



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و ششم، شماره ششم، ۱۳۹۸

۵۹-۷۸

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

DOI: 10.22069/jwsc.2019.16387.3171

ارزیابی کارایی طیف‌سنجی انعکاسی در تخمین مقدار کربن آلی خاک حوزه آبخیز دریاچه زریبار، استان کردستان

سهیلا فهمیده^۱، * مسعود داوری^۲، محمدرضا مصدقی^۳ و زاهد شریفی^۲

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، استادیار گروه علوم و مهندسی خاک،

^۲ دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، ^۳ استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: کربن آلی، به‌عنوان یکی از اجزای عمده سازنده ماده آلی خاک، در غالب فرآیندهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیک خاک نقشی مهم دارد. ماده آلی یا کربن آلی خاک یکی از پارامترهای کلیدی کیفیت خاک و یک شاخص حاصلخیزی خاک است. ماده آلی در تشکیل خاکدانه‌ها و پایداری آن‌ها، جذب آب و عناصر غذایی، ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک، نفوذ آب و هوا، هدایت هیدرولیکی خاک، آب‌گریزی و ترسیب کربن نقشی ضروری دارد. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که کیفیت و کمیت ماده آلی خاک می‌تواند تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی هم‌چون عملیات زراعی و فعالیت‌های توسعه‌ای اقتصادی قرار گیرد. نرخ بالایی از هدررفت ماده آلی خاک بر روی اراضی فرسایش یافته نیز گزارش شده است. از این‌رو پایش تغییرات زمانی و مکانی ماده آلی خاک برای ارزیابی مدیریت بلندمدت پتانسیل بالقوه خاک ضروری است. این در حالی است که نمونه‌برداری‌های مرسوم خاک و اندازه‌گیری مقدار کربن آلی خاک، به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ جغرافیایی، دشوار، پرهزینه و زمان‌بر است. بنابراین، ارزیابی سریع و دقیق کربن آلی خاک می‌تواند در مدیریت درازمدت خاک سودمند باشد. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی کارایی طیف‌سنجی انعکاسی خاک در محدوده مرئی- مادون‌قرمز نزدیک برای تخمین مقدار کربن آلی خاک در حوزه آبخیز دریاچه زریبار در شهرستان مریوان، استان کردستان بود.

مواد و روش‌ها: بدین‌منظور ۱۰۰ نمونه خاک سطحی از منطقه مورد مطالعه با وسعتی حدود ۱۰۷۱۸ هکتار جمع‌آوری شد. انعکاس طیفی این نمونه‌ها و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. پس از ثبت طیف‌ها، روش‌های مختلف پیش‌پردازش داده‌های طیفی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس توابع انتقالی خاکی و توابع انتقالی طیفی با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام برای برآورد کربن آلی خاک پی‌ریزی شدند. اعتبار این توابع اشتقاق یافته برآوردگر کربن آلی خاک، با استفاده از آماره‌های مختلفی همچون ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، میانگین خطا (ME)، شاخص انطباق (d) و درصد انحراف نسبی (RPD) ارزیابی شدند.

* مسئول مکاتبه: m.davari@uok.ac.ir

یافته‌ها: با توجه به نتایج، بین کربن آلی خاک با مقادیر انعکاس طیفی خاک در طول موج‌های ۸۵۸ و ۱۹۱۶ نانومتر همبستگی بالا و معنی‌داری (در سطح معنی‌دار ۰/۱) مشاهده گردید. نتایج نشان داد توابع انتقالی خاکی (NRMSE_{avg}=۲۴/۵۵٪، R_{avg}²=۰/۸۳) در مقایسه با توابع انتقالی طیفی پیشنهادی (NRMSE_{avg}=۴۴/۳۱٪، R_{avg}²=۰/۴۴)، دارای دقت بیشتری در برآورد کربن آلی خاک می‌باشند. هر چند توابع انتقالی طیفی اشتقاق یافته با رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام نیز، برآوردهای نسبتاً خوبی از کربن آلی خاک ارائه کردند (RPD_{avg}=۱/۴۴، R_{avg}²=۰/۵۲). نتایج هم‌چنین نشان داد مشتق اول + فیلتر ساویتزکی-گلای، به دلیل کاهش اثرات نویزهای تصادفی و بهبود مدل‌های واسنجی، بهترین روش در پیش‌پردازش داده‌های طیفی خاک است.

نتیجه‌گیری: در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد اگرچه کارایی توابع انتقالی طیفی در برآورد کربن آلی خاک نسبت به توابع انتقالی خاکی متناظر آن بالا نیست، ولی در موارد عدم دسترسی به توابع انتقالی خاکی، این رویکرد می‌تواند به‌عنوان یک روش معقول غیرمستقیم در برآورد کربن آلی خاک مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بازتاب طیفی خاک، رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام، ماده آلی خاک

مقدمه

خاک ذخیره کرده و باعث افزایش حاصلخیزی خاک و بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاهان می‌شود (۱۹ و ۳۸). کربن آلی منبع تأمین غذا و انرژی برای ریزجانداران خاک است. هم‌چنین مقدار کربن آلی خاک بر نیتروژن قابل‌دسترس گیاهان و جذب آفت‌کش‌ها نیز تأثیر قابل‌توجهی دارد. شاید به این دلیل باشد که برخی کربن آلی خاک را به‌عنوان مهم‌ترین شاخص کیفیت خاک مطرح می‌کنند (۳۴ و ۵۶). در بیش‌تر موارد نیز، کاهش مقدار کربن آلی خاک به‌عنوان مناسب‌ترین معیار برای ارزیابی شروع تخریب اراضی عنوان می‌شود (۶ و ۲۴).

اطلاع از مقدار کربن آلی خاک به‌ویژه در مقیاس‌های مکانی بزرگ نیاز به نمونه‌برداری‌های زیاد خاک و اندازه‌گیری‌های متعدد آزمایشگاهی داشته که خود هزینه و زمان زیادی را می‌طلبد. در دهه‌های اخیر، بهره‌گیری از روش‌های دورسنجی برای ارزیابی ویژگی‌های خاک به‌دلیل صرف هزینه، زمان و عملیات صحرائی کم‌تر، به مقدار زیادی مورد توجه قرار گرفته است (۳۹). این رشد روزافزون استفاده از داده‌های

خاک در چرخه کربن و گرمایش جهانی دارای نقشی کلیدی است. ذخیره کربن آلی در خاک، افزون بر کاهش غلظت گاز کربنیک نیوار، سبب افزایش کمی تولید محصولات زراعی، بهبود کمیت و کیفیت آب، حفظ خاک، اصلاح خاک‌های تخریب‌یافته، تصفیه آلاینده‌ها و تسهیل ذخیره آب و املاح در خاک می‌شود (۶ و ۲۵). بنابراین برآورد دقیق مقدار کربن آلی خاک در ارزیابی حاصلخیزی خاک و هم‌چنین در پژوهش‌های مربوط به آلودگی محیط خاک ضروری است (۵۲). کربن آلی خاک یکی از شاخص‌های اصلی کیفیت و توان تولید خاک به‌شمار می‌رود (۳۴). وجود کربن آلی، حتی به مقدار کم، می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک تأثیر زیادی داشته باشد (۱۴). کربن آلی با کمک به تشکیل خاکدانه‌های پایدار و کاهش پراکنش ذرات رس، ساختمان خاک را بهبود داده و از هدررفت خاک و آب ممانعت به عمل می‌آورد (۳۶). کربن آلی خاک به‌دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، عناصر غذایی را در

مختلف رگرسیونی و بهره‌گیری از داده‌های طیفی، برآورد مقدار کربن آلی خاک را با مقادیر R^2 بین ۰/۶۶ تا ۰/۸۹ گزارش کرده‌اند (۵۷). با توجه به این‌که در اثر برهم‌کنش‌های پیچیده هر یک از اجزای خاک، بازتاب طیفی آن حاصل می‌شود، استفاده از روش‌های مناسب آماری به‌زای طول‌موج‌های مشخص برای تعیین مقدار کربن آلی خاک ضروری است. سامرز و همکاران (۲۰۱۱) از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۴ (PLSR) و میزان انعکاس در محدوده Vis-NIR-SWIR برای آزمون همبستگی بین کانی‌شناسی خاک، رس و کربن آلی بهره گرفته و گزارش کردند که مقادیر R^2 برای تمامی پارامترها بیش از ۰/۵ و مقادیر درصد انحراف نسبی^۵ (RPD) نیز قابل قبول بوده است (۵۱). نوسیتا و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی کربن آلی خاک را در سطوح مختلف رطوبتی، با استفاده از بازتاب طیفی در محدوده Vis-NIR پیش‌بینی کردند. این پژوهشگران شاخص رطوبت خاک نرمال‌شده را برای برآورد مقدار رطوبت خاک پیشنهاد کرده و با توجه به مقدار رطوبت، از این شاخص برای طبقه‌بندی طیفی نمونه‌ها استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های طیفی خاک با رطوبت جرمی دارای همبستگی بسیار قوی و با کربن آلی خاک، به‌ویژه در مقادیر رطوبتی کم‌تر، دارای همبستگی متوسطی می‌باشند (۴۲). شیفر و هرگارتن (۲۰۱۴) از داده‌های طیفی در محدوده Vis-NIR و روش‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی^۶ (PCR) برای تخمین کربن آلی خاک در اتیوپی استفاده کردند. نتایج نشان داد مقادیر R^2 و RPD مربوط به مدل PLSR به ترتیب ۰/۶ و ۱/۵ و برای مدل PCR نیز به ترتیب ۰/۵ و ۱/۲ بودند. این نتایج بیانگر کارایی بیشتر

طیفی به دلیل بار اطلاعاتی زیادی است که این داده‌ها می‌توانند با خود به همراه داشته باشند. از آن‌جاکه خاک نیز هم‌چون دیگر اجسام موجود در طبیعت براساس ترکیب و ساختار مولکولی خود، بازتاب مشخصی در نواحی مختلف امواج الکترومغناطیس و یا طول‌موج‌های گوناگون نشان می‌دهد، بنابراین دارای سیمای طیفی خاص خود است (۳۱ و ۳۷). بنابراین با بهره‌گیری از طیف‌های بازتابی می‌توان بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را کمی کرد. برخی از ویژگی‌های خاک، مانند رنگ، بافت، ساختمان، کانی‌شناسی، ماده آلی، کربنات‌های آزاد، شوری، رطوبت و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز در انعکاس بازتابی آن تأثیر داشته و سبب شکل‌گیری الگوی سیمای طیفی ویژه‌ای می‌شوند (۱۶). استفاده از داده‌های طیفی به‌ویژه در دامنه طیف‌های مرئی^۱ (Vis) و مادون‌قرمز نزدیک^۲ (NIR) (طول‌موج‌های بین ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) به‌عنوان روش جایگزین اندازه‌گیری آزمایشگاهی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ارائه شده است (۲۹). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در گستره مرئی و مادون‌قرمز نزدیک (Vis-NIR)، طول‌موج ۳۵۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر) و مادون‌قرمز میانی^۳ (MIR)، طول‌موج ۳۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ نانومتر) می‌توان مقدار کربن آلی خاک را برآورد کرد (۱۷). بن‌دور (۲۰۰۲) و ویسکارا راسل (۲۰۰۸) نیز توصیه کرده‌اند که در گستره ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر می‌توان مقدار ماده آلی خاک را کمی کرد (۱۱ و ۵۴). در پژوهش‌های مختلف، با استفاده از داده‌های طیفی و بهره‌گیری از روش‌های مختلف آماری، گستره‌های گوناگونی از دقت برای برآورد مقدار کربن آلی خاک ارائه شده است. به‌عنوان مثال، والورت و مک‌برتنی (۲۰۰۱) با استفاده از روش‌هایی

4- Partial least square regression
5- Ratio of performance to deviation
6- Principal component regression

1- Visible
2- Near infrared
3- Mid-infrared

روش رگرسیون خطی چندگانه^۱ (MLR) در استفاده از داده‌های طیفی مرئی- مادون‌قرمز نزدیک جهت برآورد کربن آلی خاک، (۲) بررسی تأثیر استفاده از روش‌های مختلف پیش‌پردازش داده‌های طیفی بر دقت مدل‌های تخمین‌گر کربن آلی خاک و (۳) ارزیابی عملکرد مدل‌های پیشنهادی مبتنی بر داده‌های طیفی خاک با مدل‌های پیشنهادی مبتنی بر ویژگی‌های ذاتی خاک، در برآورد کربن آلی خاک.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری کربن آلی خاک: منطقه مورد مطالعه بخشی از اراضی واقع در حوزه آبخیز دریاچه زریبار در فاصله ۳ کیلومتری غرب شهر میوان، در استان کردستان است. میانگین ارتفاع حوزه از سطح دریا برابر ۱۲۸۵/۵ متر و مساحت آن حدود ۱۰۷۱۸ هکتار بوده که به‌طور عمده تحت پوشش اراضی کشاورزی شامل اراضی باتلاقی، زراعت آبی، زراعت دیم، باغات پراکنده، مرتع، جنگل و مناطق مسکونی است. اقلیم محدوده مورد مطالعه بر اساس روش آمبرژه مرطوب سرد و بر اساس روش دومارتن بسیار مرطوب سرد است. میانگین بارندگی سالیانه برابر ۱۰۲۲/۸ میلی‌متر بوده و بیشینه این مقدار در فصل بهار رخ می‌دهد. میانگین دمای سالیانه نیز ۱۲/۱۲ درجه سلسیوس و میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل سالیانه به روش پنمن-مانتیت ۱۲۱۶/۶ میلی‌متر برآورد شده است. رژیم رطوبتی و حرارتی منطقه به‌ترتیب زیریک و مزیک بوده و دو کلاس بافتی لوم و لوم سیلتی بافت‌های غالب خاک‌های منطقه را تشکیل می‌دهند.

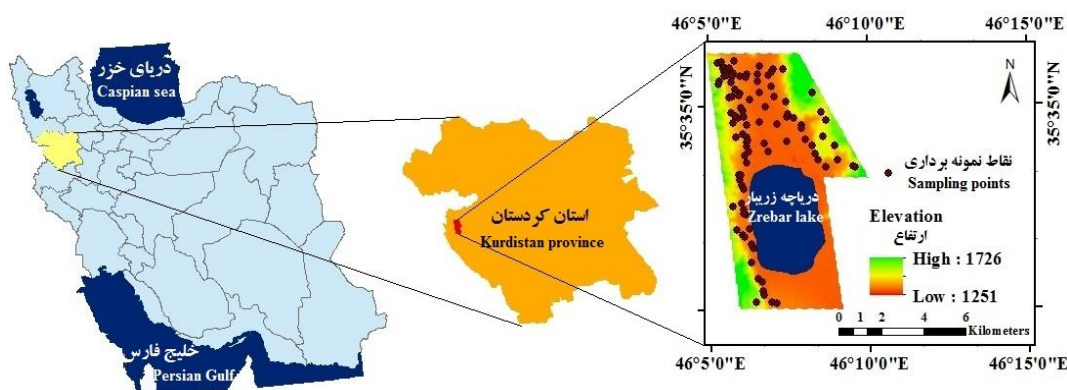
در این پژوهش تعداد ۱۰۰ نمونه خاک از این منطقه به‌صورت دست‌خورده از عمق ۵-۰ سانتی‌متری به روش تصادفی برداشت شد. نمونه‌ها پس از هوا-خشک‌شدن برای حذف سنگ، ریشه و بقایای گیاهی

روش PLSR در مقایسه با روش PCR برای برآورد کربن آلی خاک است (۴۸). از طرف دیگر اینگلی و کرو (۲۰۰۰) به بررسی ارتباط بین انعکاس طیفی و ماده آلی خاک در پنج منطقه از اراضی ساسکاتچوان کانادا پرداخته و به‌هیچ‌وجه مدل مناسبی که ارتباط بین این دو کمیت را نشان دهد دست نیافتند. دلیل این نتایج ضدونقیض را می‌توان به عوامل زیادی از جمله شرایط منطقه مورد مطالعه از نظر میزان مواد آلی خاک و توزیع مکانی آن، وضعیت پوشش گیاهی، مواد معدنی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین به مواد و روش‌های به کار گرفته شده نسبت داد (۲۷). در ایران نیز خیامیم و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی با بهره‌گیری از روش PLSR، کارایی طیف‌سنجی مرئی- مادون‌قرمز نزدیک را در برآورد مقدار ماده آلی، کربنات‌ها و درصد گچ خاک‌های سطحی استان اصفهان ارزیابی کردند. این پژوهشگران نشان دادند که مقدار R^2 مدل پیشنهادی برای ماده آلی خاک معادل ۰/۶۱ بوده و با توجه به مقادیر RPD آن، پیش‌بینی‌های این مدل برای ماده آلی خاک قابل قبول است (۳۱). بابائیان و جلالی (۲۰۱۶) نیز مقدار کربن آلی خاک را با استفاده از داده‌های طیفی و بهره‌گیری از روش‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) و رگرسیون حداقل مربعات جزئی توأم با باز نمونه‌گیری (bagging-PLSR) برآورد کردند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که روش bagging-PLSR نسبت به روش PLSR دقت بیشتری در برآورد کربن آلی خاک دارد (۷).

با توجه به این‌که راجع به استفاده از طیف‌سنجی انعکاسی در برآورد کربن آلی خاک، پژوهش‌هایی اندک در ایران انجام شده است؛ بنابراین در این پژوهش تلاش بر این بود که امکان‌سنجی استفاده از داده‌های طیفی مرئی- مادون‌قرمز نزدیک در برآورد کربن آلی خاک ارزیابی شود. بدین‌منظور مهم‌ترین اهداف این پژوهش عبارت‌اند از (۱) بررسی کارایی

معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی (۳۳)، هدایت الکتریکی و pH در نسبت‌های ۲:۱ خاک به آب به‌ترتیب با استفاده از دستگاه‌های هدایت‌سنج و pH متر (۴۴ و ۵۳) و نیتروژن کل نیز با روش کج‌دال (۱۳) اندازه‌گیری شد. برای شمارش تعداد باکتری و قارچ‌ها از روش آلف و نانی‌پیری (۱۹۹۵) و برای اندازه‌گیری تنفس پایه خاک از روش جاگی (۱۹۷۶) استفاده شد (۱ و ۲۸).

از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌های خاک، ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری (۲۲)، چگالی حقیقی و چگالی ظاهری خاک به‌ترتیب با روش‌های پیکنومتر و کلوخه (۲۰ و ۲۳)، مقدار کربن آلی خاک به روش والکی-بلاک (۴۱) و تخلخل کل خاک از طریق محاسبه نسبت چگالی ظاهری به چگالی حقیقی و بهره‌گیری از رابطه $f = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$ (۲۱) اندازه‌گیری شدند. کربنات کلسیم

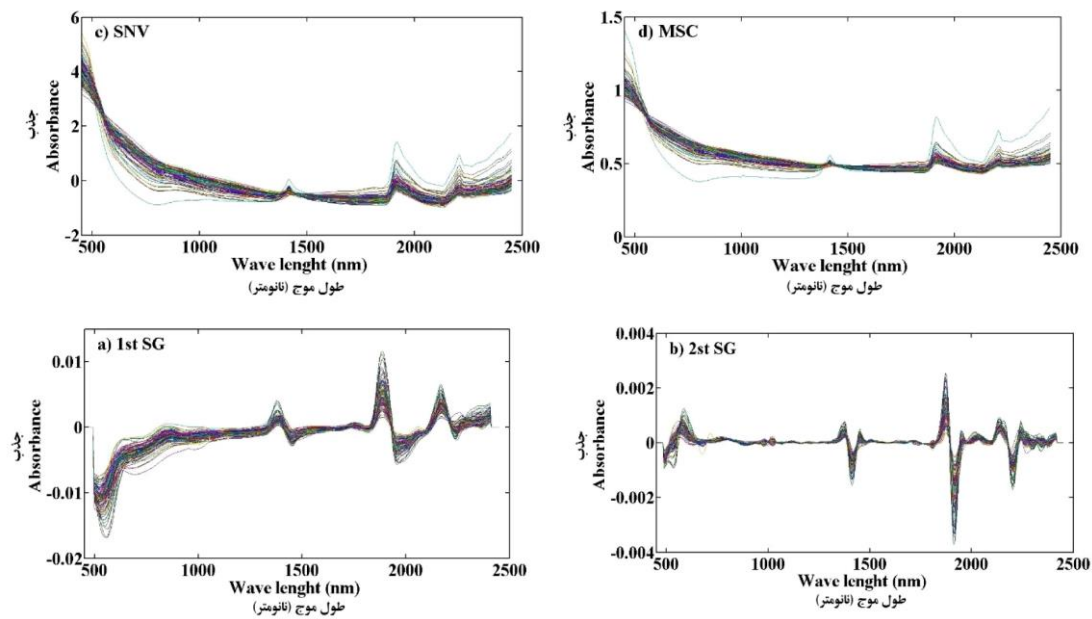


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و مکان‌های نمونه‌برداری خاک در حوزه آبخیز دریاچه زریبار، مریوان، استان کردستان.
Figure 1. Geographical location of the study area and soil sampling sites in Zrebar lake watershed, Marivan, Kurdistan Province.

شرایطی کاملاً یکسان با شرایط اندازه‌گیری نمونه‌های خاک انجام شد. هم‌چنین به‌منظور ارتقای کیفیت طیف‌ها و استفاده کارآمد از داده‌های طیفی، با استفاده از نرم‌افزار Unscrambler X 10.3، روی داده‌های طیفی انواع الگوریتم‌های پیش‌پردازش انجام شد. لازم به ذکر است که در این پژوهش از انواع مختلف روش‌های پیش‌پردازش هم‌چون مشتق اول همراه فیلتر ساویتزکی و گلائی (Savitzky-Golay)، مشتق دوم به‌همراه فیلتر ساویتزکی و گلائی، متغیر نرمال استاندارد^۱ (SNV)، تصحیح پخشیده چندگانه^۲ (MSC) استفاده شد (شکل ۲).

اندازه‌گیری داده‌های طیفی خاک و پردازش آن‌ها: به‌منظور اندازه‌گیری بازتاب طیفی نمونه‌های خاک، از دستگاه اسپکترومتر (FieldSpec@3, ASD. FR, USA) استفاده شد. بدین‌منظور نمونه‌های هوا-خشک خاک از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شده و پس از وارد کردن هر نمونه به پتری‌دیش‌هایی به قطر ۱۰ سانتی‌متر، منحنی طیفی آن‌ها در دامنه مرئی-مادون‌قرمز نزدیک (۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر) در تاریک‌خانه با پنج تکرار بر روی هر نمونه اندازه‌گیری شد (۵۵). هم‌چنین، به‌منظور ثبت اندازه‌گیری‌ها به‌صورت مقدار بازتابش و حذف آشفته‌گی‌های طیفی (نویز)، به‌ازای قرائت از هر سه نمونه خاک یک قرائت نیز از صفحه سفید استاندارد (بازتاب ۱۰۰ درصد) در

1- Standard normal variate
 2- Multiplicative signal correction



شکل ۲- طیف جذبی ۱۰۰ نمونه خاک منطقه مورد مطالعه پس از اعمال الگوریتم‌های (a) فیلتر ساویتزکی- گلائی همراه مشتق اول (1st SG)، (b) فیلتر ساویتزکی- گلائی همراه مشتق دوم (2st SG)، (c) متغیر نرمال استاندارد (SNV) و (d) تصحیح پخشیده چندگانه (MSC) در محدوده مرئی- مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR).

Figure 2. Absorbance spectra of 100 soil samples in the studied area after applying the algorithms of a) Savitzky-Golay filter with 1st order derivative (1st SG), b) Savitzky-Golay filter with 2st order derivative (2st SG), c) Standard normal variate (SNV) and d) Multiplicative signal correction (MSC) in the Vis-NIR Range.

به ذکر است که در این پژوهش پیش از استخراج توابع انتقالی پیشنهادی، نرمال بودن متغیر پاسخ با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف و با بهره‌گیری از نرم‌افزار Minitab 17 در سطح معنی‌داری ۵ درصد ارزیابی شد. با توجه به این‌که متغیر کربن آلی خاک از توزیع نرمال تبعیت می‌کرد، بنابراین نیاز به اعمال هیچ‌گونه تبدیلی نبود. از دیگر مفروضات مدنظر در روش‌های رگرسیونی، ارزیابی همراستایی چندگانه بین متغیرهای مستقل ورودی است. با توجه به مشکلاتی که همراستایی چندگانه در تفسیر و برآورد متغیرهای وابسته ایجاد می‌کند، بنابراین باید از به‌کارگیری این متغیرها اجتناب کرد. در این پژوهش برای ارزیابی همراستایی بین متغیرهای مستقل، از فاکتور عامل تورم واریانس (VIF) استفاده شد. در صورتی که شاخص VIF

همبستگی بین متغیرها، استخراج توابع پیش‌بینی و ارزیابی کارایی آن‌ها: توابع انتقالی طیفی و خاکی با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه (MLR) ایجاد شدند. در این پژوهش با استفاده از متغیرهای خاکی (رس، رس ریز، سیلت، شن، چگالی ظاهری، هدایت الکتریکی، واکنش خاک، کربنات کلسیم معادل، نیتروژن کل، فراوانی باکتری‌ها، فراوانی قارچ‌ها و تنفس پایه خاک) و با بهره‌گیری از روش گام‌به‌گام ورود متغیرها، مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه برای تخمین کربن آلی خاک به‌دست آمد.

برای استخراج توابع انتقالی پیشنهادی بر مبنای رگرسیون خطی چندگانه از نرم‌افزار SPSS 18.0 استفاده گردید. روش ورود داده‌ها بدین‌گونه بود که به‌صورت تصادفی ۷۵ درصد داده‌ها برای واسنجی و ۲۵ درصد نیز برای اعتبارسنجی انتخاب شدند. لازم

2- Variance inflation factor

1- Stepwise method

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}}{\bar{X}_{OBS}} \times 100 \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i) \quad (3)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N [|\hat{y}_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|]^2} \quad (4)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (5)$$

که در آن ها، y_i و \hat{y}_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی، \bar{y} و $\bar{\hat{y}}$ به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی، N تعداد داده‌ها و SD نیز انحراف از معیار می‌باشند. شایان ذکر است که میزان ارتباط بین مقادیر بازتاب طیفی در هر طول موج و ویژگی‌های خاکی با شاخص کربن آلی خاک با استفاده از ضرایب همبستگی پیرسون مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

توصیف آماری کربن آلی خاک^۵ (SOC): جدول ۱ توصیف آماری کربن آلی خاک را در دو گروه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. میانگین مقادیر کربن آلی، در گروه واسنجی ۳/۰ درصد و برای گروه اعتبارسنجی ۲/۵ درصد بود. با توجه به جدول ۱، درصد کربن آلی خاک‌های مورد مطالعه محدوده‌ای وسیع را در بر گرفته، به گونه‌ای که کمینه و بیشینه مقدار آن به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۹/۱ و مقدار میانگین آن نیز برابر ۲/۹ درصد است. واضح است هرچه گستره ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک‌های مورد مطالعه وسیع‌تر باشد، توابع

متغیری مستقل کم‌تر از ۱۰ باشد، بدین معنی است که این متغیر مستقل با دیگر متغیرها همبستگی ندارد. از دیگر مفروضاتی که در روش‌های رگرسیونی لحاظ می‌شود، فرض استقلال خطاها از یکدیگر است. چنانچه خطاها با هم همبستگی داشته باشند نمی‌توان از روش‌های رگرسیونی استفاده کرد. در این پژوهش استقلال خطاها از یکدیگر با استفاده از آزمون دوربین-واتسون ارزیابی شد. اگر مقدار این آماره بین ۱/۵ تا ۲/۵ قرار گیرد، فرض وجود همبستگی بین خطاها رد شده و می‌توان از معادلات رگرسیونی استفاده کرد. به منظور ارزیابی دقت توابع انتقالی پیشنهادی در هر یک از مراحل تخمین، از آماره‌های مختلفی هم‌چون ضریب تبیین^۱ (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۲ (NRMSE)، میانگین خطا^۳ (ME)، شاخص انطباق^۴ (d) و درصد انحراف نسبی (RPD) استفاده شد. شاخص انطباق بیان‌کننده درجه‌ای از دقت بوده که در آن مقادیر تخمینی به دست آمده است. در مقایسه با ضریب تبیین که بیانگر همبستگی بین مقادیر تخمینی و مشاهده‌ای است، شاخص انطباق درجه‌ای را بیان می‌کند که در آن پیش‌بینی‌های مدل عاری از خطا می‌باشند (۵۸). شاخص درصد انحراف نسبی که اغلب در مطالعات طیف‌سنجی استفاده می‌شود، به سه گستره $1/4 <$ ، $1/4 >$ و $2 >$ که به ترتیب معرف تخمین ضعیف، قابل قبول و قوی می‌باشند، طبقه‌بندی شده است (۵۴). بیان ریاضی آماره‌های ذکر شده در زیر آورده شده است:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

- 1- Coefficient of determination
- 2- Normalized root-mean-square error
- 3- Mean error
- 4- Index of agreement

دیگر ویژگی‌های خاک بر انعکاس طیفی را تحت پوشش قرار دهد (۹).

پیشنهادی برای استفاده در دیگر انواع خاک‌ها دارای اعتبار بیشتری می‌باشند. شایان ذکر است که مقدار کربن آلی بیش از ۲ درصد در خاک، می‌تواند تأثیر

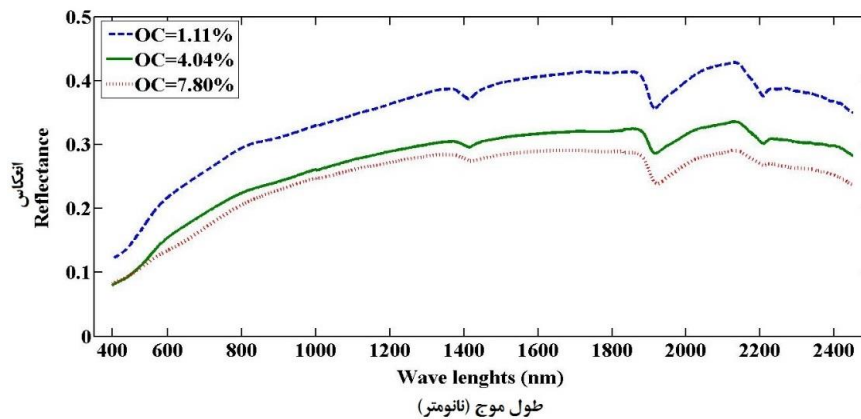
جدول ۱- توصیف آماری کربن آلی خاک (درصد) برای دو مجموعه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی.

Table 1. Descriptive statistics of soil organic carbon (%) for the calibration and validation data sets.

اعتبارسنجی Validation data				واسنجی Calibration data				ویژگی خاک Soil property
انحراف معیار SD	حداکثر Max	حداقل Min	میانگین Mean	انحراف معیار SD	حداکثر Max	حداقل Min	میانگین Mean	کربن آلی (%) Organic carbon (%)
1.3	6.0	0.7	2.5	2.0	9.10	0.4	3.0	

این موضوع است. شایان ذکر است که اجزای مختلف ماده آلی خاک نیز می‌توانند در هر یک از طول‌موج‌ها، اثرات بازتابی متفاوتی داشته باشند (۴۹).

نتایج حاصل از پژوهش‌های گذشته بیانگر آن است که افزایش مقدار ماده آلی در خاک می‌تواند مقدار بازتاب طیفی را کاهش دهد. نتایج حاصل از این پژوهش که در شکل ۳ ارائه شده نیز تأییدی بر



شکل ۳- منحنی‌های انعکاس طیفی سه نمونه خاک با مقادیر مختلف کربن آلی.

Figure 3. Spectral reflectance curves of the three soil samples with different organic carbon contents.

خاک بوده در توابع پیشنهادی لحاظ شده‌اند. دیگر پارامترهای ورودی هم‌چون مقدار رس، مقدار رس ریز، مقدار سیلت، مقدار شن، چگالی ظاهری، EC، pH خاک، کربنات کلسیم معادل، فراوانی باکتری‌ها و فراوانی قارچ‌ها از فهرست متغیرهای ورودی به توابع حذف شدند. با توجه به نتایج هر دو تابع انتقالی

مدل‌سازی کربن آلی خاک (SOC)

استخراج توابع انتقالی خاکی^۱ (PTFs) و ارزیابی آنها: همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود تنها دو پارامتر نیتروژن کل (TN) و تنفس میکروبی (CO₂) که دارای تأثیر معنی‌داری بر مقدار کربن آلی

1- Pedo-transfer functions

این توابع دارای دقت پیش‌بینی زیادی می‌باشند. هر چند مدل ۲ با $R^2=0/92$ ، $NRMSE=18/11\%$ و $ME=0/30\%$ در مقایسه با تابع پیشنهادی دیگر دارای دقت بیش‌تری در برآورد کربن آلی خاک است.

پیشنهادی، در برآورد کربن آلی خاک‌های مورد مطالعه از دقت پیش‌بینی بسیار خوبی برخوردار می‌باشند. زیرا با توجه به ضریب تبیین گزارش‌شده در این جدول، که در محدوده‌ای از $0/90$ تا $0/92$ واقع شده،

جدول ۲- توابع انتقالی اشتقاق‌یافته برای برآورد کربن آلی خاک (SOC).

Table 2. Derived pedo-transfer functions (PTFs) for predicting soil organic carbon (SOC).

Model	PTFs	R ²	NRMSE	ME
1	SOC=0.21+14.14 TN	0.90	20.91	0.40
2	SOC=0.14+10.69 TN+0.003 CO ₂	0.92	18.11	0.30

SOC: کربن آلی خاک (%); TN: نیتروژن کل (%); CO₂: تنفس پایه خاک (mg CO₂, kg dry soil⁻¹) بوده R²، NRMSE و ME نیز به ترتیب ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین خطا هستند.

SOC: soil organic carbon (%); TN: total nitrogen; CO₂: soil basal respiration (mg CO₂, kg dry soil⁻¹); R², NRMSE and ME are coefficient of determination, normalized root mean squared error and mean error, respectively.

است. این تابع دارای کمینه مقدار خطا و بیشینه مقدار ضریب تبیین در مرحله واسنجی و دقت‌آزمایی بوده است. هر چند باید یادآوری کرد که تابع پیشنهادی ۱ نیز با تنها ورودی TN، در برآورد مقدار SOC منطقه مورد مطالعه از کارایی زیادی برخوردار است. تجزیه و تحلیل‌های آماری نشان داد که پارامترهای لحاظ شده در توابع انتقالی پیشنهادی (جدول ۲) در سطح یک درصد معنی‌دار هستند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تأثیر TN بر SOC بیش‌ترین و تأثیر CO₂ بر آن کم‌ترین مقدار است. از نظر شیمیایی بین کربن آلی خاک و ویژگی‌هایی هم‌چون TN و CO₂ رابطه‌ای ذاتی وجود دارد. بدین ترتیب که در یک خاک معین، با افزایش TN و CO₂ باید SOC افزایش یابد. معادلات به‌دست‌آمده در این پژوهش نیز دربرگیرنده این بنیان شیمیایی هستند. عباسیان و همکاران (۲۰۱۴) نیز با بررسی برخی از فعالیت‌های آنزیمی در دو خاک هیستوسول و ارتباط آن‌ها با خصوصیات بیولوژیک و شیمیایی خاک، رابطه‌ای مثبت و معنی‌داری بین کربن آلی و نیتروژن کل خاک

در جدول ۳، نتایج اعتبارسنجی توابع رگرسیونی پیشنهادی در برآورد SOC برای سری داده‌های آزمون، بر اساس آماره‌های مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود ضریب تبیین همه توابع انتقالی پیشنهادی برای خاک‌های مورد مطالعه، بیش‌تر از $0/71$ است. این بدین معنی است که این توابع در برآورد کربن آلی خاک در مرحله ارزیابی، از دقت پیش‌بینی خوبی برخوردار می‌باشند. با توجه به نتایج حاصل از آماره NRMSE، مقدار این آماره برای مدل ۱ ($32/10\%$) و برای مدل ۲ ($27/08\%$) به‌دست آمد، که در مجموع نشان‌دهنده دقت متوسط مدل‌های پیشنهادی در برآورد کربن آلی خاک می‌باشد. مقادیر میانگین خطا (ME) در این جدول نیز نشان می‌دهد که این دو تابع استخراج شده در پیش‌بینی SOC دارای بیش‌برآوردی می‌باشند. در مجموع با توجه به این آماره‌ها می‌توان بیان کرد، تابعی که در آن درصد نیتروژن کل (TN) و تنفس پایه (CO₂) (مدل ۲) لحاظ شده است، عملکرد بهتری در مقایسه با تابع پیشنهادی ۱ در برآورد SOC داشته

بیان داشت رابطه‌ای خطی و مثبت بین تنفس میکروبی خاک و کربن زی‌توده میکروبی با ماده آلی خاک وجود دارد (۵). شیفر و همکاران (۲۰۰۹) نیز به نتایج مشابه این پژوهش دست یافتند (۴۵). ماده آلی خاک با بهبود پایداری خاکدانه‌ها و کاهش فرسایش‌پذیری خاک در افزایش کیفیت و تکامل خاک نقشی مهم دارد. بنابراین با اندازه‌گیری تنفس میکروبی خاک می‌توان به کیفیت خاک و مقدار تجزیه و بازگشت مواد آلی در چرخه عناصر غذایی بوم‌سامان‌ها پی برد (۳ و ۴۳).

به‌دست آوردند ($R^2=0/94$) (۲). دادگر و همکاران (۲۰۱۴)، طی پژوهشی جهت برآورد کربن آلی خاک مراتع دماوند با استفاده از توابع انتقالی، همبستگی مثبت و معنی‌دار مقادیر کربن آلی با درصد نیتروژن خاک را تأیید کردند ($r=0/73$). این پژوهشگران بیان کردند پس از کربن آلی، نیتروژن فراوان‌ترین عنصر در ماده آلی است (۱۸). زیاد بودن عناصر غذایی و مواد آلی موجود در خاک منطقه مورد مطالعه نیز می‌تواند دلیل همبستگی مثبت و معنی‌دار کربن آلی خاک (SOC) با تنفس پایه (CO_2) باشد. اجمی (۲۰۰۶)

جدول ۳- دقت آزمایشی توابع انتقالی پیشنهادی برای برآورد کربن آلی خاک (SOC) با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی ($n=25$).

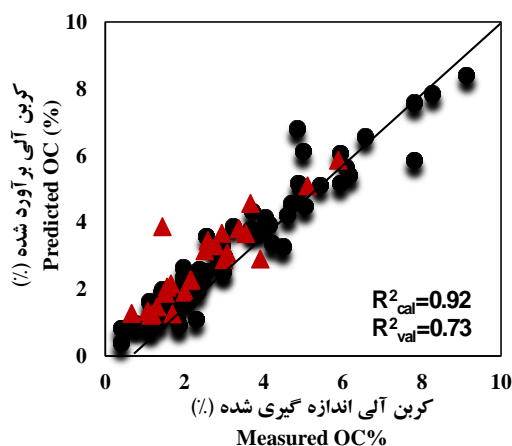
Table 3. Accuracy of the derived pedo-transfer functions (PTFs) for predicting soil organic carbon (SOC) using validation data set (n = 25).

Model	R^2	NRMSE	ME
1	0.71	32.10	0.63
2	0.79	27.08	0.45

R^2 , NRMSE and ME are coefficient of determination, normalized root mean squared error and mean error, respectively.

مجموع نتایج بیانگر این موضوع است در صورتی‌که در منطقه مورد مطالعه ویژگی‌های ذاتی از خاک هم‌چون نیتروژن کل و میزان تنفس میکروبی در دسترس باشد، می‌توان با بهره‌گیری از این توابع پیشنهادی (مدل ۱ و یا ۲) کربن آلی خاک را با دقت قابل‌قبولی پیش‌بینی کرد. دادگر و همکاران (۲۰۱۴) نیز با استفاده از ورودی‌های درصد رس و نیتروژن کل در تابع انتقالی پیشنهادی، SOC را با دقت زیادی برآورد کردند (۱۸).

در شکل ۴، نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی تابع پیشنهادی ۲ در برآورد SOC در برابر مقادیر اندازه‌گیری‌شده آن ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل و جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر آماره R^2 داده‌های واسنجی و دقت‌آزمایی مدل پیشنهادی ۲ در برآورد SOC بیش‌ترین مقدار است. این بدین‌معنی است که این تابع انتقالی در مقایسه با تابع پیشنهادی دیگر، در برآورد کربن آلی خاک دارای تخمین بهتری است. در



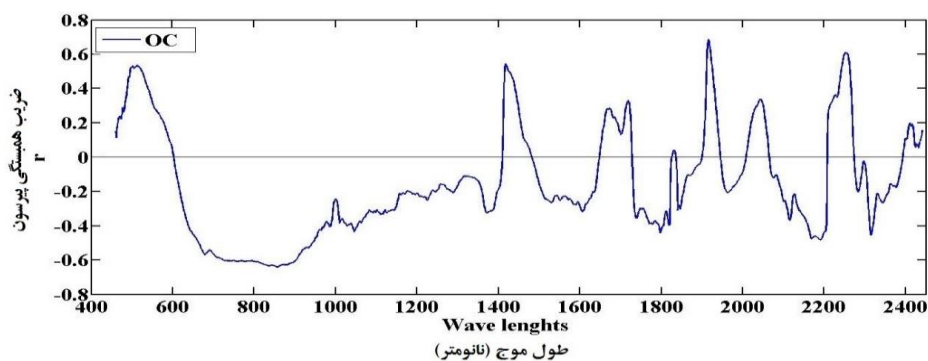
شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده کربن آلی خاک با استفاده از تابع انتقالی خاکی پیشنهادی (رابطه ۲) برای سری داده‌های واسنجی (●) و اعتبارسنجی (▲).

Figure 4. Measured and predicted soil organic carbon using the derived PTF (EQ. 2) for the calibration (●) and validation (▲) data sets.

در پژوهش‌های مختلف، به وجود رابطه منفی بین کربن آلی و بازتاب طیفی خاک در ناحیه مرئی (Vis) و مادون‌قرمز نزدیک (NIR) اشاره شده است (۹ و ۱۰). بن‌دور و بنین (۱۹۹۵) بیان کردند که طول‌موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر طول‌موج‌هایی هستند که بسیاری از ویژگی‌های مبنایی خاک از جمله کربن آلی به آن‌ها حساس می‌باشند (۱۲). بنابراین در فرایند برآورد SOC با استفاده از داده‌های طیفی، این طول‌موج‌ها می‌توانند نقش عمده‌ای را ایفاء کنند. در ایران کریمی و همکاران (۲۰۱۷)، بیش‌ترین ضریب همبستگی کربن آلی را در طول‌موج ۷۱۲ نانومتر ($r=0/41^{**}$) مشاهده کردند (۳۰). بابائیان و همکاران (۲۰۱۳) نیز گزارش کردند بین کربن آلی و طول‌موج ۱۸۷۷ نانومتر همبستگی زیادی ($r=0/51^{**}$) وجود دارد (۸).

استخراج توابع انتقالی طیفی خاک

ارزیابی ضریب همبستگی پیرسون بین کربن آلی خاک (SOC) و داده‌های طیفی: در شکل ۵، ضریب همبستگی پیرسون (r) بین SOC با مقادیر بازتاب طیفی در هر طول‌موج از گستره ۲۴۵۰-۴۰۰ نانومتر، ارائه شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد SOC به‌ازای طول‌موج‌های مختلف دارای همبستگی‌های مثبت و منفی زیادی است. بیشینه ضریب همبستگی منفی و مثبت معنی‌دار کربن آلی به‌ترتیب در طول‌موج‌های ۸۵۸ ($r=-0/640^{**}$) و ۱۹۱۶ ($r=0/690^{**}$) نانومتر مشاهده گردید. شایان‌ذکر است که طول‌موج ۱۹۱۶ نانومتر، که دارای بیشینه همبستگی کربن آلی با داده‌های طیفی است، از طول‌موج‌های نزدیک به مشخصه جذبی آب در خاک (۱۹۱۳ نانومتر) است.



شکل ۵- ضریب همبستگی پیرسون بین کربن آلی خاک با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول‌موج‌های مختلف.

Figure 5. Pearson's correlation coefficient between soil organic carbon and spectral reflectance values at various wave lengths.

جذب‌ی پیش‌پردازش شده با روش 2^{st} SG بنا نهاد شده و دارای دقت برآورد زیادی است؛ دیگر مدل‌های پیشنهادی بر مبنای داده‌های جذب‌ی، پیش‌پردازش نشده (No) و پیش‌پردازش شده با روش‌های 1^{st} SG، SNV و MSC، از دقت متوسطی در برآورد کربن آلی خاک برخوردار می‌باشند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، مقدار آماره NRMSE توابع پیشنهادی برای برآورد SOC بین $34/5$ (مربوط به مدل پیشنهادی مبتنی بر داده‌های جذب‌ی پیش‌پردازش شده با روش 2^{st} SG تا $49/5$ درصد (مربوط به مدل پیشنهادی مبتنی بر داده‌های جذب‌ی پیش‌پردازش نشده) متغیر است. کم‌ترین مقدار این آماره مربوط به مدل پیشنهادی مبتنی بر داده‌های جذب‌ی پیش‌پردازش شده با روش 2^{st} SG (مدل ۵) و بیش‌ترین مقدار آن نیز مربوط به مدل پیشنهادی بر مبنای داده‌های جذب‌ی پیش‌پردازش نشده (مدل ۳) است. شایان‌ذکر است که NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان‌دهنده دقیق بودن مدل، ۲۰ - ۱۰ درصد مناسب بودن مدل، ۳۰ - ۲۰ دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشان‌دهنده ضعیف بودن مدل است. این بدین معنی است که با توجه به این آماره توابع رگرسیونی طیفی پیشنهادی در جدول ۴ از دقت برآورد پایینی برخوردار می‌باشند. از طرفی با توجه به آماره RPD، به جزء توابعی که بر مبنای

توابع رگرسیونی طیفی (STFs) پیشنهاد شده و ارزیابی آن: همان‌گونه که در قبل بیان شد بین کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول‌موج‌های مختلف همبستگی نسبتاً قوی و معنی‌داری وجود دارد؛ بنابراین این امکان وجود دارد که بتوان با استفاده از داده‌های طیفی مقدار SOC را برآورد کرد. بدین‌منظور توابع رگرسیونی طیفی برای برآورد SOC استخراج شده که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مقدار SOC برآورد شده توسط داده‌های جذب‌ی، که با روش مشتق دوم + فیلتر ساویتزکی-گلای (2^{st} SG) پیش‌پردازش شده (مدل ۶)، دارای دقت زیاد (ضرایب تبیین برابر $0/72$) و برای داده‌های جذب‌ی پیش‌پردازش نشده (No) (مدل ۳) دارای دقتی نسبتاً کم‌تر (با ضرایب تبیین برابر $0/42$) است. لازم به ذکر است که برای داده‌های جذب‌ی پیش‌پردازش شده با مشتق اول + فیلتر ساویتزکی-گلای (1^{st} SG) (مدل ۴) و پیش‌پردازش شده با متغیر نرمال استاندارد (SNV) (مدل ۷) و تصحیح پخشیده چندگانه (MSC) (مدل ۶) نیز به ترتیب مقادیر R^2 برابر $0/61$ ، $0/53$ و $0/48$ به دست آمد. این بدین معنی است که به جزء مدل رگرسیونی طیفی که بر مبنای داده‌های

1- Spectral transfer functions

پیشنهادشده در جدول ۴ است. بیشترین مقدار بیش‌برآوردی مربوط به مدل مبتنی بر داده‌های جذبی پیش‌پردازش نشده (مدل ۳) بوده و کم‌ترین مقدار آن نیز مربوط به مدلی بوده که بر داده‌های جذبی پیش‌پردازش شده با روش 2st SG (مدل ۵) استوار است (جدول ۴).

داده‌های جذبی پیش‌پردازش شده با روش‌های 2st SG و 1st SG و SNV پیشنهادشده (مدل‌های ۴، ۵ و ۷) و دارای دقت قابل‌قبولی در برآورد SOC می‌باشند (RPD > ۱/۴)؛ دیگر توابع طیفی پیشنهادی (مدل‌های ۳ و ۶) تخمین‌هایی ضعیفی از کربن آلی ارائه می‌کنند. آماره ME نیز بیانگر بیش‌برآوردی همه مدل‌های

جدول ۴- توابع انتقالی طیفی استخراج شده برای برآورد کربن آلی خاک با بهره‌گیری از روش‌های مختلف پیش‌پردازش.

Table 4. Derived spectral transfer functions (STFs) for predicting soil organic carbon by using various preprocessing methods.

Model	توابع انتقالی طیفی STFs	روش پیش‌پردازش Preprocessing method	R ²	NRMSE	RPD	ME
3	$SOC = -0.809 + 27.13 A_{622} - 27.86 A_{902}$	No	0.42	49.47	1.32	2.24
4	$SOC = 0.031 + 1703.14 A_{1932} - 953.33 A_{667} - 1214.67 A_{2292}$	1 st SG	0.61	40.91	1.61	1.53
5	$SOC = 5.166 + 6346.98 A_{1892} + 87390.90 A_{1192} - 4707.31 A_{567} + 8729.01 A_{1807} - 11132.49 A_{1967} + 19321.32 A_{697} - 36326.02 A_{1702}$	2 st SG	0.72	34.52	1.90	1.09
6	$SOC = 43.47 - 122.99 A_{1402} + 26.63 A_{582}$	MSC	0.48	47.07	1.39	2.03
7	$SOC = 15.46 - 14.70 A_{1402} - 3.43 A_{462} + 7.80 A_{1842}$	SNV	0.53	44.41	1.48	1.80

SOC کربن آلی خاک (%/ و A_w نیز درصد جذب به‌ازای طول موج W (نانومتر) است.

R², NRMSE, RPD و ME به‌ترتیب ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، درصد انحراف نسبی و میانگین خطا هستند. No, 1st SG, 2st SG, MSC و SNV نیز به‌ترتیب داده‌های جذبی پیش‌پردازش نشده، پیش‌پردازش شده با مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلای، پیش‌پردازش شده با مشتق دوم + فیلتر ساویتزکی و گلای، تصحیح پخشیده چندگانه و متغیر نرمال استاندارد است.

SOC and A_w are soil organic carbon content (%) and spectral absorbance [%] in wavelength W (nm), respectively. R², NRMSE, RPD and ME are coefficient of determination, normalized root mean squared error, ratio of performance to deviation and mean error, respectively. NO, 1st SG, 2st SG, MSC and SNV are no preprocessing, first derivative with Savitzky-Golay smoothing, second derivative with Savitzky-Golay smoothing, multiplicative scatter correction and standard normal variate, respectively.

برآوردشده توسط داده‌های جذبی، که با روش‌های SNV و مشتق اول + فیلتر ساویتزکی-گلای (1st SG) پیش‌پردازش شده (مدل‌های ۷ و ۴)، در مقایسه با دیگر توابع پیشنهادی دارای دقتی بیش‌تری می‌باشند (به‌ترتیب دارای R² برابر ۰/۴۵ و ۰/۴۲، NRMSE برابر ۳۹/۳۶٪ و ۴۱/۱۸٪، RPD برابر ۱/۳۲ و ۱/۲۶ و ME برابر ۰/۹۵٪ و ۱/۰۴٪). این در حالی است که مدل رگرسیونی طیفی که با استفاده از داده‌های جذبی پیش‌پردازش نشده (No) استخراج شده (مدل ۳)

در جدول ۵ نیز مقادیر R², NRMSE, ME و RPD اعتبارسنجی توابع رگرسیونی طیفی پیشنهادی برای برآورد کربن آلی خاک‌های منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد، توابع طیفی برآوردگر SOC (مدل‌های ۳ تا ۷)، که بر مبنای روش‌های مختلف پیش‌پردازش به‌دست آمده، دارای دقتی کم تا متوسط می‌باشند (RPD < ۱/۳۲، NRMSE > ۳۰٪، R² < ۰/۴۵) و (ME > ۰/۹۵٪). با توجه به نتایج، مقدار SOC

(۱۲). یافته‌های آیچی و همکاران (۲۰۰۹) (با $R^2=0/91$ و $RMSE=0/36\%$)، چانگ و لیرد (۲۰۰۲) (با $R^2=0/89$ و $RMSE=0/62\%$)، کونل و بوگنر (۲۰۱۷) (با $R^2=0/40-0/86$ و $RMSE=1/90-16/63\%$)، ناوار و مؤذن (۲۰۱۹) (با $R^2>0/74$ و $RMSE<0/18\%$)، شانگشی و همکاران (۲۰۱۹) ($R^2=0/96$) و شفرود و والش (۲۰۰۲) (با $R^2=0/80$ و $RMSE=0/31\%$) نیز بیانگر دقت زیاد برآورد کربن آلی خاک با استفاده از داده‌های طیفی است (۴، ۱۵، ۳۲، ۴۰، ۴۶ و ۴۷). هم‌چنین در ایران بابائیان و همکاران (۲۰۱۴)، حسنی و همکاران (۲۰۱۴)، خیامیم و همکاران (۲۰۱۵)، بابائیان و جلالی (۲۰۱۶) و کریمی (۲۰۱۷) با استفاده از داده‌های طیفی، SOC را با دقت خوبی برآورد کرده‌اند (۷، ۸، ۲۶، ۳۰ و ۳۱).

ضعیف‌ترین برآوردها را برای SOC داشته است. در مجموع با توجه به نتایج حاصل از جدول‌های ۴ و ۵، تابع طیفی پیشنهادی که با استفاده از داده‌های جذبی در طول موج‌های ۶۶۷، ۱۹۳۲ و ۲۲۹۲ نانومتر پیشنهاد شده (مدل ۴)، در مقایسه با دیگر توابع استخراجی (مدل‌های ۳، ۵، ۶ و ۷) از کارایی بیشتری در برآورد کربن آلی خاک برخوردار است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که طول موج‌های مجاور ۱۱۰۰، ۱۶۰۰، ۱۸۰۰-۱۷۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰-۲۲۰۰ نانومتر می‌توانند در برآورد کربن آلی خاک مورد استفاده قرار گیرند (۳۱ و ۵۰). بن دور و بنین (۱۹۹۵) نیز بیان کردند که طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر باندهایی هستند که بسیاری از ویژگی‌های خاک از جمله مقدار SOC به آن‌ها حساس هستند

جدول ۵- اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی پیشنهادی برای برآورد کربن آلی خاک با استفاده از داده‌های آزمون (N=۲۵).

Table 5. Validation of the derived spectral transfer functions (STFs) for predicting soil organic carbon (SOC) using validation data set (n = 25).

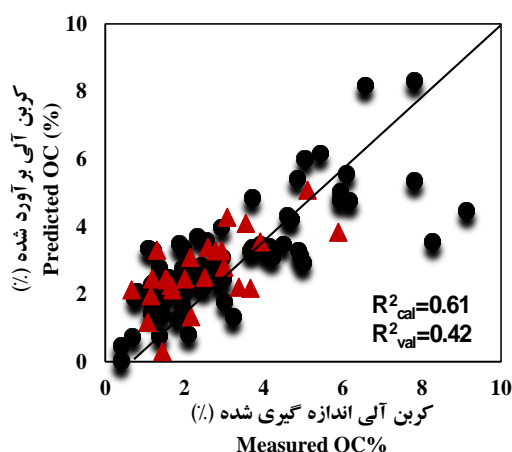
Parameter	ME	NRMSE (%)	R ²	RPD
NO	1.75	53.38	0.19	0.97
1 st SG	1.04	41.18	0.42	1.26
2 st SG	1.58	50.66	0.29	1.02
MSC	1.10	42.18	0.36	1.23
SNV	0.95	39.36	0.45	1.32

R^2 , NRMSE, RPD و ME به ترتیب ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، درصد انحراف نسبی و میانگین خطا هستند. No, 1st SG, 2st SG, MSC و SNV نیز به ترتیب داده‌های جذبی پیش‌پردازش نشده، پیش‌پردازش شده با مشتق اول + فیلتر ساویتزکی و گلای، پیش‌پردازش شده با مشتق دوم + فیلتر ساویتزکی و گلای، تصحیح پخشیده چندگانه و متغیر نرمال استاندارد است.

R^2 , NRMSE, RPD and ME are coefficient of determination, normalized root mean squared error, ratio of performance to deviation and mean error, respectively. NO, 1st SG, 2st SG, MSC and SNV are no preprocessing, first derivative with Savitzky-Golay smoothing, second derivative with Savitzky-Golay smoothing, multiplicative scatter correction and standard normal variate, respectively.

۰/۴۲ و ۰/۶۰ است. در مجموع نتایج حاصل از این شکل و جدول‌های ۴ و ۵ بیانگر آن است که تابع انتقالی طیفی که مبتنی بر داده‌های جذبی پیش‌پردازش شده با مشتق اول + فیلتر ساویتزکی-گلای بوده (مدل ۴)، در برآورد کربن آلی خاک دارای دقتی متوسط است.

در شکل ۶، نمودار پراکنش ۱:۱ مقادیر واسنجی و اعتبارسنجی تابع پیشنهادی (۴) در برآورد کربن آلی خاک، در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل و جدول‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، مقادیر آماره R^2 داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی برای درصد کربن آلی به ترتیب برابر



شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده کربن آلی خاک با استفاده از تابع انتقالی طیفی پیشنهادی (رابطه ۴) برای سری داده‌های واسنجی (●) و اعتبارسنجی (▲).

Figure 6. Measured and predicted soil organic carbon using the derived STF (Eq. 4) for the calibration (●) and Validation (▲) data set.

مقایسه با توابع انتقالی طیفی کم‌تر است (به ترتیب دارای ME برابر ۰/۴۵ درصد در مقابل ۱/۵۰ درصد).

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش تلاش شد امکان استفاده از داده‌های طیفی (گستره مرئی- مادون قرمز نزدیک) و مبنایی خاک در پیش‌بینی مقدار کربن آلی خاک (SOC) ارزیابی شود. بدین منظور پس از ثبت داده‌های طیفی و میانگین‌گیری از آن‌ها و تبدیل بازتاب طیفی به جذب، روش‌های مختلف پیش‌پردازش بر روی این داده‌ها اعمال شد. نتایج نشان داد بهترین روش پیش‌پردازش داده‌های طیفی، روش مشتق اول + فیلتر ساویتزکی-گلای می‌باشد. از رگرسیون‌های خطی چندگانه گام‌به‌گام (SMLR) برای تخمین مقدار SOC استفاده شد. با توجه به این‌که بین برخی از ویژگی‌های مبنایی خاک اندازه‌گیری شده با SOC و همچنین بین SOC با مقادیر بازتاب طیفی خاک در طول موج‌های مختلف همبستگی نسبتاً قوی و معنی‌داری مشاهده شد؛ بنابراین توابعی تحت عنوان توابع انتقالی خاکی

مقایسه توابع انتقالی خاکی (PTFs) و طیفی (STFs) پیشنهادی: به منظور یافتن پاسخ این موضوع که استفاده از داده‌های طیفی و ذاتی خاک با چه کیفیتی می‌تواند در برآورد مقدار کربن آلی خاک مؤثر باشند، عملکرد دو گروه از مناسب‌ترین توابع انتقالی خاکی (PTFs) و توابع انتقالی طیفی (STFs) مورد آزمون قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد این توابع، مقادیر میانگین ضریب تبیین (R^2) هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای PTFها و STFهای استخراج‌یافته به ترتیب برابر ۰/۸۳ و ۰/۴۴ به دست آمد که بیانگر دقیق بودن توابع انتقالی خاکی در برآورد مقدار SOC است. نتایج حاصل از ارزیابی آماره NRMSE نیز بیانگر آن است که برآوردهای حاصل از PTFها (با میانگین NRMSE برابر ۲۴/۵۵ درصد) در مقایسه با برآوردهای حاصل از STFها (با میانگین NRMSE برابر ۴۴/۳۱ درصد) دارای دقت بیشتری است. همه توابع انتقالی پیشنهادی خاکی و طیفی دارای بیش‌برآوردی مقدار SOC می‌باشند. هر چند باید خاطر نشان کرد که مقدار این بیش‌برآوردی برای توابع انتقالی خاکی در

انتقالی طیفی برخوردار هستند. در مجموع نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، به‌رغم این‌که توابع انتقالی طیفی در مقایسه با توابع انتقالی خاکی از دقت کم‌تری در برآورد کربن آلی خاک برخوردار هستند، ولی در مواقع عدم دسترسی به PTFها، این رویکرد نیز می‌تواند به عنوان روشی سریع، غیرمخرب و با حداقل آسیب به زیست‌بوم در برآورد SOC مورد استفاده قرار گیرد.

(PTFs) و توابع انتقالی طیفی (STFs) برای برآورد این پارامتر پی‌ریزی شد. به‌منظور ارزیابی دقت PTFs و STFs پیشنهادی از آماره‌های مختلفی هم‌چون ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، درصد انحراف نسبی (RPD) و میانگین خطا (ME) استفاده شد. نتایج ارزیابی آماره‌ها در هر دو سری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که توابع انتقالی خاکی پیشنهادی در برآورد SOC از دقت بیش‌تری در مقایسه با توابع

منابع

1. A1ef, K., and Nannipieri, K.P. 1995. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, London, 576p.
2. Abasian, A., Golchin, A., and Sheklabadi, M. 2014. Some enzyme activities of two Histosols and their relationship with soil biological and chemical properties. *J. Soil Biol.* 2: 2. 111-124. (In Persian)
3. Ahmad Abadi, Z., and Qajar Espanloo, M. 2012. Effect of organic matter application on some of the soil physical properties. *J. Water Soil Cons.* 19: 2. 99-116. (In Persian)
4. Aichi, H., Fouad, Y., Walter, C., Viscarra Rossel, R.A., Chabaane, Z.L., and Sanaa, M. 2009. Regional predictions of soil organic carbon content from spectral reflectance measurements. *Biosystems Engineering*. 104: 3. 442-446.
5. Ajami, M., Khormali, F., Ayoubi, S.H., and Omrani, R.A. 2006. Changes in soil quality attributes by conversion of land use on a Loess hillslope in Golestan province, Iran. P 501-504, In: 18th International Soil Meeting (ISM) on Soil Sustaining Life on Earth, Maintaining Soil and Technology Proceedings, Soil Science Society of Turkey.
6. Babaei, F., Vaezi, A.R., and Taheri, M. Modeling of soil organic carbon content using topographic indices and soil characteristics in rainfed wheat lands. *J. Water Soil Cons.* 23: 3.111-129. (In Persian)
7. Babaeian, A., and Jalali, V.R. 2016. Estimating soil organic carbon using hyperspectral data in visible, near-infrared and shortwave-infrared (VIS-NIR-SWIR) range. *J. Soil Manage. Sust. Prod.* 6: 2. 65-82. (In Persian)
8. Babaeian, A., Homaei, M., and Norouzi, A.A. 2014. Assessing spectro-transfer functions and pedotransfer functions in predicting soil water retentions. *J. Water Soil.* 3: 2. 25-42.
9. Baumgardner, M.F., and Stoner, E.R. 1981. Soil mineralogical studies by remote sensing. *Transactions of the 12th International Congress of Soil Science, Panel Discussion Papers*. Pp: 419-444.
10. Baumgardner, M.F., Kristof, S.J., Johannsen, C.J., and Zachary, A.L. 1970. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. In *Proceedings of the Indiana Academy of Science*. 79: 413-422.
11. Ben-Dor, E. 2002. Quantitative remote sensing of soil properties. *Advances in Agronomy*. 75: 173-243.
12. Ben-Dor, E., and Banin, A. 1995. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 59: 2.364-372.
13. Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-Total. P 1085-1122, In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke and R.H. Loeppert (eds.), *Methods of soil analysis part 3. Chemical methods, SSSA Book Ser. 5*. SSSA, Madison, WI, USA.

14. Cambardella, C.A., Gajda, A.M., Doran, J.W., Wienhold, B.J., Kettler, T.A., and Lal, R. 2001. Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition. *Assessment methods for soil carbon*, Pp: 349-359.
15. Chang, C.W., and Laird, D.A. 2002. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N. *Soil Science*. 167: 2. 110-116.
16. Chen, L., Sheng-lu, Z., Shao-hua, W., Qing, Z. and Qi, D. 2014. Spectral response of different eroded soils in subtropical China: A case study in Changting County, China. *J. Mater. Sci*. 11: 697-707.
17. Clark, R.N., King, T.V.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., and Vergo, N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *J. Geophysic. Res. Solid Earth*. 95: 8. 12653-12680.
18. Dadgar, M., Mahmoudi, Sh., Mahdian, M.H., Masih Abadi, M.H., and Skouti Oskouie, R. 2014. Estimating soil organic carbon using pedo-transfer functions in Damavand Rangelands. Iran. *J. Res. Range. Des*. 21: 3. 409-415. (In Persian)
19. Ding, G., Novak, J.M., Amarasiriwardena, D., Hunt, P.G., and Xing, B. 2002. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management. *Soil Sci. Soc. Amer. J*. 66: 2. 421-429.
20. Flint, A.L., and Flint, L.E. 2002. Particle density. P 229-240, In: J.H. Dane and G.C. Topp (eds), *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, USA.
21. Flint, L.E., and Flint, A.L. 2002. Porosity. P 241-254, In: J.H. Dane and G.C. Topp (eds), *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, USA.
22. Gee, G.W., and Or, D. 2002. Particle-size analysis. P 255-294, In: JH Dane and GC Topp (eds), *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, USA.
23. Grossman, R.B., and Reinsch, T.G. 2002. Bulk density and linear extensibility. P 201-228, In: JH Dane and GC Topp (eds), *Methods of soil analysis: part 4. Physical methods*, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, USA.
24. Gupta, P.K. 2000. *Soil, plant, water and fertilizer analysis*. Agrobios, New Delhi, India.
25. Han, F., Hu, W., Zheng, J., Du, F., and Zhang, X. 2010. Estimating soil organic carbon storage and distribution in a catchment of Loess Plateau, China. *Geoderma*, 154: 261-266.
26. Hasani, A., Bahrami, H., Noroozi, A.A., and Oustan, Sh. 2014. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in gypseous and calcareous soils. *J. Water. Engin. Manage*. 6: 2. 125-138.
27. Ingleby, H.R., and Crowe, T.G. 2000. Reflectance models for predicting organic carbon in Saskatchewan soils. *Canadian Agricultural Engineering*. 42: 2. 57-64.
28. Jaggi, W. 1976. Die Bestimmung der CO₂-Bildung als Maß der Bodenatmung und der Carbonate im Boden. *Z. pflanzenernähr bodenk. d*. 56: 2. 26-38.
29. Janik, L.J., Merry, R.H., and Skjemstad, J.O. 1998. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? *Austr. J. Exper. Agric*. 38: 681-696.
30. Karimi, S.A. 2017. Estimating of soil physical and mechanical properties using soil spectroscopy. Degree of M.Sc. in Soil Physical and Soil Conservation, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan. (In Persian)
31. Khayamim, F., khademi, H., Stenberg, B., and Wetterlind, U. 2015. Capability of vis-NIR spectroscopy to predict selected chemical soil properties in Isfahan province. *J. Water Soil Sci*. 19: 72. 81-91. (In Persian)
32. Kühnel, A., and Bogner, C. 2017. In-situ prediction of soil organic carbon by vis-NIR spectroscopy: an efficient use of limited field data. *Europ. J. Soil Sci*. 68: 5. 689-702.

33. Loeppert, R.H., and Suarez, DL. 1996. Carbonate and Gypsum. P 437-474, In: DL Sparks, AL Page, PA Helmke and RH Loeppert (eds), Methods of soil analysis part 3. Chemical methods, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, USA.
34. Marinari, S., Masciandro, B., and Grego, S. 2000. Influence of organic and mineral fertilizer on soil physical properties. *Geoderma*. 72: 9-17.
35. Martin, P., Malley, D., Manning, G., and Fuller, L. 2002. Determination of soil organic carbon and nitrogen at the field level using near-infrared spectroscopy. *Can. J. Soil Sci.* 82: 4. 413-422.
36. McBratney A.B., Minasny B., Cattle S.R., and Vervoort R.W. 2002. From pedo-transfer functions to soil inference systems. *Geoderma*. 109: 41-73.
37. McCoy R.M. 2005. Field methods in remote sensing. A Division of Guilford Publications, Inc. Spring, New York, U.S, Pp: 67-87.
38. Najafi, Z., Golchin, A., and Shafiei, S. 2016. The effects of soil moisture levels on dynamics of organic carbon and nitrogen from alfalfa and barley residues. *J. Water Soil Cons.* 23: 4. 171-186. (In Persian)
39. Nanni, M.R., and Demattê, J.A.M. 2006. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 70: 2. 393-407.
40. Nawar, S., and Mouazen, A.M. 2019. On-line vis-NIR spectroscopy prediction of soil organic carbon using machine learning. *Soil and Tillage Research*, 190: 120-127.
41. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 961-1010, In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke and R.H. Loeppert (eds), Methods of soil analysis part 3. Chemical methods, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, USA.
42. Nocita, M., Stevens, A., De Brogniez, D., Bampa, F., Toth, G., Panagos, P., and Montanarella, L. 2012. Prediction of SOC content at European scale by coupling vis-NIR spectroscopy and a modified local PLSR algorithm. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, 4247p.
43. Owji, A.R., Landi, A., and Hojati, S. 2017. Effects of grazing management on different forms of organic carbon in Peneti plain of Izeh area in Khuzestan province. *J. Water Soil Cons.* 24: 3. 113-129. (In Persian)
44. Rhoades, J.D. 1996. Electrical conductivity and Total Dissolved Solids. P 417-436, In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke and R.H. Loeppert (eds), Methods of soil analysis part 3. Chemical methods, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, USA.
45. Schaefer, D., Feng, W., and Zou, X. 2009. Plant carbon inputs and environmental factors strongly affect soil respiration in a subtropical forest of southwestern China, *Soil Biology and Biochemistry*. Pp: 1-8.
46. Shangshi, L., Haihua, Sh., Songchao, C., Xia, Z., Asim, B., Xiaolin, J., Zhou, Sh., and Jingyun, F. 2019. Estimating forest soil organic carbon content using vis-NIR spectroscopy: Implications for large-scale soil carbon spectroscopic assessment. *Geoderma*, 348: 37-44.
47. Shepherd, K.D., and Walsh, M.G. 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 66: 3. 988-998.
48. Shiferaw, A., and Hergarten, Ch. 2014. Visible near infra-red (vis-NIR) spectroscopy for predicting soil organic carbon in Ethiopia. *J. Ecol. Natur. Environ.* 6: 126-139.
49. Six, J., and Paustian, K. 2014. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*. 68: A4-A9.
50. Stenberg, B. 2010. Effects of soil sample pretreatments and standardized rewetting as interacted with sand classes on Vis-NIR predictions of clay and soil organic carbon. *Geoderma*. 158: 1-2. 15-22.
51. Summers, D., Lewis, M., Ostendorf, B., and Chittleborough, D. 2011. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecological Indicators*. 11: 123-131.

52. Sun, H., Nelson, M., Chen, F., and Husch, J. 2007. Effect of structural water in clay minerals on the estimation of soil organic matter content by loss-on-ignition analytical method. GSA Denver Ann. Meeting. 39: 6. 218-248.
53. Thomas, J.W. 1996. Soil pH and Soil Acidity. P 475-490, In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke and R.H. Loeppert (eds), Methods of soil analysis part 3. Chemical methods, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, USA.
54. Viscarra Rossel, R.A. 2008. ParLeS software for chemometric analysis of spectroscopic data. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 90: 72-83.
55. Viscarra Rossel, R.A., McGlynn, R., and McBratney, A. 2006. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. Geoderma. 137: 70-82.
56. Viscarra Rossel, R.A., Walter, C., and Fouad, Y. 2003. Assessment of two reflectance techniques for the quantification of field soil organic carbon. P 697-703. In: J. Stafford and A. Werner (Eds.), Precision Agriculture. Fourth European Conference on Precision Agriculture. Wageningen Academic Publishers, Berlin.
57. Walvoort, D.J.J., and McBratney, A.B. 2001. Diffuse reflectance spectrometry as a proximal sensing tool for precision agriculture. P 503-507. In: G. Grenier and S. Blackmore (Eds.), ECPA 2001, Third European Conference on Precision Agriculture, Vol. 1. Agro Montpellier.
58. Willmott, C.J. 1981. On the validation of models. Physical Geography. 2: 184-194.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(6), 2020

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

DOI: 10.22069/jwsc.2019.16387.3171

Performance evaluation of reflectance spectroscopy for estimation of soil organic carbon content in Zrebar lake watershed, Kurdistan province

S. Fahmideh¹, *M. Davari², M.R. Mosaddeghi³ and Z. Sharifi²

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, ²Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, ³Professor, Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 03.05.2019; Accepted: 07.08.2019

Abstract

Background and Objectives: Soil organic carbon (SOC), as a great constitute of soil organic matter (SOM), has an important role in chemical, physical and biological processes of soil. SOM or SOC is a key parameter of soil quality and a soil fertility indicator. SOM has an essential role in formation of soil aggregate and its stability, water and nutrients adsorption, water holding capacity, infiltration of air and water, hydraulic conductivity, soil water repellency and carbon sequestration. Various studies have shown that the quantity and quality of SOM can be affected by anthropogenic activities such as farming practices and other economic development activities. It has also been reported a high rate of SOM loss on eroded lands. Hence, monitoring temporal and spatial variation of SOM is essential for evaluating long-term soil productivity management. However, conventional soil sampling and chemical measurement of SOC, especially in large geographic scale, is tedious, time consuming and expensive. Therefore, rapid and precise assessment of SOC content can be useful in long-term management of soil. The objective of this study was to investigate the ability of soil visible-near infrared (vis-NIR) spectroscopy for estimating SOC in Zrebar lake watershed of Marivan, Kurdistan province, Iran.

Materials and Methods: A total of 100 soil samples were collected from the studied region, with an area about 10718 hectares. The spectral reflectance and physicochemical properties of all soil samples were measured under laboratory controlled conditions. After recording of the spectra, different pre-processing methods were applied and compared. Then, pedo-transfer functions (PTFs) and spectral transfer functions (STFs) were developed to estimate SOC content using stepwise multiple linear regression (SMLR). The accuracy and reliability of the derived PTFs and STFs were evaluated using coefficient of determination (R^2), normalized root mean square error (NRMSE), mean error (ME), index of agreement (d), and ratio of performance to deviation (RPD) statistics.

Results: Based on the results, soil organic carbon showed high and significant (significance level of 1%) correlations with spectral reflectance values at wavelengths 858 and 1916 nm. The results indicated that the derived PTFs had the higher accuracy ($R^2_{avg}=0.83$, $NRMSE_{avg} = 24.55\%$) to estimate SOC in comparison with the STFs ($R^2_{avg}=0.44$, $NRMSE_{avg}= 44.31\%$). However, SOC could be also fairly estimated by the derived spectral transfer functions ($R^2_{avg}=0.52$, $RPD_{avg}= 1.44$). The results also revealed that the Savitzky–Golay smoothing filter with 1st order derivative was the best spectral pre-processing method to reduce the effect of random noise and improve the calibration models.

Conclusion: Overall, the results indicated that although the performance of STFs was not superior to the corresponding PTFs for estimating SOC, but this approach can be used as a reasonable indirect method in case of unavailability of PTFs.

Keywords: Soil organic matter (SOM), Soil spectral reflectance, Stepwise multiple linear regression

* Corresponding Author; Email: m.davari@uok.ac.ir