مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۷۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰
ص ۱۸۸-۱۷۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷
تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹

پیش‌بینی مکانی کربن آلی افق سطحی خاک با استفاده از عوامل طیفی و غیرطیفی (مطالعهٔ موردی؛ مرتع ییلاقی آسوران، استان سمنان)

❖ **سعیده ناطقی*؛** استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

❖ **رستم خلیفه‌زاده؛** محقق، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

❖ **مهشید سوری؛** استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

❖ **مرتضی خداقلی؛** دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسهٔ تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

چکیده

کربن آلی خاک یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک است. هدف از انجام این پژوهش مطالعهٔ رفتارهای طیفی و غیرطیفی خاک به منظور برآورد کربن آلی خاک سطحی با استفاده از روش‌های تحلیل عاملی و رگرسیون چندگانه در مراتع نیمه‌استپی آسوران استان سمنان است. نمونه‌برداری از خاک، با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده صورت گرفت. پس از ایجاد نقشهٔ واحدهای همگن منطقه، در هر واحد همگن متناسب با مساحت آن، چندین نقطهٔ نمونه‌برداری به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شد. در مجموع تعداد ۱۴۵ نقطهٔ نمونه‌برداری برداشت شد. در هر یک از نقاط نمونه‌برداری، یک نمونهٔ خاک ترکیبی (مخلوطی از ۹ مشاهده) برداشت شد. کربن آلی خاک با استفاده از روش تیترا سیون والکلی – بلاک اندازه‌گیری شد. اطلاعات ۱۱۴ نمونه برای واسنجی مدل و اطلاعات ۳۱ نمونه برای اعتبار سنجی آن به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد میزان همبستگی متغیرهای طیفی حاصل از سنجندهٔ OLI لندست ۸ با کربن آلی خاک سطحی نسبت به متغیرهای غیرطیفی حاصل از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ بیشتر است. همچنین نتایج تحلیل عاملی به روش تجزیهٔ مؤلفه‌های اصلی با مقادیر ویژهٔ بزرگتر از یک نشان داد کل واریانس تجمعی تبیین شده به‌وسیلهٔ ۱۴ متغیر، برابر ۹۰/۲ در صد بود که این میزان واریانس به‌وسیلهٔ سه عامل توضیح داده شد. معادلهٔ رگرسیون تولید شده با ۳ عامل استخراج شده، از پتانسیل مناسبی برای پیش‌بینی کربن آلی خاک سطحی برخوردار بود ($R2 = ۰/۵۹$). ریشهٔ متوسط مربعات خطا (RMSE) مدل پیشنهادی برابر ۰/۳ محاسبه شد. با توجه به ارتباط مستقیم کربن آلی خاک با عوامل حاصلخیزی و مقاومت خاک در مقابل فرسایش، مدل توزیع مکانی کربن آلی خاک می‌تواند به‌عنوان یک زیرمدل مهم به منظور طراحی سایر مدل‌های پیچیده همچون تولید (بایومس) اکوسیستم‌های خشکی و مدل‌های فرسایش خاک مورد استفاده واقع شود.

کلید واژگان: کربن آلی، خاک سطحی، لندست ۸، تحلیل عاملی، رگرسیون خطی چندگانه.

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۹۸۹۱۲۶۹۵۳۷۹۶+
Email: nateghi@rifr-ac.ir

۱. مقدمه

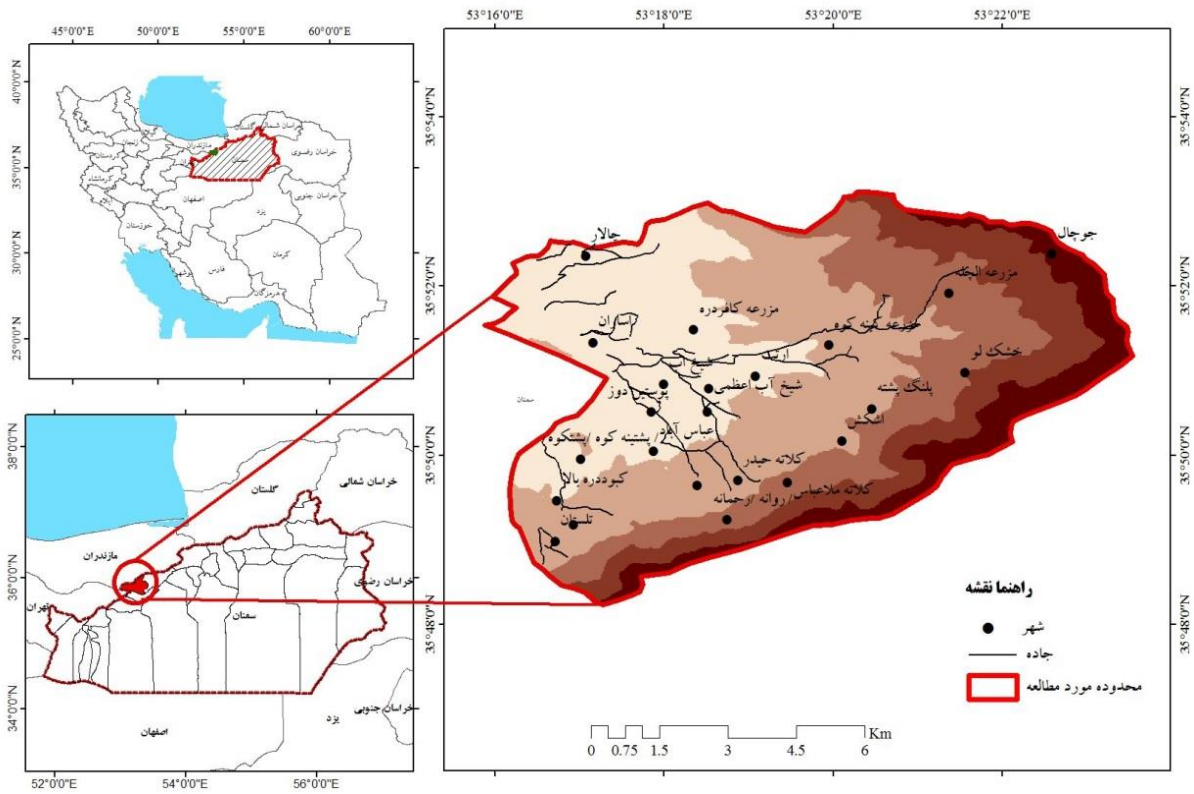
کربن آلی یکی از مهمترین شاخص‌های تعیین کنندهٔ کیفیت خاک محسوب می‌شود. در مقیاس جهانی، کل کربن ذخیره شده در خاک ۱/۵ تریلیون تن است که این مقدار تقریباً سه برابر بیشتر از کربن موجود در گیاهان و دو برابر بیشتر از کربن موجود در اتمسفر است [۶]. با توجه به اینکه مواد آلی در بسیاری از خصوصیات خاک از جمله حاصلخیزی خاک، بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و هوا در خاک و بهبود فعالیت‌های میکروبی خاک نقش دارد، امروزه به عنوان شاخص پایداری خاک شناخته شده است [۲۳]. مقدار و توزیع کربن آلی در خاک بسیار متغیر است بنابراین تعیین دقیق آن می‌تواند کمک زیادی به مدیریت منابع طبیعی نماید [۱۹]، از این رو بسیاری از محققین با به‌کارگیری فنون سنجش از دور و مدل‌سازی به پیش‌بینی کربن آلی خاک اقدام نموده‌اند. در تحقیقی [۱]، با استفاده از فناوری سنجش از دور و به‌کارگیری تصاویر ماهوارهٔ Quick Bird، به بررسی تأثیر جنگل‌کاری شهری در مناطق خشک واقع در شمال‌غرب شهر اصفهان بر میزان کربن ترسیب‌شده در دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری خاک پرداختند. بر اساس نتایج، میزان ترسیب کربن خاک در لایه‌های سطحی خاک بسیار زیادتر بوده و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر [۲۰]، با استفاده از تصاویر ماهوارهٔ IRS-AWIFS و روش رگرسیونی چند متغیره، نقشهٔ توزیع مکانی کربن آلی خاک در منطقهٔ دهاقان را ارائه نمودند و به این نتیجه رسیدند که باند قرمز بیشترین رابطه را با میزان کربن آلی خاک سطحی منطقهٔ مورد مطالعه داشته است. همچنین [۱۹]، اظهار داشتند؛ محتوای مواد آلی و کربن آلی خاک شدیداً به عواملی همچون نوع کاربری اراضی، پوشش‌گیاهی، اقلیم و پارامترهای شکل زمین وابسته است که می‌توان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و DEM آن را به صورت مدل ارائه کرد. در مطالعه‌ای دیگر [۱۵]، اظهار داشتند؛ روش تسلدکپ برای برجسته‌سازی انواع ویژگی‌های سطح زمین، به طور گسترده مورد استفاده واقع می‌شود. تسلدکپ از سه شاخص روشنایی، سبزینگی و رطوبت تشکیل شده که با توجه به خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین، اطلاعات طیفی موجود در تصاویر با باندهای متعدد را با کاهش باندها فشرده می‌کند. [۱۸]، با تلفیق روش‌های رگرسیون و زمین‌آمار به شیوهٔ کریجینگ در بخشی از حوزهٔ رودخانه نارمادا در نواحی مرکزی هند، به ارائهٔ مدلی به منظور پیش‌بینی مقدار مادهٔ آلی خاک پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از هشت متغیر پیش‌بین شامل شاخص‌های سه‌گانهٔ تبدیل تسلدکپ (درخشندگی، سبزینگی و رطوبت)، شاخص پوشش‌گیاهی NDVI، شاخص وضعیت حرارتی پوشش‌گیاهی، مدل طبقات ارتفاعی، شیب و شاخص توپوگرافی استفاده کردند و به نتایج رضایت‌بخشی دست یافتند. در تحقیقی دیگر [۲۱]، به بررسی ارتباط ذخیرهٔ کربن آلی خاک با برخی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش تحلیل‌مسیر و رگرسیون گام به گام در مراتع استان آذربایجان شرقی پرداختند. نتایج نشان داد میزان تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک بر کربن آلی بسیار بیشتر از ویژگی‌های شیمیایی آن است. همچنین نتایج رگرسیون گام به گام کل متغیرهای خاک به منظور به دست آوردن مدل نهایی تخمین کربن آلی خاک نشان داد، فاکتورهای رس، سیلت، توان حفظ رطوبت، اسیدیته و هدایت الکتریکی در حدود ۵۷ درصد تغییرات کربن آلی خاک را تبیین می‌کنند. در مطالعه‌ای دیگر [۹]، به پیش بینی کربن آلی خاک با استفاده از مدل LiDAR که بر پایهٔ مدل رقومی ارتفاع است پرداخت. نتایج نشان داد که سه ویژگی شیب نسبی، ارتفاع کانال و ارتفاع استاندارد در پیش‌بینی کربن آلی خاک نقش مهمی دارند. همچنین[۳]، در مطالعهٔ جنگل‌های کشمیر شمالی، با استفاده از چندین متغیر مستقل پیش‌بینی از جمله ارتفاع، شیب، شاخص پوشش‌گیاهی NDVI و غیره و با به کارگیری روش رگرسیون کریجینگ (RK) به پیش‌بینی مکانی کربن آلی و ازت موجود در خاک سطحی اقدام کردند. با توجه به

نقش‌های متعدد کربن آلی در اکوسیستم‌های مرتعی (حاصلخیزی خاک، افزایش میزان تولید در واحد سطح مرتع، بهبود ساختمان خاک، افزایش نفوذپذیری آب در خاک، بهبود تهویهٔ آب و هوای خاک، کنترل فرسایش خاک، تعدیل و کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای و ...)، امروزه این عامل به‌عنوان شاخص سلامت خاک شناخته شده [۱۷] و از این‌رو دستیابی به روشی علمی که بتوان بر پایهٔ آن، ضمن برآورد مناسب (با توجه به مقیاس کار) میزان ذخائر کربن آلی موجود در افق سطحی خاک، امکان تولید داده‌های پیوسته در قالب نقشهٔ توزیع مکانی و پایش سالانه یا چند سالانه آن‌را مهیا نماید و علاوه بر آن قابلیت اجرا در سطوح وسیع اکوسیستم‌های مرتعی را داشته باشد، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. پژوهش حاضر در راستای پاسخگویی به این نیاز مهم در عرصه‌های مرتعی مناطق نیمه‌استپی آسوران استان سمنان به انجام رسیده است.

۲. روش شناسی

۱.۲. معرفی منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه، موسوم به آسوران، بخشی از مراتع ییلاقی استان سمنان است که با مساحت ۵۶۴۲ هکتار، در ۱۲ کیلومتری شهرستان مهدیشهر و در محدودهٔ طول‌های شرقی ۵۳ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۴ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۲ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه از سطح تراز دریا به ترتیب ۱۹۱۰ و ۳۱۱۰ متر می‌باشد. متوسط بارندگی و دمای سالیانه منطقهٔ مورد مطالعه به ترتیب معادل ۲۱۲ میلی‌متر و ۱۱/۸ درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. اقلیم منطقه با روش دومارتن، نیمه‌خشک و با روش آمبرژه نیمه‌خشک سرد ارزیابی شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه در استان سمنان و کشور

۲.۲. روش تحقیق

در این پژوهش از اطلاعات باندهای ۲ تا ۷ سنجندهٔ OLI ماهوارهٔ لندست ۸ (جدول ۱) با شمارهٔ گذر ۱۶۳ و شمارهٔ ردیف ۳۵ مربوط به ۲۵ آگوست ۲۰۱۹ (۳ مرداد ۱۳۹۸) و نقشه های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه به شماره‌های SE 6661، NW 6661، SW 6661 استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات باندهای سنجندهٔ OLI لندست ۸ مورد استفاده در تحقیق

ردیف	شمارهٔ باند	نام باند	قدرت تفکیک مکانی (متر)	محدودهٔ طیفی (میکرو متر)
۱	باند ۲	آبی (مرئی)	۳۰	۰/۴۵۲-۰/۵۱۲
۲	باند ۳	سبز (مرئی)	۳۰	۰/۵۳۳-۰/۵۹۰
۳	باند ۴	قرمز (مرئی)	۳۰	۰/۶۳۶-۰/۶۷۳
۴	باند ۵	مادون قرمز (NIR)	۳۰	۰/۸۵۱-۰/۸۷۹
۵	باند ۶	مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR1)	۳۰	۱/۵۶۶-۱/۶۵۱
۶	باند ۷	مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR2)	۳۰	۲/۱۰۷-۲/۲۹۴

نمونه‌برداری با استفاده از روش تصادفی طبقه‌بندی شده (Stratified random sampling pattern) انجام شد [۱۶] بدین ترتیب که ابتدا نقشه‌های طبقات ارتفاعی، شیب و جهت‌های دامنه‌ای با یکدیگر تلفیق گردید و نقشهٔ اولیهٔ واحدهای همگن نمونه‌برداری تهیه شد. پس از حذف اراضی با کاربری غیرمرتعی، اراضی صخره‌ای، پر شیب و غیرقابل دسترس، در نهایت نقشهٔ واحدهای کاری همگن متشکل از ۱۷ واحد همگن ایجاد شد. در هر یک از واحدهای همگن (متناسب با مساحت)، چندین نقطهٔ نمونه‌برداری به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شد. در مجموع تعداد ۱۴۵ نقطهٔ نمونه‌برداری، برداشت شد. در هر یک از ۱۴۵ نقطهٔ نمونه‌برداری، یک نمونهٔ خاک ترکیبی متشکل از ۹ مشاهده (نقطهٔ اصلی به انضمام ۸ نقطه به شعاع ۲۰ متر از مرکز نقطهٔ اصلی) از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد. نمونه‌های برداشت شده مربوط به هر نقطهٔ نمونه‌بردای با هم مخلوط شدند و یک نمونهٔ دو کیلوگرمی از آن تهیه شد که پس از نصب برچسب مربوطه و ثبت مختصات نقطهٔ نمونه‌برداری، به آزمایشگاه خاکشناسی منتقل شد. پس از هواخشک نمودن نمونه‌ها و عبور آنها از الک ۲ میلی‌متری، محتوای کربن آلی نمونه‌ها با استفاده از روش تیتراسیون والکلی – بلاک تعیین گردید [۲۴].

۱.۲.۲. متغیرهای طیفی

پیش از محاسبهٔ متغیرهای طیفی، با استفاده از نرم افزار ENVI 5.1، عملیات پیش‌پردازش انجام شد و بازتابش طیفی بالای اتمسفر هر یک از باندهای دو تا هفت سنجندهٔ OLI لندست ۸ حاصل شد. با استفاده از تصاویر اصلاح شده، هشت شاخص طیفی شامل آلبیدوی سطح [۱۴]، شاخص رس [۱۰]، شاخص کربنات [۵]، شاخص اندازهٔ ذرات [۲۵، ۲۳ و ۱۹]، شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار (NDVI)، و شاخص‌های روشنایی، سبزینگی و رطوبت تبدیل تسلدکپ [۲]، محاسبه شد.

۲.۲.۲. متغیرهای غیرطیفی

در این پژوهش با توجه به عدم دسترسی به داده‌های مدل رقومی ارتفاعی سازمان نقشه‌برداری کشور، DEM منطقه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شد. بدین منظور، ابتدا با استفاده از جعبهٔ ابزار Arc Hydro در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3،

عملیات پیش‌پردازش زمینی (Terrain Preprocessing) انجام و تا حد ممکن، ایرادات منتسب به DEM برطرف شد و با استفاده از آن و به‌کارگیری نرم‌افزار ArcGIS 10.3، شش متغیر غیرطیفی شامل ارتفاع نسبی Relative Relief(RR)، شیب، آزیموت شیب (جهت دامنه)، شکل عمومی انحنای دامنه (landscape General Curvature) (مقعر، محدب و یا مسطح)، انحنای افقی (Planform Curvature)، دامنه (مبین شدت تغییرات جهت دامنه بوده و بیانگر آن است که هرزآب در عبور از سطح مورد نظر به صورت همگرا یا واگرا عمل می‌کند) و انحنای عمودی (Profile Curvature) دامنه (مبین شدت تغییرات شیب بوده و بیانگر آن است که سرعت جریان هرزآب در عبور از سطح مورد نظر افزوده می‌شود یا کاهش می‌یابد) تولید شد.

برای تبدیل پارامتر آزیموت شیب، از رابطهٔ (۲) استفاده شد [۷].

$$Cosin(Aspect - 225°)$$ رابطهٔ (۲)

۳.۲.۲. تجزیهٔ عاملی به روش تجزیهٔ مؤلفه‌های اصلی

تحلیل عاملی تکنیکی آماری برای تجزیهٔ اطلاعات موجود در مجموعهٔ داده‌ها است که بین مجموعه‌ای فراوان از متغیرهایی که به ظاهر بی‌ارتباط هستند، رابطهٔ خاصی را تحت یک مدل فرضی برقرار می‌کند [۸]. در تحلیل عاملی به روش تجزیهٔ مؤلفه‌های اصلی، برای ایجاد عامل‌ها از تمام متغیرها استفاده شده و اطلاعات متغیرهای اولیه با کمترین تلفات به وسیلهٔ عوامل ارائه می‌شوند و محتوای اطلاعاتی پارامترهای اصلی از دست نمی‌رود. در تجزیهٔ عاملی کنترل تناسب داده‌ها (تعداد نمونه‌ها) از اهمیت زیادی برخوردار بوده و بنا به نظر بسیاری از محققان، ارتباط مستقیمی بین تعداد نمونه‌ها و تعداد متغیرهای مستقل وجود دارد. از این رو در پژوهش حاضر، به منظور تقلیل متغیرهای مستقل و کنترل تناسب داده‌ها، پیش از اجرای تجزیهٔ عاملی، با ایجاد ماتریس همبستگی پیرسون بین ۱۹ متغیرمستقل اولیه و کربن آلی خاک، آن دسته از متغیرهایی که همبستگی معنی‌داری با کربن آلی خاک نداشتند ($p>0.05$)، شناسایی و حذف شدند و تجزیهٔ عاملی بر اساس متغیرهای واجد همبستگی معنی‌دار ($P<0.05$) با کربن آلی خاک انجام شد. از آنجا که شرط کفایت داده‌ها در تحلیل عاملی معنی‌دار شدن آزمون کرویت بارتلت توأم با حصول KMO حداقل ۰/۶ است [۱۱] و در مواردی که آزمون کرویت بارتلت معنی‌دار بوده ولی مقدار KMO کمتر از ۰/۶ است، بررسی اشتراکات متغیرها و حذف متغیرهای با میزان اشتراکات کمتر از ۰/۴ و اجرای مجدد تجزیهٔ عاملی الزامی است [۱۱]، لذا در این پژوهش تجزیهٔ عاملی در دو مرحله انجام شد به طوری که ضمن معنی‌دار شدن آزمون کرویت بارتلت، KMO بیش از ۰/۶ حاصل شود.

۴.۲.۲. اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

برای اعتبار سنجی مدل از دو معیار ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده کربن آلی و ریشهٔ دوم میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE) (رابطهٔ ۳) استفاده شد.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}$$ رابطهٔ (۳)

که در رابطهٔ فوق، O_i میزان کربن آلی مشاهده شده (اندازه‌گیری شده) و P_i مقدار کربن آلی پیش‌بینی شده و n تعداد مشاهدات است.

۳. نتایج

نتایج آزمون همبستگی پیرسون بر روی متغیرهای مستقل در جدول (۲) نشان داده شده است. با انجام آزمون تحلیل عاملی بر روی ۲۰ متغیر اولیه و بررسی مقادیر اندازهٔ دقت نمونه‌گیری (MSA) و حذف متغیرهای

با MSA کوچک‌تر از ۰/۵ و تکرار آزمون مذکور تا حصول نتیجهٔ مناسب، در نهایت تعداد ۱۴ متغیر شامل؛ باندهای دو تا هفت سنجنده OLI ماهوارهٔ لندست ۸، آلبیدوی سطح، شاخص رس، شاخص‌های ۳ گانه تبدیل تسلدکپ، NDVI، ارتفاع و شیب، به‌عنوان متغیرهای مناسب و واجد صلاحیت برای ورود به مدل تحلیل عاملی انتخاب گردید.

جدول ۲. نتایج آزمون همبستگی متغیرهای مستقل با کربن آلی خاک سطحی

ردیف	نوع متغیر	نام متغیر	ضریب همبستگی پیرسون
۱	طیفی	باند ۲	-۰/۵۸۱**
۲	طیفی	باند ۳	-۰/۵۷۳**
۳	طیفی	باند ۴	-۰/۵۷۷**
۴	طیفی	باند ۵	-۰/۴۷۹**
۵	طیفی	باند ۶	-۰/۵۲۲**
۶	طیفی	باند ۷	-۰/۵۵۹**
۷	طیفی	آلبیدو(Albedo)	-۰/۵۴۶**
۸	طیفی	شاخص رس (CI)	۰/۳۴۰**
۹	طیفی	شاخص کربنات (CaI)	۰/۰۲۲ns
۱۰	طیفی	شاخص اندازه ذرات (GSI)	۰/۰۲۹ns
۱۱	طیفی	شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار (NDVI)	۰/۴۱۹**
۱۲	طیفی	شاخص روشنایی تبدیل تسلدکپ (BI)	-۰/۵۳۲**
۱۳	طیفی	شاخص سبزینگی تبدیل تسلدکپ (GI)	۰/۳۴۷**
۱۴	طیفی	شاخص رطوبت تبدیل تسلدکپ (WI)	۰/۴۶۱**
۱۵	غیرطیفی	ارتفاع نسبی (Relative Relief)	۰/۳۵۱**
۱۶	غیرطیفی	شیب	۰/۲۴۷**
۱۷	غیرطیفی	جهت دامنه	۰/۰۴۲ns
۱۸	غیرطیفی	شکل عمومی انحنای دامنه (General Curvature)	۰/۰۲۰ns
۱۹	غیرطیفی	انحنای عمودی دامنه (Profile Curvature)	۰/۰۴۸ns
۲۰	غیرطیفی	انحنای افقی دامنه (Planform Curvature)	۰/۰۱۵ns

* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد
** معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد
ns عدم اختلاف معنی‌دار

میزان KMO حاصل از انجام تحلیل ممیزی بر اساس ۱۴ متغیر اخیر، معادل ۰/۷۶ به‌دست آمد که بزرگتر از ۰/۶ بوده و این امر مؤید کفایت داده‌ها و وجود تناسب قابل قبول بین متغیرهای ورودی و تعداد نمونه‌ها برای انجام تحلیل عاملی است. همچنین نتیجهٔ آزمون کرویت بارتلت معنی‌دار بوده ($p > ۰/۰۱$) و از این رو می‌توان گفت؛ فرض صفر آزمون مذکور مبنی بر عدم وجود اشتراک و همبستگی میان متغیرهای ورودی رد می‌شود. به عبارت دیگر بین متغیرهای ورودی وجه اشتراک (همبستگی) وجود داشته و امکان انجام تحلیل عاملی میسر بوده است. نتایج تحلیل عاملی به روش تجزیهٔ مؤلفه‌های اصلی (PCA) با مقادیر ویژهٔ (eigenvalue) بزرگتر از یک نشان داد کل واریانس تجمعی تبیین‌شده، پس از چرخش عامل‌ها به روش واریمکس (Varimax) برابر ۹۰/۲ درصد است که این میزان واریانس به‌وسیلهٔ ۳ عامل توضیح داده می‌شود (جدول ۳).

جدول ۳. کل واریانس تبیین شده توسط تحلیل عاملی به روش تجزیهٔ مؤلفه‌های اصلی

عامل	مقادیر ویژه			استخراج مجموع مجذورات بارهای عاملی			مجموع مجذورات بارهای عاملی پس از چرخش واریمکس
	کل	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی	کل	درصد واریانس	درصد واریانس تجمعی	کل
۱	۱۰/۰۷۴	۶۷/۱۶۱	۶۷/۱۶۱	۱۰/۰۷۴	۶۷/۱۶۱	۶۷/۱۶۱	۹/۷۶۳
۲	۲/۳۳۴	۱۵/۵۸۱	۸۲/۷۴۲	۲/۳۳۴	۱۵/۵۸۱	۸۲/۷۴۲	۵/۳۶۲
۳	۱/۱۲۲	۷/۴۸	۹۰/۲۲	۱/۱۲۲	۷/۴۸	۹۰/۲۲	۲/۶۴۲
۴	۰/۷۲۳	۴/۸۲۳	۹۵/۰۴۵				
۵	۰/۳۵۲	۲/۳۴۸	۹۷/۳۹۳				
۶	۰/۲۱۵	۱/۴۳۵	۹۸/۸۲۸				
۷	۰/۱۰۴	۰/۶۹۶	۹۹/۵۲۴				
۸	۰/۰۲۶	۰/۱۷۰	۹۹/۶۹۴				
۹	۰/۰۱۹	۰/۱۳	۹۹/۸۲۴				
۱۰	۰/۰۱۱	۰/۰۷۲	۹۹/۸۹۶				
۱۱	۰/۰۰۸	۰/۰۵۲	۹۹/۹۴۸				
۱۲	۰/۰۰۴	۰/۰۲۴	۹۹/۹۷۲				
۱۳	۰/۰۰۳	۰/۰۱۹	۹۹/۹۹۱				
۱۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۹	۱۰۰				

سه عامل استخراج شده حاصل از تحلیل عاملی، به‌عنوان متغیرهای مستقل مکنون در تحلیل رگرسیونی چندگانه به روش Enter مورد استفاده واقع شد (رابطهٔ ۳). آنالیز واریانس معادلهٔ رگرسیون مذکور که با استفاده از اطلاعات حاصل از ۱۱۴ نمونه خاک (۸۰ درصد کل تعداد نمونه‌ها) به‌دست آمده است در جدول (۴) ارائه شده است.

رابطهٔ (۳)

$$PC3 + ۰/۰۹\ PC2 + ۰/۱۵\ PC1 = ۱/۰۷۱ - ۰/۳۱۵\ SOC$$

$$R^2 = ۰/۵۹$$

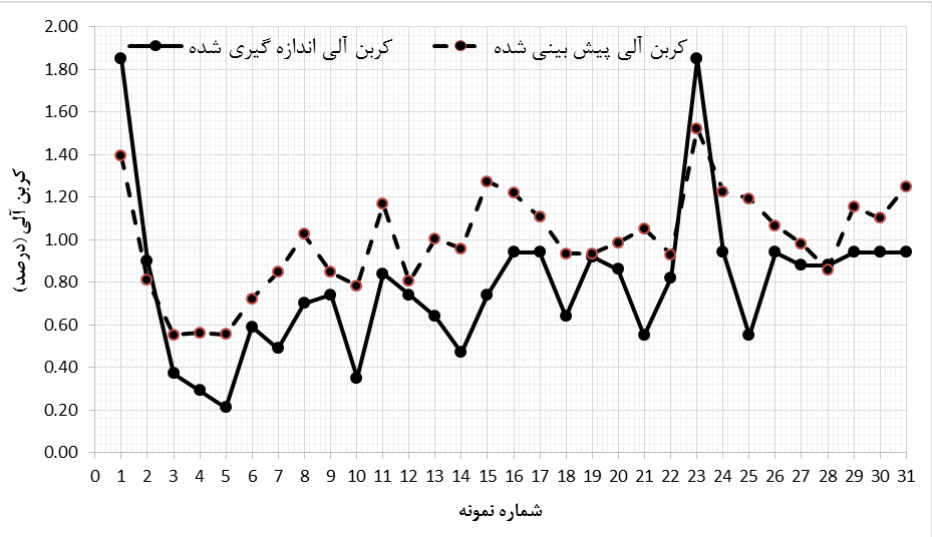
جدول ۴. آنالیز واریانس معادلهٔ رگرسیون

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات خطا	F
رگرسیون	۳	۱۴/۷۱۹	۴/۹	۲۱/۸۴**
باقیمانده	۱۱۰	۲۴/۷۱	۰/۲۲۵	
کل	۱۱۳	۳۹/۴۳		

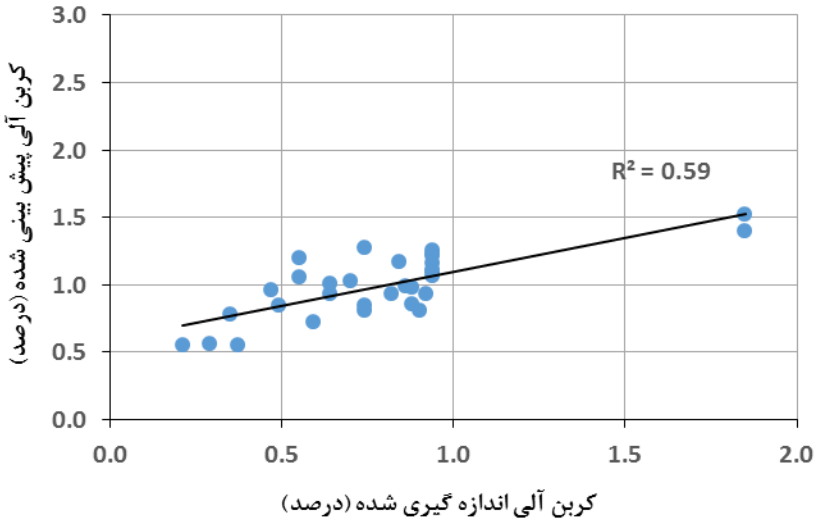
** : معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده (رابطهٔ ۳) از اطلاعات حاصل از ۳۱ نمونه خاک (۲۰ درصد کل تعداد نمونه‌ها) استفاده شد. مطابق محاسبات انجام شده ضریب همبستگی مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی کربن آلی برابر ۰/۷۶ بوده (R^2=۰/۵۹) و ریشهٔ متوسط مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۳ می‌باشد.

شکل (۲) مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شدهٔ کربن آلی خاک سطحی را در ۳۱ نمونه مورد آزمون نشان می‌دهد. نمودار یک به یک مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شدهٔ متغیر موصوف نیز در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۲. نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شدهٔ کربن آلی خاک سطحی را در ۳۱ نمونه مورد آزمون



شکل ۳. نمودار خط یک به یک مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شدهٔ کربن آلی خاک سطحی

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که متوسط کربن آلی موجود در افق سطحی خاک‌های مراتع منطقهٔ مورد مطالعه برابر ۱/۰۲ درصد است. کمترین ذخائر کربن آلی به میزان ۰/۷۳ درصد در خاک سطحی تیپ گیاهی *Rosa persica - Stachys inflate* مشاهده شد. در این تیپ گیاهی که گونهٔ غالب آن را ورک (*Rosa persica*) تشکیل می‌دهد و در ارتفاعات پایین دست (۲۰۰۰ تا ۲۲۰۰ متر) با شیب کم (کمتر از ۲۰

درصد) و در جوار جاده واقع شده است، به دلیل چرای بی‌رویه، پوشش‌گیاهی و خاک به شدت تخریب شده است. شدت تخریب‌ها در برخی نواحی این تیپ به حدی است که پوشش‌گیاهی کاملاً از بین رفته و خاک‌های کاملاً لخت با ساختمانی تخریب شده (خاک‌های پودری سفید رنگ) را بر جای نهاده است. بیشترین ذخائر کربن آلی به میزان ۱/۲۵ درصد در خاک سطحی تیپ‌های گیاهی *Artemisia Aucheri - Astragalus verus - Bromus tomentellus*، *Onobrychis cornuta - Astragalus verus - Acantholimon* sp. و *Artemisia Aucheri - Astragalus verus* مشاهده شد که از نظر فرم رویشی عمدتاً بوته‌ای و از نظر دیرزیستی پایا و یا چندساله هستند. تیپ‌های گیاهی مذکور در ارتفاعات بالادست (۲۷۰۰ تا ۲۹۰۰ متر) و در مناطق با شیب ۲۰ تا ۴۰ درصد واقع شده‌اند. با توجه به موارد فوق می‌توان گفت عدم یکنواختی در شرایط توپوگرافی (ارتفاع و شیب) مرتع مورد مطالعه موجب بروز تغییرات معنی‌دار در محتوای کربن آلی خاک در افق سطحی را به دنبال داشته است. موارد فوق با نتایج تحقیقات [۱۸، ۱۹] مطابقت دارد. بررسی نتایج آزمون همبستگی متغیر های طیفی و غیرطیفی با کربن آلی خاک نشان می‌دهد که ارتباط متغیر های طیفی با کربن آلی خاک در مقایسه با متغیرهای غیرطیفی بیشتر است. به طوری‌که از میان ۱۴ متغیر طیفی مورد مطالعه، تنها دو متغیر شاخص کربنات و شاخص اندازهٔ ذرات همبستگی معنی‌داری را با کربن آلی خاک نشان ندادند. در این رابطه، نتایج آزمایشات خاکشناسی انجام شده مؤید وجود اختلاف زیاد در میزان آهک (T.N.V) موجود در افق سطحی خاک منطقهٔ مورد مطالعه است و این میزان از ۰/۶ درصد در تیپ گیاهی *Artemisia Aucheri – Astragalus verus* تا ۳۹/۶ درصد در تیپ گیاهی *Bromus tomentelus – Stipa arabica – Psathyrostachys fragilis* متغیر است، بنابراین می‌توان گفت میزان حساسیت شاخص کربنات (CaI) حاصل از داده‌های سنجندهٔ OLI لندست ۸ نسبت به تغییرات آهک موجود در منطقه کم بوده و شاخص مناسبی برای نشان دادن تغییرات آهک موجود در منطقه نیست. در خصوص شاخص اندازهٔ ذرات، بررسی نتایج آزمایشات خاکشناسی در صدشن (sand)، لای (silt) و رس (clay) نمونه خاک‌های برداشت شده و انتقال آن‌ها به مثلث بافت خاک، نشان داد که بیش از ۶۵ درصد خاک‌های منطقهٔ مورد مطالعه دارای بافت clay loam، ۱۵ درصد دارای بافت Sandy clay loam، ۱۰ درصد دارای بافت Sandy loam و مابقی دارای بافت Silty clay loam هستند. به عبارت دیگر می‌توان گفت عمدهٔ خاک‌های منطقه از نظر اندازهٔ ذرات در طبقهٔ نسبتاً متوسط تا متوسط قرار می‌گیرند و به همین دلیل مقادیر مربوط به شاخص اندازهٔ ذرات (GSI) به هم نزدیک بوده و اختلاف معنی‌داری را نشان ندادند. این در حالی است که [۱۳] در منطقهٔ لزور فیروزکوه به توانایی مناسب شاخص اندازهٔ ذرات (GSI) در تفکیک دامنه‌های دارای واریزه‌های سنگی درشت و سفیدرنگ با متوسط قطر ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر که به وسیله گونهٔ سفیدچمن (*Leucopoa sclerophylla*) با تراکم کم پوشیده شده بودند از سایر نواحی مرتعی که دارای خاک‌های با بافت سنگین تا نسبتاً سنگین بودند اشاره داشتند. نتایج آزمون همبستگی متغیرهای غیرطیفی با کربن آلی خاک، گویای آن است که از میان ۶ متغیر غیرطیفی مورد مطالعه، متغیرهای ارتفاع نسبی (r= ۰/۳۵۱) و شیب (r= ۰/۲۴۷) با کربن آلی همبستگی مثبت و معنی‌داری دارند و با افزایش ارتفاع بر میزان ذخائر کربن آلی خاک افزوده می‌شود. وجود اختلاف ارتفاع بین پست‌ترین و مرتفع‌ترین نقطهٔ موجود در منطقهٔ مورد مطالعه، سبب بروز تغییرات مشهود در فرم رویشی گیاهان منطقه شده است؛ به طوری که هر چه از نواحی پست به طرف ارتفاعات پیش می‌رویم، بر اهمیت نسبی گونه‌های بوته‌ای همچون درمنهٔ کوهی (*Artemisia Aucheri*)، اسپرس کوهی (*Onobrychis cornuta*) و گون‌هایی نظیر *Astragalus verus* افزوده می‌شود که این قبیل گونه‌ها

در مقایسه با فرم‌های رویشی گراس و پهن‌برگان علفی از توان ترسیب کربن بالاتری برخوردارند [۱۲، ۱۳و۲۲]، و همین امر همبستگی مثبت و معنی‌دار ارتفاع نسبی با کربن آلی خاک را به همراه داشته است.

با توجه به وسعت زیاد مراتع نیمه‌استپی کشور، استفاده از روش‌های سنتی در برآورد کربن آلی خاک به دلیل نیاز به صرف وقت و هزینهٔ زیاد، صعب‌العبور بودن و عدم دسترسی به تمامی نواحی مورد مطالعه، غیریکنواخت بودن ویژگی‌های توپوگرافیک و نیز عدم پویایی این قبیل اطلاعات، امکان‌پذیر نبوده و در چنین شرایطی می‌توان با استفاده از اطلاعات طیفی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای، با صرف وقت و هزینه‌ای کم، اطلاعاتی داینامیک و پویا از تغییرات کربن آلی در افق سطحی خاک مراتع نیمه‌استپی کشور به‌دست آورد.

References

[1] Abbas Nejad, B. and Khajedin, S. J. (2013). Effect of urban reforestation on carbon sequestration in arid soils using remote sensing technology. Journal of Applied RS & GIS Techniques in Natural Resource Science, 3(4): 57-71. (In Persian)

[2] Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T. and Tong, Q. (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at satellite reflectance. Remote Sensing Letters. 5 (5): 423-431.

[3] Bangroo, S.A., Najara, G.R., Achin, E. and Truongc, P.N. (2020). Application of predictor variables in spatial quantification of soil organic carbon and total nitrogen using regression kriging in the North Kashmir forest Himalayas, Journal of Catena, 193: 104632.

[4] Beven, K. and Kirkby, N. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrolog. Sci. Bull. 24 n (1), 43–69.

[5] Boettinger, J. L., Ramsey, R. D., Bodily, J. M., Cole, N. J., Kienast_Brown, S., Nield, S. J., Saundes, A.M. and Stum, A. K. (2008). Landsat spectral data for digital soil mapping. 193–203. In: Hartemink, A. E., McBratney, A. B., Mendonca Santos, M. L. (Eds.), Digital Soil Mapping With Limited Data. Springer science, Australia.

[6] Cotrufo, M. F., Conant, R. T. and Paustian, K. (2011). Soil organic matter dynamics: land use, management and global change.Journal of Plant soil, 338:1-3.

[7] Franklin, J., McCullough, P. and Gray, C. (2000). Terrain variables used for predictive mapping of vegetation communities in Southern California. In Wilson J, Gallant J (Eds,) Terrain analysis: principles and applications. Wiley, New York, Chichester, Torono and Brisbane, 331-353.

[8] Goldasteh, A., Agha Mir Karimi, S., Khoda Rahmi, M., Torabi, M. and Asghari, R. (2000). User guide of SPSS 6.0 for windows. Hami press, 533 p.

[9] Guo, Z., Adhikari, K.,Chellasamy, M., Greve, M.B., Owens, P.R. and Greve, M.G. (2019). Selection of terrain attributes and its scale dependency on soil organic carbon prediction. Journal of Geoderma, 340: 303-312.

[10] Hengle, T., 2009. A Practical Guide to Geostatistical Mapping. Amesterdam University Press, 293 p.

[11] Howard, M. C. (2016). A Review of Exploratory Factor Analysis Decisions and Overview of Current Practices: What We Are Doing and How Can We Improve?, International Journal of Human-Computer Interaction, 32 (1): 51-62.

[12] Jafarian, Z., Tayefeh Seyyed Alikhani, L. and Tamartash, R. (2012). Investigation of Carbon Storage Potential of *Artemisia Aucheri*, *Agropyron elongatum*, *Stipa barbata* in Semi-arid Rangelands of Iran (Case study: Peshert Region, Kiasar). Journal of Range and Watershed Management, Iranian Journal of Natural Resources, 65 (2): 191-202.

[13] Khalifehzadeh, R., Tamartash, R., Tatian, M. R. and Sarajian Maralan, M. R. (2018). An estimation of topsoil organic carbon by combining factor analysis and multiple regression in semi-steppe rangelands of Lazour, Firouzkooh. Iranian Journal of Range and Desert Research, 25 (3):699-712.

[14] Liang, S., Shuey, C. J., Russ, A. L., Fang, H., Chen, M., Walthall, C. L. and Hunt, R. (2003). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. Remote Sensisng of Environment, 84 (1): 25-41.

[15] Liu, Q., Liu, G., Huang, C., Xie, C. (2015). Comparison of tasselled cap transformations based on the selective bands of Landsat 8 OLI TOA reflectance images. International Journal of Remote Sensing, 36(2): 417-441.

[16] McCoy, R.M. (2005). Field Methods in Remote Sensing, The Guildford press, New York, 159 p.

[17] Mirza Shahi, K. and Bazargan, K. (2015). Management of soil organic matter. Soil and Water Research Institute (SWRI) press, Technical Journal No. 535, 20 p. (in persian).

[18] Mondal, A., Khare, D., Kundu, S., Mondal, S., Mukherjee, S., Mukhopadhyay, A. (2017). Spatial soil organic carbon (SOC) prediction by regression kriging using remote sensing data. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 20(1): 61-70.

[19] Piccini, C., Marchetti, A. and Francaviglia, R. (2014). Estimation of soil organic matter by geostatistical methods: use of auxiliary information in agriculture and environment assessment. Ecol. Ind. 36: 301-314.

[20] Purghaumi, H., Khagehedin, S.J., Jaafari, R. and Purghaumi, A. (2013). Mapping Soil Organic Carbon Using IRS-AWIFS Satellite Imagery (Case Study: Dehaghan Rangeland, Isfahan, IRAN). Journal of Rangeland Science, 3(3): 200-212.

[21] Sheidaye Karkaj, A., Sepehri, A., Barani, H. and Motamedi, J. (2017). Soil organic carbon reserve relationship with some soil properties in East Azerbaijan. Journal of Rangeland, 11(2): 125-138.

[22] Tamartash, R., Tatian, M. R. and Yousefian, M. (2012). The effect of the different vegetative species on the carbon sequestration in Miankaleh Plain Rangelands. Journal of Environmental Studies, 38 (62): 45-54.

[23] Tarkalson, D. D., Brown, B., Kok, H. and Bjorneberg, D. L. (2009). Irrigated small-grain residue management effects on soil chemical and physical properties and nutrient cycling. Journal of Soil Science, 174:303-311.

[24] Walkley, A. and Black, I. A. (1934). An examination of the digeston method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid thtration method. Soil Sciences, 37: 29-38.

[25] Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R. and Bayaer, W. (2006). Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 12(27): 2411–2422.