



برآورد تاج‌پوشش جنگل بلوط با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی لندست ۹ در جنگل‌های زاگرس شمالی

سونیا احمدی^۱، پرویز فاتحی^{۲*}، منوچهر نمیرانیان^۳ و ناصح میری^۴

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲استادیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۴دانشجوی دکتری، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۶)

چکیده

مقدمه: تاج‌پوشش جنگل (FCC) از مشخصه‌های ساختاری مهم در پایش سلامت و کیفیت توده‌های جنگلی است. اندازه‌گیری این مشخصه براساس روش‌های زمینی به هزینه و زمان زیاد نیاز دارد و اجرا در سطح‌های وسیع، بسیار سخت است. امروزه استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور می‌تواند محدودیت روش‌های زمینی را جبران کند. پژوهش پیش رو با هدف بررسی کارایی ماهواره‌ی لندست ۹ در مدل‌سازی و برآورد تاج‌پوشش در بخشی از جنگل‌های بلوط زاگرس شمالی انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها: به‌منظور جمع‌آوری داده‌های زمینی مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل، ۷۹ قطعه نمونه مربع‌شکل با ابعاد ۴۵×۴۵ متر براساس روش نمونه‌برداری تصادفی-منظم با ابعاد شبکه‌ی آماربرداری ۲۰۰×۲۰۰ متر در تابستان سال ۱۴۰۲ در بخشی از جنگل‌های بانه در استان کردستان پیاده شد. در هر قطعه نمونه، قطر بزرگ و عمود بر آن تاج درختان با استفاده از متر نواری اندازه‌گیری و در نهایت برای هر قطعه نمونه براساس مساحت تاج هر درخت، مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل محاسبه شد. یک فریم از داده‌های سنجنده‌ی OLI-2 ماهواره‌ی لندست ۹ در سطح تصحیح Collection 2 Level 1 مربوط به تاریخ ۲۳ تیر ۱۴۰۲ دریافت شد. پس از بررسی کیفیت هندسی تصویر و تصحیح اتمسفری به روش FLAASH، شاخص‌های پوشش گیاهی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تبدیل تسلدکپ روی تصویر انجام گرفت. در مجموع ۷ باند اصلی و ۳۵ باند محاسباتی استفاده و ارزش‌های طیفی این ۴۲ متغیر طیفی به‌دست‌آمده از داده‌های لندست ۹ با استفاده از نقشه‌ی قطعه نمونه‌های زمینی برداشت‌شده استخراج شد. در ادامه، مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل با استفاده از مدل‌های آماری پارامتری رگرسیون به روش گام‌به‌گام (MLR) و ناپارامتری جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) براساس سه مجموعه از متغیرهای طیفی (باندهای اصلی، باندهای محاسباتی و ترکیب باندهای اصلی و محاسباتی) و ۷۰ درصد داده‌ها مدل‌سازی شد. ارزیابی و برازش مدل‌های رگرسیونی با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و جذر میانگین مربعات خطا نسبی (rRMSE) به روش اعتبارسنجی متقابل براساس ۳۰ درصد داده‌ها انجام گرفت.

یافته‌ها: بررسی داده‌های تاج‌پوشش جنگل اندازه‌گیری شده‌ی زمینی براساس آماره‌های توصیفی نشان داد که جنگل تحت پژوهش در وضعیت نیمه‌انبوه قرار دارد. تحلیل همبستگی پیرسون انجام‌گرفته برای بررسی ارتباط مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل با متغیرهای طیفی نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی نسبت به تغییرات تاج‌پوشش جنگل حساسیت بیشتری دارند. نتایج مدل‌سازی با استفاده از ۷۰ درصد قطعه نمونه‌ها نشان داد که مدل حاصل از RF براساس ترکیب باندهای اصلی و محاسباتی با $R^2 = 0/88$ و $rRMSE = 16/95$ مدل بهینه در برآورد مقدار تاج‌پوشش است. ارزیابی اهمیت نسبی متغیرهای طیفی استفاده‌شده در مدل به‌دست‌آمده نشان داد که شاخص گیاهی NDNIR.SWIR2 دارای بیشترین تأثیر در فرایند مدل‌سازی RF و تجزیه مؤلفه اصلی حاصل از باند ۷ (PCA.B7) دارای کمترین اهمیت است. اعتبارسنجی مدل‌های به‌دست‌آمده با استفاده از اعتبارسنجی متقابل نشان داد که مدل RF حاصل از باندهای اصلی تصویر ماهواره‌ی لندست ۹ با مقادیر $R^2 = 0/85$ و $rRMSE = 15/65$ به‌عنوان بهترین مدل برآورد و نقشه‌برداری تاج‌پوشش جنگل تحت پژوهش انتخاب شد. نتیجه‌گیری: به‌طور کلی این پژوهش نشان داد که با استفاده از باندهای اصلی داده‌های ماهواره‌ی لندست ۹ به‌همراه به‌کارگیری الگوریتم یادگیری ماشین RF می‌توان با دقت مناسبی مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل را در جنگل‌های زاگرس شمالی برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: تاج‌پوشش جنگل، جنگل بلوط زاگرس، روش‌های یادگیری ماشین، لندست ۹.

مقدمه

al., 2017; Miri & Darvishsefat, 2021; Pilaš et al., 2020; Hua & Zhao, 2021; Huang et al., 2021; Gao et al., 2022; Xie et al., 2022; Nasiri et al., 2022; Yang et al., 2022; Guan et al., 2023; Narine et al., 2023). مجموعه ماهواره‌های چندطیفی لندست، طولانی‌ترین برنامه رصد زمین است که به‌طور مداوم سطح زمین را در مقیاس مکانی متوسط پایش می‌کند (Roy et al., 2014). جدیدترین ماهواره اضافه‌شده به برنامه لندست، لندست ۹ است که در سپتامبر ۲۰۲۱ توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی^۴ (NASA) و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۵ (USGS) در مدار قرار گرفته است. لندست ۹ مجهز به سنجنده‌های پیشرفته‌ای از جمله تصویربرداری عملیاتی زمین-۶۲ (OLI-2) و سنجنده مادون قرمز حرارتی-۷۲ (TIRS-2) است. این ماهواره در مقایسه با نسل پیشین (لندست ۸)، از نظر رادیومتری و هندسی بهبود یافته است. سنجنده OLI-2 ماهواره لندست ۹ دارای تفکیک رادیومتری ۱۴ بیت است (لندست ۸، ۱۲ بیت بود) که بر این اساس این سنجنده می‌تواند تفاوت‌های ظریف به‌ویژه در مناطق تاریک‌تر مانند آب یا جنگل‌های متراکم را تشخیص دهد (Jiang et al., 2022; Palanisamy et al., 2023; Zhu et al., 2024). بنابراین داده‌های ماهواره لندست ۹ براساس ویژگی‌هایی تقویت‌شده، ممکن است برآورد تاج‌پوشش جنگل را بهبود بخشد. Miri & Darvishsefat (2021) با هدف ارزیابی ماهواره لندست ۸ در برآورد تاج‌پوشش جنگل‌های زاگرس نشان دادند که ماهواره مذکور با $rRMSE = 15/24\%$ برآورد مطلوبی از مشخصه تاج‌پوشش ارائه می‌دهد. برآورد تاج‌پوشش جنگل براساس داده‌های ماهواره‌ای بر توسعه یک مدل آماری رگرسیونی، بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده تاج‌پوشش در قطعه نمونه‌های زمینی و ارزش‌های طیفی داده‌های سنجش از دور

تاج‌پوشش جنگل^۱ (FCC) که به‌صورت نسبت مساحت تصویر تاج درختان به سطح زمین تعریف می‌شود (Korhonen et al., 2006)، مشخصه‌ای اساسی برای توصیف ساختار و عملکرد بوم‌سازگان جنگلی است (Zhou et al., 2020; Yu et al., 2023). تاج‌پوشش جنگل از مهم‌ترین مشخصه‌ها در برآورد متغیرهای زیست‌فیزیکی (شاخص سطح برگ^۲، زی‌توده روی زمینی^۳، پایش خسارت ناشی از آفات و ارزیابی تغییرات جنگل در سطوح وسیع است (Korhonen et al., 2017; Huang et al., 2021; Xie et al., 2022). بنابراین اطلاعات دقیق و به‌روز در مورد تاج‌پوشش جنگل در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف می‌تواند در فرایند تصمیم‌گیری سازمان‌های مدیریت جنگل استفاده شود و با درک ویژگی‌های آن و تغییر الگوها، پایه و اساس مدیریت جنگل را شکل دهد. روش‌های سنتی اندازه‌گیری تاج‌پوشش جنگل مانند اندازه‌گیری‌های زمینی، تفسیر چشمی، روش‌های نمونه‌برداری نقطه‌ای، روش‌های نمونه‌برداری خطی، عکس‌برداری نیم‌کره‌ای و معادله‌های آلومتری (Korhonen et al., 2006; Pilaš et al., 2020) می‌توانند داده‌هایی با دقت به‌نسبت زیاد به‌دست دهند، اما مستلزم کار، صرف زمان و انرژی زیاد هستند (Huang et al., 2021; Gao et al., 2022).

به‌تازگی فناوری سنجش از دور (RS) داده‌های ارزشمندی را برای مدل‌سازی مشخصه‌های ساختاری جنگل به‌ویژه تاج‌پوشش جنگل در مقیاس‌های مختلف فراهم کرده است. داده‌های سنجش از دور چندطیفی ماهواره‌ای با دسترسی آزاد، هزینه کم، حداقل زمان و به‌صورت پیوسته در مقیاس منطقه‌ای و جهانی، می‌توانند به‌عنوان یک منبع داده مهم برای برآورد تاج‌پوشش جنگل در مقیاس‌های مختلف استفاده شوند (Fatehi et al., 2015; Korhonen et al., 2015).

4. National Aeronautics and Space Administration
5. United States Geological Survey
6. Operational Land Imager-2
7. Thermal Infrared Sensor-2

1. Forest Canopy Cover
2. Leaf Area Index
3. Above Ground Biomass

با سنجنده‌ی OLI ماهواره‌ی لندست ۸ مدل‌سازی شد که روش RF ($rRMSE = 17/81$) عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر ارائه کرد (Guan et al., 2023). همچنین Nasiri et al. (2022) در پژوهشی در جنگل شمال ایران، تاج‌پوشش جنگل را با روش‌های RF، SVR، شبکه‌ی ارتجاعی^۷ (ENET) و تقویت گرادیان^۸ (XGBoost) مدل‌سازی کردند و دریافتند که مدل RF با $rRMSE = 18/87$ بهترین عملکرد را در برآورد تاج‌پوشش دارد.

بر همین اساس با توجه به اهمیت مشخصه‌ی ساختاری تاج‌پوشش جنگل در جنگل‌های زاگرس، در پژوهش پیش‌رو کارایی داده‌های ماهواره لندست ۹ با استفاده از روش‌های آماری رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR) و روش‌های ناپارامتری یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVR) در برآورد تاج‌پوشش بخشی از جنگل‌های زاگرس شمالی ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

گردش کار اجرای پژوهش در شکل ۱ آورده شده است. فرایند گام‌به‌گام مراحل برآورد و مدل‌سازی تاج‌پوشش جنگل‌های زاگرس با استفاده از ماهواره لندست ۹ براساس سه روش آماری RF، MLR و SVR در پژوهش در این شکل نشان داده شده است. هر مرحله در بخش‌های مربوط با جزئیات بیشتری توضیح داده شده است.

منطقه پژوهش

پژوهش پیش‌رو در بخشی از جنگل‌های زاگرس شمالی واقع در بخش نمشیر از دهستان کانی‌سور در ۳۰ کیلومتری شهرستان بانه از توابع استان کردستان انجام گرفت (شکل ۲ الف). منطقه پژوهش با مساحت ۳۲۲ هکتار در گستره جغرافیایی $45^{\circ} 43' 19''$ تا

استوار است (Feliciano et al., 2017). روش‌های رگرسیونی پارامتری (از جمله رگرسیون گام‌به‌گام^۱) به دلیل سادگی، برای مدل‌سازی مشخصه‌های کمی جنگل براساس داده‌های سنسور از دور به‌طور گسترده استفاده می‌شوند (Fatehi et al., 2015; Miri & Darvishsefat, 2021; Moradi et al., 2020; Hua & Zhao, 2021). (Vafaei et al. (2022) در پژوهشی براساس رگرسیون خطی چندمتغیره^۲ (MLR)، تاج‌پوشش جنگل‌های زاگرس را مدل‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که مدل به‌دست‌آمده با ضریب تبیین ($R^2 = 0/52$) دارای عملکرد مناسبی نیست. Zhao (2021) نیز در بخشی از جنگل‌های چین براساس روش رگرسیون خطی چندمتغیره و ماهواره سنتینل ۲، تاج‌پوشش جنگل را با $rRMSE = 20/76$ برآورد کردند. (Fatehi et al. (2015) در پژوهشی برای برآورد تاج‌پوشش پارک ملی سوئیس از رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل حاصل با $rRMSE$ برابر با ۱۰ درصد برآورد مناسبی از تاج‌پوشش جنگل ارائه داد.

روش‌های پارامتری افزون‌بر پیروی از برخی پیش‌فرض‌ها (نرمال بودن داده‌ها) زمانی که روابط غیرخطی پیچیده بین متغیرها وجود دارد، کارایی لازم را ندارند. در چنین مواردی، به ایجاد مدل‌های ناپارامتری مبتنی بر یادگیری ماشین^۳ که قابلیت زیادی در مدل‌سازی رابطه غیرخطی بین مشخصه تاج‌پوشش جنگل (متغیر وابسته) و داده‌های ماهواره‌ای (متغیر مستقل) دارند توجه شده است (Breiman, 2001; Miri et al., 2017; Mahlangu et al., 2018; Pilaš et al., 2020; Zhou et al., 2020; Nasiri et al., 2022; Guan et al., 2023; Miri et al., 2024). تاج‌پوشش جنگل در جنگل‌های چین با روش‌های جنگل تصادفی^۴ (RF)، ماشین بردار پشتیبان^۵ (SVR) و k-نزدیک‌ترین همسایه^۶ (KNN)

1. Step-wise Regression
2. Multivariate Linear Regression
3. Machine Learning
4. Random Forest
5. Support Vector Regression

6. K-Nearest Neighbors

7. Elastic Net

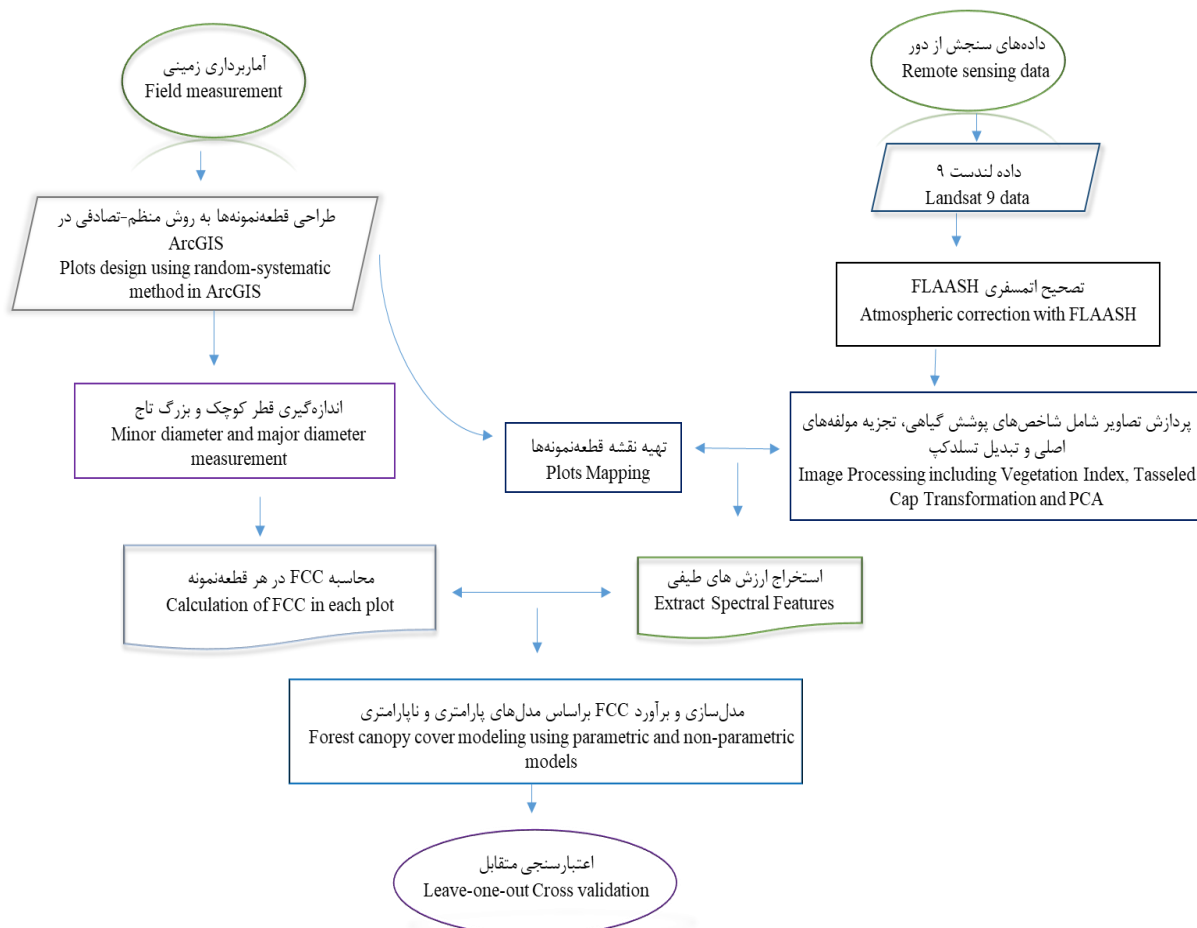
8. Extreme Gradient Boosting

منطقه مبتنی بر کشاورزی، جنگلداری و دامداری و بسیار وابسته به جنگل است. مهم ترین استفاده های جنگل، تولید علوفه دام، چرا، چوب هیزمی و برداشت محصولات غیرچوبی است (Mazouji, 2020).

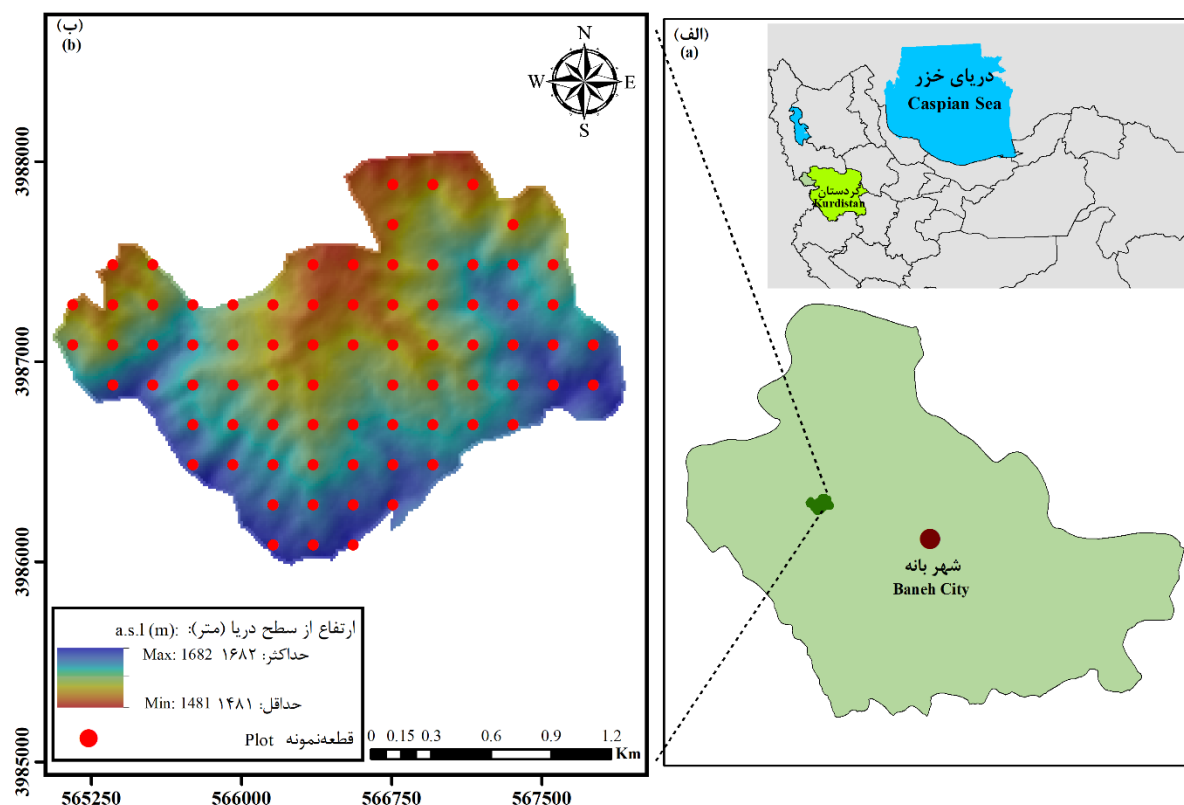
شیوه اجرای پژوهش اندازه گیری زمینی

به منظور برداشت داده های زمینی با استفاده از روش نمونه برداری تصادفی- منظم، شبکه آمار برداری به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ متر و ۷۹ قطعه نمونه در جنگل های شهرستان بانه طراحی و موقعیت نقاط محل تقاطع شبکه نمونه برداری به عنوان مختصات

۳۶°۲'۴" تا ۳۶°۰'۵۸" طول شرقی و ۴۵°۱۴'۴۵" عرض شمالی در سیستم مختصات جغرافیایی واقع شده است. با توجه به محدوده ارتفاع از سطح دریای ۱۴۸۱ تا ۱۶۸۲ متر می توان وضعیت پستی و بلندی به نسبت ملایمی برای جنگل تحت پژوهش در نظر داشت. این جنگل دارای آبوهوای نیمه مدیترانه ای با اقلیم نیمه مرطوب سرد است میانگین بارندگی سالانه ۷۶۰ میلی متر و به صورت برف و باران است که ۶۰ تا ۷۰ درصد آن در زمستان متمرکز است. گونه های غالب این جنگل ویول (*Quercus libani Oliv.*)، مازودار (*Quercus infectoria Oliv.*) و برودار (*Quercus brantii Lindl.*) است که بیشتر به صورت گلزنی شده یا شاخه زاد دیده می شوند. معیشت مردم



شکل ۱- گردش کار کلی برای برآورد تاج پوشش جنگل های زاگرس با استفاده از داده های ماهواره لندست ۹
Figure 1. Workflow for Zagros forest canopy cover estimation using Landsat 9 data



شکل ۲- موقعیت جنگل تحت پژوهش در شهرستان بانه، استان کردستان و ایران (الف) و وضعیت پراکنش قطعه نمونه‌های زمینی روی نقشه مدل ارتفاع رقومی (DEM) داده‌های آلوس-۲ (ب)

Figure 2. Location of the study area in Baneh city, Kurdistan province and Iran (a), And the map of field sample plots overlaid on the ALOS-2 DEM data (b)

S: مساحت تاج هر درخت به متر مربع و CD_1 و CD_2 : به ترتیب قطرهای بزرگ و عمود بر آن تاج درختان اندازه‌گیری شده به متر است.

داده‌های سنجش از دور

یک فریم از تصویر لندست ۹ مربوط به ۲۳ تیر ۱۴۰۲ با گذر و ردیف ۱۶۸ و ۳۵ به صورت رایگان از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکایی (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) در ۱۱ باند طیفی در سطح تصحیح Collection 2 Level 1 (تصاویر دارای پردازش‌های هندسی، رادیومتری و بهبود خطای ناشی از پستی و بلندی) دریافت شد. پس از بررسی درستی کیفیت هندسی، برای به حداقل رساندن اثرهای جو از تصویر استفاده شده تصحیح اتمسفری FLAASH^۱ روی

نقطه شمال غرب قطعه نمونه‌ها برداشت شد (شکل ۲ب). بر اساس مختصات قطعه نمونه‌ها و با استفاده از گیرنده موقعیت یاب جهانی (GPS) (با دقت ۳ تا ۷ متر)، موقعیت قطعه نمونه‌ها روی زمین بازیابی شد. در ادامه، قطعه نمونه‌ها به صورت مربع شکل با ابعاد ۴۵×۴۵ متر با استفاده از قطب‌نما پیاده و قطر بزرگ و قطر عمود بر آن تاج در همه پایه‌های دانه‌زاد و شاخه‌زاد با استفاده از متر نواری در تابستان سال ۱۴۰۲ اندازه‌گیری شد. برای محاسبه مساحت تاج هر درخت، با توجه به شکل نامتقارن تاج در جنگل تحت پژوهش، از رابطه مساحت بیضی استفاده شد (رابطه ۱) (Namiranian, 2007). در نهایت، مجموع مساحت تاج درختان و مساحت قطعه نمونه (۲۰۲۵ مترمربع)، تاج پوشش برای هر قطعه نمونه به دست آمد.

$$S = \frac{\pi}{4} (CD_1 \times CD_2) \quad \text{رابطه ۱}$$

1. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

پوشش گیاهی (جدول ۱)
 (<https://www.indexdatabase.de/>)، تجزیه مؤلفه‌های
 اصلی (شش مؤلفه) و تبدیل تسلدکپ (سه مؤلفه) روی
 تصاویر لندست ۹ در محیط نرم‌افزار ENVI 5.6 انجام
 گرفت.

تصویر انجام گرفت. باندهای ۸ (باند پانکروماتیک)، ۹
 (باند سیروس) و ۱۰ و ۱۱ (باندهای حرارتی) که
 به ترتیب خصوصیات مکانی، ابری و حرارتی تصویر را
 نشان می‌دهند، از ادامه تجزیه و تحلیل‌ها حذف شدند.
 همچنین برای استخراج هرچه کامل‌تر اطلاعات از
 داده‌های ماهواره‌ای، پردازش‌هایی مانند شاخص‌های

جدول ۱- شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه شده براساس داده‌های لندست ۹

Table 1. Vegetation indices generated from the Landsat 9 data

ردیف Number	شاخص Index	نام شاخص Name	فرمول Formula
1	SR	Simple Ratio	NIR/RED
2	NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
3	EVI	Enhanced Vegetation Index	$2.5 \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + 6 \cdot RED - 7.5 \cdot BLUE) + L}$
4	GDVI	Green Difference Vegetation Index	NIR-GREEN
5	NDWI	Normalized Difference Water Index	$\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$
6	MNDWI	Modified Normalized Differences Vegetation Index	$\frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$
7	DVI	Difference Vegetation Index	NIR-RED
8	CI	Coloration Index	$\frac{RED - GREEN}{RED + GREEN}$
9	GR	Green Ratio	NIR/GREEN
10	VI	Vegetation Index	GREEN/RED
11	SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	$2.5 \times (1 + L) \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)}$
12	CIgreen	Chlorophyll Index Green	$(NIR/GREEN) - 1$
13	DVIMSS	Differenced Vegetation Index MSS	$2.4 \times NIR/RED$
14	GBNDVI	Green-Blue NDVI	$\frac{NIR - (GREEN + BLUE)}{NIR + (GREEN + BLUE)}$
15	GRNDVI	Green-Red NDVI	$\frac{NIR - (GREEN + RED)}{NIR + (GREEN + RED)}$
16	MSR NIR.Red	Modified Simple Ratio NIR\Red	$\frac{\left(\frac{NIR}{RED}\right) - 1}{\sqrt{\left(\frac{NIR}{RED}\right) + 1}}$
17	ND860.1640	Normalized Difference 860/1640	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$
18	NDGreen.Red	Normalized Difference Green/Red	$\frac{GREEN - RED}{GREEN + RED}$
19	NDNIR.Blue	Normalized Difference Nir/Blue	$\frac{NIR - BLUE}{NIR + BLUE}$
20	NDNIR.Green	Normalized Difference Nir/Green	$\frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$
21	NDNIR.SWIR2	Normalized Difference Nir/Swir	$\frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$
22	TNDVI	Transformed NDVI	$\sqrt{\frac{NIR - RED}{NIR + RED} + 0.5}$
23	TVI	Transformed Vegetation Index	$\sqrt{\frac{RED - GREEN}{RED + GREEN} + 0.5}$
24	VARIgreen	Visible Atmospherically Resistant Index Green	$\frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE}$
25	WDRVI	Wide Dynamic Range Vegetation Index	$\frac{0.1(NIR - RED)}{0.1(NIR + RED)}$

روش تحلیل

برآورد تاج پوشش جنگل

۴۱ متغیر طیفی از داده‌های لندست ۹ شامل باندهای اصلی و محاسباتی (شاخص‌های پوشش گیاهی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و باندهای حاصل از تبدیل تسلدکپ) برای مدل‌سازی و برآورد تاج پوشش جنگل تهیه شد. ابتدا همبستگی پیرسون بین متغیرهای طیفی با تاج پوشش جنگل با استفاده از ماتریکس همبستگی براساس بسته "corrplot" نرم‌افزار R 4.3.2 بررسی شد. در ادامه از روش‌های پارامتری MLR و ناپارامتری RF و SVR برای مدل‌سازی استفاده شد. تجزیه و تحلیل‌های رگرسیونی، نوعی رویکرد تجربی برای تعیین روابط بین متغیرها، یعنی متغیرهای وابسته (تاج پوشش جنگل) و مستقل (متغیرهای طیفی) است. در سنجش از دور، تحلیل رگرسیون به دلیل سهولت در اجرا و کارایی زیاد، کاربرد گسترده‌ای دارد (Fatehi et al., 2015). رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده شده برای برآورد تاج پوشش جنگل، به روش گام به گام انجام گرفت. در این روش متغیرها به صورت گام به گام به مدل اضافه می‌شوند. اگر متغیر اضافه شده براساس آماره‌های p -value و F -value سبب بهبود معنی دار مدل شده باشد، در مدل باقی می‌ماند و در غیر این صورت حذف خواهد شد. یک پیش فرض مهم مرتبط با روش‌های پارامتری پیروی از توزیع نرمال مشخصه وابسته (تاج پوشش جنگل) است. در این پژوهش از آزمون آماری شاپیرو-ویلک^۱ برای ارزیابی توزیع نرمال داده‌های تاج پوشش استفاده شد. در روش RF برای تشکیل هر درخت دسته متفاوتی از الگوهای موجود با در نظر گرفتن جایگزینی دوباره هر الگوی انتخاب شده، برگزیده می‌شود. در این روش، دو مشخصه n tree (تعداد درختان) و m try (تعداد متغیرها) اهمیت زیادی دارند که در این پژوهش مقادیر n tree ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ و مقادیر m try

مختلف براساس مجموعه‌های باندی وارد شده آزمون شد. روش SVR براساس یک تابع کرنل^۲ تعریف شده توسط کاربر، فضای ویژگی اصلی را به یک فضای N بعدی تبدیل می‌کند. در پژوهش پیش رو، برای اجرای مدل SVR از کرنل خطی استفاده شد. مدل‌سازی براساس سه مجموعه باندی (باندهای اصلی، باندهای محاسباتی، ترکیب آنها) برای هر تصویر و استفاده از ۵۵ قطعه نمونه (۷۰ درصد نمونه‌ها) انجام گرفت. اجرای هر سه مدل RF، MLR و SVR در محیط نرم‌افزار R 4.3.2 به ترتیب براساس بسته‌های "caret"، "randomForest" و "e1071" انجام گرفت.

اعتبارسنجی مدل‌ها

به منظور ارزیابی و برازش مدل‌های رگرسیونی و نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌های آماری، ۳۰ درصد داده‌ها به صورت تصادفی انتخاب و به عنوان مجموعه داده‌های ارزیابی استفاده شد. رابطه بین تاج پوشش جنگل برآورد شده از تصاویر ماهواره‌ای و تاج پوشش جنگل اندازه‌گیری شده روی زمین با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و جذر میانگین مربعات خطا نسبی (rRMSE) (رابطه‌های ۲، ۳ و ۴) به روش اعتبارسنجی متقابل^۳ اعتبارسنجی شدند. همچنین با توجه به تعداد کم، داده‌های ارزیابی نیز به کار برده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (FCC_i - \widehat{FCC}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (FCC_i - \overline{FCC})^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (FCC_i - \widehat{FCC}_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{FCC} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه‌های ذکر شده، n : ۲۴ قطعه نمونه انتخاب شده برای ارزیابی مدل‌ها، \widehat{FCC}_i : تاج پوشش برآورد شده از مدل‌ها، FCC_i : تاج پوشش

جنگل در قطعه نمونه‌ها ۴۸/۱۸ درصد، کمترین مقدار تاج‌پوشش جنگل اندازه‌گیری شده ۴/۶۲ درصد و بیشترین مقدار آن ۱۰۰ درصد است (جدول ۲). همچنین براساس طبقه‌بندی تاج‌پوشش جنگل قطعه‌نمونه‌های اندازه‌گیری شده می‌توان گفت که تاج‌پوشش در منطقه در طبقه نیمه‌انبوه (۵۰-۲۵ درصد) قرار دارد.

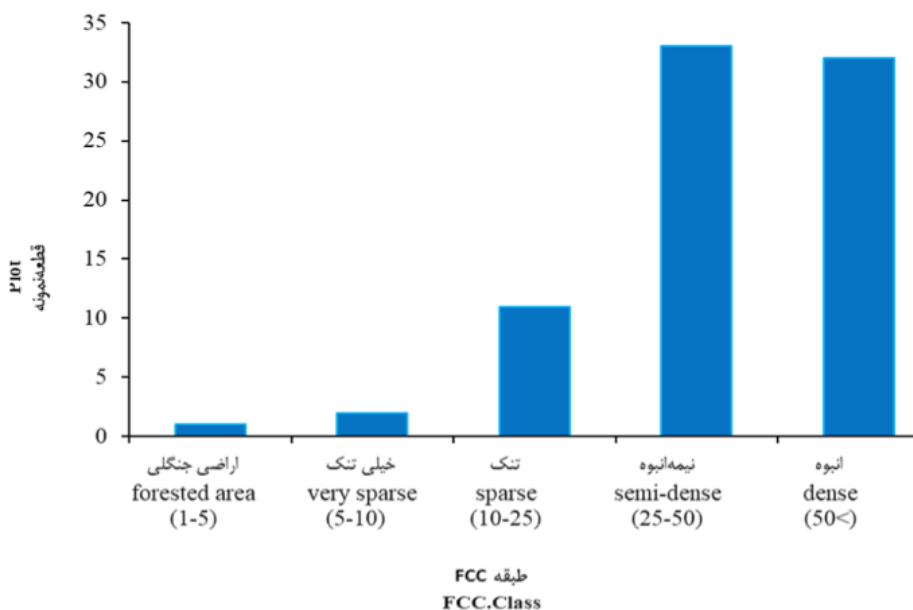
اندازه‌گیری شده در قطعه نمونه‌ها و \overline{FCC} : میانگین مقادیر تاج‌پوشش جنگل اندازه‌گیری شده برای ۲۴ قطعه نمونه است.

نتایج

بررسی وضعیت تاج‌پوشش جنگل اندازه‌گیری شده در ۷۹ قطعه نمونه زمینی براساس آماره‌های توصیفی داده‌های زمینی نشان داد که میانگین تاج‌پوشش

جدول ۲- آماره‌های توصیفی مشخصه FCC در جنگل تحت پژوهش
Table 2. Descriptive statistics of measured FCC in the study area

مشخصه Attribute	تعداد قطعه نمونه No. of Plots	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	میانه Median	چارک اول Q1	چارک سوم Q2	واریانس Variance	انحراف معیار Standard deviation
FCC	79	4.62	100	48.18	45.6	32.7	61.3	509.5	22.5



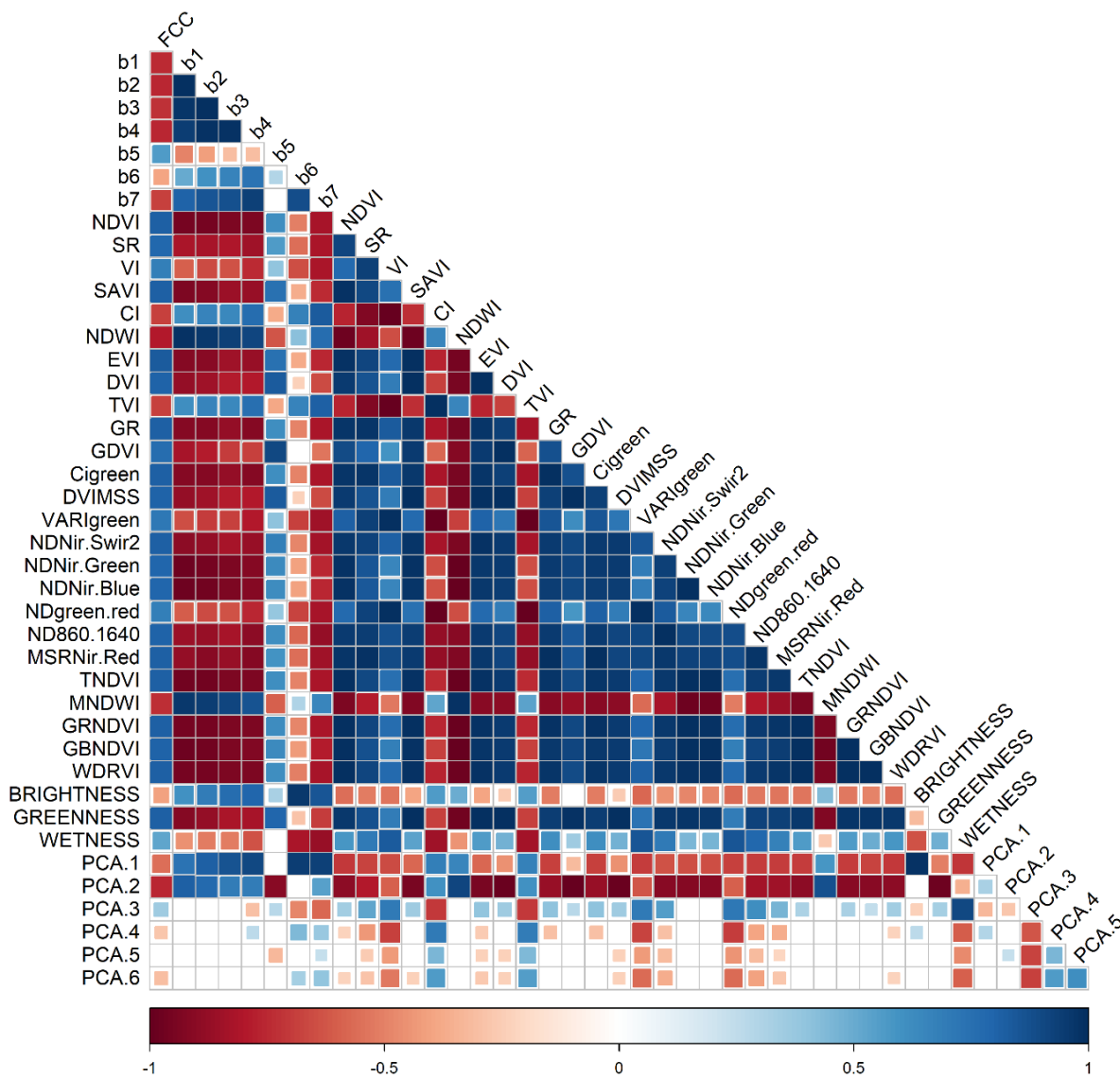
شکل ۳- فراوانی طبقه‌های FCC موجود در جنگل تحت پژوهش
Figure 3. Frequency of FCC classes in the study area

اصلی و محاسباتی) حاصل از تصویر ماهواره لندست ۹ در شکل ۴ ارائه شده است. در این شکل رنگ قرمز به معنای همبستگی منفی و رنگ آبی به معنای همبستگی مثبت است و تغییر اندازه در مربع‌ها نشان‌دهنده تغییرات همبستگی بین تاج‌پوشش با متغیرهای طیفی است. نتایج حاصل از همبستگی

بررسی نرمال بودن داده‌های تاج‌پوشش جنگل اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمون ذکر شده نشان داد که داده‌ها با مقادیر $W = 0.97$ و $P = 0.11$ از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. نتایج حاصل از بررسی همبستگی و معنی‌داری بین تاج‌پوشش جنگل با متغیرهای طیفی (باندهای

همبستگی زیاد تاج‌پوشش با باندهای محاسباتی NDVI و WDRVI و همبستگی کم غیرمعنی‌دار با PCA 5 ماهواره لندست ۹ است.

پیرسون تاج‌پوشش جنگل با باندهای اصلی نشان داد که تاج‌پوشش با باند ۴ (باند قرمز) بیشترین و تاج‌پوشش با باند ۶ (مادون قرمز کوتاه) کمترین همبستگی را دارد. همچنین این تحلیل حاکی از



شکل ۴- ضریب همبستگی پیرسون بین FCC و متغیرهای طیفی لندست ۹
Figure 4. Pearson correlation coefficient between FCC and Landsat 9 spectral variables

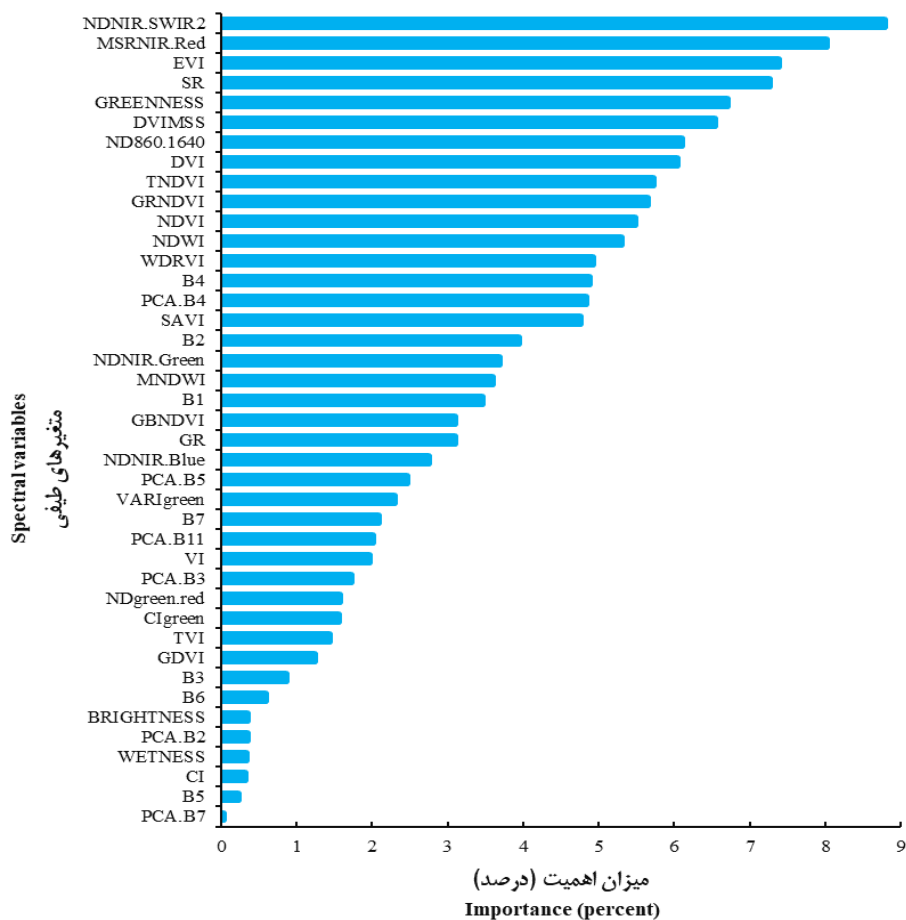
محاسباتی در برآورد تاج‌پوشش جنگل ارزیابی شد و مشخص شد که شاخص گیاهی NDNIR.SWIR2 دارای بیشترین تأثیر در فرایند مدل‌سازی RF و تجزیه مؤلفه اصلی حاصل از باند ۷ (PCA.B7) دارای کمترین اهمیت است (شکل ۵).

نتایج مدل‌سازی با استفاده از ۷۰ درصد قطعه نمونه‌ها نشان داد که مدل حاصل از RF براساس ترکیب باندهای اصلی و محاسباتی با $R^2 = 0.88$ و $rRMSE = 16/95$ به‌عنوان مدل بهینه برآورد مقدار تاج‌پوشش جنگل در پژوهش پیش رو است (جدول ۳). در این مدل اهمیت نسبی باندهای اصلی و

جدول ۳- مدل سازی FCC با استفاده از تصویر لندست ۹ براساس ۷۰ درصد قطعه نمونه‌ها

Table 3. FCC modeling using Landsat 9 image based on 70% plots

آماره‌های ارزیابی Evaluation statistics			مجموعه باندی Inputs	مدل Model
درصد جذر میانگین مربعات خطا (rRMSE)	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	ضریب تبیین (R ²)		
25.83	12.45	0.71	باندهای اصلی Original bands	رگرسیون چندمتغیره گام به گام MLR
20.91	10.08	0.81	باندهای محاسباتی Computational bands	
17.65	8.51	0.86	باندهای اصلی و محاسباتی Spectral and computational bands	
18.67	9	0.86	باندهای اصلی Original bands	جنگل تصادفی RF
17.18	8.28	0.88	باندهای محاسباتی Computational bands	
16.95	8.17	0.88	باندهای اصلی و محاسباتی Spectral and computational bands	
26.70	12.87	0.69	باندهای اصلی Original bands	ماشین بردار پشتیبان SVM
26.20	12.63	0.70	باندهای محاسباتی Computational bands	
26.27	12.66	0.70	باندهای اصلی و محاسباتی Spectral and computational bands	



شکل ۵- اهمیت نسبی متغیرهای طیفی استفاده شده در مدل RF برای برآورد FCC

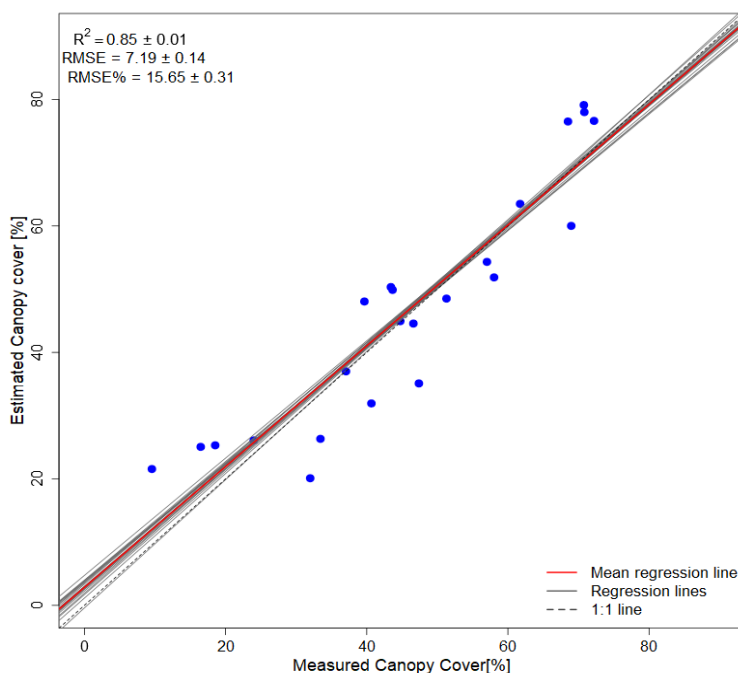
Figure 5. The relative importance of spectral variables in the RF model to estimate FCC

داشته است (جدول ۴). نمودار نقطه‌ای مشخصه تاج‌پوشش جنگل اندازه‌گیری‌شده در برابر برآوردشده براساس بهترین مدل در شکل ۶ آورده شده است.

نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل نشان داد که مدل RF براساس باندهای اصلی تصویر ماهواره لندست ۹ با $R^2 = 0.85$ و $rRMSE = 15/65$ بهترین نتیجه را

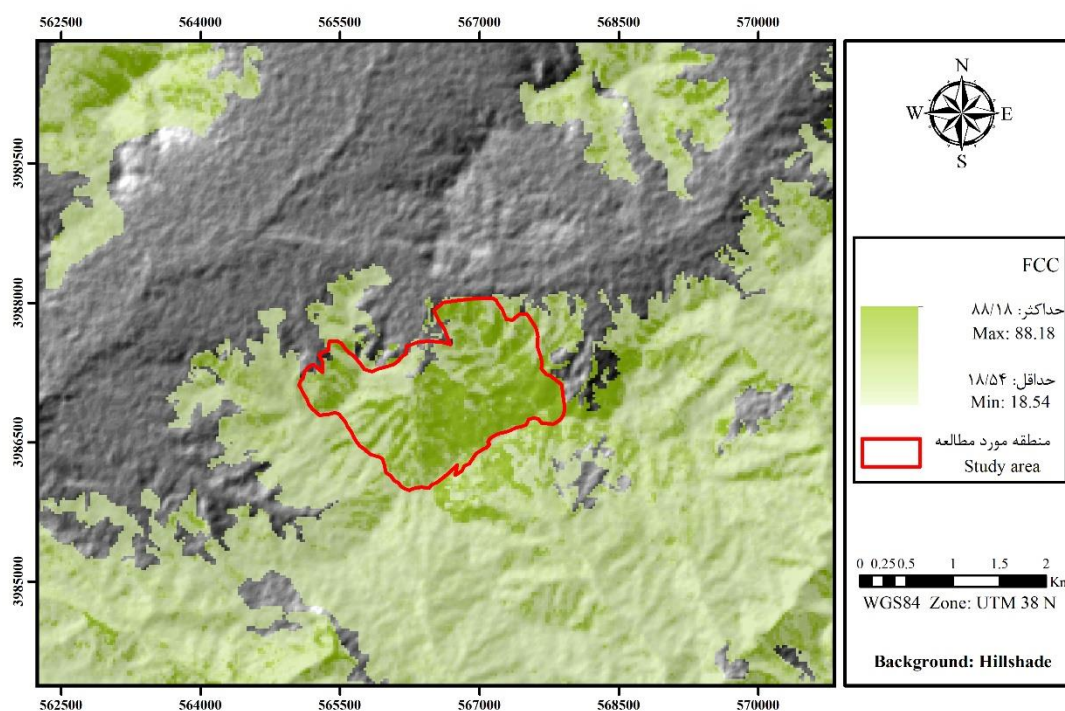
جدول ۴- ارزیابی مدل‌ها به روش اعتبارسنجی متقابل
Table 4. Evaluation of models using cross-validation method

آماره‌های ارزیابی Evaluation metrics			مجموعه باندی Inputs	مدل Model
درصد جذر میانگین مربعات خطا (rRMSE)	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)	ضریب تبیین (R ²)		
21.62	9.93	0.7	باندهای اصلی Original bands	رگرسیون چندمتغیره گام به گام MLR
33.03	15.10	0.46	باندهای محاسباتی Computational bands	
57.64	26.47	0.26	باندهای اصلی و محاسباتی Spectral and computational bands	
15.65	7.19	0.85	باندهای اصلی Original bands	جنگل تصادفی RF
16.51	7.50	0.83	باندهای محاسباتی Computational bands	
16.11	7.4	0.84	باندهای اصلی و محاسباتی Spectral and computational bands	
19.56	8.98	0.76	باندهای اصلی Original bands	ماشین بردار پشتیبان SVM
22.44	10.30	0.69	باندهای محاسباتی Computational bands	
22.27	10.50	0.69	باندهای اصلی و محاسباتی Spectral and computational bands	



شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری‌شده در برابر مقادیر برآوردشده FCC براساس مدل RF حاصل از تصویر لندست ۹ به روش اعتبارسنجی-متقابل

Figure 6. Measured FCC versus estimated values based on RF model obtained from Landsat 9 image with cross-validation method



شکل ۷- نقشه FCC جنگل تحت پژوهش با استفاده از تصویر لندست ۹ و مدل RF
Figure 7. FCC mapping of the study forest using Landsat 9 image and RF model

داده‌های ماهواره لندست ۹ به‌عنوان جدیدترین ماهواره سری لندست براساس روش‌های آماری در مدل‌سازی مشخصه تاج‌پوشش جنگل در جنگل‌های حفاظتی زاگرس بررسی شد.

نتایج بررسی آماره‌های توصیفی داده‌های میدانی اندازه‌گیری‌شده مشخصه تاج‌پوشش جنگل در منطقه پژوهش نشان داد که بیشتر قطعه نمونه‌ها مقادیر متوسطی از تاج‌پوشش را ارائه می‌دانند. بر همین اساس، تاج‌پوشش جنگل تحت پژوهش در طبقه نیمه‌انبوه (۵۰-۲۵ درصد) قرار دارد (شکل ۳). این نتایج با پژوهش Miri & Darvishsefat (2021) و Vafaei et al. (2022) در جنگل مشابه همسو است که نشان می‌دهد جنگل‌های زاگرس شمالی تاج‌پوشش متوسط دارند. همچنین واریانس زیاد داده‌های میدانی تاج‌پوشش جنگل نشان از پراکندگی زیاد داده‌های اندازه‌گیری‌شده و تفاوت مقادیر تاج‌پوشش جنگل بین قطعه نمونه‌هاست (جدول ۲). فاکتورهای رویشگاهی (مقدار رطوبت و حاصلخیزی خاک) و تابش خورشید بر رشد و پراکنش

در نهایت نقشه تاج‌پوشش این جنگل با استفاده از مدل RF براساس باندهای اصلی تصویر ماهواره لندست ۹ تهیه شد (شکل ۷).

بحث

مشخصه ساختاری تاج‌پوشش جنگل برای ارزیابی شرایط نوری، میکرواقلیم کف جنگل و تشخیص انواع زیستگاه‌های گیاهی و جانوری استفاده می‌شود (Yang et al., 2022). همچنین برای درک ذخیره کربن جنگل و واکنش به تغییرات آب‌وهوایی بسیار مهم است (Richardson et al., 2013). با وجود پیشرفت در تکنیک‌های غیرمخرب و غیرمستقیم نوری در برآورد تاج‌پوشش جنگل، اندازه‌گیری میدانی تاج‌پوشش جنگل فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است و از نظر مقیاس‌های مکانی-زمانی پویا نیست (Zhu et al., 2018; Brown et al., 2020). داده‌های سنجش از دور با قابلیت مناسب، پایش زمانی و مکانی مشخصه مهم ساختاری تاج‌پوشش جنگل را فراهم می‌کنند (Jiang et al., 2022). از این‌رو در این پژوهش قابلیت

NDVI حاصل از لندست ۹ مشخصه‌های پوشش گیاهی به‌دست آوردند مطابقت دارد. همچنین Miri & Darvishsefat (2021) در جنگل‌های زاگرس شمالی نشان دادند که شاخص گیاهی NDVI به‌دست‌آمده از لندست ۸ بیشترین ارتباط را با مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل دارد. از بین باندهای اصلی ماهواره‌ی لندست ۹ استفاده‌شده در پژوهش پیش‌رو تنها باند مادون قرمز نزدیک (باند ۵) دارای همبستگی مثبت با مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل بود. همبستگی مثبت در اینجا بیانگر ارتباط مستقیم متغیرهای طیفی با مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل است، یعنی هرچه مقدار تاج‌پوشش جنگل افزایش یابد بر مقدار بازتاب افزوده می‌شود و برعکس. براساس مبانی سنجش از دور پوشش گیاهی بیشترین بازتاب را در محدوده‌ی طول‌موج مادون قرمز نزدیک دارد و اصولاً باید از همبستگی مثبت بین بازتاب در این طول و تاج‌پوشش جنگل وجود داشته باشد. در مقایسه با بقیه باندها، همبستگی ضعیف‌تری بین بازتاب در مادون قرمز نزدیک و تاج‌پوشش مشاهده شد که این ارتباط به‌نسبت ضعیف در جنگل تحت پژوهش را می‌توان به حضور به‌نسبت زیاد گونه‌ی نیمه‌انگل موخور (*Loranthus europaeus*) که سبب خشکی سرشاخه‌های درختان شده بود ربط داد؛ زیرا با تأثیر این گونه بر تاج‌پوشش درختان و ایجاد فضای خالی در سطح تاج، مقدار جذب امواج الکترومغناطیسی در محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک زیاد و بازتاب پوشش گیاهی درختان آلوده کم می‌شود. Fathollahi et al. (2013) بیان کردند که در توده‌های مسن با تراکم کم، به‌دلیل وجود فضای خالی زیاد در سطح تاج از مقدار بازتاب طیفی در طول‌موج مادون قرمز نزدیک کاسته می‌شود.

بررسی نتایج اعتبارسنجی متقابل مدل‌های به‌دست‌آمده در برآورد مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل نشان داد که مدل حاصل از RF براساس مجموعه‌ی باندهای اصلی ماهواره‌ی لندست ۹ با مقدار $R^2 = 0.85$ و $0.15/0.65$

مشخصه‌های ساختاری جنگل از جمله تاج درختان تأثیر دارد، اما برداشت برگ توسط بهره‌برداران محلی از توده‌های بلوط (گلازنی) نیز میزان تاج‌پوشش درختان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Moradi et al., 2022). این پراکنش زیاد داده‌های میدانی تاج‌پوشش جنگل (۱۰۰-۴/۶۲ درصد) می‌تواند بر عملکرد نهایی مدل‌های به‌دست‌آمده تأثیر مثبتی داشته باشد.

براساس تحلیل همبستگی پیرسون ۴۱ متغیر طیفی (باندهای اصلی و محاسباتی) استفاده‌شده در برآورد مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل مشاهده شد (شکل ۴) که اعمال روابط ریاضی روی باندهای اصلی ماهواره‌ی لندست ۹، بارزسازی پوشش گیاهی و در نهایت حساسیت متغیرها به مشخصه‌ی ساختاری تاج‌پوشش جنگل را افزایش داده است. روابط ریاضی با ایجاد نسبت‌های طیفی روی باندهای اصلی، بخش زیادی از خطاهای ناشی از تغییر زاویه‌ی خورشید، سایه، شرایط جوی، توپوگرافی و پس‌زمینه‌ی تاج‌پوشش را حذف می‌کنند (Matsushita et al., 2007). نتایج پژوهش‌های (Yu et al. (2023), Tian et al. (2024), Nasiri et al. (2022), Sebastiani et al. (2023), Miri & Darvishsefat و Zhang et al. (2022) (2021) یافته‌ی پژوهش پیش‌رو را تأیید می‌کنند. همچنین با بررسی همبستگی بین باندها و شاخص‌های طیفی با مشخصه‌ی تاج‌پوشش مشخص شد که همبستگی بیشتری بین شاخص‌های طیفی با مشخصه‌ی مذکور نسبت به باندهای اصلی وجود دارد که این نتیجه در پژوهش (Miri et al. (2024) در رابطه با شاخص سطح برگ نیز مشهود است. در این میان شاخص‌های گیاهی NDVI و WDRVI از بین همه‌ی متغیرهای طیفی مشتق‌شده از لندست ۹ بیشترین ارتباط ($r = 0.838$) را با مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل ارائه داده‌اند که انتظار می‌رود به‌دلیل وجود باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک (پوشش محدوده‌ی لبه‌ی قرمز) در رابطه‌ی این شاخص‌ها باشد. این نتیجه با پژوهش (Jiang et al. (2022) که همبستگی زیادی از شاخص

برآوردهای کمتری از مقدار واقعی اندازه‌گیری شده زمینی ارائه کرد (کم‌برآوردی) که این نتیجه را می‌توان با اندازه‌گیری تاج‌پوشش گونه‌های زیراشکوب موجود در عرصه و تشخیص ندادن این پایه‌ها در تصاویر ماهواره‌ای توجیه کرد. از دیگر دلایل کم‌برآوردی مدل نهایی می‌توان به اشباع‌شدگی تصاویر اپتیک اشاره کرد، به این معنا که ماهواره‌های استفاده‌شده تا سطح معینی می‌توانند بازتاب ناشی از تاج‌پوشش جنگل را ثبت کنند و بیشتر از آن اندازه، به تاج‌پوشش درختان حساس نخواهند بود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت داده‌های ماهواره‌ی لندست ۹ برای برآورد مناسب مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل براساس سه مدل MLR ، SVR و RF در جنگل‌های زاگرس شمالی بررسی شد. از آنجا که باندهای محاسباتی اثرهای نامطلوب باندهای اصلی و مناطق ناهمگون پوشش گیاهی را تا حدودی کاهش می‌دهند، استفاده از تعداد زیادی متغیر محاسباتی و ترکیب آنها با باندهای اصلی ماهواره برای برآورد و پایش مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل مهم است. ارزیابی مشخص کرد که اگرچه مجموعه‌ی متغیرهای محاسباتی، مدل مناسبی برای برآورد مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل ارائه نمی‌دهد، در ترکیب با باندهای اصلی به‌عنوان متغیرهای طیفی ورودی مدل‌های استفاده‌شده در پژوهش پیش رو، دقت برآورد تاج‌پوشش جنگل را افزایش می‌دهد و سبب کاهش خطا در مدل‌ها می‌شود. افزون‌بر این، مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های آماری پارامتری و ناپارامتری مختلف برای حل چالش انتخاب بهترین مدل در برآورد و نقشه‌برداری مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل می‌تواند اهمیت داشته باشد. از مقایسه‌ی سه مدل MLR ، SVR و RF برای برآورد تاج‌پوشش جنگل مشاهده شد که مدل حاصل از RF با $R^2 = 0.85$ و $rRMSE = 15/65$ نسبت به دو مدل دیگر بهترین نتیجه را ارائه داد. به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد که با استفاده از باندهای اصلی

$rRMSE =$ نتیجه‌ی بهتری از بقیه‌ی مدل‌های استفاده‌شده در پژوهش پیش‌رو داشت. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌های پیشین همچون (Narine et al. (2023)، (Nasiri et al. (2022) و (Nazariani et al. (2023) Noorian et al. (2019) که کارایی مناسب مدل RF را گزارش کرده‌اند همسو است. (Jiang et al. (2022) در پژوهشی با مدل‌سازی مشخصه‌های کمی جنگل براساس ماهواره‌ی لندست ۹ و مدل‌های RF ، SVR و $BPNN$ نتیجه گرفتند که مدل RF در مقایسه با مدل‌های دیگر با $R^2 = 0.87$ و $rRMSE = 14/05$ نتیجه‌ی مناسب‌تری ارائه داده است که می‌تواند تأییدی بر عملکرد مناسب مدل RF و ماهواره‌ی لندست ۹ در پژوهش پیش‌رو باشد. همچنین (Beygi Heidarlou et al. (2023) به عملکرد مناسب لندست ۹ در تهیه‌ی نقشه‌ی تراکم تاج‌پوشش جنگل براساس مدل تاج‌پوشش جنگل رسیدند. (Vafaei et al. (2022) و (Miri & Darvishsefat (2021) با استفاده از روش پارامتری MLR در جنگل مشابه مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل را به‌ترتیب با مقادیر ضریب تبیین 0.69 و 0.662 برآورد کرده بودند که به نظر می‌رسد مدل یادگیری ماشین RF در پژوهش پیش‌رو نتایج این پژوهش‌ها را بهبود داده است. در پژوهش دیگری، (Rashidi & Jaafari (2024) از الگوریتم‌های مختلف برای تهیه‌ی نقشه‌ی کاربری زمین استفاده کردند و مشخص شد که الگوریتم ماشین بردار پشتیبان دارای بیشترین صحت بود که با نتیجه‌ی این پژوهش همسو نبود.

بررسی نمودار نقطه‌ای مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآورده‌ی مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل حاصل از مدل RF براساس مجموعه باندهای اصلی و محاسباتی داده‌های لندست ۹ نشان داد (شکل ۶) که این مدل در مقادیر کم، مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری‌شده برآورد کرده است (بیش‌برآوردی)؛ این بیش برآوردی می‌تواند به دلیل بازتاب ناشی از پوشش درختچه‌ای کف جنگل باشد. همچنین مدل به‌دست‌آمده در مقادیر بیشتر نیز

سیاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از مرکز پژوهش و توسعه جنگلداری زاگرس شمالی دکتر هدایت غضنفری دانشگاه کردستان، همکاری‌های ارزشمند آقایان کمال احمدی و فرشید ستوره باوانی در برداشت داده‌های زمینی و پیشنهادهای اصلاحی داوران گرامی کمال سپاس و قدردانی را ابراز می‌دارند.

داده‌های ماهواره‌ی لندست ۹ براساس الگوریتم یادگیری ماشین RF می‌توان با دقت مناسبی مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل را در جنگل‌های با مدیریت سنتی زاگرس شمالی برآورد و نقشه‌برداری کرد. شایان ذکر است که مدل حاصل از روش‌های آماری برای برآورد مشخصه‌های جنگل به‌ویژه مشخصه‌ی تاج‌پوشش جنگل، برای یک منطقه، رویشگاه، زمان و داده‌ی سنجش از دوری خاص توسعه‌پذیر است.

References

- Beygi Heidarlou, H., Karamat Mirshekarlou, A., Sasanifar, S., & Khezryan, B. (2023). Forest cover density mapping of Zagros forests using Landsat-9 imagery and hemispherical photographs. *Forest Research and Development*, 9(1), 47-65. <https://doi.org/10.30466/jfrd.2023.54591.1661>. (In Persian)
- Breiman, L. (2001). Using iterated bagging to debias regressions. *Machine Learning*, 45, 261-277. <https://doi.org/10.1023/A:1017934522171>.
- Brown, L.A., Ogutu, B.O., & Dash, J. (2020). Tracking forest biophysical properties with automated digital repeat photography: A fisheye perspective using digital hemispherical photography from below the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287, 107944. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107944>.
- Fatehi, P., Damm, A., Schaepman, M.E., & Kneubühler, M. (2015). Estimation of alpine forest structural variables from imaging spectrometer data. *Remote Sensing*, 7(12), 16315-16338. <https://doi.org/10.3390/rs71215830>.
- Fathollahi, M., Fallah, A., Hojjati, S.M., & Kalbi, S. (2013). Determining the Ability of SPOT-HRG Sensor Data in Estimating the Number of Trees Per Hectare. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 20(4), 133-117. (In Persian)
- Feliciano, D., Bouriaud, L., Brahic, E., Deuffic, P., Dobsinska, Z., Jarsky, V., & Ficko, A. (2017). Understanding private forest owners' conceptualization of forest management: Evidence from a survey in seven European countries. *Journal of Rural Studies*, 54, 162-176. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.06.016>.
- Gao, T., Gao, Z., Sun, B., Qin, P., Li, Y., & Yan, Z. (2022). An Integrated Method for Estimating Forest-Canopy Closure Based on UAV LiDAR Data. *Remote Sensing*, 14(17), 4317. <https://doi.org/10.3390/rs14174317>.
- Guan, Y., Tian, X., Zhang, W., Marino, A., Huang, J., Mao, Y., & Zhao, H. (2023). Forest Canopy Cover Inversion Exploration Using Multi-Source Optical Data and Combined Methods. *Forests*, 14(8), 1527. <https://doi.org/10.3390/f14081527>.
- 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. <https://doi.org/10.3390/f12121768>.
- Huang, X., Wu, W., Shen, T., Xie, L., Qin, Y., Peng, S., Zhou, X., Fu, X., Li, J., Zhang, Z., Zhang, M., Liu, Y., Jiang, J., Ou, P., Huangfu, W. & Zhang, Y. (2021). Estimating forest canopy cover by multiscale remote sensing in northeast Jiangxi, China. *Land*, 10(4), 433. <https://doi.org/10.3390/land10040433>.
- Jiang, F., Sun, H., Chen, E., Wang, T., Cao, Y., & Liu, Q. (2022). Above-ground biomass estimation for coniferous forests in Northern China using regression kriging and landsat 9 images. *Remote Sensing*, 14(22), 5734. <https://doi.org/10.3390/rs14225734>.

- Korhonen, L., Korhonen, K.T., Rautiainen, M., & Stenberg, P. (2006). Estimation of forest canopy cover: a comparison of field measurement techniques. *Silva Fennica*, 40(4), 577-588. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.315>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.021>.
- Mahlangu, P., Mathieu, R., Wessels, K., Naidoo, L., Verstraete, M., Asner, G., & Main, R. (2018). Indirect estimation of structural parameters in South African forests using MISR-HR and LiDAR remote sensing data. *Remote Sensing*, 10(10), 1537. <https://doi.org/10.3390/rs10101537>.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636-2651. <https://doi.org/10.3390/s7112636>.
- Mazouji, M., Mohammadi Samani, K., & Hosseini, V. (2020). The variation in density and biomass of earthworms with physical and chemical properties of soil after forest land-use change. *Iranian Journal of Forest*, 12(2), 203-218. (In Persian)
- Miri, N., Darvishsefat, A.A., Zargham, N., & Shakeri, Z. (2017). Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 data. *Iranian Journal of Forest*, 9(1), 29-42. (In Persian)
- Miri, N., & Darvishsefat, A.A. (2021). Modeling of Canopy Cover Estimation Using Landsat 8 Satellite OLI Data in the Zagros Forests. *Ecology of Iranian Forests*, 9(17), 196-206. (In Persian)
- Miri, N., Fatehi, P., Darvishsefat, A.A., Pir Bavaghar, M., & Homolová, L. (2024). Leaf area index estimation in the Zagros forests of Iran using Sentinel-2 image and Gaussian Process Regression. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(4), 323-337. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2023.364041.2129>. (In Persian)
- Moradi, G., Pir Bavaghar, M., Shakeri, Z., & Fatehi, P. (2021). Leaf area index estimation in the northern Zagros forests using remote sensing. *Journal of Forest Research and Development*, 6(4), 679-693. <https://doi.org/10.30466/jfrd.2020.120986>. (In Persian)
- Moradi, N., Ghahramany, L., & Valipour, A. (2022). Monitoring changes in the structural characteristics of pollarded oak stands (Case study: Kocher forest in Kurdistan province, Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 30(1), 83-102. doi: 10.22092/ijfpr.2022.358078.2046. (In Persian)
- Namiranian, M. (2007). Measurement of tree and forest biometry. *Tehran University Publications*, 574. (In Persian)
- Narine, L.L., Popescu, S.C., & Malambo, L. (2023). A methodological framework for mapping canopy cover using ICESat-2 in the Southern USA. *Remote Sensing*, 15(6), 1548. <https://doi.org/10.3390/rs15061548>.
- 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. <https://doi.org/10.3390/rs14061453>.
- Nazariani, N., Fallah, A., Ramezani Moziraji, H., Naghavi, H., & Jalilvand, H. (2023). The Effect of Different Cluster Sampling Schemes in Estimating the Quantitative Characteristics of Zagros Forests Using Sentinel 2 Sensor Images. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 14(4), 71-86. <https://doi.org/10.52547/gisj.14.4.71>. (In Persian)
- Rashidi, F., & Jaafari, A. (2024). Evaluation of the efficiency of supervised algorithms in preparing the ground cover map using Sentinel 2 images in the Zagros Forest Habitat. *Iranian Journal of Forest*, 16(1), 25-36. doi: 10.22034/ijf.2023.328404.1849. (In Persian)
- Noorian, N., Shataee, S., & Mohamadi, J. (2019). Evaluation of RapidEye satellite data for estimation some quantitative structure variables in the Caspian forests of Gorgan region. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 9(4), 1-16. (In Persian)

- Palanisamy, P.A., Jain, K., & Bonafoni, S. (2023). Machine Learning Classifier Evaluation for Different Input Combinations: A Case Study with Landsat 9 and Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 15(13), 3241. <https://doi.org/10.3390/rs15133241>.
- Pilaš, I., Gašparović, M., Novkinić, A., & Klobučar, D. (2020). Mapping of the canopy openings in mixed beech–fir forest at Sentinel-2 subpixel level using UAV and machine learning approach. *Remote Sensing*, 12(23), 3925. <https://doi.org/10.3390/rs12233925>.
- Richardson, A.D., Keenan, T.F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., & Toomey, M. (2013). Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 156-173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>.
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Hedler, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., Scambos, T.A., ... & Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, 145, 154-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.
- Sebastiani, A., Salvati, R., & Manes, F. (2023). Comparing leaf area index estimates in a Mediterranean forest using field measurements, Landsat 8, and Sentinel-2 data. *Ecological Processes*, 12(1), 28.
- Tian, X., Li, J., Zhang, F., Zhang, H., & Jiang, M. (2024). Forest Aboveground Biomass Estimation Using Multisource Remote Sensing Data and Deep Learning Algorithms: A Case Study over Hangzhou Area in China. *Remote Sensing*, 16(6), 1074. <https://doi.org/10.3390/rs16061074>.
- 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. <https://doi.org/10.30495/jest.2018.20376.2940>. (In Persian)
- Xie, B., Cao, C., Xu, M., Yang, X., Duerler, R.S., Bashir, B., Huang, Z., Wang, K., Chen, Y., & Guo, H. (2022). Improved Forest Canopy Closure Estimation Using Multispectral Satellite Imagery within Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 14(9), 2051. <https://doi.org/10.3390/rs14092051>.
- Yang, X., He, P., Yu, Y., & Fan, W. (2022). Stand Canopy Closure Estimation in Planted Forests Using a Geometric-Optical Model Based on Remote Sensing. *Remote Sensing*, 14(9), 1983. <https://doi.org/10.3390/rs14091983>.
- Yu, J., Lai, H., Xu, L., Luo, S., Zhou, W., Song, H., Xi, L., & Shu, Q. (2023). Estimation of Forest Canopy Cover by Combining ICESat-2/ATLAS Data and Geostatistical Method/Co-Kriging. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 1824-1838. <https://doi:10.1109/JSTARS.2023.3340429>.
- Zhang, F., Tian, X., Zhang, H., & Jiang, M. (2022). Estimation of aboveground carbon density of forests using deep learning and multisource remote sensing. *Remote Sensing*, 14(13), 3022. <https://doi.org/10.3390/rs14133022>.
- Zhou, J., Dian, Y., Wang, X., Yao, C., Jian, Y., Li, Y., & Han, Z. (2020). Comparison of GF2 and SPOT6 imagery on canopy cover estimating in northern subtropics forest in China. *Forests*, 11(4), 407. <https://doi.org/10.3390/f11040407>.
- Zhu, W., Li, Y., Luan, K., Qiu, Z., He, N., Zhu, X., & Zou, Z. (2024). Forest Canopy Height Retrieval and Analysis Using Random Forest Model with Multi-Source Remote Sensing Integration. *Sustainability*, 16(5), 1735. <https://doi.org/10.3390/su16051735>.
- Zhu, X., Skidmore, A. K., Wang, T., Liu, J., Darvishzadeh, R., Shi, Y., Premier, J., & Heurich, M. (2018). Improving leaf area index (LAI) estimation by correcting for clumping and woody effects using terrestrial laser scanning. *Agricultural and forest meteorology*, 263, 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.026>.



Oak Forest Canopy Cover Estimation using Landsat 9 data in the Northern Zagros Forests

S. Ahmadi¹, P. Fatehi^{2*}, M. Namiranian³, and N. Miri⁴

¹M.Sc., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

²Assistant Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. I.R. Iran

³Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. I.R. Iran

⁴Ph.D. Student, Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. I.R. Iran

(Received: 21 May 2024; Accepted: 16 August 2024)

Abstract

Introduction: Forest Canopy Cover (FCC) is one of the most important structural characteristics in monitoring health and quality of forest stands. Measuring this characteristic based on ground methods requires a lot of cost and time, and it is extremely difficult to implement on a large scale. Today, use of remote sensing techniques can compensate for the limitations of terrestrial methods. The present study was conducted with the aim of investigating the efficiency of Landsat 9 satellite in modeling and estimating the canopy cover of the northern Zagros oak forests.

Materials and methods: In order to collect FCC field data, 79 square plots with dimensions of 45×45 m were implemented based on systematic-random sampling method with 200×200 m grid size in summer 2023 in a part of Baneh forests, Kurdistan province. In each plot, the large diameter and the perpendicular diameter of the crown of trees or shoots were measured using a tape measure. Finally, FCC values were calculated for each plot based on the crown area of each tree or stem. In the present study, a frame of the OLI-2 sensor data of the Landsat 9 satellite at the Collection 2 Level 1 correction level was received on July 23, 2023. After verifying the geometrical quality of the image and performing atmospheric correction using FLAASH method, Vegetation Indices, Principal Component Analysis (PCA), and Tasseled Cap Transformation were performed on the image. In total, the number of 35 computational bands and 7 original usage bands and the spectral values of these 42 spectral variables obtained from Landsat 9 data were extracted using the map of field plots. In the following, FCC using stepwise regression (MLR) and non-parametric Random Forest (RF) and Support Vector Machine (SVM) statistical models based on three sets of spectral variables (original bands, computational bands and combination of original and computational bands) and 70% of the data were modeled. Finally, the regression models were evaluated and fitted using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE) and root mean square relative error (rRMSE) statistics using cross-validation method based on 30% of data.

Results: Investigation of FCC data measured on the field data on descriptive statistics showed that the researched forest is in a semi-dense condition. Pearson's correlation analysis conducted to investigate the relationship between FCC and spectral variables showed that vegetation indices are more sensitive to FCC changes. The results of modeling using 70% of the samples showed that the model obtained from RF is based on the combination of the original and computational bands with $R^2 = 0.88$ and $rRMSE = 16.95$ as the optimal model in estimating the amount of canopy. The evaluation of the relative importance of the spectral variables used in the obtained model showed that $NDNIR.SWIR2$ has the highest influence in the RF modeling process and PCA of band 7 ($PCA.B7$) has the least importance. Validation of the obtained models using cross-validation showed that the RF model obtained from the original bands of the Landsat 9 image with of $R^2 = 0.85$ and $rRMSE = 15.65$ was selected as the best model for forest canopy estimation and mapping.

Conclusion: In general, this research showed that by using the original bands of Landsat 9 satellite data based on the RF machine learning algorithm, it is possible to estimate and map the FCC in the traditionally managed forests of North Zagros with reasonable accuracy.

Keywords: Forest Canopy Cover, Landsat 9, Machine Learning Approach, Zagros Oak Forest.