



مقاله پژوهشی

مقایسه برآورد کربن آلی خاک با استفاده از طیفسنجی فروسرخ نزدیک و تصاویر ماهواره‌ای در کاربری‌های کشاورزی و جنگل در منطقه گیان، استان همدان

پریناز عبدلی، سهیلاسادات هاشمی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴ / پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

چکیده

نتایج نشان داد که در روش سنجنش از دور تنها باند ۱۱، با میزان کربن آلی خاک در اراضی کشاورزی همبستگی مثبت معنی‌داری در سطح ۵ درصد دارد. هم‌چنین نسبت باند ۷ به باند ۸ همبستگی مثبت معنی‌داری با کربن آلی خاک در سطح ۱ درصد داشت. سه شاخص گیاهی NDVI، DVI و RAI، با کربن آلی خاک در سطح ۵ درصد همبستگی معنی‌داری نشان دادند. همبستگی بین کربن آلی محاسبه شده در آزمایشگاه با تصاویر ماهواره‌ای در کاربری کشاورزی برابر $R^2 = 0/36$ بود. در حالی که همبستگی کربن آلی با تصاویر ماهواره‌ای برای کل نقاط مورد مطالعه برابر $R^2 = 0/32$ به دست آمد. در روش طیفسنجی بالاترین همبستگی در طول موج‌های ۱۴۰۴، ۱۹۰۷ و ۲۲۱۶ نانومتر مشاهده شد. در بین مدل‌های برازش داده شده به کمک رگرسیون چندتایی، مدل گام به گام بهترین مدل برای تخمین کربن آلی پیشنهاد شد. به‌طور کلی اگر تعداد نمونه‌ها خیلی کم باشد، روش آزمایشگاهی مناسب بوده، اما اگر نمونه‌ها زیاد باشد، روش طیفسنجی برای صرف زمان و هزینه مناسب است. در ایران به دلیل قیمت بالای روش طیفسنجی، روش سنجنش از دور برای تخمین پیشنهاد می‌گردد.

در این مطالعه ارتباط بین انعکاس طیفی کربن آلی خاک از ماهواره‌های لندست ۸ و طیفسنجی فروسرخ، در ۴۸ نمونه خاک در کاربری‌های اراضی کشاورزی و جنگل بکر در دشت گیان نهاوند، استان همدان، مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری به‌طور تصادفی جمع‌آوری شدند. آنالیز همبستگی بین باندهای اصلی، باندهای ترکیبی، شاخص‌های گیاهی و ترکیب شاخص‌ها با میزان کربن آلی خاک انجام گرفت. هم‌چنین آنالیز طیفی خاک با کمک دستگاه طیفسنج در طول موج ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر انجام شد. پس از ثبت طیف‌ها پیش‌پردازش آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

پریناز عبدلی^۱، سهیلاسادات هاشمی^۲ (✉)

۱. کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

DOI: 10.30495/girs.2022.697117

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: s.hashemi@malayeru.ac.ir

ASD آمریکا اسکن شدند. بازتاب مطلق نمونه‌ها در دامنه ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر و با درجه وضوح یک نانومتر ثبت شدند، که در مجموع ۲۱۵۰ نقطه در هر طیف به دست آمد. از هر نمونه، تعداد ۴ قرائت بازتاب متوالی گرفته شد و برای هر نمونه خاک، یک طیف که بیانگر طیف بازتابی آن بود، در فایل اصلی داده‌ها ثبت شد. از نرم‌افزارهای Excel، ViewSpecPro برای میانگین‌گیری، پردازش اولیه و تبدیل فرمت طیف‌های خام استفاده شد.

نتایج و بحث: در بین باندهای اصلی تنها باند ۱۱ تصویر لندست ۸ همبستگی معنی‌داری در سطح ۵٪ با کربن‌آلی خاک در کاربری کشاورزی داشته‌است. ترکیب باندهی (باند ۸/باند ۷)، همبستگی معنی‌داری در سطح ۱٪ با میزان کربن‌آلی خاک داشته‌است. این ترکیب باندهی با توجه به نتایج به دست آمده از آن، می‌تواند به عنوان یک شاخص برای تعیین میزان کربن‌آلی خاک تعریف گردد. از میان شاخص‌های پوشش گیاهی و روش‌نمایی مورد استفاده، ۳ شاخص پوشش گیاهی NDVI، DVI و RAI برای تعیین کربن‌آلی خاک نتیجه مثبتی به همراه داشتند. ترکیب این شاخص‌ها با یکدیگر و همچنین ترکیب این شاخص‌ها با شاخص پوشش گیاهی MSI، دارای همبستگی مثبتی با کربن‌آلی خاک است. از بین مدل‌های برازش داده شده توسط رگرسیون چند متغیره، مدل Stepwise برای برآورد کربن‌آلی خاک از طریق شاخص‌های پوشش گیاهی، ترکیب شاخص‌های گیاهی و همچنین ترکیب باندها، مدل مناسبی بوده است. نتایج تحقیق طیف‌سنجی نشان داد که بیش‌ترین همبستگی‌ها در طول موج‌های ۱۴۰۴، ۱۹۰۷ و ۲۲۱۶ نانومتر به ترتیب با ضریب همبستگی (R²=۰/۱۶)، (R²=۰/۲۳) و (R²=۰/۱۷) همراه بودند. مقادیر R² و RSME حاصل از مدل‌سازی توسط رگرسیون PLSR برای کربن‌آلی نشان داد که مقادیر R² در سری اعتبارسنجی کمتر از سری کالیبراسیون و مقادیر RSME در سری اعتبارسنجی بیش‌تر از مقادیر مشابه آن در سری کالیبراسیون است.

نتیجه‌گیری: هر یک از روش‌های استفاده شده، در این تحقیق با توجه به شرایط مختلف، می‌تواند روش مناسبی برای اندازه‌گیری کربن آلی باشد. در صورتی که تعداد نمونه‌ها خیلی کم باشد، روش آزمایشگاهی می‌تواند مناسب باشد، اما در صورتی که تعداد نمونه‌ها خیلی زیاد باشد، برای صرفه‌جویی در وقت، روش طیف‌سنجی مناسب می‌باشد و برای صرفه‌جویی در هزینه، با توجه به هزینه

طرح مسئله: کربن آلی خاک کلیدی‌ترین عامل در باروری و کیفیت خاک و حفاظت محیط زیست، به ویژه در مناطق نیمه‌خشک بوده و ابزاری برای اصلاح تغییرات اقلیمی و کاهش گازهای گلخانه‌ای در جو زمین است. توزیع کربن‌آلی خاک عمدتاً بوسیله گروهی عوامل شامل نوع خاک، آب و هوا، هیدرولوژی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و ... کنترل می‌شود. محققان از تکنیک‌ها و روش‌های مختلفی از جمله نمونه‌برداری شبکه‌ای و منطقه‌ای برای تعیین توزیع موادآلی خاک استفاده می‌کنند. اما این روش مشکلاتی دارند، از جمله این که عموماً هزینه نمونه‌برداری و تجزیه نمونه‌ها بالاست و همین امر تعیین‌کننده مقیاس نقشه‌برداری بوده و ممکن است بسیاری نقاط با موادآلی زیاد یا کم نادیده گرفته شوند. با توجه به مسئله مطرح شده، نیاز به روش‌های کم هزینه و سریع برای آنالیز خاک احساس می‌شود. اولین راهکار بررسی قابلیت داده‌های طیفی ماهواره‌ای در این زمینه است و در صورت اثبات کارایی این داده‌ها می‌تواند مشکلات فوق را تا حدودی برطرف ساخت.

هدف: با توجه به اینکه ایران در موقعیت جغرافیایی خشک و نیمه-خشک قرار گرفته است و بررسی محتوی موادآلی در بسیاری از مناطق آن بسیار ضروری است، هدف از انجام این تحقیق بررسی میزان کربن‌آلی خاک، با دو روش سریع طیف‌سنجی و سنجش‌ازراه-دور و مقایسه آنها با یکدیگر و با روش آزمایشگاهی می‌باشد.

روش تحقیق: ۸ نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتیمتری برداشته شد و سپس هوا خشک شدند و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. جهت مطالعات سنجش‌ازدور، از تصویر لندست ۸ مربوط به تاریخ نمونه‌برداری (سپتامبر ۲۰۱۹) استفاده شد. مقادیر محاسبه شده هر یک از قطعات نمونه در محیط ERDAS imagine 9.1 ایجاد گردید. تعیین محل قطعه نمونه با توجه به ابعاد پیکسل در درون پیکسل قرار گرفته و محل دقیق آن عملاً امکان‌پذیر نیست، لذا چهار پیکسل اطراف را بررسی کرده و میانگین آنها در نظر گرفته شد. ولیو هر باند برای ۸ نقطه در محیط Excel وارد شد و در نهایت مراحل توصیف‌های آماری متغیرها انجام گرفت. در این پژوهش، ۹ شاخص پوشش گیاهی شامل NDVI، DVI، MSI، SAVI، ARVI، IPVI، OSVI، MSR و دو شاخص روش‌نمایی شامل BI، NDBI و ترکیب شاخص‌ها و ترکیب باندهای اصلی برای پیش‌بینی کربن‌آلی استفاده شد. تست همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی در محیط SPSS 24.1 انجام شد. برای برآورد کربن‌آلی به روش طیف‌سنجی، نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه Field spec شرکت

واژگان کلیدی: تغییر کاربری، باندها، سنجش از دور، فرسوخ
نزدیک

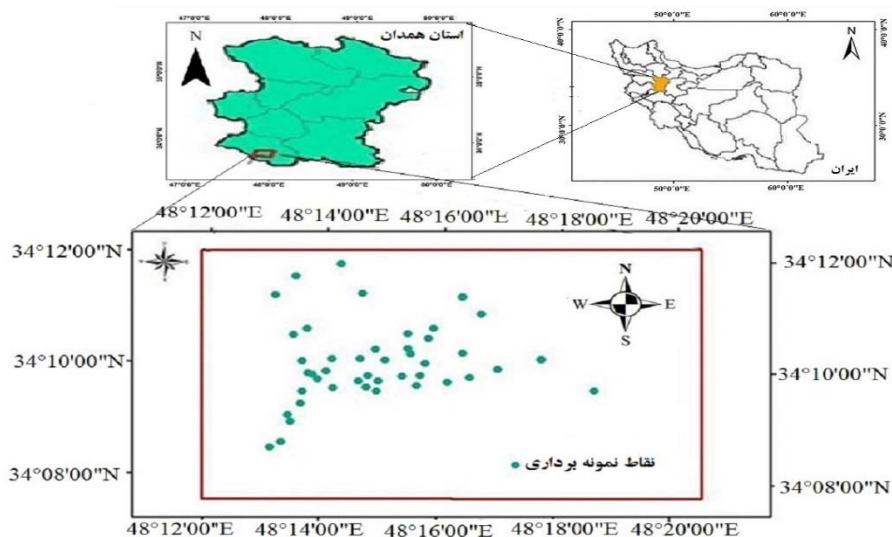
بالای طیف‌سنجی در ایران، روش سنجش از دور، روش مناسب‌تری
پیشنهاد می‌گردد.

لطفاً به این مقاله استناد کنید: عبدلی، پ.، هاشمی، س.، س. مقایسه برآورد کربن آلی خاک با استفاده از طیف‌سنجی فرسوخ‌نزدیک و تصاویر ماهواره‌ای در کاربری‌های کشاورزی و جنگل در منطقه گیان، استان همدان. نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۵(۱): ۷۴-۹۳.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه واقع در دشت گیان، جنوب شهرستان نهاوند، استان همدان است. موقعیت جغرافیایی منطقه بر روی نقشه ایران در عرض جغرافیایی $34^{\circ}11'5''$ شمالی و طول جغرافیایی $48^{\circ}14'56''$ شرقی قرار گرفته است. دارای ارتفاع از سطح دریا است. اراضی منطقه از نظر ژئومورفولوژی در دشت-دامنه‌ای و مخروط‌افکنه رسوب‌واریزه‌ای واقع شده است. به-طور کلی از نظر آب و هوایی محدوده مورد مطالعه بر اساس روش دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد و تابستان‌های ملایم و خشک می‌باشد. متوسط نزولات جوی سالانه 354 میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه $12/8$ درجه سانتی‌گراد است. منطقه مورد مطالعه دارای رژیم رطوبتی زیریک و رژیم حرارتی مزیک می‌باشد (۴). شکل ۱ موقعیت دشت گیان در استان همدان را همراه با نقاط نمونه‌برداری نشان می‌دهد.

بالاتری است. مدل PLSR دارای تناسب بهتری برای داده‌های آزمایشگاهی طیف‌سنجی بود، اما مدل RF برای داده‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای طیف‌سنجی، تفاوتی نشان نداد. ایشان بهترین دامنه طیفی برای بیان کربن آلی خاک را طیف مرئی عنوان کردند. تغییر کاربری اراضی منجر به هدررفت کربن آلی خاک، کاهش قابلیت دسترسی و نگهداری عناصر غذایی، تغییر جامعه بیولوژیک خاک، تخریب ساختمان خاک، کاهش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی خاک، افزایش رواناب سطحی، افزایش فرسایش و افزایش چگالی ظاهری خاک شده است. با توجه به تغییر کاربری اراضی مرتع و جنگل به کشاورزی در منطقه گیان، شهرستان نهاوند، و هم‌چنین وسعت زیاد و هزینه بالای اندازه‌گیری آزمایشگاهی، تصمیم بر آن شد که تغییرات ایجادشده در میزان کربن آلی خاک در کاربری‌های متفاوت، با کمک سنجش‌ازدور و طیف‌سنجی بررسی شده و دو روش نام‌برده با روش آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته، تا بهترین روش برای چنین تغییراتی معرفی گردد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری بر روی حوضه مورد مطالعه

Fig1. Study area location and sampling points in the investigated Catchment

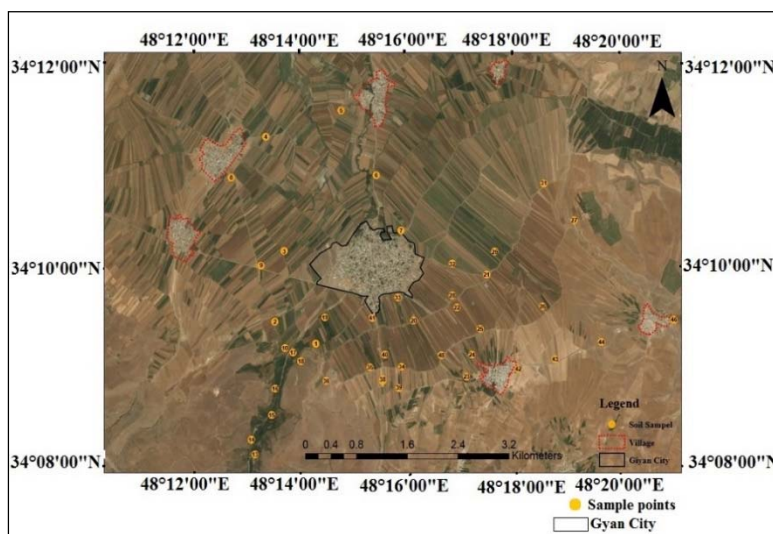
کلزا و چغندر (قند) در منطقه گیان، در هفته اول مهرماه ۱۳۹۸ صورت گرفت. بعد از انجام نمونه‌برداری و آماده‌سازی از بین ۶۳ نقطه نمونه‌برداری، ۴۸ نمونه جهت تعیین پارامترهای خاک

مطالعات صحرائی و آزمایشگاهی: نمونه‌برداری خاک از عمق (۳۰-۰ سانتی‌متر) در دو کاربری جنگل طبیعی (با گونه غالب چنار، زبان‌گنجشک و بلوط) و کشاورزی (عمدتا کشت

می‌گیرند، که در این پژوهش از سطح پیکسل استفاده شد. تعیین محل قطعه نمونه با توجه به ابعاد پیکسل در درون آن بوده و محل دقیق آن عملاً امکان‌پذیر نیست، لذا چهار پیکسل اطراف را بررسی کرده و میانگین آن‌ها در نظر گرفته شد. ویو هر باند برای ۴۸ نقطه در محیط Excel وارد شد و در نهایت مراحل توصیف‌های آماری متغیرها انجام گرفت. تست همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی در محیط SPSS 24.1 انجام شد. در این پژوهش، ۹ شاخص پوشش گیاهی شامل NDVI, DVI, MSI, RAI, SAVI, ARVI, JPVI, MSR, OSAVI و دو شاخص روشنایی شامل BI, NDBI و ترکیب شاخص‌ها و ترکیب باندهای اصلی برای کربن آلی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱).

در نظر گرفته شد. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاکی از جمله، بافت خاک به روش هیدرومتر، مقدار کربنات کلسیم معادل با روش تیتراسیون، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، pH خاک در سوسپانسیون ۱:۵ خاک و آب مقطر، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره سوسپانسیون ۱:۵ خاک و آب مقطر، و کربن آلی (۲۴) اندازه‌گیری شدند.

مطالعات تصویر ماهواره‌ای: جهت مطالعات سنجش‌ازدور، از تصویر لندست ۸ مربوط به سپتامبر ۲۰۱۹، استفاده شد. شکل ۲ تصویر دشت گیان و نقاط نمونه‌برداری را بر روی تصویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد. مقادیر محاسبه شده هر یک از قطعات نمونه در محیط ERDAS imagine 9.1 ایجاد گردید. تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در انواع سطوح مانند سطح پیکسل، سطح صحنه و سطح تصویربرداری در دسترس قرار



شکل ۲. پراکنش نقاط نمونه‌برداری بر روی تصویر ماهواره‌ای
Figure 2. The scattering of sample points on a satellite image

تعداد ۴ قرائت بازتاب متوالی گرفته شد و برای هر نمونه خاک، یک طیف که بیانگر طیف بازتابی آن بود، در فایل اصلی داده‌ها ثبت شد. از نرم‌افزارهای Excel, ViewSpecPro برای میانگین‌گیری، پردازش اولیه و تبدیل فرمت طیف‌های خام استفاده شد. به منظور پیش‌پردازش طیف‌ها، دو بخش نویزی ابتدا و انتهای طیف‌ها در محدوده ۴۵۰-۳۵۰ و ۲۵۰۰-۲۴۵۰

مطالعات طیف‌سنجی: طیف‌سنجی نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه Fieldspec3 شرکت ASD آمریکا، در آزمایشگاه گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، اسکن شدند. بازتاب مطلق نمونه‌ها در دامنه ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر و با درجه وضوح یک نانومتر ثبت شد، که در مجموع ۲۱۵۰ نقطه در هر طیف به دست آمد. از هر نمونه،

استفاده شد. بدین منظور ابتدا مجموعه داده‌ها به صورت تصادفی به دو گروه کالیبراسیون و اعتبارسنجی تقسیم گردید. سپس از رگرسیون خطی چندگانه (MLR) برای برآورد کربن استفاده شد. مراحل توصیف‌های آماری متغیرها، پیش‌پردازش طیف‌ها و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Unscrambler X 10.2 انجام شد.

نانونتر حذف گردید. سپس داده‌های طیفی با استفاده از نرم‌افزار TheUnscramblerX 10.2 به مشتق اول تبدیل شدند. پس از انجام پیش‌پردازش، به کمک آنالیز مولفه‌های اصلی، اطلاعات طیفی به دست آمده را خلاصه نموده، تا بتوان جهاتی را با حداکثر واریانس داده‌های طیفی جستجو نمود. سپس از رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) برای پیش‌بینی کربن

جدول ۱. مشخصات شاخص‌های طیفی و معادلات آنها

Table 1. Spectral indices properties and their equations

معادله Equation	نام کامل شاخص	شاخص -
$(\text{Band5}-\text{Band4})/(\text{Band5}+\text{Band4})$	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI
$\text{Band5}-\text{Band4}$	Difference Vegetation Index	DVI
$\text{Band6}/\text{Band5}$	Moisture Stress Index	MSI
$\text{Band5}/(\text{Band4}+\text{Band6})$	Rainfall Anomaly Index	RAI
$(\text{Band5}-\text{Band2})/(\text{Band5}+\text{Band2})$	Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI
$\text{Band5}/(\text{Band4}+\text{Band5})$	Atmospherically Resistant Vegetation	AVRI
$\text{Band5}/\text{Band4}$	Infrared Percentage Vegetation Index	IPVI
1.16	Modified Simple Ratio	MSR
$(\text{Band10}-\text{Band5})/(\text{Band10}+\text{Band5})$	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	OSAVI
$\sqrt{(\text{Band4}^2 + \text{Band5}^2)}$	Normalized Difference Brightness Index	NDBI
	Brightness Index	BI

نتایج

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک: جدول ۲ میانگین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در دو کاربری را نشان می‌دهد. تعداد نقاط نمونه‌برداری در کاربری کشاورزی ۳۹ نمونه به طور تقریبی در ۵۰ تا ۶۰ درصد مساحت منطقه و در کاربری جنگل بدلیل مساحت کمتر ۹ عدد، حدود ۹۰ درصد مساحت کاربری جنگل و تنها در منطقه سراب گیان، بوده است. نتایج نشان داد که میانگین میزان کربنات کلسیم خاک در کاربری کشاورزی و جنگل به ترتیب ۳۰ و ۲۲/۲۲ درصد است (جدول ۲).

بافت خاک در بیش‌تر نمونه‌ها لومی رسی شنی است. بافت خاک عامل بسیار تعیین کننده‌ای در میزان رطوبت خاک است. رطوبت خاک، موجب کاهش بازتاب در بخش مرئی و فرسرخ می‌شود، بنابراین خاک رسی که مقدار زیادی رطوبت را جذب کلونید می‌کند، انعکاس کمتری در طول موج‌های

مرئی و فرسرخ نزدیک و میانی دارد، زیرا آن‌ها را به شدت جذب می‌نماید. اغلب خاک‌های رسی علاوه بر باندهای جذب آبی، دارای باندهای جذب هیدروکسیل در طول موج‌های ۱/۴ تا ۲/۲ میکرومتر هستند (۸). حداکثر و حداقل مقدار هدایت الکتریکی در عصاره‌های خاک به ترتیب ۰/۶۹۲ و ۰/۰۹۴ دسی‌زیمنس برمتر مشاهده شده است.

بیش‌ترین میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک مربوط به خاک جنگل (۴۷/۵۸ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) و کمترین میزان آن مربوط به خاک کشاورزی (۲۶/۹ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) است.

آنالیز تصاویر ماهواره‌ای لندست: ماتریس همبستگی بین باندهای مختلف تصویر ماهواره‌ای لندست در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، باند ۵ همبستگی کمتری با سایر باندها دارد.

جدول ۲. برخی از خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک‌های مطالعه شده

Table 2. The selected physicochemical characteristics of soils studied

نوع کاربری Land use	کربن آلی خاک O.C (%)	آهک Calcium Carbonate (%)	هدایت الکتریکی EC(dSm ⁻¹)	اسیدیته pH	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (Cmolc/kg ⁻¹)	
کشاورزی Agriculture	۰/۱	۱۵	۰/۰۹	۷	۲۶/۹	حداقل Minimum
جنگل Forest	۰/۶	۱۰/۵	۰/۱۶	۷	۲۷/۲	
کشاورزی Agriculture	۲/۸	۴۷/۵	۰/۴۵	۷/۹	۴۰	حداکثر Maximum
جنگل Forest	۲/۶	۳۹/۷	۰/۳۲	۷/۶	۴۷/۶	
کشاورزی Agriculture	۱/۱	۳۰	۰/۲۱	۷/۴	۳۲/۴	میانگین Mean
جنگل Forest	۱/۹	۲۲/۲	۰/۲۳	۷/۵	۳۸/۵	

جدول ۳. ماتریس همبستگی بین باندهای مختلف تصویر ماهواره‌ای لندست

Table 3. The correlation coefficient between different bands of landsat satellite image

نام باند	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷	باند ۸	باند ۹	باند ۱۰	باند ۱۱
باند ۲	۱	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۹ **
باند ۳	۰/۹۸۹ **	۱	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **
باند ۴	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۴ **	۱	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **
باند ۵	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۱	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **
باند ۶	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۱	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **
باند ۷	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۱	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **
باند ۸	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۱	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **
باند ۹	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۱	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **
باند ۱۰	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۱	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **
باند ۱۱	۰/۹۸۹ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۰/۹۸۴ **	۱

*** به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد و ns معنی‌دار نمی‌باشد.

*** are Significant at 5 and 1 (%) probability level, respectively and ns, no significant.

همبستگی ترکیب باندهای اصلی با کربن آلی: نتایج نشان داد که از بین ۲۴ ترکیب باند اصلی، ۲۳ ترکیب باند در سطح ۰/۵٪ و یک نسبت باندی (باند ۸/باند ۷)، در سطح ۱٪ با مقدار کربن آلی خاک، همبستگی مثبت معنی‌دار دارد (جدول ۴).

همبستگی باندهای اصلی با کربن آلی خاک: میزان انعکاس طیفی نمونه‌ها بر روی ۱۰ باند اصلی و پردازش شده، استخراج گردید. آنالیز بررسی همبستگی پیرسون بین باندهای اصلی و میزان کربن آلی انجام گردید. هیچ‌گونه همبستگی بین ۱۰ باند اصلی و کربن آلی وجود نداشت.

جدول ۴. همبستگی بین ترکیب باندهای اصلی

Table 4. The correlation between main band combinations

شماره	ترکیب باندها	R ²	شماره	ترکیب باندها	R ²
۱	Band5/Band2	۰/۳*	۱۳	Band2/(Band5-Band2)	۰/۳*
۲	Band5/Band6	۰/۳۳*	۱۴	Band5/(Band5-Band2)	۰/۳*
۳	Band7/Band8	۰/۴**	۱۵	Band5/Band7	۰/۲*
۴	Band7/Band6	۰/۴*	۱۶	Band5/(Band5+Band7)	۰/۳۶*
۵	Band7-Band6	۰/۳۵*	۱۷	Band7/(Band5+Band7)	۰/۳۲*
۶	(Band7-Band6)/(Band7+Band6)	۰/۴۵*	۱۸	Band5/(Band5-Band9)	۰/۴۳*
۷	Band8/Band9	۰/۳۷*	۱۹	Band9/(Band5-Band9)	۰/۳*
۸	Band5-Band2	۰/۳۵*	۲۰	(Band5-Band2)/(Band5+Band2)	۰/۴۴*
۹	Band2/Band5	۰/۲*	۲۱	(Band3+Band4)/Band5	۰/۲*
۱۰	Band5/(Band3+1)	۰/۲*	۲۲	Band3/(Band3+2)	۰/۳*
۱۱	(Band4-Band5)/Band3	۰/۳*	۲۳	(Band5-1)/(Band3+1)	۰/۳۵*
۱۲	(Band5-Band4)/(Band3+1)	۰/۳*	۲۴	(Band3+Band4)/(Band5+Band7+1)	۰/۳۷*

*** به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی دار می باشد و ns معنی دار نمی باشد.

معنی داری در سطح احتمال ۵٪ نشان دادند. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده، ۲ شاخص روشنایی با مقدار کربن-آلی خاک، همبستگی معنی داری ندارند.

همبستگی شاخص های گیاهی با کربن آلی: نتایج نشان داد که از بین ۹ شاخص پوشش گیاهی، سه شاخص NDVI، DVI و RAI با مقدار کربن آلی سطحی خاک، همبستگی

جدول ۵. همبستگی شاخص های گیاهی و روشنایی با میزان کربن آلی خاک

Table 5. The correlation of vegetation index combinations with soil organic carbon

شاخص	R ²	شاخص	R ²
NDVI	۰/۳۷*	IPVI	۰/۲۲ ^{ns}
DVI	۰/۴۵*	NDBI	۰/۱۰۳ ^{ns}
MSI	۰/۱ ^{ns}	ARVI	۰/۰۴۱ ^{ns}
RAI	۰/۴*	SR	۰/۰۶ ^{ns}
SAVI	۰/۰۳۱ ^{ns}	BI	۰/۱۳ ^{ns}
OSAVI	۰/۲ ^{ns}		

***، ** به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی دار می باشد و ns معنی دار نمی باشد.

بررسی همبستگی باندهای اصلی با کربن آلی در کاربری کشاورزی: همبستگی باندهای اصلی با میزان کربن آلی در کاربری کشاورزی انجام شد و فقط باند ۱۱ با میزان کربن آلی در سطح ۵٪ همبستگی نشان داد. رگرسیون خطی به روش Enter انجام شد و معادله برای کربن آلی در کاربری کشاورزی محاسبه گردید (رابطه ۱). مقادیر باندها در معادله قرار داده شد و در نهایت میزان کربن آلی جدید محاسبه شد. همبستگی کربن آلی محاسبه شده توسط معادله و کربن آلی اندازه گیری

همبستگی ترکیب شاخص های گیاهی با کربن آلی: نتایج نشان داد که از بین ۲۴ ترکیب شاخص پوشش گیاهی، ۱۳ ترکیب شاخص گیاهی با مقدار کربن آلی سطحی خاک دارای همبستگی معنی دار در سطح احتمال ۵٪ هستند (جدول ۶). شاخص MSI با ماده آلی همبستگی نداشت، اما در جدول ۶ مشاهده می شود که ترکیب این شاخص با شاخص های NDVI، DVI و RAI با میزان کربن آلی همبستگی دارد.

شده در آزمایشگاه در کاربری کشاورزی در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۶. همبستگی ترکیب شاخص‌های گیاهی با میزان کربن آلی خاک

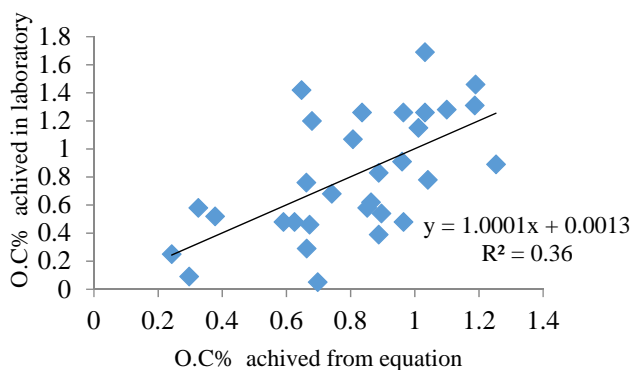
Table 6. Correlation of vegetation index combinations with soil organic carbon

شماره	ترکیب شاخص	R ²	شماره	ترکیب شاخص	R ²
۱	DVI+MSI	۰/۳*	۱۳	MSI+RAI	۰/۱ ^{ns}
۲	DVI-MSI	۰/۳۵*	۱۴	RAI-MSI	۰/۰۳ ^{ns}
۳	DVI/MSI	۰/۱ ^{ns}	۱۵	RAI/MSI	۰/۱۶ ^{ns}
۴	DVI-MSI/DVI+MSI	۰/۱۴ ^{ns}	۱۶	RAI-MSI/RAI+MSI	۰/۳۵*
۵	DVI+RAI	۰/۴*	۱۷	MSI+NDVI	۰/۰۴ ^{ns}
۶	DVI-RAI	۰/۳۵*	۱۸	MSI-NDVI	۰/۲۵ ^{ns}
۷	DVI/RAI	۰/۳*	۱۹	MSI/NDVI	۰/۱ ^{ns}
۸	DVI-RAI/DVI+RAI	۰/۳۵*	۲۰	MSI-NDVI/MSI+NDVI	۰/۴*
۹	DVI+NDVI	۰/۴۵*	۲۱	RAI+NDVI	۰/۴۵*
۱۰	DVI-NDVI	۰/۳۵*	۲۲	RAI-NDVI	۰/۴*
۱۱	DVI/NDVI	۰/۰۲۱ ^{ns}	۲۳	RAI/NDVI	۰/۰۶ ^{ns}
۱۲	DVI-NDVI/DVI+NDVI	۰/۱۳ ^{ns}	۲۴	RAI-NDVI/RAI+NDVI	۰/۳۵*

*، ** به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی دار می باشد و ns معنی دار نمی باشد.

$$OC = -102.673 + 5.759 \text{LogBand}2 - 4.507 \text{LogBand}3 + 2.104 \text{LogBand}4 + 3.491 \text{LogBand}5 - 1.838 \text{LogBand}6 + 2.803 \text{LogBand}7 - 4.825 \text{LogBand}8 + 14.185 \text{LogBand}9 + 6.699 \text{LogBand}10 + 1.759 \text{LogBand}11$$

رابطه (۱)



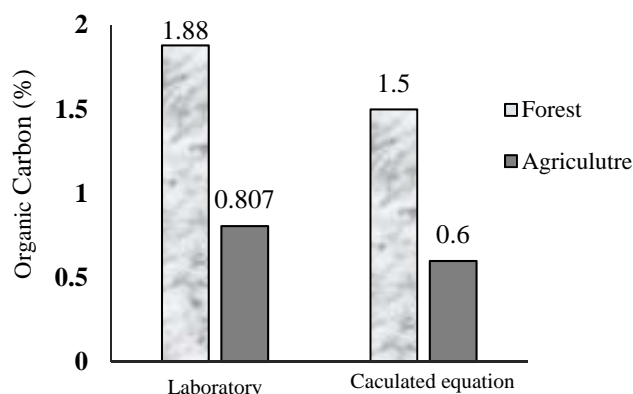
شکل ۳. رگرسیون بین میزان کربن آلی محاسبه شده توسط معادله و کربن آلی اندازه گیری شده در آزمایشگاه

Figure 3. The regression between calculated organic carbon by equation with achieved organic carbon in the laboratory in agricultural landuse

دهنده نزدیکی مقادیر کربن آلی محاسبه شده با مقادیر آزمایشگاهی است، اما این نزدیکی را می توان بدلیل تعداد کم نمونه های جنگل دانست (شکل ۴).

همبستگی باندهای اصلی با کربن آلی در کاربری جنگل:

بین باندهای اصلی و محتوی کربن آلی در کاربری جنگل همبستگی مشاهده نشد. هرچند که معادله ایجاد شده نشان-



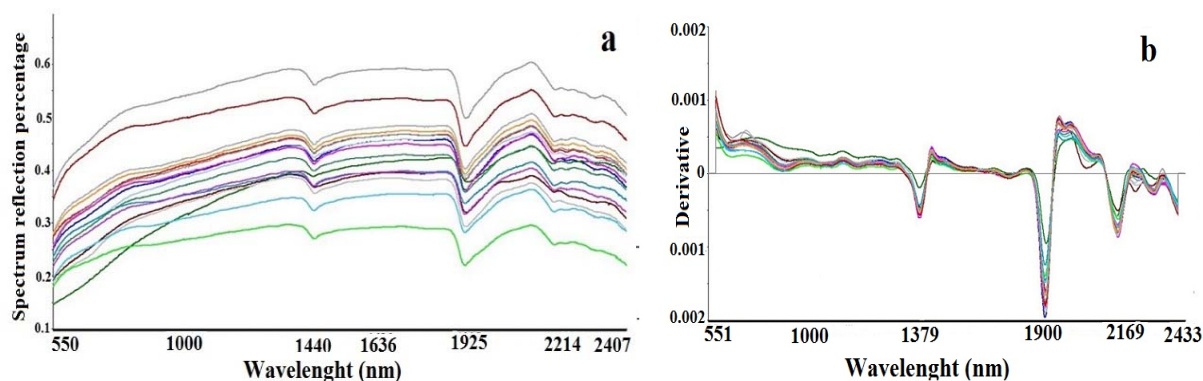
شکل ۴. مقایسه میانگین میزان کربن آلی محاسبه شده توسط داده‌های ماهواره‌ای و اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در دو کاربری

Figure 4. The mean comparison was conducted between the organic carbon in the laboratory and satellite images in two land uses

(b) نمایش داده شده است. مشتق اول به‌طور کلی عوارض جذبی را بزرگ‌نمایی می‌کند، که نشان‌دهنده مقدار مواد مختلف موجود در خاک است و موجب کم‌شدن تغییرات بین نمونه‌ها می‌شود. قله‌های جذب به‌طور کلی در نمودار مشتق اول به‌طور بارزتری دیده می‌شوند (شکل ۵، b).

بازتاب طیفی خاک:

مقدار رطوبت خاک، ماده آلی، اکسیدهای آهن و آلومینیوم، مقدار و نوع رس از اجزای اصلی خاک هستند که طیف بازتابی را به‌طور مستقیم تحت تاثیر قرار می‌دهند و در این مورد با نام متغیرهای اولیه شناخته می‌شوند (۲۲). طیف بازتابی خام ۱۷ نمونه خاک (شکل ۵، a) و هم‌چنین مشتق اول آن‌ها (شکل ۵،

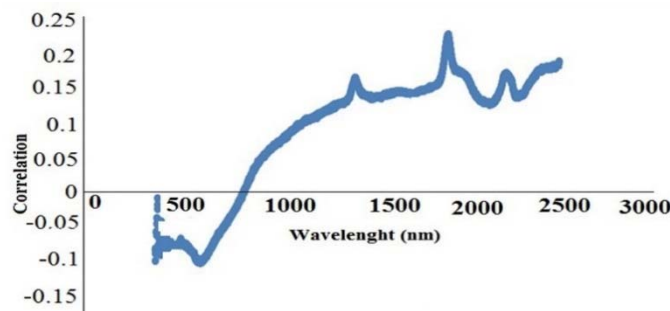


شکل ۵. طیف بازتاب اصلی (a) و مشتق شده (b) از ۱۷ نمونه خاک

Figure 5. The origin (a) and derivative (b) reflection spectra from 17 soil samples

همبستگی در طول موج ۱۴۰۴، ۱۹۰۷ و ۲۲۱۶ نانومتری مشاهده شد.

همانگونه که در شکل ۶ نمایش داده شده است، ضریب همبستگی بین کربن آلی خاک و بازتاب طیفی مثبت است. اما در طول موج‌های طیفی متفاوت همبستگی منفی نیز دارد. بالاترین



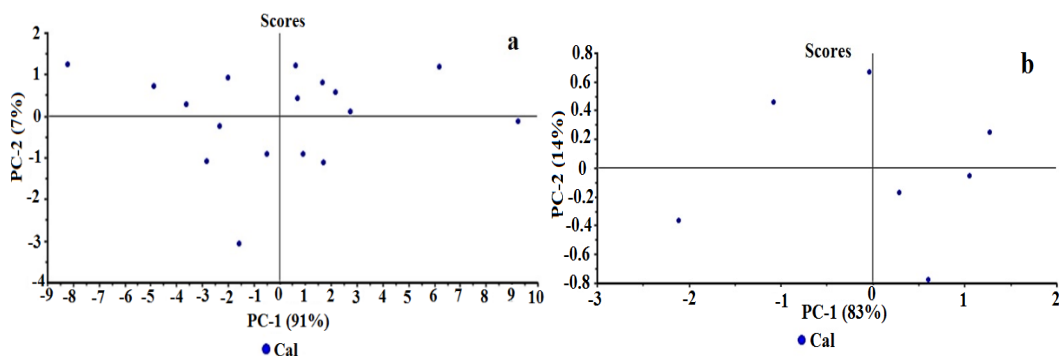
شکل ۶. همبستگی بین کربن آلی خاک و انعکاس‌های طیفی خاک

Figure 6. The correlation between soil organic carbon and reflectance spectra

مولفه‌ها از محاسبات بعدی حذف می‌شوند (۷). شکل (۷a)، نمودار امتیاز را برای داده‌های محاسبه این تحقیق نشان می‌دهد. با استفاده از این نمودار می‌توان نمونه‌هایی که دارای طیف متفاوت از سایر نمونه‌ها هستند را شناسایی کرد و چنانچه پس از بررسی‌های لازم داده‌پرت تشخیص داده شود، می‌توان از مجموعه داده‌ها حذف نمود. شکل (۷b) نمودار امتیاز حذف داده‌های پرت را نشان می‌دهد. این نمونه‌ها دارای طیف مرئی-فرسرخ متفاوتی در مقایسه با سایر نمونه‌های خاک هستند. با بررسی نمودارهای تاثیر، می‌توان دریافت که این گروه از خاک‌ها با خصوصیات طیفی متفاوت از سایر خاک‌ها تاثیر چشم‌گیری بر مدل رگرسیونی دارند.

تحلیل مولفه‌های اصلی در طیف‌سنجی: روش تحلیل-

مولفه اصلی روشی است که متغیرهای موجود در یک فضای چندبعدی همبسته را، به یک مجموعه از مولفه‌های غیرهمبسته خلاصه می‌کند، که هر یک از آنها ترکیب خطی از متغیرهای اصلی می‌باشند. مولفه‌های غیرهمبسته به دست آمده مولفه‌های اصلی (PC) نامیده می‌شوند، که از بردارهای ویژه ماتریس همبستگی متغیرهای اصلی به دست می‌آیند. اولین مولفه بیش‌ترین اطلاعات را با خود به همراه دارد و از نقطه نظر آماری بیش‌ترین واریانس را توضیح می‌دهد. مولفه دوم بیش‌ترین اطلاعات باقیمانده که توسط مولفه اول توضیح داده نشده است، را بیان می‌کند. با انتخاب چند مولفه اصلی اول، سایر



شکل ۷. آنالیز مولفه‌های اصلی بدون حذف داده‌ها (a) و با حذف داده‌های پرت (b)

Figure 7. Principal component analysis without deleting of data (a) and with deleting of data (b)

کربن آلی خاک به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۴ درصد در گروه کالیبراسیون و ۰/۴ و ۰/۶ درصد در گروه اعتبارسنجی محاسبه گردید (جدول ۷). مقادیر R^2 در سری اعتبارسنجی کمتر از سری کالیبراسیون و مقادیر RMSE در سری اعتبارسنجی بیشتر از مقادیر مشابه آن در سری کالیبراسیون است، ولی با این وجود کارکرد آماری آن تغییر چندانی نداشته است. هنگامی که از نمونه‌های مستقل برای اعتبارسنجی استفاده می‌شود، رسیدن به سطوح برآوردی مشابه غیرمعمول است، حتی اگر هر دو سری داده‌ها خاستگاه مکانی مشابهی داشته باشند. نتایج نشان می‌دهد که وقتی سری کالیبراسیون کمتر از سری اعتبارسنجی باشد، از کیفیت برآوردها کاسته می‌شود و این موضوع در روش PLSR صادق است.

همانطور که در شکل (Va) مشاهده شد، در نمودار مولفه‌های اصلی بدون حذف داده‌های پرت، مولفه اول ۹۱ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه می‌کند و مولفه دوم، ۷ درصد از تغییرات را توجیه می‌کند. همانطور که در شکل (۷)، (b) مشاهده می‌شود، در نمودار مولفه‌های اصلی با حذف داده‌های پرت، مولفه اول ۸۳ درصد از داده‌های واریانس را توجیه می‌کند و مولفه دوم ۱۴ درصد از تغییرات را توجیه می‌کند. مدل‌سازی ویژگی‌های طیفی خاک با کمک رگرسیون PLSR انجام شد. مقدار R^2 و RMSE بدست‌آمده توسط رگرسیون برای کربن آلی خاک در جدول ۶ نشان داده شده است. ضریب تبیین و میزان مجذور مجموع مربعات خطا برای

جدول ۷. مدل کربن آلی خاک در روش PLSR

Table 7. The soil organic carbon model by PLSR method

Validation		Calibration		کربن آلی خاک
RMSE	R^2	RMSE	R^2	
۰/۶	۰/۴	۰/۴	۰/۵	

از طریق این معادله (۲)، میزان کربن آلی برای ۷ نمونه خاک به دست آمد (جدول ۸).
 رابطه (۲) $PC1+0.0006 \%OC=0.0886$

با استفاده از مدل رگرسیونی MLR، معادله جدیدی برای میزان کربن آلی تعریف گردید (رابطه ۲).

جدول ۸. کربن آلی محاسبه شده با کمک مدل رگرسیونی MLR

Table 8. The organic carbon was calculated using the MLR equation

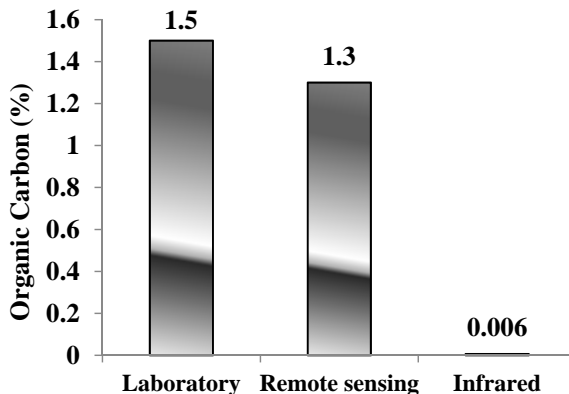
۴۶	۴۰	۳۸	۲۰	۱۴	۴	۱	نمونه خاک
۰/۱	۰/۰۹	/۱	۰/۵	/۰۰۲	۰۹	۰	کربن آلی محاسبه شده

مقایسه سه روش برآورد کربن آلی خاک: میزان کربن آلی - خاک بدست آمده در روش آزمایشگاهی، سنجش از دور و طیف‌سنجی فرورسرخ در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مدل برآوردشده از رگرسیون گام‌به‌گام در روش سنجش از دور، بخوبی توانسته است میزان کربن آلی را برآورد نماید و میزان کربن به دست آمده از روش

همانطور که در جدول (۷) مشاهده شد، میزان کربن آلی به دست آمده از طریق معادله (۲)، با میزان کربن آلی به دست آمده در آزمایشگاه و تصاویر ماهواره‌ای، مطابقت ندارد. همچنین با توجه به ولیو مدل MLR، می‌توان گفت که مدل ضعیف بوده و علت، می‌تواند تعداد کم نمونه‌ها باشد.

بررسی کربن آلی، مدل ضعیفی بوده است و علت تعداد کم نمونه‌های اندازه‌گیری شده توسط طیف فرسرخ است.

سنجش‌ازدور و آزمایشگاه اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند. اما در روش طیف فرسرخ‌نزدیک، مدل برآوردشده برای



شکل ۸. مقایسه میزان کربن آلی خاک حاصله از روش‌های آزمایشگاهی، سنجش‌ازدور و طیف‌سنجی فرسرخ

Figure 8. Comparison of soil organic carbon obtained from laboratory analysis, satellite images, and near-infrared spectrum methods

رابطه بین کربن آلی خاک و انعکاس‌های ماهواره عموماً در دو محدوده طیفی اتفاق افتاده است. ۱- محدوده طیف مرئی، ناحیه‌ای در مرز بین محدوده سبز و قرمز و بیش‌تر در محدوده قرمز ۲- محدوده طیفی فرسرخ میانی. مشابه این نتایج، ری و همکاران (۲۰) نشان دادند که ماده آلی بیش‌ترین همبستگی را در ناحیه فرسرخ میانی و مرئی دارد. در نتیجه ترکیب باندهایی که در این محدوده طیفی قرار دارند، می‌تواند همبستگی معنی‌داری با کربن آلی داشته باشند. عباس‌نژاد و خواجه‌الدین (۱) بیان کردند که باند آبی و قرمز بیش‌ترین همبستگی را با میزان کربن خاک سطحی و باند قرمز بیش‌ترین همبستگی را با کربن خاک عمقی دارد. علت آن را جذب شدید دو طول‌موج قرمز و آبی توسط پیگمان‌های فعال برگ در فتوسنتز دانستند که با افزایش میزان بیومس گیاهی، جذب این دو طول‌موج طیف الکترومغناطیس تشدید می‌یابد. سه شاخص گیاهی NDVI، DVI و RAI با مقدار کربن آلی- سطحی خاک، همبستگی معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ نشان دادند. همبستگی باندهای اصلی با میزان کربن آلی در کاربری کشاورزی نشان داد که تنها باند ۱۱ با میزان کربن خاک در سطح ۵ درصد همبستگی دارد. رگرسیون مقادیر کربن آلی خاک

بحث

با توجه به نتایج حاصله، باند ۵ کمترین همبستگی را با سایر باندها داشته و لذا تابش‌های ثبت شده در این باند، از سایر باندها متمایز خواهد بود. نتایج تحقیق پورمحمدی و همکاران (۱۸) نیز نشان داد که باند ۵ در لندست ۷، همبستگی کمتری با سایر باندها دارد. هم‌چنین نتایج نشان داد که هیچ‌گونه همبستگی بین ۱۰ باند اصلی و کربن آلی وجود ندارد. ژیزالا و همکاران (۲۸) جهت برآورد کربن آلی خاک از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ و ۴ سنسور استفاده کردند. مقایسه برآورد کالیبراسیون و اعتبارسنجی نشان داد که باندهای اصلی لندست ۸ به نسبت دارای توانایی تخمین کربن پس از سایر سنسورها بوده است. نتایج حاصله از شاخص‌های گیاهی با میزان کربن- خاک نشان داد که شاخص MSI با ماده آلی همبستگی نداشت، اما ترکیب این شاخص با شاخص‌های NDVI، DVI و RAI با میزان کربن آلی همبستگی دارد. دلیل آن را، می‌توان ترکیب جدیدی از سیگنال‌های باندهای رادیومتری با یکدیگر دانست. شاخص‌های گیاهی اساساً به صورت کسری یا خطی، سیگنال‌های باندهای رادیومتری را ترکیب می‌کنند (۱۹). نتایج بررسی تست همبستگی پیرسون هم نشان داد که قوی‌ترین

مطالعات قبلی صورت گرفته نیز، طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتری نشان دهنده محتوی کربن‌آلی خاک بوده است (۶). حسنی و همکاران (۱۰) همبستگی ۰/۴۹ را برای کربن-آلی خاک با بازتاب طیفی نشان دادند. مدل‌سازی ویژگی‌های-طیفی خاک با کمک رگرسیون PLSR نیز نشان داد که مقادیر R^2 در سری اعتبارسنجی کمتر از سری کالیبراسیون و مقادیر RMSE در سری اعتبارسنجی بیش‌تر از مقادیر مشابه آن در سری کالیبراسیون است. در برخی پژوهش‌های انجام شده، مقدار RMSE تخمین کربن‌آلی خاک به روش PLSR برابر ۰/۳۶ درصد به دست آمده است (۲۴)، که در مقایسه با نتایج پژوهش حاضر با خطای بیش‌تری همراه است. هم‌چنین در برخی مطالعات، تنها گستره‌های ۵۰۰ تا ۹۰۰ و ۱۳۵۰ تا ۱۴۶۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این مطالعات نشان داده است که مدل PLSR در برآورد مقدار کربن‌آلی خاک با اجزای ۱۲ فاکتور ($R^2 = ۰/۹$, $RMSE = ۳/۳۷$) نسبت به هشت فاکتور ($R^2 = ۰/۷۶$, $RMSE = ۵/۱۲$) دقت بالاتری دارد. در نتیجه می‌توان گفت که هرچه تعداد نمونه‌ها برای طیف‌سنجی بیش‌تر باشد، دقت بالاتر می‌رود و می‌توان گفت که از علت‌های پایین بودن دقت برآورد کربن‌آلی خاک در این پژوهش، تعداد کم نمونه‌ها است، اما به‌طور کل مدل PLSR مدل خوبی برای برآورد کربن آلی بود. می‌لوش و بنسا (۱۶) برای تخمین کربن‌آلی خاک از ۴۲۴ نمونه در طیف‌سنجی استفاده کردند. ایشان نیز برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی داده-ها مدل PLSR را به‌کار برده و نشان دادند که دامنه طیفی-مرئی-فروسرخ نزدیک دارای بیشترین ضریب تبیین (۰/۸۸) و کمترین میزان خطا (۲/۱۸) است. خیامیم و همکاران (۱۳) از مدل PLSR برای تخمین کلسیت و گچ با کمک داده‌های طیف‌سنجی استفاده کردند، ایشان بیان کردند که این مدل قادر است به‌ترتیب ۵۲ تا ۸۰ درصد از تغییرات کلسیت و گچ را نشان دهد. در واقع نتایج آنها بیان‌کننده توانایی مدل در تخمین بهتر گچ با کمترین میزان خطا و عدم‌توانایی برای تخمین کلسیت واقعی خاک بوده است.

حاصله از داده‌های رقومی در نمونه‌های کاربری کشاورزی با میزان کربن‌خاک حاصله از نتایج آزمایشگاهی دارای ضریب ۰/۳۶ بودند. اما بین باندهای اصلی و محتوی کربن‌آلی در کاربری جنگل همبستگی مشاهده نشد. در نتایج طیف‌سنجی مشاهده شده که بازتاب خاک به‌طور کلی در محدوده مرئی، پایین و در محدوده فروسرخ بالا بود و هم‌چنین، در طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر عوارض جذبی بارزی در طیف‌ها دیده شد. این باندها در حقیقت به OH آب‌آزاد در ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر و هم‌چنین، OH شبکه رس در طول موج‌های ۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر (۱۲) مربوط است. قله‌های جذب در نمودار مشتق‌اول به‌طور بارزتری دیده شدند. با توجه به شکل (۵)، با افزایش طول موج از دامنه مرئی، مقدار بازتاب طیفی خاک به تدریج افزایش یافته و حداکثر به مرز ۵۵ درصد می‌رسد، از طرفی، در طول موج‌های بین ۱۳۷۰ تا ۱۵۰۰، ۱۸۶۰ تا ۲۰۵۰ و ۲۲۰۰ تا ۲۲۳۰ نانومتر مقادیر بازتاب طیفی خاک‌ها به شدت کاهش یافته است. این طول-موج‌ها، مربوط به جذب آب بر روی سطوح رس‌ها (طول موج ۱۴۱۴)، پیوندهای H-O-H مولکول‌های آب‌حبس‌شده در شبکه رس‌ها (طول موج ۱۹۱۳) و پیوندهای OH با فلزات آلومینیوم، آهن و سیلیس (طول موج ۲۲۰۷) است (۷). بابائیان و جلالی (۳) در جهت تخمین کربن‌آلی خاک با کمک داده‌های طیف‌سنجی نشان دادند که نمودارهای طیفی خاک‌ها در سه طول موج ۹۱۳، ۱۴۱۴ و ۲۲۰۷ نانومتری مربوط به مقدار آب موجود در ساختار رس و آب‌هیگروسکوپی خاک می‌باشند. این باندها در تخمین کربن‌آلی خاک موثر هستند. پیش‌پردازش داده‌های طیفی خاک و انتخاب روش مناسب در پیش‌پردازش از عوامل مهم برای تخمین کربن‌خاک در روش PLSR است. هندرسون (۱۱) نشان داد که مواد آلی خاک بخصوص بالاتر از ۲ درصد، منجر به کاهش انعکاس طیفی در دامنه ۵۲۰ تا ۸۰۰ نانومتر می‌شود. ایشان بیان داشتند که هومیک‌اسید منجر به کاهش انعکاس طیفی در دامنه مرئی می‌شود، در حالی‌که فولوویک‌اسید بر روی انعکاس اثری ندارد. بالاترین همبستگی در طول موج ۱۴۰۴، ۱۹۰۷ و ۲۲۱۶ نانومتری مشاهده شد. در

NDVI، DVI و RAI دارای همبستگی مثبتی با کربن خاک بودند. همچنین ترکیب این شاخص‌ها با شاخص گیاهی MSI، همبستگی مثبتی با کربن خاک داشتند. لذا از هر کدام از این نسبت‌ها و شاخص‌ها می‌توان برای بررسی میزان کربن خاک در اثر تغییر کاربری اراضی استفاده نمود. در بین مدل‌های رگرسیونی مدل گام‌به‌گام، بهترین مدل در تخمین میزان کربن آلی خاک از طریق شاخص‌های گیاهی، ترکیب شاخص و ترکیب باندها شناخته شد. نتایج حاصله از طیف‌سنجی نیز نشان داد که بالاترین همبستگی کربن خاک در طول موج‌های ۱۴۰۴، ۱۹۰۷ و ۲۲۱۶ نانومتر به ترتیب با ضریب همبستگی $(R^2=0/16)$ ، $(R^2=0/23)$ و $(R^2=0/23)$ بدست آمد. به طور کل مدل PLSR توانست به‌عنوان بهترین مدل و مدل رگرسیونی MLR بعنوان مدل نامناسب، برای تخمین محتوی کربن خاک پیشنهاد گردد. با توجه به شرایط متفاوت هر کدام از روش‌های استفاده‌شده در این تحقیق، سنجش‌ازدور می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب در تخمین کربن خاک به‌کار گرفته شود. مسلماً در تعداد نمونه کم خاک، روش آنالیز آزمایشگاهی از دقت‌نظر بالایی برخوردار است. اما در تعداد نمونه بسیار، روش طیف‌سنجی بدلیل صرف زمان و هزینه مناسب‌تر است. منتها در شرایطی که هزینه طیف‌سنجی بالا باشد، روش سنجش‌ازدور به‌عنوان مناسب‌ترین روش در تخمین کربن آلی خاک معرفی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

1. Abbas Nejad B, Khajedin SJ. 2014. Effect of urban reforestation on carbon sequestration in arid soils using remote sensing technology. Journal of RS and GIS for Natural Resources, 5(2): 75-88. (In Persian)
2. Askari MS, Rourke SM, Holden NL. 2015. Evaluation of soil quality for agricultural production using Visible Near Infrared spectroscopy. Geoderma, 243(244): 80-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.012>.
3. Babaeian E, Jalali VR. 2016. Estimating soil organic carbon using hyperspectral data in visible, near-infrared and shortwave-infrared (VIS-NIR-SWIR) range. Journal of Soil Management and Sustainable Production, 6(2): 65-82. <https://doi.org/10.22069/ejsms.2016.3143>. (In Persian)

زو و همکاران (۲۷) در بررسی کربن آلی خاک توسط طیف‌سنجی از ۱۰۸ نمونه خاک، استفاده کردند. ایشان در تحقیق خود از رگرسیون حداقل مربعات خطا استفاده کرده و اعتبارسنجی مدل را برآورد نموده و گزارش کردند که نوسانات طیفی در طول موج‌های ۱۴۱۰، ۱۹۲۰ و ۲۲۱۰ نانومتری مشاهده شده و برای داده طیفی در ناحیه ۴۸۰ تا ۹۰۰ و ۱۱۷۰ تا ۱۸۷۰ نانومتری و ناحیه ۴۰۰ تا ۲۴۴۹ نانومتری، همبستگی منفی معنی‌داری را نشان دادند. محاسبه کربن آلی خاک با کمک مدل رگرسیونی MLR، نشان داد که این میزان کربن آلی به دست آمده با کربن آلی محاسبه شده در آزمایشگاه و تصاویر ماهواره‌ای، مطابقت ندارد. ودرلایند و همکاران (۲۶) نشان دادند که مدل پیش‌بینی موفقیت‌آمیز برای کربن آلی خاک می‌تواند تنها از ۲۵ نمونه خاک به‌دست آید، در حالی که کی-یوانگ و مواژن (۱۴) پیشنهاد کردند که حداقل ۵۰ نمونه برای دقت خوب و حداقل هزینه در یک پیش‌بینی طیفی در مقایسه مزرعه‌ای کربن آلی، مقدار رطوبت و ازت کل کافی است. ساکیدیس و همکاران (۲۳) نیز برای برآورد برخی مشخصات خاک از جمله کربن آلی خاک از طیف مرئی و فرسرخ نزدیک استفاده نمودند. تعداد نمونه‌های خاک در این تحقیق بالغ بر ۲۰۰۰۰ نمونه از ۲۳ کشور اتحادیه اروپا بود. میزان همبستگی کربن آلی برآورد شده برابر با ۰/۸۶ و میزان خطای برآورد شده برابر با ۱۰/۹۶ گرم در هر کیلوگرم بود. در حالی که تعداد نمونه‌های تحقیق حاضر برای طیف‌سنجی ۱۷ نمونه بود و تعداد کم، عامل اصلی برآورد نامناسب است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج سنجش‌ازدور در مطالعات کربن آلی خاک نشان داد در بین تمام باندهای اصلی تنها باند ۱۱ لندست، همبستگی مثبت-معنی‌داری (سطح ۵ درصد) در کاربری کشاورزی با کربن آلی خاک دارد. نسبت باند ۷ به باند ۸ نیز در سطح یک درصد، دارای همبستگی معنی‌دار با کربن خاک بود. این ترکیب باندی می‌تواند به‌عنوان یک شاخص در تعیین کربن خاک تعریف گردد. در بین شاخص‌های روشنایی و گیاهی نیز شاخص‌های -

16. Miloš M, Bensab A. 2017. Prediction of soil organic carbon using VIS-NIR spectroscopy: Application to Red Mediterranean soils from Croatia. *Eurasian Journal Soil Science*, 6 (4): 365-373. <https://doi.10.18393/ejss.319208>.
17. Mulders MA. 1987. Remote sensing in soil science. Wageningen: Elsevier.
18. Poormohamadi S, Ekhtesasi MR, Rahimian, MH. 2015. The reorganization and separation of calcite colluvium from non-calcite structure by using remote sensing and lithological characteristics combination (case study: Bhadoran area in Yazad province). *Geology Engineering journal*, 4: 33-45. <https://doi.10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113>.
19. Rahmani N, Shahedi K, Miryaghobzadeh MH. 2011. Evaluation of vegetation indices using in remote sensing (case study: Herysk catchment). 24 th geomatics congress. Soil Survey institute. Tehran.
20. Ray SS, Singh JP, Dasa G, Panigrahy S. 2004. Use of high resolution remote sensing data for generating site specific soil management plan. Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing congress, Istanbul, Turkey.
21. Saati Zarei S, Attaeian B. 2021. Investigation of firing effect in rangelands on soil organic carbon changes using remotely sensed based indices. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(3): 82-100. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.1.1.2>. (In Persian)
22. Stenberg B, Rossel RAV, Mouazen AN, Wetterlind G. 2010. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advance in Agronomy*, 107: 163-215.
23. Tsakiridis NL, Keramaris KD, Theocharis JB, Zalidis GC. 2020. Simultaneous prediction of soil properties from VNIR-SWIR spectra using a localized multi-channel 1-D convolutional neural network. *Geoderma*, 114208. <https://doi.org/10.1016/j>.
24. Walkley AJ, Black IA. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
25. Wang X, Zhangb Y, Atkinsonc MP, Yao H. 2020. Predicting soil organic carbon content in Spain by combining Landsat TM and ALOS PALSAR images. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 92: 102182. <https://doi.org/10.1016/j.jag>.
26. Wetterlind J, Stenberg B, Raphael A, Rossel V. 2013. Soil analysis using visible and near infrared spectroscopy. *Plant Mineral Nutrients*, 953: 95-107. doi:10.1007/978-1-62703-152-3-6.
27. Xu L, Hong Y, Wei Y, Guo L, Shi T, Liu Y, Jiang Q, Fei S, Liu Y, Mouazen AM, Chen Y. 2020. Estimation of organic carbon in anthropogenic soil
4. Banaei MH. 1998. Soil moisture and temperature regimes map of Iran. Soil and Water Research institute of Iran. (In Persian)
5. Bangelesa F, Adam E, Knight J, Dhau I, Ramudzuli Mand Mokotjomela TM. 2020. Predicting soil organic carbon content using hyperspectral remote sensing in a degraded mountain landscape in Lesotho. *Applied and Environmental Soil Science*, 2158573. <https://doi.org/10.1155/2020/2158573>.
6. Ben-Dor E, Banin A. 1995. Near infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society American Journal*, 59: 364-372. <https://doi.org/10.1155/2020/2158573>.
7. Cozzolino D, Moron A. 2003. The potential of near infrared reflectance spectroscopy to analyze soil chemical and physical characteristics. *Journal Agricultural Science*, 140: 65-71. <https://doi.org/10.1017/S0021859602002836>.
8. Esbensen, KH. 2006. *Multivariate Data Analysis*. CAMO Software AS. 589 Pp.
9. Fatemi SB, Rezaei Y. 2013. Introduction to remote sensing. Buali Sina University press, Hamadan.
10. Hassani A, Bahrami HA, Noroozi AA, Ostan Sh. 2014. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in gypseous and calcareous soils. *Watershed Engineering and Management*, 6(2): 140-154. <https://doi.10.22092/ijwmse.2014.101721>.
11. Henderson TL, Baumgardner MF, Franzmeier DP, Stott DE, Coster DC. 1992. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3): 865-872.
12. Hunt GR. 1980. Spectroscopy properties of rock and minerals. In: C.R. Stewart (ed), *Handbook of Physical Properties of Rocks*. CRC Press Inc, Florida, 259 pages.
13. Khayamim F, Wetterlind J, Khademi H, Stenberg B. 2015. Using visible and near infrared spectroscopy to estimate carbonates and gypsum in soils in arid and sub humid regions of Isfahan, Iran. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 23: 155-165. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1157>.
14. Kuang B, Mouazen AM. 2012. Influence of the number of samples on prediction error of visible and near infrared spectroscopy of selected soil properties at the farm scale. *Journal Soil Science*, 63(3): 421-429. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01456.x>.
15. Kunkel VR, Wells T, Hancock GR. 2022. Modelling soil organic carbon using vegetation indices across large catchments in eastern Australia. *Science of The Total Environment*, 817, 152690. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152690>

remote sensing data: prediction ability of data with different spatial and spectral resolutions. *Remote Sensing*, 11, 2947; doi:10.3390/rs11242947.

- by VIS-NIR spectroscopy: Effect of variable selection. *Remote Sensing*, 12, 3394. doi:10.3390/rs12203394.
28. Žižala D, Minarčík R, Zádorová T. 2019. Soil organic carbon mapping using multispectral



Original
paper

Comparison of soil organic carbon estimation using remote sensing and Near Infrared spectrum in forest and agricultural land uses in Gyan area, Hamadan province

Parinaz Abdoli, Soheila sadat Hashemi

Received: 2022-08-05

/ Accepted: 2022-11-16

/ Available online: 2024-06-26

Abstract

In this study, the relationship between soil spectral reflections using Landsat 8 satellite sensors and near-infrared spectrum with 48 soil samples was investigated in agricultural and natural forestry uses in Gyan Nahavand plain, Hamadan province, Iran. Soil samples were randomly collected from a depth of 0-30 cm. The analysis included examining the correlation between main bands, artificial bands, and soil surface organic carbon, as well as vegetation indices, composition of indicators, and soil surface organic carbon. Spectral analysis of soils was conducted using a field spectrometer with a wavelength range of 350-2500 nm. After recording the spectra, a variety of pre-processing methods were evaluated. The results showed that in the remote sensing method, only the 11th band shows a significant correlation at the 5% level with organic carbon in agriculture. Also, the band composition (band7/band8) showed a significant correlation at the 1% level with organic carbon content. Three vegetation indices, NDVI, DVI, and RAI, showed a significant correlation with organic carbon at a 5% significance level.

The correlation between the calculated organic carbon in the laboratory and the imagery in agricultural land use yielded an $R^2 = 0.36$. While the correlation between the measured organic carbon in the laboratory and the image was calculated ($R^2=0.32$) at all points. In the spectroscopy method, the strongest correlations were observed at wavelengths of 1404, 1907, and 2216, respectively. Among the fitted models provided by multiple regression, the stepwise model is recommended for estimating organic carbon as a suitable model. Consistently, if the number of samples is very low, the laboratory method may be appropriate. However, if the number of samples is too high, spectroscopy is more suitable to save time and costs. Due to the high cost of spectroscopy in Iran, remote sensing is proposed as an appropriate method.

Statement of the Problem: Soil organic carbon, especially in semi-arid areas, is a key factor affecting productivity and environmental protection strategies. It also serves as a tool in climate change mitigation and the reduction of greenhouse gases. Organic carbon distribution is influenced by various factors such as soil type, weather, hydrology, land use, geology, and others. Different procedures, such as network and local sampling, have been used to determine the distribution of soil organic matter. The high cost of sampling and sample analysis are some of the problems accompanying these methods, and these are determining factors in mapping. Consequently, a large number of areas with high or low organic matter contents may be

Parinaz Abdoli¹, Soheila sadat Hashemi² (✉)

1. MSc. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran

2. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran

DOI: 10.30495/girs.2022.697117

e-mail: s.hashemi@malayeru.ac.ir

ignored. As a result, there is a need for fast and low-cost soil analysis methods. Investigating the capability of satellite spectral data is the initial step in this data could help solve the aforementioned problems to some extent.

Purpose: Given that Iran is located in an arid and semi-arid region where organic matter content is crucial for many areas, the aim of this study was to investigate soil organic carbon content using quick spectroscopy and remote sensing, and to compare these methods with each other and with laboratory techniques.

Methodology: 48 soil samples were taken from the soil surface (0-30 cm), air-dried, and sieved to a 2 mm size. The Landsat 8 image for September 2019 was utilized in remote sensing studies. The calculated values of each sample unit were generated in the ERDAS imagine 9.1 environment. The values of each band for 48 points were entered into Excel, and the variables were statistically described. In this study, nine vegetation indices including NDVI, DVI, MSI, RAI, SAVI, ARVI, IPVI, MSR and OSAVI and two lighting indices including BI and NDBI, along with the combination of indices and main bands, were used to predict organic carbon content. Pearson correlation test and linear regression were performed in the SPSS 24.1 environment. In order to estimate organic carbon content using spectroscopy, soil samples were scanned using an ASD FieldSpec. Absolute reflection of samples was recorded in the range of 350 to 2500 nm at a resolution of 1 nm, resulting in a total of 2150 data points per spectrum. Four successive reflection readings were taken from each sample. For each soil sample, a spectrum representing its reflection spectrum was recorded in the main data file.

Results and discussion: Among the main bands, only band 11 of Landsat 8 showed a significant correlation with soil organic carbon at the 0.05 level in agricultural

land use. The band combination (Band 7 / Band 8) shows a significant correlation with soil organic carbon content at the 0.01 level. This band combination can be defined as an indicator for determining the amount of organic carbon in the soil. Among the vegetation and lighting indices used, three vegetation indices, namely NDVI, DVI and RAI, yielded positive results in determining the organic carbon content of the soil. The combination of these indices, as well as their combination with the MSI vegetation index, shows a positive correlation with soil organic carbon. Among the fitted models provided by multivariate regression, the stepwise model was deemed appropriate for estimating organic carbon using vegetation indices, a combination of vegetation indices, and bands. The results of the spectroscopy research showed that the highest correlation with wavelengths of 1404, 1907 and 2216 nm were associated with correlation coefficient ($R^2 = 0.16$), ($R^2 = 0.23$) and ($R^2 = 0.17$) respectively. The values of R^2 and RSME derived from the PLSR regression modeling for organic carbon indicated that the R^2 values of R^2 in the validation series were lower than those in the calibration series, while the RSME values in the validation series were greater than those in the calibration series.

Conclusion: According to various conditions, each of the methods employed in this research may be a suitable approach for measuring organic carbon. If the number of samples is very low, the laboratory method may be appropriate. However, if the number of samples is too high, spectroscopy is more suitable to save time and costs. Due to the high cost of spectroscopy in Iran, remote sensing is a more suitable method.

Keywords: Landuse change, Band7, Remote sensing, Near-Infrared