

Research Paper

Modeling Aboveground Carbon Storage of Urban Trees Using Sentinel-2 Imagery and Machine Learning Algorithms

Elham Fazeli¹, Asghar Fallah², Morteza Shabani³, and Mahya Tafazoli⁴

- 1- Ph.D. Student, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
- 2- Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran, (Corresponding author: fallaha2007@yahoo.com)
- 3- Ph.D., Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
- 4- Assistant professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

Received: 02 September, 2025

Revised: 22 November, 2025

Accepted: 20 December, 2025

Extended Abstract

Background: The increasing concentration of greenhouse gases, especially carbon dioxide (CO₂), is the main driver of global warming and climate change. Urban forests, as part of green infrastructure, play a vital role in absorbing and sequestering this carbon. However, the accurate estimation of aboveground carbon storage in urban trees through traditional field methods is costly, time-consuming, and limited in scale. In contrast, the integration of remote sensing data and machine learning models provides a novel, rapid, and cost-effective approach for large-scale monitoring. The main objective of this research was to estimate the aboveground carbon storage of trees in Sari city using vegetation indices extracted from Sentinel-2 satellite images and to compare the performance of four machine learning algorithms: Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN), and the Generalized Linear Model (GLM). **Methods:** This study was conducted within the three urban districts of Sari city (with a total approximate area of 2970 hectares). One hundred and fifty sample plots (50 plots in each district) were collected using selective sampling (with the transect method in boulevards and with the circular sample plot method in squares). The Diameter at Breast Height (DBH) and height of all trees were measured in each plot, and their locations were recorded with GPS. Stem biomass was calculated using an allometric equation based on DBH, height, form factor (0.5), and wood density, and carbon storage was estimated by multiplying it by a factor of 0.47. A set of cloud-free Sentinel-2 satellite images (2021-2022 timeframe) was used to extract a wide range of vegetation indices, including common indices (e.g., NDVI, EVI), red-edge band-based indices (e.g., S2REP, REIP, & NDRE), and spectral transformations (e.g., TCB, TCW) on the Google Earth Engine platform. After screening variables based on multicollinearity (removing variables with Pearson's correlation > 0.8), the data were prepared for modeling. The performance of RF, SVM, KNN, and GLM models was evaluated using 10-fold cross-validation, and their accuracy was assessed with the coefficient of determination (R²), Root Mean Square Error (RMSE), and Mean Absolute Error (MAE) metrics. The relative importance of variables was also calculated for each model. All analyses were performed in the R software environment.

Results: The mean aboveground carbon storage in district one of Sari city was significantly higher than in the other two districts. The Random Forest (RF) model performed remarkably better than the other models, showing the highest accuracy and lowest error. The observed vs. predicted values plot for RF showed a close fit to the 1:1 line, and its residuals were symmetrically scattered around zero, indicating no systematic bias. Although the SVM model showed acceptable accuracy in some iterations, it was unstable and exhibited high dispersion in error metrics. The KNN and GLM models performed weaker and showed a strong tendency to underestimate higher carbon storage values. The examination of variable importance in all models indicated the key role of red-edge band-based indices. The S2REP index had the highest relative importance in predicting carbon storage across all four models. Subsequently, the REIP, NDRE, and EVI indices ranked next in importance.

Conclusion: This research demonstrated that integrating advanced spectral indices from Sentinel-2 (especially red-edge indices) with the RF machine learning algorithm provides an accurate,



stable, and efficient method for estimating and spatially monitoring aboveground carbon storage of trees in the complex and heterogeneous urban environment of Sari. The superiority of RF stems from its ability to model complex nonlinear relationships, handle outliers, and deliver generalizable results. The pivotal role of the S2REP index emphasizes the importance of spectral information related to chlorophyll content and the advanced physiological structure of trees (captured by red-edge bands) compared to conventional greenness indices for carbon storage estimation. Urban managers and planners are suggested to use this framework as an operational tool for periodic monitoring of carbon sequestration potential in green spaces, identifying strengths and weaknesses, prioritizing the protection of mature trees (such as old plane trees), and evaluating the effectiveness of green space development projects toward carbon reduction. For future studies, integrating multi-source data (such as airborne LiDAR for vertical canopy structure, Sentinel-1 radar data, and micro-scale environmental variables), developing ensemble models, and adapting the model for different tree species are recommended to increase the accuracy and reliability of estimates at the metropolitan level.

Keywords: Carbon Sequestration, Machine Learning Models, Urban Forest, Sentinel-2 Satellite

How to Cite This Article: Fazeli, E., Fallah, A., Shabani, M., & Tafazoli, M. (2026). Modeling Aboveground Carbon Storage of Urban Trees Using Sentinel-2 Imagery and Machine Learning Algorithms. *Ecol Iran For*, 14(1), 29-43. DOI: 10.61882/ifej.2026.603



مقاله پژوهشی

مدل‌سازی ذخیره کربن روی‌زمینی درختان شهری با استفاده از داده‌های Sentinel-2 و الگوریتم‌های یادگیری ماشین

الهام فاضلی^۱، اصغر فلاح^۲، مرتضی شعبانی^۳ و محیا تفضلی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
 ۲- استاد، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، (نویسنده مسوول: Fallaha2007@yahoo.com)
 ۳- دکتری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
 ۴- استادیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱
صفحه: ۲۹ تا ۴۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسیدکربن (CO₂)، عامل اصلی گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی است. جنگل‌های شهری به‌عنوان بخشی از زیرساخت سبز، نقشی حیاتی در جذب و ترسیب این کربن ایفا می‌کنند. با این حال، برآورد دقیق ذخیره کربن روی‌زمینی درختان شهری با روش‌های سنتی میدانی، پرهزینه، زمان‌بر و محدود در مقیاس است. در مقابل، تلفیق داده‌های سنجنش از دور و مدل‌های یادگیری ماشین، رویکردی نوین، سریع و مقرون به‌صرفه را برای پایش در مقیاس وسیع فراهم می‌آورد. هدف اصلی این پژوهش، برآورد ذخیره کربن روی‌زمینی درختان شهر ساری با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره Sentinel-2 و مقایسه عملکرد چهار الگوریتم یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، k نزدیک‌ترین همسایه (KNN) و مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) بود.

مواد و روش‌ها: این مطالعه در محدوده سه منطقه شهری ساری (با مجموع مساحت تقریبی ۲۹۷۰ هکتار) انجام شد. با نمونه‌برداری انتخابی، ۱۵۰ قطعه نمونه (۵۰ قطعه در هر منطقه) برداشت گردید (در بلوارها با روش خطی و در میادین با روش قطعات نمونه دایره‌ای). در هر قطعه، قطر برابر سینه (DBH) و ارتفاع تمامی درختان اندازه‌گیری و موقعیت‌ها با GPS ثبت شدند. زی‌توده تنه با استفاده از رابطه آلومتریک مبتنی بر DBH، ارتفاع، ضریب شکل (۰/۵) و چگالی چوب محاسبه و ذخیره کربن با ضرب آن در ضریب ۰/۴۷ برآورد شد. از مجموعه تصاویر بدون ابر ماهواره Sentinel-2 (بازه ۲۰۲۲-۲۰۲۱) برای استخراج طیف وسیعی از شاخص‌های پوشش گیاهی شامل شاخص‌های مرسوم (مانند NDVI، EVI)، شاخص‌های مبتنی بر باند Red-Edge (مانند S2REP، NDRE، REIP) و تبدیلات طیفی (مانند TCW، TCB) در پلتفرم Google Earth Engine استفاده گردید. پس از غربال‌گری متغیرها (حذف متغیرهای با همبستگی پیرسون بالاتر از ۰/۸)، فرآیند مدل‌سازی انجام شد. عملکرد مدل‌های RF، SVM، KNN و GLM با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع ۱۰-تایی ارزیابی و دقت آن‌ها با معیارهای ضریب تبیین (R²)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) سنجیده شد. اهمیت نسبی متغیرها نیز در هر مدل محاسبه گردید. کلیه تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزار R انجام شد.

یافته‌ها: میانگین ذخیره کربن روی‌زمینی در منطقه یک شهر ساری به‌طور معنی‌داری بیشتر از دو منطقه دیگر بود. مدل RF به‌طور چشم‌گیری از سایر مدل‌ها بهتر عمل کرد و بالاترین دقت و کمترین خطا را نشان داد. نمودار مقادیر مشاهده‌شده در مقابل پیش‌بینی‌شده برای RF تطابق نزدیکی با خط ۱:۱ داشت و باقی‌مانده‌های آن به‌طور متقارن حول صفر پراکنده بودند که نشان‌دهنده عدم سوگیری سیستماتیک بود. مدل SVM با وجود داشتن دقت قابل قبول در برخی تکرارها، ناپایدار بود و پراکندگی زیادی در معیارهای خطا نشان داد. مدل‌های KNN و GLM عملکرد ضعیف‌تری داشتند و تمایل شدیدی به کم‌برآوردی مقادیر بالای ذخیره کربن از خود نشان دادند. بررسی اهمیت متغیرها در تمامی مدل‌ها حاکی از نقش کلیدی شاخص‌های مبتنی بر باند راج بود. شاخص S2REP در تمام چهار مدل بالاترین اهمیت نسبی را در پیش‌بینی ذخیره کربن داشت. پس از آن، شاخص‌های REIP، NDRE و EVI در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق شاخص‌های طیفی پیشرفته Sentinel-2 (به‌ویژه شاخص‌های مبتنی بر Red-Edge) با الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی، روشی دقیق و کارآمد برای برآورد و پایش مکانی ذخیره کربن روی‌زمینی درختان در محیط پیچیده و ناهمگن شهری ساری است. برتری RF ناشی از توانایی آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده، مدیریت داده‌های پرت و ارائه نتایج با قابلیت تعمیم‌پذیری بالا است. نقش محوری شاخص S2REP، بر اهمیت اطلاعات طیفی مرتبط با محتوای کلروفیل و ساختار فیزیولوژیک پیشرفته درختان نسبت به شاخص‌های سبزی‌نگی مرسوم در برآورد ذخیره کربن تأکید دارد. به مدیران و برنامه‌ریزان شهری پیشنهاد می‌شود که از این چارچوب به‌عنوان ابزاری عملیاتی برای پایش دوره‌ای پتانسیل ترسیب کربن فضای سبز، شناسایی نقاط قوت و ضعف، اولویت‌دهی به حفاظت از درختان بالغ (مانند چنارهای کهن سال) و ارزیابی اثربخشی پروژه‌های توسعه فضای سبز در راستای کاهش کربن استفاده کنند. برای مطالعات آینده، ادغام داده‌های چندمنبعی (مانند LiDAR هوابرد برای استخراج ساختار عمودی تاج، داده‌های راداری Sentinel-1 و متغیرهای محیطی ریزمقیاس)، توسعه مدل‌های اجماعی و تطبیق مدل برای گونه‌های درختی مختلف پیشنهاد می‌گردد تا دقت و قابلیت اطمینان برآوردها در سطح کلان‌شهرها افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: ترسیب کربن، جنگل شهری، ماهواره Sentinel-2، مدل‌های یادگیری ماشین

مقدمه

اتمسفری و ماندگاری طولانی، نقش محوری در پدیده گرمایش جهانی ایفا می‌کند (Osabohien et al., 2019). افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، گسترش شهرنشینی و تخریب پوشش‌های گیاهی طبیعی، از عوامل اصلی افزایش CO₂ اتمسفری به‌شمار می‌روند (Srivastava et al., 2012). به‌ویژه در مناطق شهری، بخش حمل و نقل، انرژی مصرفی خانگی و

افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان شناخته می‌شود که پیامدهای آن به‌صورت افزایش دمای متوسط زمین و تغییر الگوهای اقلیمی بروز یافته است. در میان گازهای گلخانه‌ای، دی‌اکسیدکربن (CO₂) به‌دلیل سهم بالاتر در غلظت

به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در شهرها و نقش کلیدی زیرساخت سبز در کاهش آن، برآورد دقیق ذخیره کربن روی‌زمینی درختان شهری به‌عنوان یکی از پیش‌نیازهای اساسی مدیریت پایدار فضای سبز، برنامه‌ریزی اقلیمی و سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد علمی مطرح می‌شود. دستیابی به این هدف مستلزم بهره‌گیری از روش‌های کارآمد، دقیق و مقیاس‌پذیر برای کمی‌سازی ذخایر کربن در محیط‌های پیچیده شهری است.

روش‌های سنتی برآورد زی‌توده و ذخیره کربن روی‌زمینی عمدتاً مبتنی بر اندازه‌گیری‌های میدانی، برداشت نمونه و استفاده از معادلات آلومتریکی هستند (Alazmani et al., 2021; Hojjati et al., 2022; Zhou et al., 2025). اگرچه این روش‌ها از دقت بالایی برخوردارند، اما به‌دلیل زمان‌بر بودن، هزینه بالا و محدودیت پوشش مکانی، کاربرد آن‌ها در مقیاس‌های وسیع شهری با چالش‌های جدی مواجه است. در مقابل، داده‌های سنجش‌ازدور به‌عنوان ابزاری کارآمد، امکان پایش گسترده، تکرارپذیر و غیر مخرب پوشش گیاهی را فراهم کرده‌اند و نقش مهمی در مطالعات مرتبط با زی‌توده و کربن ایفا می‌کنند (Wu et al., 2022). در میان سامانه‌های ماهواره‌ای، ماهواره Sentinel-2 به‌دلیل دسترسی آزاد به داده‌ها، قدرت تفکیک مکانی مناسب (۱۰ تا ۶۰ متر)، تناوب زمانی بالا و وجود باندهای Red-Edge، ظرفیت بالایی برای پایش وضعیت فیزیولوژیک و ساختار پوشش گیاهی دارد (Castillo et al., 2017). شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج‌شده از تصاویر Sentinel-2، نظیر NDVI، EVI و شاخص‌های مبتنی بر Red-Edge، اطلاعات ارزشمندی را درباره سبزیگی، تراکم تاج و محتوای کلروفیل فراهم می‌کنند که با زی‌توده و ذخیره کربن روی‌زمینی ارتباط دارند. با این حال، رابطه بین شاخص‌های طیفی و ذخیره کربن غالباً پیچیده، غیر خطی و چندبعدی است و استفاده از روش‌های رگرسیونی کلاسیک، توانایی محدودی در مدل‌سازی این روابط دارد (Ali et al., 2025).

در سال‌های اخیر، روش‌های یادگیری ماشینی به‌عنوان رویکردی نوین و قدرتمند برای مدل‌سازی داده‌های پیچیده و غیر خطی مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها نسبت به رویکردهای سنتی، توانایی بیشتری در شناسایی روابط چندبعدی و غیر خطی بین متغیرهای ورودی و خروجی دارند (Greener et al., 2022). الگوریتم‌هایی نظیر جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، k نزدیک‌ترین همسایه (Ifjd) و مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)، در مطالعات مختلف عملکرد موفقی را در پیش‌بینی زی‌توده، بیوماس و ذخیره کربن نشان داده‌اند (Kamer Aksoy, 2022; Mi et al., 2017; Ly et al., 2021). الگوریتم RF به‌عنوان یک روش یادگیری جمعی، قادر است با استفاده از مجموعه‌ای از درختان تصمیم، روابط غیر خطی و داده‌های هم‌بسته را با دقت بالا مدل‌سازی کند. در مقابل، SVM به‌عنوان یک روش ناپارامتری، بدون نیاز به فرض توزیع خاص داده‌ها، در مسائل رگرسیونی و طبقه‌بندی کاربرد گسترده‌ای دارد و دقت بالایی در پیش‌بینی متغیرهای زیستی نشان داده است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در

صنایع، سهم بالایی در انتشار کربن دارند. بر اساس داده‌های ترازنامه انرژی ایران، حجم گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در کشور روندی فزاینده دارد و پیش‌بینی می‌شود که میزان انتشار معادل حدود ۱۷۳۲ میلیون تن CO_2 تا سال ۲۰۳۰ برسد، مگر آن‌که سیاست‌های کاهش انتشار به‌طور جدی اجرا شوند (Shayesteh et al., 2021). همچنین طبق گزارش توسعه انسانی سازمان ملل، تولید سرانه گاز دی‌اکسیدکربن در ایران حدود ۶/۴ تن به ازای هر نفر در سال بود (Reinaud, 2008). داده‌های بهره‌رتر نیز نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۴، سرانه انتشار CO_2 در ایران به حدود ۸/۶ تن به‌ازای هر نفر افزایش یافته است، که شامل انتشار حاصل از سوخت‌های فسیلی در حمل و نقل، تولید برق و گرمایش است (Friedlingstein et al., 2024). این آمارها نشان می‌دهند که مناطق شهری به‌ویژه کلان‌شهرها نقش مهمی در تمرکز انتشار CO_2 دارند. اگرچه روش‌های مصنوعی پالایش کربن نظیر فیلترهای صنعتی توسعه یافته‌اند، اما این راهکارها هزینه‌بر هستند و از نظر اقتصادی و اجرایی، به‌ویژه در مقیاس وسیع، محدودیت‌های قابل توجهی دارند (Cannell et al., 2003). در نتیجه، توجه پژوهشگران و سیاست‌گذاران به راهکارهای طبیعی و مبتنی بر اکوسیستم برای کاهش غلظت CO_2 معطوف شده است.

جنگلداری شهری (Urban Forestry) یکی از رویکردهای نوین در مدیریت سرزمین در شهرهای در حال توسعه و توسعه‌یافته محسوب می‌شود که به برنامه‌ریزی، کاشت، حفاظت و مدیریت درختان و پوشش‌های چوبی در محدوده‌های شهری و حاشیه آن‌ها می‌پردازد (Bolund & Hunhammar, 1999). جنگل‌های شهری به‌عنوان یکی از ارکان اصلی زیرساخت سبز، شامل درختان خیابانی، پارک‌ها، باغ‌های شهری، فضاهای سبز عمومی، درختستان‌ها و جنگل‌کاری‌های پیرامون شهر هستند و نقش مهمی را در بهبود کیفیت زیست‌محیطی شهرها ایفا می‌کنند (Nowak & Greenfield, 2015; Butlin et al., 2012). توسعه این عناصر سبز، علاوه بر ارتقای کیفیت بصری و رفاه اجتماعی، با تأمین طیف گسترده‌ای از خدمات اکوسیستمی از جمله تنظیم اقلیم خرد، کاهش جزیره حرارتی شهری، تصفیه هوا، کاهش رواناب سطحی و بهبود تنوع زیستی همراه است (Bolund & Hunhammar, 1999; Nowak et al., 2013). در میان این خدمات، ترسیب و ذخیره کربن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. درختان از طریق فرآیند فتوسنتز، دی‌اکسیدکربن اتمسفری را جذب و آن را در قالب زی‌توده در بخش‌های مختلف شامل ریشه، تنه، شاخه و برگ ذخیره می‌کنند (Strohbach & Haase, 2012). از این‌رو، پوشش درختی شهری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخازن کربن در محیط‌های شهری شناخته می‌شود و می‌تواند نقش مؤثری در کاهش غلظت CO_2 و تعدیل تغییرات اقلیمی در مقیاس محلی ایفا کند (Nowak et al., 2016; Nedkov et al., 2013). مطالعات نشان داده‌اند که حتی درختان خیابانی و فضاهای سبز کوچک‌مقیاس نیز سهم قابل توجهی در ذخیره کربن شهری دارند، به‌گونه‌ای که مجموع این عناصر پراکنده می‌تواند اثر جمعی قابل توجهی در مقیاس شهری ایجاد کند (Nowak & Greenfield, 2012). با توجه

۵۰ دقیقه عرض شمالی است. بر اساس تقسیم‌بندی شهری، ساری به سه منطقه اصلی (با مساحت‌های به ترتیب ۱۰۵۰، ۱۲۲۷ و ۶۹۳ هکتار) طبقه‌بندی می‌شود. داده‌های اقلیمی ایستگاه هواشناسی ساری میانگین بارش سالانه ۷۴۱ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۸/۱۷ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند (Tafazoli et al., 2020).

روش انجام پژوهش

در این پژوهش، به‌منظور برآورد ذخیره کربن روی زمینی درختان شهری، تعداد ۱۵۰ قطعه نمونه در محدوده شهر ساری انتخاب و پیاده‌سازی شد. استقرار قطعات به‌صورت هدفمند و با هدف دستیابی به پوشش مکانی مناسب از مهم‌ترین فضاهای دارای پوشش درختی شهری (شامل بلوارها، میداين و فضاهای سبز عمومی) انجام گرفت، به‌گونه‌ای که پراکنش نمونه‌ها نمایانگر تنوع ساختاری پوشش چوبی شهر باشد. در بلوارهای شهری، نمونه‌برداری به روش ترانسکت خطی انجام شد. به این منظور، یک ترانسکت به طول ۱۰۰ متر در امتداد محور بلوار در هر محل پیاده گردید و تمام پایه‌های درختی و درختچه‌ای واقع در محدوده تعریف‌شده ترانسکت اندازه‌گیری شدند. در میداين و فضاهای سبز متمرکز، از قطعات نمونه دایره‌ای با مساحت ۱۰۰ متر مربع (شعاع تقریبی ۵/۶۴ متر) استفاده شد و کلیه پایه‌های چوبی داخل قطعه ثبت گردیدند. در هر قطعه نمونه، تمامی گونه‌های درختی و درختچه‌ای موجود (اعم از درختان خیابانی و گونه‌های زینتی رایج شهری) مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. برای هر پایه، گونه، قطر برابر سینه (DBH) ارتفاع کل اندازه‌گیری شد. مختصات مرکز هر قطعه نمونه و موقعیت مکانی درختان اندازه‌گیری‌شده با استفاده از دستگاه GPS ثبت گردید. داده‌های مکانی پس از انتقال به محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پردازش شدند و برای تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفتند.

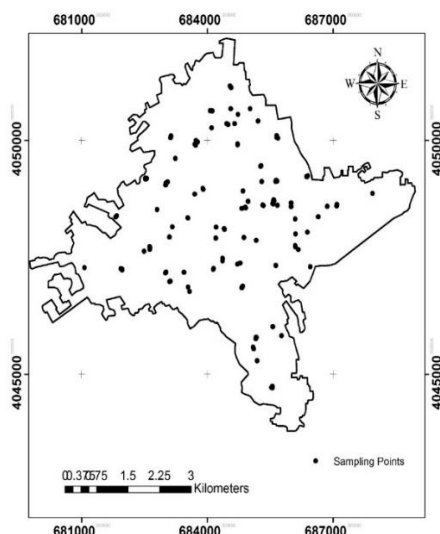
استفاده از داده‌های Sentinel-2 و مدل‌های یادگیری ماشین برای برآورد زی‌توده و کربن در اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی، کاربرد این رویکردها در جنگل‌های شهری، به‌ویژه در مناطق شمال ایران با شرایط اقلیمی خاص، همچنان محدود است. بررسی هم‌زمان عملکرد چندین الگوریتم یادگیری ماشین و مقایسه توانایی آن‌ها در برآورد ذخیره کربن روی زمینی می‌تواند به درک بهتر روابط طیفی-زیستی و انتخاب مدل بهینه برای مدیریت شهری کمک کند.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، برآورد ذخیره کربن روی زمینی جنگل شهری شهرستان ساری با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج‌شده از تصاویر Sentinel-2 و مدل‌های مختلف یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، k نزدیک‌ترین همسایه و مدل خطی تعمیم‌یافته است. نوآوری این مطالعه در تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌ها در مقیاس جنگل شهری نهفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند چارچوبی علمی و کاربردی را برای پایش کربن شهری، بهبود برنامه‌ریزی فضای سبز و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در راستای کاهش اثرات تغییر اقلیم فراهم آورند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در محدوده شهری ساری، مرکز استان مازندران، انجام شد. شهر ساری با مساحتی حدود ۲۹۷۰ هکتار در بخشی از جلگه گسترده‌ای واقع شده است که میان دریای خزر و رشته‌کوه البرز قرار دارد. از نظر موقعیت طبیعی، این شهر در ناحیه جنوبی ساحل خزر و در مجاورت دامنه‌ها و تپه‌ماهورهای کم‌ارتفاع منتهی به البرز جای گرفته است. مختصات جغرافیایی آن بین ۵۲ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۵۹ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۵ درجه و



شکل ۱- موقعیت قطعات نمونه مورد مطالعه در شهر ساری
Figure 1. The location of studied sample plots in Sari city

برآورد زی‌توده و ذخیره کربن

برای برآورد زی‌توده تنه درختان از رابطه (۲) استفاده گردید (Vahedi & Mattagi, 2014). در این رابطه، متغیر dbh قطر در ارتفاع برابر سینه، ht ارتفاع کل، f ضریب شکل تنه و p چگالی چوب را نشان می‌دهند. در اغلب پژوهش‌های مرتبط با جنگل‌های طبیعی شمال ایران و نیز مطالعات مشابه در سایر مناطق، ضریب شکل درختان به‌طور میانگین ۰/۵ در نظر گرفته شده است (Namiranian, 2007). در نهایت، پس از محاسبه زی‌توده، میزان ذخیره کربن با بهره‌گیری از رابطه (۳) تعیین گردید. پس از محاسبه ذخیره کربن روی‌زمینی، ابتدا نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و لون بررسی شد. به‌منظور مقایسه ذخیره کربن روی زمینی بین مناطق مختلف شهر ساری از آنالیز واریانس یک‌طرفه و به‌منظور مقایسه بین گروهی از آزمون دانکن در نرم‌افزار SPSS Ver 26 استفاده شد.

$$\text{Biomass} = \frac{\pi}{4} dbh^2 \times h_t \times f \times \rho \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$C_t = \text{Biomass} \times 0.47 \quad \text{رابطه (۳)}$$

تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و شاخص‌های پوشش گیاهی

در این مطالعه، از تصاویر چندطیفی ماهواره Sentinel-2 به‌منظور استخراج متغیرهای مرتبط با پوشش گیاهی برای برآورد ذخیره کربن روی‌زمینی استفاده شد. ماهواره Sentinel-2 به‌سنجنده چندطیفی MultiSpectral Instrument مجهز است که داده‌های اپتیکی با قدرت تفکیک مکانی مناسب را برای پایش ساختار و وضعیت پوشش گیاهی فراهم می‌کند. این سنجنده شامل ۱۳ باند طیفی در محدوده مرئی، مادون‌قرمز نزدیک (NIR) و مادون‌قرمز کوتاه‌موج (SWIR) است که بسته به نوع باند، دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر است (جدول ۱). باندهای قرمز،

جدول ۱- مشخصات ماهواره Sentinel-2

Table 1. Technical specifications of the Sentinel-2 satellite imagery used in this study

هفتم مارس ۲۰۱۷ 7 March 2017	تاریخ پرتاب Launch date
Vega (Kourou)	ماهواره بر و سکوی پرتاب Satellite carrier and launch pad
۷۸۶ کیلومتر 786 Km	ارتفاع مدار Orbital height
۵ روز برای هر دو ماهواره، خورشید آهنگ days for both satellites, Sun Song ۵	دوره بازگشت Return period
۲۹۰ کیلومتر 290 Km	عرض تصویر Image width
Band 1 – Coastal aerosol, Band 2 – Blue, Band 3 – Green, Band 4 – Red, Band 5 – Vegetation Red Edge, Band 6 – Vegetation Red Edge, Band 7 – Vegetation Red Edge, Band 8 – NIR, Band 8A – Vegetation Red Edge, Band 9 – Water vapour, Band 10 – SWIR – Cirrus, Band 11 – SWIR Band 12 – SWIR	باندهای سنجنده Sensor bands
B2, B3, B4, B8: 10m B5, B6, B6, B8A, B11, B12: 20m B1, B9, B10: 60m	قدرت تفکیک مکانی Spatial resolution
۱۲ بیت 12 bits	قدرت تفکیک رادیومتری Radiometric resolution
۱۸۰-۱ نانومتر 1-180 Nanometer	قدرت تفکیک طیفی Spectral resolution

مادون‌قرمز نزدیک و Red-Edge از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات پوشش گیاهی برخوردارند، زیرا به تغییرات مقدار کلروفیل، تراکم تاج پوشش و وضعیت فیزیولوژیک گیاهان حساس هستند. انتخاب تصاویر Sentinel-2 به‌دلیل قدرت تفکیک مکانی مناسب برای مطالعات مقیاس شهری، دوره بازگشت زمانی کوتاه (حدود ۵ روز) و در دسترس بودن باندهای Red-Edge انجام شد؛ باندهایی که در پژوهش‌های پیشین، نقش مؤثری در بهبود برآورد ویژگی‌های پوشش گیاهی و زیست‌توده نشان داده‌اند. به‌منظور کاهش اثرات فصلی، تصاویر بدون پوشش ابر مربوط به ماه مرداد مورد استفاده قرار گرفتند. در مجموع، تصاویر Sentinel-2 مربوط به بازه زمانی سال ۲۰۲۱-۲۰۲۲ میلادی (همزمان با سال برداشت نمونه میدانی) انتخاب شد که کل محدوده مورد مطالعه را پوشش می‌دادند. در ادامه، شاخص‌های پوشش گیاهی از تصاویر Sentinel-2 با استفاده از بستر Google Earth Engine استخراج گردید. بر اساس اطلاعات طیفی حاصل از تصاویر Sentinel-2، مجموعه‌ای از شاخص‌های پوشش گیاهی به‌منظور توصیف سبزیگی، ساختار تاج پوشش و ویژگی‌های مرتبط با کلروفیل گیاهان محاسبه شد. این شاخص‌ها شامل شاخص‌های متداولی مانند NDVI، EVI و DVI، شاخص‌های مبتنی بر باند Red-Edge (مانند NDRE، CIRE، S2REP و REIP) و همچنین شاخص‌های پهن‌بند و تبدیلات طیفی (مانند TCB، TCG و TCW) بودند. این شاخص‌ها با سطح برگ، تراکم تاج، محتوای کلروفیل و ساختار فیزیولوژیک پوشش گیاهی مرتبط‌اند. از آنجا که زی‌توده و ذخیره کربن روی‌زمینی با این ویژگی‌های بیوفیزیکی همبستگی دارند، از شاخص‌های مذکور برای مدل‌سازی ذخیره کربن استفاده شد. در نهایت، شاخص‌های استخراج‌شده به‌عنوان متغیرهای ورودی در مدل‌های یادگیری ماشین برای برآورد ذخیره کربن روی‌زمینی مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۲).

جدول ۲- فهرست، آمار توصیفی و علائم اختصاری متغیرهای محیطی مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. The list, descriptive statistics, and abbreviation of environmental variables used in this study

Variables	Abbreviation	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	0.05	0.46	0.16	0.08
Green-Blue Difference Vegetation Index	GBDVI	0.08	0.42	0.16	0.07
Difference Vegetation Index	DVI	0.00	0.20	0.04	0.03
Enhanced Vegetation Index	EVI	-0.99	1.05	0.15	0.17
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	MCARI	0.00	0.01	0.07	0.01
Sentinel-2 Red Edge Position	S2Rep	680.58	790.42	721.48	12.62
Red Edge Inflection Point	REIP	556.61	812.06	717.57	28.42
Normalized Difference Red Edge Index	NDRE	-0.04	0.03	-0.01	0.01
Canopy Chlorophyll Content Index	CCCI	-2.75	1.37	-0.04	0.43
Chlorophyll Index Red Edge	CIRE	0.03	1.33	0.26	0.21
Chlorophyll Vegetation Index	CVI	1.28	3.17	1.65	0.34
Green Leaf Index	GLI	-0.05	0.10	0.01	0.02
Green-Red Normalized Difference Vegetation Index	GRNDVI	0.06	0.44	0.16	0.08
Blue Wide Dynamic Range Vegetation Index	BWDRVI	-0.77	-0.33	-0.6	0.08
Normalized Difference Vegetation Index using Red Edge	NDVIRE	0.01	0.33	0.096	0.06
Weighted Difference Vegetation Index	WDVI	-0.09	0.13	-0.03	0.04
Tasseled Cap Brightness	TCB	0.78	1.06	0.90	0.05
Tasseled Cap Greenness	TCG	-0.20	-0.01	-0.13	0.03
Tasseled Cap Wetness	TCW	-0.02	0.09	0.04	0.019
Tasseled Cap Angle	TCA	77.91	98.03	92.82	4.07
Tasseled Cap Distance	TCD	0.82	1.12	0.95	0.05

روش مدل‌سازی

به‌منظور برآورد ذخیره کربن روی‌زمینی، از متغیرهای استخراج‌شده از شاخص‌های پوشش گیاهی به‌عنوان متغیرهای مستقل و از مقادیر اندازه‌گیری‌شده ذخیره کربن روی‌زمینی به‌عنوان متغیر وابسته استفاده شد. در این مطالعه، چهار الگوریتم مدل‌سازی شامل جنگل تصادفی (Random Forest; RF)، ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine; SVM)، k نزدیک‌ترین همسایه (K-Nearest Neighbors; KNN) و مدل خطی تعمیم‌یافته (Generalized Linear Model; GLM) به‌کار گرفته شدند تا توانایی آن‌ها در پیش‌بینی ذخیره کربن روی‌زمینی مورد مقایسه قرار گیرد. پیش از مدل‌سازی، همبستگی بین متغیرهای مستقل (شاخص‌های پوشش گیاهی) با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد (با استفاده از بسته نرم‌افزاری corrplot در محیط نرم‌افزار R) و در مواردی که ضریب همبستگی بین دو متغیر بیش از ۰/۸ بود، یکی از آن‌ها به‌منظور کاهش هم‌خطی و جلوگیری از بیش‌برازش مدل حذف گردید. این مرحله به‌منظور افزایش پایداری مدل‌ها و بهبود تفسیرپذیری نتایج انجام شد. فرآیند آموزش و اعتبارسنجی مدل‌ها با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ تایی (10-Fold Cross-Validation) انجام گرفت. در این روش، داده‌ها به ده بخش تقسیم شدند و در هر تکرار، یک بخش برای آزمون و سایر بخش‌ها برای آموزش مدل مورد استفاده قرار گرفتند. کلیه مدل‌ها در محیط نرم‌افزار R و با استفاده از بسته نرم‌افزاری caret پیاده‌سازی شدند. به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد مدل‌ها، تنظیم فرآیندها با استفاده از روش جستجوی شبکه‌ای (Grid Search) همراه با اعتبارسنجی متقابل انجام شد. در مدل جنگل تصادفی، تعداد

درختان (ntree) و تعداد متغیرهای انتخاب‌شده در هر گره انشعاب (mtry) مورد تنظیم قرار گرفت. در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، پارامتر جریمه (Cost) و پارامتر پهنای کرنل (σ) بهینه‌سازی شدند. در روش نزدیک‌ترین همسایه، تعداد همسایه‌ها (k) تنظیم گردید. در نهایت، ترکیب پارامترهایی که کمترین مقدار خطای پیش‌بینی (بر اساس RMSE) را در فرآیند اعتبارسنجی متقابل ایجاد کردند، به‌عنوان پیکربندی نهایی هر مدل انتخاب شدند. در نهایت، اهمیت نسبی متغیرهای مورد مطالعه نیز با استفاده از بسته نرم‌افزاری caret در نرم‌افزار R محاسبه شد. در ادامه، به‌منظور ارزیابی دقت در مدل‌سازی از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، میانگین قدر مطلق خطا (Mean Absolute Error) و جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) استفاده شد (Chicco *et al.*, 2021; Valizadeh *et al.*, 2023).

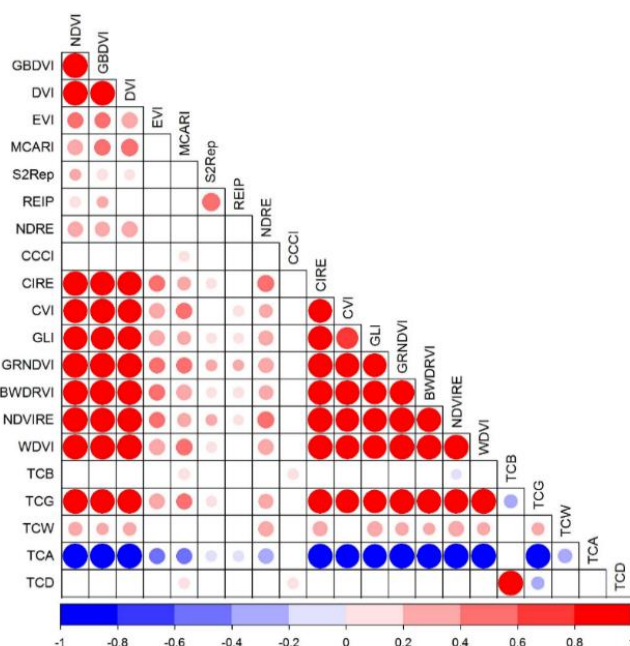
نتایج و بحث

مشخصات کمی درختان در شهر ساری

نتایج مشخصات کمی درختان شامل ارتفاع، قطر برابر سینه، سطح مقطع، حجم در هکتار و ذخیره کربن روی زمینی شهر ساری در جدول ۲ گزارش شده‌اند. پیش از مدل‌سازی، همبستگی پیرسون متغیرهای مستقل بررسی و متغیرهای با همبستگی بالا (بیشتر از ۰/۸۰) حذف شدند تا از هم‌خطی چندگانه جلوگیری شود. در نهایت، شاخص‌های گیاهی EVI، MCARI، S2Rep، REIP، NDRE، CCCI، CVI، GLI، TCB و TCW به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل‌ها انتخاب شدند (شکل ۲).

جدول ۳- مشخصات کمی درختان در شهر ساری

مشخصه Properties	میانگین ± انحراف معیار Mean ± standard deviation
تراکم درختان (اصله در هکتار) Density (tree per hectare)	616.66 ± 97.84
ارتفاع (متر) Height (m)	5.57 ± 0.25
قطر برابر سینه (سانتی‌متر) DBH (cm)	16.08 ± 0.96
سطح مقطع (متر مربع در هکتار) Basal area (square meter per hectare)	21.64 ± 6.19
حجم (متر مکعب در هکتار) Volume (cubic meters per hectare)	138.71 ± 48.07
ذخیره کربن روی‌زمینی درختان (تن در هکتار) Aboveground carbon storage (T ha-1)	36.02 ± 13



شکل ۲- نتایج همبستگی پیرسون متغیرهای مورد مطالعه (رنگ‌های قرمز و آبی به ترتیب نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار مثبت و منفی هستند و مربع‌های خالی عدم معنی‌دار بودن همبستگی را نشان می‌دهند)

Figure 2. Pearson's correlation results of the studied variables (red and blue colors indicate significant positive and negative correlations, respectively, and blank squares indicate no significant correlation).

است. مدل SVM در برخی از بخش‌ها (Folds) عملکرد قابل قبولی نشان داد و در بعضی موارد حتی R^2 بالاتری نسبت به RF به دست آورد، اما پراکندگی بسیار زیاد در مقادیر R^2 ، RMSE و MAE (به‌ویژه در RMSE که دامنه‌ای تا بیش از ۵۰ را تجربه کرد) نشان‌دهنده ناپایداری و حساسیت بالای این مدل به تقسیم‌بندی‌های مختلف داده بود. مدل‌های KNN و GLM عملکرد ضعیف‌تری نسبت به RF و حتی SVM از خود نشان دادند. مدل KNN به‌طور مداوم پایین‌ترین مقادیر R^2 (اغلب نزدیک به صفر در برخی فولدها) را داشت و مقادیر RMSE و MAE آن نیز در سطوح مشابه یا بالاتر از GLM قرار گرفتند. اگرچه مدل GLM در مقایسه با KNN اندکی بهتر عمل کرد و توزیع نسبتاً متعادل‌تری را در معیارها نشان داد، اما همچنان از نظر دقت کلی (R^2 پایین‌تر و خطاهای بالاتر) در رتبه‌های بعدی قرار گرفت.

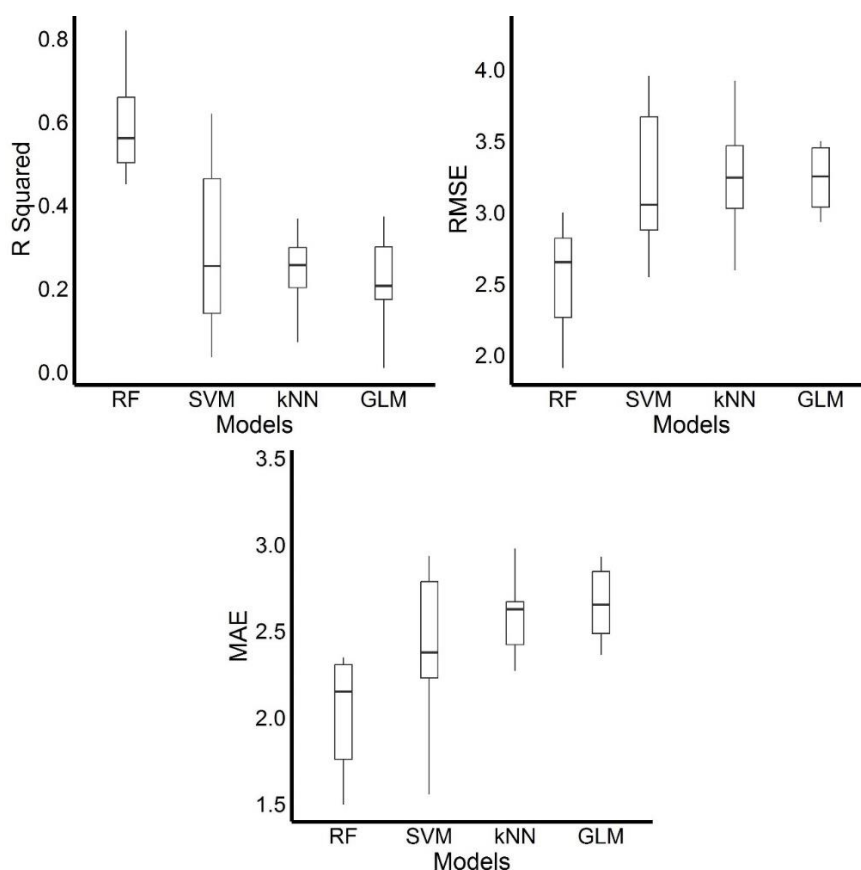
عملکرد مدل‌ها و اهمیت نسبی متغیرها

در این مطالعه، عملکرد چهار مدل یادگیری ماشین شامل RF، SVM، KNN و GLM در برآورد ذخیره کربن بالای زمینی درختان شهری در شهر ساری با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل ۱۰-تایی مقایسه شد. معیارهای ارزیابی شامل ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) بودند که نتایج آنها به‌صورت باکس‌پلات در شکل ۳ ارائه شده‌اند. نتایج نشان دادند که مدل RF به‌طور کلی بهترین عملکرد را در میان مدل‌های بررسی شده از خود نشان داد. این مدل بالاترین مقادیر میانگین توزیع R^2 را داشت و در مقایسه با سایر مدل‌ها، پراکندگی کمتری در مقادیر R^2 نشان داد که بیانگر پایداری نسبی عملکرد آن در داده‌های مختلف است. همچنین، RF پایین‌ترین مقادیر میانگین و دامنه RMSE و MAE را به دست آورد که نشان‌دهنده دقت بالاتر و خطای پیش‌بینی کمتر این مدل نسبت به سایرین

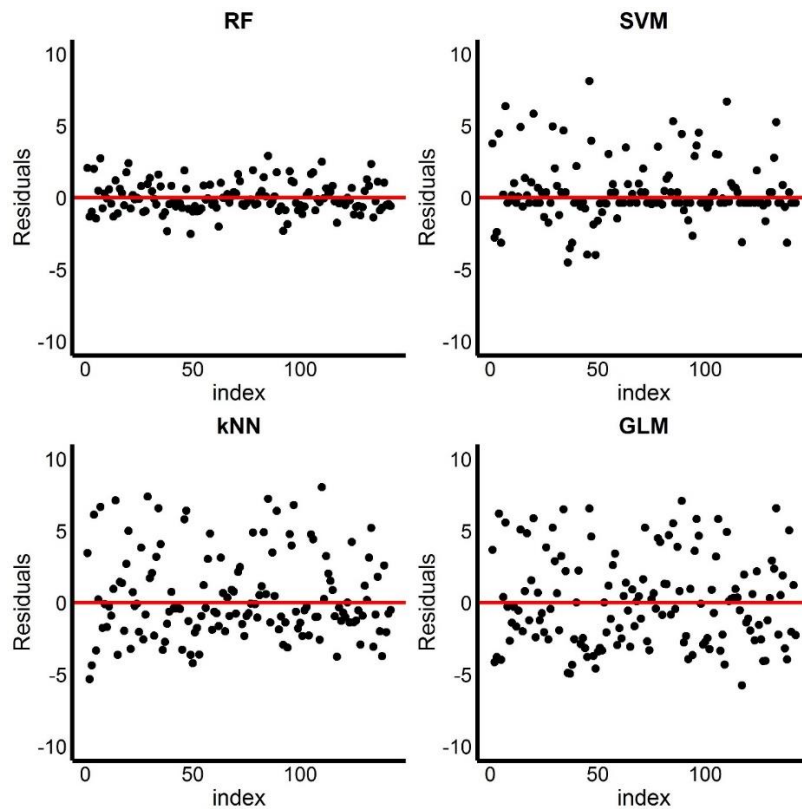
برازش‌شده شیب مناسبی دارد و به خط ۱:۱ نزدیک است. این الگو بیانگر عدم وجود بایاس سیستماتیک قابل توجه و توانایی خوب مدل در پیش‌بینی مقادیر در سراسر دامنه مشاهده‌شده است. در مقابل، مدل‌های SVM، KNN و GLM تطابق ضعیفی با خط ۱:۱ از خود نشان دادند؛ خط برازش‌شده شیب بسیار کمی دارد و تقریباً افقی است، که نشان‌دهنده تمایل شدید مدل‌ها به پیش‌بینی مقادیر پایین حتی برای نمونه‌های با مقادیر مشاهده‌شده بالا است. این رفتار حاکی از کم‌برآورد سیستماتیک شدید (underestimation) در مقادیر بزرگ‌تر و عملکرد ضعیف مدل‌ها در مدل‌سازی تغییرات بالای ذخیره کربن است. نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرها نشان دادند که شاخص S2Rep به‌طور مداوم بالاترین اهمیت را در تمام چهار مدل (SVM، KNN و GLM) داشت (شکل ۶). در مدل RF (بهترین مدل)، پس از S2Rep، شاخص‌های REIP، EVI، NDRE و CCCI در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند و اهمیت قابل توجهی (حدود ۶۰-۳۰٪) داشتند.

مدل RF بهترین توزیع باقی‌مانده‌ها را دارد؛ نقاط عمدتاً حول خط صفر پراکنده شده‌اند، و دامنه تغییرات کوچک‌تر است (شکل ۴). در مقابل، اگرچه مدل SVM در بسیاری از نقاط نزدیک به صفر باقی مانده است، اما پراکندگی بیشتری نشان می‌دهد و در برخی نمونه‌ها خطاهای بزرگ‌تر دیده می‌شوند که می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت به نمونه‌های پرت یا ناپایداری در داده باشد. مدل‌های KNN و GLM نیز هر دو پراکندگی قابل توجهی دارند؛ در KNN نقاط پرت بیشتری مشاهده می‌شود و در GLM نیز اگرچه الگوی کلی نسبتاً متعادل‌تر از KNN به نظر می‌رسد، اما هم‌چنان مواردی از خطاهای بزرگ و عدم تقارن کامل حول صفر وجود دارند.

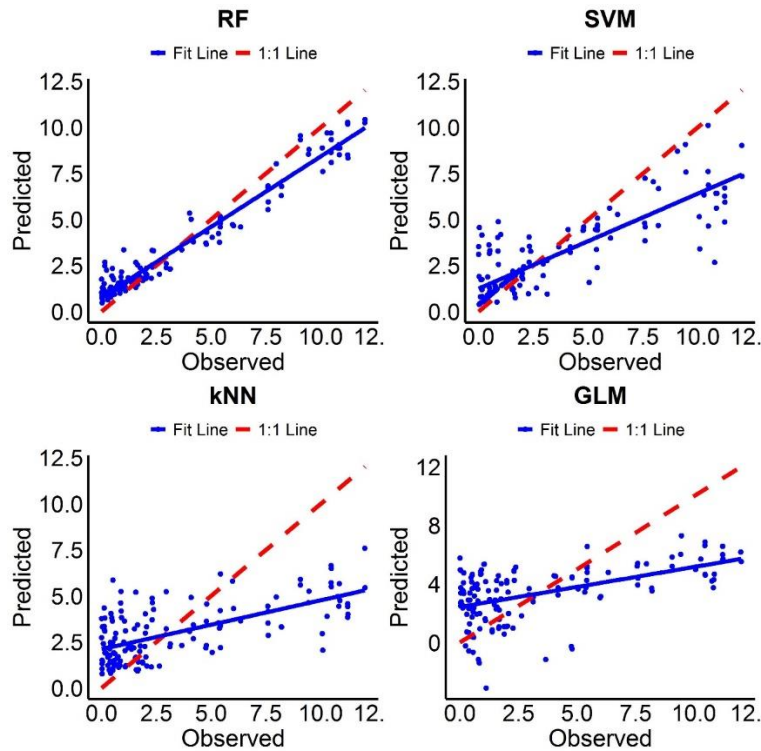
عملکرد مدل‌ها از طریق نمودارهای پراکندگی مقادیر مشاهده‌شده (Observed) در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده (Predicted) ارزیابی شد (شکل ۵). خط قرمز نقطه‌چین نشان‌دهنده خط ایده‌آل ۱:۱ (یعنی پیش‌بینی کاملاً دقیق) و خط آبی پیوسته خط رگرسیون برازش‌شده (Fit Line) بر روی نقاط داده است. مدل RF بهترین تطابق را با خط ۱:۱ نشان داد؛ نقاط داده عمدتاً در دو طرف خط ایده‌آل پراکنده شده‌اند، خط



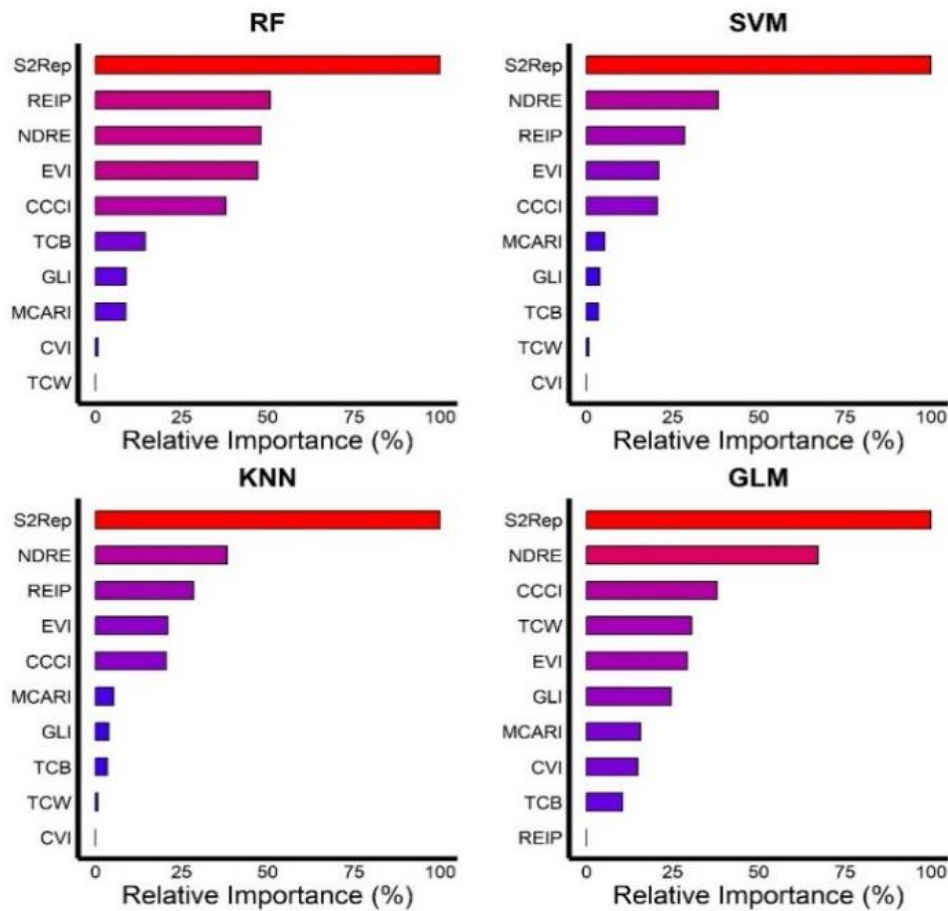
شکل ۳- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های مورد مطالعه با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع
Figure 3. Evaluation metrics of the applied models using cross-validation



شکل ۴- مقادیر باقیمانده‌های مدل‌های مورد استفاده در پیش‌بینی ذخیره کربن روی زمینی در شهر ساری
Figure 4. Residual values of the applied models in predicting aboveground carbon storage in Sari city.



شکل ۵- مقادیر واقعی و برآوردی مدل‌های مورد استفاده در پیش‌بینی ذخیره کربن روی زمینی در شهر ساری
Figure 5. Observed versus predicted values of aboveground carbon storage obtained from the applied models in Sari city.



شکل ۶- اهمیت نسبی متغیرهای محیطی مورد بررسی برای مدل‌های مختلف (محور X اهمیت متغیرها و محور Y متغیرها هستند)
 Figure 6. Relative importance of the environmental variables under study for different models (X-axis the importance of the variables and Y-axis the variables)

که پارک‌های شهری با پوشش گیاهی متراکم‌تر، توانایی بالاتری در ترسیب کربن داشتند. در پژوهش دیگری، محمودی و همکاران (Mahmoudi *et al.*, 2021) در پارک جنگلی لویزان تهران مشاهده کردند که گونه‌های مختلف درختی تأثیر متفاوتی بر ذخیره کربن داشتند و گونه‌هایی مانند کاج تهران بیشترین میزان ترسیب را نشان دادند.

در این مطالعه، مدل RF به‌طور قابل توجهی عملکرد بهتری را نسبت به مدل‌های SVM، KNN و GLM در برآورد ذخیره کربن بالای زمینی درختان شهری شهر ساری نشان داد. این برتری در معیارهای ارزیابی (بالاترین R^2 ، پایین‌ترین RMSE و MAE)، توزیع باقی‌مانده‌ها (پراکندگی کم و نزدیک به صفر بدون الگوی سیستماتیک) و نمودارهای مقادیر برآوردی در مقابل مقادیر واقعی (تطابق نزدیک‌تر با خط ۱:۱ و عدم بایاس سیستماتیک در دامنه‌های مختلف) مشهود بود. RF به‌دلیل توانایی بالای خود در مدیریت روابط غیر خطی پیچیده، مقاومت در برابر نویز و بیش‌برازش، و عملکرد خوب در داده‌های با ابعاد بالا (high-dimensional) مانند شاخص‌های گیاهی Sentinel-2 (شامل باندهای red-edge) به‌عنوان بهترین الگوریتم در این پژوهش ظاهر شد. این یافته با مطالعات متعدد در زمینه برآورد بیوماس بالای زمینی (AGB) و ذخیره کربن جنگلی هم‌خوانی دارد؛ برای مثال، در برآورد AGB جنگل‌های

در این پژوهش، میزان بالای ترسیب کربن در شهر ساری مشاهده شد که عمدتاً به حضور غالب درختان چنار کهن‌سال در فضای سبز شهری نسبت داده می‌شود. چنار به‌دلیل چگالی بالای چوب خود، ظرفیت ذخیره‌سازی کربن بیشتری نسبت به بسیاری از گونه‌های دیگر دارد (Heidarian & Ghasemi, 2020). اگرچه درختان جوان معمولاً سرعت ترسیب کربن بالاتری دارند، درختان مسن‌تر نیز در بلندمدت حجم بیشتری از کربن را به‌صورت پایدار ذخیره می‌کنند (Stephenson *et al.*, 2014). درختان از طریق فتوسنتز دی‌اکسید کربن را جذب و در بیوماس و خاک تثبیت می‌کنند. گونه‌های تندرشد در مراحل اولیه زندگی به‌دلیل سرعت بالای تولید بیوماس، کربن بیشتری را ذخیره می‌کنند (Eslamdoust & Sohrabi, 2018)، در حالی که گونه‌های کندرشد مانند چنار به‌دلیل تراکم بالای چوب، در دوره‌های طولانی‌تر پتانسیل ذخیره‌سازی بیشتری دارند (Vieira *et al.*, 2017). نتایج این مطالعه با یافته‌های پیشین هم‌خوانی دارند. برای مثال، ورامش و همکاران (Varamesh *et al.*, 2013) نشان دادند که جنگل‌کاری با گونه‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ در پارک جنگلی چیتگر، ترسیب کربن خاک را به‌طور قابل توجهی افزایش داد. همچنین، قاسمی آقباش و حیدریان (Ghasemi Aghbash & Heidarian, 2020) گزارش کردند

به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته‌تر، به‌ویژه مدل‌های یادگیری ماشین، دقت برآورد زی‌توده و کربن را به‌طور قابل توجهی افزایش داده‌اند (Ali et al., 2025; Gheysarbeigi et al., 2024). وجود باندهای red-edge در Sentinel-2 امکان توصیف بهتر وضعیت فیزیولوژیک پوشش گیاهی و ساختار تاج را فراهم کرده است و موجب بهبود عملکرد مدل‌ها نسبت به تصاویر با تفکیک طیفی محدودتر شده است. یافته‌های این مطالعات، مشابه نتایج تحقیق حاضر، نشان می‌دهند که شاخص‌های گیاهی مبتنی بر باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و red-edge نقش کلیدی را در پیش‌بینی ذخیره کربن روی زمینی ایفا می‌کنند. همچنین، مقایسه مدل‌ها در مطالعات مختلف نشان می‌دهد که الگوریتم‌های غیر خطی مانند جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان، به‌دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیر خطی بین متغیرهای طیفی و زیستی، معمولاً عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های خطی کلاسیک دارند (Peng et al., 2023; Zhou et al., 2025). با این حال، نتایج برخی مطالعات شهری و جنگل‌کاری (Mirrajabi et al., 2016) نشان می‌دهند که در مقیاس‌های کوچک و با ساختار پوشش گیاهی ساده‌تر، مدل‌های خطی نیز می‌توانند برآوردهای قابل قبولی ارائه دهند. این موضوع اهمیت انتخاب مدل متناسب با هدف مطالعه، مقیاس مکانی و پیچیدگی ساختار پوشش گیاهی را برجسته می‌کند.

نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرها نشان دادند که در همه مدل‌ها شاخص S2Rep دارای بالاترین اهمیت بود. شاخص S2Rep که موقعیت نقطه عطف red-edge را تخمین می‌زند، حساسیت بالایی را به محتوای کلروفیل، وضعیت رشد و سلامت پوشش گیاهی نشان می‌دهد و بنابراین بهترین پیش‌بینی‌کننده ذخیره کربن بالای زمینی درختان شهری در شهر ساری بود (Ali et al., 2022). این الگو تأیید می‌کند که باندهای red-edge Sentinel-2 (به‌ویژه شاخص‌های مرتبط با آن‌ها) نقش کلیدی را در مدل‌سازی روابط غیر خطی بین پوشش گیاهی و ذخیره کربن ایفا می‌کنند، زیرا این باندها نسبت به شاخص‌های سنتی (مانند NDVI) کمتر دچار اشباع (saturation) می‌شوند و اطلاعات دقیق‌تری را از محتوای کلروفیل و ساختار تاج ارائه می‌دهند. به‌طور کلی، برتری شاخص‌های red-edge-محور (S2Rep, REIP, NDRE) در تمام مدل‌ها، به‌ویژه در RF، با یافته‌های مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهند این شاخص‌ها دقت برآورد بیوماس و ذخیره کربن را در محیط‌های جنگلی و شهری بهبود می‌بخشند، زیرا حساسیت بالاتری به تغییرات کلروفیل و ساختار تاج دارند و مشکل اشباع در پوشش‌های متراکم (مانند درختان کهن‌سال چنار) را کاهش می‌دهند (Gao et al., 2024; Wang et al., 2025).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج‌شده از تصاویر Sentinel-2 در ترکیب با مدل‌های یادگیری ماشین، رویکردی کارآمد و قابل اعتماد برای برآورد ذخیره کربن روی‌زمینی درختان شهری است. در

صنوبر-نراد با استفاده از داده‌های GEDI، RF عملکرد بهتری نسبت به SVM و KNN داشت و پیش‌بینی‌های نزدیک‌تری را به مقادیر واقعی ارائه کرد. همچنین، در محیط‌های شهری و جنگل‌های بازسازی‌شده، RF اغلب دقت مناسبی را نشان می‌دهد. هر چند که در برخی از پژوهش‌ها XGBoost یا مدل‌های ترکیبی برتر بودند، اما در شرایط داده‌های نویزی یا نمونه‌های محدود (مانند جنگل‌های شهری با تنوع گونه‌ای و ساختار ناهمگن)، RF تعادل خوبی بین تعمیم‌پذیری و دقت برقرار می‌کند. عملکرد بهتر مدل جنگل تصادفی (RF) را می‌توان به توانایی بالای آن در پردازش داده‌های پیچیده، شناسایی روابط غیرخطی و مدیریت داده‌های پرت نسبت داد. این مدل با تنظیم حداقل پارامترها پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه می‌دهد (Probst et al., 2019) و با نمونه‌برداری تکراری و تصادفی از داده‌ها، از برازش بیش‌ازحد جلوگیری می‌کند (Breiman, 2001; Catani et al., 2013). افزون بر این، RF قادر است تا تعاملات پیچیده بین عوامل اقلیمی، محیطی و توپوگرافی را در برازش مدل لحاظ کند و تخمین دقیقی را از اهمیت متغیرها ارائه دهد (Pecchi et al., 2019).

مدل SVM، اگرچه در روابط غیر خطی قوی است، اما در این مطالعه پراکندگی بالا در باقی‌مانده‌ها و تمایل به کم‌برآورد سیستماتیک (به‌ویژه در مقادیر بالای ذخیره کربن) را نشان داد که می‌تواند ناشی از حساسیت به انتخاب کرنل و نیاز به تنظیم دقیق‌تر پارامترها باشد. مدل KNN نیز به‌دلیل وابستگی به نمونه‌های نزدیک و ناتوانی در تعمیم به مقادیر افراطی (مانند درختان کهن‌سال چنار با ذخیره کربن بالا)، عملکرد ضعیف‌تری داشت. GLM به‌عنوان یک مدل خطی، روابط پیچیده غیر خطی داده‌های گیاهی را به‌خوبی مدل‌سازی نکرد و در رتبه پایین‌تر قرار گرفت. با توجه به این که این پژوهش یکی از نخستین مطالعات مدل‌سازی یادگیری ماشین برای برآورد ذخیره کربن درختان شهری در شهر ساری است، نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای RF در کاربردهای عملی شهری است؛ جایی که داده‌های میدانی محدود، تنوع گونه‌ای بالا (به‌ویژه غالب بودن چنار کهن‌سال) و عوامل محیطی ناهمگن وجود دارند. این الگوریتم نه‌تنها دقت بالاتری را ارائه داد، بلکه پایداری بیشتری را در اعتبارسنجی متقابل ۱۰ تایی نشان داد.

نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین در زمینه برآورد ذخیره کربن و زی‌توده روی زمینی با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و مدل‌های آماری و یادگیری ماشین هم‌راستا است. میر رجبی و همکاران (Mirrajabi et al., 2016) در یکی از نخستین مطالعات انجام‌شده در جنگل‌کاری‌های شهری ایران نشان دادند که حتی با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا (GeoEye-1)، شاخص‌های پوشش گیاهی به‌ویژه NDVI و باند مادون قرمز نزدیک (NIR) همبستگی قابل قبولی با ذخیره کربن روی‌زمینی داشتند. این نتایج بیانگر آن هستند که اطلاعات طیفی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند به‌عنوان جایگزینی مناسب یا مکمل برداشت‌های میدانی پرهزینه و زمان‌بر مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه مسیر این مطالعات، پژوهش‌های جدیدتر با بهره‌گیری از داده‌های Sentinel-2 و

درختان بالغ، و برنامه‌ریزی توسعه فضای سبز با هدف کاهش اثرات تغییر اقلیم کمک کنند. با این حال، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، از داده‌های چندمنبعی نظیر LiDAR شهری، تصاویر راداری Sentinel-1، متغیرهای ساختاری و مدیریتی درختان، و همچنین مدل‌های پیشرفته‌تر یا هیبریدی (مانند XGBoost، deep learning و ensemble models) استفاده شود تا دقت برآوردها افزایش و عدم قطعیت‌ها کاهش یابند. این مسیر می‌تواند چارچوبی دقیق‌تر و عملی‌تر را برای ارزیابی پتانسیل کربن‌زدایی شهرها در مقیاس محلی و منطقه‌ای فراهم آورد.

میان مدل‌های بررسی شده، الگوریتم RF با ارائه بالاترین دقت، کمترین خطای پیش‌بینی و پایداری بیشتر در اعتبارسنجی متقابل، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای شرایط ناهمگن جنگل‌های شهری شهر ساری شناخته شد. برتری شاخص‌های مبتنی بر باند red-edge، به‌ویژه S2Rep، REIP و NDRE، نشان‌دهنده نقش کلیدی اطلاعات طیفی مرتبط با کلروفیل و ساختار تاج در مدل‌سازی ذخیره کربن در محیط‌های شهری، به‌خصوص در حضور درختان کهن‌سال با تاج متراکم، است. یافته‌های این مطالعه از منظر کاربردی می‌توانند به مدیران شهری در پایش مکانی ذخیره کربن، اولویت‌بندی حفاظت از

References

- Alazmani, M., Hojjati, S.M., Waez-Mousavi, S.M., & Tafazoli, M. (2021). Effect of alder plantation age on soil carbon sequestration. *Forest Research and Development*, 7(2), 279-291. [In Persian]
- Ali, A., Imran, M., Ali, A., & Khan, M.A. (2022). Evaluating Sentinel-2 red edge through hyperspectral profiles for monitoring LAI & chlorophyll content of Kinnow Mandarin orchards. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26, 100719.
- Ali, H. & Mohammadi, J. (2023). Estimation of above-ground biomass of Arabdagh reforested stands, Golestan province using Sentinel-2 satellite data. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 30(4), 93-110.
- Ali, J., Haoran, W., Mehmood, K., Hussain, W., Iftikhar, F., Shahzad, F., Hussain, K., Qun, Y., & Zhongkui, J. (2025). Remote sensing and integration of machine learning algorithms for above-ground biomass estimation in *Larix principis-rupprechtii* Mayr plantations: a case study using Sentinel-2 and Landsat-9 data in northern China. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1577298.
- Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), 293-301.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- Cannell, M. G. R. (2003). Carbon sequestration and biomass energy offset theoretical, potential and achievable capacities globally in Europe and UK. *Biomass and Bioenergy*, 24, 97-116.
- Castillo, J. A. A., Apan, A. A., Maraseni, T. N., & Salmo III, S. G. (2017). Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134, 70-85.
- Catani, F., Lagomarsino, D., Segoni, S. & Tofani, V. (2013). Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2815-2831.
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623.
- Eslamdoust, J., & Sohrabi, H. (2018). Carbon storage in biomass, litter, and soil of different native and introduced fast-growing tree plantations in the South Caspian Sea. *Journal of Forestry Research*, 29, 449-457.
- Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., ... & Zeng, J. (2024). Global carbon budget 2024. *Earth System Science Data Discussions*, 2024, 1-133. <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>.
- Gao, S., Yan, K., Liu, J., Pu, J., Zou, D., Qi, J., Mu, X. & Yan, G. (2024). Assessment of remote-sensed vegetation indices for estimating forest chlorophyll concentration. *Ecological Indicators*, 162, 112001.
- 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.
- Greener, J.G., Kandathil, S.M., Moffat, L. & Jones, D.T. (2022). A guide to machine learning for biologists. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 23(1), 40-55.
- Heidarian, Sh., & Ghasemi Aghbash, F. (2020). Study of Carbon sequestration in trees and soil in two urban parks of Kohdasht City. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(1), 215-225. [In Persian]
- Hojjati, S.M., Hashemi, S.A., Hosseyni, S.M., Asadiyan, M., & Tafazoli, M. (2020). The Effect of plantation with native and exotic species on soil CO₂ emissions (The case study: Darabkola forest). *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 8(16), 95-110. [In Persian]
- Hojjati, S. M., Tafazoli, M., Asadian, M., & Baluce, A. (2022). Estimation of carbon sequestration and forest soil respiration using machine learning models in Eastern Forests of Mazandaran Province. *Forest Research and Development*, 8(4), 371-388. [In Persian]

- Hojjati, S. M., Tafazoli, M., Imani, M., Alazmani, M., Fallah, A., & Pourmajidian, M. R. (2023b). Variation in carbon sequestration and soil properties in relation to stand age in maple and alder plantations. *Journal of Sustainable Forestry*, 42(6), 640-654.
- Kamer Aksoy, Ö. (2022). Predicting the Potential Distribution Area of the *Platanus orientalis* L. in Turkey Today and in the Future. *Sustainability*, 14(18), p11706.
- Ly, H. B., Asteris, P. G. & Pham., T. B. (2021). Accuracy assessment of extreme learning machine in predicting soil compression coefficient. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 42(3), 228-336.
- Mahmoudi, M., Ramezani Kakroudi, E., Banj Shafiei, A., Salehi, A., Pato, M., & Hoseinzadeh, O. (2021). The study of soil carbon storage in Lavizan Forest Park, Tehran. *Forest Research and Development*, 7(2), 327-342.
- Mi, C., Huettmann, F., Guo, Y., Han, X., & Wen, L. (2017). Why choose Random Forest to predict rare species distribution with few samples in large undersampled areas? Three Asian crane species models provide supporting evidence. *PeerJ*, 5, e2849. DOI 10.7717/peerj.2849.
- 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.
- Namiranian, M. (2007). Measurement of tree and forest biometry. Tehran University Publications, 574p. [In Persian]
- Nedkov, S., Zhiyanski, M., Nikolova, M., Gikov, A., Nikolov, P., & Todorov, L. (2016, September). Mapping of carbon storage in urban ecosystems: a Case study of Pleven District, Bulgaria. In *Proceedings, Scientific conference Geographical aspects of land use and planning under climate change*. Varshets, Bulgaria, 23, 09-25.
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*, 178, 229-236.
- Nowak, D.J., & Crane, D.E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental pollution*, 116(3), 381-389.
- Nowak, D.J., & Greenfield, E.J. (2012). Tree and impervious cover change in US cities. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11(1), 21-30.
- Osabohien, R., Matthew, O., Aderounmu, U., & Olawande, T. (2019). Greenhouse gas emissions and crop production in West Africa: Examining the mitigating potential of social protection. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(1), 57.
- Pecchi, M., Marchi, M., Burton, V., Giannetti, F., Moriondo, M., Bernetti, I., Bindi, M., & Chirici, G. (2019). Species distribution modelling to support forest management. A literature review. *Ecological Modelling*, 411, 108817.
- Peng, J., Zeiner, N., Parsons, D., Féret, J.B., Söderström, M., & Morel, J. (2023). Forage biomass estimation using Sentinel-2 Imagery at high latitudes. *Remote Sensing*, 15(9), 2350.
- Probst, P., Wright, M. N., & Boulesteix, A. L. (2019). Hyperparameters and tuning strategies for random forest. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 9(3), e1301.
- Reinaud, J., 2008. Issues behind competitiveness and carbon leakage. *Focus on Heavy Industry. Paris: IEA. IEA Information Paper*, 2.
- Shayesteh, K., Gharibi, Sh., & Attaiean, B. (2021). Estimation of greenhouse gases emissions from urban traffic: a case study of Hamadan city. *Iranian Journal of Health and Environment*, 13(4), 653-68.
- Srivastava, A. K., Gaiser, T., Paeth, H., & Ewert, F. (2012). The impact of climate change on Yam (*Dioscorea alata*) yield in the savanna zone of West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 153, 57-64.
- Stephenson, N. L., Das, A. J., Condit, R., Russo, S. E., Baker, P. J., Beckman, N. G., ... & Zavala, M.A. (2014). Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature*, 507(7490), 90-93.
- Strohbach, M. W., Arnold, E., & Haase, D. (2012). The carbon footprint of urban green space- A life cycle approach. *Landscape and Urban Planning*, 104(2), 220-229.
- Tafazoli, M., Attarod, P., Hojjati, S. M., & Tafazoli, M. (2020). Throughfall Chemistry of Persian Maple (*Acer velutinim*) and Turkish Pine (*Pinus brutia*) Plantations in East of Mazandaran. *Ecology of Iranian Forest*, 7(14), 39-47.
- Vahedi, A. A., & Mattagi, A. (2014). Amount of carbon sequestration distribution associated with oak tree's (*Quercus castaneifolia* CA May) bole in relation to physiographical units of Hyrcanian natural forests of Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(4), 716-728.
- Valizadeh, E., Asadi, H., Jaafari, A., & Tafazoli, M. (2023). Machine learning prediction of tree species diversity using forest structure and environmental factors: a case study from the Hyrcanian forest, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1334.
- Varamesh, S., Hoseini, S. M., & Abdi, N. (2011). Estimating potential of urban forests for atmospheric carbon sequestration. *Journal of Environmental Studies*, 37(57), 113-120.
- Varamesh, S., Hosseini, S. M., & Sefidi, K. (2013). Evaluation of the amount of carbon sequestration in biomass, litter and soil of acacia and silver cedar stands around Tehran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 16(4), 396-404.

- Vieira, S., Trumbore, S., Camargo, P. B., Selhorst, D., Chambers, J. Q., Higuchi, N., & Martinelli, L. A. (2005). Slow growth rates of Amazonian trees: consequences for carbon cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(51), 18502-18507.
- Wang, X., Gan, Y., Iio, A., & Wang, Q. (2025). Using vegetation indices developed for sentinel-2 multispectral data to track spatiotemporal changes in the leaf area index of temperate deciduous forests. *Geomatics*, 5(1), 11.
- Wu, L., Wang, L., Shi, C., & Yin, D. (2022). Detecting mangrove photosynthesis with solar-induced chlorophyll fluorescence. *International Journal of Remote Sensing*, 43(3), 1037-1053.
- Zhou, H., Shariff, A. R. M., Bejo, S. K., Jahari, M., Mohd Shafri, H. Z. B., Omar, H. B., Nordin, L., Trisasongko, B., & Takeuchi, W. (2025). Estimating Mangrove Aboveground Biomass Using Sentinel-2 and ALOS-2 Imagery: A Case Study of the Matang Mangrove Reserve, Malaysia. *Forests*, 16(10), 1517.