

Research Paper

Estimation of Canopy Cover and Ground Biomass in Afforestation Areas of Western Guilan using Remote Sensing and Geostatistical Methods (Study Area: Pilembera)

Solmaz Zandi¹ , Amir Eslam Bonyad², Iraj Hassanzad Navroodi³, Seyed Jalil Alavi⁴ and Neda Ghorbanzadeh⁵

1- Ph.D. student of Forestry and Forest Management, Faculty of Natural Resources of Soumesara, University of Guilan, Guilan Iran (Corresponding author:solmazzandi94@gmail.com)

2- Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Soumesara, University of Guilan, Guilan, Iran

3- Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Soumesara, University of Guilan, Guilan, Iran

4- Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Mazandaran, Iran

5- Ph.D. in Forestry, Faculty of Natural Resources of Soumesara, University of Guilan, Guilan, Iran

Received: 20 January, 2025

Revised: 10 April, 2025

Accepted: 18 May 2025

Extended Abstract

Background: The reduction of natural forests due to various factors has made afforestation particularly important, aiming to increase forest area and wood production. Estimating forest characteristics using remote sensing data has been proposed as a tool for sustainable natural resource management. Remote sensing and geostatistical methods can be useful and cost-effective in estimating canopy cover and aboveground biomass of forests for management and conservation purposes. In the Hyrcanian forests, canopy structure and biomass are considered important criteria for studying and monitoring changes in the forest. This study aimed to estimate and examine the canopy cover and aboveground biomass of the afforested areas of Pilembera, located in Guilan Province, using Landsat 9 satellite imagery, remote sensing methods, and geostatistics.

Methods: To implement ground sample plots (in summer 2023), the plot grid was randomly and systematically selected with a distance of 300 by 300 meters. A total of 120 sample plots were collected. The data obtained from field surveys and statistical measurements were entered into Excel to perform calculations related to canopy cover and aboveground biomass. Additionally, vegetation indices (including NDVI, EVI, DVI, GNDVI, RVI, ARVI, SAVI, OSAVI, and IPVI) were calculated using Landsat 9 images, and then the corresponding values for each sample plot were extracted from each of the indices. Correlation and regression analyses were conducted on these data. The Information Gain Ratio (IGR) technique and Average Merit index were used to evaluate the predictive power of factors affecting canopy cover and biomass in the afforestation areas of the Pilmabra region. The correlation between canopy cover and aboveground biomass in the ground sample plots and their corresponding spectral values in satellite data was examined using SPSS software and Pearson's correlation analysis. Inverse Distance Weighting (IDW), ordinary kriging, and radial basis functions (RBF) were employed for estimating the percentage of canopy cover and aboveground biomass. Furthermore, Random Forest (RF) regression models and support vector machines were used for variable selection and estimating the percentage of canopy cover and aboveground biomass in the study area, which were analyzed and evaluated using Weka software. In this study, 80% (96 sample plots) of a set of 120 existing sample plots were used as training datasets. The ROC curve was utilized to assess the performance of geostatistical methods and remote sensing in modeling.

Results: The results of IGR and the Mean Competence Index (MA) indicated that the highest significant correlation was observed between the percentage of canopy cover and the variables OSAVI (0.918) and NDVI (0.915), as well as the highest significant correlation between aboveground biomass (tons per hectare) and the variables SAVI (0.913) and NDVI (0.902). The presence or absence of spatial dependence of the canopy cover percentage and biomass, after fitting several semivariogram models based on the residual sum of squares (RSS) and the coefficient of determination (R^2), showed that the exponential model for aboveground biomass ($R^2 = 0.64$) and the spherical model for canopy cover ($R^2 = 0.76$) were selected as the most suitable models. The validation results of the canopy cover percentage and biomass using RMSE and bias



criteria indicated that the RF algorithm and Support Vector Machine (SVM) had a better status and validity than the geostatistical approach due to having the lowest mean squared error and bias values. Additionally, both the RF and SVM models performed well; however, the RF model (92%) had a higher accuracy and sensitivity index in predicting the percentage of canopy cover than the SVM model (83%). The results of this study showed a significant relationship and correlation between the percentage of canopy cover and biomass (tons per hectare) with over 80% of the studied variables. The ROC curve was used to evaluate the performance of geostatistical and remote sensing methods in modeling. In this study, the AUC values based on machine learning models for canopy cover and biomass (RF = 0.94, SVM = 0.93) outperformed geostatistical methods for canopy cover (0.71) and biomass (0.76) in terms of predicting and modeling these indices. Furthermore, there was no significant difference at the 99% and 95% probability levels between the estimated values of canopy cover and aboveground biomass and the actual values.

Conclusion: Awareness of changes in the canopy of vegetation is very important for application programs, resource management, and the assessment of environmental services. Based on the obtained results, it can be stated that the information derived from the main bands and spectral indices played a significant role in estimating canopy cover and aboveground biomass. Furthermore, the effectiveness of the models used in this study may indicate the selection of predictive mapping techniques for modeling forest aboveground biomass. The ability of random forests to estimate the forest variables mentioned in this research could pave the way for future studies.

Keywords: Kriging, Landsat 9, Random Forest, Support Vector Machine, Satellite images

How to Cite This Article: Zandi, S., Bonyad, E., Hasanzad Navrodi, I., Alavi, S. J., & Ghorbanzadeh, N. (2025). Estimation of Canopy Cover and Ground Biomass in Afforestation Areas of Western Guilan using Remote Sensing and Geostatistical Methods (Study Area: Pilembera). *Ecol Iran For*, 13(2), 143-157. DOI: 10.61882/ifej.2025.578



مقاله پژوهشی

بررسی تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی در جنگل‌کاری‌های غرب گیلان با استفاده از روش‌های سنجش از دور و زمین‌آمار (منطقه مورد مطالعه: پیلمبرا، رضوانشهر)

سلماز زندی^۱، امیراسلام بنیاد^۲، ایرج حسن زاد ناورودی^۳، سید جلیل علوی^۴ و ندا قربان‌زاده^۵

۱- دانشجوی دکتری جنگلداری و مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی صومعه‌سرا، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران، (نویسنده مسئول: solmazzandi94@gmail.com)

۲- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی صومعه‌سرا، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

۳- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی صومعه‌سرا، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

۴- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، ایران

۵- دانش‌آموخته دکتری جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی صومعه‌سرا، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰
صفحه ۱۴۳ تا ۱۵۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

چکیده مبسوط

مقدمه: کاهش سطح جنگل‌های طبیعی در نتیجه عوامل مختلف سبب شده است که جنگل‌کاری با هدف توسعه سطح جنگل و تولید چوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برآورد ویژگی‌های جنگل با استفاده از داده‌های سنجش از دور به‌عنوان ابزاری برای مدیریت پایدار منابع طبیعی مطرح شده است. روش‌های سنجش از دور و زمین‌آمار در برآورد تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی جنگل‌ها با هدف مدیریتی و حفاظتی می‌توانند مفید و مقرون به‌صرفه باشند. در جنگل‌های هیرکانی، مشخصه تاج‌پوشش و زی‌توده به‌عنوان معیار مهمی برای مطالعه و بررسی تغییرات و پایش جنگل محسوب می‌گردد. این مطالعه نیز با هدف برآورد و بررسی تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی جنگل‌کاری‌های پیلمبرا واقع در استان گیلان با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره لندست ۹، روش‌های سنجش از دور و زمین‌آمار انجام شد.

مواد و روش‌ها: به‌منظور پیاده‌سازی قطعات‌نمونه زمینی (در تابستان ۱۴۰۲)، شبکه پلات‌ها به‌طور تصادفی سیستماتیک و با فاصله ۳۰۰ در ۳۰۰ متر انتخاب شد. تعداد ۱۲۰ قطعه نمونه برداشت شدند. داده‌های حاصل از پیمایش میدانی و آماربرداری وارد نرم‌افزار اکسل و محاسبات مربوط به برآورد تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی انجام شد. همچنین، شاخص‌های گیاهی (شامل NDVI، EVI، DVI، GNDVI، RVI، ARVI، SAVI، OSAVI و IPVI) با استفاده از تصاویر لندست ۹ محاسبه شدند. سپس ارزش‌های متناظر هر قطعه نمونه از هر یک از شاخص‌ها استخراج و تحلیل‌های همبستگی و رگرسیون بر روی این داده‌ها انجام شدند. از تکنیک Information Gain Ratio (IGR) و شاخص میانگین شایستگی (Average Merit) جهت ارزیابی قدرت پیش‌بینی عوامل موثر بر میزان تاج‌پوشش و زی‌توده در جنگل‌کاری‌های منطقه پیلمبرا استفاده شد. همبستگی بین تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی در قطعه نمونه‌های زمینی و ارزش‌های طیفی متناظر آن‌ها در داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزار SPSS و به‌روش تحلیل همبستگی پیرسون بررسی و روش‌های زمین‌آماري درون‌یابی فاصله معکوس (IDW)، کریجینگ معمولی و توابع پایه‌ای شعاعی (RBF) به‌منظور تخمین درصد تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی استفاده شدند. همچنین، از مدل‌های رگرسیون جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان برای انتخاب متغیرها و برآورد درصد تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی منطقه مورد مطالعه استفاده شد که با استفاده از نرم‌افزار Weka تحلیل و ارزیابی شدند. در این مطالعه، ۸۰ درصد (تعداد ۹۶ قطعه‌نمونه) از مجموعه‌ای شامل ۱۲۰ قطعه نمونه موجود به‌عنوان مجموعه داده‌های آموزش مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور بررسی عملکرد روش‌های زمین‌آمار و سنجش از دور در مدل‌سازی، از منحنی ROC استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج IGR و شاخص میانگین شایستگی (MA) نشان دادند که بیشترین همبستگی معنی‌دار بین درصد تاج‌پوشش با متغیرهای OSAVI (۰/۹۱۸) و NDVI (۰/۹۱۵) و همچنین بیشترین همبستگی معنی‌دار بین زی‌توده روی‌زمینی (تن در هکتار) و متغیرهای SAVI (۰/۹۱۳) و NDVI (۰/۹۰۲) مشاهده شد. وجود یا نبود وابستگی مکانی پارامتر درصد تاج‌پوشش و زی‌توده پس از برازش چندین مدل نیم‌تغییرنما، بر پایه آماره مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و ضریب تبیین (R^2)، مدل‌هایی برای زی‌توده روی‌زمینی ($R^2 = ۰/۶۴$) و مدل‌های تاج‌پوشش ($R^2 = ۰/۷۶$) به‌عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. نتایج اعتبارسنجی شاخص درصد تاج‌پوشش و زی‌توده با استفاده از معیارهای RMSE و ارزیابی نشان دادند که الگوریتم جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان نسبت به رویکرد زمین‌آمار به سبب داشتن کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا و ارزیابی دارای وضعیت و اعتبار بیشتری بودند. همچنین، هر دو مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان عملکرد مناسبی داشتند اما در پیش‌بینی درصد تاج‌پوشش، مدل جنگل تصادفی (۹۲٪) نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان (۸۳٪) دارای مقدار صحت و شاخص حساسیت بالاتری بود. نتایج این مطالعه نشان دادند که بین درصد تاج‌پوشش و زی‌توده (تن در هکتار) با بیش از ۸۰ درصد متغیرهای مورد مطالعه ارتباط و همبستگی معنادار مشاهده شد. به‌منظور بررسی عملکرد روش‌های زمین‌آمار و سنجش از دور در مدل‌سازی، از منحنی ROC استفاده شد. در این مطالعه، مقادیر AUC مبتنی بر مدل‌های یادگیری ماشین برای تاج‌پوشش و زی‌توده ($RF = ۰/۹۴$) و ($SVM = ۰/۹۳$) نسبت به روش‌های زمین‌آمار برای تاج‌پوشش ($۰/۷۱$) و زی‌توده ($۰/۷۶$) در زمینه پیش‌بینی و مدل‌سازی این شاخص‌ها دارای عملکرد بهتری بودند. همچنین، بین مقادیر تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی برآوردشده و مقدار واقعی تفاوت‌های معنی‌داری در سطوح احتمال ۹۹ و ۹۵ درصد وجود نداشتند.

نتیجه‌گیری: آگاهی از روند تغییرات تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی برای برنامه‌های کاربردی و مدیریت جنگل‌ها و نیز ارزیابی خدمات محیط زیستی بسیار مهم است. با توجه به نتایج حاصل، می‌توان اذعان داشت که اطلاعات به‌دست‌آمده از باندهای اصلی و شاخص‌های طیفی نقش به‌سزایی در برآورد تاج‌پوشش و زی‌توده روی‌زمینی داشتند. علاوه بر این، کارایی مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه می‌تواند از انتخاب تکنیک‌های نگاشت پیش‌بینی‌کننده برای مدل‌سازی زی‌توده روی‌زمینی جنگل خبر دهد. توانایی جنگل تصادفی در برآورد متغیرهای جنگلی اشاره‌شده در این تحقیق می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات آینده باشد.

واژه‌های کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای، جنگل تصادفی، کریجینگ، لندست ۹، ماشین بردار پشتیبان

مقدمه

اهمیت هستند (Haidari et al., 2024). یک مداخله جنگلی به اطلاعات دقیق و صریح در مورد ویژگی‌های درخت و توده‌های جنگلی نیاز دارد (MacDicken, 2015). ارزیابی پوشش جنگلی به‌منظور تسهیل تصمیم‌گیری در مورد

جنگل‌ها از نظر تولید چوب، ذخیره کربن، تولید غذا، حفاظت از خاک، کنترل آب و هوا، حفاظت از تنوع زیستی، آلودگی‌زدایی محیطی و تنظیم چرخه هیدرولوژیکی بسیار حائز

برای بهبود تخمین و نقشه برداری زی توده با استفاده از تصاویر لندست ۹ در منطقه جنگل کاری شده در شمال چین استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان دادند که رگرسیون کریجینگ توانسته طور قابل توجهی خطای تخمین را کاهش دهد. رضایی سگدهی و همکاران (Rezaei-Sangdehi *et al.*, 2022) در مطالعه ای که در سری سه سگده انجام دادند برای برآورد مشخه های کمی جنگل از روش های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان دادند که استفاده از این روش ها در ترکیب با روش های سنجش از دور توانست اطلاعات کامل تری برای مدیریت جنگل را فراهم کند. حسان و محمدی (Hassan & Mohammadi, 2024) در مطالعه ای که به برآورد زی توده در توده های دست کاشت عرب داغ گلستان پرداختند نشان دادند که داده های سنتینل ۲ با دقت قابل قبول توانستند زی توده روزمینی را برآورد نمایند و با توجه به نتایج حاصل شده در این مقاله نتیجه گرفتند که اطلاعات باندهای اصلی و شاخص های طیفی نقش مهمی را در برآورد زی توده داشتند. قیصریگی و همکاران (Gheysarbeigi *et al.*, 2024) از مدل رگرسیون جنگل تصادفی برای برآورد زی توده روزمینی جنگل های زاگرس استفاده کردند. نتایج حاصل نشان از عملکرد قابل قبول مدل در برآورد زی توده روی زمینی جنگل داشتند. نتایج بررسی میزان اهمیت متغیرها با استفاده از آماره جینی نشان دادند که شاخص های NDVI, GNDVI, RVI و DVI اهمیت بیشتری در ارائه مدل برآورد زی توده داشتند. در سال های اخیر، فنون سنجش از دور با استفاده از روش های ناپارامتریک مانند الگوریتم جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان به طور گسترده برای برآورد زی توده و تاجپوشش درختان جنگل مورد استفاده قرار گرفته اند. امروزه با گسترش صنعت، افزایش جمعیت و تخریب بخش بزرگی از جنگل ها توسط فعالیت های بشر، با توجه به اهمیت و حساسیت موضوع تغییر اقلیم و افزایش دمای زمین، اطلاعات زی توده روزمینی درختان و تاجپوشش به ویژه در جنگل کاری های استان گیلان از اهمیت بالایی برخوردار است. این پژوهش با هدف برآورد تاجپوشش و زی توده روزمینی با استفاده از داده های تصاویر ماهواره لندست ۹ و زمین آمار در جنگل های غرب گیلان (منطقه مورد مطالعه پیلمبرا) می تواند به عنوان یک مبنای علمی در جنگل کاری ها و مدیریت جنگل مورد توجه قرار بگیرد. استفاده از نتایج این پژوهش برای انجام طرح هایی که نیاز به مدل و نقشه های دقیق از منطقه جنگل کاری شده دارد می تواند امکان تجزیه و تحلیل مکانی در کمترین زمان با دسترسی سریع به این داده ها را فراهم کند.

مواد و روش ها

این مطالعه در جنگل کاری های پیلمبرا واقع در رضوانشهر انجام شد که در عرض جغرافیایی $37^{\circ} 33' 71''$ تا $37^{\circ} 36' 47''$ و طول جغرافیایی $49^{\circ} 51' 5''$ تا $49^{\circ} 23' 31''$ قرار دارد. این منطقه در ۳۵ کیلومتری مسیر بندر انزلی-آستارا و جنب مجتمع چوب و کاغذ ایران (چوکا) واقع است. سری ۱۹ پیلمبرا در جنگل های حوزه ۹ سفارود، با جنگل های دست کاشت جلگه ای

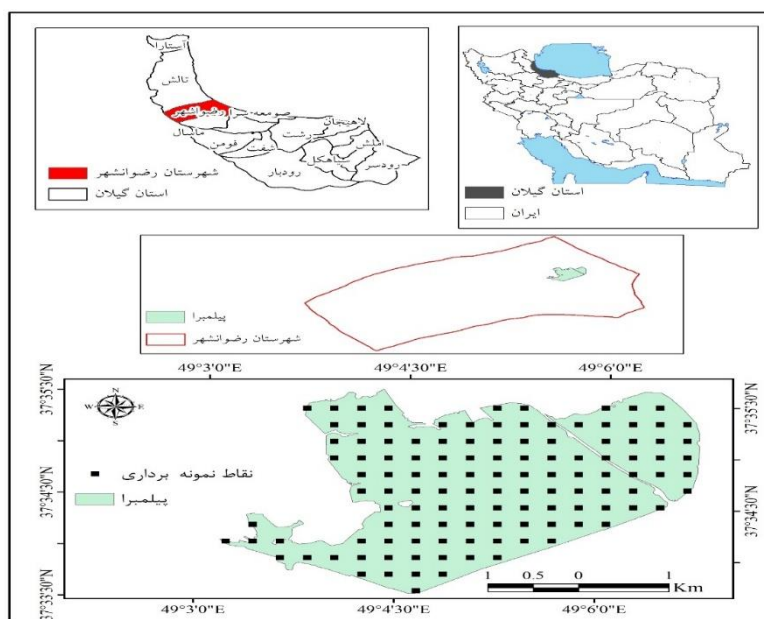
برنامه های حفاظت از تنوع زیستی و احیای جنگل انجام می شود. علاوه بر این، نقشه های جنگل برای ارزیابی تغییرات محیطی جهانی و برنامه ریزی مدیریت محلی جنگل بسیار مهم هستند (Ganz *et al.*, 2020). یقیناً مدیریت و برنامه ریزی اصولی به عنوان یکی از ارکان مهم در راستای حفظ و حراست از منابع طبیعی محسوب می شود. پایش کارآمد جنگل ها و همچنین شناسایی فرآیندهای متغیر و ارائه ابزارهای جدید برای حفاظت از آن ها از اهمیت زیادی برخوردار است (Brockerhoff *et al.*, 2017). از آنجایی که فرآیند جنگل کاری بر پویایی پوشش اراضی تأثیر بسزایی دارد، لازم است که تکامل آن پایش شود و برای این منظور باید داده ها و اطلاعات دقیق تری از موقعیت و شرایط آن ها داشت و این مهم مگر با استفاده از ابزار و تجهیزات مدرن و نیروهای مدیریتی آگاه به دست نخواهد آمد. برآورد زی توده و تاجپوشش برای تشخیص ساختار جنگل مهم است و به عنوان یک شاخص مهم برای ارزیابی رویشگاه از نظر بیواکولوژیکی و اقتصادی در نظر گرفته می شود (Cole-Thomas & Ewel-John, 2006). روش های سنجش از دور و زمین آمار مطمئناً ابزاری با پتانسیل بالا را نشان می دهند که امکان تجزیه و تحلیل و طبقه بندی مناطق بزرگ را فراهم می کنند و به دست آوردن نتایج مکرر قابل به روزرسانی در مقیاس های فضایی مختلف را ممکن می سازند. داده های حاصل از نمونه برداری ها باید برای اهداف و پروژه های تصمیم گیری پرورش جنگل مناسب و کاربردی باشند تا نیاز به استخراج اطلاعاتی یکپارچه، از یک منبع اطلاعاتی دقیق تامین شود. سنجش از دور می تواند این نیاز را با استفاده از اطلاعات مکانی پیوسته که در اختیار قرار می دهد، تامین کند. روش جنگل تصادفی^۱ (RF) و ماشین بردار پشتیبان^۲ (SVM) از روش های ناپارامتریک جدید با کاربرد علمی در جنگل داری هستند (Ohman *et al.*, 2014). برآورد ویژگی های جنگل با استفاده از آماربرداری زمینی، مدل های آماری، اطلاعات حاصل از تجزیه و تحلیل داده های دورسنجی مانند عکس های هوایی، تصاویر ماهواره ای و یا داده های راداری و تجزیه و تحلیل های مکانی (زمین آمار) انجام می شود. روش های دورسنجی به علت امکان پردازش و تجزیه و تحلیل سریع، قابلیت یکپارچگی با سامانه اطلاعات جغرافیایی، مستمر بودن و تکرار آن ها می توانند امکان مناسبی را برای جمع آوری اطلاعات در مورد جنگل کاری ها فراهم کنند (Brown *et al.*, 1989). میررجبی و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه ای که در پارک چیتگر تهران انجام دادند اذعان داشتند که استفاده از تصاویر ماهواره ای در تخمین زی توده از دقت مناسبی برخوردار بود (Mirrajab *et al.*, 2016). میری و درویش صفت در سال (۲۰۲۱) مطالعه ای را با هدف بررسی قابلیت داده های ماهواره لندست ۸ در مدل سازی و برآورد تاجپوشش جنگل در بخشی از جنگل های زاگرس انجام دادند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان دادند که تاجپوشش جنگل با استفاده از ماهواره لندست ۸ می توان با هزینه بسیار پایین در کمترین زمان برآورد شد (Miri & Darvish-Sefat, 2021). فوگن و همکاران (Fugen *et al.*, 2022) در مطالعه خود از روش کریجینگ

² Support vector machines

¹ Random Forest

متوسط منطقه بین ۵ تا ۵۰ متر است و شیب نیز بین صفر تا ۱۵ درصد قرار دارد (شکل ۱).

در شمال این شهرستان و در ۴ کیلومتری شرکت شفاورد قرار دارد. مساحت کل این سری ۱۱۱۴/۳ هکتار است. ارتفاع



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان گیلان
Figure 1. Location of the study area in Guilan Province

سریای تک‌تک درختان با استفاده از جدول تاریف محلی محاسبه و مجموع حجم درختان سریای موجود در قطعه نمونه به‌دست‌آمده و با استفاده از ضریب سیلو (۰/۹) به واحد مترمکعب تبدیل شد (Zobeiri, 2010). بعد از این که مقدار حجم چوب سریا در قطعات نمونه محاسبه شد، با استفاده از معادله تبدیل حجم به زی‌توده روزمینی که توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO, 1997) نیز ارائه شده است، میزان زی‌توده در هر قطعه نمونه (تن در هکتار) برآورد شد که معادله آن (رابطه ۱) به شرح زیر است:

$$AGB \text{ (Mg/ha)} = \text{volume} \times WD \times BEF \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن Volume حجم چوب به متر مکعب در هکتار (m³/ha)، WD چگالی بحرانی متوسط چوب به تن در متر مکعب (ton/m³) و BEF ضریب افزایش زی‌توده هستند.

شبکه پلات‌ها براساس تصاویر لندست طراحی‌شده و مرکز پیکسل‌ها به‌عنوان مرکز قطعه نمونه مربعی انتخاب شدند. سپس، شبکه پلات با استفاده از GPS پیاده‌سازی شد. بعد از استخراج ارزش‌های طیفی از باندهای اصلی و شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه شده از تصویر لندست ۹، ابتدا وضعیت نرمال‌بودن داده‌ها با استفاده از آزمون آماری کلموگروف اسمیرنوف ارزیابی شد. سپس، همبستگی بین مشخصه‌های کمی توده‌های جنگلی در قطعه‌های نمونه زمینی و ارزش‌های طیفی متناظر آن‌ها در داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزار SPSS و به روش تحلیل همبستگی پیرسون بررسی شد. با توجه به هدف پژوهش حاضر که مرتبط با بررسی ارتباط بین مقادیر مشخصه‌های کمی توده‌های جنگلی و داده‌های

نمونه‌برداری از جنگل‌کاری‌های سری ۱۹ پیلیمرا به روش منظم- تصادفی انجام شد. در هر قطعه نمونه، کلیه درختان بیش از قطر برابر سینه ۷/۵ سانتی‌متر آماربرداری شدند. به‌منظور پیاده‌سازی قطعات نمونه زمینی (در تابستان ۲۰۲۳)، شبکه نمونه‌برداری به‌طور تصادفی سیستماتیک با استفاده از ابزار Fishnet و در محیط آرک جی‌آی‌اس تهیه شد. فاصله بین شبکه پلات‌ها ۳۰۰ در ۳۰۰ متر برآورد شد. تعداد ۹۶ قطعه‌نمونه (۸۰ درصد) از مجموعه‌ای شامل ۱۲۰ قطعه‌نمونه موجود به‌عنوان مجموعه داده‌های آموزش مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های زمینی مورد استفاده به‌منظور تخمین تاج‌پوشش به‌روش منظم-تصادفی شامل قطر برابر سینه درختان، قطر برابر سینه بزرگ تاج، و قطر برابر سینه کوچک تاج اندازه‌گیری شدند. از هفت باند اصلی ماهواره لندست ۹ مربوط به گذر/ ردیف شماره ۱۶۶/۴ در روز ۱ ماه آگوست ۲۰۲۳ میلادی برای استخراج داده‌های طیفی متناظر با داده‌های حاصل از قطعات نمونه‌برداری زمینی استفاده شد. تصاویر از سایت USGS Earth Explorer دانلود و داده‌های حاصل از پیمایش میدانی و آماربرداری وارد نرم‌افزار اکسل و محاسبه شدند. همچنین، شاخص‌های گیاهی (شامل GNDVI، DVI، EVI، NDVI، RVI، ARVI، SAVI، OSAVI و IPVI) با استفاده از تصاویر لندست ۹ محاسبه شدند. سپس، ارزش‌های متناظر هر قطعه نمونه از هر یک از شاخص‌ها استخراج و تحلیل‌های همبستگی و رگرسیون بر روی این داده‌ها انجام شدند. با توجه به کاربرد بسیار زیاد تبدیل تسلدکپ در استخراج پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور استفاده از ضرایب تسلدکپ در این پژوهش، برای تصاویر لندست ۹، شاخص‌های تسلدکپ با توجه به ضرایب ارائه‌شده در جدول (۱) به‌دست آمدند. حجم

طیفی مرتبط با داده‌های ماهواره‌ای لندست ۹ و شاخص پوشش گیاهی به‌عنوان متغیرهای مستقل (یا متغیرهای تبیین‌کننده) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شایان‌ذکر است که معنی‌داری روابط حاصله در سطوح احتمال ۹۹ و ۹۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت.

ماهواره‌ای لندست ۹ است، تلاش شد تا یک مدل مناسب برای پیش‌بینی تاج‌پوشش و زی‌توده ارائه شود. در این تحقیق، مشخصه‌های کمی توده‌های جنگلی که در قطعه‌نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری شده است، به‌عنوان متغیر وابسته (یا متغیر پیش‌بینی‌شونده) مدنظر قرار گرفته‌اند. همچنین، اطلاعات

جدول ۱- ضرایب تبدیل تسلدکپ در لندست ۹

Table 1. Tasseled cap in Lndsat 9

مادون قرمز طول موج کوتاه Ir-c	مادون قرمز طول موج کوتاه Ir-b	مادون قرمز نزدیک Near infrared	قرمز Red	سبز Green	آبی Blue	Landsat 9 لندست ۹
0.187	0.508	0.559	0.473	0.278	0.302	روشنایی Brightness
-0.160	0.071	0.727	-0.542	-0.243	-0.294	سبزیگی Greenness
-0.455	-0.711	0.340	0.328	0.197	0.151	رطوبت Wetness

شد. اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از ۲۰ درصد نمونه‌ها که به‌صورت تصادفی انتخاب شده بودند (داده‌های شاهد) براساس آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۴)، جذر درصد میانگین مربعات (RMSE%) (رابطه ۵)، اریبی (Bias) (رابطه ۶) و درصد اریبی (%Bias) انجام شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \bar{y}_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_{oi} - \bar{y}_o)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)}{n} \bar{y} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\%Bias = Bias \times 100 \quad (\text{رابطه ۷})$$

در روابط فوق‌الذکر، n : تعداد قطعه‌نمونه ارزیابی، $\bar{y}_i$: مقدار مشخصه کمی توده جنگلی برآوردشده از مدل‌ها، y_i : مقدار مشخصه کمی توده جنگلی حاصل داده‌های میدانی و $\bar{y}$: میانگین مقادیر مشخصه کمی توده جنگلی اندازه‌گیری‌شده برای تعداد قطعه‌نمونه هستند.

در پایان، پس از ارزیابی و راستی‌آزمایی مدل‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، بهترین مدل بر اساس بالاترین مقدار R^2 و کمترین میزان $RMSE\%$ انتخاب شد. از این مدل انتخاب‌شده برای تهیه نقشه مشخصه‌های کمی توده جنگلی منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج آمار توصیفی تاج‌پوشش و زی‌توده اندازه‌گیری‌شده نشان دادند که سطح معناداری در آزمون کولموگروف اسمیرنوف برای تمام متغیرهای مورد مطالعه بیشتر از ۰/۰۵ بود و متغیرهای مورد مطالعه دارای توزیع نرمال بودند. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، بین درصد تاج‌پوشش با تمامی متغیرهای مورد مطالعه، به غیر از باندهای ۲، ۳، ۶ و ۷، همبستگی معنادار مشاهده شد. بیشترین همبستگی معنی‌دار بین درصد تاج‌پوشش و متغیرهای OSAVI و NDVI مشاهده شد. در تحقیق هیوالی و همکاران (Hualei et al., 2017)، شاخص NDVI به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای مشاهدات

در این تحقیق، مشخصه‌های کمی توده‌های جنگلی که در قطعه‌نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری شدند، به‌عنوان متغیر وابسته (یا متغیر پیش‌بینی‌شونده) مدنظر قرار گرفتند. همچنین، اطلاعات طیفی مرتبط با داده‌های ماهواره‌ای لندست ۹ و شاخص‌های پوشش گیاهی به‌عنوان متغیرهای مستقل (یا متغیرهای تبیین‌کننده) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، جهت برآورد پوشش جنگل از شاخص‌های طیفی مختلفی استفاده شد. در ادامه، برای انتخاب متغیرها و مدل‌سازی‌های آماری از روش جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان و کریجینگ استفاده شد. جنگل تصادفی یکی از الگوریتم‌های معروف یادگیری گروهی است که با استفاده از تعداد زیادی درخت تصمیم، به کاهش بیش‌برازش و بهبود دقت کمک می‌کند و همچنین تکنیک ماشین بردار پشتیبان روشی مبتنی بر نمونه‌گیری تصادفی است که دشواری تعریف مسئله را با نگهداشت اطلاعات اصلی کم می‌کند. کریجینگ روش زمین‌آماری است که از یک ترکیب خطی از وزن‌های نقاط شناخته‌شده برای تخمین مقادیر نقاط ناشناخته استفاده می‌کند. کریجینگ از یک نیم‌تغییرنا استفاده می‌کند که معیاری از همبستگی مکانی بین دو نقطه است به گونه‌ای که وزن آن‌ها بر اساس ترتیب مکانی نمونه‌ها تغییر می‌کند. نیم‌تغییرنا متداول‌ترین ابزاری است که همبستگی مکانی را در زمین‌آمار بررسی می‌کند. در عمل برای محاسبه نیم‌تغییرنمای تجربی از رابطه ۲ استفاده می‌شود:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن $\gamma(h)$ نیم‌تغییرنمای تجربی، $N(h)$ تعداد جفت نقاطی که به فاصله h از یکدیگر قرار دارند، $z(x_i)$ مقدار متغیر در نقطه‌ای به مختصات x و $z(x_i + h)$ مقدار متغیر در نقطه‌ای به مختصات $(x_i + h)$ هستند.

به‌منظور بررسی و تعیین بهترین روش درون‌یابی از معیارهای میانگین خطای مطلق (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و همبستگی استفاده گردید. بهترین مقدار برای معیارهای RMSE و MAE برابر صفر و برای معیار R^2 (رابطه ۳) برابر یک است (Xie et al., 2011). واریوگرام برای تحلیل ساختار مکانی استفاده شد. همچنین برای محاسبه و ترسیم تغییرنا از نرم‌فزار GS+ ورژن ۱۰ استفاده شد و برای ترسیم نقشه‌های خروجی از نرم‌فزار ArcGIS ورژن ۱۰/۳ استفاده

طولانی‌مدت و نزدیک به سطح برای نظارت بر توسعه تاج‌پوشش توصیه شد نتایج آزمون همبستگی بین میزان زی‌توده (تن در هکتار) و متغیرهای طیفی در جدول (۳) ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنها بین زی‌توده با باندهای ۲، ۳، و ۷ و شاخص‌های Wetness همبستگی معنادار مشاهده نشد و در سایر متغیرها همبستگی و ارتباط معنادار وجود داشت. بیشترین همبستگی معنی‌دار بین زی‌توده (تن در هکتار) و متغیرهای SAVI و NDVI مشاهده شد.

جدول ۲- همبستگی و ارتباط بین درصد تاج‌پوشش جنگل و متغیرهای طیفی

Table 2. Correlations and relationships between forest canopy percentages and spectral variables

ضریب همبستگی Correlation coefficient	متغیرهای مستقل Independent variables	ضریب همبستگی Correlation coefficient	متغیرهای مستقل Independent variables
0.537**	GRVI	0.674**	ARVI
0.84**	Greenness	-0.798**	DVI
0.143**	Brightness	-0.823**	EVI
0.266**	Wetness	0.689**	GNDVI
0.27**	PCA-1	0.639**	IPVI
0.986**	PCA-2	0.915**	NDVI
0.029 ns	باند 2 Band2	0.918**	OSAVI
-0.119 ns	باند 3 Band3	0.685**	RVI
-0.263*	باند 4 Band4	0.905**	SAVI
0.636**	باند 5 Band5	0.82**	LAI
ns 0.189	باند 6 Band6	0.855**	MNLI
-0.067 ns	باند 7 Band7	0.701**	GARI
		0.798**	GDVI

**معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد، ns: عدم وجود همبستگی معنی‌دار، *معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصد
**Significance at the 99% probability level, ns: the absence of a significant correlation, *significance at the 95% probability level.

برازش واریوگرام و انتخاب مدل مناسب بر مبنای حداقل مقدار RSS انتخاب شد (جدول ۴). براساس نتایج، مدل‌های کروی و نمایی بهترین مدل‌ها به ترتیب برای پارامترهای درصد تاج‌پوشش و زی‌توده بودند. از آنجا که نسبت اثر قطعه‌ای به

جدول ۳- تحلیل همبستگی و ارتباط بین زی‌توده (تن در هکتار) و متغیرهای طیفی.

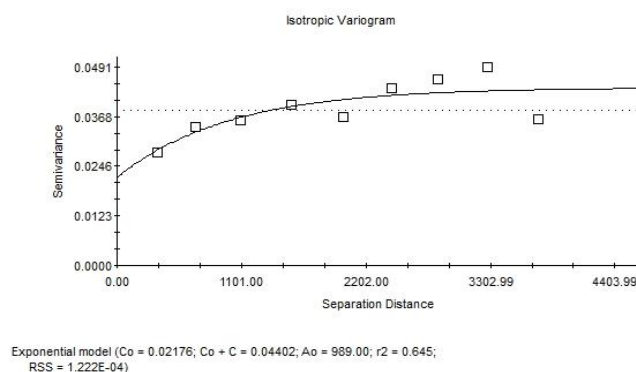
Table 3. Correlation analyses and relationships between biomass (tons per hectare) and spectral variables

ضریب همبستگی Correlation coefficient	متغیرهای مستقل Independent variables	ضریب همبستگی Correlation coefficient	متغیرهای مستقل Independent variables
0.682**	GRVI	0.634**	ARVI
0.884**	Greenness	-0.844**	DVI
0.412**	Brightness	-0.815**	EVI
0.067 ns	Wetness	0.614**	GNDVI
0.428**	PCA-1	0.565**	IPVI
0.868**	PCA-2	0.902**	NDVI
-0.146 ns	باند 2 Band2	0.87**	OSAVI
-0.07 ns	باند 3 Band3	0.643**	RVI
-0/215*	باند 4 Band4	0.91**	SAVI
0/693**	باند 5 Band5	-0.858**	LAI
0/342**	باند 6 Band6	0.909**	MNLI
-0/039 ns	باند 7 Band7	0.676**	GARI
		0.838**	GDVI

**معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد، ns: عدم وجود همبستگی معنی‌دار، *معنی‌داری در سطح احتمال ۹۵ درصد
**Significance at the 99% probability level, ns: the absence of a significant correlation, *significance at the 95% probability level.

واریوگرام تجربی به‌همراه مدل نظری برازش داده‌شده برای درصد تاج‌پوشش در شکل (۲) ارائه شده است. با بررسی وجود یا نبود وابستگی مکانی پارامتر درصد تاج‌پوشش، پس از برازش

کریجینگ برای درصد تاج پوشش به عنوان مناسب ترین مدل انتخاب شد (جدول ۶).



شکل ۲- واریوگرام تجربی به همراه مدل نظری برازش داده شده برای درصد تاج پوشش.
Figure 2. The experimental variogram along with the fitted theoretical model for the canopy percentage.

جدول ۴- پارامترهای نیم تغییرنمای متغیر تحت بررسی تاج پوشش و زی توده

Table 4. Semi-variable parameters of the variables for the studied canopy cover and biomass

متغیر Variable	مدل Model	اثر قطعه ای (C0) Nugget effect	سقف (C0+C)	دامنه تاثیر (متر) Range of influence	C0/C0+C	ضریب تبیین (R ²) R-squared correlation
درصد تاج پوشش Canopy%	نمایی Exponential	0.022	0.044	989	0.506	0.645
زی توده (تن در هکتار) Biomass	کروی Spherical	10.9	21.87	177	0.5	0.76

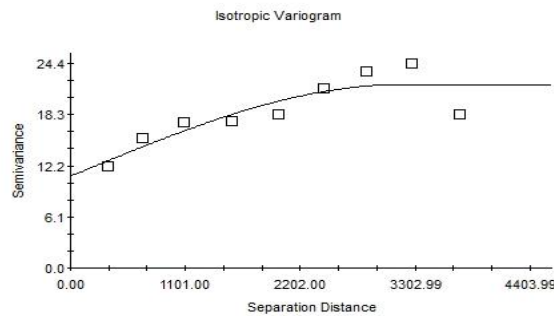
جدول ۵- نتایج ارزیابی روش های زمین آماری در تخمین درصد تاج پوشش

Table 5. Evaluation results of geostatistical methods in estimating the canopy percentage

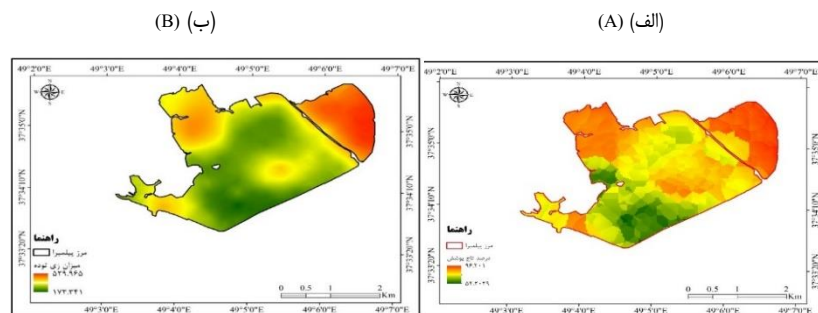
روش Method	مدل Model	ME میانگین خطا	RMSE مجموع مربعات خطا	ضریب تبیین (R ²) R-squared correlation
معکوس فاصله وزنی (IDW)	توان 1 P1	-4.84	124.4	0.456
	توان 2 P2	-3.89	124.38	0.461
	توان 3 P3	-3.41	126.7	0.488
کریجینگ معمولی Kerjijing	کروی Spherical model	0.011	12.62	0.555
	نمایی Exponential model	0.008	12.5	0.645
	گوسی Gaussian model	0.12	12.65	0.432
توابع پایه ای شعاعی (RBF)	چنددرجی Q	-1.24	132.06	0.401
	چنددرجی معکوس RQ	-4.17	124.9	0.393
	نواری کم ضخامت TPS	-3.51	151	0.387

چندین مدل نیم تغییرنما، بر پایه آماره مجموع مربعات باقی مانده (RSS) و ضریب تبیین (R²) بررسی شد. از آن جا که کمترین مقدار مجموع مربعات باقی مانده (RSS) مربوط به مدل نمایی روش درونیابی کریجینگ بود، بنابراین این مدل به عنوان مدل منتخب انتخاب شد.

همچنین، واریوگرام تجربی به همراه مدل نظری برازش داده شده برای زی توده (تن در هکتار) در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج ارزیابی روش های زمین آماری در تخمین زی توده (تن در هکتار) در جدول (۶) ارائه شده اند که وجود یا نبود وابستگی مکانی پارامتر زی توده (تن در هکتار)، پس از برازش



شکل ۳- واریوگرام تجربی به همراه مدل نظری برازش داده شده برای زی توده
Figure 3. Experimental variogram along with the fitted theoretical model for biomass



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی تاج پوشش (الف) و زی توده (تن در هکتار) (ب) به روش زمین‌آمار
Figure 4. The classification map of the canopy (A) and biomass (tons per hectare) (B) by the kriging method

جدول ۶- نتایج ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در تخمین زی توده (تن در هکتار)

Table 6. Evaluation results of geostatistical methods in estimating biomass

روش Method	مدل Model	میانگین خطا ME	میانگین مربعات خطا RMSE	ضریب تبیین (R ²) R-squared correlation
وزندگی فاصله معکوس (IDW)	1 توان P1	-4.8	124.3	0.611
	2 توان P2	-3.89	124.4	0.621
	3 توان P3	-3.4	126.7	0.632
کریجینگ معمولی Kriging	کروی Spherical Model	-0.53	124.4	0.761
	نمایی Exponential Model	-0.54	124.5	0.755
	گوسی (Gaussian model)	-0.54	125.4	0.741
	چنددرجی Q	-1.2	132	0.588
توابع پای‌های شعاعی (RBF)	چنددرجی معکوس RQ	-4.1	124.9	0.533
	نواری کم‌ضخامت TPS	-3.5	151	0.545

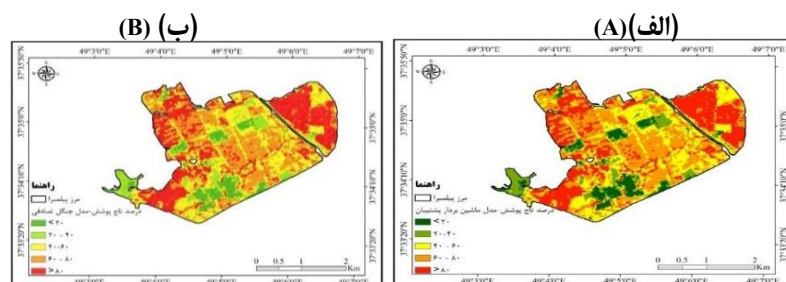
از معیارهای آماری (جدول ۷) سنجیده شد. در این مطالعه، تعداد ۹۶ قطعه نمونه (۸۰٪) از مجموعه‌های شامل ۱۲۰ قطعه نمونه موجود به عنوان مجموعه داده‌های آموزش مورد استفاده قرار گرفتند. از نظر نمونه‌های آموزشی، مدل جنگل تصادفی (۰/۹۲) نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان (۰/۸۳) دارای صحت بالاتری بود. مقادیر شاخص حساسیت در مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۸۳ بودند، به این معنی که مدل جنگل تصادفی قادر است ۹۲ درصد از پیکسل‌ها را به درستی طبقه‌بندی کند که نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان قدرت پیش‌بینی بالاتری دارد.

نتایج برآورد متغیر درصد تاج پوشش با الگوریتم‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان جهت بررسی و مدل‌سازی درصد تاج پوشش با استفاده از شاخص IGR بر روی داده‌های ثانوی سنجنش از دور نشان دادند که (2/03)NDVI، (1/9)SAVI و (1/8)MNLI نسبت به سایر متغیرها بیشترین تاثیر را بر پیش‌بینی تاج پوشش جنگل داشتند. این یافته‌ها در راستای نتایج تحقیق قبلی مطلق (Ghanbari-Motlaq et al., 2019) در جنگل معتدل هیرکانی شمال ایران هستند. پس از آموزش مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان، عملکرد آن‌ها در زمینه مدل‌سازی درصد تاج پوشش با استفاده

جدول ۷- عملکرد الگوریتم‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان برای مدل‌سازی تاج‌پوشش.

Table 7. Performance of RF and SVM algorithms for canopy modeling

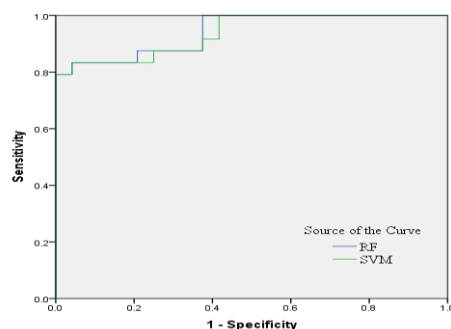
جنگل تصادفی	ماشین بردار پشتیبان	معیارهای آماری Statistical criteria
0.92	0.83	حساسیت (%) Sensitivity%
0.92	0.78	ویژگی (%) Feature%
0.92	0.83	صحت (%) Accuracy%
0.88	0.74	شاخص کاپا Cappa in ex
0.15	0.32	RMSE
0.99	0.91	AUC



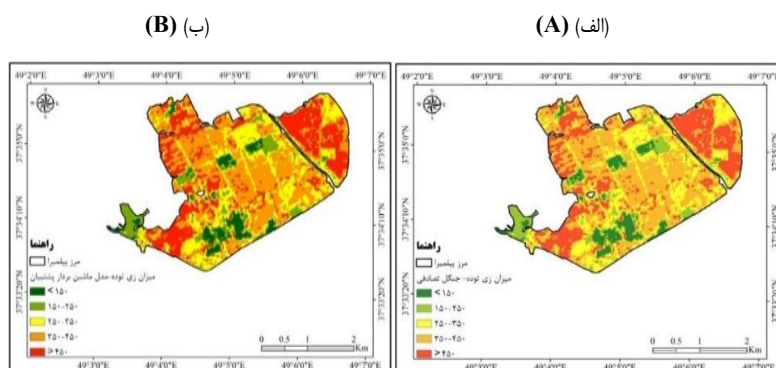
شکل ۵- مدل‌سازی درصد تاج‌پوشش جنگل با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (الف) و ماشین بردار پشتیبان (ب).
Figure 5. Modeling the percentage of forest canopy using the RF (A) & SVM (B) algorithms

مدل‌سازی درصد تاج‌پوشش جنگل با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان (۰/۹۴) و ماشین بردار پشتیبان (۰/۹۸) عملکرد مناسبی را در مدل‌سازی متغیر میزان زی‌توده داشتند. مدل‌سازی میزان زی‌توده با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در شکل (۷) ارائه شده است. منحنی ROC مدل‌های مورد ارزیابی با توجه به داده‌های اعتبارسنجی در شکل (۸) ارائه شده است. پس از آموزش مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان، عملکرد آن‌ها در زمینه مدل‌سازی زی‌توده با استفاده از معیارهای آماری (جدول ۸) سنجیده شد.

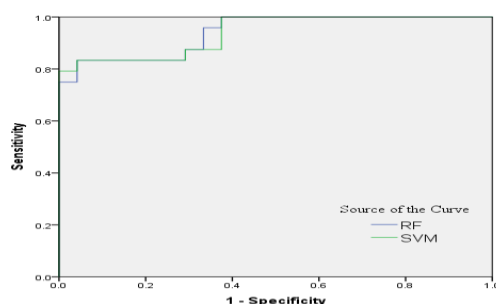
مدل‌سازی درصد تاج‌پوشش جنگل با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در شکل (۶) ارائه شده است. هر دو مقدار AUC در منحنی ROC نقشه درصد تاج‌پوشش بر اساس مدل‌های جنگل تصادفی (۰/۹۴۱) و بر اساس الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (۰/۹۳۹) در یک محدوده قرار داشتند، بنا بر این، هر دو مدل عملکرد مناسبی را در مدل‌سازی متغیر درصد تاج‌پوشش جنگل داشتند (شکل ۴). مقدار AUC نقشه میزان زی‌توده بر اساس مدل‌های مورد نظر در یک محدوده قرار داشت، بنا بر این، هر دو مدل جنگل تصادفی



شکل ۶- منحنی ROC نقشه درصد تاج‌پوشش بر اساس مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان.
Figure 6. The ROC curve of the canopy percentage map based on RF and SVM models



شکل ۷- مدل‌سازی میزان زی‌توده (تن در هکتار) با استفاده از الگوریتم‌های جنگل تصادفی (الف) و ماشین بردار پشتیبان (ب).
Figure 7. Modeling of yield (tons per hectare) using RF (A) & SVM (B) algorithms.



شکل ۸- منحنی ROC نقشه میزان زی‌توده براساس مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان.
Figure 8. The ROC curve of the biomass map based on RF and SVM models

جدول ۸- عملکرد الگوریتم‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان برای مدل‌سازی میزان زی‌توده
Table 8. The performance of RF and SVM algorithms for modeling the biomass

معیارهای آماری Statistical criteria	SVM ماشین بردار پشتیبان	RF جنگل تصادفی
حساسیت (%)	0.912	0.915
ویژگی (%)	0.904	0.915
صحت (%)	0.904	0.915
شاخص کاپا	0.799	0.82
Capa index	0.01	0.27
RMSE	0.89	0.95
AUC		

ماشین بردار پشتیبان (۰/۹۳۸) و روش کریجینگ (۰/۷۱۷) محاسبه شدند. همچنین، این مقادیر برای زی‌توده به روش جنگل تصادفی (۰/۹۴۳)، ماشین بردار پشتیبان (۰/۹۳۸) و کریجینگ (۰/۷۶۹) برآورد شدند. مقدار AUC حاصل از مدل‌های یادگیری ماشین نسبت به روش‌های زمین‌آمار در زمینه پیش‌بینی و مدل‌سازی درصد تاج‌پوشش و زی‌توده جنگل دارای عملکرد بهتری بود. برای اعتبارسنجی الگوریتم‌ها براساس معیارهای آماری در این مطالعه، تعداد ۲۴ قطعه‌نمونه (۲۰٪) از مجموعه‌ای شامل ۱۲۰ قطعه‌نمونه موجود به‌عنوان مجموعه داده‌های اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج اعتبارسنجی شاخص‌های کمی درصد تاج‌پوشش و میزان زی‌توده با استفاده از معیارهای RMSE و آریبی نشان دادند که الگوریتم‌های مد نظر نسبت به رویکرد زمین‌آمار به سبب داشتن کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا و آریبی دارای وضعیت و اعتبار بیشتری هستند (جدول ۱۱).

در این پژوهش، از تکنیک (IGR) و شاخص میانگین (Average Merit) جهت ارزیابی میزان تاج‌پوشش و زی‌توده استفاده شد. نتایج این روش (جدول ۹ و ۱۰) نشان دادند که SAVI، NDVI و MNLI در برآورد تاج‌پوشش و زی‌توده متغیرهای NDVI، OSAVI و SAVI نسبت به سایر متغیرها بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی تاج‌پوشش و زی‌توده داشتند. با توجه به نتایج از نظر نمونه‌های آموزشی، مدل جنگل تصادفی (۰/۹۱۵) نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان (۰/۹۰۴) دارای صحت بالاتری بود. مقادیر شاخص حساسیت در هر دو مدل نشان می‌دهند که مدل جنگل تصادفی قادر است ۹۲ درصد از پیکسل‌ها را به‌درستی طبقه‌بندی کند که نسبت به مدل دیگر قدرت پیش‌بینی بالاتری دارد. به‌منظور بررسی عملکرد روش‌های زمین‌آمار و سنجش از دور در مدل‌سازی شاخص‌های کمی جنگل، از منحنی ROC استفاده شد. مقادیر AUC برای مدل‌های مورد ارزیابی با توجه به داده‌های اعتبارسنجی برای شاخص درصد تاج‌پوشش با الگوریتم جنگل تصادفی (۰/۹۴۳)،

جدول ۹- بررسی و مدل سازی درصد تاج پوشش با استفاده از شاخص IGR

Table 9. Investigation and modeling of the canopy percentage using the IGR index

اهمیت v	(داده ها) Data	اهمیت v	(داده ها) Data
0.77	باند 3 Band3	2.03	NDVI
0.75	باند 7 Band7	1.9	SAVI
0.74	PCA-1	1.8	MNLI
0.74	Brightness روشنایی	1.66	OSAVI
0.68	GRVI	1.63	Greenness سبزینگی
0.68	GNDVI	1.61	PCA-2
0.56	باند 6 Band6	1.41	EVI
0.54	RVI	1.41	LAI
0.54	IPVI	1.19	DVI
0.53	باند 2 Band 2	1.18	GDVI
0.48	باند 4 Band 4	1.1	باند 5 Band 5
0.35	Wetness رطوبت	1.05	GARI
		0.92	ARVI

جدول ۱۰- بررسی و مدل سازی زی توده روزمینی با استفاده از شاخص IGR

Table 10. Investigation and modeling of aboveground biomass using the IGR index

اهمیت v	(داده ها) Data	اهمیت v	(داده ها) Data
0.41	ARVI	00.65	NDVI
0.16	Brightness روشنایی	0.62	OSAVI
0.26	PCA-1	0.61	SAVI
0.33	باند 7 Band7	0.58	Greenness سبزینگی
0.42	GNDVI	0.47	PCA-2
0.42	GRVI	0.58	MNLI
0.3	باند 3 Band 3	0.56	EVI
0.33	باند 4 Band4	0.56	LAI
0.22	RVI	0.45	GDVI
0.23	IPVI	0.42	DVI
		0.41	GARI
		0.32	باند 5 Band 5

جدول ۱۱- اعتبارسنجی الگوریتمها در برآورد درصد تاج پوشش و زی توده بر اساس معیارهای آماری و داده های اعتبارسنجی

Table 11. Validation of algorithms in estimating the canopy percentage & biomass based on statistical criteria and validation data

Bias% اریبی %	Bias اریبی	RMSE%	RMSE میانگین مربعات خطا	مدل Model	شاخص کمی Quantitative indicators
21.9	1.8	25.5	16.1	SVM	درصد تاج پوشش Canopy%
17.1	11.3	19.7	13.01	ماشین بردار پشتیبان RF	
23.4	15.5	29.3	19.5	جنگل تصادفی	
8.8	23.2	55.6	146.5	زمین آمار (کریجینگ) SVM	زی توده (تن در هکتار) Biomass
7.8	20.9	54.2	144.2	ماشین بردار پشتیبان RF	
-17.9	-62.8	54.8	191.8	جنگل تصادفی	
				زمین آمار (کریجینگ)	

مناسب ترین مدل برای پارامتر درصد تاج پوشش انتخاب شد. کمترین همبستگی بین شاخص های کمی جنگل با باندهای اصلی مشاهده شد. راهداری و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه خود نشان دادند که شاخص گیاهی SAVI دارای بیشترین همبستگی با تاج پوشش گیاهی معادل ۰/۷۸ بود (Rahdari-

مطابق با نتایج این پژوهش، بین درصد تاج پوشش با بیش از ۸۰ درصد متغیرهای مورد مطالعه ارتباط و همبستگی معنادار مشاهده شد. بیشترین ارتباط و همبستگی معنی دار بین درصد تاج پوشش با متغیرهای NDVI و OSAVI مشاهده شد. در این تحقیق، مدل کروی روش درون یابی کریجینگ به عنوان

داشتند. وفایی و همکاران در تحقیقی که در جنگل‌های شمال کشور انجام دادند اذعان داشتند که روش سنجش از دور نسبت به زمین آمار دارای میانگین مجذور خطای مربعات کمتری بود (Vafaei et al., 2022). مقایسه مطالعه حاضر با مطالعات یادشده حاکی از برتری داده‌های لندست ۹ و الگوریتم جنگل تصادفی است و به‌طور خلاصه پتانسیل بالای این داده‌ها و الگوریتم را در تهیه اطلاعات دقیق و به‌هنگام از مشخصه‌های جنگلی اشاره‌شده برای مدیریت بهتر این جنگل‌کاری‌های مهم بیان می‌دارد. نتایج نشان دادند که از نظر نمونه‌های آموزشی، مدل جنگل تصادفی نسبت به مدل ماشین بردار دارای صحت بالاتری بود. مقادیر شاخص حساسیت در مدل‌های مد نظر به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۸۳ بودند به این معنی که مدل جنگل تصادفی قادر است ۹۲ درصد از پیکسل‌ها را به‌درستی طبقه‌بندی کند، که این موضوع می‌تواند به‌عنوان یک مزیت در استفاده از این مدل برای تحلیل داده‌ها در نظر گرفته شود. مقدار AUC نقشه درصد تاج‌پوشش بر اساس مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در یک محدوده قرار داشت، بنا بر این، هر دو مدل عملکرد مناسبی را در مدل‌سازی متغیر درصد تاج‌پوشش جنگل داشتند (جدول ۱۲).

(Sufianian et al., 2012). در تحقیق هیوالی و همکاران (Hualei et al., 2017)، شاخص NDVI به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای مشاهدات طولانی‌مدت و نزدیک به سطح برای نظارت بر توسعه تاج‌پوشش توصیه شد. بین زی‌توده (تن در هکتار) با تمامی متغیرها به‌جز باندهای ۲، ۳، و ۷ و شاخص‌های Wetness همبستگی معنادار مشاهده شد. بیشترین همبستگی معنی‌دار به‌ترتیب بین زی‌توده (تن در هکتار) و متغیرهای NDVI و SAVI مشاهده شد. در تحقیق قنبری و همکاران (۲۰۲۰)، شاخص NDVI در سطح تمامی مناطق بیشترین سطح معنی‌داری و بالاترین ضریب همبستگی با زی‌توده روزمینی را داشت که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد (Ghanbari-Motlaq et al., 2019). در تحقیق ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2014) جهت برآورد زی‌توده در جنگل‌های پهن‌برگ در ایالت ویسکانسین، زی‌توده جنگل‌های سوزنی‌برگ رابطه قوی با شاخص NDVI داشت که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد و نشان‌دهنده اعتبار و قابلیت اطمینان این شاخص‌ها در برآورد زی‌توده در جنگل‌ها است. نتایج (IGR) و شاخص میانگین شایستگی نشان دادند که متغیرهای NDVI، SAVI و MNLI نسبت به سایر متغیرها بیشترین تاثیر را بر پیش‌بینی تاج‌پوشش و زی‌توده جنگل

جدول ۱۲- مقادیر AUC متغیرهای کمی بر اساس مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان و زمین‌آمار (کریجینگ)
Table 12. AUC values of quantitative variables based on RF and SVM models and geostatistics (kriging)

داده‌های اعتبارسنجی Validation data	مدل model	شاخص کمی Quantitative index	ردیف
0.938	ماشین بردار پشتیبان SVM	درصد تاج پوشش Canopy%	1
0.943	جنگل تصادفی RF		2
0.717	زمین‌آمار (کریجینگ) SVM		3
0.938	ماشین بردار پشتیبان RF	میزان زی‌توده Biomass	4
0.943	جنگل تصادفی RF		5
0.769	زمین‌آمار (کریجینگ) SVM		6

اطلاعات دقیق و به‌هنگام از مشخصه‌های جنگلی اشاره شده برای مدیریت بهتر این جنگل‌کاری‌های مهم بیان می‌دارد؛ این موضوع به‌ویژه در شرایطی که منابع انسانی و مالی محدود هستند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. روش‌های مورد استفاده و نتایج تحقیقات را می‌توان در سایر حوزه‌ها برای تخمین زی‌توده و تاج‌پوشش به‌کار برد، اما نتایج و نتیجه‌گیری‌ها ممکن است به‌دلیل شرایط منطقه‌ای متفاوت باشند.

نتیجه‌گیری کلی

کاهش سطح جنگل‌های طبیعی در نتیجه عوامل مختلف سبب شده است که جنگل‌کاری با هدف توسعه سطح جنگل و تولید چوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شود. استفاده از روش‌های زمین‌آمار و سنجش از دور در مدیریت و برنامه‌ریزی برای جلوگیری از خسارات بیشتر به این جنگل‌ها می‌تواند مفید باشد. بر اساس نتایج این مطالعه، رویکردهای مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای نسبت به روش‌های زمین‌آمار مبتنی بر داده‌های زمینی دارای عملکرد بهتری هستند. نتایج آزمون همبستگی بین شاخص‌های گیاهی، شاخص تسلدکپ و آنالیز

پژوهش‌های زیادی برتری عملکرد الگوریتم ناپارامتریک جنگل تصادفی را در برآورد مشخصه‌های بیوفیزیکی جنگل در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های ناپارامتریک به‌کار گرفته‌شده تأیید کرده‌اند (Zhang et al., 2014). یکی از دلایل این برتری این است که الگوریتم جنگل تصادفی در مجموعه داده‌های مدل‌سازی کمتر تحت تاثیر نویز قرار می‌گیرد و قابلیت تعمیم‌پذیری زیادی دارد (Zhang et al., 2014). یکی دیگر از دلایل منحصربه‌فرد بودن این الگوریتم این است که در هر گره تقسیم شده به‌جای انتخاب همه متغیرها، آن‌ها را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند و تصادفی بودن درخت رگرسیون به بهبود دقت برآورد این الگوریتم می‌انجامد. همچنین، این الگوریتم همانند برخی دیگر از الگوریتم‌های ناپارامتریک می‌تواند تعداد زیادی متغیر پیش‌بینی‌کننده را استفاده و مدیریت کند و برای تعیین روابط غیرخطی پیچیده بین متغیرها کاربرد دارد، حتی اگر متغیرها با یکدیگر همبستگی زیادی داشته باشند. مقایسه مطالعه حاضر با مطالعات یادشده حاکی از برتری داده‌های لندست ۹ و الگوریتم جنگل تصادفی است و به‌طور خلاصه پتانسیل بالای این داده‌ها و این الگوریتم را در تهیه

بهترین روش برآورد مشخصه های جنگل کاری اقدام کرد و در نهایت، عملیاتی کردن نتایج این تحقیق در آماربرداری جنگل کاری و مقایسه آن با آمار زمینی، مقایسه هزینه ها در سایر مناطق جنگل کاری یا جنگل های شمال کشور صورت گیرد. به طور خلاصه، نتایج این تحقیق تأکید می کنند که استفاده از فناوری های نوین و روش های پیشرفته می تواند به بهبود مدیریت جنگل کاری ها و جلوگیری از خسارات بیشتر به این منابع ارزشمند کمک کند.

مؤلفه اصلی با شاخص درصد تاجپوشش و زی توده نشان می دهند که بیشترین همبستگی بین شاخص های گیاهی و این شاخص های کمی وجود دارد. با توجه به تنوع الگوریتم های یادگیری ماشین، پیشنهاد می شود که از سایر الگوریتم ها نیز به منظور ارزیابی عملکرد آن ها در اندازه گیری شاخص ها و متغیرهای کیفی و کمی جنگل کاری های پیلیمرا در رضوانشهر استفاده شود. همچنین، می توان با بررسی و مقایسه قابلیت تصاویر سنتینل و لندست ۹ با روش های پارامتریک و ناپارامتریک جهت یافتن بهترین داده های تصویری رایگان و

References

- Brockerhoff, E. G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D. I., Gardiner, B., González-Olabarria, J. R., ... & Jactel, H. (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 26(13), 3005-3035. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2>
- Brown, S., Gillespie, A. J. R., & Lugo, A. E. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 5, 881-902. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/forestscience/35.4.881>
- Cole-Thomas, G., & Ewel-John, J. (2006). Allometric equations for four valuable tropical tree species Forest Ecology and Management. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3), 351-360. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.04.017>
- Fugen, J., Sun, H., Erxue, C., Tianhong, W., Yalingand, C., & Qingwang, L. (2022). Above-Ground Biomass Estimation for Coniferous Forests in Northern China Using Regression Kriging and Landsat 9 Images. *Remote Sensing*, 14(22), 574. <https://doi.org/10.3390/rs14225734>
- Ganz, S., Adler, P., & Kändler, G. (2020). Forest cover mapping based on a combination of aerial images and Sentinel-2 satellite data compared to National Forest Inventory data. *Forests*, 11(12), 1322. <https://doi.org/10.3390/f11121322>
- Ghanbari-Motlaq, M., Babaei-Kafaki, S., Mataji, A., & Akhwan, R. (2019). Estimation of above ground biomass in Hyrcanian forest using satellite data. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(5). <https://doi.org/10.22034/JEST.2020.36440.4305>
- Gheysarbeigi, S., Pir-Bavaghar, M., & Valipour, A. (2024). Forest Aboveground Biomass Estimation Using Satellite Imagery and Random Forest Regression Model. *Geography and Environmental Sustainability*, 14(1), 85-100. <https://doi.org/10.22126/GES.2024.9971.27150>
- Haidari, M., Matiniazadeh, M., Pourhashemi, M., Nouri, E., & Bagheri-Delijani, N. (2024). Investigating changes in the physical and chemical characteristics of soil in control and dieback stands in Marivan county, Kurdistan province in Iran. *Forest Research and Development*, 10(1), 95-111. <https://doi.org/10.30466/jfrd.2024.55002.1703>
- Hassan, A., & Mohammadi, J. (2024). Estimation of aboveground biomass of Arabdagh reforested stands, Golestan province using Sentinel-2 satellite data. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 30(40), 93-110. <https://doi.org/10.22069/JWFST.2024.21807.2039>
- Hosseini, S., Sarikhani, N. E., & Soleimani, K. (2003). Investigation of effective factors in routing forest roads using geographic information system (case study of Khairud-Kanar Nowshahr forest). *Iranian Journal of Natural Resources*, 57(1), 47-59. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2006.2055.2061> [In Persian]
- Hualei, Y., Yang, X., Heskell, M., Sun, S., & Tang, J. (2017). Seasonal variations of leaf and canopy properties tracked by ground-based NDVI imagery in a temperate forest. *Scientific Reports*, 7(1), 1267 ref. 64. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01260-y>
- Li, Y., Li, C., Li, M., & Liu, Z. (2019). Influence of Variable Selection and Forest Type on Forest Aboveground Biomass Estimation Using Machine Learning Algorithms. *Forests*, 10, 1073. <https://doi.org/10.3390/f10121073>
- MacDicken, K. G. (2015). Global forest resources assessment 2015: what, why and how? *Forest Ecology and Management*, 352(7), 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.006>
- Miri, N., & Darvish-Sefat, A. A. (2021). Estimation of canopy cover of Zagros forests using OLI sensor data of Landsat 8 satellite. *Ecology of Iran's Forests*, 9(17), 196-206. <https://doi.org/https://sid.ir/paper391604/fa>
- Mirrajabi, H., Oladi, J., & Mataji, A. (2016). Estimating above Ground Carbon Storage in Urban Afforestation Using Satellite Data (Case Study: Chitgar Forest Park in Tehran. *Ecology of Iranian Forest*, 4(7), 35-42. <http://ifej.sanru.ac.ir/article-1-223-fa.html> [In Persian]
- Ohman, J. L., Gregory, M. J., & Robets, H. M. (2014). Scale considerations for integrating forest inventory plot data and satellite image data for regional forest mapping, remote sensing of environment. *Remote Sensing of Environment*, 151, 3-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.048>

- Rahdari-Sufianian, A., Khaledin, S., & Jaddin, M.-N., S. (2012). Investigating the capability of satellite data in preparing a map of vegetation canopy percentage in arid and semi-arid areas (case study of Mote Wildlife Sanctuary). *Environmental Science and Technology*, 15(4 (series 59), 43-54. <https://doi.org/https://sid.ir/paper/87267/fa>
- Rezaei-Sangdehi, S. M., Fallah, A., Oladi, J., & Latifi, H. (2022). The Modeling of Some Quantitative Characteristics Forest Using Topographic Features Stands (Case Study: District-3 of Sangdeh Forests). *Ecology of Iranian Forest*, 10(19), 88-98. <https://doi.org/10.52547/ifej.10.19.88> [In Persian]
- 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://www.sid.ir/fileservers/jf/692140111606.pdf>
- Xie, Y., Chen, T. B., Lei, M., Yang, J., Guo, Q. J., Song, B., & Zhou, X. Y. (2011). Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. *Chemosphere*, 82, 468-476. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.053>
- Zhang, G., Ganguly, S., Nemani, R., White, M., Milesi, C., Hashimoto, H., . . . & Myneni, R. (2014). Estimation of forest aboveground biomass in California using canopy height and leaf area index estimated from satellite data. *Journal Remote Sensing of Environment*, 151, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.025>
- Zobeiri, M. (2010). *Vector statistics in the forest*. Tehran University Publications.