



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مآلن تحقیقات، آموزش و پژوهش کشاورزی

توزیع مکانی کربن آلی خاک سطحی در گونه‌های گیاهی مراتع آبخیز چهلگزی شهرستان سنندج، استان کردستان

صلاح‌الدین زاهدی^{۱*}، رستم خلیفه‌زاده^۲

۱- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

کردستان، سنندج، ایران

۲- پژوهشگر گروه مرتع مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، تهران، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

کربن آلی خاک، بر تمام ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تأثیرگذار است و سبب حاصلخیزی خاک می‌شود و یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک است. کربن آلی خاک در بوم‌نظام‌های خشکی از جنبه‌های گوناگونی همچون کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای، افزایش عملکرد و حاصلخیزی خاک، کاهش فرسایش پذیری خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی و غیره، حائز اهمیت است. از این‌رو، امروزه در زمره عوامل‌های تعیین‌کننده سلامت خاک طبقه بندی شده است و از آن با عناوینی همچون قلب کشاورزی پایدار و بخش حیاتی سامانه‌های تولید یاد می‌شود. مدیریت کربن آلی به‌ویژه در خاک‌هایی با کربن آلی کمتر از یک درصد (که بخش بزرگی از خاک‌های ایران را شامل می‌شوند)، ضرورت اجتناب‌ناپذیری است. هدف این پژوهش، ارزیابی توان عامل‌های طیفی و غیرطیفی خاک به‌منظور پیش‌بینی توزیع مکانی کربن آلی خاک سطحی در مراتع نیمه‌خشک چهلگزی سنندج با استفاده از تحلیل عاملی و وایازی خطی چندگانه بود.

مواد و روش‌ها

داده‌های ماهواره‌ای استفاده‌شده در این پژوهش از پایگاه سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) دریافت شد. این داده‌ها از نوع اطلاعات سطح یک ماهواره لندست ۸ در تاریخ ۲۰۱۹/۰۶/۱۸ بود و شماره مسیر و ردیف آن به ترتیب ۱۶۷ و ۳۵ بود. برای تهیه نقشه مدل طبقات ارتفاعی منطقه، از نقشه‌های پستی بلندی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مطالعه‌شده به شماره‌های ۵۳۶۰-NE و ۵۳۶۰-NW و ۵۳۶۱-SW به ترتیب به نام‌های ساتیله، تودارملا و هانه‌گلان استفاده شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: zahedi51@gmail.com

استناد: زاهدی، ص.، خلیفه‌زاده، ر. ۱۴۰۴. توزیع مکانی کربن آلی خاک سطحی در گونه‌های گیاهی مراتع آبخیز چهلگزی شهرستان سنندج، استان کردستان. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۸ (۳): ۱۱۹-۱۰۰.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.368385.1612

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۴۸، پاییز ۱۴۰۴، صفحه‌های ۱۰۰ تا ۱۱۹.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



با انجام بازدیدهای میدانی و به‌کارگیری روش فیزیونومی - فلوریستیک، مرز واحدهای همگن، اصلاح و تدقیق شد و نقشه نهایی گونه‌های گیاهی منطقه تهیه شد. برای برآورد متغیرهای درصد پوشش تاجی، لاشبرگ، سنگ و سنگریزه و خاک لخت موجود در هر گونه گیاهی، از روش گام نقطه استفاده شد. سپس، از خاک گونه‌های مختلف مرتعی آبخیز چهلگزی، با استفاده از روش تصادفی طبقه‌بندی شده، نمونه‌برداری شد. به این منظور، تعداد ۱۳۵ پایگاه تعلیمی در واحدهای کاری همگن انتخاب شد. از این تعداد، اطلاعات ۱۰۵ پایگاه برای واسنجی مدل و اطلاعات ۳۰ پایگاه برای اعتبارسنجی آن به‌کار گرفته شد. در هر یک از پایگاه‌های تعلیمی به شیوه تصادفی، یک نمونه خاک ترکیبی متشکل از نه مشاهده از ژرفای صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک سطحی برداشت شد. در هر نمونه، محتوای کربن آلی خاک با استفاده از روش تیتراسیون والکلی-بلاک اندازه‌گیری شد. به‌منظور تعیین یک مدل مناسب برای پیش‌بینی کربن آلی خاک سطحی، ۲۱ متغیر بررسی شد. این متغیرها مشتمل بر ۱۴ متغیر طیفی و هفت متغیر شکل معیار بودند. با استفاده از فن تحلیل عاملی مبتنی بر روش اکتشافی متغیرهای مد نظر به سه عامل (رنگ خاک، پوشش گیاهی، گیتاشناسی همراه با ویژگی‌های فیزیکی خاک طبقه‌بندی شدند. این سه عامل در مجموع $80/356\%$ تغییرات داده‌ها را تبیین کردند. با استفاده از وایازی خطی چندگانه، یک معادله وایازی مناسب ($R^2=0/66$) برای پیش‌بینی کربن آلی خاک سطحی محاسبه شد.

نتایج و بحث

نقشه واحدهای همگن از روی هم‌اندازی سه لایه اطلاعات مربوط به طبقه‌های بلندی، شیب و جهت‌های دامنه‌ای و حذف واحدهای خرد، زمین صخره‌ای و غیرقابل دسترس و زمین‌های کشاورزی تهیه شد و مشتمل بر ۳۲ واحد همگن بود. نقشه پوشش گیاهی منطقه شامل پنج گونه گیاهی غالب بود. در این پژوهش، متغیرهای طیفی انعکاسی مشتمل بر ۱۴ متغیر، از تصویرهای ماهواره‌ای استخراج شد. متغیرهای غیرطیفی (شکل معیار) نیز شامل هفت سنج‌بلندی نسبی، شیب، جهت دامنه تبدیل‌شده، انحنای عمومی دامنه، انحنای عمودی و افقی دامنه و شاخص رطوبت پستی‌بلندی بودند که از مدل رقومی ارتفاع منطقه به‌دست آمدند. سپس، با انجام آزمون تحلیل عاملی شاخص کفایت نمونه برداری (KMO) بررسی شد و متغیرهای با ضریب همبستگی کمتر از ۰/۵ حذف شدند. این آزمون تا دستیابی به نتیجه مناسب، تکرار شد و سرانجام ۸ متغیر (آلبیدوی سطح، شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار، شاخص‌های سبزی‌نگی، روشنایی و رطوبت تبدیل تسلدکپ، شاخص رس، شیب و بلندی از سطح تراز دریا) به‌عنوان متغیرهای مناسب برای ورود به مدل تحلیل عاملی انتخاب شدند. جذر میانگین مربعات خطا و میانگین نسبی خطای مطلق مدل پیشنهادی به ترتیب $0/117$ و $0/191$ محاسبه شد. مقایسه میانگین ذخیره کربن آلی خاک سطحی در گونه‌های گیاهی موجود در منطقه پژوهش شده با استفاده از تجزیه و ردایی، معنی‌دار بود ($p < 0/01$). بر اساس نتایج این پژوهش با تحلیل نمودار میانگین بهنجار یک‌طرفه، گونه‌های گیاهی بررسی شده در دو گروه بیشتر از میانگین کل کربن آلی رویشگاه (گونه‌های ۱، ۲ و ۵) و کمتر از میانگین کل کربن آلی رویشگاه (گونه‌های ۳ و ۴)، طبقه‌بندی شدند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج تجزیه و ردایی میانگین ذخیره کربن آلی در خاک سطحی ۵ گونه گیاهی موجود در منطقه مطالعه‌شده نشان داد که اختلاف میانگین کربن آلی خاک در گونه‌های گیاهی مد نظر معنی‌دار بود ($p < 0/01$). میانگین وزنی کربن آلی در خاک سطحی مراتع منطقه پژوهش شده $1/26\%$ به‌دست آمد. بر پایه نتایج این پژوهش و بر اساس مساحت و پستی‌بلندی منطقه و تعداد نمونه‌های برداشت‌شده، پیشنهاد می‌شود برای فراهم آوردن شرایط تغییر میانگین وزنی کربن آلی در خاک سطحی مراتع منطقه، تعداد نمونه‌ها را افزایش داد و نقاط نمونه‌برداری را با پراکنش مناسب‌تری تعیین کرد.

واژگان کلیدی

تحلیل عاملی اکتشافی، کربن آلی خاک، لندست ۸، متغیرهای شکل معیار، متغیرهای طیفی، مراتع نیمه‌خشک، وایازی خطی چندگانه

مقدمه

کربن آلی یکی از مهمترین شاخص‌های کیفیت خاک است (استیونسون، ۱۹۹۴؛ ساها و همکاران ۲۰۱۱) که در بوم‌نظام‌های خشکی از جنبه‌های گوناگونی همچون کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای، افزایش عملکرد و حاصلخیزی خاک، کاهش فرسایش‌پذیری خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی و غیره، حائز اهمیت است و امروزه در زمره عوامل‌های تعیین‌کننده سلامت خاک طبقه‌بندی شده است (بوما و مک براتنی ۲۰۱۳) و از آن با عنوان‌هایی چون قلب کشاورزی پایدار (میرزاشاهی و بازرگان ۲۰۱۵) و بخش حیاتی سامانه‌های تولید (بیدوال ۱۹۸۹) یاد می‌شود که مدیریت آن به‌ویژه در خاک‌های با کربن آلی کمتر از یک درصد (که بخش بزرگی از خاک‌های ایران را شامل می‌شوند)، ضرورت اجتناب‌ناپذیری است (میرزاشاهی و بازرگان ۲۰۱۵). نکته قابل توجه آن است که استفاده از روش‌های مستقیم (سنتی) برای برآورد کربن آلی خاک، فقط در مقیاس‌های محلی (سطوح کوچک) قابل اجرا است و در مقیاس‌های گسترده (منطقه‌ای، ملی و فراملی) به دلیل نیاز به صرف هزینه و وقت زیاد، قابلیت اجرایی ندارد. از این رو، دستیابی به روش نوینی برای پیش‌بینی اندازه ذخیره کربن آلی خاک مراتع که با صرف کمترین هزینه، قادر به ارائه نقشه‌ای پیوسته در سطح گسترده و با دقت مناسب از متغیر یادشده باشد، ضرورت اجتناب‌ناپذیری است. در این راستا، با استفاده از داده‌های سنجش از دور می‌توان به راهکار مناسبی برای پاسخگویی به این نیاز دست یافت.

به‌منظور تعیین عامل‌های تأثیرگذار بر تغییرات ذخیره کربن در کاربری‌های گوناگون زمین در اخترا‌آباد سمنان، تیمارهای متفاوتی از دیدگاه نوع و سن کشت و استفاده از زمین، شدت‌های چرای مختلف روی گیاه آتریپلکس، تاغ، گندم دیم، جو آبی و شاهد (مرتع طبیعی) بررسی شد (کمالی و صادقی‌پور ۲۰۱۶). نتایج این پژوهش نشان داد مهمترین عامل‌های تأثیرگذار بر ذخیره کربن در تیمارهای گوناگون شامل رس ژرفای دوم و سوم و بی‌کربنات ژرفای دوم، ازت ژرفای دوم، هدایت الکتریکی ژرفای سوم، وزن اندام هوایی و کربن ریشه بودند. در

عرصه‌های پخش سیلاب دشت گربایگان فسا، روستا و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک و نوع کاربری زمین بر اندازه ذخیره کربن در خاک و کاهش اثرهای منفی تغییر اقلیم را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین و کمترین میانگین کربن آلی در کاربری‌های گوناگون به ترتیب مربوط به جنگل اوکالیپتوس (۶۸/۱٪) و کاربری شاهد (۱۴/۰٪) بود. نتایج پژوهش رفتارهای طیفی و غیرطیفی خاک برای برآورد کربن آلی خاک سطحی در مناطق گوناگون با استفاده از روش‌های تحلیل عاملی و وایازی چندگانه در مراتع نشان داد که اندازه همبستگی متغیرهای طیفی به دست آمده از تصویرهای ماهواره‌ای با کربن آلی خاک سطحی بیشتر از متغیرهای محیطی است (ناطقی و همکاران ۲۰۲۱؛ خلیفه‌زاده و همکاران ۲۰۱۸). در آبخیز راونگ میناب، ترکمانی و همکاران (۲۰۱۹) از تصویرهای ماهواره لندست ۸ و مدل جنگل تصادفی برای تهیه نقشه توزیع مکانی کربن آلی خاک و تعیین مهمترین متغیرها در برآورد آن استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد بیشترین وزن در مدل توزیع مکانی کربن مربوط به متغیرهای به دست آمده از نقشه مدل رقومی ارتفاع (بلندی، سطح پایه شبکه کانال، شیب و ویژگی‌های خاک مانند درصد لای و ماسه) بود. جعفری و همکاران (۲۰۲۳) از مدل RothC برای برآورد ذخیره کربن آلی در مراتع کوهستانی فیروزآباد کرمانشاه در سه دوره زمانی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر تغییرات ذخیره کربن آلی، تغییرات آب و هوایی بود و اندازه کل کربن ذخیره‌شده مراتع در مقایسه با زمین‌های کشاورزی بیشتر بود. همچنین، عملیات کشاورزی سبب کاهش مراحل مختلف ذخیره کربن آلی در خاک شد. اثرات دو عامل طبیعی و انسانی بر تجزیه، گردش و تبدیل کربن آلی خاک و توزیع مکانی آن بر خاک های چرنوزوم در چین به وسیله ژئائوزانگ و همکاران (۲۰۲۴) بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد که تأثیرگذارترین متغیرها بر توزیع مکانی SOC شامل تغییرات آب و هوا، انواع کاربری زمین، کوددهی،

مناسب با استفاده از اطلاعات طیفی انعکاسی ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های غیرطیفی به‌دست آمده از مدل رقومی ارتفاع گونه‌های مختلف مراتع منطقه پژوهش‌شده بود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه پژوهش‌شده

مساحت منطقه پژوهشی که یکی از زیرآبخیزهای آبخیز سد قشلاق است حدود ۲۷۲۳۳ هکتار و در ۳۰ کیلومتری شمال شهرستان سنندج و میان مختصات جغرافیایی ۴۵° ۴۶' تا ۴۶° ۵۷' طول شرقی و ۲۵° ۳۵' تا ۳۵° ۳۸' عرض جغرافیایی است (شکل ۱). اقلیم این منطقه بر پایه روش دومارتن اصلاح‌شده نیمه‌خشک فراسرد و کمترین میانگین دما در سردترین ماه سال ۸/۱- درجه است. میانگین دمای سالانه ۹/۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه ۳۲۳/۱ میلی‌متر است.

روش پژوهش

سنجش از دور

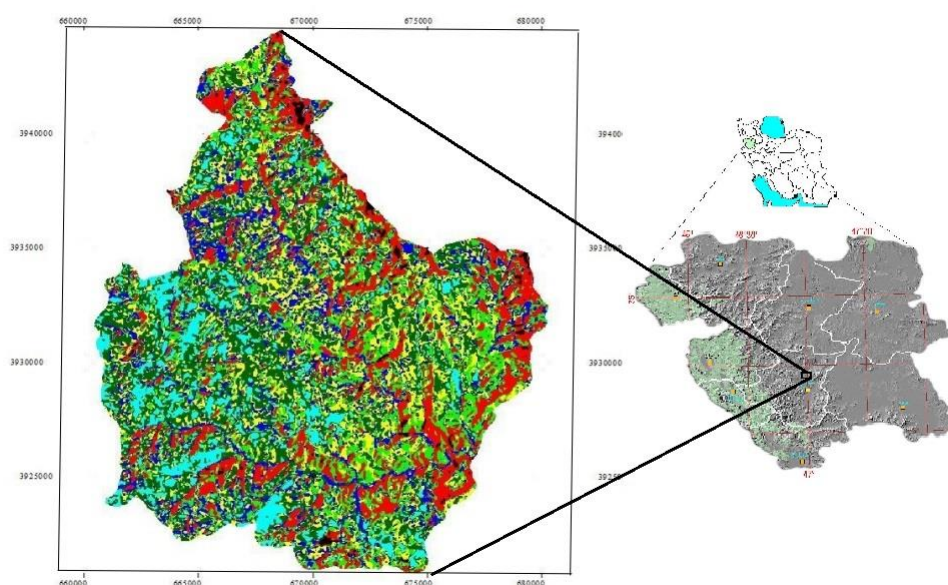
از داده ماهواره لندست ۸ مورخ ۲۰۱۹/۰۶/۱۸ با شماره مسیر و ردیف به‌ترتیب ۱۶۷ و ۳۵ استفاده شد.

داده برداری میدانی

واحدهای کاری همگن برای نمونه‌برداری با استفاده از نقشه‌های شیب، جهت و طبقات بلندی به‌دست آمده از نقشه‌های پایه و رقومی ارتفاع منطقه به‌دست آمد. مساحت پوشش گیاهی مرتعی در این آبخیز بیش از ۲۳۰۰۰ هکتار بود. درصد این پوشش از ۳۵ تا ۶۸٪ و وضعیت مراتع بر اساس روش چهار فاکتوره از ضعیف و متوسط تا خوب متغیر بود. مرز واحدهای همگن در نقشه گونه‌های گیاهی منطقه، با انجام بازدیدهای میدانی و به‌کارگیری روش فیزیونومی- فلوریستیک اصلاح شد و نقشه نهایی گونه‌های گیاهی منطقه تهیه شد. متغیرهای درصد پوشش تاجی، لاشبرگ، سنگ و سنگریزه و خاک لخت موجود در هر گونه گیاهی با روش گام نقطه (برآورد شد).

شیوه‌های خاک‌ورزی همراه با عامل پستی‌بلندی، فرایندهای آب‌شناسی و فرسایش خاک بودند. اثرات پستی‌بلندی و عامل‌های پوشش گیاهی بر محتوا و توزیع SOC در ژرفاهای گوناگون خاک در آبخیزی کوچک در چین به‌وسیله یو و همکاران (۲۰۲۰)، ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر توزیع مکانی SOC در این آبخیز، پستی‌بلندی بود. از این‌رو، در برآورد دقیق ذخیره‌سازی SOC در یک آبخیز کوچک عامل پستی‌بلندی مهم‌تر از عامل پوشش گیاهی است. در یک آبخیز شهری، ژانگ و همکاران (۲۰۲۱)، تغییرات مکانی و توزیع کربن آلی خاک را بررسی کردند. نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی ترکیبی، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی و گردآوری کمترین مجموعه داده‌ها نشان داد که همبستگی میان محتوای ماسه، فاصله تا مرکز شهر، نوع کاربری زمین و نوع پوشش گیاهی با تغییرات مکانی و برآورد SOC نزدیک بود. در دشت شمال‌شرقی چین، ما و همکاران (۲۰۲۴)، اندازه محتوای SOC خاک سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) را با ۱۹۲۰ نقطه نمونه‌برداری و بر اساس شبکه پایش زمین‌شیمیایی کیفیت زمین تهیه‌شده در سال ۲۰۱۸ را برآورد کردند. نتایج نشان داد که بیشتری محتوای SOC در میان انواع گوناگون کاربری زمین مربوط به زمین‌های شالیزار بود. همچنین، نتایج بیانگر وابستگی مکانی زیاد محتوای SOC بود و از این‌رو، به‌تدریج از سمت جنوب‌غربی به شمال‌شرقی در منطقه پژوهش‌شده اندازه آن افزایش یافت.

وانگ و همکاران (۲۰۲۴) در آبخیز رود ژینگه در چین با استفاده از یک چارچوب یادگیری ماشینی و با چارچوب از پایین به بالا، تغییرات مکانی- زمانی کربن آلی خاک و آسیب‌پذیری آن در برابر تغییرات آب و هوایی، را ارزیابی کردند و دریافتند که زمین‌های کشاورزی بخش شمالی منطقه پژوهش‌شده به تغییر اقلیم حساس‌تر بودند و افزایش دما سبب کاهش شدید SOC شد. هدف این پژوهش، دستیابی به مدل قابل قبول پیش‌بینی کربن آلی خاک سطحی با هزینه و زمان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش شده.
Figure 1- Geographical location of the study area.

پیمایش میدانی و با استفاده از نقشه پستی بلندی منطقه و دستگاه GPS، موقعیت مکانی کلیه نقاط نمونه برداری تعیین شد و در محل هر نقطه با استفاده از بیلچه، یک نمونه از خاک سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی متر) برداشت شد. نمونه های برداشت شده مربوط به هر پایگاه تعلیمی (در سطح پیکسل) با هم مخلوط شد و یک نمونه دو کیلوگرمی از آن تهیه شد و به آزمایشگاه منتقل شد. از مجموع ۱۳۵ نمونه خاک برداشت شده، تعداد ۱۰۵ نمونه برای واسنجی مدل و ۳۰ نمونه نیز برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

داده های استفاده شده برای پیش بینی کربن آلی خاک سطحی

برای برآورد کربن آلی خاک از دو دسته متغیرهای طیفی کمکی (داده های انعکاسی) و غیرطیفی استفاده شد. همه عامل های نامبرده به عنوان متغیرهای مستقل اولیه، در مدل پیش بینی کربن آلی خاک سطحی به شمار می آیند. متغیرهای طیفی (انعکاسی) استفاده شده شامل ۱۵ لایه اطلاعاتی بودند که از این تعداد، هفت لایه مربوط به اطلاعات طیفی باندهای ۲ تا ۷ انعکاسی اصلاح شده جو بالای سنجنده OLI بودند. هشت متغیر دیگر شامل شاخص طیفی آلبیدوی سطح، شاخص رس، شاخص کربنات، شاخص اندازه ذرات،

گونه های گیاهی بررسی شده به شرح زیر است:

- گونه *Ferula haussknechtii*-*Bromus tomentellus* (condition value = 42)
- گونه *Astragalus* Spp.- *Psathyrostachys Fragilis*- *Bromus tomentellus* (condition value = 40)
- گونه *Astragalus* Spp.- *Gundelia tournefortii* (condition value = 27)
- گونه *Astragalus* Spp.-*Bromus tomentellus* (condition value = 33)
- گونه *Bromus tomentellus*-*Ferula hausknechtii* (condition value = 36)

برای حذف اثر رطوبت بر واکنش طیفی، با استفاده از منحنی آمپروترمیک، میانگین بلندمدت ایستگاه همدید سنج محاسبه شد و عملیات نمونه برداری در خشک ترین ماه سال و نزدیکترین زمان به تاریخ گذر ماهواره انجام شد. از هر یک از واحدهای کاری همگن، با استفاده از روش تصادفی طبقه بندی شده نمونه برداری شد. در این روش منطقه پژوهش شده به چند طبقه همگن تقسیم شد. سپس، در هر یک از طبقات همگن چند نقطه تصادفی (متناسب با سطح هر واحد همگن) تعیین شد و موقعیت نقاط مد نظر روی نقشه پستی بلندی منطقه منتقل شد. با مراجعه به عرصه و

r_{ij} : ضریب همبستگی ساده میان متغیرهای i و j ،
ضریب همبستگی جزئی میان متغیرهای i و j به شرط ثابت بودن دیگر متغیرها است. هر چه شاخص KMO به یک نزدیک شود، بیانگر دقت محاسبات مربوطه با استفاده از روش تحلیل عاملی است. در شرایطی که این شاخص بزرگتر از $0/6$ باشد، این نکته بیانگر امکان اجرای تحلیل عاملی بر متغیرهای ورودی است (هوارد ۲۰۱۶). با آزمون کرویت بارتلت فرض برابری ماتریس ضریب های همبستگی را می توان بررسی کرد. رد نشدن این فرض بیانگر آن است که همه متغیرها، مستقل از هم عمل می کنند و وجه اشتراک میان متغیرها معنی دار نیست. برای تعیین تعداد عامل ها از قاعده کایسر^۷ استفاده شد. بر اساس این قاعده، تعداد عامل ها تعیین شد که اندازه ویژه^۸ آنها برابر یا بزرگتر از یک است (کایسر ۱۹۶۰).

پهنه بندی کربن آلی خاک

پهنه بندی کربن آلی خاک سطحی با استفاده از روش وایازی چندگانه انجام شد. نقشه نقطه ای کربن آلی خاک سطحی در نقاط نمونه برداری تهیه شد و به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. عامل های به دست آمده از تجزیه عاملی با روش تجزیه مؤلفه های اصلی (PCA) نیز به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. با ایجاد رابطه وایازی میان متغیر وابسته و متغیرهای مستقل، مدل پیش بینی کربن آلی خاک سطحی ایجاد شد. رابطه ۴ شکل کلی معادله وایازی چندگانه بر اساس متغیرهای مستقل (عامل ها) است.

$$SOC = \beta_0 + \beta_1(PC_1) + \beta_2(PC_2) + \dots + \beta_n(PC_n) + \varepsilon \quad (4)$$

اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

برای اعتبارسنجی مدل از سه معیار ضریب همبستگی میان اندازه های حقیقی و پیش بینی شده کربن آلی، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (رابطه ۵) و میانگین نسبی خطای مطلق (رابطه ۶) استفاده شد.

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

شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار (NDVI) و شاخص های سه گانه تبدیل تسلدکپ (روشنایی، سبزینگی و رطوبت) بودند که پس از اجرای عملیات پیش پردازش روی داده های ماهواره، محاسبه و تهیه شدند.

متغیرهای غیرطیفی (شاخص های ریخت سنجی)

پس از عملیات پیش پردازش روی نقشه رقومی ارتفاع منطقه، هفت متغیر غیرطیفی شامل بلندی نسبی^۲، شیب، آزیموت شیب (جهت دامنه)، شکل عمومی انحنا^۳، انحنای افقی^۴، انحنای افقی (مبین شدت تغییرات جهت دامنه است و بیانگر آن است که هرز آب در عبور از سطح مد نظر به شکل همگرا یا واگرا عمل می کند) انحنای عمودی^۵، دامنه (شدت تغییرات شیب است و بیانگر آن است که سرعت جریان هرز آب در عبور از سطح مد نظر افزایش یا کاهش می یابد) (اولایا ۲۰۰۹) و شاخص رطوبت پستی بلندی^۶ محاسبه شد. این شاخص بیانگر گرایش آب به جمع شدن در هر نقطه از آبخیز (بر حسب As) است و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین دست (بر حسب $\tan \beta$ به عنوان شیب آبی تقریبی) توصیف می کند. برای محاسبه شاخص رطوبت پستی بلندی از رابطه ۱ استفاده شد (بیون و کیرک بای ۱۹۷۹).

$$TWI = Ln(As/\tan \beta) \quad (1)$$

A_s : سطح ویژه آبخیز و β : شیب است.

برای تبدیل متغیر آزیموت شیب، از رابطه ۲ استفاده شد (فرانکلین و همکاران ۲۰۰۰).

$$\cos(\text{Aspect} - 225^\circ) \quad (2)$$

برای تجزیه اطلاعات موجود در مجموعه داده ها از روش آماری تحلیل عاملی استفاده شد. در این راستا، با استفاده از شاخص KMO داده ها بررسی شدند. ضریب های همبستگی ساده و جزئی با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$KMO = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p r^2_{ij}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p r^2_{ij} + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p r^2_{ij}} \quad (3)$$

6-Topographic Wetness Index (TWI)

7- Kaiser Criteria

8- Eigenvalue

2-Relative Relief (RR)

3- landscape General Curvature

4-Planform Curvature

5-Profile Curvature

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

مقایسه ذخیره کربن آلی خاک سطحی در گونه‌های گیاهی برای مقایسه ذخیره کربن آلی در لایه سطحی خاک گونه‌های گیاهی مختلف موجود در منطقه پژوهش شده، از افزونه نمونه‌برداری در محیط نرم افزار ArcGIS 10.3 بهره‌گیری شد. ابتدا نقشه گونه‌های گیاهی منطقه فراخوان شد. سپس با استفاده از افزونه نمونه‌برداری، در هر گونه گیاهی، به شیوه تصادفی، تعداد ۳۰ نقطه (مشاهده) مشخص شد. با افزودن لایه پهنه‌بندی کربن آلی خاک سطحی و استفاده از دستور Extract در نرم افزار نامبرده، اندازه کربن آلی خاک در محل نقاط نمونه‌برداری، استخراج و به پرونده مربوطه اضافه شد. با انتقال این جدول به نرم افزار آماری مینی‌تب ابتدا وجود اختلاف میان میانگین ذخیره کربن آلی خاک در لایه سطحی گونه‌های مختلف گیاهی موجود در منطقه پژوهش شده با استفاده از روش تجزیه و ردایی یک‌طرفه آزمون شد و برای گروه‌بندی گونه‌های گیاهی مد نظر از تحلیل نمودار میانگین بهنجار یک‌طرفه بهره‌گیری شد.

نتایج و بحث

چکیده نتایج بررسی کیفیت آماری داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در این پژوهش متغیرهای غیرطیفی (ریخت‌سنجی) بررسی شده، ۷ متغیر بلندی نسبی، شیب، جهت دامنه تبدیل شده، انحنای عمومی دامنه، انحنای عمودی و افقی دامنه و شاخص رطوبت

پستی‌بلندی بودند که ۶ متغیر از این تعداد در شکل ۲ نشان داده شده است. متغیرهای طیفی انعکاسی نیز شامل ۱۴ متغیر بود که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.

عامل‌های استخراج شده

برای تعیین تعداد عامل‌هایی که باید برای مجموعه داده‌ها در این تحلیل استخراج شوند، از معیار کایسر استفاده شد. بر اساس این معیار، فقط عامل‌هایی انتخاب شدند که اندازه ویژه آنها برابر یا بزرگتر از یک باشد. عامل‌های استخراج شده و درصد تغییرات آنها در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس این جدول اندازه ویژه سه عامل بیشتر از یک بود و این عامل‌ها در مجموع ۸۰٪/۳۶۵ تغییرات داده‌ها را تبیین کردند.

محاسبه امتیازات عاملی

اندازه نمرات (امتیازات) عامل‌های سه‌گانه برای ۷ متغیر استفاده شده در تحلیل عاملی در جدول ۳ نشان داده شده است. محورها و پراکنش متغیرها در نمودار تحلیل PCA در شکل ۵ نشان داده شده است.

مدل پیش‌بینی و پهنه‌بندی کربن آلی خاک

سطحی

برای ایجاد مدل پیش‌بینی کربن آلی خاک، ابتدا رابطه وایازی خطی چندگانه میان کربن آلی خاک با لایه‌های اطلاعاتی عامل‌ها در ۱۰۵ نقطه نمونه‌برداری شده، بررسی شد. با بررسی هم‌خطی چندگانه و محاسبه ضریب‌های متغیرهای مستقل با روش توأم، صحت این مدل بررسی شد (جدول‌های ۴، ۵ و ۶).

جدول ۱- نتایج آمار توصیفی و آزمون احتمال بهنجاری همه متغیرهای وابسته و مستقل بررسی شده.

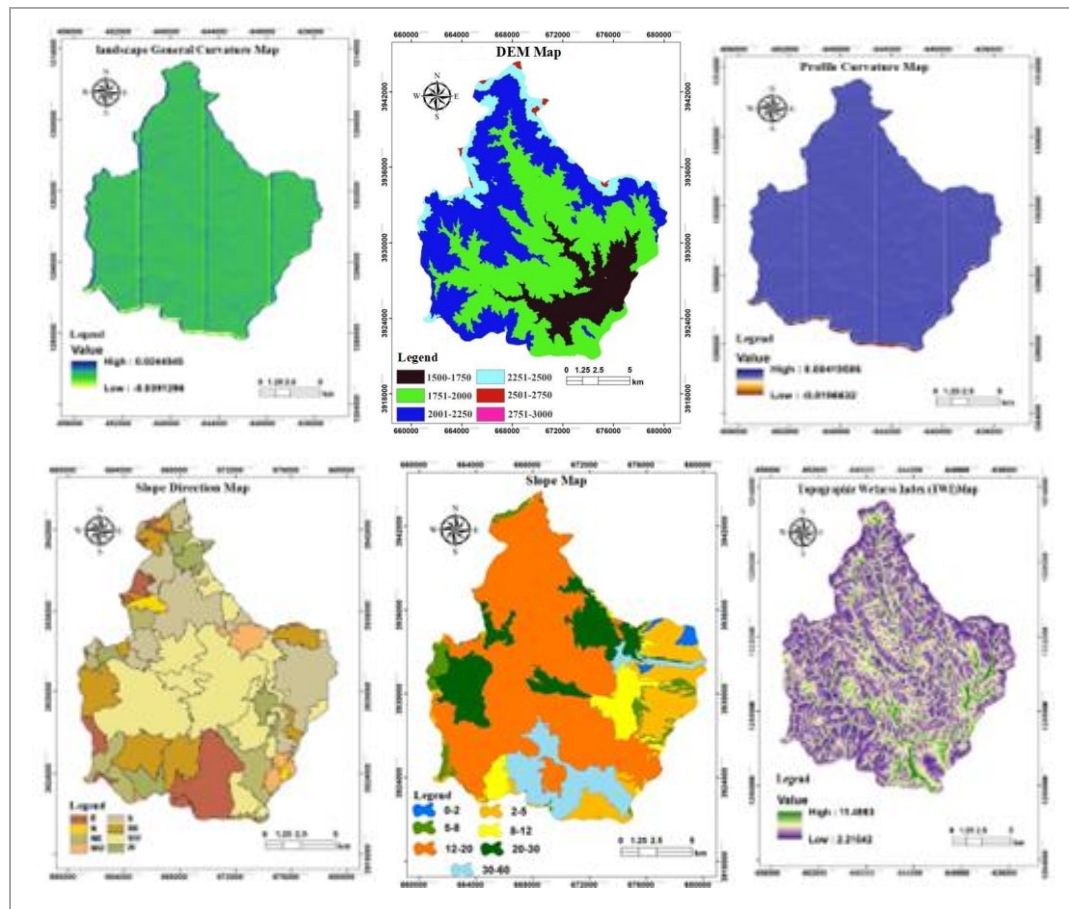
Table1- descriptive statistics and normal probability test of all dependent and independent variables Results.

Skewness	Kurtosis	standard deviation	average	Number of observations	Variables	Row
0.899	0.368	0.745	0.985	105	SOC (%)	1
-0.48	-0.54	20.16	119.7160	105	Blue Band	2
-0.39	-0.47	26.87	122.348	105	Green Band	3
-0.13	-0.19	19.73	108.6321	105	Red Band	4
-0.73	3.71	32.11	93.4192	105	NIR	5
-0.025	0.187	5.84	19.96523	105	SWIR1	6
0.0017	0.321	2.21	6.295124	105	SWIR2	7
0.187	0.988	0.275	3.431	105	Albedo	8
6.15	45.16	5.263	16.37	105	Clay Index	9
0.013	-0.004	0.76	1.11013	105	Carbonate index	10
0.321	1.145	0.816	0.103147	105	Grain Size Index	11
-3.71	20.65	0.092	0.001	105	NDVI	12
0.271	-0.059	0.011	0.133	105	Tasseled-Cap (TC) (Brightness index)	13
3.48	18.62	11.648	-29.7	105	TC greenness	14
11.44	132.27	0.048	0.065	105	TC wetness	15
0.261	-0.07	204	1979	105	RelativeRelief	16
0.473	0.188	6.745	14.718	105	Slope	17
-0.44	-0.51	1.78	5.62	105	Direction	18
0.042	-0.023	0.001	0.0076	105	landscape General Curvature	19
1.065	0.18	0.03	0.084	105	Planform Curvature	20
3.871	-0.37	-0.002	-0.0069	105	Profile Curvature	21
0.879	1.234	2.94	5.49	105	Topographic Wetness Index (TWI)	22

جدول ۲- وردایی و اندازه‌های ویژه عامل‌ها.

Table2- Variance and characteristic values of factors.

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	2.013	38.751	38.751	2.013	28.751	28.751
2	1.661	23.726	62.477	1.661	23.726	52.477
3	1.252	17.888	80.365	1.252	17.888	70.365
4	0.949	6.559	86.924			
5	0.699	4.993	91.917			
6	0.346	3.943	95.859			
7	0.180	2.178	98.038			
8	0.110	1.962	100.000			



شکل ۲- نقشه‌های متغیرهای طیفی ریخت‌سنجی.

Figure 2- Morphometric spectral variables Maps.

جدول ۳- ماتریس امتیازات عامل‌ها.

Table3- Factors Scores Matrix.

	Mean	Std. Deviation	Analysis N
Albedo	3.43157345	0.275465371	135
NDVI	0.0322790	0.11889083	135
TassGreen	-25.0303	11.34274	135
TassBright	0.13276	0.011233	135
TassWet	0.06497634	0.048085868	135
Slope(degree)	14.719	6.7455	135
Hypso	1979.163	204.0225	135

جدول ۴- ضریب تبیین رابطه وایازی خطی چندگانه.

Table4- The explanatory coefficient of the multiple linear regression relationship.

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.825a	0.681	0.632	0.4697835

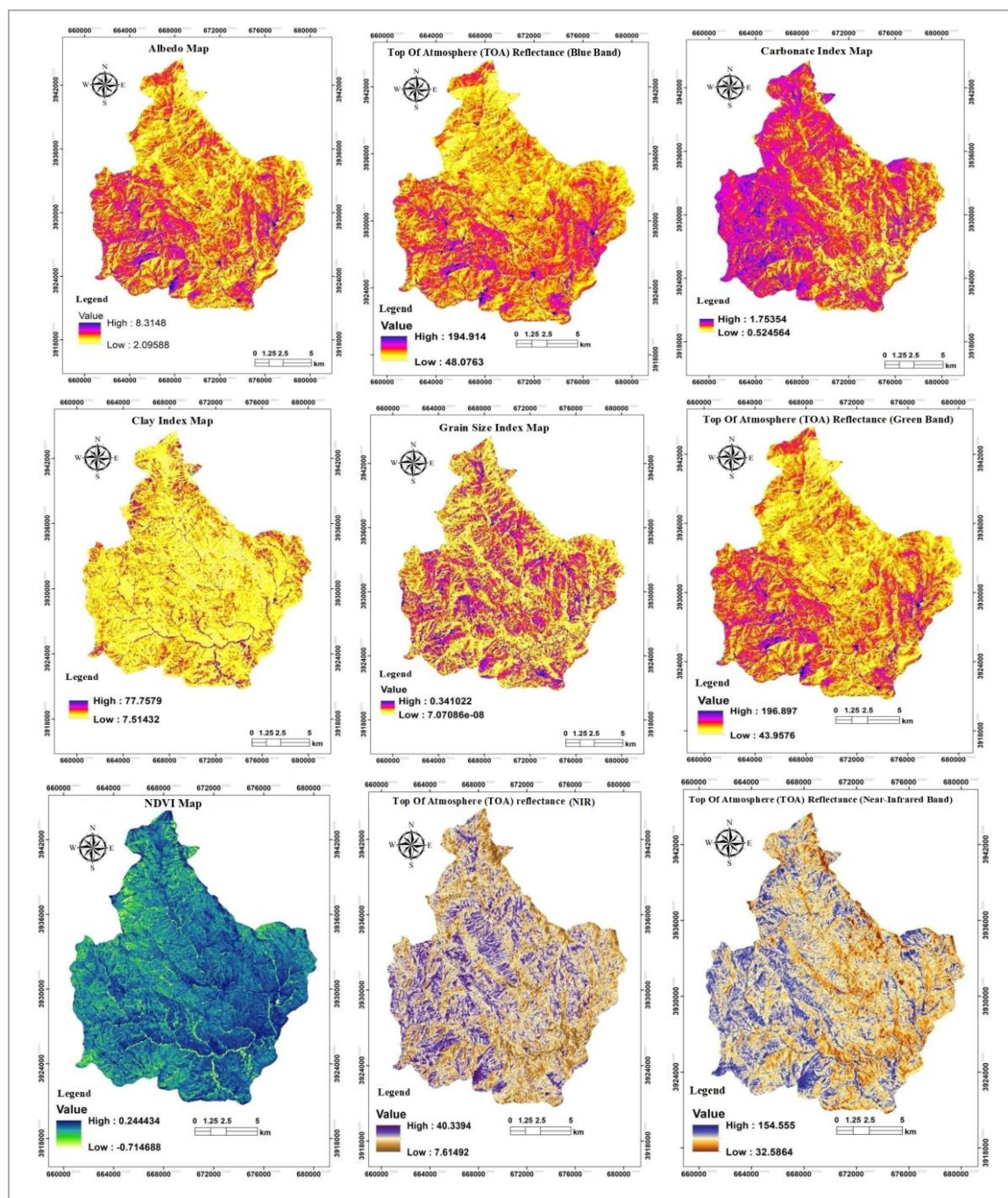
جدول ۵- تجزیه و ردایی رابطه وایزی خطی چندگانه.

Table5- Variance analysis of multiple linear regression relationship.

	Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F
1	Regression	24.487	3	3.061	13.56**
	Residual	11.476	123	0.221	
	Total	35.963	96		

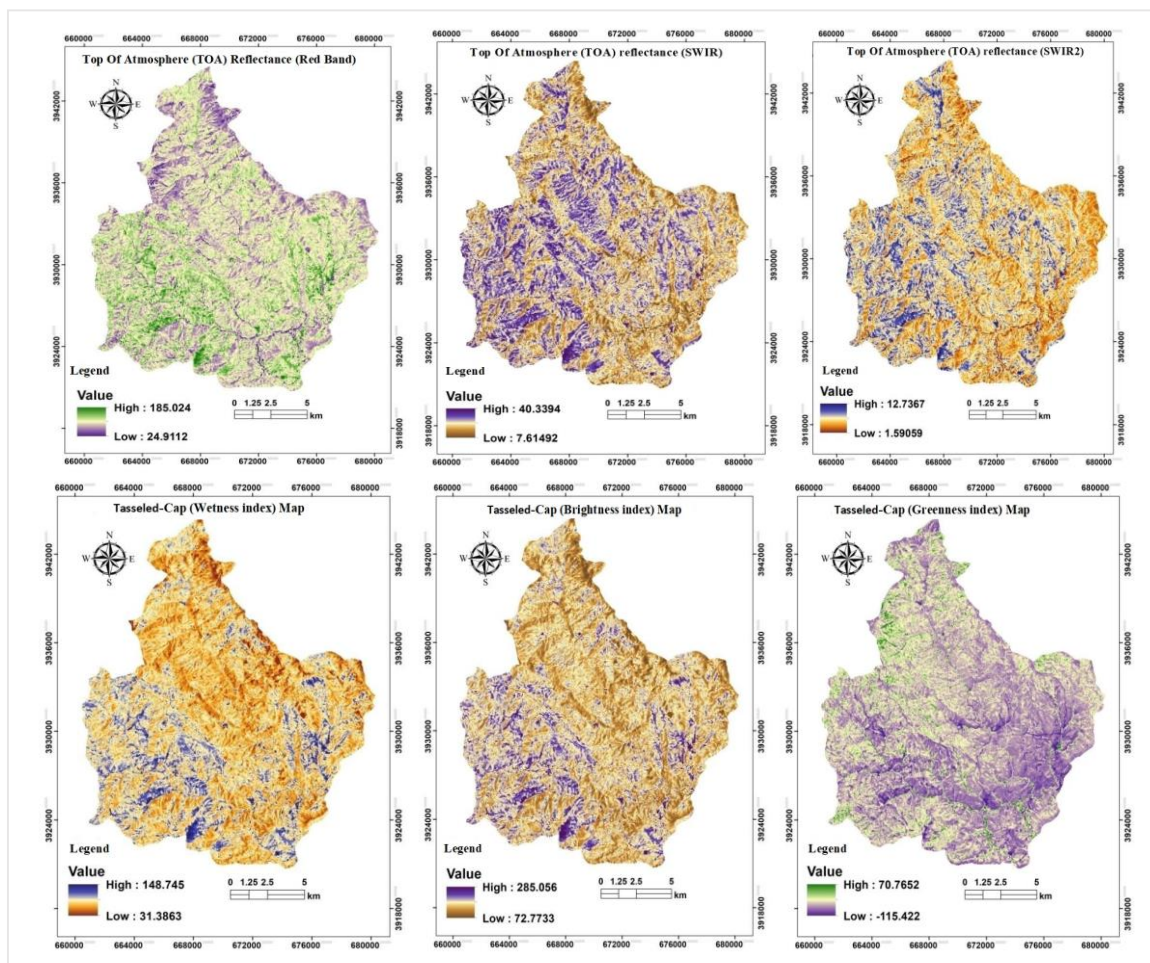
**: Significant difference at the %99 confidence level

*: تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹٪



شکل ۳- نقشه های متغیرهای طیفی انعکاسی

Figure 3- Reflectance spectral variables Maps



شکل ۴- ادامه نقشه متغیرهای طیفی انعکاسی.

Figure 4- Continuation of Reflectance spectral variables Maps.

جدول ۶- ضریب های رابطه وایازی خطی چندگانه و آزمون معنی داری آنها

Table 6- Multiple linear regression correlation coefficients and their significance test

Regression Model	Coefficient	t	(VIF)
Intercept	1.641	0.378 **	-
PC1	-5.568	-3.81 **	1.781
PC2	1.78	6.17 **	1.519
PC3	0.33	1.27 ns	1.093

** : Significant difference at the 99% confidence level

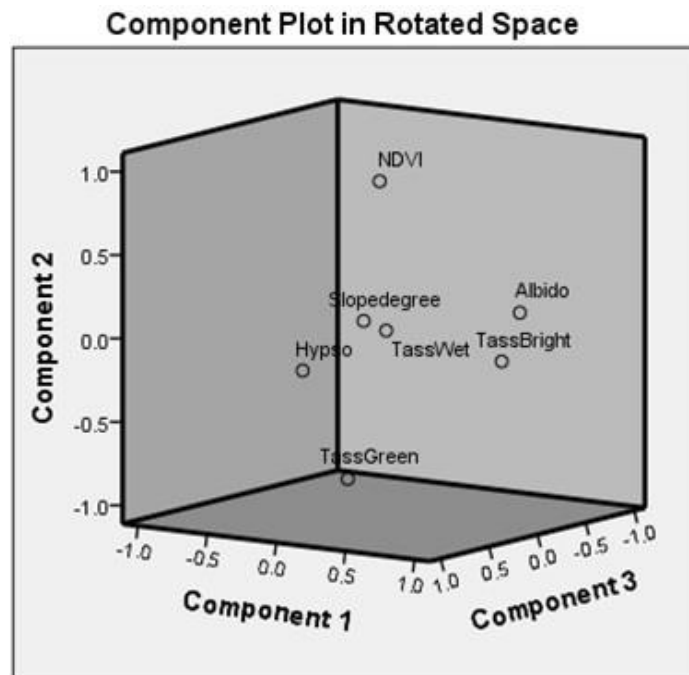
※ : تفاوت معنی داری در سطح اطمینان ۹۹٪

Ns: No significant difference at the 95% confidence level

※ : نبودن تفاوت معنی داری در سطح اطمینان ۹۵٪

با عدد صفر پذیرفته شد. از این رو، در ادامه متغیر موصوف حذف شد و معادله وایازی با استفاده از متغیرهای PC1 و PC2 محاسبه شد (جدول های ۷ تا ۹).

بر اساس نتایج جدول ۶، مدل پیشنهادی، بدون هم خطی چندگانه بود ($VIF < 10$)، اما ضریب های وایازی متغیر PC3 معنی دار نبود. به بیان دیگر فرض صفر آزمون تی مبنی بر احتمال برابری ضریب نامبرده



شکل ۵- محورها و پراکنش متغیرها در نمودار تحلیل PCA.

Figure 5- Axes and distribution of variables in a PCA analysis chart.

جدول ۷- ضریب تبیین رابطه وایازی دو متغیره.

Table 7- The explanatory coefficient of the bivariate linear regression relationship.

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.816 ^a	0.666	0.66	0.5100211

جدول ۸- تجزیه و ردایی رابطه وایازی دو متغیره.

Analysis of variance of bivariate regression relationship.

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F
1 Regression	21.656	10	4.331	16.651**
Residual	14.307	96	0.260	
Total	35.963	97		

** : تفاوت معنی داری در سطح اطمینان ۹۹٪

** : Significant difference at the 99% confidence level

مربعات خطا (RMSE) و میانگین نسبی خطای مطلق (MARE) به ترتیب برابر ۰/۱۹۱ و ۰/۱۱۷ بود. اندازه های اندازه گیری شده و پیش بینی شده کربن آلی خاک سطحی در ۳۰ نمونه بررسی شده در شکل ۷ نشان داده شده است. نمودار یک به یک داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده متغیر موصوف نیز در شکل ۸ ارائه شده است.

نقشه توزیع مکانی (پهنه بندی) کربن آلی خاک در لایه سطحی مراتع منطقه چهلگزی در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۹ به دست آمد.

نتایج اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

آزمون مدل وایازی با استفاده از ۳۰ نمونه نشان داد که ضریب همبستگی اندازه های پیش بینی شده با اندازه های حقیقی کربن آلی ۰/۷۱ بود و ریشه میانگین

مقایسه میانگین ذخیره کربن آلی خاک سطحی در گونه‌های گیاهی

با توجه به وجود ۵ گونه گیاهی در منطقه پژوهش‌شده و با انتخاب تعداد ۳۰ نقطه (مشاهده) تصادفی در هر یک از گونه‌های گیاهی نامبرده، در مجموع ۱۵۰ نقطه تصادفی در سطح منطقه تعیین شد. با استفاده از نقشه پهنه‌بندی تولیدشده (شکل ۶)، اندازه‌های کربن آلی خاک سطحی در این نقاط محاسبه شد. نتایج تجزیه

وردایی میانگین کربن آلی خاک سطحی در ۵ گونه گیاهی موجود در منطقه پژوهش‌شده در جدول ۱۰ ارائه شده است. برای طبقه‌بندی گونه‌های گیاهی پژوهش‌شده در گروه‌های دوگانه (کمتر از میانگین کل منطقه و بیشتر از میانگین کل منطقه) از تحلیل میانگین بهنجار یک‌طرفه (ANOM) استفاده شد (شکل ۹).

جدول ۹- ضریب‌های رابطه وابازی دو متغیره و آزمون معنی‌داری آنها.

Table 9- Bivariate regression relationship coefficients and their significance test.

Regression Model	coefficient	t
intercept	1.796	**2.269
PC1	-16.173	** -1.122
PC2	2.893	**6.633

** : تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹٪

** : Significant difference at the %99 confidence level

جدول ۱۰- تجزیه وردایی میانگین کربن آلی خاک سطحی در گونه‌های گیاهی.

Table10- Variance analysis of average surface soil organic carbon in plant types.

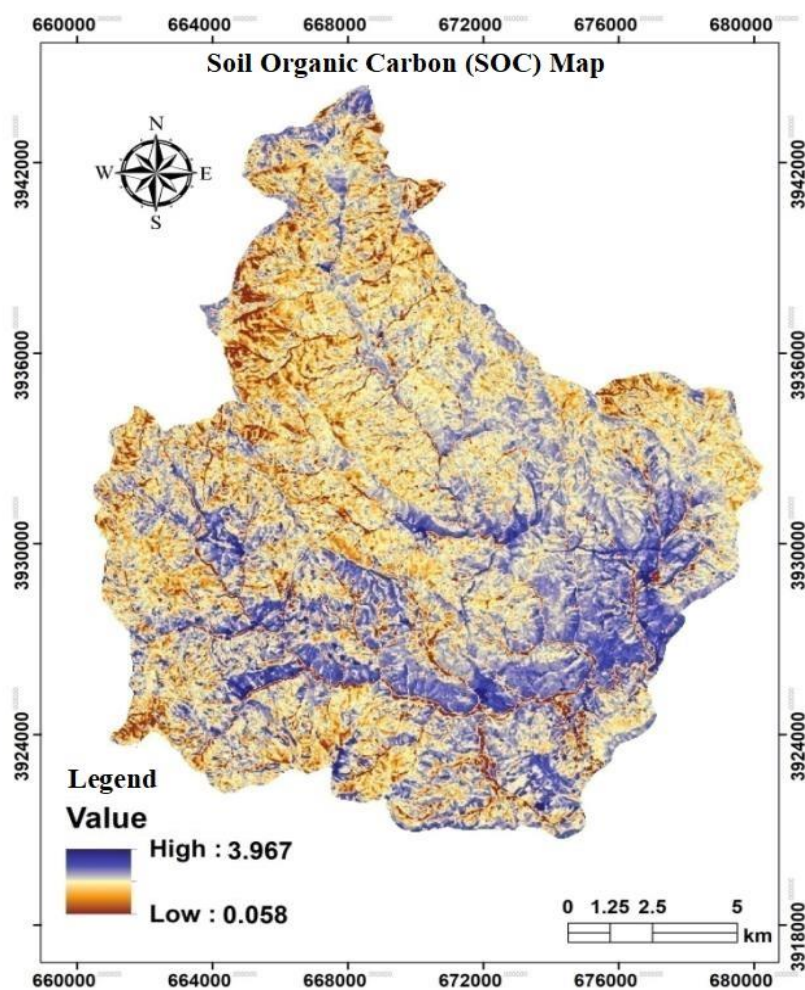
F	Mean Square	Sum of Squares	df	Intercept
12.98 **	0.715	22.16	31	between groups (plant type)
	0.326	16.92	4	within groups (error)
		40.4	134	Total

** : تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹٪

Ns: نبودن تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪

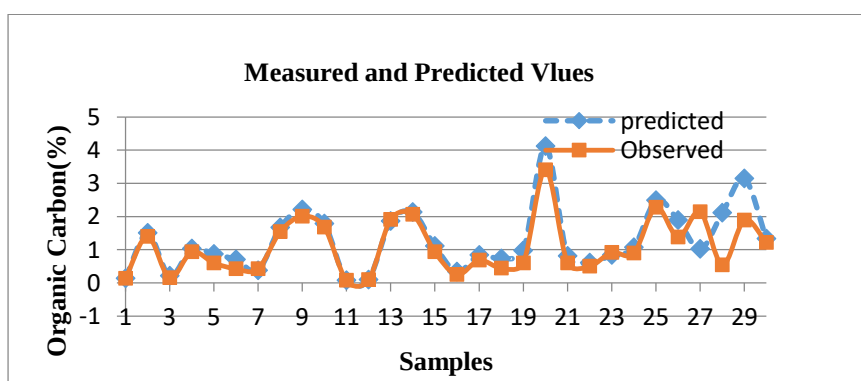
** : Significant difference at the 99% confidence level

Ns: No significant difference at the 95% confidence level



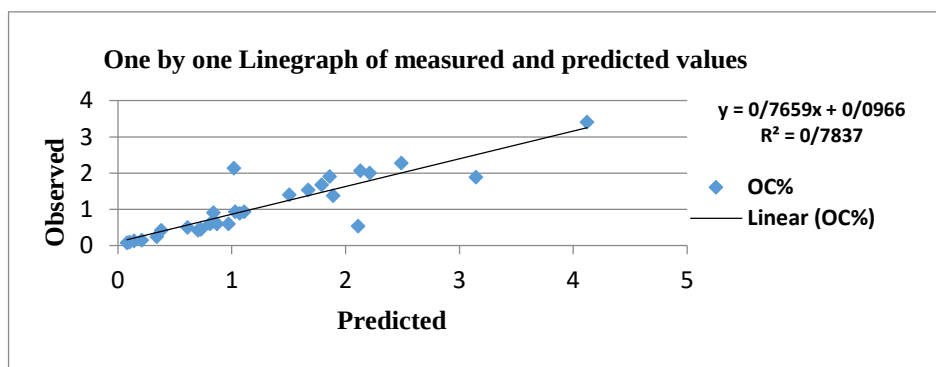
شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی کربن آلی خاک سطحی.

Figure6- Zoning map of surface soil organic carbon.



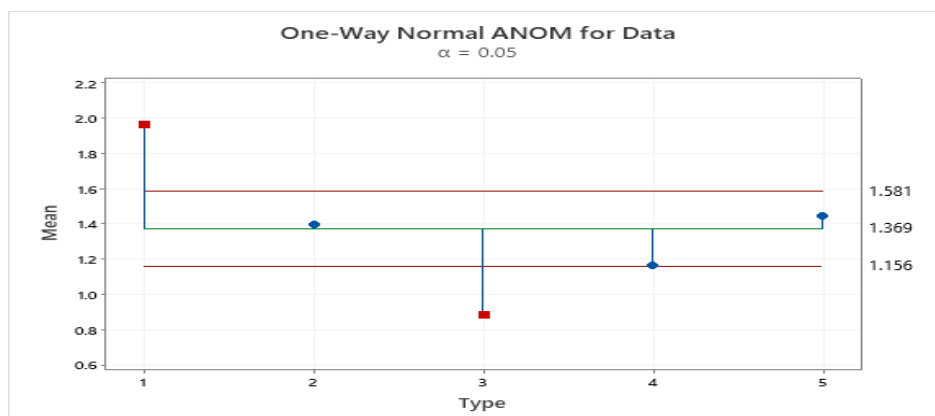
شکل ۷- داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده کربن آلی خاک سطحی در ۳۰ نمونه آزمون شده.

Figure7- Measured and predicted values in 30 tested samples.



شکل ۸- نمودار خطی یک به یک داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده کربن آلی خاک سطحی.

Figure 8- One by one line graph of measured and predicted values.



شکل ۹- گروه‌بندی میانگین کربن آلی خاک سطحی در گونه‌های گیاهی با آزمون ANOM.

Figure9- Grouping of average surface soil organic carbon in plant types by ANOM test.

شدند. با انجام آزمون تحلیل عاملی اندازه دقت داده‌ها با استفاده از شاخص KMO و آزمون کرویت بارتلت بررسی شد و متغیرهای با کوچکترین وجوه اشتراک و اندازه دقت نمونه‌گیری کوچکتر از ۰/۵ حذف شدند. این آزمون تا دستیابی به نتیجه مناسب تکرار شد و سرانجام ۸ متغیر (آلبیدوی سطح، شاخص گیاهی تفاضلی بهنجار، شاخص‌های روشنایی، سبزی‌نگی و رطوبت تبدیل تسلدکپ، شاخص رس، شیب و بلندی از سطح تراز دریا) به‌عنوان متغیرهای مناسب برای ورود به مدل تحلیل عاملی انتخاب شدند. از میان این متغیرها، ۵ متغیر از نوع طیفی و ۳ متغیر از نوع غیرطیفی بودند. که این نکته بیانگر اهمیت بیشتر متغیرهای طیفی در مقایسه با متغیرهای غیرطیفی در تبیین تغییرات متغیر پاسخ (کربن آلی خاک) بود. یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیکسینی و همکاران (۲۰۱۴) و

با توجه به گستردگی منطقه پژوهش‌شده و بررسی‌های انجام‌شده به‌وسیله دیگر پژوهشگران، متغیرهای مستقل انتخاب‌شده برای پیش‌بینی کربن آلی خاک سطحی، در دو گروه متغیرهای طیفی (به‌دست آمده از تصویرهای لندست ۸) شامل ۱۵ متغیر و متغیرهای غیرطیفی (به‌دست آمده از عامل‌های پستی‌بلندی) شامل هفت متغیر طبقه‌بندی شدند. برای خلاصه کردن این متغیرها، از روش تحلیل عاملی اکتشافی استفاده شد. با توجه به کمی بودن تحلیل عاملی، تبعیت داده‌ها از توزیع بهنجار ضرورت اجتناب‌ناپذیری است (فلوید و ویدامان ۱۹۹۵). با تکرار تحلیل عاملی و بررسی کفایت داده‌ها با استفاده از شاخص KMO و آزمون کرویت بارتلت و شناسایی و حذف متغیرهای با کوچکترین وجوه از میان ۲۲ متغیر مد نظر، فقط ۱۵ متغیر با توزیع بهنجار و مناسب برای انجام تحلیل عاملی اولیه شناخته

آمد. براساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل میانگین بهنجار یک‌طرفه (ANOM) گونه‌های گیاهی بررسی‌شده در دو گروه بیشتر از میانگین کل کربن آلی ریشگاه و کمتر از میانگین کل کربن آلی ریشگاه طبقه‌بندی شدند. الف) در گونه‌های گیاهی ۱، ۲ و ۵ اختلاف میانگین کربن آلی در لایه سطحی خاک آنها با میانگین کل نمونه‌ها (۱۵۰ نمونه) که برابر ۱/۲۶ بود در سطح احتمال ($p < 0.05$) معنی‌دار بود و محتوای کربن آلی آنها به ترتیب ۱/۹۶، ۱/۳۹ و ۱/۴۴ به‌دست آمد.

ب) گونه‌های گیاهی ۳ و ۴ اختلاف میانگین کربن آلی در لایه سطحی خاک آنها با میانگین کل نمونه‌ها (۳۶۰ نمونه) که برابر ۱/۲۶ بود در سطح احتمال ($p < 0.05$) معنی‌دار بود و محتوای کربن آلی آنها به ترتیب ۰/۸۸ و ۱/۱۶ به‌دست آمد. بر پایه نتایج این پژوهش و بر اساس مساحت و پستی‌بلندی منطقه و تعداد نمونه‌های برداشت‌شده، پیشنهاد می‌شود برای فراهم آوردن شرایط تغییر میانگین وزنی کربن آلی در خاک سطحی مراتع منطقه، تعداد نمونه‌ها را افزایش داد و نقاط نمونه‌برداری را با پراکنش مناسب‌تری تعیین کرد. بر اساس نتایج این پژوهش و با توجه به قرق بودن مراتع مربوط به گونه ۱ و وضعیت مطلوب آن در مقایسه با دیگر گونه‌ها، پیشنهاد می‌شود با مدیریت فصل چرا و نرخ مناسب دام‌گذاری، شاخص سلامت مراتع و ذخیره کربن آلی خاک را به‌طور قابل توجهی افزایش داد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه و نهایی مقاله
نویسنده دوم: ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج

موندال و همکاران (۲۰۱۷) هم‌راستا است. از میان ۵ متغیر طیفی مد نظر، کمترین اندازه ضریب همبستگی با کربن آلی خاک سطحی مربوط به شاخص رس (۰/۱۳) و بیشترین اندازه ضریب همبستگی مربوط به شاخص NDVI (۰/۲۶۲) بود. افزون بر این، نتایج آزمون همبستگی بیانگر وجود همبستگی بسیار زیاد میان شاخص‌های آلبیدوی سطح ($r = -0.541$) و روشنایی تبدیل تسلدکپ ($r = -0.473$) با کربن آلی خاک بودند. از آنجایی که شاخص‌های نامبرده بیانگر درصد بازتاب نور از سطح یک جسم هستند، با رنگ خاک ارتباط مستقیم دارند و از ضریب منفی همبستگی این شاخص‌ها با کربن آلی خاک می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ذخیره کربن آلی خاک، رنگ خاک تیره‌تر و بازتاب طیفی خاک کاهش خواهد یافت. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های ایسدادفال و همکاران (۱۹۸۹) هماهنگی دارد. ضریب همبستگی متغیرهای غیرطیفی (بلندی نسبی و شیب) با کربن آلی خاک سطحی به ترتیب برابر ۰/۱۱۵ و -۰/۱۳ محاسبه شد. از این‌رو، می‌توان گفت که با افزایش بلندی نسبی و شیب به ترتیب ذخیره کربن آلی خاک افزایش و کاهش خواهد یافت. با افزایش بلندی، شکل رویشی گیاهان به‌سوی بوته‌ای شدن گرایش می‌یابد که این قبیل گونه‌ها در مقایسه با شکل‌های رویشی گراس و پهن‌برگان علفی توان انباشت کربن بیشتری دارند (جعفریان و همکاران ۲۰۱۲؛ تمرتاش و همکاران ۲۰۱۲) و همبستگی مثبت و معنی‌دار بلندی نسبی با کربن آلی خاک مؤید این نکته بود. در این راستا، در بیشتر پژوهش‌ها، پستی‌بلندی به‌عنوان یکی از مهمترین متغیرهای تفسیرکننده توزیع مکانی ویژگی‌های مربوط به خاک (اندازه کربن آلی) به‌شمار می‌آید (وانگ و همکاران ۲۰۱۰؛ فلورینسکی ۲۰۰۲؛ مولدر و همکاران ۲۰۱۱ و شوانگارت و جارمر ۲۰۱۱).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش میانگین وزنی کربن آلی در خاک سطحی مراتع منطقه پژوهش شده ۱/۲۶٪ به‌دست

- Beven K, Kirkby N. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrology Science Bulletin*. 24 (1): 43-69.
<https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bidwell OW. 1989. Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. *Soil Survey Horizons*. 30(3): 77-79.
<https://doi.org/10.2136/sh1989.3.0077>
- Bouma J, Mcbratney AB. 2013. Framing soils as an actor when dealing with wicked environmental problems. *Geoderma*. 200-201:130-139.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.011>
- Esadafal R, Girard MC, Courault D. 1989. Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of landsat MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment*. 27 (1): 37-46.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90035-7)
- Florinsky IV, Eilers RG, Manning GR, Fuller LG. 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environmental Modelling and Software*. 17(3):295-311.
[https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00067-6)
- Floyd FJ, Widaman KF. 1995. Factor analysis in the development and refinement of clinical assessment instruments. *Psychological Assessment*. 7(3): 286-299.
<https://doi.org/10.1037/1040-3590.7.3.286>
- Franklin J, McCullough P, 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. Toronto and Brisbane. pp. 331-353.
<https://www.researchgate.net/publication/43289817>
- Jafari A, Sefidi H, Rahime M. 2023. Investigating the relationship between spatial changes of soil carbon deposition with climatic elements of temperature and precipitation in recent years (Ahangan Basin study area). *Journal of Climate Change Research*. 3 (12):1-20. (In Persian).
<https://doi.org/10.30488/ccr.2022.365475.1100>
- Jafariyan Z, Tayefeh L, Alikhani S 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*. 65(2):191-202. (In Persian).
<https://doi.org/10.22059/jrwm.2012.30011>
- Kaiser HF. 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*. 20. 141-151.
<https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Kamali N, Sadeghipour A. 2016. Determining the most important factors related to carbon storage in different land uses (Case study: Shahriar, Iran). *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*. 111: 2-8. (In Persian).
<https://doi.org/10.22092/wmej.2016.112319>
- Khalifehzadeh R, Tamartash RM, Tatian R, Sarajian Maralan MR. 2018. An estimation of topsoil organic carbon by combining factor analysis and multiple regression in semi-steppe rangelands of Lazour, Firouzkooch. *Iranian Journal of Range and Desert Research*. 25 (3): 699-712. (In Persian).
<https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.117819>
- Ma H, Peng M, Yang Z, Yang K, Zhao C, Li K, Guo F, Yang Z, Cheng H. 2024. Spatial distribution and driving factors of soil organic carbon in the Northeast China Plain: Insights from latest monitoring data. *Science of The Total Environment*. 911.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168602>
- Mirzashahi k, Bazargan k. 2015. Soil organic matter management. *Soil and Water Research Institute. Technical Publication 535*. (In Persian).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168602>
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.004>
- Mulder VL, Bruin SD, Schaepman ME, Mayr TR. 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping: A review. *Geoderma*. 162 (1): 1-19.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.018>
- Nateghi S, Khalifehzadeh R, Souri M, Khodagholi M. 2021. Spatial prediction of soil surface organic carbon using spectral and non-spectral factors (Case study; Asuran Summer Rangeland, Semnan Province). *Journal of Range and Watershed Management*. 4 (1): 177-188. (In Persian).
<https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.313256.1547>
- Olaya V. 2009. Basic land-surface parameters. *Geomorphometry Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*. 33: 141-169.
[https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00006-8)
- Piccini C, Marchetti A, Francaviglia R. 2014. Estimation of soil organic matter by geostatistical methods: use of auxiliary information in agriculture and environment

assessment. *Ecological Indicators*. 36: 301-314.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.08.009>

Rousta MJ, Pakparvar M, Soleimanpour SM, Enayati M. 2022. The role of land use and physical properties on soil organic carbon in the flood spreading fields of Kowsar Station. *Watershed Management Research*. 34-4(133): 35-149. (In Persian).

<https://doi.org/10.22092/WMRJ.2021.355443.1426>

Saha D, Kukal S, Sharma S. 2011. Landuse impacts on SOC fractions and aggregate stability in typic us ochrepts of Northwest India. *Plant Soil*. 339: 457– 470.

<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0602-0>

Schwanghart W, Jarmer T. 2011. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography: A case study from south-eastern Spain. *Geomorphology*. 126(1): 252-263.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.008>

Stevenson FJ. 1994. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. Second Edition. John Wiley and Sons Pub. 505 p.
<https://doi.org/10.1021/ed072pA93.6>

Tamartash R, Tatian MR, Yousefian M. 2012. The ability of different vegetative forms to carbon sequestration in plain rangeland of Miankaleh. *Journal of Environmental Studies*. 38 (62):45-54. (In Persian).

<https://doi.org/10.22059/jes.2012.29099>

Torkamani F, Piri Sahragard H, PahlavanRad MR, Nohtani M. 2020. Determination of soil organic carbon distribution along with affecting factors using random forest model in Ravang Minab watershed. *Agricultural Engineering*.

42 (4): 89-104. (In Persian).

<https://doi.org/10.22055/agen.2020.29872>

Wang Q, Shan Y, Shi W, Zhao F, Li Q, Sun P Wua Y. 2024. Assessing spatiotemporal variations of soil organic carbon and its vulnerability to climate change: A bottom-up machine learning approach. *Climate Smart Agriculture*. 1 (100025): 1-9.

<https://doi.org/10.1016/j.csag.2024.100025>

Wang Y, Fu B, Lü Y, Song C, Luan Y. 2010. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Quaternary Research*. 73(1):70-76. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.11.006>

Xiaoguang N, Shaoliang Z, Chengbo Z, Pengke Y, Hao W, Weitao X, Mingke S, Muhammad A. 2024. Key factors influencing the spatial distribution of soil organic carbon and its fractions in Mollisols. *Catena*. 247: (10) 108522.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108522>

Yu H, Zha T, Zhang X, Nie L, Ma L, Pan Y. 2020. Spatial distribution of soil organic carbon may be predominantly regulated by topography in a small revegetated watershed. *CATENA*. 188: (9).104459.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104459>

Zhang P, Wang Y, Sun H, Qi L, Liu H, Wang Z. 2021. Spatial variation and distribution of soil organic carbon in an urban ecosystem from high-density sampling. *Catena*. 204 (9): 105364. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105364>



Spatial Distribution of Surface Soil Organic Carbon in Vegetation Types of Chehelgazi Rangelands, Sanandaj City, Kurdistan Province

Salahudin Zahedi^{1*}, Rostam Khalifehzade²

1- Assistant Professor of Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center,
AREEO, Sanandaj, Iran

2- Researcher, Rangeland Section, Forests and Rangelands Research Institute, AREEO, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Soil organic carbon affects all physical, chemical, and biological properties of the soil, causes soil fertility and is one of the most important soils qualities. Soil organic carbon is important in terrestrial ecosystems from various aspects such as reducing greenhouse gas effects, increasing soil yield and fertility, reducing soil erodibility, increasing water and nutrient retention capacity, etc. Therefore, today it is classified as one of the determinants of soil health and is referred to as the heart of sustainable agriculture and a vital part of production systems. Organic carbon management is an inevitable necessity, especially in soils with organic carbon less than one percent (which includes most of the soils in Iran). The aim of this study was to evaluate the power of spectral and non-spectral soil factors to predict the spatial distribution of topsoil organic carbon in the semi-arid Chehelgazi rangelands of Sanandaj using factor analysis and multiple linear regression.

Materials and Methods

The satellite data used in this study was obtained from the United States Geological Survey (USGS) database. This data is Level 1 data from the Landsat 8 satellite dated 18/06/2019, with path and row numbers 167 and 35, respectively. To prepare the elevation model map of the region, 1: 25,000 topographic maps of the study area, numbers 5360-1 NE, 5360-1NW, and 5361-2 SW, respectively named Satile, Todarmala, and Haneh-Gallan, were used. By conducting field visits and applying the physiognomic-floristic method, the boundaries of homogeneous units were modified and refined, and the final map of the plant species was prepared.

Article Type: Research Article

*Corresponding Author's E-mail: zahedi51@gmail.com

Citation: Zahedi, S., Khalifehzade, R. 2025. The Spatial Distribution of Topsoil Organic Carbon in Vegetation Types of Chehelgazi Rangelands, Sanandaj City, Kurdistan Province. Watershed Management Research. 38 (3): 100-119.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.368385.1612

Received: 24 January 2025, Received in revised form: 17 February 2025, Accepted: 18 March 2025

Published online: 23 September 2025

Watershed Management Research, VOL.38, No.3 Ser. No: 148, Autumn 2025, pp.100-119.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



In order to estimate the parameters of the percentage of canopy cover, litter, stones and pebbles, and bare soil in each plant type, the step-point method was used. Soil samples from different types of rangeland in the Chehelgazi watershed were taken using a stratified random sampling method. In this regard, a number of 135 training sites were selected in the homogeneous units. Of these sites, 105 sites were used to calibrate the model and 30 sites were used to validate it. In each of the training sites, a mixed soil sample includes of 9 observations was taken from a depth of 0 to 20 cm of the surface soil, randomly. In each sample, the SOC content was determined by Walkley-Black titration method. In order to determine an appropriate model for predicting the topsoil SOC, the 21 variables were used. These variables include 14 spectral variables and the seven morphometric variables. Using Factor Analysis (EFA), technique based on exploratory method, the considered variables were classified into three factors (soil color, vegetation, lithology and physical characteristics of the soil). These three factors explained a total of 80.356% of the data changes. Using multiple linear regression, a suitable regression equation ($R^2=0.66$) was calculated to predict topsoil organic carbon.

Results and Discussion

The map of homogeneous units was prepared by overlaying three information layers of elevation classes, slope and slope directions and eliminating micro-units, rocky and inaccessible lands and agricultural lands and consists of 32 homogeneous units. A vegetation map of the region including five major vegetation types. In this study, reflectance spectral variables included 14 variables extracted from satellite images. The non-spectral variables (criterion form) also include seven variables of relative elevation, slope, transformed slope direction, general slope curvature, vertical and horizontal slope curvature, and topographic moisture index, which were obtained from the digital elevation model of the region. Then Measure of sampling adequacy (KMO) was examined by performing a factor analysis test, and variables with a KMO less than 0.5 were eliminated. This test was repeated until a suitable result was achieved, and finally 8 variables (surface albedo, normalized differential vegetation index, vegetation indices, brightness and moisture of the Tesselcap transformation, clay index, slope, and height above sea level) were selected as suitable variables to enter the factor analysis model. The root mean square error and relative mean absolute error of the proposed model were calculated as 0.191 and 0.117, respectively. The comparison of the average topsoil organic carbon capacity in plant species in the studied area using regression analysis was significant ($p<0.01$). Based on the results of this study, by analyzing the one-way normalized mean plot, the studied plant species were classified into two groups: those with more than the average total organic carbon of the habitat (species 1, 2, and 5) and those with less than the average total organic carbon of the habitat (species 3 and 4).

Conclusion and Suggestions

The results of the regression analysis of the average organic carbon storage in the topsoil of the 5 plant species in the study area showed that the average soil organic carbon in the plant species in the study area differed significantly ($p < 0.01$). The average weighted of organic carbon in the topsoil of the rangelands of the study area is 1.26%. According to the results of this study, the area and elevation of the region, and the number of samples collected, it is suggested that in order to provide conditions for changing the average weight of organic carbon in the topsoil of the region's rangelands, the number of samples should be increased and sampling points should be determined with a more appropriate distribution.

Keywords: Exploratory factor analysis, landsat spectral variables, morphometric variables, multiple linear regression, semi-arid rangelands, soil organic carbon

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, performing software/statistical analysis, writing the initial and final version of the article

Author 2: Editing and revising the article, controlling the results