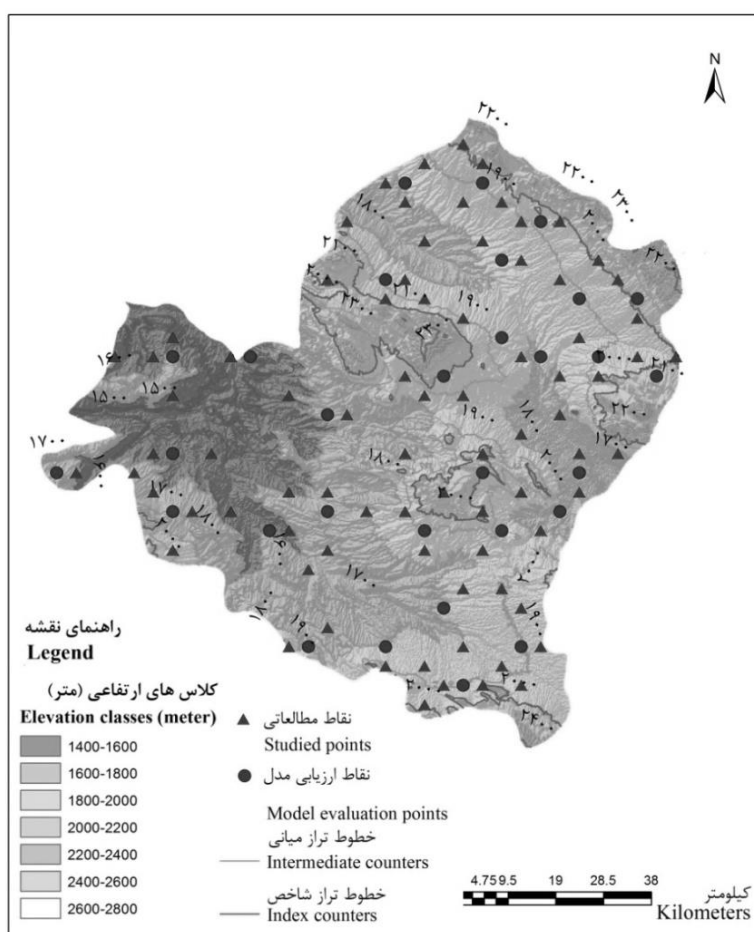
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

که در آن، P_i و O_i همان تعاریف قبلی و n تعداد نمونه‌هاست. برای تجزیه آماری داده‌ها و مدل‌سازی از نرم‌افزارهای SPSS نسخه ۲۲ و Minitab نسخه ۱۶ استفاده شد.

مدل است. طبق این روش تعداد مؤلفه‌ای از مدل PLSR که بیش‌ترین ضریب تبیین اعتبارسنجی تقاطعی را دارد به‌عنوان بهینه‌ترین تعداد مؤلفه برای ارائه مدل انتخاب می‌گردد (۳۶). خطای مدل به صورت زیر مورد محاسبه قرار گرفت:

$$\text{Model Error} = \frac{\sum O_i - P_i}{O_i} \quad (1)$$

که در آن، P_i و O_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده کربن آلی و Model Error میزان خطای برآورد است. ارزیابی مدل با استفاده از روش ترسیمی (خط ۱:۱) با استفاده از داده‌های ۳۰ کشت‌زار برای



شکل ۱- وضعیت شهرستان خداوند در جنوب استان زنجان، شمال غرب ایران و موقعیت نقاط نمونه برداری خاک.

Figure 1. Soil samples positions in Khodabandeh County in South Zanjan, Northwest Iran.

نتایج و بحث

شاخص‌های توپوگرافی: جدول ۱ برخی از شاخص‌های توپوگرافی در کشتزارهای دیم گندم مورد بررسی را نشان می‌دهد. مقدار شیب در کشتزارهای مورد بررسی بین صفر و $34/73$ درصد متغیر و به‌طور میانگین شیب‌های مزارع مطالعاتی رو به جنوب بود. با توجه به شاخص‌های انحنای حداکثر و حداقل، شیب‌ها عموماً به شکل محدب بوده که در پیرامون دره‌ها واقع شده بودند. مقادیر انحنای قائم و افقی نشان می‌دهد که به‌طور میانگین وضعیت توپوگرافی اراضی موجب واگرایی جریان و تضعیف جریان عرضی آب در داخل خاک می‌گردد. نتایج آزمون رایان- جویئر نشان داد که به‌جز شاخص همواری دره با قدرت تفکیک چندگانه و جهت شیب سایر شاخص‌های توپوگرافی از تابع توزیع نرمال پیروی نکردند ($P < 0/01$).

ویژگی‌های خاک‌ها: میانگین و ضریب تغییرات ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نمایش داده شده است. جدول مذکور نشان می‌دهد که به‌طور میانگین بافت خاک‌های مطالعاتی لومرسی بودند. نتایج آزمون رایان- جویئر نشان داد که ویژگی‌های خاک از تابع توزیع نرمال تبعیت

می‌کردند. تمام ویژگی‌های مورد استفاده در این پژوهش جزء ویژگی‌هایی هستند که در کوتاه‌مدت دست‌خوش تغییر نمی‌شوند. از این رو می‌توان برای برآورد میزان کربن آلی خاک در شرایط مشابه از آن‌ها بهره جست.

اثربرداری کربن آلی خاک از شاخص‌های توپوگرافی و ویژگی‌های خاک: جدول ۳ ضرایب همبستگی پیرسون بین کربن آلی خاک و مقادیر نرمال شده شاخص‌های توپوگرافی و ویژگی‌های خاک را نشان می‌دهد. کربن آلی خاک بالاترین همبستگی را به‌ترتیب با میزان شن ($P < 0/01$ ، $r = -0/68$)، رس ($P < 0/01$ ، $r = 0/64$)، شاخص خیزی ($P < 0/01$ ، $r = 0/59$)، سیلت ($P < 0/01$)، $r = 0/59$)، درصد شیب ($P < 0/01$ ، $r = -0/37$) و انحنای حداکثر ($P < 0/01$ ، $r = -0/34$) داشت. در این میان، رس، شاخص خیزی و سیلت با میزان ماده آلی دارای ضرایب همبستگی مثبتی بودند، یعنی افزایش این عوامل منجر به افزایش کربن آلی در خاک شد. این در حالی است که شن، درصد شیب و انحنای حداکثر همبستگی منفی با کربن آلی نشان دادند و افزایش آن‌ها همراه با کاهش محتوای کربن آلی بود.

جدول ۱- برخی از شاخص‌های توپوگرافی در کشت‌زارهای دیم گندم مورد بررسی (n=۱۱۰).

Table 1. Some of topographic indices in the studied wheat farms (n=110).

علامت	آماره رایان جویبر RJ	ضریب تغییرات Variation coefficient	بیش‌ترین Maximum	کم‌ترین Minimum	میانگین Mean	واحد Unit	مشخصه Characteristics
nS	0.85	1.05	34.73	0.00	4.51	درصد (%)	تندی شیب Slope Steepness
A	0.98	53.12	360	0	190.7	درجه	جهت شیب Slope Aspect
nPrC	0.98	-5.96	0.001	-0.001	-7.5	1/m	انحنای قائم Profile Curvature
nPIC	0.88	21.06	0.09	-0.05	0.0007	1/m	انحنای افقی Plan Curvature
nGC	0.75	-8.35	0.006	-0.004	-0.0002	1/m	انحنای کلی General curvature
nMiC	0.96	-1.4	0.001	-0.002	-0.0003	1/m	انحنای حداقل Minimal Curvature
nMaC	0.96	4.69	0.002	-0.001	0.0002	1/m	انحنای حداکثر Maximal Curvature
MRVBF	0.99 ^{ns}	0.52	5.95	0.02	2.96	-	همواری دره با قدرت تفکیک چندگانه Multi-resolution Valley Bottom Flatness
nTWI	0.94	0.25	20.38	6.21	10.1112	-	شاخص خیزی Topographic Wetness Index

ns تبعیت از توزیع نرمال ($P>0.1$)، nS تندی شیب نرمال شده، A جهت شیب، nPrC انحنای قائم نرمال شده، nPIC انحنای افقی نرمال شده، nTC انحنای مماسی نرمال شده، nGC انحنای کلی نرمال شده، nMiC انحنای حداقل نرمال شده، nMaC انحنای حداکثر نرمال شده، nLC انحنای طولی نرمال شده، MRVBF همواری دره با قدرت تفکیک چندگانه و nTWI شاخص خیزی نرمال شده.

ns: following normal distribution ($P>0.1$), ns Normalized slope steepness, A slope Aspect, nPrC Normalized Profile Curvature, nPIC Normalized Plan Curvature, nGC Normalized General Curvature, nMiC Normalized Minimal Curvature, nMaC Normalized Maximal Curvature, MRVBF Multi-resolution Valley Bottom Flatness and nTWI normalized Topographic Wetness Index.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های مورد مطالعه (n=۱۱۰).

Table 2. Some physicochemical characteristics of the soils (n=110).

آماره رایان جویبر RJ	ضریب تغییرات Variation coefficient	بیش‌ترین Maximum	کم‌ترین Minimum	میانگین Mean	واحد Unit	مشخصه Characteristics
0.99 ^{ns}	0.36	67	9	45.2	درصد (%)	شن Sand
0.99 ^{ns}	0.19	56	13	34.4	درصد (%)	سیلت Silt
0.99 ^{ns}	0.36	36	9	20.4	درصد (%)	رس Clay
0.99 ^{ns}	0.01	8.16	7.64	7.87	-	واکنش خاک pH
0.99 ^{ns}	0.31	1.3	0.32	0.71	درصد (%)	کربن آلی Organic carbon

^{ns} تبعیت از توزیع نرمال، ($P>0.1$).

هستند (۹). ضرایب همبستگی پیرسون نشان‌دهنده هم‌خطی چندگانه^۱ بالای بین شن با سیلت ($r = -0/85$) و رس ($r = -0/73$) بود ($|r| > 0/7$) (۱۲). هم‌خطی بین اجزای بافت خاک قبلاً نیز توسط پژوهشگران گزارش شده است (۱۱). از این رو به ناچار میزان شن را در مدل وارد نکرده و سیلت و رس به‌عنوان ورودی‌های مدل وارد شدند. هر چند روش PLSR، رگرسیون مؤلفه‌های اصلی^۲ (PCR) و رگرسیون ریدج^۳ (RR) به‌عنوان روش‌هایی برای مقابله با هم‌خطی ذکر شده‌اند (۱)، با این حال نگره داشتن شن در مجموعه داده‌های ورودی مدل منجر به عامل تورم واریانس^۴ (VIF) بالاتر از ۱۰ و مانع از پذیرفتن مدل شد (۳).

نتایج پژوهش حاضر (جدول ۳) با گزارش‌های صورت گرفته توسط ویسمیر و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت داشت. این پژوهشگران گزارش کردند شاخص خیسی با کربن آلی دارای همبستگی معنی‌دار مثبت است (۴۰). میزان افزایش شاخص خیسی با افزایش تجمع آب و میزان رطوبت خاک در ارتباط است (۳۷). از این رو، افزایش شاخص خیسی احتمالاً با ایجاد شرایط مساعد برای خاک‌سازی، استقرار گیاه و تجمع کربن آلی در ارتباط است. افزایش شیب نیز به دلیل کاهش تشکیل خاک، افزایش فرسایش خاک شرایط نامناسبی برای استقرار پوشش گیاهی و تجمع کربن آلی ایجاد می‌کند. افزایش انحنای حداکثر به‌عنوان معیاری از افزایش تحذب منجر به کاهش ماده آلی می‌گردد. گزارش شده است که در شیب‌های محدب میزان سرعت رواناب و فرسایش خاک و در نتیجه شستشو و هدررفت خاک و کربن آلی بالاست (۳۵). پژوهش صورت گرفته توسط دان-دان (۲۰۱۰) نیز نشان داد که میزان کربن آلی خاک در شیب‌های محدب کم‌تر از شیب‌های مقعر است (۱۰). یافته‌های جدول مذکور (جدول ۳) با نتایج پژوهش صورت گرفته توسط دان-دان و همکاران (۲۰۱۰) نیز مطابقت نشان داد که گزارش کردند در مقیاس منطقه‌ای میزان ماده آلی خاک با میزان شن همبستگی منفی و با سیلت و رس همبستگی مثبتی دارد و همانند مطالعه حاضر ترتیب میزان همبستگی ماده آلی خاک با اجزای بافت خاک به صورت شن < سیلت < رس بود (۱۰). سرعت تجزیه بقایای گیاهی تحت تأثیر دما و رطوبت خاک قرار می‌گیرد که هر دو متأثر از بافت خاک

-
- 1- Multicollinearity
 - 2- Principal component regression
 - 3- Ridge Regression
 - 4- Variance inflation factor

جدول ۳- ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک و شاخص‌های توپوگرافی در کشت‌زارهای دیم گندم (شاخص‌های توپوگرافی همگی نرمال شده هستند).
Table 3- Pearson's correlation coefficients among soil properties and topographic indices in rainfed wheat farms (All topographic indices are normalized).

متغیر variable	کربن آلی Organic carbon (%)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	واکنش pH	شیب Steepness	جهت Aspect	انحنای قائم Profile Curvature	انحنای افقی Plan Curvature	انحنای کلی Total Curvature	انحنای حداقل Minimal Curvature	انحنای حداکثر Maximal Curvature	همواری دره با قدرت تفکیک Multi-resolution Valley Bottom Flatness	شاخص خیسگی Topographic Wetness Index
کربن آلی Organic carbon	1													
شن Sand	-0.68**	1												
سیلت Silt	0.59**	-0.85**	1											
رس Clay	0.64**	-0.73**	0.6**	1										
واکنش pH	0.02	-0.13	0.17	0.09	1									
شیب Steepness	-0.37**	0.27*	-0.2	-0.35**	0.01	1								
جهت شیب Aspect	-0.07	0.11	-0.26*	0.16	-0.1	0.09	1							
انحنای قائم Profile Curvature	-0.13	0.09	-0.03	-0.18	-0.2	-0.18	-0.09	1						
انحنای افقی Plan Curvature	-0.17	0.01	0.08	-0.21	-0.12	-0.05	-0.03	0.42**	1					
انحنای کلی Total Curvature	-0.15	0.06	0.02	-0.22*	-0.19	-0.21	-0.08	0.88**	0.74**	1				
انحنای حداقل Minimal Curvature	0.04	-0.07	0.13	-0.1	-0.14	-0.3**	-0.05	0.77**	0.65**	0.9**	1			
انحنای حداکثر Maximal Curvature	-0.34**	0.16	-0.08	-0.30**	-0.18	0.07	-0.06	0.73**	0.69**	0.81**	0.5**	1		
همواری دره با قدرت تفکیک چندگانه Multi-resolution Valley Bottom Flatness	0.09	-0.13	0.09	0.1	0.24*	-0.53**	0.09	-0.01	-0.04	-0.02	0.05	-0.13	1	
شاخص خیسگی Topographic wetness index	0.59**	-0.33**	0.18	0.55	-0.05	-0.61**	-0.22*	-0.05	-0.29**	-0.12	0.08	-0.43**	0.36**	1

**معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد، * معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصد

**Significant (P<0.01) and *Significant (P<0.05)

و دو ویژگی خاک و ۵۳ درصد (ضریب تبیین رگرسیون) از تغییرات کربن آلی خاک بودند. در واقع میزان سیلت، رس، مقادیر نرمال شده شیب، شاخص خیزی و انحناى حداکثر در قالب دو مؤلفه اصلی توانستند حدود ۵۳ درصد از تغییرات ماده آلی خاک را در اراضی گندم دیم توجیه نمایند. میزان خطای مدل در هر سه تکرار برابر با ۰/۰۵- بود، یعنی به طور میانگین مدل در برآورد کربن آلی هر نقطه به میزان ۵ درصد خطا دارد و مقدار آن را کم تر از مقدار واقعی آن نشان می دهد که از نظر آماری مقدار قابل قبولی است. کتن و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند که درصد شن و یا درصد رس به ترتیب ۷۴ و ۷۱ درصد از تغییرات کربن آلی را توجیه می کنند (۱۹) که با نتایج پژوهش حاضر (جدول ۵) مغایرت داشت و بسیار بیش تر از مقداری (۵۳ درصد) بود که در مطالعه حاضر با در نظر گرفتن شش ویژگی مختلف ارائه شد.

مدل سازی تغییرات کربن آلی خاک در کشتزارهای دیم گندم: جدول ۴ مقادیر R^2 برای سه مدل (برابر با تعداد مؤلفه های اصلی) پیشنهادی بیان کننده تغییرات کربن آلی خاک و اعتبارسنجی تقاطعی هر کدام از آنها را در سه تکرار (M1-M3) نشان می دهد. طبق جدول مذکور تعداد مؤلفه های که دارای بیش ترین R^2 اعتبارسنجی تقاطعی بود، به عنوان تعداد مؤلفه های بهینه و مدلی که بر اساس تعداد مؤلفه بهینه بیان کننده تغییرات محتوای کربن آلی خاک بود، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. از این رو، در هر سه تکرار، مدلی که ترکیب دو مؤلفه اصلی بود به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. مقادیر R^2 برای برازش مدل و اعتبارسنجی آن طبق دو مؤلفه اصلی برای سه تکرار به ترتیب به طور میانگین برابر با ۰/۵۳ و ۰/۴۶ بود. مؤلفه های اصلی اول و دوم در کنار هم قادر به توجیه حدود ۵۷ درصد از واریانس ویژگی های مورد مطالعه شامل سه شاخص توپوگرافی

جدول ۴- انتخاب مدل مناسب برای توصیف تغییرات کربن آلی خاک با استفاده از شیوه PLSR و LOOCV.

Table 4. Optimal model selection for description of soil organic carbon using PLSR and LOOCV methods.

ضریب رگرسیون اعتبارسنجی			ضریب تبیین مدل			خطای مدل			واریانس ورودی			مؤلفه ها
Cross validation coefficient of determination (R^2)			Model coefficient of determination (R^2)			Model Error			Input variance			
M3	M2	M1	M3	M2	M1	M3	M1	M1	M3	M2	M1	Components
.47	0.42	0.43	0.52	0.48	0.48	-0.1	-0.09	-0.09	0.42	0.38	0.38	PC1
0.49	0.46	0.44	0.55	0.53	0.51	-0.05	-0.05	-0.05	0.58	0.57	0.56	PC2
0.48	0.45	0.43	0.55	0.53	0.51							PC3

PC1 مؤلفه اصلی اول، PC2 مؤلفه اصلی دوم و PC3 مؤلفه اصلی سوم.

PC1: First Principal Component, Second Principal Component and Third Principal Component.

اساس دو مؤلفه اصلی قادر بود که به طور معنی داری (P<۰/۰۱) تغییرات کربن آلی را در خاک های مورد پژوهش توجیه کند.

جدول ۵ نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیونی ارائه شده به روش PLSR را نشان می دهد. طبق این جدول هر سه تکرار مدل رگرسیونی ارائه شده بر

جدول ۵- تجزیه واریانس برای مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی در سه تکرار M1، M2 و M3.

Table 5. Analysis of variance for of partial least square model in the three replicates M1, M2 and M3.

F			میانگین مربعات (MS) Mean of square			مجموع مربعات (SS) Sum of square			درجه آزادی (DF) Degree of freedom	منبع تغییرات Variation source
M3	M2	M1	M3	M2	M1	M3	M2	M1	M1-M3	
47.54**	42.76**	40.43**	1.07	0.94	0.97	2.14	1.88	1.95	2	رگرسیون Regression
			0.02	0.2	0.02	1.74	1.7	1.85	77	باقیمانده Residual
						3.88	3.59	3.8	79	کل Total

** معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد.

** Significant (P<0.01).

پیش‌بینی‌کننده کربن آلی خاک دارند. به عبارتی سهم این عوامل در تعیین تغییرات کربن آلی خاک در منطقه مورد مطالعه بیش‌ترین مقدار را دارد.

جدول ۶ ضرایب غیراستاندارد مدل PLSR به همراه ضرایب استاندارد شده آن‌ها را نشان می‌دهد. درصد رس، سیلت و شاخص خیزی نرمال شده بیش‌ترین ضرایب استاندارد شده را در مدل PLSR

جدول ۶- ضرایب غیر استاندارد و ضرایب استاندارد شده مدل PLSR در سه تکرار M1، M2 و M3.

Table 6. Coefficients and standardized coefficients of PLSR model in the three replicates M1, M2 and M3.

ضرایب استاندارد شده Standardized coefficients			ضرایب غیر استاندارد Non-standardized Coefficients			متغیرها Variables
M3	M2	M1	M3	M2	M1	
0.00	0.00	0.00	0.14	0.17	0.22	ثابت Constants
0.3	0.39	0.37	0.01	0.01	0.01	سیلت Silt
0.43	0.36	0.32	0.02	0.01	0.01	رس Clay
0.2	0.23	0.26	0.04	0.05	0.06	شاخص خیزی نرمال شده Normalized wetness index
-0.12	-0.13	-0.12	-0.03	-0.03	-0.02	شیب نرمال شده Normalized slope steepness
-0.08	-0.14	-0.11	-0.02	-0.03	-0.03	انحنای حداکثر نرمال شده Normalized maximal curvature

می‌دهد. با توجه به این که مؤلفه اصلی اول به نوبه خود سهم بیش‌تری در توجیه تغییرات کربن آلی خاک (به‌طور میانگین ۴۹ درصد) دارد، شاید بتوان گفت عواملی که بیش‌ترین سهم را در مؤلفه اول دارند، نقش بیش‌تری نیز در تعیین کربن آلی خاک ایفاء می‌کنند. در نتیجه به نظر می‌رسد که درصد شاخص خیسی نرمال‌شده و درصد شیب که به‌طور میانگین بیش‌ترین ضرایب مؤلفه اصلی اول را به خود اختصاص داده‌اند، ترتیب برابر با ۰/۵۹ و ۰/۴۸ بود، بیش‌ترین سهم را نیز در توجیه تغییرات کربن داشته باشند. با این حال، رس که از نظر سهم در مؤلفه اصلی اول در جایگاه سوم قرار دارد و بیش‌ترین سهم را نیز در مؤلفه اصلی دوم برابر با ۰/۶۹ دارد، بیش از دو عامل یادشده دیگر در توجیه تغییرات کربن آلی خاک نقش دارد.

در پژوهشی موره و همکاران (۱۹۹۳) گزارش کردند که در بین شاخص‌های توپوگرافی، شیب به‌عنوان یکی از شاخص‌های اولیه و شاخص خیسی به‌عنوان یکی از شاخص‌های ثانویه توپوگرافی، بیش‌ترین توانایی را برای توجیه تغییرات ویژگی‌های خاک دارند (۲۴). طبق جدول مذکور سیلت و رس در کنار هم به‌طور میانگین قادر به توجیه ۳۲ درصد از تغییرات محتوی کربن آلی خاک بودند. در گام بعدی شاخص‌های توپوگرافی به‌ویژه شاخص خیسی نرمال شده نقش عمده‌ای در تغییرات کربن آلی در منطقه مورد مطالعه داشت که در کنار شیب و انحنا حد اکثر نرمال شده مجموعاً به‌طور میانگین ۲۱ درصد از تغییرات محتوی کربن آلی خاک را توجیه کرد.

جدول ۷ سهم پنج ویژگی وارد شده در مدل را بر اساس دو مؤلفه اصلی در هر سه تکرار نشان

جدول ۷- سهم متغیرهای مستقل در مؤلفه‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی (nS, nMaC, nTWI) به ترتیب مقادیر نرمال‌شده شیب، انحنا حد اکثر و شاخص خیسی است).

Table 7. Independent variable proportion in components of partial least square regression (nS, nMaC, nTWI are normalized amounts of slope, Maximal curvature and topographic wetness index).

M4		M3		M1		متغیرها Variables
مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	
0.32	0.5	0.24	0.81	0.33	0.77	سیلت Silt
0.48	0.52	0.45	0.21	0.44	0.19	رس Clay
-0.51	0.44	-0.54	0.36	-0.46	0.44	شیب نرمال‌شده Ns
-0.33	0.33	-0.4	0.28	-0.38	0.3	انحنا حد اکثر نرمال‌شده nMaC
0.57	-0.44	0.58	-0.36	0.61	-0.32	شاخص خیسی نرمال‌شده nTWI

$$\text{Estimated OC} = 0.5262 \text{ Measured OC} + 0.3333$$

(M2, $R^2=0.53$, $P<0.01$) (۳)

$$\text{Estimated OC} = 0.5526 \text{ Measured OC} + 0.3088$$

(M3, $R^2=0.55$, $P<0.01$) (۴)

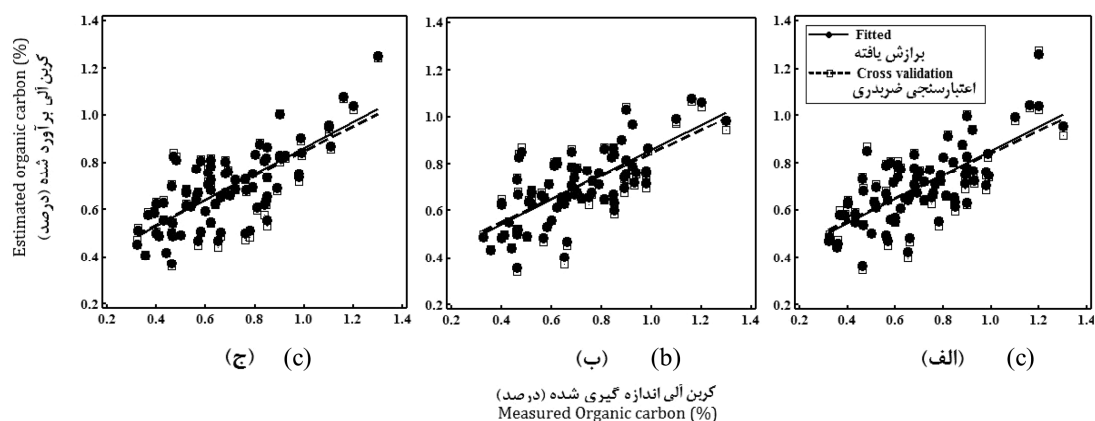
که در آن‌ها، Measured OC و Estimated OC به ترتیب کربن آلی اندازه‌گیری و محاسبه شده (درصد) است. نتایج LOOCV نیز نشان داد که مدل‌های ارائه‌شده در هر سه تکرار به صورت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد تغییرات کربن آلی را بر اساس دو مؤلفه اصلی می‌تواند پیش‌بینی کند (به‌طور میانگین $R^2=0.53$). در پژوهش انجام‌شده توسط ویسمیر و همکاران (۲۰۱۳)، رابطه رگرسیونی برای مدل‌سازی کربن آلی بر اساس ویژگی‌های توپوگرافی و خاک ارائه شد که تنها قادر بود ۱۹ درصد از تغییرات کربن آلی را در اراضی زراعی توجیه کند و عامل اصلی در مدل رگرسیونی همان شاخص خیس‌ی بود (۳۸).

به‌طور میانگین در هر سه تکرار، درصد شیب نرمال‌شده و انحنای حداکثر نرمال شده نیز بیش‌ترین سهم منفی، به ترتیب برابر ۰/۵۵ و ۰/۳۷-، را در مؤلفه اصلی اول بر عهده دارد. شاخص خیس‌ی نرمال‌شده در مؤلفه اصلی دوم نیز سهم منفی دارد. افزایش ماده آلی در مناطقی که دارای شیب بالا و عوارض سطحی به صورت محذب بودند کم‌تر از مکان‌هایی است که اراضی پست‌تر و انحنای زمین به صورت معقر بوده است. این امر به دلیل تجمع بیش‌تر آب، امکان تولید رواناب و فرسایش کم‌تر و امکان استقرار بیش‌تر پوشش گیاهی در اراضی پست‌تر و با شیب کم‌تر است (۳۸، ۹)

شکل ۲ الف، ب و ج به ترتیب رابطه رگرسیونی برازش‌یافته و اعتبارسنجی ضربدری مدل را برای هر سه تکرار نشان می‌دهد. رابطه رگرسیونی اعتبارسنجی شده ($n=80$) برای سه تکرار M1، M2، M3 و میانگین آن‌ها به ترتیب به صورت زیر است:

$$\text{Estimated OC} = 0.5122 \text{ Measured OC} + 0.3411$$

(M1, $R^2=0.51$, $P<0.01$) (۲)



شکل ۲- برازش کربن آلی محاسبه‌شده و مشاهده‌شده و اعتبارسنجی آن برای سه تکرار M1 (الف)، M2 (ب) و M3 (ج) ($n=80$).
Figure 2. Calculated and observed organic carbon fitting and its validation in the three replicates M1(a), M2(b) and M3(c) ($n=80$).

که در آن‌ها، Predicted OC و Measured OC به ترتیب کربن آلی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده (درصد) است.

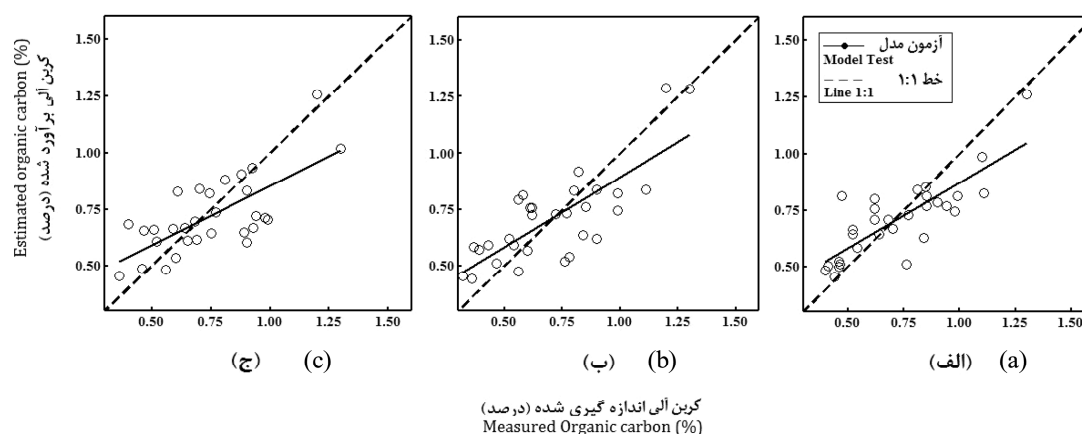
خط ۱:۱ در شکل ۳ نشان می‌دهد که مدل مذکور در تکرار M1 و M2، ۱۳ نقطه را کم‌تر از میزان واقعی و در تکرار M3، ۱۴ نقطه را کم‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. نمودار باقی‌مانده‌های مدل و آزمون آن برای هر سه تکرار از نظر نرمال بودن بررسی شد (در این مقاله آورده نشده است) که برای هر سه تکرار باقی‌مانده‌های مدل از تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کردند. بررسی تبعیت باقی‌مانده‌ها از تابع توزیع نرمال یکی از روش‌های بررسی تبعیت مدل از رابطه خطی است (۲۰) که در هر سه تکرار مدل و آزمون مدل این شرط تأمین شد.

شکل ۳ الف، ب، ج آزمون مدل‌های ارائه شده را در هر سه تکرار برای ۳۰ نقطه نشان می‌دهد. مقادیر RMSE برای آزمون مدل ارائه شده برابر ۰/۲۶ درصد و میزان ضریب تبیین برابر ۰/۵۸ بود که در سطح احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار بود. رابطه رگرسیونی آزمون مدل برای سه تکرار M1، M2 و M3 به ترتیب به صورت زیر است:

$$\text{Estimated OC} = 0.5811 \text{ Measured OC} + 0.2906 \quad (M1, R^2=0.65, \text{RMSE}=0.26, P<0.01) \quad (5)$$

$$\text{Estimated OC} = 0.6234 \text{ Measured OC} + 0.2701 \quad (M2, R^2=0.60, \text{RMSE}=0.26, P<0.01) \quad (6)$$

$$\text{Estimated OC} = 0.5244 \text{ Measured OC} + 0.2680 \quad (M3, R^2=0.49, \text{RMSE}=0.26, P<0.01) \quad (7)$$



شکل ۳- آزمون مدل‌های ارائه شده برای سه تکرار M1 (الف)، M2 (ب) و M3 (ج) (n=۳۰).

Figure 3. Selected model's test in the three replicates M1(a), M2(b) and M3(c) (n=30).

ارائه مدل و هم آزمون آن شود. همچنین، دخالت دادن سایر ویژگی‌های خاک و عوامل مؤثر در تعیین میزان کربن آلی خاک ممکن است بر دقت مدل بیافزاید هر چند که افزایش تعداد متغیرهای مستقل ورودی در هر مدلی ممکن است منجر به افزایش پیچیدگی تفسیر مدل، زمان‌بر بودن گردآوری اطلاعات و مصرف نیروی انسانی بیشتر شود.

می‌توان گفت این مدل توانسته است به طور معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصد تغییرات کربن آلی را در دیم‌زارهای گندم شهرستان خدابنده توجیه کند. بنابراین از این مدل می‌توان در شرایط مشابه شهرستان خدابنده استفاده کرد و یا آن را واسنجی نمود. البته، افزایش تعداد نمونه‌های دارای کربن آلی بالا احتمالاً منجر به افزایش دقت آن هم در مرحله

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش جزء ویژگی‌هایی هستند که در کوتاه‌مدت دست‌خوش تغییر نمی‌شوند. از این‌رو می‌توان برای برآورد میزان کربن آلی خاک در شرایط مشابه از آن‌ها بهره جست. به نظر می‌رسد افزودن سایر ویژگی‌های خاک هم‌چون ویژگی‌های نیم‌رخ خاک و دیگر ویژگی‌های توپوگرافی به مدل منجر به افزایش دقت آن گردد. علاوه بر آن، سایر عوامل از جمله پارامترهای اقلیمی مانند بارندگی و دما، مدیریت خاک و مدیریت زراعی نیز ممکن است در تغییرات محتوای ماده آلی خاک در اراضی دیم منطقه نقش داشته باشد که می‌توان در پژوهش‌های آتی به نقش آن‌ها پرداخت. البته باید این امر را نیز در نظر داشت که افزودن ویژگی‌های دیگر به هر مدل منجر به پیچیده شدن آن و نیاز به داده‌های بیش‌تر و افزایش نیروی انسانی و صرف زمان خواهد شد.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه بیش‌تر تحت‌تأثیر مقادیر شاخص‌های توپوگرافی نرمال‌شده شامل تندگی شیب، انحنای حداکثر و شاخص خیسی و همین‌طور اجزای بافت خاک شامل شن، سیلت و رس است ($P < 0/01$) و از سایر ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری در این مطالعه تأثیر نمی‌پذیرد. نتایج اعتبارسنجی تقاطعی نشان داد که مدلی که دارای دو مؤلفه اصلی اول می‌باشد در هر سه تکرار، دقیق‌ترین مدل در تعیین تغییرات کربن آلی در خاک کشت‌زارها است ($P < 0/01$ و $R^2 = 0/46$). دو مؤلفه اصلی ترکیبی از پنج ویژگی تندگی شیب، انحنای حداکثر، شاخص خیسی توپوگرافی، سیلت و رس بود. مدل رگرسیونی حداقل مربعات جزئی نشان داد که مدل دومؤلفه‌ای به‌طور معنی‌داری قابلیت توجه ۵۳ درصد از تغییرات کربن آلی را در اراضی گندم دیم دارد ($P < 0/01$). تمام ویژگی‌های مورد استفاده

منابع

- Adnan, N., Ahmad, M.H., and Adnan, R. 2006. A comparative study on some methods for handling multicollinearity problems. *Matematika*. 22: 2. 109-119.
- Andruschkewitsch, R., Geisseler, D., Koch, H.J., and Ludwig, B. 2013. Effects of tillage on contents of organic carbon, nitrogen, water-stable aggregates and light fraction for four different long-term trials. *Geoderma*. 192: 368-377.
- Asakereh, H. 2004. Modeling of spatial variation climatic parameters- case study: annual precipitation of Isfahan province. *Geographical Research*. 74: 3. 213-231. (In Persian)
- Ayoubi, S., Mokhtari Karchegani, P., Mosaddeghi, M.R., and Honarjoo, N. 2012. Soil aggregation and organic carbon as affected by topography and land use change in western Iran. *Soil Tillage Res.* 121: 0. 18-26.
- Bilandi, S.M., Khormali, F., and Karouyeh, A.K. 2014. Map preparing using topographic characteristic and geostatistic in in some part of Toshan area, Golestan Province. *Soil Res. J. (Soil and Water Science.)* 28: 2. 459-468. (In Persian)
- Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., and McDaniel, P.A. 2011. *Soil genesis and classification*, John Wiley and Sons.
- Chaudhari, S., Singh, R., and Kundu, D. 2008. Rapid textural analysis for saline and alkaline soils with different physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 2. 431-441.
- Corsi, S., Friedrich, T., Kassam, A., Pisante, M., and Sà, J.M. 2012. Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture: a literature review. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Craine, J.M., and Gelderman, T.M. 2011. Soil moisture controls on temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition for a mesic grassland. *Soil Biol. Biochem.* 43: 2. 455-457.

10. Dan-Dan, W., Xue-Zheng, S., Hong-Jie, W., Weindorf, D.C., Dong-Sheng, Y., Wei-Xia, S., Hong-Yan, R., and Yong-Cun, Z. 2010. Scale effect of climate and soil texture on soil organic carbon in the uplands of Northeast China. *Pedosphere*. 20: 4. 525-535.
11. Dashtaki, S.G., Homaei, M., and Khodaverdiloo, H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use Manage.* 26: 1. 68-74.
12. Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P.E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A.K., Zurell, D., and Lautenbach, S. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*. 36: 1. 27-46.
13. Fallahzade, J., and Hajabbasi, M.A. 2011. The distribution of organic carbon, nitrogen and carbohydrates in aggregates of some desert and cropland soils in central Iran. *J. Water Soil.* 25: 3. 518-529. (In Persian)
14. Florinsky, I.V. 2012. *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*, Elsevier/Academic Press.
15. Franzluebbers, A.J. 2005. Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. *Soil Tillage Res.* 83: 1. 120-147.
16. Gee, G.W., and Or, D. 2002. Particle-size analysis. P 255-294, In: J. Dane and G.C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 4. Physical Methods*. SSSA, Madison, WI, USA.
17. Johnson, N.L. 1949. Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation. *Biometrika Trust*. 36: 1-2. 149-176.
18. Knadel, M., Thomsen, A., Schelde, K., and Greve, M.H. 2015. Soil organic carbon and particle sizes mapping using vis-NIR, EC and temperature mobile sensor platform. *Comput. Electron. Agric.* 114: 0. 134-144.
19. Konen, M., Burras, C., and Sandor, J. 2003. Organic carbon, texture, and quantitative color measurement relationships for cultivated soils in north central Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 6. 1823-1830.
20. Kuhn, M., and Johnson, K. 2013. *Applied predictive modeling*, Springer.
21. Lal, R. 2010. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *BioScience*. 60: 9. 708-721.
22. Liu, S., Zhang, W., Wang, K., Pan, F., Yang, S., and Shu, S. 2015. Factors controlling accumulation of soil organic carbon along vegetation succession in a typical karst region in Southwest China. *Sci. Total. Environ.* 521-522: 0. 52-58.
23. McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement, pp. (199-224). In: Page, A.L., ed., *Methods of soil analysis, (Volume) Part 2. Chemical and microbiological properties: American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin*.
24. Moore, I.D., Gessler, P., Nielsen, G., and Peterson, G. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 2. 443-452.
25. Nelson, D.W., and Sommer, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter, pp. (539-579). In: Page, A.L., ed., *Methods of Soil Analysis: (Volume) Chemical and Microbiological Properties ASA Monograph, 9 American Society of Agronomy, Madison*.
26. O'Brien, S.L., Jastrow, J.D., Grimley, D.A., and Gonzalez-Meler, M.A. 2015. Edaphic controls on soil organic carbon stocks in restored grasslands. *Geoderma*. 251-252: 0. 117-123.
27. Office of budget and planning. 2011. *Planning assistant of Zanjan province general governor*. 5. 1st edition.
28. Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V., and Ojima, D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 5. 1173-1179.
29. Parvizi, Y., Gorji, M., Mahdian, M.H., and Omid, M. 2010. Soil organic carbon variability prediction and determination of physical and management variables impacts in a semi-arid rainfed watershed using multivariate canonical discriminate analysis (CDA) techniques. *J. Water Soil.* 24: 4. 745-756. (In Persian)

30. Pei, T., Qin, C.Z., Zhu, A.X., Yang, L., Luo, M., Li, B., and Zhou, C. 2010. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. *Ecol. Indic.* 10: 3. 610-619.
31. Reeves, D. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* 43: 1. 131-167.
32. Reinsch, S., Ambusa, P., Thornton, B., and Paterson, E. 2013. Impact of future climatic conditions on the potential for soil organic matter priming. *Soil Biol. Biochem.* 65: 133-140.
33. Renwick, W., Smith, S., Sleezer, R., and Buddemeier, R.W. 2004. Comment on "managing soil carbon"(ii). *Science.* 305: 5690. 1567-1567.
34. Rhoades, J.D. 1982. Soluble salts. P 167-179, In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2: Chemical and microbiological properties*, (Volume Monograph Number 9 (Second Edition): ASA, Madison, WI. USA.
35. Ritchie, J.C., McCarty, G.W., Venteris, E.R., and Kaspar, T.C. 2007. Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape. *Geomorphology.* 89: 1-2. 163-171.
36. Ryan, B., Joiner, B., and Cryer, J. 2012. MINITAB Handbook: Update for Release.
37. Schwanghart, W., and Jarmer, T. 2011. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography-a case study from south-eastern Spain. *Geomorphology.* 126: 1. 252-263.
38. Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
39. Volk, C., Wood, L., Johnson, B., Robinson, J., Zhu, H.W., and Kaplan, L. 2002. Monitoring dissolved organic carbon in surface and drinking waters. *J. Environ. Monit.* 4: 1. 43-7.
40. Wiesmeier, M., Hübner, R., Barthold, F., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., von Lütow, M., and Kögel-Knabner, I. 2013. Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria). *Agric. Ecosyst. Environ.* 176: 0. 39-52.
41. Zarinfar, S., Ghahraman, B., and Davary, K. 2011. Development of Some Pedotransfer Functions to Predict the Saturated Hydraulic Conductivity of Gravel Soils Using Partial Least Square Regression Method. *J. Water Soil.* 25: 3. 617-624. (In Persian)
42. Zinn, Y.L., Lal, R., and Resck, D.V.S. 2005. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. *Geoderma.* 127: 1-2. 168-173.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(3), 2016
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Modeling of soil organic carbon content using topographic indices and soil characteristics in rainfed wheat lands

***F. Babaei¹, A.R. Vaezi² and M. Taheri³**

¹Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, University of Zanjan,

²Associate Prof., Dept. of Soil Science, University of Zanjan,

³Assistant Prof. of Zanjan, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

Received: 04/04/2014; Accepted: 12/28/2014

Abstract

Background and Objectives: Soil organic carbon is one of the crucial factors which affects soil quality, water and atmosphere. Soil organic carbon content is a function of climate, vegetation cover, drainage, crop management, land use and soil properties such as texture, mineralogy and structure. Slope steepness and different topographic positions are influencing on soil moisture retention and a suitable condition creation for plant establishment and eventually soil organic carbon accumulation and decomposition. Among soil properties affecting on soil organic carbon, the most researches have been done on soil texture constitutes and the different results has been reported. The aim of this study is developing a regression model to estimate soil organic carbon using topographic indices and soil characteristics.

Materials and Methods: In the present study, 110 soil samples were randomly collected from topsoil (0-30 cm) in three replicates from rainfed wheat farms of Khodabandeh County located in South Zanjan, in 2013. Topographic indices including slope steepness, topographic wetness index, multi-resolution valley bottom flatness and profile, plane, general, maximal and minimal curvatures were obtained using digital elevation model in 90m×90m resolution. Soil properties including sand, silt and clay, saturated paste pH and organic carbon content were measured in laboratory. If the data did not follow normal distribution, Johnson Transformation was performed. Applying partial least square regression, a model was developed for describing soil organic carbon variations (n=80). The cross validation by leave one out method was executed to select the optimal model based on principal components number. Then, the selected model was tested using new set of data (n=30). All the modeling, it validation and test processes were performed in three replicates by grouping the data in modeling-validation and test data sets.

Results: Among topographic indices, soil organic carbon demonstrated highest Pearson correlation coefficients with normalized topographic wetness index ($r=0.59$, $P<0.01$), normalized slope steepness ($r=0.37$, $P<0.01$) and normalize maximal curvature ($r=0.34$, $P<0.01$). Also, Soil organic carbon revealed the highest correlation with sand ($r= -0.68$, $P<0.01$), clay ($r=0.64$, $P<0.01$) and silt ($r=0.59$, $P<0.01$). Normalized topographic wetness index, slope steepness and maximal curvature, also silt, clay and equivalent calcium carbonate were used for modeling of soil organic carbon variations applying least square regression method. The cross-validation results revealed that the two first principal components were optimal for the modeling that could describe 57 and 53 percentages of model's inputs and output variances, respectively ($P<0.01$ and $n=80$). RMSE and R^2 of the model's evaluation were equal to 0.26 percent and 0.55, respectively ($P<0.01$).

Conclusion: In general, the results of the current research showed soil organic carbon in different farms were mostly influenced by soil texture constitutes as silt and clay could describe 32 percentage of soil organic carbon content variation. Topographic indices were in the next step, normalized wetness index, slope and maximal curvature described 21 percentage of soil organic carbon content variations. The partial least square regression model showed the model which contains two principal components could significantly describe 62 percentages of soil organic carbon in rainfed wheat lands ($P<0.01$). The model can be applied for estimation of soil organic carbon in rainfed lands. Assessment of other variables such as soil profile characteristics, historical soil and crop management may become beneficiary in development of more accurate model.

Keywords: Leave-one-out cross validation, Maximal curvature, Regression, Wetness index

* Corresponding Author; Email: fbabaei_a@yahoo.com

