



Research Paper

Modeling the Leaf Area Index Based on Structural Characteristics and Machine Learning Algorithms in Northern Zagros Forests: A Case Study of Marivan, Kurdistan

Saywan NikKhah¹, Hassan Pourbabaei² , and Seyed Mohsen Hosseini³

1- Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Professor, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Rasht, Iran,

(Corresponding author: hpourbabaei@guilan.ac.ir)

3- Professor, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Received: 10 June, 2025

Revised: 20 October, 2025

Accepted: 30 November, 2025

Extended Abstract

Background: The Zagros forests play a vital role in climate regulation, biodiversity conservation, and carbon sequestration. The Zagros forests, covering approximately five million hectares, as one of the most valuable forest ecosystems in Iran, play an important role in mitigating the impacts of global warming and in soil conservation. The Leaf Area Index (LAI), as one of the most crucial ecological indicators, reflects the productive capacity of forest ecosystems and is essential for modeling photosynthesis, carbon cycle, and evapotranspiration processes. Leaf Area Index (LAI), as one of the most critical ecological indicators, reflects the productive capacity of forest ecosystems, and is applied in modeling the processes of photosynthesis, carbon cycling, and evapotranspiration. Given the challenges of direct LAI measurement, employing non-destructive machine learning-based methods for LAI estimation becomes imperative. This study aimed to model LAI based on tree structural characteristics (including diameter at breast height [DBH], tree height, and canopy cover percentage) using machine learning algorithms in the northern Zagros forests (the Marivan region, Kurdistan Province). The research seeks to provide an accurate and cost-effective solution for monitoring ecosystem changes and sustainable forest management.

Methods: The study was conducted in the northern Zagros forests (Marivan County) characterized by cold and semi-humid climate. Field data were collected from 80 systematically randomized square plots (20×20 m). In each plot, structural characteristics, including DBH, tree height, canopy cover percentage, and LAI, were measured using hemispherical photography and Gap Light Analyzer (GLA) software. In each sample plot, five microplots (1 m²) were established. The herbaceous cover survey was conducted during the growing season, when most plant species had reached full growth. In each microplot, herbaceous species were identified, and their percentage cover was visually estimated using the Van Der Marel criterion. Aboveground biomass (AGB) was estimated using a polynomial regression model with DBH as the independent variable. In this study, four machine learning algorithms namely Random Forest (RF), K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machine (SVM), and Gaussian Process Regression (GPR) were compared to select the most appropriate algorithm for investigating the relationship between Leaf Area Index (LAI) and forest stand-related variables. In the RF model, 500 trees were considered for the number of trees parameter (ntree), and two features were selected for the number of features considered at each split (mtry). The KNN model was implemented with seven neighbors and sample weighting using a Gaussian kernel function, and the distance between samples was calculated using the Euclidean distance metric. The SVM model was implemented using a radial basis function, with its optimized parameters set to gamma=0.01, epsilon=0.1, and cost coefficient C=1. Furthermore, the GPR model was developed using a Gaussian kernel function. All models were implemented in the R programming language using the random Forest, kkn, e1071, and kernlab packages, respectively. The dataset was divided into training (70%) and validation (30%) subsets, with model performance evaluated using the coefficient of determination (R²), root mean square error (RMSE), relative RMSE (rRMSE), and mean absolute error (MAE).

Results: LAI values in the study area ranged from 0.151 to 4.623, indicating high vegetation density variability. LAI showed a very strong correlation with canopy cover percentage ($r = 0.92$), and moderate correlations with DBH ($r = 0.70$) and tree height ($r = 0.78$). Aboveground biomass demonstrated moderate correlation with LAI ($r = 0.64$). Among the machine learning algorithms,



RF achieved the highest accuracy ($R^2 = 0.96$ in training, $R^2 = 0.90$ in validation) and was identified as the optimal model. GPR and KNN algorithms performed similarly ($R^2 = 0.91$), followed by SVM ($R^2 = 0.88$). The correlation matrix confirmed the strong influence of structural characteristics on LAI, while the Shannon-Wiener diversity index showed weak correlation with the other variables.

Conclusion: This study demonstrates that the RF algorithm, with its capability to model complex nonlinear relationships, serves as an effective tool for indirect LAI estimation in Zagros forests. The strong correlation between LAI and both canopy cover and structural tree characteristics enables the use of these variables as physical proxies for leaf density. From the perspective of natural resource management and conservation of the Zagros forests, this research is of great importance. Accurate modeling of the Leaf Area Index and understanding its relationship with structural characteristics can contribute to monitoring changes in forest ecosystems, assessing the impacts of climate change, and designing sustainable management programs. Furthermore, this index can serve as a sensitive indicator for identifying environmental stresses and damages caused by biotic agents. The findings provide a scientific basis for the sustainable management planning of Zagros forests, climate change monitoring, and environmental stress assessment. Future studies should consider integrating remote sensing data with deep learning approaches to enhance model accuracy. This research represents a significant step toward conserving the valuable Zagros ecosystems and promoting evidence-based decision-making.

Keywords: Aboveground Biomass, Forest monitoring, Hemispherical Photography, Random Forest

How to Cite This Article: NikKhah, S., Pourbabaei, H., & Hosseini, S. M. (2026). Modeling the Leaf Area Index Based on Structural Characteristics and Machine Learning Algorithms in Northern Zagros Forests: A Case Study of Marivan, Kurdistan. *Ecol Iran For*, 14(1), 16-28. DOI: 10.61882/ifej.2026.592



مقاله پژوهشی

مدل‌سازی شاخص سطح برگ بر اساس مشخصه‌های ساختاری و الگوریتم‌های یادگیری ماشینی در جنگل‌های زاگرس شمالی، مطالعه موردی: مریوان، کردستان

سیوان نیکخواه^۱، حسن پوربابایی^۲ و سید محسن حسینی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
 ۲- استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، (نویسنده مسوول: hpourbabaei@guilan.ac.ir)
 ۳- استاد، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸
صفحه ۱۶ تا ۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

چکیده مسوط

مقدمه و هدف: جنگل‌های زاگرس نقش حیاتی در تعدیل آب و هوا، حفظ تنوع زیستی و ذخیره کربن ایفا می‌کنند. در این میان، جنگل‌های زاگرس با سطح حدود پنج میلیون هکتار به‌عنوان یکی از ارزشمندترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران، سهم بسزایی در کاهش پیامدهای گرمایش جهانی و حفاظت خاک دارند. شاخص سطح برگ به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین شاخص‌های بوم‌شناختی، توان تولیدی اکوسیستم‌های جنگلی را بازتاب می‌دهد و در مدل‌سازی فرآیندهای فتوسنتز، چرخه کربن و تبخیر و تعرق کاربرد دارد. شاخص سطح برگ به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین شاخص‌های بوم‌شناختی، توان تولیدی اکوسیستم‌های جنگلی را بازتاب می‌دهد و در مدل‌سازی فرآیندهای فتوسنتز، چرخه کربن و تبخیر و تعرق کاربرد دارد. با توجه به چالش‌های اندازه‌گیری مستقیم شاخص سطح برگ، استفاده از روش‌های غیر مخرب و مبتنی بر یادگیری ماشینی برای برآورد این شاخص ضروری است. هدف این مطالعه، مدل‌سازی شاخص سطح برگ بر اساس ویژگی‌های ساختاری درختان (مانند قطر برابر سینه، ارتفاع و درصد تاج‌پوشش) با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی در جنگل‌های زاگرس شمالی (منطقه مریوان، استان کردستان) بود. این پژوهش به‌دنبال ارائه راهکاری دقیق و کم‌هزینه برای پایش تغییرات اکوسیستمی و مدیریت پایدار جنگل‌ها است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه در جنگل‌های زاگرس شمالی (شهرستان مریوان) با آب‌وهوای سرد و نیمه‌مرطوب انجام شد. داده‌های میدانی از ۸۰ قطعه نمونه مربعی (۲۰×۲۰ متر) به‌روش منظم تصادفی جمع‌آوری گردیدند. در هر قطعه، مشخصه‌های ساختاری شامل قطر برابر سینه، ارتفاع درختان، درصد تاج‌پوشش و شاخص سطح برگ با استفاده از تکنیک عکس‌برداری نیم‌کره‌ای و نرم‌افزار Gap Light Analyzer (GLA) اندازه‌گیری شدند. در هر قطعه نمونه، پنج میکرو پلات یک متر مربعی ایجاد شد. آماربرداری پوشش علفی در فصل رویش، زمانی که اکثر گونه‌های گیاهی به رشد کامل رسیدند، انجام گرفت. در هر میکرو پلات، گونه‌های علفی شناسایی و درصد پوشش آن‌ها به‌صورت چشمی با استفاده از معیار وان درمارل برآورد شد. برای برآورد زی‌توده روی زمین از مدل رگرسیونی چند جمله‌ای با متغیر مستقل قطر برابر سینه استفاده شد. در این پژوهش، به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین الگوریتم برای بررسی ارتباط بین شاخص سطح برگ و متغیرهای مرتبط با توده جنگلی، چهار الگوریتم یادگیری ماشینی، شامل الگوریتم جنگل تصادفی (RF)، نزدیک‌ترین همسایه (KNN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) مورد مقایسه قرار گرفتند. در مدل RF، ۵۰۰ درخت برای پارامتر تعداد درختان (ntree) و برای مشخصه تعداد ویژگی انتخاب شده برای هر درخت (mtry) تعداد دو ویژگی در نظر گرفته شدند. مدل KNN با تعداد هفت همسایه و وزن‌دهی نمونه‌ها از طریق تابع هسته گاوسی پیاده‌سازی شد و فاصله بین نمونه‌ها با معیار فاصله اقلیدسی محاسبه گردید. مدل SVM با استفاده از تابع پایه شعاعی اجرا شد و پارامترهای بهینه‌شده آن شامل $\epsilon = 0.1$, $\gamma = 0.01$ و ضریب هزینه $C = 1$ تعیین شدند. همچنین، مدل GPR با به‌کارگیری تابع هسته گاوسی توسعه یافت. تمام مدل‌ها به‌ترتیب با استفاده از بسته‌های randomForest، kkn، e1071 و kernlab در زبان برنامه‌نویسی R پیاده‌سازی شدند. داده‌ها به دو بخش آموزشی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شدند و عملکرد مدل‌ها با معیارهای ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نسبی و میانگین قدر مطلق خطا ارزیابی گردید.

یافته‌ها: مقادیر شاخص سطح برگ در منطقه مورد مطالعه بین ۰/۱۵۱ تا ۴/۶۲۳ متغیر بودند که نشان‌دهنده تنوع بالای تراکم پوشش گیاهی است. همچنین، تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد که تاج‌پوشش با بیشترین سهم (۳۵ درصد) و شاخص تنوع شانون با کمترین تأثیر (کمتر از ۵ درصد) در پیش‌بینی شاخص سطح برگ نقش داشتند. همبستگی شاخص سطح برگ با درصد تاج‌پوشش بسیار قوی ($r = 0.92$) و با قطر برابر سینه و ارتفاع درختان ۰/۷۰ بود. زی‌توده روی زمین نیز همبستگی متوسطی ($r = 0.64$) را با شاخص سطح برگ نشان داد. در میان الگوریتم‌های یادگیری ماشینی، جنگل تصادفی با بالاترین دقت در داده‌های آموزشی و $R^2 = 0.96$ در اعتبارسنجی به‌عنوان بهترین مدل شناسایی شد. الگوریتم‌های رگرسیون فرایند گاوسی و نزدیک‌ترین همسایه با $R^2 = 0.91$ و ماشین بردار پشتیبان با $R^2 = 0.88$ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. ماتریس همبستگی تأثیر قوی ویژگی‌های ساختاری بر شاخص سطح برگ را تأیید کرد، در حالی که شاخص تنوع گونه‌های شانون-وینر ارتباط ضعیفی با سایر متغیرها داشت.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان می‌دهد که الگوریتم جنگل تصادفی با توجه به توانایی در مدل‌سازی روابط غیر خطی و پیچیده، ابزاری کارآمد برای برآورد غیر مستقیم شاخص سطح برگ در جنگل‌های زاگرس است. همبستگی قوی شاخص سطح برگ با تاج‌پوشش و ویژگی‌های ساختاری درختان، امکان استفاده از این متغیرها را به‌عنوان نماینده‌های فیزیکی تراکم برگ‌ها فراهم می‌کند. از منظر مدیریت منابع طبیعی و حفاظت جنگل‌های زاگرس، این پژوهش اهمیت بالایی دارد. مدل‌سازی دقیق شاخص سطح برگ و شناخت ارتباط آن با ویژگی‌های ساختاری می‌تواند به پایش تغییرات اکوسیستم‌های جنگلی، ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و طراحی برنامه‌های مدیریت پایدار کمک کند. همچنین، این شاخص می‌تواند به‌عنوان یک نامگر حساس در شناسایی تنش‌های محیطی و آسیب‌های ناشی از عوامل زیستی مورد استفاده قرار گیرد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی برای برنامه‌ریزی مدیریت پایدار جنگل‌های زاگرس، پایش تغییرات اقلیمی و ارزیابی تنش‌های محیطی مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از ترکیب داده‌های سنجنش از دور و یادگیری عمیق برای بهبود دقت مدل‌ها استفاده شود. این پژوهش گامی مؤثر در جهت حفظ اکوسیستم‌های ارزشمند زاگرس و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد است.

واژه‌های کلیدی: پایش جنگل، جنگل تصادفی، زی‌توده روی زمین، عکاسی نیم‌کره‌ای

مقدمه

می‌شوند و نقش حیاتی را در تنظیم چرخه‌های آب‌وهوایی، تعدیل تغییرات اقلیمی، کاهش پدیده گرمایش جهانی و حفاظت از منابع خاک ایفا می‌کنند (Sarvazad & Fallah, 2023). در

جنگل‌ها با پوشش تقریبی یک‌سوم از مساحت خشکی‌های کره زمین، از مهم‌ترین اجزای زیست‌بوم‌های طبیعی محسوب

این میان، جنگل‌های زاگرس با سطح حدود پنج میلیون هکتار به‌عنوان یکی از ارزشمندترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران، سهم بسزایی در کاهش پیامدهای گرمایش جهانی و حفاظت خاک دارند (Marvie Mohadjer, 2011). با این حال، امروزه شاهد کاهش چشم‌گیر شاخص‌های کمی و کیفی در جنگل‌ها هستیم؛ پدیده‌ای که حتی به‌صورت ملموس قابل مشاهده است. این وضعیت، ضرورت برنامه‌ریزی اصولی مبتنی بر مبانی بوم‌شناختی را برای مدیران و کارشناسان عرصه‌های جنگلی بیش از پیش آشکار می‌کند. برای ارزیابی دقیق وضعیت اکوسیستم‌ها و پایش تغییرات زمانی در ساختار و عملکرد آن‌ها، استفاده از شاخص‌های بوم‌شناختی کلیدی به‌عنوان رویکردی ضروری و متداول در مدیریت پایدار جنگل‌ها مورد تأکید قرار گرفته است (Da Silva et al., 2020). برای ارزیابی و کمی‌سازی اثرات تغییر اقلیم و پایش روند آن، دستیابی به داده‌هایی از مشخصه‌های کلیدی، مانند شاخص سطح برگ ضروری است. این شاخص امکان سنجش دقیق میزان تغییرات اکوسیستمی را فراهم می‌کند. ویژگی‌های کمی ساختار توده‌های جنگلی، از جمله شاخص سطح برگ، نه تنها از متغیرهای اصلی در چرخه کربن محسوب می‌شوند، بلکه به‌عنوان پارامترهای اساسی در مدل‌سازی اقلیمی نیز کاربرد دارند. بررسی شاخص‌های کمی ساختار توده‌های جنگلی (مانند شاخص سطح برگ) به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا تغییرات این عوامل را تحت شرایط محیطی مختلف پیش‌بینی کنند. چنین تحلیلی می‌تواند به درک بهتر تأثیرپذیری اکوسیستم‌های جنگلی از تغییرات اقلیمی کمک شایانی کند (Wilby & Dawson, 2013). از طرف دیگر، مهم‌ترین مشخصه‌های ساختاری و فیزیولوژیکی در اکوسیستم‌های جنگلی شاخص سطح برگ است زیرا می‌تواند اطلاعات بسیار مهمی از پویایی جنگل و فرایندهای محیطی، مانند مدل‌سازی برای فتوسنتز و تبخیر و تعرق تاج‌پوشش، کنترل تبادل گاز و افزایش کربن و تولید ناخالص اولیه اکوسیستم را ارائه دهد (Persson, 2014).

این شاخص سطح برگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای زیست‌فیزیکی در ارزیابی عملکرد و ساختار اکوسیستم‌های جنگلی است. این شاخص نشان‌دهنده نسبت مساحت برگ‌های موجود در یک واحد سطح جنگل به مساحت کل زمین زیر پوشش است و نقش کلیدی در مدل‌سازی فرایندهای فتوسنتز، چرخه کربن و تبخیر و تعرق دارد. برآورد دقیق شاخص سطح برگ برای نظارت و مدیریت پایدار جنگل‌ها ضروری است و می‌تواند بازتابی از واکنش پوشش گیاهی به تغییرات محیطی و نشانه‌ای از تنش‌های اکولوژیکی مانند اثر عوامل محیطی و آسیب حشرات باشد (Kang et al., 2021; Arias et al., 2007; Zheng & Moskal, 2009).

روش‌های اندازه‌گیری این شاخص متفاوت هستند و در مقیاس‌های مختلف از سطح تک‌درخت تا توده جنگلی تعریف می‌شوند. اهمیت این شاخص در مطالعات بوم‌شناختی و ارزیابی استراتژیک جنگل‌ها باعث شده است که توجه ویژه‌ای به آن معطوف شود. روش‌های تعیین شاخص سطح برگ به دو دسته کلی مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می‌شوند (Jonckheere et al., 2004). روش‌های مستقیم، اگرچه دقیق هستند، اما زمان‌بر و مخرب هستند و امکان اندازه‌گیری مداوم را فراهم نمی‌کنند. در مقابل، روش‌های غیر مستقیم به‌عنوان راهکاری سریع و کم‌هزینه برای برآورد شاخص سطح برگ و تراکم تاج‌پوشش مطرح شده‌اند (Fang et al., 2019; Yan et al., 2019). با توجه به تغییرپذیری تاج پوشش، اندازه‌گیری شاخص سطح برگ چالش‌برانگیز است و در این زمینه، مدل‌های یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری کارآمد برای برآورد غیر مستقیم شاخص سطح برگ پیشنهاد شده‌اند (Liu et al., 2021). این الگوریتم‌ها با استفاده از تشخیص الگو، روابط پیچیده بین متغیرهای ورودی و خروجی را مدل‌سازی می‌کنند و به‌ویژه در تحلیل داده‌های غیر خطی و با ساختار پیچیده عملکرد مناسبی دارند (Liu et al., 2021; Chen et al., 2021).

مطالعات متعددی در ایران و سایر کشورها به بررسی ارتباط میان شاخص سطح برگ و ویژگی‌های کمی درختان پرداخته‌اند. برای مثال، پناهی و همکاران (Panahi et al., 2013) در جنگل‌های شهری سنندج دریافتند که قطر برابر سینه دارای بیشترین همبستگی با شاخص سطح برگ بود (ضریب تبیین ۰/۷۲). در پژوهشی دیگر بر روی گونه بلوط مازودار (*Quercus libani*) در منطقه خلخال، بابایی کافکایی و همکاران (Babaei Kafkai et al., 2009) نشان دادند که قطر و ارتفاع درختان به‌ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۲۵ و ۰/۲۸ با شاخص سطح برگ رابطه داشتند. در مطالعات بین‌المللی نیز اهمیت ویژگی‌های ساختاری در برآورد شاخص سطح برگ مورد تأکید قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه، تیان و همکاران (Tian et al., 2021) و مکدائول و همکاران (McDowell et al., 2002) نقش تعیین‌کننده ارتفاع درختان را گزارش کردند، در حالی که چاترودی و همکاران (Chaturvedi et al., 2017) و توبین و همکاران (Tobin et al., 2006) بر اهمیت قطر برابر سینه و مساحت تاج پوشش در این زمینه تأکید داشتند. در پژوهشی دیگر، ژای و همکاران (Zhai et al., 2023) از فناوری لیدار برای برآورد مؤثر شاخص سطح برگ در جنگل‌های شهری استفاده کردند و نتایج موفقیت‌آمیزی به‌دست آوردند. همچنین، آریاس و همکاران (Arias et al., 2007) در کشور کاستاریکا نشان دادند که شاخص سطح برگ ارتباط معنی‌داری با ارتفاع غالب و حجم سرپای درختان داشت. به‌طور کلی، یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهند که انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده برای مدل‌سازی شاخص سطح برگ تا حد زیادی به شرایط بوم‌شناختی، نوع پوشش گیاهی و ساختار توده‌های جنگلی بستگی دارد. روش‌های سنجش از دور، به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های لیدار، به‌عنوان رویکردی رایج و مؤثر برای برآورد شاخص سطح برگ در مقیاس‌های وسیع شناخته شده‌اند و با الگوریتم‌های یادگیری ماشین تلفیق می‌شوند (Miri et al., 2024). با این وجود، داده‌های میدانی دقیق، هسته مرکزی و پایه اعتبارسنجی این مدل‌ها محسوب می‌شوند. هدف این مطالعه، توسعه یک مدل پایه با دقت بالا در سطح محلی بر اساس اندازه‌گیری‌های مستقیم بود. این رویکرد با تمرکز بر دقت جزئیات ساختاری جنگل، اجتناب از عدم قطعیت‌های ناشی از پوشش ابر در تصاویر نوری و

با ویژگی‌های ساختاری جنگل و عوامل توپوگرافی از طریق روش‌های مدل‌سازی پیشرفته می‌تواند به درک بهتر وضعیت کنونی و پیش‌بینی تغییرات آتی کمک کند. بنا بر این، یافته‌های این پژوهش می‌توانند پایه‌ای علمی را برای مدیریت پایدار جنگل‌های زاگرس فراهم کنند و به طراحی برنامه‌های پیش و حفاظتی برای گونه‌های بومی منجر شود. این مطالعه نه تنها گامی اساسی در راستای حفظ این اکوسیستم ارزشمند است، بلکه می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی در اتخاذ تصمیمات مبتنی بر شواهد کمک کند.

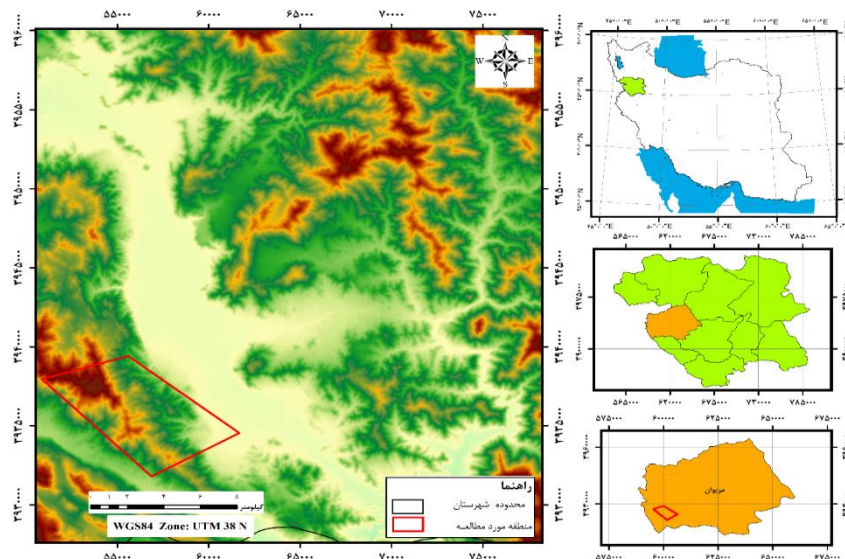
مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در جنگل‌های شهرستان مریوان، که بخشی از جنگل‌های زاگرس شمالی در استان کردستان محسوب می‌شود، انجام شد. منطقه مورد مطالعه در حوضه‌های آبریز سیروان و رزاب واقع شده است. شهرستان مریوان در ۱۲۵ کیلومتری شمال غرب سنندج قرار دارد.

منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوای سرد و نیمه‌مرطوب با تابستان‌های خشک است. بارش‌ها عمدتاً تحت تأثیر جبهه‌های هوای مدیترانه‌ای است و بیشتر در اواخر زمستان و بهار رخ می‌دهد. میانگین دمای سالانه ۱۳/۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۹۹۱/۲ میلی‌متر گزارش شدند (Hemmat boland, 2010).

ملاحظات هزینه‌ای داده‌های لیدار با وضوح بسیار بالا، یک چارچوب قوی و قابل اطمینان را برای منطقه فراهم می‌کند. بنابراین، اگرچه سنجش از دور برای تعمیم برآوردها ضروری است، این پژوهش بر ایجاد بنیان محکمی از روابط در سطح زمین متمرکز شده است که می‌تواند مبنای مناسبی برای کالیبراسیون مطالعات سنجش از دوری آتی باشد.

در سال‌های اخیر، تخریب کمی و کیفی جنگل‌های زاگرس به یک چالش جدی محیط زیستی تبدیل شده است، لذا ارزیابی دقیق وضعیت کنونی و تحلیل علمی آن برای تدوین راهبردهای مدیریتی پایدار ضروری است. از طرف دیگر، شاخص سطح برگ به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین شاخص‌های بوم‌شناختی، بیانگر توان تولیدی رویشگاه و پاسخ اکوسیستم به تغییرات محیطی است و در مدل‌های بیوشیمیایی، هیدرولوژیکی و بوم‌شناختی از اهمیت بالایی برخوردار است. در واقع، نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه مدلی پیشرفته و دقیق برای برآورد شاخص سطح برگ جنگل‌های زاگرس شمالی با استفاده از داده‌های میدانی غنی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه الگوریتم جنگل تصادفی، است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر داده‌های سنجش از دور تکیه داشتند، این تحقیق با بهره‌گیری از داده‌های دقیق زمینی و مدل‌سازی غیر خطی توانسته است تا ارتباط میان ویژگی‌های ساختاری درختان (از جمله قطر برابر سینه، ارتفاع و درصد تاج پوشش) با شاخص سطح برگ را با دقت بالاتر و کمترین خطای پیش‌بینی تشخیص دهد. از این رو، بررسی شاخص سطح برگ در ارتباط



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران، استان کردستان، شهرستان مریوان و نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) map
Figure 1. The study area location in Iran, Kurdistan Province, Marivan County, and the digital elevation model (DEM) map

موقعیت جغرافیایی مرکز هر قطعه نمونه با استفاده از دستگاه GPS ثبت شد. در هر قطعه نمونه، شاخص سطح برگ، درصد تاج پوشش و مشخصه‌های درختی شامل قطر برابر سینه با نوار قطرستج و ارتفاع درختان ثبت گردیدند. ارتفاع درختان با میانگین‌گیری از پنج درخت انتخاب‌شده در هر قطعه اندازه‌گیری شد؛ این پنج درخت شامل یک درخت از هر گوشه قطعه و

جمع‌آوری داده‌های میدانی

در این پژوهش، ۸۰ قطعه نمونه مربعی شکل با ابعاد ۲۰×۲۰ متر به روش منظم-تصادفی برداشت شد. فواصل بین قطعه نمونه‌ها به‌صورت ۲۰ متر در جهت شیب و ۴۰ متر عمود بر جهت شیب در نظر گرفته شدند تا پوشش مناسبی از تغییرات توپوگرافی و پوشش گیاهی منطقه حاصل شود.

متغیرهای مورد مطالعه و آمار توصیفی

متغیر وابسته در این پژوهش، شاخص سطح برگ بود. متغیرهای مستقل (پیش‌بین) مورد استفاده در مدل‌سازی شامل مشخصه‌های ساختاری توده (قطر برابر سینه، ارتفاع درختان، درصد تاج پوشش)، زی‌توده روی زمین و شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر بودند. آمار توصیفی این متغیرها که از ۸۰ قطعه نمونه برداشت شد، در جدول ۱ ارائه شده است.

قطرترین درخت در قطعه نمونه بودند. اندازه‌گیری قطر درختان برای درختانی با قطر بالاتر از ۷/۵ سانتی‌متر انجام شد. در هر قطعه نمونه، نه عکس بر اساس طرح نمونه‌برداری خوشه‌ای (شکل ۳) با رعایت شرایط نوری بهینه شامل زمان مناسب (بلافاصله پس از طلوع یا قبل از غروب آفتاب) و شرایط جوی مطلوب (هوای کاملاً ابری در صورت عدم وجود خورشید) برداشت شدند (Darvish-Sefat *et al.*, 2017; Zou *et al.*, 2020).

جدول ۱- مقادیر شاخص سطح برگ و مشخصه‌های کمی به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های زمینی

میانگین \pm انحراف معیار Mean \pm SD	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	مشخصه‌های مورد بررسی Characteristics
2.01 \pm 1.12	4.623	0.151	شاخص سطح برگ Leaf Area Index
54.66 \pm 23.56	94.75	3.4	مساحت تاج پوشش در هکتار (متر مربع) Canopy cover per hectare (m ²)
11.44 \pm 3.48	21.15	4.2	قطر برابر سینه (سانتی‌متر) Diameter (cm)
3.63 \pm 0.1	5.85	1.2	ارتفاع (متر) Height (m)
1.75 \pm 1.06	5.68	0.63	زی‌توده روی زمین در هکتار (کیلوگرم) Aboveground biomass per hectare (kg)
3.38 \pm 0.67	4.32	1.46	شاخص شانون-وینر Shannon-Wiener index

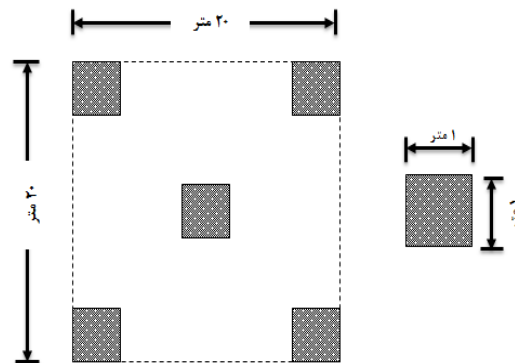
میکروپلات‌ها) تهیه شد. شاخص تنوع شانون-وینر برای هر قطعه نمونه طبق رابطه زیر محاسبه گردید (Ludwig & Reynolds, 1988).

$$H' = - \sum (p_i \times \ln(p_i)) \quad (1)$$

رابطه (۱) که در آن H' (مقدار شاخص شانون-وینر، S (تعداد کل گونه‌ها در قطعه نمونه، p_i (نسبت پوشش گونه، i (به کل پوشش گونه‌های علفی) در آن قطعه نمونه و علامت \sum نشانه مجموع‌گیری از ۱ تا i هستند.

پوشش علفی

در هر قطعه نمونه، پنج میکرو پلات ۱ متر مربعی ایجاد شد (شکل ۲). آماربرداری پوشش علفی در فصل رویش، زمانی که اکثر گونه‌های گیاهی به رشد کامل رسیدند، انجام گرفت. در هر میکروپلات، گونه‌های علفی شناسایی و درصد پوشش آن‌ها به‌صورت چشمی با استفاده از معیار وان درمارل برآورد شد. سپس، فهرستی از گونه‌های علفی هر قطعه نمونه همراه با میانگین درصد پوشش آن‌ها (برای گونه‌های مشترک در



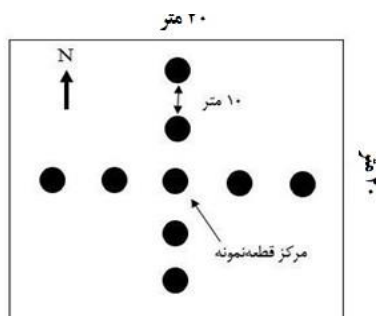
شکل ۲- نمای شماتیک از قطعه نمونه ۴۰۰ متر مربعی و میکروپلات‌ها
Figure 2. Schematic representation of the 400 m² sample plot and microplots

نوری یکنواخت (هوای کاملاً ابری یا در ساعات طلوع و غروب خورشید) و با دوربین در حالت کاملاً تراز (استفاده از تراز حبابی) گرفته شدند.

مراحل پردازش شامل کالیبراسیون تصاویر بر اساس مختصات جغرافیایی، محاسبه شاخص سطح برگ و درصد تاج‌پوشش برای هر تصویر و محاسبه میانگین مقادیر نه تصویر برای هر قطعه نمونه به‌عنوان نماینده پارامترهای مورد مطالعه بودند.

پردازش تصاویر و تحلیل داده‌ها

برای استخراج مقدار شاخص سطح برگ و درصد تاج‌پوشش از تصاویر نیم‌کروی، از نرم‌افزار Gap Light Analyzer نسخه ۲ استفاده شد. کلیه تصاویر با رعایت اصول استاندارد عکس‌برداری نیم‌کروی برداشت شدند: از یک دوربین دیجیتال مجهز به لنز چشم‌ماهی با زاویه ۱۸۰ درجه استفاده گردید. دوربین بر روی یک سه‌پایه و در مرکز هر قطعه نمونه، در ارتفاع ۱ متری از سطح زمین نصب شد. عکس‌ها در شرایط



شکل ۳- موقعیت نقاط عکس‌برداری در قطعه نمونه

Figure 3. Camera positions within the sample plot for hemispherical photography

ویژگی‌های ساختاری (قطر برابر سینه، ارتفاع درختان، درصد تاج‌پوشش) به‌عنوان متغیرهای مستقل یا پیشگو استفاده شد.

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از ۱۸ قطعه نمونه باقی‌مانده استفاده شد. معیارهای ارزیابی عبارتند از:

- ضریب تعیین (R^2) (رابطه ۳)
رابطه (۳)

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

- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۴)
رابطه (۴)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

- جذر میانگین مربعات خطای نسبی (rRMSE) (رابطه ۵)
رابطه (۵)

$$rRMSE = \frac{RMSR}{\bar{y}} \times 100$$

در روابط فوق، y_i : شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده، \hat{y}_i : شاخص سطح برگ برآوردشده، \bar{y} : میانگین شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده داده‌های انتخاب شده برای اعتبارسنجی و n : تعداد قطعه‌نمونه‌های انتخاب شده برای اعتبارسنجی مدل‌ها هستند (Chen *et al.*, 2021).

برای انجام این پژوهش از نرم‌افزار Adobe Photoshop CS5 برای پردازش عکس‌های نیم‌کره‌ای، نرم‌افزار Gap Light Analyzer (GLA) برای محاسبه مقدار شاخص سطح برگ در هر عکس نیم‌کره‌ای و در نهایت مقادیر شاخص سطح برگ هر قطعه‌نمونه، نرم‌افزار ArcGIS 10.8.2 به‌منظور تهیه نقشه رقومی ارتفاع و تهیه نقشه قطعات نمونه زمینی و برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزارهای Microsoft Excel و R CoreTeam استفاده شد.

نتایج و بحث

بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده از ۸۰ قطعه‌نمونه در جنگل‌های زاگرس شمالی (شهرستان مریوان)، مقادیر شاخص سطح برگ و سایر مشخصه‌های کمی توده‌های جنگلی مورد ارزیابی قرار گرفتند. بررسی اهمیت متغیرهای مؤثر در

تجزیه و تحلیل آماری

برآورد زی‌توده با استفاده از روابط آلومتریکی

با توجه به عملکرد مطلوب مدل‌های رگرسیونی در برآورد زی‌توده در مطالعات پیشین (Mahdavi *et al.*, 2024; Sohrabi & Shirvani, 2012; Oyonarte *et al.*, 2003; Sohrabi & Daryaei, 2015; Yousefvand mofrad *et al.*, 2017) در این پژوهش از مدل‌های آلومتریکی توانی برای تخمین زی‌توده در جنگل‌های شاخه‌زاد زاگرس شمالی استفاده شد. متغیر مستقل اصلی در مدل‌سازی، قطر برابر سینه بر حسب سانتی‌متر در نظر گرفته شد. مدل رگرسیونی چند جمله‌ای در رابطه (۲) نمایش داده شده است (Yousefvand Mofrad *et al.*, 2017).

رابطه (۲)

$$Y = 0.7116 DBH^2 - 6.1363DBH + 38.473$$

Y: زی‌توده روی زمین (کیلوگرم) و DBH: قطر برابر سینه (سانتی‌متر)

مدل‌سازی شاخص سطح برگ

در این پژوهش، به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین الگوریتم برای بررسی ارتباط بین شاخص سطح برگ و متغیرهای مرتبط با توده جنگلی، چهار الگوریتم یادگیری ماشینی، شامل الگوریتم جنگل تصادفی^۱ (RF)، نزدیک‌ترین همسایه (KNN)^۲، ماشین‌بردار پشتیبان (SVM)^۳ و رگرسیون فرایند گاوسی (GPR)^۴ مورد مقایسه قرار گرفتند. در مدل RF، ۵۰۰ درخت برای پارامتر تعداد درختان (ntree) و برای مشخصه تعداد ویژگی انتخاب شده برای هر درخت (mtry) تعداد دو ویژگی در نظر گرفته شدند. مدل KNN با تعداد هفت همسایه و وزن‌دهی نمونه‌ها از طریق تابع هسته گاوسی پیاده‌سازی شد و فاصله بین نمونه‌ها با معیار فاصله اقلیدسی محاسبه گردید. مدل SVM با استفاده از تابع پایه شعاعی اجرا شد و پارامترهای بهینه‌شده آن شامل $\epsilon=0.1$, $\gamma=0.01$ و ضریب هزینه $C=1$ تعیین شدند. همچنین، مدل GPR با به‌کارگیری تابع هسته گاوسی توسعه یافت. تمام مدل‌ها به‌ترتیب با استفاده از بسته‌های kernlab، e1071، kknn، randomForest و شتابان زبان برنامه‌نویسی پیاده‌سازی شدند. داده‌های مورد استفاده شامل ۸۰ قطعه نمونه بودند که به‌صورت تصادفی انتخاب شدند (Chen *et al.*, 2021).

³ Support Vector Machine - SVM

⁴ Gaussian Process Regression- GPR

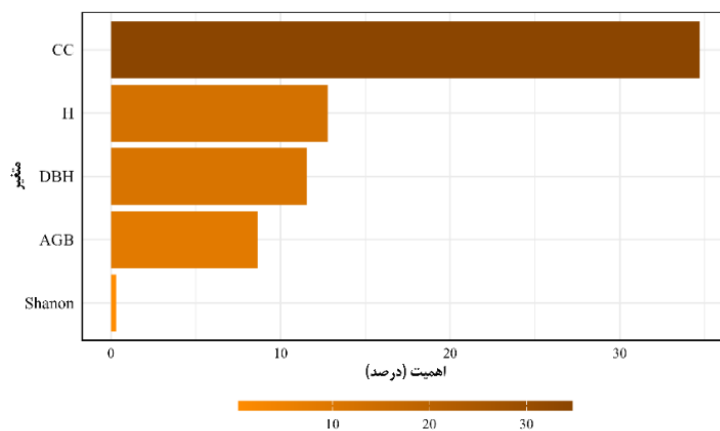
¹ Random Forest-RF

² K-Nearest Neighbors-KNN

برگ همبستگی بسیار قوی با تاج‌پوشش ($r = 0.92$) داشت، که نشان‌دهنده ارتباط نزدیک بین این دو متغیر است. این نتیجه با ماهیت فیزیکی این دو شاخص همخوانی دارد، زیرا هر دو به تراکم و گستردگی تاج‌پوشش وابسته هستند. همبستگی شاخص سطح برگ با قطر برابر سینه و ارتفاع با ضرایب 0.70 متوسط بود، که بیانگر تأثیر این مشخصه‌های ساختاری بر شاخص سطح برگ است. زیست‌توده روی زمین نیز با شاخص سطح برگ همبستگی متوسطی ($r = 0.64$) نشان داد، که منطبق با نقش زیست‌توده به‌عنوان معیاری از توان تولیدی توده‌های درختی است. در مقابل، شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر همبستگی ضعیفی با ($r=0.45$) شاخص سطح برگ و سایر متغیرها (r بین 0.33 تا 0.15) داشت.

مدل‌سازی شاخص سطح برگ نشان داد که متغیر تاج‌پوشش با بیشترین اهمیت (حدود ۳۵ درصد) به‌عنوان کلیدی‌ترین عامل در برآورد شاخص سطح برگ عمل کرد. پس از آن، ارتفاع درختان با اهمیت تقریبی ۲۵ درصد و قطر برابر سینه با اهمیت نزدیک به ۲۰ درصد در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. زی‌توده روی زمین نیز سهمی حدود ۱۵ درصد داشت، در حالی که شاخص تنوع شانون با کم‌ترین میزان اهمیت (کمتر از ۵ درصد) نقش ناچیزی در پیش‌بینی شاخص سطح برگ ایفا کرد. این نتایج همسو با ماتریس همبستگی هستند و مجدداً بر برتری متغیرهای ساختاری جنگل در مدل‌سازی شاخص سطح برگ تأکید می‌کنند (شکل ۴).

شکل ۵ ماتریس همبستگی بین شاخص سطح برگ و متغیرهای کمی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. شاخص سطح



شکل ۴- درصد اهمیت نسبی متغیرهای مستقل در پیش‌بینی شاخص سطح برگ با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی
Figure 4. Relative importance percentage of independent variables in predicting the Leaf Area Index using the Random Forest algorithm

جدول ۱ دامنه تغییرات، میانگین و انحراف معیار این متغیرها را نشان می‌دهد. شاخص سطح برگ در محدوده 0.151 تا 4.623 گزارش شد. این دامنه وسیع بیانگر تنوع قابل توجه در تراکم پوشش گیاهی منطقه است که می‌تواند تحت تأثیر عوامل محیطی و توپوگرافی باشد. مساحت تاج‌پوشش در هکتار بین $3/4$ تا $94/75$ متغیر بود، که نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در تراکم تاج‌پوشش در قطعات نمونه است. قطر برابر سینه از $4/2$ تا $21/15$ سانتی‌متر و ارتفاع درختان از $1/2$ تا $5/85$ متر متغیر بود، که بیانگر ساختار متنوع توده‌های درختی در منطقه مورد مطالعه است. زیست‌توده روی زمین در هکتار در محدوده $0/63$ تا $5/68$ کیلوگرم گزارش شد. شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر نیز بین $1/146$ تا $4/32$ متغیر بود، که نشان‌دهنده تنوع گونه‌ای نسبتاً بالا در منطقه است.

برای مدل‌سازی شاخص سطح برگ با استفاده از مشخصه‌های ساختاری، چهار الگوریتم یادگیری ماشین، شامل جنگل تصادفی، نزدیک‌ترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون فرایند گاوسی مورد استفاده قرار گرفتند. عملکرد این مدل‌ها بر اساس داده‌های آموزشی (۵۶ قطعه نمونه) و اعتبارسنجی (۲۴ قطعه نمونه) با معیارهای ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نسبی و

در داده‌های آموزشی، الگوریتم جنگل تصادفی با ضریب تعیین برابر 0.96 ، جذر میانگین مربعات خطا برابر 0.22 ، جذر میانگین مربعات خطای نسبی برابر $11/11$ درصد و میانگین قدر مطلق خطا برابر 0.17 بهترین عملکرد را داشت. سایر الگوریتم‌ها نیز عملکرد قابل قبولی نشان دادند، اما میزان خطای آنها بیشتر از جنگل تصادفی بود. در داده‌های اعتبارسنجی، الگوریتم جنگل تصادفی با ضریب تعیین برابر 0.90 ، جذر میانگین مربعات خطا برابر 0.35 ، جذر میانگین مربعات خطای نسبی برابر $18/40\%$ و میانگین قدر مطلق خطا برابر 0.27 برتری خود را حفظ کرد. الگوریتم فرایند گاوسی با ضریب تعیین برابر 0.91 ، جذر میانگین مربعات خطا برابر 0.35 ، جذر میانگین مربعات خطای نسبی برابر $18/49\%$ و میانگین قدر مطلق خطا برابر 0.20 در رتبه دوم قرار گرفت. نزدیکترین همسایه با ضریب تعیین برابر 0.91 و رگرسیون فرایند گاوسی با ضریب تعیین برابر 0.91 عملکرد مشابهی داشتند، اما الگوریتم

برای مدل‌سازی شاخص سطح برگ با استفاده از مشخصه‌های ساختاری، چهار الگوریتم یادگیری ماشین، شامل جنگل تصادفی، نزدیک‌ترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون فرایند گاوسی مورد استفاده قرار گرفتند. عملکرد این مدل‌ها بر اساس داده‌های آموزشی (۵۶ قطعه نمونه) و اعتبارسنجی (۲۴ قطعه نمونه) با معیارهای ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نسبی و

برای مدل‌سازی شاخص سطح برگ با استفاده از مشخصه‌های ساختاری، چهار الگوریتم یادگیری ماشین، شامل جنگل تصادفی، نزدیک‌ترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون فرایند گاوسی مورد استفاده قرار گرفتند. عملکرد این مدل‌ها بر اساس داده‌های آموزشی (۵۶ قطعه نمونه) و اعتبارسنجی (۲۴ قطعه نمونه) با معیارهای ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطای نسبی و

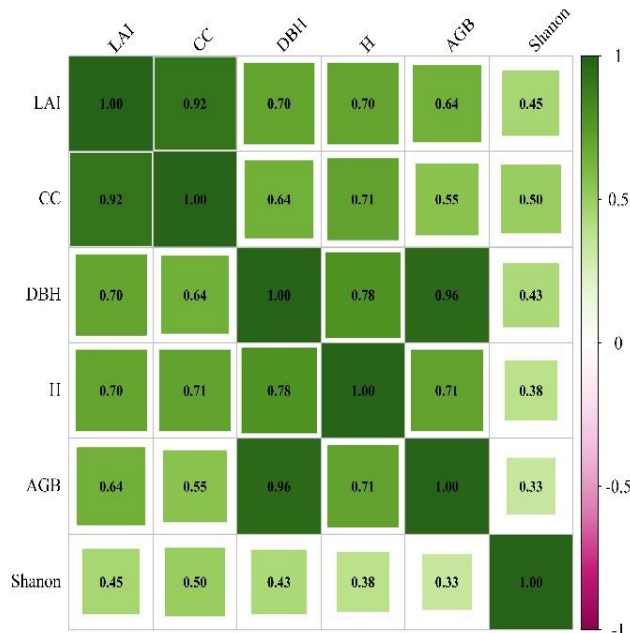
ماشین بردار پشتیبان با ضریب تعیین برابر ۰/۸۸، جذر میانگین مربعات خطا برای ۰/۴۰، جذر میانگین مربعات خطای نسبی برابر ۱۹/۶۳ درصد و میانگین قدر مطلق خطا برابر ۰/۲۶ کمترین دقت را در اعتبارسنجی نشان داد.

جدول ۲- ارزیابی مدل‌ها بر اساس داده‌های آموزش و اعتبارسنجی با معیارهای R^2 ، RMSE، rRMSE، MAE و $rRMSE$
 Table 2. Model evaluation based on training and validation data using R^2 , RMSE, rRMSE, and MAE criteria

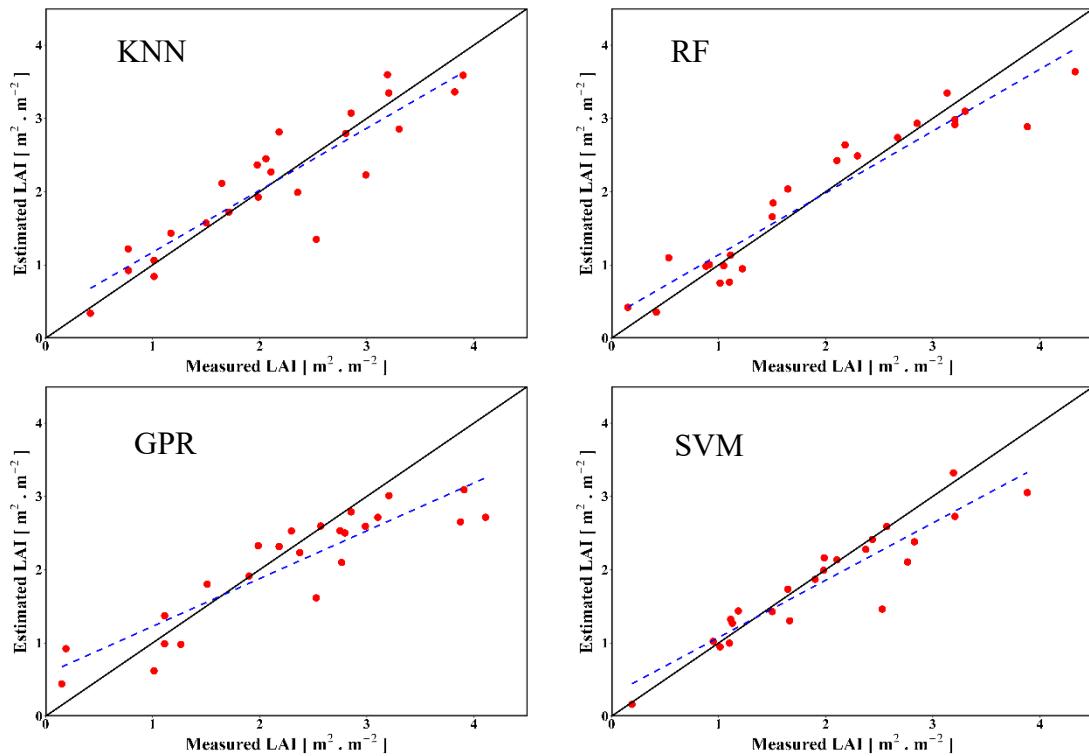
داده‌های اعتبارسنجی (n = 24) Validation Data (n = 24)				داده‌های آموزشی (n = 56) Training Data (n = 56)				مدل Model
MAE	rRMSE (%)	RMSE ($m^2 \cdot m^{-2}$)	R^2	MAE	rRMSE (%)	RMSE ($m^2 \cdot m^{-2}$)	R^2	
0.27	18.40	0.35	0.90	0.17	11.11	0.22	0.96	جنگل تصادفی Random Forest (RF)
0.31	19.42	0.41	0.81	0.27	18.85	0.36	0.91	نزدیکترین همسایه K-Nearest Neighbors (KNN)
0.23	19.50	0.36	0.87	0.26	19.63	0.40	0.88	ماشین بردار پشتیبان Support Vector Machine (SVM)
0.40	23.93	0.54	0.80	0.20	18.49	0.35	0.91	رگرسیون فرآیند گاوسی Gaussian Process Regression (GPR)

مدل‌های دیگر در مقایسه با الگوریتم جنگل تصادفی از پراکندگی بیشتری برخوردار بودند.

بررسی نمودارهای پراکنش (شکل ۶) نشان داد که مدل جنگل تصادفی با کمترین میزان پراکندگی، بالاترین تطابق را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده داشت. به‌طور کلی، تمام



شکل ۵- ماتریس همبستگی بین شاخص سطح برگ و متغیرهای کمی اندازه‌گیری شده
 Figure 5. The correlation matrix between the leaf area index and measured quantitative variables



شکل ۶- مقادیر شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر برآورد شده داده‌های اعتبار سنجی بر اساس روش‌های جنگل تصادفی، نزدیکترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون فرآیند گاوسی.

Figure 6. Measured vs. predicted LAI values from validation data using Random Forest, K-Nearest Neighbors, Support Vector Machine, and Gaussian Process Regression methods

Moser-Reischl *et al.*, 2025; Tian *et al.*, 2021;) علاوه بر آن، ضریب همبستگی قطر برابر سینه و ارتفاع درختان نشان‌دهنده تأثیر معنادار ویژگی‌های ساختاری بر شاخص سطح برگ بوده‌اند. این نقش کلیدی خصوصیات فیزیکی درختان در برآورد شاخص سطح برگ به‌وسیله مدل‌ها، در مطالعات (Liu *et al.*, 2025; Sinan & Hasenauer, 2025) توجه شده است که به اهمیت ترکیب داده‌های کمی ساختار جنگل با الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین در برآورد دقیق پارامترهای اکولوژیکی اشاره می‌کنند. شاخص زیست‌توده روی زمین نیز رابطه متوسطی ($r = 0.64$) با شاخص سطح برگ داشت که با توجه به نقش زیست‌توده در بازتاب توان مولد اکوسیستم جنگلی، این همبستگی معقول و مورد تأیید تحقیقات اخیر است (Seyed Mousavi *et al.*, 2024; Putzenlechner *et al.*, 2024).

اگرچه شاخص تنوع گونه‌ای شانون-وینر همبستگی ضعیفی را با شاخص سطح برگ و سایر متغیرها نشان داد، اما این شاخص ابزار مهمی برای بررسی تنوع زیستی و پایداری جنگل محسوب می‌شود. این موضوع احتمالاً به این دلیل است که در جنگل‌های زاگرس، ساختار تاج‌پوشش و تراکم گونه‌های غالب (مازودار و برودار) نقش اصلی را در تعیین شاخص سطح برگ ایفا می‌کنند، در حالی که تغییرات در تنوع گونه‌ای الزاماً منجر به تغییر محسوس در مقدار شاخص سطح برگ نمی‌شوند.

شاخص سطح برگ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های بیومتری و بوم‌شناختی، نقش کلیدی را در ارزیابی توان تولیدی و عملکرد اکوسیستم‌های جنگلی ایفا می‌کند. اهمیت شاخص سطح برگ در جنگل‌های زاگرس که یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی ایران به‌شمار می‌رود، دوچندان است، زیرا این جنگل‌ها نقش حیاتی در تعدیل اقلیم، حفاظت از تنوع زیستی و حفاظت خاک دارند (Marvie Mohadjer, 2011; Sarvazad & Fallah, 2023).

نتایج پژوهش حاضر نشان دادند که الگوریتم جنگل تصادفی با ضریب تعیین بالا در اعتبارسنجی و خطای کم، بهترین عملکرد را در پیش‌بینی شاخص سطح برگ داشت. این یافته‌ها با مطالعات پیشین که قابلیت یادگیری ماشین در مدل‌سازی غیر خطی و پیچیده پارامترهای بوم‌شناختی را تأیید کرده‌اند، همخوانی دارند (Liu *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021). همچنین، همبستگی قوی شاخص سطح برگ با درصد تاج‌پوشش نشان‌دهنده اهمیت تاج‌پوشش به‌عنوان نماینده فیزیکی تراکم و گستردگی برگ‌ها است که مستقیماً بر مقدار شاخص سطح برگ تأثیر می‌گذارد. همچنین، ارتباط متوسط تا قوی شاخص سطح برگ با قطر برابر سینه و ارتفاع درختان بیانگر نقش مؤثر ویژگی‌های ساختاری در تعیین سطح برگ است. این نتایج با مطالعات مشابه در اکوسیستم‌های جنگلی ایران و جهان مطابقت دارند که قطر و ارتفاع درختان را به‌عنوان متغیرهای کلیدی در برآورد شاخص سطح برگ معرفی کرده‌اند

شناسایی تنش‌های محیطی و آسیب‌های ناشی از عوامل زیستی مورد استفاده قرار گیرد (Zheng & Moskal, 2009).

در نهایت، یافته‌های این مطالعه پایه‌ای علمی را برای توسعه استراتژی‌های حفاظتی و مدیریتی جنگل‌های زاگرس فراهم می‌آورند و نشان می‌دهند که ادغام داده‌های میدانی با تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین، رویکردی نوین و مؤثر در مطالعات بوم‌شناختی و مدیریت جنگل است که می‌تواند به حفاظت و پایداری این اکوسیستم‌های ارزشمند کمک شایانی کند.

با توجه به این که این مطالعه در یک منطقه خاص از جنگل‌های زاگرس شمالی (مریوان) با شرایط اکولوژیکی یکسان (آب‌وهوای سرد و نیمه‌مرطوب) انجام شده است، مدل ارائه‌شده در مرحله اول برای مناطق با شرایط اکولوژیکی مشابه قابل کاربرد است. وسعت زیاد و تنوع شرایط اکولوژیکی (از نظر ارتفاع، بارش، خاک و ترکیب گونه‌ای) در گستره جنگل‌های زاگرس، تعمیم‌پذیری مستقیم این مدل را برای کل این ناحیه با چالش مواجه می‌سازد. بنا بر این، پیشنهاد می‌شود که پیش از به‌کارگیری این مدل در سایر زیرحوزه‌های اکولوژیکی زاگرس، با نمونه‌برداری از آن مناطق، اعتبار آن ارزیابی شود و در صورت لزوم، پارامترهای مدل بازکالیبره گردند. استفاده از داده‌های سنجش از دور در ترکیب با داده‌های میدانی از مناطق مختلف می‌تواند راهکاری برای توسعه مدل‌های مقیاس وسیع و قابل تعمیم‌تر باشد.

بنا بر این، به‌نظر می‌رسد که شاخص سطح برگ بیشتر به متغیرهای ساختاری و تراکمی جنگل وابسته است تا به تنوع گونه‌ای. مطالعات جدید (Putzenlechner *et al.*, 2024; Moser-Reischl *et al.*, 2025) بر اهمیت ارزیابی تنوع گونه‌ای برای تحلیل واکنش‌های اکوسیستم جنگل به تغییرات محیطی تأکید دارند، موضوعی که می‌تواند در مطالعات آینده بهبود یابد و با داده‌های یادگیری عمیق ترکیب شود.

استفاده از روش‌های غیر مستقیم و به‌ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین در برآورد شاخص سطح برگ، مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های مستقیم سنتی دارد. این روش‌ها امکان برآورد سریع، کم‌هزینه و غیر مخرب را فراهم می‌کنند و می‌توانند در شرایط متغیر محیطی و ساختاری جنگل‌ها به دقت بالایی دست یابند (Fang *et al.*, 2019; Yan *et al.*, 2019). با توجه به چالش‌های اندازه‌گیری مستقیم شاخص سطح برگ در عرصه‌های جنگلی به‌دلیل تغییرپذیری تاج‌پوشش و پیچیدگی ساختار جنگل، کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری کارآمد و دقیق توصیه می‌شود (Liu *et al.*, 2021).

از منظر مدیریت منابع طبیعی و حفاظت جنگل‌های زاگرس، این پژوهش اهمیت بالایی دارد. مدل‌سازی دقیق شاخص سطح برگ و شناخت ارتباط آن با ویژگی‌های ساختاری می‌تواند به پیش‌بینی تغییرات اکوسیستم‌های جنگلی، ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و طراحی برنامه‌های مدیریت پایدار کمک کند. همچنین، این شاخص می‌تواند به‌عنوان یک نماگر حساس در

References

- Arias, D., Calvo-Alvarado, J., & Dohrenbusch, A. (2007). Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 247(1-3), 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.039>
- Babaei Kafaki, S., Khademi, A., & Mataji, A. (2009). Relationship between leaf area index and physiological and edaphical condition in a *Quercus macranthera* stand (Case study: Andebil's forest, Khalkhal). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 17(2), 289-280.
- Chaturvedi, R. K., Singh, S., Singh, H., & Raghubanshi, A. S. (2017). Assessment of allometric models for leaf area index estimation of *Tectona grandis*. *Tropical Plant Research*, 4(2), 274-285. <https://doi.org/10.22271/tpr.2017.v4.i2.037>
- Chen, Y., Ma, L., Yu, D., Feng, K., Wang, X., & Song, J. (2021). Improving Leaf Area Index Retrieval Using Multi-Sensor Images and Stacking Learning in Subtropical Forests of China. *Remote Sensing*, 14(1), 148. <https://doi.org/10.3390/rs14010148>
- Da Silva, D. A., Pfeifer, M., Pattison, Z., & Vibrans, A. C. (2020). Drivers of leaf area index variation in Brazilian Subtropical Atlantic Forests. *Forest Ecology and Management*, 476, 118477. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118477>
- Darvish-Sefat, M., Miri, N., Shakeri, Z., Zahed, M., Zargham, N., & Nosratollah, A. (2017). Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 satellite data. *Iranian Journal of Forest*, 9(1), 29-42. [In Persian]
- Fang, H., Baret, F., Plummer, S., & Schaepman-Strub, G. (2019). An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 57(3), 739-799. <https://doi.org/10.1029/2018RG000608>
- Hemmat Baland, E., Akbarinia, M., & Banj Shafei, A. (2010). The effect of fire on some soil chemical properties in oak forests of Marivan. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(3), 421-432. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20113021094> [In Persian]
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muysa, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>

- Kang, Y., Ozdogan, M., Gao, F., Anderson, M. C., White, W. A., Yang, Y., & Erickson, T. A. (2021). A data-driven approach to estimate leaf area index for Landsat images over the contiguous US. *Remote Sensing of Environment*, 258, 112383. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112383>
- Liu, J., Wang, D., Gong, H., Wang, C., Zhu, J., & Wang, D. (2025). Advancing the Understanding of Fine-Grained 3D Forest Structures using Digital Cousins and Simulation-to-Reality: Methods and Datasets. arXiv preprint arXiv:2501.03637. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.03637>
- Liu, S., Jin, X., Nie, C., Wang, S., Yu, X., Cheng, M., & Liu, Y. (2021). Estimating leaf area index using unmanned aerial vehicle data: shallow vs. deep machine learning algorithms. *Plant Physiology*, 187(3), 1551-1576. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab322>
- Mahdavi, Y., Rokhollah, M., & Naji. Evaluation of Allometric Relationships for Estimation of Biomass, Carbon Sequestration and Leaf Area Index of Kikum Trees. *Journal of Forest Ecology of Iran*. 13(2), 130-142. <https://doi.org/10.61882/ifej.2025.549>. [In Persian]
- Marvie Mohadjer, M. R. (2011). Silviculture. University of Tehran press, Tehran, 418p.
- McDowell, N. G., Phillips, N., Lunch, C., Bond, B. J., & Ryan, M. G. (2002). An investigation of hydraulic limitation and compensation in large, old Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 22(11), 763-774. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.11.763>
- Miri, N., Fatehi, P., Darvishsefat, 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. [10.22092/ijfpr.2023.364041.2129](https://doi.org/10.22092/ijfpr.2023.364041.2129)
- Moser-Reischl, A., Franceschi, E., Rahman, M. A., Rodrigues-Leite, J., Pretzsch, H., Pauleit, S., & Rötzer, T. (2025). Spatial and temporal dynamics of the leaf area index (LAI) of selected tree species in urban environments. *Urban Forestry & Urban Greening*, 107, 128795. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128795>.
- Oyonarte, P.B., & Cerrillo, R. M. N. (2003). Aboveground phytomass models for major species in shrub ecosystems of western Andalusia. *Forest Systems*, 12(3), 47-55. <https://doi.org/10.5424/1078>
- Panahi, P., Pourhashemi, M., & Zandebasiri, M. (2013). Application of visual surveys to estimate acorn production of Brants oak (*Quercus brantii* Lindl.) in northern Zagros Forests of Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 11(1), 85-95.
- Persson, S. (2014). Estimating leaf area index from satellite data in deciduous forests of Southern Sweden. MSc thesis series *INES*, 35.
- Putzenlechner, B., Bevern, F., Koal, P., Grieger, S., Kappas, M., Koukal, T., & Filipponi, F. (2024). Accuracy assessment of LAI, PAI and FCOVER from Sentinel-2 and GEDI for monitoring forests and their disturbance in Central Germany. *European Journal of Remote Sensing*, 57(1), 2422323. <https://doi.org/10.1080/22797254.2024.2422323>.
- Sarvazad, A., & Fallah, A. (2023). Investigation the Effect of Dead Trees on the Trend of Changes in Soil Carbon Storage Across an Altitudinal Gradient of Western oak Forests (Case study: Qalajeh Forest). *Ecology of Iranian Forest*, 11(22), 142-150. [In Persian]
- Seyed Mousavi, S. Z., Mohammadi, J., Darvishzadeh, R., Shataee Jouibary, Sh., Rahmani, R., & Ghorbani, Kh. (2024). The Effects of Changes in the Forest Structure's Quantitative Traits on the Leaf Area Index in Hyrcanian Forests, Golestan Province. *Iranian Journal of Forest Ecology*, 12(2), 59-72. [doi:10.61186/ifej.12.2.59](https://doi.org/10.61186/ifej.12.2.59)
- Sinan, M., & Hasenauer, H. (2025). Improving leaf area index (LAI) estimation by integrating forest inventory and remote sensing (No. EGU25-4928). *Copernicus Meetings*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-4928>
- Sohrabi, H., & Shirvani, A. (2012). Allometric equations for estimating standing biomass of atlantic pistache (*Pistacia atlantica* var. *mutica*) in Khojir National Park. *Iranian Journal of Forest*, 4(1), 55-64. <http://www.sid.ir/en/ViewPaper.asp?ID=245508&varStr=6> [In Persian]
- Sohrabi, H., Daryaei, A. (2015). Estimation of aboveground biomass of small-diameter hornbeam, beech and ironwood trees using power regression models. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 22(2), 137-150. [10.1001.1.23222077.1394.22.2.8.2](https://doi.org/10.1001.1.23222077.1394.22.2.8.2) [In Persian]
- Tian, L., Qu, Y., & Qi, J. (2021). Estimation of forest LAI using discrete airborne LiDAR: a review. *Remote Sensing*, 13(12), 2408. <https://doi.org/10.3390/rs13122408>.
- Tobin, B., Black, K., Osborne, B., Reidy, B., Bolger, T., & Nieuwenhuis, M. (2006). Assessment of allometric algorithms for estimating leaf biomass, leaf area index and litter fall in different-aged Sitka spruce forests. *Forestry*, 79(4), 453-465. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl030>.
- Wilby, R. L., & Dawson, C. W. (2013). The Statistical Downscaling Model: insights from one decade of application. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1707. [10.1002/joc.3544](https://doi.org/10.1002/joc.3544)
- Yan, G., Hu, R., Luo, J., Weiss, M., Jiang, H., Mu, X., & Zhang, W. (2019). Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 390-411. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.033>
- Yousoufvand Mofrad, M., Soosani, J., Ostakh, E., & HosseinZadeh, R. (2018). Estimate the above ground biomass in Brant's oak (*Quercus brantii* Lindl.) (Case Study: Region Melah-Shbanan horramabad). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 24(4), 148-172. [10.22069/jwfst.2017.12418.1648](https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.12418.1648)

- Zhai, C., Ding, M., Ren, Z., Bao, G., Liu, T., Zhang, Z., ... & Lin, H. (2023). A LiDAR-driven effective leaf area index inversion method of urban forests in Northeast China. *Forests*, 14(10), 2084. <https://doi.org/10.3390/f14102084>.
- Zheng, G., & Moskal, L. M. (2009). Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors*, 9(4), 2719-2745. <https://doi.org/10.3390/s90402719>.
- Zou, J., Hou, W., Chen, L., Wang, Q., Zhong, P., Zuo, Y., & Leng, P. (2020). Evaluating the impact of sampling schemes on leaf area index measurements from digital hemispherical photography in *Larix principis-rupprechtii* forest plots. *Forest Ecosystems*, 7(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00262-z>