

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و هفت، شماره پنج، مرداد ماه ۱۴۰۴ (۱۰۳-۱۱۴)

مدل سازی تراکم تاج پوشش جنگل با استفاده داده های سنجنده MSI ماهواره Sentinel-2 در جنگل های زاگرس جنوبی (مطالعه موردی: دورود، استان لرستان)

مسعود محمودی^{*۱}

masoud.mah1385@yahoo.com

نبی الله یارعلی^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

چکیده

زمینه و هدف: تاج پوشش جنگل به عنوان یک مشخصه حیاتی ساختار جنگل، نقش مهمی در بسیاری از کاربردهای اکولوژیکی، هیدرولوژیکی و مدیریت جنگل ایفا می کند. تکنیک های دورسنجی برای برآورد تاج پوشش جنگلی نسبت به روش های زمینی، کارآمدتر و مناسب تر هستند. بدین منظور پژوهش پیش رو با هدف بررسی قابلیت داده های Sentinel-2 در برآورد تاج پوشش جنگل های زاگرس جنوبی با استفاده از روش های رگرسیون چندمتغیره و جنگل تصادفی انجام شد.

روش بررسی: در این پژوهش تعداد ۶۵ قطعه نمونه با ابعاد مربعی ۲۰×۲۰ متر در جنگل های استان لرستان پیاده سازی و در قطعه های نمونه قطر کوچک و بزرگ (عمود برهم) تاج درختان اندازه گیری شد. همچنین داده های Sentinel-2 مربوط به تاریخ شهریورماه سال ۱۴۰۱ تهیه و پردازش های مورد نیاز روی آن ها صورت گرفت. به منظور مدل سازی تاج پوشش جنگل از روش های رگرسیون چندمتغیره (گام به گام) و جنگل تصادفی براساس ۷۰ درصد از قطعه های نمونه انجام شد. اعتبارسنجی مدل ها نیز براساس ۳۰ درصد قطعه های نمونه و با استفاده از آماره های RMSE% و Bias% انجام شد.

یافته ها: براساس نتایج میزان ضریب تبیین برای روش های رگرسیون چندمتغیره و جنگل تصادفی به ترتیب ۰/۸۰۲۵ و ۰/۹۱۸۶ به دست آمد. در حالت مقایسه ای مدل جنگل تصادفی (RMSE% = ۱۲/۲۸ و Bias% = -۱/۵۲) نسبت به مدل رگرسیون چندمتغیره (RMSE% = ۱۷/۶۱ و Bias% = ۳/۴۴) نتیجه بهتری ارائه داد.

بحث و نتیجه گیری: براساس نتایج این پژوهش می توان بیان کرد که داده های ماهواره Sentinel-2 و روش های آماری به ویژه روش جنگل تصادفی برآورد مناسبی از تاج پوشش جنگل های زاگرس ارائه می دهد. از این رو داده های دورسنجی می توانند به مدیریت هر چه بهتر این جنگل ها کمک کنند.

واژه های کلیدی: تاج پوشش جنگل، Sentinel-2، رگرسیون چندمتغیره، جنگل تصادفی.

^۱ دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران* (مسوول مکاتبات)

^۲ دانشیار علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

Modeling forest canopy cover using Sentinel-2 satellite MSI data in Southern Zagros forests (case study: Doroud, Lorestan province)

Masoud Mahmoudi^{1*}

masoud.mah1385@yahoo.com

Nabiallah Yarali²

Accepted Date: November 6, 2024

Date Received: September 16, 2024

Abstract

Background and purpose: Forest canopy cover, a crucial element of forest structure, assumes a crucial role in numerous ecological, hydrological, and forest management applications. Remote sensing techniques have proven to be more efficient and suitable than ground-based methods when it comes to estimating the forest canopy. Consequently, this research endeavors to assess the capability of Sentinel-2 data in estimating the southern Zagros forests canopy, using multivariate regression and random forest methods.

Material and Methodology: In this research, the number of 65 plots were measured 20×20 m each within the forests of Lorestan province. The primary objective was to measure the diameters of both small and large tree crowns within these designated sample plots. Concurrently, Sentinel-2 data corresponding to the date of September 2022 were acquired and subjected to essential processing procedures. To model the forest canopy, we used multiple regression methods, specifically utilizing the stepwise approach, alongside random forest algorithms. These modeling techniques were applied to 70% of the sample plots. Subsequent to this, a rigorous model validation was conducted, utilizing 30% of the sample plots and employing RMSE% and Bias% statistics for a comprehensive assessment.

Findings: In light of the results, the coefficient of determination (R^2) for the multivariable regression methods and random forest was 0.8025 and 0.9186, respectively. In a comparative analysis, it is evident that the random forest model exhibited superior performance with an RMSE = 12.28% and Bias = 1.52%, outperforming the multivariable regression model which showed an RMSE = 17.61% and Bias = 3.44%.

Discussion and conclusion: The findings of this study affirm that Sentinel-2 satellite data, coupled with statistical approaches, notably the random forest method, offer a reliable means to assess the forest canopy in the Zagros region. Consequently, remote sensing data emerges as a valuable tool for effective forest management in this area.

Keywords: Forest Canopy, Sentinel-2, Multiple Regression, Random Forest.

¹ Ph D. student, Department of Forest management, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahr -e-Kord University, Shahr -e-Kord, Iran (*Corresponding Officer*)

² Associate Professor, Forest Science, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahr -e-Kord University, Shahr -e-Kord, Iran

مقدمه

جنگل ها از جمله منابع طبیعی مهم تجدیدشونده هستند، که به دلیل تأمین منافع اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی برای بشر به عنوان بخشی از خدمات بوم سازگان جنگل، پشتوان های برای هر کشور محسوب شوند (۱). جنگل های زاگرس با مساحت ۵ میلیون هکتاری به عنوان دومین منبع سلولزی تجدیدپذیر کشور، به دلایل متعدد مانند تنظیم آب و خاک، تعادل اکولوژیک، کمک به معیشت مردم محلی و کاهش آلودگی هوا، از عرصه های کلیدی و راهبردی کشور به شمار می آیند (۲). از این رو کسب اطلاعات در زمینه های مختلف اکولوژیکی مانند تاج پوشش جنگلی به منظور در انتخاب راهکارهای صحیح مدیریتی برای حفظ، احیاء و پایش که نهایتاً به مدیریت پایدار این جنگل ها ختم می شود، ضروری است. تاج پوشش جنگل یک مشخصه ساختاری در توده های جنگلی است، که به عنوان درصدی از مساحت جنگلی که توسط تاج درختان پوشیده شده، تعریف می شود (۳، ۴). از این مشخصه به عنوان معیاری برای تراکم توده، غنای گونه ای، پیش بینی ترکیب گونه ای درختان، مدل سازی حجم درختان و تولید خالص اولیه استفاده می شود (۵، ۶، ۷). همچنین تاج پوشش جنگل نقش مهمی در ارزیابی عملکرد جنگل، ارزیابی سلامت توده، ارزیابی فرسایش خاک، ارزیابی خسارات عوامل مختلف مانند خشکسالی، آتش سوزی و آفات ایفا می کند (۸، ۹). فرآیندهای اکولوژیکی متعددی در بوم سازگان های جنگلی متأثر از تاج پوشش جنگل هستند (۴)، به طوری که این مشخصه یک متغیر کلیدی مهم در مطالعات دینامیک خطرات طبیعی مانند رانش زمین، ریزش سنگ، لغزش برف و بهمن است (۱۰). علاوه بر این، تاج پوشش جنگل برای فهرست ملی جنگل ها مورد نیاز است، زیرا تعریف بین المللی جنگل از منظر سازمان خواربار و کشاورزی (FAO)، براساس تاج پوشش است، که برای تمایز جنگل و سایر زمین های استفاده می شود. در این تعریف، زمینی با تاج پوشش درختان بیش از ۱۰ درصد در مساحتی بیش از ۰/۵ هکتار به عنوان جنگل در نظر گرفته می شود (۱۱).

در حال حاضر روش های برآورد و اندازه گیری تاج پوشش جنگل به دو دسته زمینی و سنجش از دوری تقسیم می شود (۱۲). روش های زمینی اغلب بسیار دشوار، زمان بر و پرهزینه و در منطق وسیع تاحدودی غیرقابل اجرا هستند. علاوه بر این، شرایط جنگل های زاگرس به دلایل وسعت زیاد و شرایط سخت توپوگرافی استفاده از این روش ها برای پایش بلندمدت تاج پوشش جنگل بسیار سخت و در برخی مناطق تقریباً غیرممکن می سازد (۱۳). در مقابل روش های سنجش از دوری به دلیل دسترسی بهتر، پوشش مناسب تر از لحاظ مکانی و

زمانی، هزینه کم و به روز بودن اطلاعات پایه، محدودیت های روش های زمینی را جبران و امکان توصیف تاج پوشش برای سطوح جنگلی را فراهم می کنند (۱۴، ۱۵).

شاهولی کوه شیر و همکاران (۱۶) قابلیت داده های سنجنده ETM+ ماهواره Landsat 7 و مدل تراکم تاج پوشش جنگل^۱ (FCD) را برای تهیه نقشه تراکم تاج پوشش جنگل های زاگرس در شهرستان مریوان مورد بررسی قرار دادند. نتایج طبقه بندی، صحت کلی و ضریب کاپا را به ترتیب ۶۲ درصد و ۰/۳۹ نشان داد. Azizi و همکاران (۱۷) در مطالعه ای براساس مدل FCD با استفاده از تصویر IRS به برآورد تاج پوشش جنگل پرداختند. در این پژوهش مدل FCD با صحت کلی ۸۴/۴ درصد، تاج پوشش جنگل را به طور مناسبی برآورد کرد. وفایی و همکاران (۱۸) در پژوهشی برای برآورد تاج پوشش جنگل های زاگرس شمالی از داده های Landsat 5 و رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده کردند. مدل حاصل با ضریب تبیین (R^2) ۰/۵۲ و میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE%) ۱۶/۴۷ درصد برآورد مطلوبی از تاج پوشش ارائه کرد. میری و درویش صفت (۱۳) با استفاده از داده های ماهواره Landsat 8 در جنگل های مریوان تاج پوشش جنگل را براساس روش آماری رگرسیون چندمتغیره مدل سازی کردند. نتایج حاصل از رگرسیون چندمتغیره نشان داد که شاخص پوشش گیاهی RS و باند ۸ با R^2 برابر ۰/۶۶۲ و درصد RMSE ۱۵/۲۴ درصد به عنوان متغیرهای مدل در برآورد تراکم تاج پوشش جنگل شناخته شدند. Nasiri و همکاران (۱۲) پژوهشی با هدف تعیین بهترین مدل یادگیری ماشین برای برآورد تاج پوشش جنگل های هیرکانی با استفاده از داده های Sentinel-2 انجام داده اند. در این پژوهش مدل های جنگل تصادفی^۳ (RF)، ماشین بردار پشتیبان^۴ (SVM)، شبکه الاستیک^۵ (ENET) و تقویت گرادیان شدید^۶ (XGBoost) مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد بین مدل های مورد بررسی RF با R^2 برابر ۰/۶۷ و درصد RMSE ۱۸/۸۷ درصد بهترین مدل است. فلاح و نظریانی (۱۹) در مطالعه ای قابلیت باندهای اصلی و مصنوعی تصاویر ماهواره Sentinel-2 با استفاده از چهار الگوریتم RF، SVM، k نزدیک ترین همسایه^۷ (KNN) و شبکه عصبی مصنوعی^۸ (ANN) را در برآورد تاج پوشش جنگل های زاگرس

¹ Forest Canopy Density

² Root Mean Square Error

³ Random Forest

⁴ Support Vector Machine

⁵ Elastic Net

⁶ Extreme Gradient Boosting

⁷ K-Nearest Neighbors

⁸ Artificial Neural Network

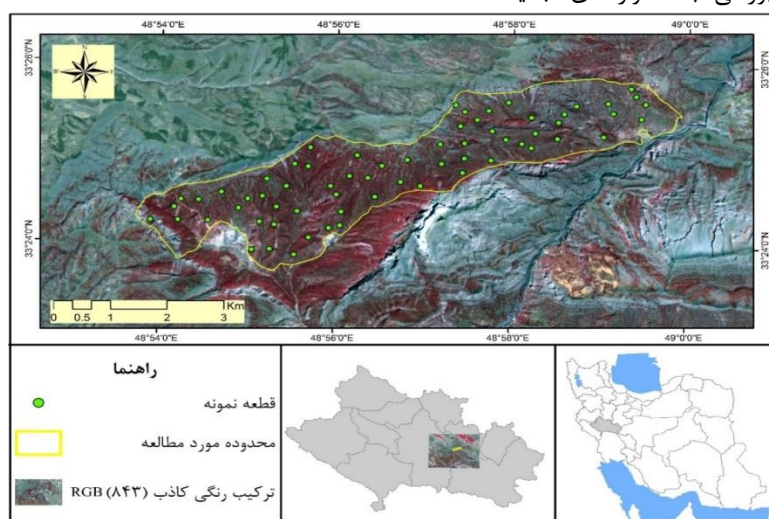
Sentinel-2 که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) در سال ۲۰۱۷ به صورت کامل عملیاتی شده، دو چندان است. جنگل‌های زاگرس قادر به تولید چوب قابل استفاده صنایع مربوطه نمی‌باشد، بنابراین نمی‌توان حجم توده جنگلی را به عنوان عامل بررسی و اندازه‌گیری مورد استفاده قرار داد (۲۳). در نتیجه باید مشخصه دیگری مانند تاج‌پوشش برای بررسی روند تحولات کمک گرفت (۲۴). از این رو هدف این پژوهش بررسی قابلیت داده‌های سنجنده MSI ماهواره‌ای Sentinel-2 و مدل‌های رگرسیون چندمتغیره و جنگل تصادفی در برآورد تاج‌پوشش در جنگل‌های زاگرس استان لرستان است.

روش بررسی

منطقه مورد پژوهش

پژوهش حاضر در بخشی از جنگل‌های زاگرس جنوبی با مساحت ۱۳۶۲ هکتار در استان لرستان انجام شد. جنگل مورد پژوهش در جنوب شهرستان دورد در گستره جغرافیایی $33^{\circ}33'$ تا $33^{\circ}23'$ عرض شمالی و $48^{\circ}48'$ تا $48^{\circ}54'$ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه کوهستانی با جهت غالب جنوب‌شرقی با شیب متوسط ۴۰ درصد و متوسط ارتفاع از سطح دریای ۱۶۰۰ متر می‌باشد. در این جنگل بیشترین درصد ترکیب درختی را گونه بلوط ایرانی (برودار) (*Quercus brantii* Lindl.) به خود اختصاص داده است.

مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که روش ANN با ضریب تبیین ۰/۷۶ ارائه مناسب‌تری از تاج‌پوشش جنگل دارد. Korhonen و همکاران (۲۰) در مطالعه‌ای توانایی دو ماهواره Sentinel-2 و Landsat 8 در برآورد تاج‌پوشش جنگل‌های بورآل در فنلاند را مورد مقایسه قرار داده‌اند. نتایج نشان داد در این جنگل‌ها، Sentinel-2 به‌طور جزئی (۰/۶ تا ۲/۱ درصد) بهتر از Landsat 8 عمل کرد، که عمدتاً به دلیل وجود باند در طول موج ۷۰۵ نانومتری است. در پژوهشی دیگری در چین، Zhao و Hua (۲۱) بسته بودن تاج‌پوشش جنگل را با استفاده از تصویر Sentinel-2 براساس دو مدل رگرسیون خطی چندمتغیره و شبکه عصبی پس انتشار خطا^۱ (BPNN) برآورد کردند. با توجه به نتایج، مدل BPNN با $R^2 = 0/811$ تاج‌پوشش جنگل را با صحت بالاتری برآورد کرد. Akin و همکاران (۲۲) در پژوهشی در جنگل‌های ترکیه تراکم تاج‌پوشش درختان را با استفاده داده‌های Sentinel-2 و مدل یادگیری ماشین ANN مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که مدل ANN براساس تصویر ماهواره‌ای با ضریب تبیین ۰/۸۷ برآورد خوبی از تراکم تاج‌پوشش ارائه می‌دهد. بررسی منابع نشان می‌دهد که مطالعات زیادی در خارج از ایران برای برآورد تاج‌پوشش جنگل براساس داده‌های ماهواره‌ای صورت گرفته است. با این حال، بررسی‌های بیشتری در رابطه با دقت برآورد این مشخصه مهم در بوم‌سازگان‌های جنگلی تمام دنیا، به دلیل منحصر به فرد بودن ویژگی و شرایط بوم‌سازگان نیاز است. اهمیت این بررسی با ماهواره‌های جدید مانند



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش و قطعه‌های نمونه برداشت شده در ایران، استان لرستان، شهرستان دورد و تصویر ترکیب رنگی کاذب RGB (۸۴۳) تصویر ماهواره Sentinel-2.

Figure 1. Location of study area and plots in Iran, Lorestan province, Durood and the RGB (843) of the Sentinel-2 satellite image.

¹Back Propagation Neural Network

داده های ماهواره ای

در این پژوهش داده های سنجنده MSI ماهواره ای Sentinel-2 مربوط به تاریخ ۶ شهریورماه سال ۱۴۰۱ هجری شمسی (۲۸ آگوست ۲۰۲۲ میلادی) با سطح تصحیحات L2A از سایت سازمان فضایی اتحادیه اروپا با مبنای WGS84 دریافت شد (شکل ۱). علت انتخاب تاریخ دریافت تصویر، همزمان بودن با تاریخ آماربرداری و همچنین عدم وجود ابر در تصاویر این تاریخ بود. داده های این ماهواره شامل ۱۳ باند طیفی از محدوده مرئی تا مادون قرمز با تفکیک مکانی ۱۰ تا ۶۰ است که در این بررسی برای دستیابی به اهداف موردنظر از باندهای ۲ (آبی)، ۳ (سبز)، ۴ (قرمز)، ۸ و ۸a (مادون قرمز نزدیک) با تفکیک مکانی ۱۰ متر و همچنین باندهای ۵، ۶، ۷ (لبه قرمز)، ۱۱ و ۱۲ (مادون قرمز کوتاه) با تفکیک مکانی ۲۰ متر استفاده شد.

جمع آوری داده های میدانی

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش پیش رو، اندازه گیری زمینی تاج پوشش جنگل در شهریور ماه سال ۱۴۰۱ با استفاده از روش نمونه برداری تصادفی انجام شد. به طوری که تعداد ۶۵ قطعه نمونه به صورت نقطه ای با روش نمونه برداری تصادفی بر روی نقشه طراحی و در دستگاه GPS وارد شد. موقعیت جغرافیایی قطعه های نمونه پیاده شده در عرصه به عنوان شمال غربی قطعه نمونه در نظر گرفته شد و براساس این موقعیت قطعه های نمونه با ابعاد مربعی شکل ۲۰×۲۰ متر در منطقه پیاده سازی و برداشت شدند (شکل ۱). در هر یک از قطعه های نمونه قطر کوچک و بزرگ (عمود بر هم) تاج جست ها و درختان مورد آماربرداری و اندازه گیری قرار گرفت. در ادامه برای محاسبه مساحت تاج برای هر یک از جست ها و درختان اندازه گیری شده از شکل دایره استفاده شد (رابطه ۱) و سپس تراکم تاج پوشش برای هر قطعه نمونه به دست آمد.

$$\text{رابطه (۱)} \quad FCC = \frac{\pi}{4} \times \frac{d_1}{2} \times \frac{d_2}{2}$$

در رابطه ۱، FCC: مساحت تاج پوشش درختان بر حسب متر مربع، d_1 : قطر کوچک تاج درخت بر حسب متر و d_2 : قطر بزرگ تاج درخت بر حسب متر است.

پیش پردازش و پردازش تصاویر Sentinel-2

تصاویر ماهواره Sentinel-2 قبل از ارایه به کاربران توسط سازمان ارایه دهنده در سطوح مختلفی از نظر هندسی و رادیومتری مورد تصحیح قرار می گیرند، اما ضروری است که قبل از استفاده از تصاویر در پردازش ها و تجزیه و تحلیل ها از وجود خطاهای احتمالی اطمینان حاصل شود. برای بررسی عدم

وجود خطاهای رادیومتری مانند پیکسل های تکراری، از بزرگنمایی های تک باندها بر روی صفحه نمایش رایانه استفاده شد. همچنین جهت اطمینان از هندسه صحیح تصویر نقشه رقومی جاده ها و آبراهه های مربوط به یک برگ نقشه توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ به شماره 57561NE مورد استفاده قرار گرفت. انجام بررسی های ذکر شده نشان داد که تصویر Sentinel-2 مورد استفاده در پژوهش حاضر از هندسه صحیح و کیفیت مطلوبی برخوردار است.

پس از پیش پردازش های مورد نیاز، با توجه به ناهمگنی ساختارهای تاج پوشش در جنگل مورد مطالعه، محاسبه شاخص های پوشش گیاهی نظیر $NDVI^1$ ، $TNDVI^2$ ، $GEMI^3$ و $REIP^4$ به عنوان پردازش مورد نیاز برای این پژوهش در نظر گرفته شد. در این راستا، شاخص های مختلف پوشش گیاهی براساس باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و لبه قرمز محاسبه شد (جدول ۱). این فرآیند با استفاده از نرم افزار SNAP⁴ که توسط آژانس فضایی اروپا طراحی و ارائه شده، انجام شد.

تجزیه و تحلیل آماری

در ابتدا برای ارزیابی رابطه بین تراکم تاج پوشش زمینی جنگل و شاخص های پوشش گیاهی تصاویر Sentinel-2 به عنوان پردازش مورد استفاده مناسب از رگرسیون خطی و ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. برای این منظور، در ابتدا، ارزش های متناظر شاخص های پوشش گیاهی در محل قطعه های نمونه زمینی استخراج شدند و در تجزیه و تحلیل رگرسیون و همبستگی مورد استفاده قرار گرفتند.

در ادامه برای مدل سازی و برآورد تراکم تاج پوشش جنگل با استفاده از باندهای اصلی و شاخص های پوشش گیاهی در پژوهش حاضر براساس ۷۰ درصد قطعه های نمونه از دو روش آماری پارامتری رگرسیون چند متغیره به روش گام به گام و ماشین یادگیری جنگل تصادفی استفاده شد. برای انتخاب بهترین مدل های حاصل از تحلیل به دو روش و ورود آن ها به مرحله ارزیابی و اعتبارسنجی، آماره ضریب تبیین (R^2) مورد استفاده گرفت. مدل سازی ها در این پژوهش با استفاده از نرم افزارهای SPSS Ver.26 و Statistica Ver.14 انجام شد. پس از مدل سازی، ارزیابی و اعتبار مدل های انتخاب شده براساس ۳۰ درصد قطعه های نمونه با استفاده از آماره های ریشه

¹ Transformed Normalized Difference Vegetation Index

² Global Environmental Monitoring Index

³ Red Edge Inflection Point

⁴ Sentinel Application Platform

میانگین مربعات خطا (RMSE و RMSE%) (رابطه‌های ۲ و ۳) و اریبی (Bias و Bias%) (رابطه‌های ۴ و ۵) انجام شد.

جدول ۱- شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Vegetation indices used in this study

نام شاخص	رابطه ریاضی	مرجع	مرجع
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	۲۶	Rouse <i>et al</i> , 1974
TNDVI	$TNDVI = \sqrt{\frac{NIR - RED}{NIR + RED}} + 0.5$	۲۷	Tucker, 1979
GEMI	$GEMI = \frac{\mu(1 - 0.25\mu) - (RED - 0.125)}{1 - RED}$ $\mu = \frac{(NIR^2 - RED^2) + 1.5NIR + 0.5RED}{NIR + RED + 0.5}$	۲۸	Pinty & Verstraete, 1992
REIP	$REIP = 700 + 40 * [(\frac{R_1 + NIR}{2} - R_2) / (R_3 - R_2)]$	۲۹	Guyot <i>et al</i> , 1988

که تاج‌پوشش اندازه‌گیری شده با شاخص GEMI دارای بالاترین همبستگی ($R^2=0.534$ و $r=0.731$) در مقایسه با شاخص‌های دیگر است. در حالی شاخص REIP که علاوه بر همبستگی منفی ($R^2=0.003$ و $r=-0.057$)، نشان دهنده‌ای همبستگی بسیار ضعیف نیز است. ضریب پیرسون (r) و ضریب تبیین (R^2) به دست آمده برای تاج‌پوشش و شاخص‌های NDVI و TNDVI بسیار نزدیک است. همچنین رابطه خطی بین تراکم تاج‌پوشش جنگل (درصد) با شاخص‌های پوشش گیاهی که در شکل ۲ آمده نیز، علاوه بر تأیید مطالب فوق نشان می‌دهد که ابر نقاط و رابطه رگرسیون خطی شکل گرفته بین تاج‌پوشش و شاخص‌های NDVI و TNDVI بسیار به همدیگر شبیه است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (FCC_i - \overline{FCC})^2}{n}}$$

رابطه ۲

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\overline{FCC}} \times 100$$

رابطه ۳

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (FCC_i - \overline{FCC})}{n}$$

رابطه ۴

$$Bias(\%) = \frac{Bias}{\overline{FCC}} \times 100$$

رابطه ۵

در رابطه‌های مذکور n : تعداد قطعه‌های نمونه، $\overline{FCC}_i$: میزان تاج‌پوشش جنگل برآورد شده، FCC_i : میزان تاج‌پوشش جنگل اندازه‌گیری شده و $\overline{FCC}$: میانگین میزان تاج‌پوشش جنگل اندازه‌گیری شده است.

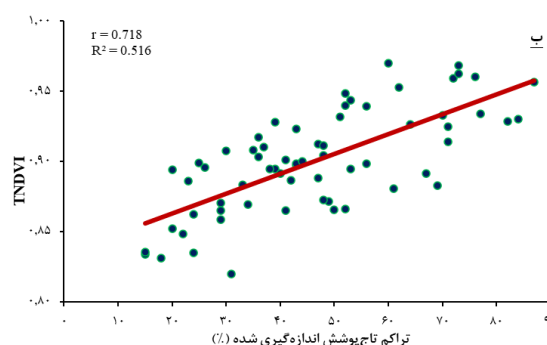
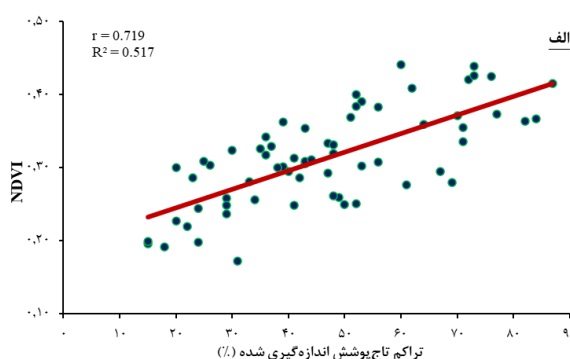
یافته‌ها

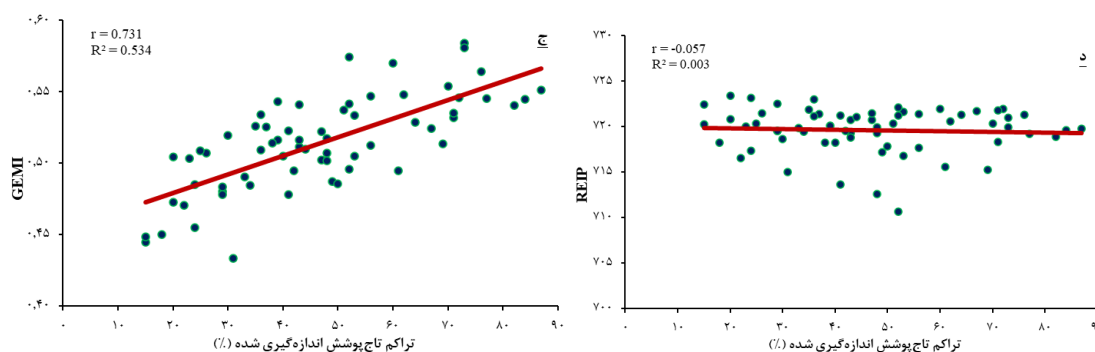
همبستگی بین تراکم تاج‌پوشش جنگل و شاخص‌های پوشش گیاهی در جدول ۲ ارائه شده است. جدول مذکور نشان می‌دهد

جدول ۲- همبستگی بین تراکم تاج‌پوشش جنگل (درصد) و شاخص‌های پوشش گیاهی

Table 2. Correlation between the forest canopy cover (percentage) and vegetation indices

شاخص‌های پوشش گیاهی	NDVI	TNDVI	GEMI	REIP
ضریب پیرسون (r)	۰/۷۱۹	۰/۷۱۸	۰/۷۳۱	-۰/۰۵۷
ضریب تبیین (R^2)	۰/۵۱۷	۰/۵۱۶	۰/۵۳۴	۰/۰۰۳





شکل ۲- رابطه خطی بین تراکم تاج‌پوشش جنگل (درصد) با شاخص‌های گیاهی: (الف) NDVI، (ب) TNDVI، (ج) GEMI و (د) REIP
Figure 2. Linear relationships between forest canopy cover (percentage %) and vegetation indices: (a) NDVI; (b) TNDVI; (c) GEMI; (d) REIP

Sentinel-2 و شاخص‌های پوشش گیاهی در روش جنگل تصادفی در شکل ۴ آمده است. براساس این شکل بالاترین اهمیت در مدل‌سازی را شاخص NDVI و کمترین اهمیت را باندهای طیفی b11 و b12 دارند. در حالت کلی نیز تمام شاخص‌های پوشش گیاهی از اهمیت بالاتری از باندهای اصلی در مدل‌سازی جنگل تصادفی ایفا می‌کنند. این نقاط حاصل از تاج‌پوشش اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره (شکل ۳) و جنگل تصادفی (شکل ۴) نیز نشان می‌دهد مدل جنگل تصادفی برآوردهای مناسب‌تری را ارائه می‌کنند.

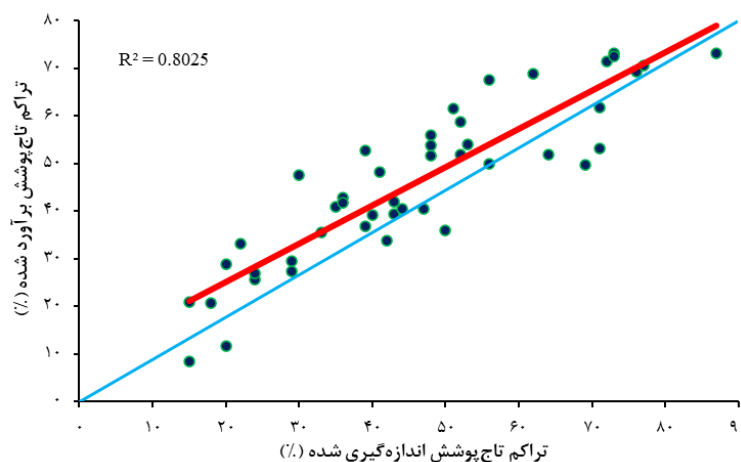
مدل‌سازی

نتایج تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره به روش گام‌به‌گام بین اندازه‌گیری زمینی تراکم تاج‌پوشش با متغیر طیفی باندهای اصلی و محاسباتی نشان داد که مدل رگرسیونی حاصل از متغیرهای b3، b8a، TNDVI و REIP با $R^2 = 0.8025$ و $R^2_{adj} = 0.7827$ به عنوان مناسب‌ترین مدل شناخته شد. این در حالی است که در نتایج حاصل از روش جنگل تصادفی میزان ضریب تبیین برابر با ۰/۹۱۸۶ به دست آمد (شکل ۵)، که بیانگر توانایی بالای این روش در برآورد تاج‌پوشش جنگل در منطقه مورد پژوهش است. اهمیت نسبی متغیرهای باندهای اصلی

جدول ۳- مناسب‌ترین مدل رگرسیونی چندمتغیره به روش گام‌به‌گام

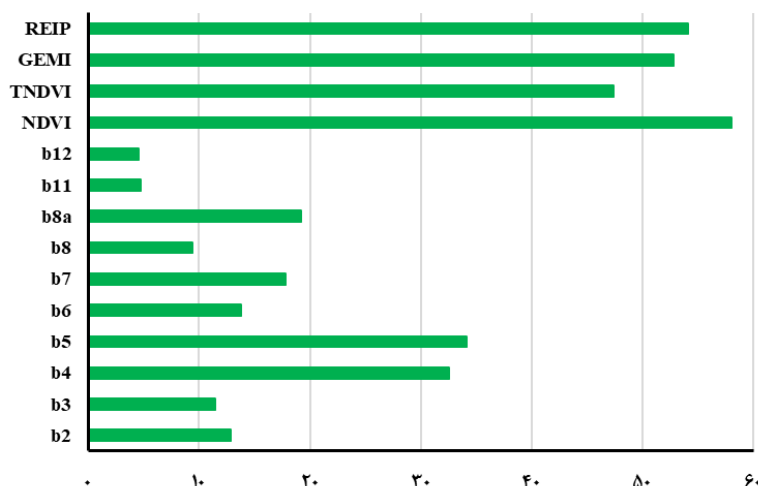
Table 3. The most suitable using multiple regression as stepwise

مدل رگرسیون چند متغیره	ضریب تبیین (R^2)	ضریب تبیین تعدیل شده (R^2_{adj})
$FCC = 0.1301b3 - 0.0675b8a + 900.218TNDVI - 3.170REIP$	۰/۸۰۲۵	۰/۷۸۲۷



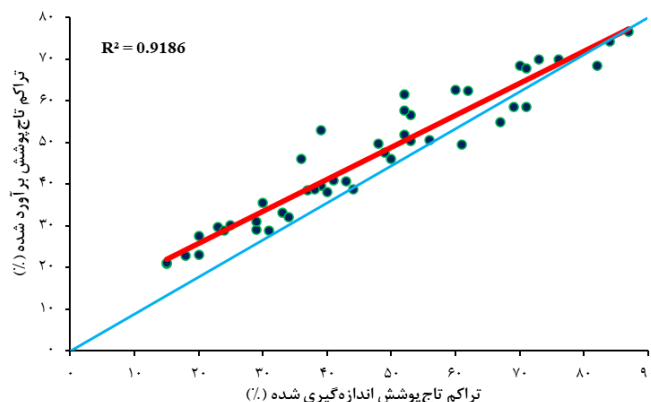
شکل ۳- این نقاط میزان اندازه‌گیری شده و برآورد شده تراکم تاج‌پوشش جنگل (درصد) برای مدل رگرسیون چندمتغیره به روش گام‌به‌گام

Figure 3. Scatterplots of measured and estimated forest canopy cover (percentage) values for multiple linear regression as stepwise



شکل ۴- اهمیت نسبی متغیرهای باندهای اصلی Sentinel-2 و شاخص‌های پوشش گیاهی در روش جنگل تصادفی

Figure 4. Relative importance of variables Sentinel-2 multispectral bands and vegetation indices in Random Forest



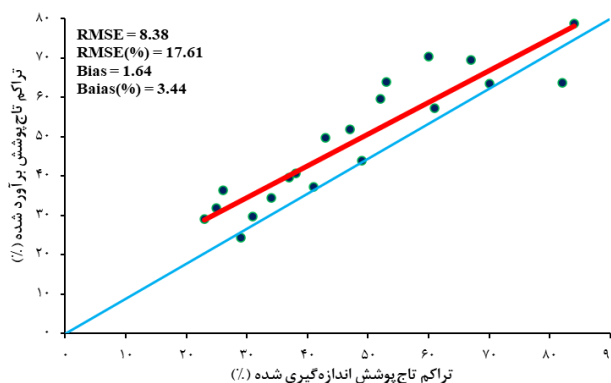
شکل ۵- ابرنقاط میزان اندازه‌گیری شده و برآورد شده تراکم تاج پوشش جنگل (درصد) برای مدل جنگل تصادفی

Figure 5. Scatterplots of measured and estimated forest canopy cover (percentage) values for Random Forest

Bias % برای مدل رگرسیون چندمتغیره به ترتیب ۸/۳۸، ۱/۱۷/۶۱، ۱/۶۴ و ۳/۴۴٪ و برای مدل جنگل تصادفی به ترتیب ۵/۶۷، ۱۲/۲۸٪، ۰/۷- و ۱/۵۲٪- است. بیانگر کارایی بهتر و مناسب‌تر مدل جنگل تصادفی در برآورد تاج پوشش است.

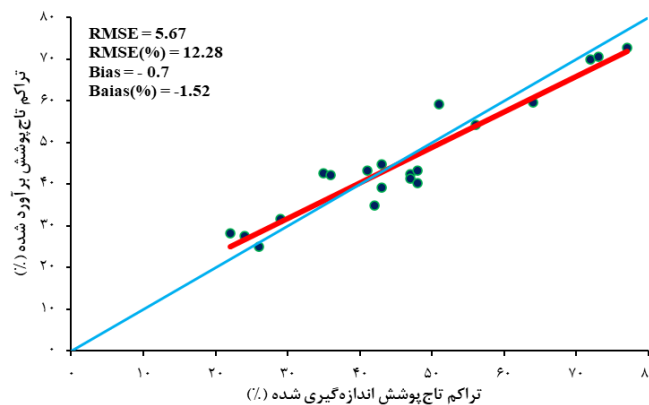
ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها

نتایج حاصل از ارزیابی مدل با ۳۰ درصد از اندازه‌گیری‌های زمینی که در مدل‌سازی استفاده نشده بودند، نشان داد (شکل ۶ و ۷) معیارهای ارزیابی صحت RMSE، RMSE %، Bias و



شکل ۶- اعتبارسنجی زمینی برای برآورد تراکم تاج پوشش جنگل (درصد) توسط مدل رگرسیون چندمتغیره.

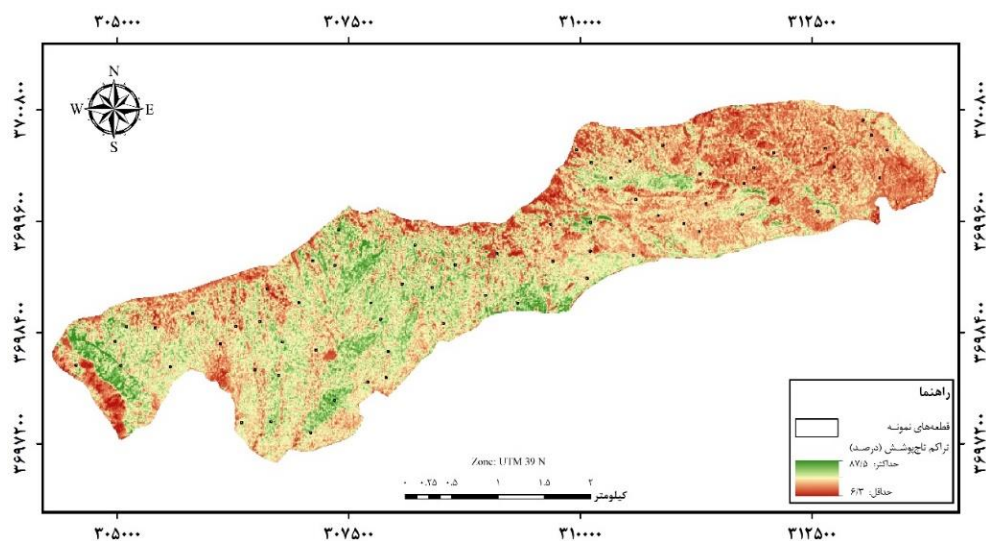
Figure 6. Field validation for estimating forest canopy cover (percentage) by multiple regression model.



شکل ۷- اعتبارسنجی زمینی برای برآورد تراکم تاج پوشش جنگل (درصد) توسط مدل جنگل تصادفی.
Figure 7. Field validation for estimating forest canopy cover (percentage) by Random Forest.

براساس این نقشه تراکم تاج پوشش بین ۸۷/۵ تا ۶/۳ درصد تغییر می کند، که بخش های میانی منطقه مورد مطالعه از تراکم تاج پوشش بالاتری نسبت به مناطق شرقی برخوردار هستند.

باتوجه به قابلیت بالاتر روش جنگل تصادفی نسبت به روش رگرسیون چندمتغیره، از روش جنگل تصادفی برای تهیه نقشه تاج پوشش جنگل استفاده شد. شکل ۸ نقشه تراکم تاج پوشش جنگل (درصد) در منطقه مورد پژوهش را نشان می دهد.



شکل ۸- نقشه تراکم تاج پوشش جنگل (درصد) حاصل از استفاده از مدل جنگل تصادفی بر روی داده های Sentinel-2
Figure 8- Forest canopy cover map (percentage) resulting from using the Random Forest model on Sentinel-2 data

خاک نیازی به معادله خط خاک ندارد (۲۵). کاهش اثرات بازتاب خاک در جنگل های زاگرس که دارای تراکم تاج پوشش پایینی است، اهمیت بالای دارد. Zimmermann و Hoffmann (۲۶) گزارش کرده اند، شاخص های گیاهی تعدیل شده با خاک مهم ترین متغیرها در برآورد تاج پوشش در جنگل های با تاج پوشش کم هستند، جایی که طیفی بازتابی ممکن است تحت تأثیر پس زمینه خاک قرار گیرد. پژوهش Karkon و همکاران (۲۷) نیز نشان داده شاخص GEMI توانایی بالای در تشخیص تراکم تاج پوشش دارد و به طور معمول

بحث و نتیجه گیری

نتایج رگرسیون خطی همبستگی مثبت قوی را بین تاج پوشش جنگل و شاخص های GEMI، NDVI و TNDVI نشان داد. از بین شاخص های پوشش گیاهی، شاخص GEMI با همبستگی ۰/۷۳۱ ارتباط قوی تری با مشخصه تاج پوشش جنگل مورد پژوهش دارد. همبستگی بالای شاخص گیاهی GEMI با تاج پوشش جنگل را می توان به کاهش اثرات بازتاب خاک و جو این شاخص ارتباط داد (۲۶، ۲۵). شاخص GEMI با استفاده از مفهوم خط خاک طراحی شده است، اما برخلاف شاخص های

ندارند، است. داده‌های ماهواره Sentinel-2 با تفکیک زمانی بالا (به ترتیب ۱۰ و ۵ روز در استوا با یک و دو ماهواره)، تفکیک مکانی متوسط (۱۰ تا ۶۰ متر) و تفکیک طیفی بالا امکان پایش و برآورد مشخصه‌های جنگلی را فراهم می‌کند. بررسی توانایی داده‌های این ماهواره و همچنین شفاف‌سازی کارایی مدل‌های تاج‌پوشش یک نیاز اساسی است. چرا که بهترین مدل‌ها می‌تواند بیشتر برای تهیه نقشه‌های تاج‌پوشش جنگل در مقیاس بزرگ و در زمانی معین استفاده شود. در این مطالعه ما توانایی داده‌های ماهواره Sentinel-2 و روش‌های رگرسیون چندمتغیره و جنگل تصادفی در برآورد تاج‌پوشش در جنگل‌های استان لرستان را مورد بررسی قرار دادیم. نتایج به‌دست آمده مناسب بودن داده‌های Sentinel-2 و روش‌های مورد استفاده به‌ویژه روش جنگل تصادفی را برای برآورد و تهیه نقشه تاج‌پوشش جنگل‌ها زاگرس در مقیاس وسیع را نشان می‌دهد. این نتایج برای مدیریت پایدار این جنگل‌ها موثر است.

Reference

- Ahmadian, Z., Gholami, Sh., Sayad, A. and Tase, M., (2017). Spatial evaluation of forest structural features in Zagros forests (Cradle forests, Kermanshah), Iran Forest Ecology, 6, 10. (In Persian).
- Talebi, K. S., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). Forests of Iran. A treasure from the past, a hope for the future, 10.
- Korhonen, L., Packalen, P., & Rautiainen, M. (2017). Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. Remote sensing of environment, 195, 259-274.
- Paletto, A., & Tosi, V. (2009). Forest canopy cover and canopy closure: comparison of assessment techniques. European Journal of Forest Research, 128(3), 265-272.
- Dormann, C. F., Bagnara, M., Boch, S., Hinderling, J., Janeiro-Otero, A., Schäfer, D., ... & Hartig, F. (2020). Plant species richness increases with light availability, but not variability, in temperate forests understorey. BMC ecology, 20(1), 1-9.
- Gray, A. N., McIntosh, A. C., Garman, S. L., & Shettles, M. A. (2021). Predicting canopy cover of diverse forest types from individual tree measurements. Forest Ecology and Management, 501, 119682.
- Sefidi, K., Copenheaver, C. A., & Sadeghi, S. M. M. (2021). Anthropogenic pressures decrease structural complexity in Caucasian forests of Iran. Écoscience, 1-11.
- Panahandeh, T., Attarod, P., Sadeghi, S. M. M., Bayramzadeh, V., Tang, Q., & Liu, X. (2022). The performance of the reformulated Gash

می‌توانست مناطق مرزی با تراکم تاج‌پوشش پایین درختان را از مناطق بدون تاج‌پوشش جدا کند. شاخص‌های NDVI و TNDVI بر پایه تفاوت نرمال شده بین باندهای NIR و قرمز است. براساس مطالعه Mao و همکاران (۲۸)، شاخص‌های پوشش گیاهی نرمال‌شده می‌توانند اثرات زاویه ارتفاع خورشیدی، اثر توپوگرافی، ابر/سایه و تأثیرات اتمسفر را از بین ببرند. در عین حال، آن‌ها منعکس‌کننده ویژگی‌های تاج‌پوشش هستند. علاوه بر این نقش اساسی NDVI در برآورد تراکم تاج‌پوشش در پژوهش Davies و همکاران (۲۹) نیز عنوان شده است.

در این مطالعه، دو روش رگرسیون چندمتغیره و جنگل تصادفی به‌منظور برآورد تاج‌پوشش مورد استفاده قرار گرفتند. ضریب تبیین (R^2) به‌دست‌آمده برای این مدل‌ها به ترتیب ۰/۸۰۲۵ و ۰/۹۱۸۶ است، که بیانگر عملکرد معقول هر دو مدل است. متغیرهای مورد استفاده در روابط ریاضی این مدل‌ها نیز نشان‌می‌دهند شاخص‌های پوشش گیاهی از اهمیت بالای در تهیه مدل‌های برآورد تاج‌پوشش دارند. این مورد در رابطه با شاخص REIP و مدل رگرسیون چند متغیره مشهودتر است چرا که REIP به تنهای با همبستگی ۰/۰۵۷ را تاج‌پوشش نشان داد اما استفاده از آن در رگرسیون چندمتغیره به همراه سایر متغیرها بالاترین ضریب تبیین را نشان داد. پس از شاخص‌های پوشش گیاهی باندهای طیفی مادون قرمز نزدیک، لبه قرمز و قرمز اهمیت بالای را دارند که معمولاً شاخص‌های گیاهی نیز از این باندهای محاسبه می‌شوند. اهمیت شاخص‌های پوشش گیاهی در برآورد مشخصه تاج‌پوشش جنگل در مطالعات Nasiri و همکاران (۱۵)، میری و درویش‌صفت (۱۳)، Karkon و همکاران (۲۷) و Korhonen و همکاران (۳) نیز بیان شده است.

ارزیابی مدل‌های رگرسیون چند متغیره و جنگل تصادفی در برآورد تاج‌پوشش جنگل نشان دهنده صحت مناسب هر دو مدل است. اما در حالت مقایسه‌ای صحت مدل جنگل تصادفی $RMSE = ۵/۶۷$ ، $Bias = -۰/۷$ و $RMSE = ۱۲/۲۸$ ، $Bias = -۱/۵۲$ از مدل رگرسیون چندمتغیره $RMSE = ۱۷/۶۱$ ، $Bias = ۱/۶۴$ و $RMSE = ۳/۴۴$ ، $Bias = ۸/۳۸$ بیشتر است. نتایج پژوهش‌های Nasiri و همکاران (۱۲)، Zhao و همکاران (۳۰) و Karlson و همکاران (۳۱) که بیان کرده‌اند روش جنگل تصادفی توانایی بالای در برآورد تاج‌پوشش جنگل دارند، تأییدی بر این نتیجه پژوهش حاضر هستند.

مدل مناسب و در نهایت نقشه‌های دقیق و به‌موقع تاج‌پوشش جنگل ابزار مهمی برای پژوهش‌های زیست‌محیطی و مدیریت منابع جنگلی به‌خصوص جنگل‌های که تولید چوب صنعتی

9. rainfall interception model in the Hyrcanian temperate forests of northern Iran. *Journal of Hydrology*, 612, 128092.
10. Senf, C., Sebal, J., & Seidl, R. (2021). Increasing canopy mortality affects the future demographic structure of Europe's forests. *One Earth*, 4(5), 749-755.
11. Notaro, S., & Paletto, A. (2008). Natural disturbances and natural hazards in mountain forests: a framework for the economic valuation. *Dipartimento di Economia, Università degli studi di Trento* (8).
12. FAO (2001) Global forest resources assessment 2000. Main report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
13. Nasiri, V., Darvishsefat, A. A., Arefi, H., Griess, V. C., Sadeghi, S. M. M., & Borz, S. A. (2022). Modeling forest canopy cover: A synergistic use of Sentinel-2, aerial photogrammetry data, and machine learning. *Remote Sensing*, 14(6), 1453.
14. Miri, N., Darvishsefat, A., A., (2021). Estimating Zagros forest canopy using Landsat 8 oli sensor data, *Iran Forest Ecology*, 17, 196-209. (In Persian).
15. Eskandari, S., Reza Jaafari, M., Oliva, P., Ghorbanzadeh, O., & Blaschke, T. (2020). Mapping land cover and tree canopy cover in Zagros forests of Iran: Application of Sentinel-2, Google Earth, and field data. *Remote Sensing*, 12(12), 1912.
16. Li, W., Niu, Z., Shang, R., Qin, Y., Wang, L., & Chen, H. (2020). High-resolution mapping of forest canopy height using machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102163.
17. Shahvali Kouhshour, A., M. Pir Bavaghar and P. Fatehi. 2012. Forest cover density mapping in sparse and semi dense forests using forest canopy density model (Case study: Marivan forests). *Journal of Applied RS & GIS Techniques in Natural Resource Science*, 3(3): 73-83 (In Persian).
18. Azizi, Z., A. Najafi and H. Sohrabi. (2008). Forest canopy density estimating using satellite images. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 8.
19. Vafaei, S., Maleknia, R., Naghavi, H., & Fathizadeh, O. (2022). Estimation of forest canopy using remote sensing and geostatistics (case study: Marivan Baghan Forests). *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(1), 71-82. (In Persian).
20. Nazariani, N., & Fallah, A. (2023). Investigation of the Effect of Main and Artificial Bands of Sentinel 2 satellite Images on Estimation of Quantitative Characteristics of Zagros Forests. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 31(124), 103-118.
21. Korhonen, L., Packalen, P., & Rautiainen, M. (2017). Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. *Remote sensing of environment*, 195, 259-274.
22. Hua, Y., & Zhao, X. (2021). Multi-Model Estimation of Forest Canopy Closure by Using Red Edge Bands Based on Sentinel-2 Images. *Forests*, 12(12), 1768.
23. Akın, A., Çilek, A., & Middel, A. (2023). Modelling tree canopy cover and evaluating the driving factors based on remotely sensed data and machine learning. *Urban Forestry & Urban Greening*, 86, 128035.
24. Mahdavi, A., M. Niknejad and O. Karami. (2014). Multi-Criteria Evaluation of Land for Ecotourism Development (Case Study: Khorram-Abad Country). *Ecology of Iranian Forest*, 2(4): 56-69. (In Persian)
25. Yeganeh, H., S. Jamale Khajedein, F. Amiri and A.R.M. Shariff. (2012). Monitoring rangeland ground cover vegetation using multitemporal MODIS data. *Arabian Journal of Geosciences*, 1-12. (In Persian).
26. McDonald, A. J., Gemmell, F. M., & Lewis, P. E. (1998). Investigation of the utility of spectral vegetation indices for determining information on coniferous forests. *Remote Sensing of Environment*, 66(3), 250-272.
27. Zimmermann, S., & Hoffmann, K. (2020). Evaluating the capabilities of Sentinel-2 data for large-area detection of bark beetle infestation in the Central German Uplands. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(2), 024515.
28. Karkon Varnosfaderani, M., Kharazmi, R., Nazari Samani, A., Rahdari, M. R., Matinkhah, S. H., & Aslinezhad, N. (2017). Distribution changes of woody plants in Western Iran as monitored by remote sensing and geographical information system: a case study of Zagros forest. *Journal of forestry research*, 28(1), 145-153.
29. Mao, Z. H., Deng, L., Duan, F. Z., Li, X. J., & Qiao, D. Y. (2020). Angle effects of vegetation indices and the influence on prediction of SPAD values in soybean and maize. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93, 102198.

30. Davies, S. J., Abiem, I., Salim, K. A., Aguilar, S., Allen, D., Alonso, A., ... & Yap, S. L. (2021). ForestGEO: Understanding forest diversity and dynamics through a global observatory network. *Biological Conservation*, 253, 108907.
31. Zhao, Q., Wang, F., Zhao, J., Zhou, J., Yu, S., & Zhao, Z. (2018). Estimating forest canopy cover in black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) plantations on the Loess Plateau using random forest. *Forests*, 9(10), 623.
32. Karlson, M., Ostwald, M., Reese, H., Sanou, J., Tankoano, B., & Mattsson, E. (2015). Mapping tree canopy cover and aboveground biomass in Sudano-Sahelian woodlands using Landsat 8 and random forest. *Remote Sensing*, 7(8), 10017-10041.