



Modeling and estimation of soil organic carbon using satellite images and machine learning algorithm in Alborz province

Saeed Saadat^{1✉} | Leila Esmaeelnejad² | Hamed Rezaei³ | Rasoul Mirkhani⁴ | Amirreza Esfandiyar⁵

1. Corresponding Author, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. E-mail: saeed_saadat@yahoo.com
2. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. E-mail: esmaeelnejad.leila@gmail.com
3. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. E-mail: rezaei_h@yahoo.com
4. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. E-mail: mirkhani.rasoul@gmail.com
5. Department of Forestry Engineering and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, niversity College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: amirrezaesfandiyar@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 26 April 2025 Received in revised form 16 September 2025 Accepted 17 October 2025 Published online 21 September 2025 Keywords: <i>Digital soil mapping, Geographic Information System (GIS), Landsat 8, Random forest, Spectral indices, Soil quality.</i>	This study was conducted to model and estimate the spatial distribution of soil organic carbon (SOC) in the agricultural lands of Alborz province by integrating Landsat 8 satellite data with the Random Forest machine learning algorithm. The model was based on field data from 257 soil samples collected via a regular grid method, with their SOC content measured using the Walkley-Black method. Predictor variables included visible, near-infrared (NIR), and short-wave infrared (SWIR) spectral bands, along with relevant vegetation indices. The model's performance evaluation confirmed its high accuracy, with a coefficient of determination (R²) of 0.83 and a normalized root mean square error (NRMSE) of 12.5%. The resulting map showed an average SOC of 0.23% for the region, with the highest values concentrated in the northern and central parts of the province. Additionally, a trend analysis over the last decade showed no statistically significant changes in the mean SOC. The findings demonstrate the significant potential of combining machine learning algorithms with remote sensing data for accurate and efficient mapping of soil organic carbon at a regional scale. This approach can serve as an effective tool for sustainable soil resource management and greenhouse gas emission reduction strategies.
Cite this article: Saadat, S., Esmaeelnejad, L., Rezaei, H., Mirkhani, M., & Esfandiyar, A. (2025). Modeling and estimation of soil organic carbon using satellite images and machine learning algorithm in Alborz province. <i>Journal of Natural Environment</i>, 78 (2), 299-314. DOI: doi.org/10.22059/jne.2025.394148.2801	



مدل سازی و برآورد کربن آلی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم یادگیری ماشین در استان البرز

سعید سعادت^۱ | لیلا اسماعیل نژاد^۲ | حامد رضایی^۳ | رسول میرخانی^۴ | امیررضا اسفندیار^۵

۱. نویسنده مسئول، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: saeed_saadat@yahoo.com

۲. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: esmaeelnejad.leila@gmail.com

۳. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: rezaei_h@yahoo.com

۴. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: mirkhani.rasoul@gmail.com

۵. گروه مهندسی جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌های کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: amirrezaesfandyar@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	پژوهش حاضر به منظور مدل سازی و برآورد توزیع مکانی کربن آلی خاک در اراضی کشاورزی استان البرز با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ و الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی انجام شد. کاربرد الگوریتم‌های پیشرفته در مقیاس منطقه‌ای، پتانسیل قابل توجهی برای نقشه‌برداری دقیق و کارآمد کربن آلی خاک از طریق تلفیق یادگیری ماشین و سنجش از دور دارد و می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت پایدار منابع خاک و راهبردهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار گرفته شود. اساس مدل بر داده‌های میدانی ۲۵۷ نمونه خاک استوار بود که با روش شبکه‌بندی منظم جمع‌آوری و میزان کربن آلی آنها به روش والکلی-بلک اندازه‌گیری شد. متغیرهای پیش‌بین شامل باندهای طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز موج کوتاه و شاخص‌های گیاهی مرتبط بودند. ارزیابی عملکرد مدل، دقت بالای آن را با ضریب تعیین R^2 برابر با ۰/۸۳ و خطای استاندارد نسبی NRMSE معادل ۱۲/۵ درصد تأیید نمود. نقشه تولیدی، میانگین کربن آلی خاک منطقه را ۰/۲۳ درصد نشان داد که بیشترین مقادیر در نواحی شمالی و مرکزی استان متمرکز بود. همچنین تحلیل روند ده ساله اخیر، تغییرات آماری معنی‌داری را در میانگین کربن آلی خاک نشان نداد. نتایج این تحقیق، پتانسیل قابل توجه الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تلفیق با داده‌های سنجش از دور را برای نقشه‌برداری دقیق و کارآمد کربن آلی خاک در مقیاس منطقه‌ای اثبات می‌کند و این رویکرد می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت پایدار منابع خاک و راهبردهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار گرفته شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰	
کلیدواژه‌ها: جنگل تصادفی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، شاخص‌های طیفی، کیفیت خاک، لندست ۸، نقشه‌برداری رقومی خاک.	

استناد: سعادت، سعید؛ اسماعیل نژاد، لیلا؛ رضایی، حامد؛ میرخانی، رسول؛ و اسفندیار، امیررضا (۱۴۰۴). مدل سازی و برآورد کربن آلی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم یادگیری ماشین در استان البرز. محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۲)، ۲۹۹-۳۱۴.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.394148.2801>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

خاک به‌عنوان یک بخش حیاتی و حساس از کره زمین، نقش‌های متعددی از جمله فراهم کردن محیطی مناسب برای رشد گیاهان، پشتیبانی از فعالیت موجودات زنده، تأمین منابع غذایی برای انسان‌ها و حیوانات و ذخیره‌سازی آب ایفا می‌کند. برای مدیریت مؤثر بوم‌سازگان خاک به‌منظور اهداف مختلف، ضروری است که ویژگی‌ها و فرایندهای مرتبط با آن به دقت شناسایی شوند (Akumu et al., 2015).

کربن آلی خاک (SOC)^۱ به‌عنوان یک جزء کلیدی و پویا در محیط‌زیست، نقش قابل توجهی در تغییرات اقلیمی جهانی و بهره‌وری کشاورزی ایفا می‌کند و از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محسوب می‌شود (Oldfield et al., 2019). این ویژگی کلیدی با خصوصیات شیمیایی، فیزیکی، زیستی، کیفیت خاک و محیط‌زیست در ارتباط است و تأثیرات گسترده‌ای بر توابع خاک دارد. همچنین، به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی و مؤثر در ارزیابی اثرات محیط‌زیستی شناخته می‌شود (Esfandiyar et al., 2024). در سال‌های اخیر، تمرکز جهانی بر استفاده مناسب از خاک و پوشش‌های گیاهی به‌عنوان مخازن کربن افزایش یافته است. اتحادیه اروپا، از طریق پروژه ENVASSO، تهدیداتی مانند کاهش کربن آلی خاک، فرسایش خاک، شور شدن و بیابان‌زایی را شناسایی کرده و مدیریت کربن آلی خاک را به‌عنوان یک اولویت در سطح اروپا تعیین نموده است. به‌منظور دستیابی به اهداف استراتژی اروپا ۲۰۲۰ و بهره‌وری پایدار منابع، افزایش سطح کربن آلی خاک در خاک‌های کشاورزی مورد تأکید قرار گرفته است (Kibblewhite et al., 2008).

ماده آلی خاک به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مؤلفه‌های کیفیت و توان تولید خاک شناخته می‌شود که به‌دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص خود، تحت تأثیر عواملی مانند پوشش گیاهی، خصوصیات خاک، و شرایط اقلیمی قرار دارد. این ماده می‌تواند نقش مهمی در مدیریت خاک ایفا کرده و رفتار طیفی آن را تحت تأثیر قرار دهد. ماده آلی با فراهم کردن عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان و بهبود شرایط فیزیکی خاک، به افزایش رشد گیاه کمک می‌کند. علاوه بر این، ماده آلی با تثبیت ذرات خاک و کاهش اثرات مخرب فرسایش، به حفظ پایداری خاک کمک می‌نماید. همچنین، توانایی خاک در ذخیره و انتقال آب و هوا به‌واسطه حضور این ماده بهبود یافته و در نتیجه، رشد محصولات کشاورزی تسهیل می‌شود (Schmidt et al., 2011; Ayoubi et al., 2012; Sierra et al., 2015; Järmer and Rousseau, 2013).

کربن آلی خاک به‌شدت تحت تأثیر ورودی‌ها (مانند مواد آلی و تولید لاشبرگ) و خروجی‌ها (شامل تجزیه و آبشویی) قرار دارد و شرایط اقلیمی نقش کلیدی در پویایی این فرایندها ایفا می‌کند. اقلیم، علاوه بر تأثیرگذاری بر تولید اولیه خالص، نرخ تجزیه و آبشویی کربن آلی خاک را نیز تنظیم می‌کند. برای مثال، در اکوسیستم‌های مرطوب، افزایش دما موجب افزایش تولید و تجزیه می‌شود، اما در شرایط نیمه‌خشک تا خشک، محدودیت بارندگی بر این فرایندها حاکم است. مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات در کربن آلی خاک در مقیاس‌های منطقه‌ای به‌شدت وابسته به الگوهای بارندگی و نوع مدیریت زمین‌های کشاورزی است. همچنین، تغییرات در کاربری زمین و سیستم‌های کشت تأثیر مهمی بر در کربن آلی خاک دارد؛ به‌طوری که سیستم‌های مدیریتی با شدت کمتر، معمولاً SOC بیشتری در سطح خاک دارند (Baldock et al., 2007; Conant et al., 2008; Álvaro-Fuentes et al., 2012).

خاک می‌تواند بیش از دو برابر مقدار کربن موجود در گیاهان یا اتمسفر را ذخیره کند. بنابراین، بهبود ذخیره‌سازی کربن به‌صورت ماده آلی خاک از طریق مدیریت و پایش اراضی، گزینه‌ای مناسب برای کاهش محتوای دی‌اکسید کربن اتمسفر است (Lal et al., 1998). روش‌های مدیریتی مانند کوددهی و آبیاری می‌توانند موجب تغییر کربن آلی خاک شوند و همین‌طور کشت‌های متمرکز ممکن است اثرات منفی به‌همراه داشته باشند. براساس تحقیقات انجام‌شده، نوع سیستم استفاده از اراضی و شیوه‌های مدیریتی از جمله عوامل تعیین‌کننده در کنترل محتوای کربن آلی خاک هستند. این عوامل با تغییر در مقدار و کیفیت ورودی بقایای گیاهی و فرایندهای تثبیت ماده آلی در خاک، تأثیر مستقیمی بر محتوای SOC دارند (Six et al., 2002).

¹Soil Organic Carbon

در ایران، با توجه به موقعیت جغرافیایی خشک و نیمه خشک، کمبود در کربن آلی خاک در خاک‌های کشاورزی به عنوان یک چالش اساسی مطرح است. این مشکل به دلیل ویژگی‌های خاک، مدیریت نامناسب و فعالیت‌های کشاورزی تشدید شده است. در حال حاضر، داده‌های جامع و هماهنگ درباره کربن آلی خاک در مقیاس ملی در دسترس نیست و این مسئله نیازمند مطالعات گسترده با استفاده از داده‌های اقلیمی، خاک‌شناسی و توپوگرافی است. ایجاد مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر این داده‌ها می‌تواند به تدوین سیاست‌ها و استراتژی‌های مناسب برای بهبود در کربن آلی خاک در خاک‌های کشاورزی ایران کمک کند (Rezaei et al., 2022).

در مجموع، بررسی عوامل مؤثر بر در کربن آلی خاک از جمله اقلیم، مدیریت اراضی و ویژگی‌های خاک نشان می‌دهد که این متغیرها به طور پیچیده‌ای بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. بنابراین، برای دستیابی به مدیریت پایدار و حفاظت از خاک، درک جامعی از این تعاملات ضروری است (Fang et al., 2022).

از سوی دیگر، پراکندگی مکانی در کربن آلی خاک در خاک‌های کشاورزی به دلیل تأثیرات انسانی و شرایط محلی، به شدت متغیر است. برای تخمین دقیق کربن آلی خاک در مقیاس‌های منطقه‌ای و ملی، نمونه‌برداری گسترده خاک ضروری است، اما این روش به دلیل هزینه و زمان‌بر بودن و وجود خطاهای احتمالی، چالش‌برانگیز است. از این رو، تکنیک‌های تخمین و مدل‌سازی مختلفی برای پیش‌بینی SOC در مقیاس‌های بزرگ‌تر توسعه یافته و به کار گرفته شده‌اند. این تکنیک‌ها امکان شبیه‌سازی تغییرات در کربن آلی خاک را در شرایط مختلف فراهم می‌کنند و به سیاست‌گذاران کمک می‌کنند تا راهبردهای مدیریتی مناسبی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای و حفاظت از خاک اتخاذ کنند (Suliman and AlGarni, 2019).

برای بهبود تعیین مقدار و مدل‌سازی تغییرات مکانی در کربن آلی خاک، نیاز به روش‌های قابل اعتماد توزیع مکانی وجود دارد. در این راستا، Mondal و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای در مرکز هند از روش درون‌یابی تلفیقی رگرسیون کریجینگ و داده‌های سنجنش از دور استفاده کردند. آنها برای پیش‌بینی SOC از متغیرهایی مانند شاخص روشنایی (BI)^۲، شاخص سبزی‌نگی (GI)^۳، شاخص خیس‌ی (WI)^۴، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)^۵، شاخص وضعیت دمایی پوشش گیاهی (VTCl)^۶، مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۷، شیب زمین و شاخص ترکیبی توپوگرافی (CTI)^۸ بهره گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که روش رگرسیون کریجینگ نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد و SOC در اراضی پست و خاک‌های رسی به طور قابل توجهی بالاتر است (Mondal et al., 2015).

شناسایی تغییرات کربن آلی خاک به منظور ارزیابی ذخیره‌سازی کربن در خاک‌ها و همچنین بهبود کیفیت خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. با این حال، نرخ تغییرات SOC محدود بوده و تغییرات مکانی قابل توجهی حتی در فواصل کوتاه مشاهده می‌شود. اندازه‌گیری این تغییرات به روش‌های تحلیلی در آزمایشگاه به دلیل هزینه و زمان زیاد، به‌ویژه در کاربردهای مقیاس وسیع که نیازمند تعداد بالای نمونه‌های خاک است، چالش‌برانگیز می‌باشد. بنابراین، نیاز به استفاده از تکنیک‌های نظارتی برای ارزیابی مؤثر SOC احساس می‌شود (Lal et al., 1998).

کیفیت نمونه‌برداری و دقت در تحلیل‌های آزمایشگاهی نقش مهمی در فرآیند تهیه نقشه کربن آلی خاک ایفا می‌کند. برای تعیین توزیع کربن آلی در خاک، روش‌های مختلفی از جمله نمونه‌برداری شبکه‌ای و منطقه‌ای به کار گرفته می‌شود. با توجه به پیچیدگی‌های فنی، هزینه‌بر بودن و زمان‌بر بودن آماده‌سازی نمونه‌ها برای تجزیه و تحلیل، معمولاً تعداد محدودی نمونه از اراضی تهیه و آنالیز می‌شود. بیان مقدار کربن آلی خاک در اراضی وسیع تنها براساس ویژگی‌هایی مانند میانگین کلی، به‌ویژه در مناطق گسترده، ناکافی است. این موضوع نیاز به استفاده از روش‌های کارآمدتر و دقیق‌تر را برجسته می‌سازد (Basak et al., 2007).

^۲Brightness Index

^۳Green Index

^۴Wetness index

^۵Normalized Difference Vegetation Index

^۶Vegetation temperature condition index

^۷Digital elevation model

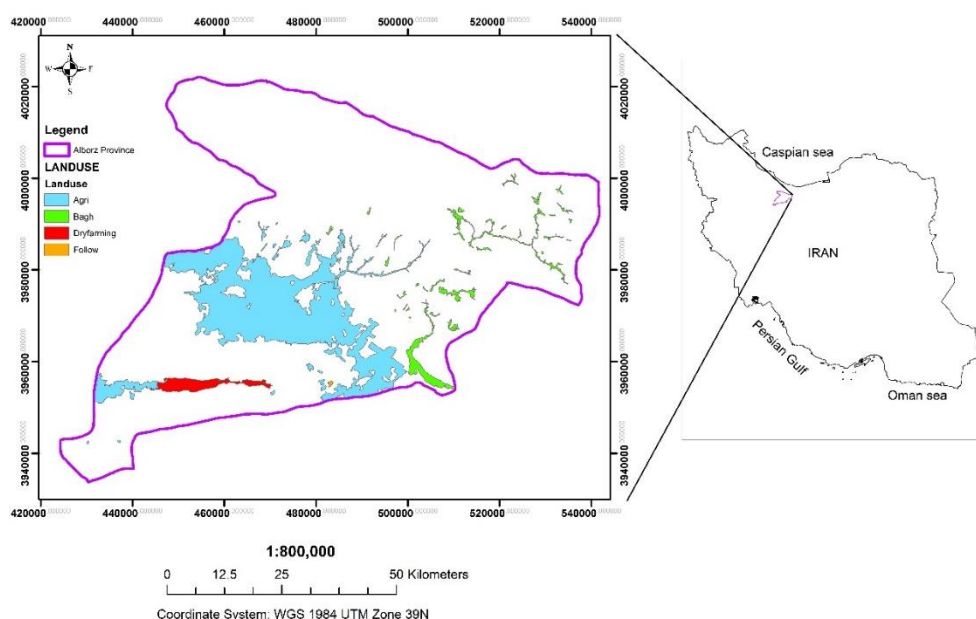
^۸Compound topographic index

استفاده از روش‌های معمول و قدیمی برای تعیین مقدار کربن آلی خاک، علاوه بر زمان‌بر بودن، هزینه‌های زیادی را به همراه دارد. در این زمینه، فناوری سنجش از دور به‌عنوان روشی بسیار مفید شناخته شده است که امکان دستیابی به اطلاعاتی جامع از خاک و پوشش گیاهی را در مقیاس‌های گسترده و مناطق مختلف فراهم می‌کند. ویژگی‌هایی مانند ارائه دید وسیع و یکپارچه از مناطق، تکرارپذیری، دسترسی آسان به اطلاعات، و دقت بالای داده‌ها از جمله دلایلی هستند که استفاده از این فناوری را برای بررسی میزان کربن آلی خاک و پایش تغییرات آن نسبت به روش‌های سنتی برتر کرده است. تصاویر ماهواره‌ای، به دلیل توانایی ثبت انرژی بازتابی پدیده‌ها، ابزار ارزشمندی برای برآورد غیرمستقیم SOC هستند. این تصاویر قادرند طیف وسیعی از امواج الکترومغناطیسی را ثبت کنند و بازتاب انرژی پدیده‌های مختلف را تحلیل نمایند. با توجه به اینکه SOC تأثیر مستقیم بر جذب نور، حرارت و رطوبت دارد، می‌توان با استفاده از داده‌های طیفی مانند مادون قرمز نزدیک و حرارتی و ترکیب آنها با داده‌های آزمایشگاهی، SOC خاک را برآورد کرد. این روش‌ها به دلیل دقت بالا و کارایی در ارزیابی SOC، ابزار مؤثری برای مدیریت و حفاظت از خاک محسوب می‌شوند (Chen et al., 2015).

بررسی سوابق تحقیق نشان می‌دهد که اگرچه روش‌های سنتی ارزیابی کربن آلی خاک به دلیل هزینه و زمان‌بر بودن برای مقیاس‌های بزرگ کارایی ندارند، اما مطالعات اخیر پتانسیل بالای تلفیق داده‌های سنجش از دور و روش‌های یادگیری ماشین را برای غلبه بر این چالش اثبات کرده‌اند. این تحقیقات عمدتاً بر ارتباط میان بازتاب طیفی خاک و میزان ماده آلی تمرکز داشته‌اند. با این حال، نوآوری پژوهش حاضر در به‌کارگیری الگوریتم قدرتمند جنگل تصادفی برای مدل‌سازی این روابط پیچیده و غیرخطی در اراضی کشاورزی استان البرز است؛ منطقه‌ای که فاقد داده‌های مکانی جامع در این زمینه می‌باشد. بر این اساس، این پژوهش با هدف اصلی تهیه نقشه توزیع مکانی کربن آلی خاک‌های کشاورزی استان البرز و ارزیابی تغییرات آن طی یک دهه گذشته انجام شد و در نهایت، صحت و دقت مدل پیش‌بینی به‌طور کامل مورد ارزیابی قرار گرفت.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مطالعاتی: منطقه مورد مطالعه، اراضی کشاورزی استان البرز، در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز مرکزی واقع شده و به دلیل اختلاف ارتفاع چشمگیر از شمال به جنوب، دارای تنوع بسیار بالایی در شرایط اقلیمی، توپوگرافی و ویژگی‌های خاک‌شناسی است (شکل ۱). شرایط اقلیمی منطقه از نیمه مرطوب سرد در ارتفاعات شمالی با بارش سالانه حدود ۶۰۰ میلی‌متر، تا خشک و بیابانی در دشت‌های جنوبی با بارش کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر متغیر است. خاک‌های منطقه، که عمدتاً در رده‌های Entisols، Inceptisols و Aridisols طبقه‌بندی می‌شوند، طیفی از خاک‌های کم‌عمق در نواحی کوهستانی تا خاک‌های عمیق آب‌رفتی در دشت‌ها را در بر می‌گیرند. اراضی کشاورزی، که تمرکز اصلی این پژوهش است، در دشت‌های مرکزی و غربی با شیب ملایم (کمتر از ۶ درصد) واقع شده و تحت کشت متمرکز محصولات نظیر گندم، جو و ذرت علوفه‌ای قرار دارند (Statistical Yearbook of Alborz Province, 2012).



شکل ۱- موقعیت استان البرز و پراکندگی اراضی کشاورزی مورد مطالعه در منطقه

روش شناسی

طراحی نقاط نمونه برداری: در طراحی نقاط نمونه برداری، توجه به اهداف تحقیق، مقیاس مطالعه، فرضیات اولیه و ویژگی های تغییرپذیر از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این دقت به ویژه در مطالعاتی که با پهنه وسیع و پیچیدگی های اجرایی، همچون تغییرات قابل توجه در فاکتورهای مختلف، همراه هستند، ضرورت بیشتری پیدا می کند. بنابراین، طراحی نمونه برداری باید به طور دقیق و با در نظر گرفتن تمامی ویژگی های محیطی و اقلیمی منطقه صورت پذیرد. در گام نخست، استفاده از نقشه ها و تصاویر ماهواره ای به منظور بررسی دقیق تر منطقه ضروری است. تصاویر ماهواره ای، به ویژه آنهایی که از منابعی همچون Google Earth Engine قابل دسترسی و پردازش هستند، این امکان را فراهم می آورند که بدون نیاز به محاسبات پیچیده برای تصحیح اثرات اتمسفری، بررسی های لازم انجام شود. نقشه های پایه ای همچون کاربری اراضی، توپوگرافی، ارتفاع محلی و ویژگی های زمین شناسی در این مرحله برای تفکیک منطقه به بخش های مختلف و انتخاب نقاط نمونه برداری به کار گرفته شدند. در ادامه، با استفاده از روش شبکه بندی منظم با ابعاد 1650×1650 متر، نقاط نمونه برداری به صورت منظم و دقیق در سطح منطقه پراکنده شدند. در این تحقیق، تعداد ۲۵۷ نمونه از سطحی با مساحت تقریبی ۶۰۰۰۰ هکتار جمع آوری شد. پس از انتخاب پایگاه های نمونه برداری که در نقشه با طول و عرض جغرافیایی مشخص شده اند، لازم است نمونه برداری خاک در هر پایگاه انجام شود. برای نمونه برداری، دایره نمونه برداری به قطر ۵۰ متر به حداقل ۵ قطعه مساوی تقسیم شده و از هر یک از قطعات، یک زیر نمونه به وزن یک کیلوگرم از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متر تهیه و سپس زیر نمونه ها با هم مخلوط شدند. پس از هوا خشک کردن نمونه ها، آنها از الک با اندازه دو میلی متر عبور داده شدند. در نهایت، میزان کربن آلی خاک با استفاده از روش واکنش والکلی-بلک (WB)^۹ اندازه گیری شد. همچنین ویژگی های بافت خاک و اجزای آن، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، هدایت الکتریکی، pH و گچ خاک نیز تعیین شدند. این فرآیند به منظور دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد، به ویژه برای تحلیل های عمیق تر و تصمیم گیری های علمی و مدیریتی طراحی شده است.

تکنیک سنجش از دور: در مطالعه حاضر، از تصاویر سنجنده OLI لندست ۸ (تاریخ ۲۲ جولای) به عنوان داده های پایه استفاده شده است که از Google Earth Engine دریافت گردید. از آنجا که تصاویر رقومی سنجنده لندست ۸ زمین مرجع هستند، نیازی به انجام تصحیح هندسی ندارند. در راستای اهداف تحقیق، باندهای مختلف شامل باندهای مرئی (۲، ۳ و ۴)، مادون قرمز نزدیک (باند ۵)، مادون قرمز طول موج کوتاه (باندهای ۶ و ۷) با اندازه پیکسل ۳۰ متر، و باندهای حرارتی (باندهای ۱۰ و ۱۱) با اندازه

^۹Walkey and black

پیکسل ۱۰۰ متر به منظور استخراج ویژگی‌های طیفی مرتبط با نقاط زمینی و انجام تحلیل‌های مورد نیاز به کار گرفته شدند. در این پژوهش، شاخص رطوبت، پوشش گیاهی، توپوگرافی و اقلیم محاسبه گردیدند. اطلاعات مربوط به این شاخص‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در مرحله بعد از روش داده‌کاوی مبتنی بر داده‌های میدانی برای مدل‌سازی استفاده شد. این فرآیند با به کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین، به طور خاص در این پژوهش جنگل تصادفی در زبان برنامه‌نویسی R انجام گردید. در نهایت، نتایج مدل‌ها با کمک سامانه Google Earth Engine و نرم‌افزار Arc GIS 10.8 تهیه و تحلیل شد.

جدول ۱- شاخص‌های مستخرج شده از داده‌های لندست ۸ برای تهیه نقشه کربن آلی خاک

ردیف	نام شاخص	فرمول
۱	شاخص شوری نرمال شده	$NDSI = (Red - NIR) / (Red + NIR)$
۲	شاخص پوشش گیاهی نرمال شده	$NDVI = (NIR - Red) / (Red + NIR)$
۳	شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده	$SAVI = (1 + L) (NIR - Red) / (NIR + Red + L)$
۴	شاخص شوری-خاک-پوشش گیاهی	$VSSI = 2Green - 5(Red - NIR)$
۵	شاخص عمودی پوشش گیاهی	$PVI = NIR - R - b / \sqrt{1 + a^2}$
۶	شاخص درجه روشنایی	$BI = \sqrt{R^2 + NIR^2}$
۷	شاخص گیاهی بهبود یافته	$EVI = 2.5 \times (NIR - RED) / (NIR + 6 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1)$
۸	شاخص نرمال شده تفاوت آب	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$

مدل‌سازی کربن آلی خاک: مدل جنگل تصادفی یک روش یادگیری ماشین محبوب است که در تحلیل سنجش از دور کاربرد وسیعی دارد. این مدل نسبت به مدل‌های سنتی مانند درخت تصمیم پایدارتر است و می‌تواند عملکرد را در شبیه‌سازی پدیده‌ها به‌ویژه در موقعیت‌هایی با داده‌های پیچیده و غیرخطی بهبود بخشد (Mehrabi et al., 2020).

در این پژوهش، اطلاعات کربن آلی خاک با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 بر روی متغیرهای مختلف همپوشانی شد. پس از تلاقی، مقادیر طیفی شاخص‌ها و باندها براساس مختصات هر نقطه در قالب جدول توصیفی استخراج و ذخیره گردید. ارتباط میان کربن آلی خاک و هر یک از شاخص‌ها و باندهای حاصل از تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزار و زبان آماری R محاسبه شد. تحلیل‌های آماری میان کربن آلی خاک (به عنوان متغیر وابسته) و باندها و شاخص‌ها (به عنوان متغیرهای مستقل) انجام شد و روابط رگرسیونی با دقت بالا استخراج گردید. این روابط آماری با استفاده از نقاط آزمون اعتبارسنجی شده و بهترین مدل شناسایی کربن آلی خاک براساس بیشترین دقت و کمترین خطای آماری انتخاب شد. به منظور ارزیابی صحت مدل نهایی، داده‌ها به دو گروه آموزش و آزمون با نسبت ۷۵ به ۲۵ درصد تقسیم شدند و ۲۵ درصد از نقاط برای اعتبارسنجی کنار گذاشته شد. مدل نهایی، که منجر به تولید نقشه کربن آلی خاک شد، با نقاط آزمون تلاقی داده شده و صحت مدل ارزیابی گردید (Bandak et al., 2024).

پس از تعیین روش مناسب برای تولید نقشه سنجش از دور در مرداد ۱۴۰۳ (زمان نمونه‌برداری فاز اول)، از این روش برای تهیه نقشه کربن آلی خاک در بازه زمانی ۱۰ ساله قبل از آن استفاده گردید. در نهایت، با استفاده از نقشه‌های به دست آمده، روند تغییرات کربن آلی سطح خاک استان البرز در بازه زمانی ۱۰ ساله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Elshehy et al., 2024). در این مرحله، از معادله رگرسیونی به دست آمده در فروردین ۱۴۰۳ برای تولید نقشه کربن آلی خاک برای سال ۱۳۹۳ استفاده شد؛ به طور خاص، با اعمال معادله رگرسیونی و جای‌گذاری روش مناسب، هر DN به میزان کربن آلی خاک تبدیل گردید.

ارزیابی دقت نقشه‌های کربن آلی خاک: برای ارزیابی دقت مدل در تخمین کربن آلی خاک، از چندین آماره مختلف استفاده شد. این آماره‌ها شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) بودند. معادلات مربوط به این آماره‌ها در روابط (۱) تا (۳) ارائه شده است.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - y)^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y} - y)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y} - y|}{N} \quad (3)$$

که در آنها $\hat{y}$ مقادیر پیش‌بینی شده، y مقادیر مشاهده شده، $\bar{y}$ میانگین مقادیر مشاهده شده و N تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

یافته‌های پژوهش

در جدول ۲ آنالیز آماری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استان البرز ارائه شده است. نتایج نشان داد که اسیدیته خاک منطقه مورد مطالعه خنثی و تا حدودی به سمت قلیایی بوده و میزان شوری خاک منطقه کم می‌باشد. با توجه به نتایج جدول ۲، فراوانی بافت خاک منطقه نشان داد که عمده خاک‌ها دارای بافت لومی شنی می‌باشد.

جدول ۲- آنالیز آماری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استان البرز

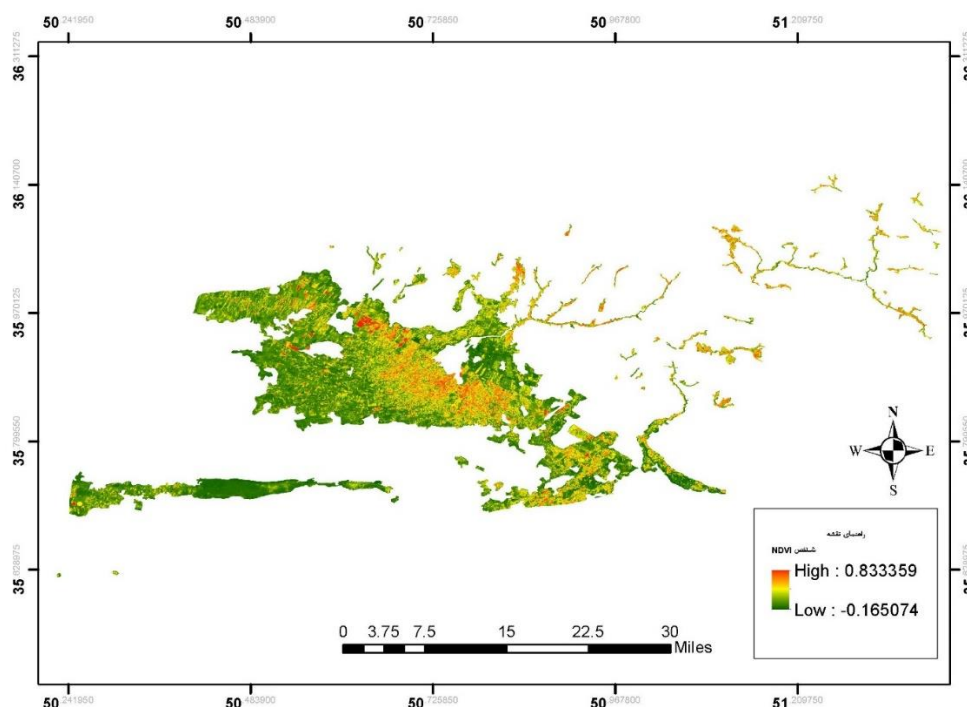
ویژگی	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	کشیدگی	چولگی	میانگین
گچ (Gypsum)	۲/۱۶۱	۰	۳۷/۳	۷۳/۰۳۴	۷/۷۰۸	۰/۴۰۵
pH	۰/۲۵۱	۷/۲	۹	۱/۳۸۱	۰/۳۶۰	۷/۹۵۲
هدایت الکتریکی (EC)	۶/۲۲۳	۰/۴۳	۶۳/۱	۳۴/۳۴۹	۵/۲۰۵	۳/۶۰۵
پتانسیم قابل استفاده (k_{ava})	۳۴۴/۲۵۱	۳۷/۹۶۶	۳/۶۰۵	۱۵/۵۰۵	۷/۹۵۲	۳۴۳/۶۹۹
فسفر قابل استفاده (p_{ava})	۵۳۵/۷۱۷	۳۴۴/۲۵۱	۳۷/۹۶۶	۷/۹۵۲	۳/۶۰۵	۱۵/۵۰۵
کربن آلی (OC%)	۰/۴۳۶	۰/۰۷	۳/۵۳۲	۶/۱۶۹	۱/۶۶۴	۰/۷۹۵

جدول ۳- فراوانی بافت خاک استان البرز

سیلت (silt)	رس (clay)	شن (sand)
۲۷/۲۳۵۰۹	۳۵/۴۴۴۹۵	۳۷/۳۱۹۹۵
فراوانی بافت خاک (درصد)		

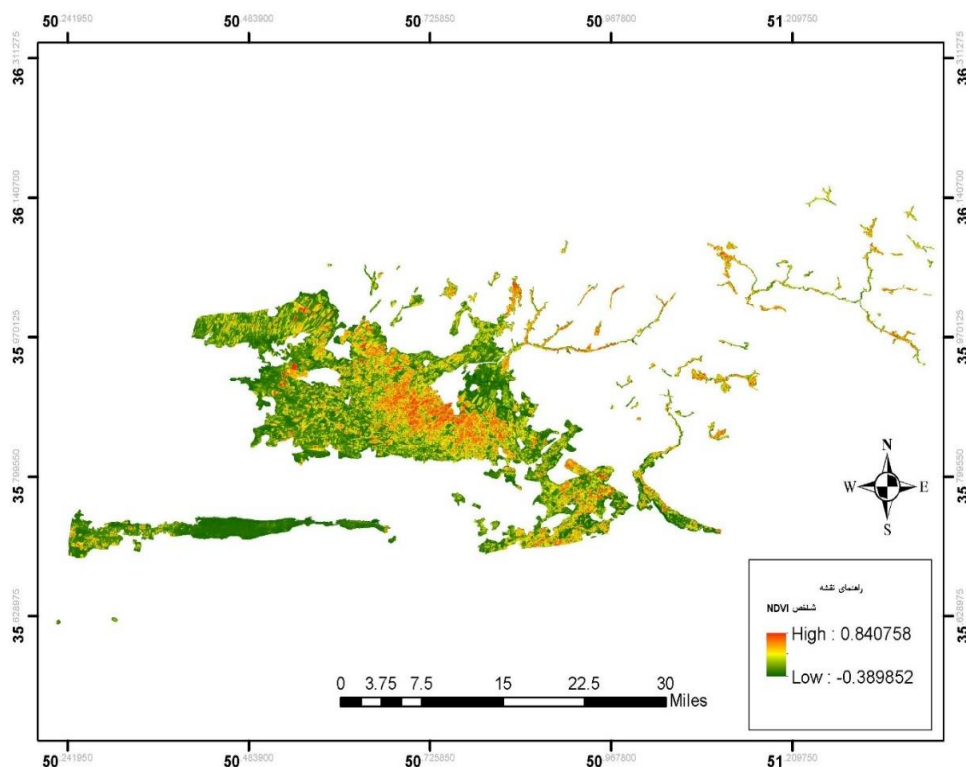
داده‌های کربن آلی خاک که از طریق نمونه‌برداری زمینی در سال ۲۰۲۳ به دست آمده‌اند، همراه با نتایج آنالیز آماری ارائه شده در جدول ۳، به همراه داده‌های انعکاسی حاصل از باندهای مختلف ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های گیاهی و رطوبتی محاسبه شده، برای تحلیل استفاده گردیدند. سپس، در زبان برنامه‌نویسی R و با بهره‌گیری از روش رگرسیون جنگل تصادفی (Random Forest)، این داده‌ها مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج این تحلیل‌ها برای ارزیابی عملکرد این روش در برآورد کربن آلی خاک در منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ بررسی شدند. در این تحقیق، قابلیت تخمین مقادیر مواد آلی خاک از طریق باندهای سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های استخراج شده از آنها در اراضی کشاورزی استان البرز ارزیابی شد. مطابق با داده‌های ارائه شده در جدول ۲، میانگین میزان ماده آلی خاک (۰/۷۹۵) در نقاط نمونه‌برداری شده از سطح استان البرز پایین بوده و کمی بالاتر از حد استاندارد کشور (۰/۵٪) است.

برآورد شاخص‌های طیفی: با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، نقشه‌های شاخص NDVI برای سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۱۴ در اراضی کشاورزی استان البرز تهیه شد. این نقشه‌ها به منظور بررسی پوشش گیاهی در سطح استان و همچنین به عنوان ابزاری برای برآورد میزان کربن آلی خاک در منطقه استفاده شدند. داده‌های NDVI به طور مؤثری اطلاعات مربوط به وضعیت پوشش گیاهی و تغییرات آن در طول زمان را فراهم کرده و به تحلیل‌های مرتبط با تخمین مقدار کربن آلی خاک کمک نمودند. در شکل ۲ نقشه‌های تغییرات شاخص پوشش گیاهی استاندارد (NDVI) مربوط به سال ۲۰۲۴ اراضی کشاورزی استان البرز ارائه شده است.

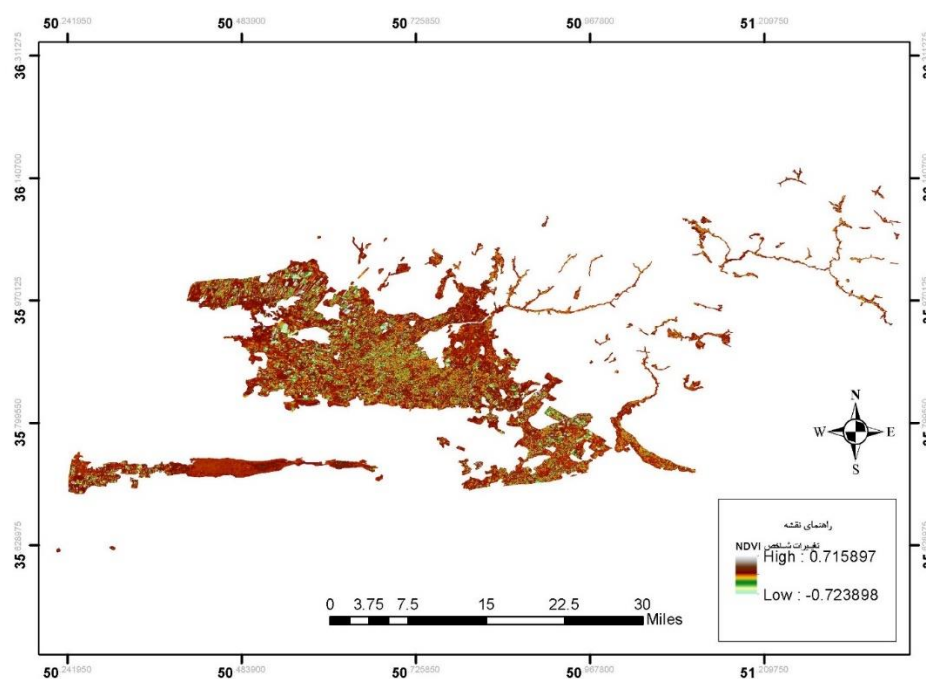


شکل ۲- نقشه تغییرات شاخص پوشش گیاهی استاندارد (NDVI) مربوط به سال ۲۰۲۴

نتایج نشان داد که مناطق شمالی و مرکزی استان البرز بیشترین میزان شاخص NDVI ($0/84$) را داشته و مناطق جنوبی و غربی استان ($-0/38$) کمترین میزان این شاخص را دارا می‌باشند. همچنین شاخص پوشش گیاهی در سطح استان برابر با $0/26$ می‌باشد که نشان‌دهنده وضعیت متوسط شاخص در اراضی کشاورزی استان البرز است. به منظور پایش و ارزیابی پوشش گیاهی به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار در برآورد میزان کربن آلی خاک وضعیت این شاخص نسبت به ده سال گذشته بررسی گردید. به همین منظور نقشه شاخص پوشش گیاهی مربوط به سال ۲۰۱۴ استخراج گردید (شکل ۳). نتایج نشان داد که بیشترین میزان این شاخص ($0/84$) و همین‌طور کمترین میزان آن در سطح استان ($-0/38$) تفاوت چشمگیری با میزان این شاخص در سال ۲۰۲۴ نداشته است. این موضوع در مورد میانگین این شاخص در اراضی کشاورزی استان البرز در سال ۲۰۱۴ ($0/25$) نیز مشهود می‌باشد. در شکل ۴ نقشه تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) بین سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ ارائه شده است.



شکل ۳- نقشه تغییرات شاخص پوشش گیاهی استاندارد (NDVI) مربوط به سال ۲۰۱۴



شکل ۴- نقشه تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

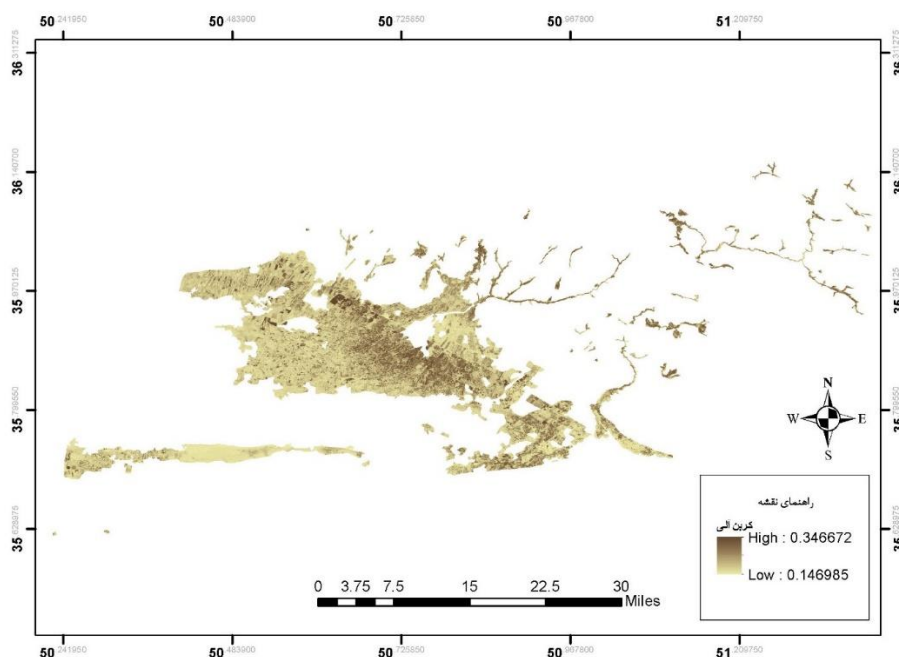
نتایج نشان داد که با توجه به اینکه میزان میانگین این شاخص در سطح استان طی ۱۰ سال گذشته تغییر قابل توجهی نداشته است اما بیشینه ($0/71$) و کمینه ($-0/72$) تغییرات این شاخص طی ۱۰ سال گذشته در مناطق مختلف استان البرز بالا بوده است.

دقت مدل سنجش از دور: پس از مدل‌سازی و برآورد کربن آلی خاک براساس مدل رگرسیون جنگل تصادفی (RF)، نتایج R^2 و RMSE و MAE براساس داده‌های آموزشی و تست به‌منظور صحت‌سنجی مدل بررسی و ارزیابی گردید. نتایج اعتبارسنجی داده‌های آزمون با نقشه‌های تولید شده در جدول ۴ ارائه شده است. بر این پایه، مقادیر مثبت MAE نشان‌دهنده بیش برآورد کربن آلی خاک توسط فن سنجش از دور است. همچنین مقادیر NRMSE تمام نقشه‌های فوق (۱۲/۵٪) در محدوده ۲۰-۱۰٪ قرار دارد که نشان‌دهنده وضعیت مناسب برآورد نقشه‌ها می‌باشد. همچنین ضریب تبیین تمام نقشه‌ها (۰/۸۳) بین ۰/۷۱-۰/۶۵ قرار دارد که حاکی از دقت مناسب نقشه‌های برآورد شده است.

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی داده‌های آزمون با مدل ایجاد شده و نقشه‌های تولید شده

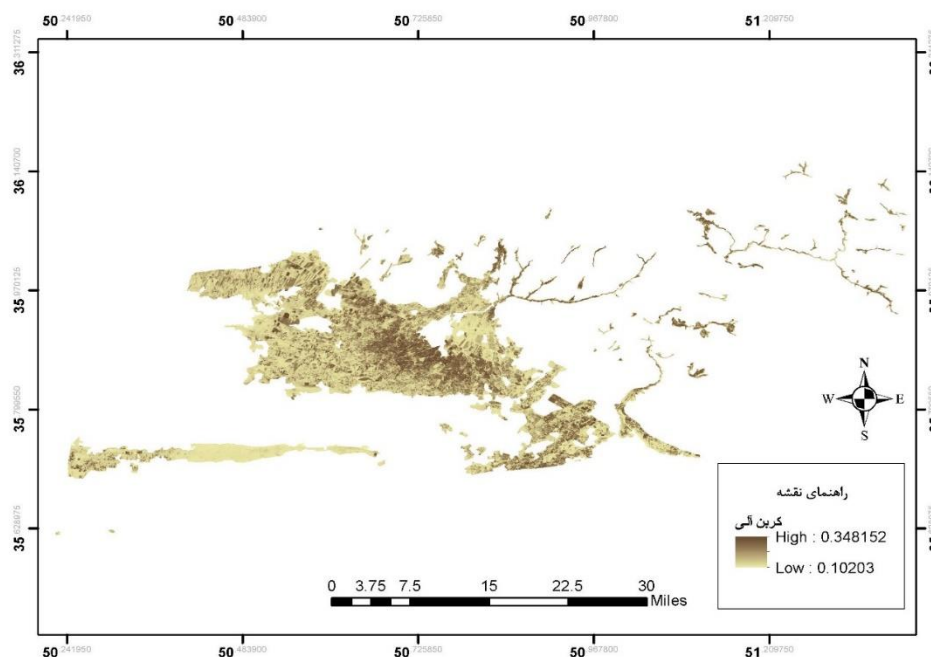
تاریخ بررسی	MAE	NRMSE	R^2
مارس ۲۰۱۹ (فروردین ۹۸)	۲/۰۶	۱۲/۵	۰/۸۳

توزیع مکانی کربن آلی خاک: نقشه کربن آلی خاک منطقه مورد مطالعه به‌دست آمده از مدل در شکل ۵ ارائه شده است. براساس پیش‌بینی مدل، بیشترین و کمترین مقدار کربن آلی خاک در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب برابر با ۰/۳۶ و ۰/۱۴ بوده است. بیشترین مقدار کربن آلی در مناطق شمالی و مرکزی استان البرز بوده و کمترین میزان آن مربوط به مناطق جنوبی و غربی استان می‌باشد. همچنین میانگین کربن آلی منطقه مورد مطالعه برابر ۰/۲۳ می‌باشد.



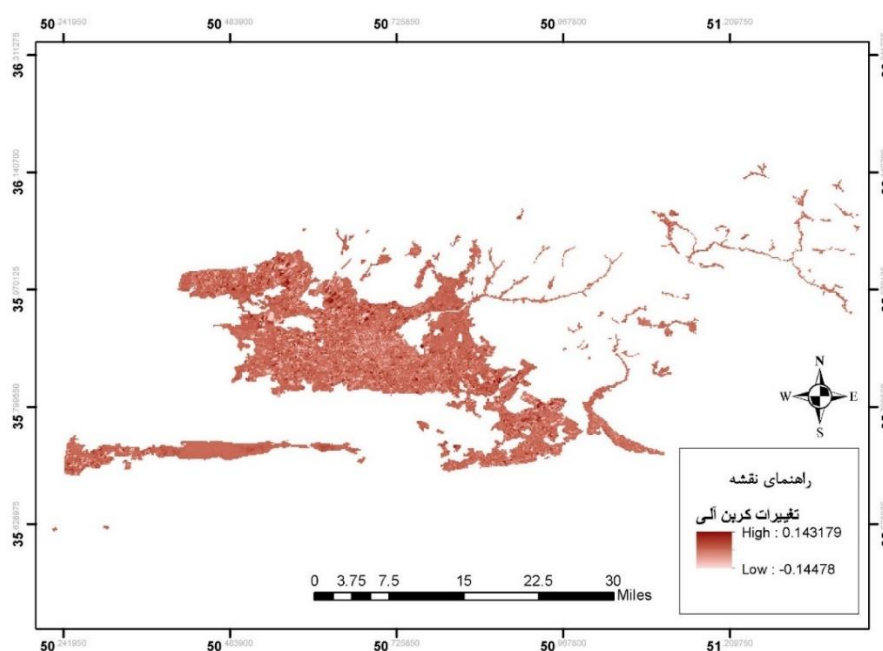
شکل ۵- نقشه توزیع کربن آلی خاک بر مبنای مدل و تلفیق داده‌های سنجش از دور

در گام بعدی به‌منظور پایش و بررسی تغییرات کربن آلی خاک استان البرز طی ۱۰ سال گذشته با استفاده از مدل به‌دست آمده، نقشه کربن آلی مربوط به سال ۲۰۱۴ با استفاده از فن سنجش از دور استخراج گردید (شکل ۶).



شکل ۶- نقشه کربن آلی خاک سال ۲۰۱۴

نتایج نشان داد که بیشینه و کمینه کربن آلی در سال ۲۰۱۴ به ترتیب برابر ۰/۳۴ و ۰/۱۰ در سطح استان بوده است. مشابه سال ۲۰۲۴ بیشترین میزان کربن آلی در قسمت‌های مرکزی و شمالی استان و کمترین میزان آن نیز در قسمت‌های جنوب غربی استان البرز بوده است. میانگین کربن آلی خاک در سال ۲۰۱۴ نیز ۰/۲۳ برآورد گردید. به منظور مقایسه میانگین‌های کربن آلی خاک در سطح استان البرز طی ۱۰ سال گذشته از آزمون t استفاده شد. نتایج آزمون نشان می‌دهد که مقدار t معادل ۱/۵۷۴ و P -value برابر با ۰/۱۱۵۷۷ است، که نشان‌دهنده عدم معناداری آماری در سطح ۰/۰۵ می‌باشد و بدین ترتیب تفاوت مشاهده شده از نظر آماری معنی‌دار نخواهد بود. در نتیجه تغییرات معنی‌داری طی ۱۰ سال گذشته در میانگین میزان کربن آلی استان البرز مشاهده نشده است. در شکل ۷ نقشه تغییرات کربن آلی استان البرز بین سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ ارائه شده است. مطابق نقشه تغییرات کربن آلی بیشترین میزان تغییر در کربن آلی خاک در سطح اراضی کشاورزی استان البرز برابر ۰/۱۴ بوده است.



شکل ۷- نقشه تغییرات کربن آلی استان البرز

بحث و نتیجه‌گیری

کربن آلی خاک (SOC) به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین شاخص‌های سلامت خاک و یک جزء کلیدی در چرخه جهانی کربن، نقشی بنیادین در امنیت غذایی، پایداری اکوسیستم‌ها و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی و تهیه نقشه توزیع مکانی کربن آلی خاک در اراضی کشاورزی استان البرز، با بهره‌گیری از تلفیق داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای لندست ۸ و الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی (Random Forest)، در راستای پیشرفت‌های جهانی در حوزه نقشه‌برداری رقومی خاک (Digital Soil Mapping - DSM) گام برداشته است. رویکرد اتخاذ شده در این تحقیق، که بر پایه تلفیق سنجش از دور و یادگیری ماشین استوار است، به‌عنوان یک پارادایم نوین و کارآمد در علوم خاک شناخته می‌شود که به‌طور مؤثری بر محدودیت‌های زمانی و هزینه‌ای روش‌های سنتی نمونه‌برداری و تحلیل آزمایشگاهی فائق می‌آید و امکان پایش مستمر و گسترده ویژگی‌های خاک را فراهم می‌سازد (Lima et al., 2025). انتخاب تصویر ماهواره‌ای مربوط به ماه جولای (تیر-مرداد) برای این مطالعه، یک انتخاب هوشمندانه و منطبق بر اصول علمی بوده است. در مناطق نیمه‌خشک مانند استان البرز، این بازه زمانی اغلب پس از فصل برداشت محصولات زراعی اصلی قرار دارد و سطح خاک با کمترین پوشش گیاهی مواجه است. این شرایط، تداخل ناشی از پوشش گیاهی و رطوبت خاک را به حداقل می‌رساند؛ دو عاملی که به‌عنوان مهم‌ترین چالش‌ها در برآورد طیفی کربن آلی خاک از طریق سنجش از دور شناخته می‌شوند (Ladoni et al., 2010). بنابراین، چارچوب روش‌شناختی این پژوهش نه تنها با روندهای روز دنیا همسو است، بلکه به‌طور خاص برای غلبه بر چالش‌های محیطی منطقه مورد مطالعه بهینه‌سازی شده است.

یکی از برجسته‌ترین دستاوردهای این پژوهش، دستیابی به ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۸۳ در مجموعه داده‌های آزمون است که نشان‌دهنده قدرت پیش‌بینی بسیار بالای مدل جنگل تصادفی در شرایط استان البرز می‌باشد. این نتیجه، مطالعه حاضر را در رده پژوهش‌های با عملکرد بالا در سطح بین‌المللی قرار می‌دهد و کارایی آن، با مطالعات پیشرفته در شرایط محیطی مشابه رقابت می‌کند. برای درک بهتر جایگاه این یافته، می‌توان آن را با سایر پژوهش‌های اخیر مانند مطالعه Meliho و همکاران (۲۰۲۳) در مراکش که به R^2 برابر با ۰/۷۹ دست یافت یا مطالعه‌ای در یک منطقه تپه‌ای نیمه‌گرمسیری که R^2 آن ۰/۵۴ گزارش شد، مقایسه کرد. این عملکرد حتی از مدل‌های پیشرفته‌تری مانند XGBoost که در شاندونگ چین به R^2 برابر با ۰/۷۵ رسید و مدل‌های یادگیری عمیق مانند CNN-LSTM در سین‌کیانگ چین با R^2 برابر با ۰/۸ نیز بهتر است (Melih et al., 2023; Wang et al., 2023; Pouladi et al., 2023). عملکرد مدل این پژوهش با مدل‌های بسیار پیشرفته‌ای مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون فرآیند گوسی (GPR) در مناطق خشک مصر که به ترتیب به R^2 برابر با ۰/۸۴ و ۰/۸۹ دست یافته‌اند، قابل رقابت است (Gouda et al., 2024).

انتخاب الگوریتم جنگل تصادفی در این پژوهش کاملاً قابل دفاع است، زیرا این الگوریتم به‌طور مداوم به‌عنوان یک مدل قدرتمند، انعطاف‌پذیر و مقاوم در برابر بیش‌برازش (overfitting) در ادبیات علمی نقشه‌برداری کربن آلی خاک معرفی شده است و به‌نوعی به مدل استاندارد و "کارآمد" این حوزه تبدیل شده است (Pouladi et al., 2023). با این وجود، حوزه یادگیری ماشین به سرعت در حال تحول است. مطالعات تطبیقی اخیر به‌طور فزاینده‌ای نشان می‌دهند که الگوریتم‌های تقویت گرادیان (Gradient Boosting)، به‌ویژه XGBoost، اغلب عملکردی برتر از جنگل تصادفی، به‌خصوص در اراضی کشاورزی، ارائه می‌دهند. برای مثال، مطالعه Wang و همکاران (۲۰۲۳)، به‌صراحت نشان داد که مدل XGBoost بهترین عملکرد را برای مناطق زراعی داشته است، یافته‌ای که ارتباط مستقیمی با تمرکز پژوهش حاضر بر اراضی کشاورزی استان البرز دارد (Wang et al., 2023).

مهم‌ترین روند حال حاضر، حرکت به سمت معماری‌های یادگیری عمیق (Deep Learning-DL) است که قابلیت‌های بی‌سابقه‌ای برای استخراج خودکار ویژگی از داده‌های پیچیده ارائه می‌دهند. برخلاف جنگل تصادفی که به ویژگی‌های مهندسی شده دستی (مانند شاخص‌های NDVI و SAVI) متکی است، مدل‌های یادگیری عمیق، به ویژه شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNNs)، قادرند ویژگی‌های فضایی بهینه را مستقیماً از باندهای خام تصاویر ماهواره‌ای بیاموزند (Pouladi et al., 2023). این امر نه تنها یک لایه از مهندسی ویژگی وابسته به کاربر را حذف می‌کند، بلکه می‌تواند الگوهای پیچیده‌ای را که شاخص‌های گیاهی قادر به ثبت آنها نیستند، شناسایی کند. مفاهیم پیشرفته‌تری مانند معماری‌های U-Net برای بخش‌بندی تصاویر و یادگیری انتقالی (Transfer Learning) برای بهره‌گیری از دانش آموخته‌شده از داده‌های سایر مناطق یا اعماق خاک، لبه علم در این حوزه را

تشکیل می‌دهند. بنابراین، استفاده از مدل جنگل تصادفی در این پژوهش، یک کاربرد بسیار قوی از یادگیری ماشین "کلاسیک" را به نمایش می‌گذارد. این نتیجه نه به‌عنوان یک نقطه ضعف، بلکه به‌عنوان یک خط پایه (baseline) مستحکم و معتبر باید در نظر گرفته شود که مطالعات آتی مبتنی بر یادگیری عمیق در این منطقه باید عملکرد خود را در برابر آن بسنجند (Pavlovic et al., 2024; Han et al., 2025).

نقشه کربن آلی تولید شده در این پژوهش (شکل ۵)، با ارائه نقشه‌ای با وضوح بالا از این شاخص کلیدی سلامت خاک در استان البرز، یک ابزار پایه حیاتی محسوب می‌شود که می‌تواند مستقیماً به برنامه‌ریزی منطقه‌ای و ترویج کشاورزی کمک کند. این نقشه از طریق شناسایی مناطق آسیب‌پذیر با سطح کربن پایین، فراهم کردن مبنایی برای کشاورزی دقیق و استفاده متغیر از کودهای آلی، و ایفای نقش به‌عنوان یک خط پایه برای پایش و ارزیابی اثربخشی برنامه‌ریزی مدیریت اراضی در آینده، کاربردهای عملی مهمی دارد. علاوه بر این، نقشه تغییرات زمانی (شکل ۷) با شناسایی شیوه‌های مدیریت کشاورزی متفاوت که منجر به ترسیب یا تخلیه کربن می‌شوند، ابزاری قدرتمند برای ارائه بازخورد مستقیم به مدیران اراضی و کشاورزان است. این بحث با قرار دادن این یافته‌ها در بستر پیشرفت‌های سریع جهانی، مسیرهای روشنی را برای تحقیقات آینده مشخص کرد. اتخاذ تکنیک‌های تلفیق داده (لندست-۸/سنیتینل-۲)، تحلیل سری زمانی و کاوش مدل‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، همراه با مجموعه‌ای گسترده‌تر از متغیرهای محیطی، گام‌های حیاتی بعدی خواهند بود. در نهایت، این مطالعه یک خط پایه علمی مستحکم برای پایش کربن آلی خاک در استان البرز فراهم می‌کند. این پژوهش نه تنها یک مجموعه داده حیاتی برای ذی‌نفعان محلی به ارمغان می‌آورد، بلکه به‌عنوان یک معیار برای تلاش‌های آتی و پیچیده‌تر در زمینه نقشه‌برداری رقومی خاک در ایران و سایر مناطق نیمه‌خشک مشابه در سراسر جهان عمل خواهد کرد.

References

- Bayat, M., Heidari Masteali, S., 2021. Evaluation and Comparison of Biodiversity Indexes of Tree Species in Hyrcanian Forests (Case Study: Kheyroud, Ramsar and Neka Forests). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)* 34(2), 315-326.
- Canter, L.W., 1996. *Environmental Impact Assessment*; McGraw-HILL Book Company, New York
- Etehad Abari, M., Majnounian, B., Malekian, A., Jourgholami, M., 2018. Does forest harvesting change the runoff quality? *Iranian Journal of Forest* 10(1), 13-2.
- FAO., 2020. The state of the world's forests 2020. Forests, biodiversity and people: Key findings. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/state-of-forests/en/>
- Grunberg, J., Ghaffariyan, M., Jourgholami, M., Labelle, E., Kaakkurivaara, N., Goncalves Robert, R., Kuhmaier, M., 2023. Criteria and Indicators for Assessing the Sustainability of Timber Harvesting Operations studied from 2017 to 2021 — a systematic Review. *Current Forestry Reports* 112(2), 2114-2128.
- Gouda, M., Abu-hashim, M., Nassrallah, A., Khalil, M.N., Hendawy, E., Benhasher, F.F., Mohamed, E.S., 2024. Integration of remote sensing and artificial neural networks for prediction of soil organic carbon in arid zones. *Frontiers in Environmental Science* 12(1), 1448601.
- Hartmann, M., Howes, C.G., Vaninsberghe, D., Yu, H., Bachar, D., Christen, R., Henrik Nilsson, R., Hallam, S.J., Mohn, W.W., 2012. Significant and persistent impact of timber harvesting on soil microbial communities in Northern coniferous forests. *ISME Journal* 6(12).
- IPCC., 2019. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srccl-chapter/chapter-2/>
- Johansson, H., Eriksson, M., 2019. Assessing the environmental impacts of forest use: A review of ecological, social, and economic factors. *Forest Ecology and Management* 432(1), 707-723.
- Kiasari, J., 2017. Evaluating the effect of forestry projects on the quantitative and qualitative status of forest stands (case study: Nem Khane section of Khairud forest). Master thesis. Department of Environment, University of Tehran. Karaj, Iran, 114 p. (In Persian)

- Kim, B., Cruden, G., Crable, E.L., Quanbeck, A., Mittman, B.S., Wagner, A.D., 2023. A structured approach to applying systems analysis methods for examining implementation mechanisms. *Implementation Science Communications* 4(1), 127.
- Labelle, E.R., Lemmer, K.J., 2019. Selected environmental impacts of forest harvesting operations with varying degree of mechanization. *Croatian Journal of Forest Engineering* 40(2).
- Ladoni, M., Alavipanah, S.K., Bahrami, H.A., Noroozi, A.A., 2010. Remote sensing of soil organic carbon in semi-arid region of Iran. *Arid Land Research and Management* 24(4), 271-281.
- Lima, A. A., Lopes, J. C., Lopes, R. P., de Figueiredo, T., Vidal-Vázquez, E., Hernández, Z., 2025. Soil Organic Carbon Assessment Using Remote-Sensing Data and Machine Learning: A Systematic Literature Review. *Remote Sensing* 17(5).
- Lotfalian, M., Zare, N., Falah, A., Hojati, S., Imani, P., 2018. Environmental effects of wood extraction on composition and biodiversity regeneration (tree and herbaceous cover) (A case study: Gardeshy district of Choob and Kaghaz Mazandaran). *Journal of Natural Environment (Iranian Journal of Natural Resources)* 71(1), 93-107. (In Persian)
- Makhdom, M., 2002. Degradation Model: A Quantitative EIA Instrument, Acting as a Decision Support System (DSS) for Environmental Management. *Environmental Management* 30(1), 151-156.
- Manori, M., 2004. Environmental impact assessment. Mitra Publications, Tehran, 460 p. (In Persian)
- Mohajer, M., 2005. Forestry and forest cultivation. Tehran University Publications, Tehran, 388 p. (In Persian)
- Meliho, M., Boulmane, M., Khattabi, A., Dansou, C.E., Orlando, C.A., Mhammdi, N., Noumonvi, K.D., 2023. Spatial prediction of soil organic carbon stock in the Moroccan High Atlas using machine learning. *Remote Sensing* 15(10), 2494.
- Moradnezehadi, M., Jourgholami, M., Bozorg-Haddad, O., 2019. The effect of forest harvesting variants for mitigating the runoff and loss of water resources using SWAT rainfall-runoff model in Kheyroud forest watershed. *Forest and Wood Products* 71(4), 275-287. (In Persian)
- Motamedi, M., Arayian, A., Khani, Z., 2018. Examining the types of common methods of environmental impact assessment (EIA) along with the practical examination of the methods. *Journal of Geography, Civil Engineering and Urban Management Studies* 4(2), 148-158. (In Persian)
- Newton Michael, C., Elizabeth, C., 2006. harvesting impacts on understory regeneration in two-storied Douglas-Fir stands. *Western Journal of Applied Forestry* 21(1), 14-18
- Oghnoum, M., Fegheh, J., Makhdom, M., Jabareyan, B., 2015. Environmental Impact Assessment of the Forest Management Plan, Using Degradation Model (Case Study: Patom District of Kheyroud Forest). *Environmental Researches* 5(10), 63-72. (In Persian)
- Palviainen, M., Peltomaa, E., Laurén, A., Kinnunen, N., Ojala, A., Berninger, F., Zhu, X., Pumpanen, J., 2021. Water quality and the biodegradability of dissolved organic carbon in drained boreal peatland ,under different forest harvesting intensities. *Science of The Total Environment* 806, 150919.
- Pouladi, N., Gholizadeh, A., Khosravi, V., Borůvka, L., 2023. Digital mapping of soil organic carbon using remote sensing data: A systematic review. *Catena* 232(2), 107409.
- Saaty, T.L., 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 48(1), 9-26.
- Shahriari, A., Moghadami Rad, M., Abdie, E., 2019. The effects of logging on forest soil (Azad Shahr Kuhmian Forest). *PEC* 6(13), 233-250. (In Persian)
- Shariat, M., Manori, M., 1994. An introduction to environmental assessment. Publications of the Environmental Protection Organization, Tehran, 297 p. (In Persian)
- Sobh Zahedi, S., Naghdi, R., Gharibreza, M.R., Salehi, A., Zahedi, G., 2020. Assessing the Effects of Strip Cutting methods on Soil Erosion (A Case Study: Chafroud Forest). *Iranian Journal of Forest* 12(1), 49-60. (In Persian)
- Sohrabi, H., Jourgholami, M., Jafari, M., 2021. Evaluation of changes in soil physical, chemical and biological properties 25 years after skidding operations in Kheyroud forest. *Forest and Wood Products* 73(4), 403-415. (In Persian)
- Statistical Yearbook of Alborz Province., 2012, Statistics Center of Iran. (In Persian)

- Spahbodi, K., Kiasari, S., 2000. Evaluation of one of the main methods of forestry in the forests of the north (Pijom forestry plan). National Conference on Northern Forest Management and Sustainable Development, Ramsar, Iran. pp. 229-269. (In Persian)
- Wenger, R.B., Rhyner, C.R., 1972. Evaluation of Alternatives For Solid Waste Systems. Journal of Environmental Systems 2(1), 89-108.
- Wang, Z., Tang, Z., Zhou, P., Lai, J., Dai, Y., Zhou, L., Wang, Y., Chen, G., Jiang, Y., Guo, X., Wu, J., 2023. Comparison of four machine learning in predicting soil organic carbon content in a small watershed in the subtropical hilly area. Research of Agricultural Modernization, 44(3), 558-566.
- Zarafshar, M., Teymuri, M., 2022. Introduction of suitable biological indicators to monitor the quality and health of the soil of forest ecosystems. Journal of Sustainable Management of Hyrcanian Forests 4(1), 29-35. (In Persian)
- Esfandiyar, A. , Jourgholami, M. and Fegghi, J., 2024. Environmental impact assessment of engineering measures and exploitation on forest ecosystems. Journal of Natural Environment 77(2), 341-357.