

Research Paper

Development of volume tables for *Populus nigra* L. using a non-destructive sampling in the West Azerbaijan province of Iran

Reza Akhavan¹, Majid Pato^{*2}, Mohamad Hosein Sadegh Zadeh Hallaj³ and Jalal Henareh⁴

1- Associate Professor, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, I. R. Iran. (akhavan@rifr-ac.ir)

2,*- (Corresponding author) Assistant Professor, Forests and Rangelands Research Department, West Azerbaijan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Urmia, I. R. Iran. (m.pato@areeo.ac.ir)

3- Senior research expert, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, I. R. Iran. (h_sadeqzade@gmail.com)

4- Assistant Professor, Forests and Rangelands Research Department, West Azerbaijan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Urmia, I. R. Iran. (jhenareh@gmail.com)

Received: 06 September 2022

Revised: 05 November 2025

Accepted: 08 December 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Given the restrictions on wood imports and the implementation of conservation policies in Iran, the expansion of poplar plantations has become a strategic imperative. West Azerbaijan province, ranking third in cultivation area, serves as a key hub for this industry; however, the lack of precise volume models remains a significant barrier to the scientific management of these resources. This study aimed to develop volume tables for the black poplar species (*Populus nigra* L.) using non-destructive methods. By providing a tool for accurate volume estimation and economic planning, this research not only strengthens wood self-sufficiency but also provides the necessary foundation for regional policy-making and the sustainable management of wood farming.

Material and Methods: In the first phase of this study, major *Populus nigra* stands were identified across the province, and 57 sample trees were selected from five distinct stands in the districts of Shahindezh, Urmia, and Khoy. A stratified random sampling approach was employed, focusing on diameter classes ranging from 10 to 30 cm, with five trees selected from different stands for each class. To estimate volume non-destructively, the diameter at breast height (DBH) and total height were measured. Additionally, upper-stem diameters were recorded at 2-meter intervals (up to a minimum diameter of 5 cm) on standing trees using a Leica D810 laser distance meter. The actual volume of the segments and the total trunk volume were then calculated using Smalian's formula. To validate the accuracy of the laser measurements, 13 trees scheduled for felling were measured both before (using the Leica device) and after cutting (using a caliper), and the results were compared via a paired t-test, which confirmed the reliability of the non-destructive measurements. Finally, non-linear regression models, including seven single-factor (DBH-based) and nine two-factor (DBH and height-based) models, were fitted to the data. Model performance was evaluated using standard statistical indices, including the Akaike Information Criterion (AIC), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), and the

Willmott Index (WI), to select the optimal model. This systematic approach ensures high precision in predicting the standing volume of poplar plantations in the region.

Results: The results indicated that for the 57 selected trees, the mean diameter at breast height (DBH) was 19.9 cm, the mean total height was 17.9 m, and the mean actual trunk volume was 0.29 m³. The paired t-test demonstrated no significant difference between the diameter measurements obtained by the caliper and the Leica device, confirming that both instruments perform identically in measuring diameter. Based on the evaluation criteria for ranking the models, the Hohenadl-Krenn model was identified as the best-performing single-factor model, while the Takata model was the superior two-factor model. Consequently, these models were utilized to develop the single-factor and two-factor volume tables for *Populus nigra* L., respectively.

Conclusion: This research demonstrates that non-destructive methods are efficient tools for accurately collecting the parameters necessary for volume estimation while preserving tree health and preventing unnecessary felling. This approach not only reduces inventory costs and time but also enables continuous monitoring and optimized management of poplar plantations. Given that West Azerbaijan province possesses significant potential for poplar wood farming, access to accurate volume tables is vital for managerial and economic planning. Ultimately, by providing precise volume tables and emphasizing non-destructive techniques, this study represents a major step toward the sustainable management of poplar plantations in West Azerbaijan. It is expected that these findings will serve as a basis for informed and strategic decision-making in the expansion of wood farming, contributing to the achievement of sustainable development goals for natural resources.

Keywords: Standing volume, Diameter classes, Black poplar, Hohenadl-Krenn model, Takata model.

How to Cite This Article: Akhavan, R., Pato, M., Sadegh Zadeh Hallaj, M. H., and Henareh, J. (2026). Development of volume tables for *Populus nigra* L. using a non-destructive sampling in the West Azerbaijan province of Iran. Forest Research and Development, 12(1), 41-63. DOI: [10.30466/jfrd.2025.56475.1778](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.56475.1778)



Copyright ©2024 Akhavan et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

تهیه جداول حجم برای صنوبر تبریزی (*Populus nigra L.*) به روش غیرمخرب در استان آذربایجان غربی

رضا اخوان^۱، مجید پاتو^{۲*}، محمدحسین صادقزاده حلاج^۳ و جلال هناره^۴

- ۱- دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. (akhavan@rifr-ac.ir)
- ۲- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. (m.pato@areeo.ac.ir)
- ۳- کارشناس ارشد پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. (h_sadeqzade@gmail.com)
- ۴- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. (jhenareh@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

چکیده

مقدمه و هدف: با توجه به محدودیت واردات چوب و سیاست‌های حفاظتی در ایران، توسعه زراعت صنوبر ضرورتی راهبردی یافته است. آذربایجان غربی با کسب رتبه سوم سطح زیر کشت، قطب کلیدی این صنعت محسوب می‌شود؛ با این حال، فقدان مدل‌های حجمی دقیق برای مدیریت علمی این منابع یک خلأ جدی است. این پژوهش با هدف تدوین جداول حجم برای گونه تبریزی (*Populus nigra L.*) با استفاده از روش‌های غیرمخرب انجام شد. این پژوهش با ارائه ابزاری برای برآورد دقیق حجم و برنامه‌ریزی اقتصادی، علاوه بر تقویت خودکفایی در تولید چوب، زیربنای لازم برای سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای و مدیریت پایدار زراعت چوب را فراهم می‌آورد.

مواد و روش‌ها: در گام نخست، پس از شناسایی توده‌های اصلی صنوبرکاری در سطح استان، تعداد ۵۷ اصله درخت نمونه در پنج توده مختلف واقع در شهرستان‌های شاهین‌دژ، ارومیه و خوی انتخاب شدند. فرآیند انتخاب درختان بر اساس روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی‌شده-تصادفی در طبقات قطری ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد، به طوری که در هر طبقه، پنج درخت از توده‌های مختلف انتخاب شد. برای برآورد حجم به روش غیرمخرب، قطر برابر سینه و ارتفاع کل درختان اندازه‌گیری شد. همچنین قطر تنه در فواصل دو متری (تا قطر حداقل ۵ سانتی‌متر) با استفاده از دستگاه فاصله‌سنج لیزری لایکا (مدل D810) به صورت سرپا ثبت شد. حجم واقعی قطعات و در نهایت حجم کل تنه هر درخت با بهره‌گیری از فرمول اسمالین محاسبه شد. برای اعتبارسنجی دقت دستگاه لیزری، ۱۳ اصله درخت منتخب پیش از قطع با دستگاه لایکا و پس از

قطع با کالیپر اندازه‌گیری شدند و نتایج با استفاده از آزمون تی-جفتی مورد مقایسه قرار گرفتند که صحت اندازه‌گیری‌های غیرمخرب را تأیید کرد. در مرحله نهایی، برای تدوین جداول حجم، همبستگی میان متغیرهای قطر، ارتفاع و حجم واقعی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی تحلیل شد. در این راستا، هفت مدل یک‌عامله (مبتنی بر قطر برابر سینه) و نه مدل دوعامله (مبتنی بر قطر و ارتفاع) مورد برازش قرار گرفتند. ارزیابی عملکرد و انتخاب بهینه‌ترین مدل‌ها جهت برآورد حجم، بر اساس شاخص‌های آماری معتبر شامل معیار اطلاعات آکایک (AIC)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب کارایی نش-سانتکلیف (NSE) و شاخص توافق ویلموث (WI) انجام شد. این رویکرد سیستماتیک، دقت بالایی را در پیش‌بینی موجودی حجمی صنوبرکاری‌های منطقه تضمین می‌کند.

یافته‌ها: براساس نتایج، میانگین قطر در ارتفاع برابر سینه ۵۷ درخت منتخب برابر ۱۹/۹ سانتی‌متر، میانگین ارتفاع کل ۱۷/۹ متر و میانگین حجم واقعی تنه آنها ۰/۲۹ مترمکعب بود. نتایج آزمون تی جفتی نشان داد که تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده قطرهای متناظر بین دو دستگاه کالیپر و لایکا معنی‌دار نیست، به عبارت دیگر دو دستگاه برای اندازه‌گیری قطر یکسان عمل می‌کنند. نتایج مربوط به رتبه‌بندی مدل‌های مورد استفاده برای تهیه جداول حجم یک‌عامله و دوعامله برای گونه تبریزی با استفاده از معیارهای در نظر گرفته شده نشان داد که در بین مدل‌های یک‌عامله، مدل Hohenadl_Krenn و در بین مدل‌های دوعامله، مدل Takata بهترین مدل است که به ترتیب از آنها برای تهیه جداول حجم یک‌عامله و دوعامله استفاده شد.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان داد که روش‌های غیرمخرب با حفظ سلامت درختان و جلوگیری از قطع غیرضروری، ابزاری کارآمد برای جمع‌آوری دقیق مشخصه‌های لازم برای برآورد حجم هستند. این رویکرد ضمن کاهش هزینه‌ها و زمان آماربرداری، امکان پایش مستمر و مدیریت بهینه صنوبرکاری‌ها را فراهم می‌آورد. با توجه به اینکه استان آذربایجان غربی ظرفیت زیادی برای زراعت چوب صنوبر دارد، دسترسی به جداول دقیق حجم برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و اقتصادی بسیار حیاتی است. در نهایت می‌توان بیان کرد که این پژوهش با ارائه جداول حجم دقیق و تأکید بر روش‌های غیرمخرب، گام مهمی در راستای مدیریت پایدار صنوبرکاری‌ها در استان آذربایجان غربی برداشته و امید است که نتایج این بررسی، مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه و راهبردی در زمینه توسعه زراعت چوب در این استان باشد تا به تحقق اهداف توسعه پایدار منابع طبیعی کمک کند.

واژه‌های کلیدی: حجم سرپا، طبقات قطری، صنوبر سیاه، مدل Hohenadl_Krenn، مدل Takata.

گیلان، مازندران و گلستان بوده، اما در دهه اخیر استان‌هایی مانند آذربایجان غربی، کردستان و زنجان نیز به استان‌های هدف توسعه صنوبرکاری افزوده شده‌اند (Hosein Zadeh, 2015). استان آذربایجان غربی با برخورداری از شرایط خاص توپوگرافی، منابع آبی داخلی و اقلیم نیمه‌خشک و کوهستانی از استان‌های دارای تنوع بوم‌شناسی زیاد است. شهرستان‌هایی مانند میاندوآب، شاهین‌دژ، ارومیه، نقده، سلماس و خوی از مهم‌ترین مراکز صنوبرکاری در این استان به‌شمار می‌روند. این استان با دارا بودن ۳۲۳۷ هکتار سطح زیر کشت صنوبر پس از استان‌های گیلان و آذربایجان شرقی دارای رتبه سوم در کشور است (Mirakhorlou, 2020). در این استان به‌طور غالب دو گونه تبریزی (*P. nigra L.*) و کبوده (*P. alba L.*) در عملیات زراعت چوب و بیشه‌زراعتی کشت می‌شوند. فراوانی گونه تبریزی بیشتر در مناطق مرکزی و شمالی استان شامل شهرستان‌های ارومیه و خوی و فراوانی گونه کبوده بیشتر در نواحی جنوب و جنوب شرقی، به‌ویژه در شهرستان میاندوآب و در اراضی شور و قلیایی است (Henareh et al., 2025). با توجه به گستردگی بیشتر کاشت گونه تبریزی در این استان نسبت به گونه کبوده، در این پژوهش از گونه تبریزی به‌عنوان گونه منتخب استفاده شد.

با توجه به مزایا و اهمیت زراعت چوب با جنس صنوبر در این استان، توسعه ابزارهای علمی برای مدیریت دقیق صنوبرکاری‌ها به امری ضروری تبدیل شده است. مدیریت علمی زراعت چوب نیازمند ابزارهایی است که بتوانند حجم چوب قابل برداشت را با دقت زیاد برآورد کنند. جداول حجم به‌عنوان یکی از این ابزارهای کلیدی، امکان برنامه‌ریزی اقتصادی و بهینه‌سازی بهره‌برداری را فراهم می‌کنند (Pascual et al., 2018). این جداول که به‌صورت یک‌عامله

زراعت چوب به‌عنوان یک فعالیت کشاورزی هدفمند برای تولید چوب و فرآورده‌های چوبی در مزارع خارج از جنگل‌های طبیعی انجام می‌شود که نقش مهمی در تأمین پایدار منابع چوبی، کاهش بهره‌برداری از جنگل‌ها و حفاظت از تنوع زیستی ایفا می‌کند. با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای چوب و محصولات چوبی و محدودیت‌های منابع طبیعی، توسعه زراعت چوب به‌ویژه با گونه‌های تندرشد، به‌عنوان راهکاری کارآمد برای تأمین نیازهای صنعتی و حفظ بوم‌سازگان‌های جنگلی مطرح شده است (Daugaviete et al., 2022). این روش علاوه بر تأمین مواد اولیه، می‌تواند به ایجاد اشتغال، توسعه اقتصادی مناطق روستایی و بهبود شرایط زیست‌محیطی کمک کند (Alaejos et al., 2023). استفاده از گونه‌های تندرشد مانند صنوبر (*Populus spp.*) در زراعت چوب به‌دلیل رشد سریع، دوره برداشت کوتاه و تولید زیاد زی‌توده جایگاه ویژه‌ای در زراعت چوب دارد. این گونه‌ها قادرند در مدت زمان کوتاهی حجم قابل‌توجهی چوب با کیفیت تولید کنند که این امر موجب افزایش بازده اقتصادی و کاهش دوره بازگشت سرمایه می‌شود (Vornicu et al., 2023). همچنین صنوبر به‌دلیل سازگاری با شرایط محیطی مختلف و قابلیت کشت در اراضی کم‌بازده، گزینه‌ای مطلوب برای گسترش زراعت چوب در مناطق متنوع جغرافیایی است (Gong et al., 2025).

در ایران نیز با توجه به سیاست‌های حفاظتی اخیر که با هدف حفظ بوم‌سازگان‌های جنگلی و کاهش بهره‌برداری از جنگل‌های طبیعی اجرا شده است و همچنین نیاز به چوب صنعتی و محدودیت واردات، توجه به توسعه زراعت چوب با جنس صنوبر به‌ویژه در مناطق خارج از شمال افزایش یافته است. اگرچه در گذشته تمرکز عمده بر استان‌های شمالی کشور مانند

درختان برای دوره‌های بعدی بهره‌برداری، هزینه‌ها و اثرهای زیست‌محیطی را کاهش داده و پایداری زراعت چوب را تقویت می‌کند (Blanco and Blanco, 2021).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به توسعه و ارزیابی روش‌های غیرمخرب برای تهیه جداول حجم درختان، به‌ویژه برای گونه‌های صنوبر، پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها با هدف افزایش دقت برآورد حجم سرپای درختان و کاهش نیاز به قطع و نمونه‌برداری مخرب از آنها انجام شده‌اند که نتایج آنها نقش مهمی در ارتقای مدیریت پایدار منابع چوبی ایفا کرده است. برای نمونه، Chianucci et al. (2020) در ایتالیا با بررسی حجم درختان صنوبر نشان دادند که استفاده از روش‌های غیرمخرب می‌تواند مدل‌های دقیق حجم ارائه دهد و نیاز به قطع درختان را به حداقل برساند. در پژوهشی دیگر، Gao et al. (2021) در چین با استفاده از روش غیرمخرب موفق به تهیه جداول حجم برای گونه‌های صنوبر شدند و اعلام کردند که این روش‌ها می‌توانند خطاهای پیش‌بینی حجم را نسبت به روش‌های سنتی به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند. از سوی دیگر، Bornand et al. (2023) با ارزیابی مدل‌های مختلف برآورد حجم درختان به کمک روش‌های غیرمخرب، نشان دادند که روش‌های مبتنی بر بازسازی سه‌بعدی و مدل‌های ساختاری کمی می‌توانند حجم سرپای درختان را با دقت زیاد و بدون نیاز به برداشت‌های مخرب برآورد کنند. همچنین Mura et al. (2025) روش‌های غیرمخرب مختلفی را برای برآورد سریع حجم درختان بررسی کرده و تأکید کردند که این روش‌ها علاوه بر کاهش هزینه و زمان، دقت قابل قبولی برای کاربردهای عملی در عرصه‌های جنگلی دارند.

اما در داخل کشور، بررسی‌های محدودی به تهیه جداول حجم برای گونه‌های صنوبر پرداختند که به‌طور

(براساس قطر) یا دوعامله (براساس قطر و ارتفاع کل) تهیه می‌شوند، اطلاعات ضروری برای ارزیابی ظرفیت تولیدی مزارع و مدیریت منابع را ارائه می‌دهند. جداول یک‌عامله به دلیل سهولت در اندازه‌گیری قطر در بسیاری از سیستم‌های مدیریتی کاربرد دارند، اما جداول دوعامله به دلیل در نظر گرفتن متغیرهای بیشتر مانند ارتفاع، دقت بیشتری در برآورد حجم ارائه می‌دهند (Wang et al., 2024). این ابزارها به مدیران کمک می‌کنند تا با پیش‌بینی دقیق حجم چوب تولیدی، ضایعات را کاهش داده و سودآوری اقتصادی را افزایش دهند (Şahin and Çomak, 2023). حجم درختان صنوبر به دلیل تأثیر مستقیم بر مقدار چوب قابل استحصال و ارزش اقتصادی آن در بهره‌برداری اهمیت دارد. بهره‌برداری فقط بر اساس قطر هدف انجام نمی‌شود، بلکه حجم درخت معیار کلیدی برای ارزیابی بازده و مدیریت پایدار منابع است.

در ایران، با توجه به افزایش تقاضای چوب و محدودیت‌های منابع جنگلی، تهیه جداول حجم دقیق برای گونه‌های صنوبر، به‌ویژه در مناطق مستعد مانند آذربایجان غربی، به بهبود مدیریت مزارع چوبی و کاهش وابستگی به منابع خارجی کمک می‌کند. با این حال، برای توسعه این جداول، استفاده از روش‌های غیرمخرب که امکان برآورد حجم را بدون آسیب به درختان فراهم می‌کنند، اهمیت فزاینده‌ای دارد.

روش‌های غیرمخرب برای برآورد حجم درختان، به دلیل مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی، در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته‌اند (Liu et al., 2019). این روش‌ها شامل اندازه‌گیری‌هایی مانند قطر و ارتفاع درخت و استفاده از مدل‌های رگرسیونی تک‌عامله و دوعامله هستند که امکان ارزیابی دقیق منابع چوبی را بدون نیاز به قطع درختان فراهم می‌کنند (Yusup et al., 2023). چنین رویکردی ضمن حفظ

استان آذربایجان غربی با تکیه بر روش‌های غیرمخرب، پاسخی مستقیم به یک خلأ پژوهشی مشخص و ضرورتی آشکار برای بهبود مدیریت علمی، اقتصادی و بوم‌شناسی زراعت چوب در این منطقه است. همچنین این پژوهش می‌تواند ابزارهای علمی لازم را برای بهینه‌سازی بهره‌برداری، کاهش هزینه‌ها و تقویت پایداری زیست‌محیطی فراهم کند که نتایج آن می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای و ملی در زمینه زراعت چوب مورد استفاده قرار گیرد تا به کاهش وابستگی به منابع خارجی و تقویت خودکفایی در تولید چوب یاری رساند.

مواد و روش‌ها

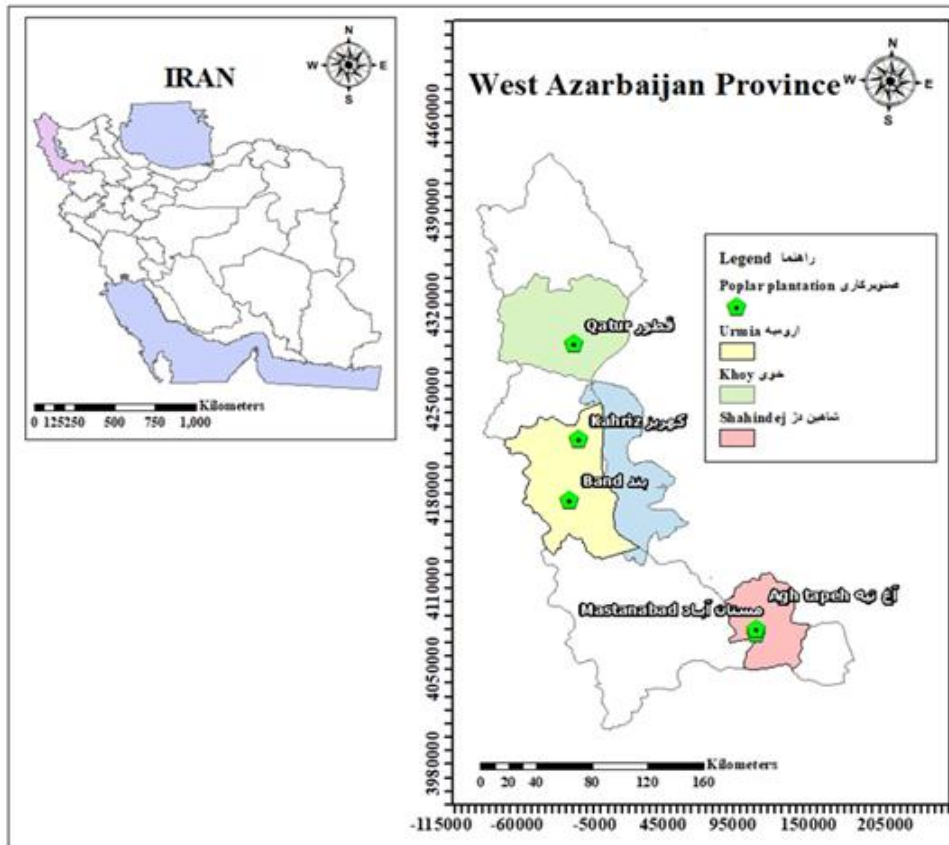
استان آذربایجان غربی، واقع در شمال غرب ایران، به دلیل ویژگی‌های اقلیمی و خاکی مناسب، یکی از مناطق برجسته برای زراعت چوب با گونه‌های صنوبر در ایران محسوب می‌شود. این استان با مساحت تقریبی ۳۷۴۳۷ کیلومتر مربع، دارای اقلیمی نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل است. متوسط دمای سالانه در این استان بین هشت تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد و مقدار بارندگی سالانه بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر متغیر است و خاک‌های غالب این استان به طور عمده لومی-آهکی است (Nazarnejad et al., 2018).

در این پژوهش، پنج توده صنوبرکاری شده با گونه تبریزی (*Populus nigra L.*) از سه شهرستان این استان که از مناطق عمده صنوبرکاری با گونه تبریزی هستند، شامل شاهین‌دژ، ارومیه و خوی انتخاب شدند. در شکل ۱ موقعیت توده‌های مورد بررسی در استان ارائه شده است. همچنین مشخصات توده‌های مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است.

عمده از روش‌های مخرب استفاده کردند. برای مثال Bagheri et al. (2002) در پژوهش خود برای تهیه جداول حجم صنوبرکاری‌های منطقه زنجان‌رود از روش قطع درختان برای تهیه جداول حجم استفاده کردند. Gorji Bahri (1992) در ایستگاه تحقیقات خوشامیان کلارآباد مازندران براساس روابط بین قطر و حجم درختان قطع شده، جدول حجم یک‌عامله برای صنوبر دورگ اورامریکن کلن ۲۱۴ تهیه کرد. همچنین Sagheb-Talebi (1996) نیز در همین ایستگاه برای صنوبر دورگ اورامریکن کلن ۴۴۸ براساس روابط بین قطر و ارتفاع با حجم ۱۲۰ درخت صنوبر قطع شده، جدول حجم دوعامله تهیه کرد. در ارتباط با روش‌های غیرمخرب هم می‌توان به پژوهش Abedi (2023) اشاره کرد که در استان گیلان انجام شد و مدل‌های آلومتریک را برای برآورد حجم و زی‌توده صنوبر ارائه کرد.

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان کرد که با وجود گسترش زراعت چوب در استان آذربایجان غربی و اهمیت اقتصادی و بوم‌شناسی گونه تبریزی (*Populus nigra L.*) در این منطقه، تاکنون جداول حجم دقیق و بومی برای این گونه تهیه نشده است. اغلب مدل‌های موجود یا متکی بر داده‌های غیرمنطقه‌ای هستند که با شرایط اقلیمی، خاکی و مدیریتی استان انطباق ندارند، یا با روش‌های مخرب تهیه شده‌اند که با اصول مدیریت پایدار منابع جنگلی و کشاورزی سازگار نیستند. در شرایطی که استان آذربایجان غربی سومین استان کشور از نظر سطح زیرکشت صنوبر است، فقدان مدل‌های حجمی دقیق مبتنی بر داده‌های غیرمخرب، خلایی جدی در فرآیند تصمیم‌سازی، پیش‌بینی بهره‌برداری و ارزیابی عملکرد کمی زراعت چوب ایجاد کرده است.

از این‌رو، انجام این پژوهش با هدف تهیه جداول حجم یک‌عامله و دوعامله برای گونه صنوبر تبریزی در



شکل ۱- موقعیت جغرافیای توده‌های صنوبر مورد بررسی در استان آذربایجان غربی

Figure 1. Geographic location of the studied poplar stands in the West Azerbaijan province

جدول ۱- مشخصات توده‌های صنوبرکاری مورد بررسی در استان آذربایجان غربی

Table 1. Characteristics of the studied poplar stands in the West Azerbaijan province

شکل زمین Landform	سن توده (سال) Stand age (year)	فاصله کاشت (متر) Planting distance (m)	ارتفاع از سطح دریا (متر) Elevation (m)	نام منطقه Region name	شهرستان County	ردیف Row
مسطح Flat	12	1×2	1392	آغ تپه Agh tapeh	شاهین‌دژ ShahinDej	1
مسطح Flat	10	1×2	1340	مستان آباد Mastan abad	شاهین‌دژ ShahinDej	2
مسطح Flat	8	1×1	1456	بند Band	ارومیه Urumia	3
مسطح Flat	متفاوت Different	نامنظم Irregular	1340	کهریز Kahriz	ارومیه Urumia	4
مسطح Flat	7	1×1	1175	قطور Qatur	خوی Khoy	5

انتخاب و اندازه‌گیری درختان نمونه (sampling) براساس طبقات قطری درختان صنوبر استفاده شد. طبقات قطری براساس بررسی‌های قبلی و

در این پژوهش برای انتخاب درختان نمونه از روش نمونه‌برداری طبقه‌ای - تصادفی (Stratified random

علامت‌گذاری شده است تنظیم می‌شود (شکل ۳). در مرحله بعد از محل قطر برابر سینه درخت عکسی رقومی برداشت و بر روی صفحه دستگاه نشان داده می‌شود. سپس با استفاده از صفحه لمسی دستگاه، دو بازوی کالیپر ماندی که در دو طرف عکس رقومی تنه درخت قرار دارند (شکل ۴) بر روی دو لبه بیرونی تنه تنظیم می‌شوند. با توجه به اینکه تصویر برداشت شده به وسیله دستگاه رقومی است و به هنگام تهیه آن فاصله افقی دستگاه و زاویه آن نسبت به محل عکس برداری از تنه درخت در نظر گرفته می‌شود، با تنظیم کالیبرها در دو طرف تصویر تنه درخت، قطر تنه درخت در ارتفاع مورد نظر به وسیله دستگاه محاسبه و بر روی صفحه نمایش آن آشکار می‌شود.

پس از ثبت قطر تنه در ارتفاع مشخص (به طور مثال ۱/۳۰ متر) با استفاده از پیچ تنظیمی که در کنار دستگاه قرار دارد (شکل ۲)، شیب دستگاه افزایش داده می‌شود تا نور لیزر در راستای تنه درخت به ارتفاع بالاتری برای نقطه اندازه‌گیری بعدی انتقال داده شود که همزمان دستگاه فاصله ارتفاعی طی شده را محاسبه و بر روی صفحه نمایش نشان می‌دهد. به عنوان مثال با طی کردن ۷۰ سانتی‌متر از محل قطر برابر سینه (۱/۳ متر) به محل ارتفاع دو متری تنه رسیده می‌شود که با تکرار مراحل قبلی، قطر در ارتفاع دو متری تنه محاسبه و تعیین می‌شود و به همین ترتیب کار ادامه می‌یابد تا به محلی رسیده شود که قطر تنه درخت کمتر از پنج سانتی‌متر که در این نقطه کار اندازه‌گیری متوقف می‌شود.

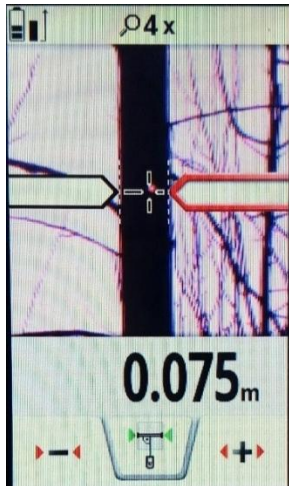
در نتیجه با این روش اندازه قطر برای ابتدا و انتهای هر قطعه دو متری از تنه صنوبر تعیین خواهد شد که با استفاده از آنها می‌توان حجم واقعی هر قطعه دو متری و در نهایت حجم واقعی کل تنه را محاسبه کرد. شایان

منابع موجود برای درختکاری‌های صنوبر (Bagheri et al., 2014; Jahani et al., 2014) از طبقه قطری ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و با فاصله هر طبقه دو سانتی‌متر در نظر گرفته شد. دلیل استفاده از طبقه قطری ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر این است که درختان صنوبر کم‌قطرتر از ۱۰ سانتی‌متر به‌طور معمول به دلیل عدم صرفه اقتصادی قطع نمی‌شوند و درختان قطورتر از ۳۰ سانتی‌متر نیز به دلیل رسیدن به سن بهره‌برداری و بازدهی سرمایه اغلب ننگه داشته نمی‌شوند. در نتیجه در مجموع ۱۱ طبقه قطری برای بررسی وجود داشت. در هر طبقه قطری حداقل پنج درخت به عنوان تکرار (Jahani et al., 2014) به صورت تصادفی از پنج توده مختلف واقع در شهرستان‌های ارومیه، خوی و شاهین‌دژ انتخاب شدند. قطر برابر سینه با استفاده از کالیپر رقومی هاگلوب (با دقت ۰/۱ سانتی‌متر) و ارتفاع کل درختان با استفاده از هیسومتر Vertex III اندازه‌گیری شد. همچنین قطر در ارتفاعات مختلف تنه درختان منتخب (ابتدا و انتهای قطعات دو متری در امتداد تنه درخت که حجم آنها اختلاف ناچیزی با حجم استوانه خواهد داشت) تا قطر حداقل پنج سانتی‌متر (حداقل قطر تجاری تنه صنوبر؛ Tenzin et al., 2017) با دستگاه لیزری لایکا مدل D810 اندازه‌گیری شد.

لازم به ذکر است که دستگاه لیزری لایکا علاوه بر اندازه‌گیری فاصله افقی و ارتفاع قادر است تا قطر در هر ارتفاعی از تنه درخت را نیز با دقت مناسب اندازه‌گیری کند. روش کار بدین صورت است که ابتدا دستگاه در فاصله مناسبی از تنه درخت (بین هشت تا ۱۲ متر بسته به ارتفاع درخت هدف) بر روی سه پایه آن در توده صنوبرکاری قرار گرفته و تراز می‌شود (شکل ۲). سپس نور لیزر دستگاه بر روی تنه درخت در ارتفاع برابر سینه که از قبل به صورت دستی مشخص و

بهار یعنی در زمان بی‌برگ بودن درختان صنوبر انجام شود تا نور لیزر دستگاه به تنه درختان صنوبر برخورد کند.

ذکر است که برای سهولت اندازه‌گیری‌ها به وسیله دستگاه لایکا و وضوح بیشتر دید به قطر تنه درخت در ارتفاعات بالاتر از برابرسینه درختان صنوبر باید تمامی اندازه‌گیری‌ها باید در فصل‌های پاییز، زمستان و اوایل



شکل ۴- محاسبه قطر در ارتفاع بالاتر از برابرسینه تنه درخت صنوبر

Figure 4. Calculating the diameter at height above breast height of a poplar tree stem



شکل ۳- برخورد نور لیزر دستگاه لایکا به تنه صنوبر برای اندازه‌گیری قطر

Figure 3. Laser beam from a Leica device hitting a poplar stem to measure the diameter



شکل ۲- نحوه استقرار دستگاه لایکا در توده صنوبرکاری

Figure 2. Installation the Leica device in a poplar plantation stand

از دستگاه کالیپر تعیین قطر شدند تا در مقایسات آماری مورد استفاده قرار گیرند.

علاوه بر این داده‌ها از داده‌های قطر برابرسینه و قطر در ارتفاع دو متری تنه (بیشینه ارتفاعی از تنه که به صورت سرپا قابل دسترس است) ۱۰ اصله درخت صنوبر تبریزی سرپا نیز برای ارزیابی صحت اندازه‌گیری دستگاه لایکا استفاده شد. بدین ترتیب که ابتدا با استفاده از خط‌کش دو بازو (کالیپر) قطر برابرسینه (۱/۳ متر) و قطر در ارتفاع دو متری تنه این درختان تا دقت میلی‌متر اندازه‌گیری و ثبت شد. در مرحله بعد قطر در ارتفاع برابرسینه و دو متری تنه همین درختان دوباره با استفاده از دستگاه لیزری لایکا تا دقت میلی‌متر اندازه‌گیری و ثبت شد تا با مقایسه دو سری داده متناظر قطر با هم (در مجموع ۲۰ جفت داده) معنی‌دار بودن یا نبودن تفاوت

روش ارزیابی صحت اندازه‌گیری قطر با دستگاه لایکا برای ارزیابی صحت اندازه‌گیری قطر درختان صنوبر در ارتفاعات مختلف تنه با استفاده از دستگاه لایکا از ۱۳ درخت صنوبر از گونه‌های کبوده و تبریزی با قطرهای برابر سینه ۱۵ تا ۲۴ سانتی‌متر که برای قطع در نظر گرفته شده بودند، استفاده شد. بدین ترتیب که قبل از قطع این درختان ابتدا قطر در ارتفاع ۱/۳ متری، دو متری، چهار متری، شش متری و تا ۱۴ متری (بسته به ارتفاع درختان نمونه) این درختان به صورت سرپا با استفاده از دستگاه لایکا به طور دقیق اندازه‌گیری شد. سپس این درختان شماره‌گذاری و مشخص شدند تا پس از قطع دوباره در همین ارتفاع‌ها بر روی زمین اندازه‌گیری شوند. در مرحله بعد این درختان قطع شده و پس از قطع بر روی زمین و در همان ارتفاع‌های مشخص شده قبلی با استفاده

$$V_T = \sum_{i=1}^n v_i \quad \text{رابطه ۲}$$

به طوری که V_T حجم واقعی کل تنه درخت است.

انتخاب بهترین مدل برای تهیه جداول حجم یک عامله و دو عامله

در این بررسی برای تعیین بهترین مدل از نظر مقدار خطا و کارایی برای برآورد حجم تنه درختان صنوبر براساس متغیرهای قطر و ارتفاع اندازه گیری شده و حجم های واقعی به دست آمده، ابتدا براساس منابع موجود (Hjelm and Johansson, 2012; Singhdoha et al., 2018; Oliveira et al., 2018; Santos et al., 2019; Imana- Encinas et al., 2019; De Lima et al., 2021) تعداد ۱۶ رابطه پرکاربرد برای برآورد حجم تنه درختان که شامل هفت رابطه یک عامله (فقط براساس قطر برابر سینه) و نه رابطه دو عامله (براساس قطر برابر سینه و ارتفاع کل) بود، انتخاب شدند. مشخصات این مدل ها در جدول ۲ ارائه شده است.

اندازه گیری دو دستگاه برای اندازه گیری قطر تنه درختان صنوبر مشخص شود.

برای مقایسه مقادیر اندازه گیری شده قطر با دو دستگاه کالیپر و لایکا و تعیین اینکه آیا تفاوت های موجود معنی دار هستند یا خیر از آزمون تی جفتی (Paired- sample t- test) استفاده شد.

محاسبه حجم درخت

حجم هر قطعه دو متری از تنه هر درخت صنوبر منتخب با استفاده از رابطه اسمالین (رابطه ۱) محاسبه شد.

$$v_i = \frac{g_{1i} + g_{2i}}{2} \times h \Rightarrow g = \frac{\pi d_i^2}{4} \quad \text{رابطه ۱}$$

به طوری که d_i قطر ابتدا یا انتهای هر قطعه به متر، v_i

حجم هر قطعه به مترمکعب، g_1 سطح مقطع ابتدای هر قطعه به مترمربع، g_2 سطح مقطع انتهای هر قطعه به مترمربع و h طول هر قطعه به متر است.

سپس حجم واقعی کل درخت از مجموع حجم

قطعات دو متری به دست آمد (رابطه ۲).

جدول ۲- مشخصات مدل های حجم استفاده شده

Table 2. Characteristics of the used volume models

نوع مدل Model Type	رابطه مدل Formula	نام مدل Model Name	ردیف No.
یک عامله Single entry	$V = a_0 + a_1 D^2$	Kopezky-Gehhardt	1
	$V = a_1 D + a_2 D^2$	Dissecsu-Meyer	2
	$V = a_0 + a_1 D + a_2 D^2$	Hohenadl_Krenn	3
	$\ln(V) = a_0 + a_1 \ln(D)$	Hummel 1	4
	$\ln(V) = a_0 + a_1 \ln(D) + a_2 D^{-1}$	Brenac	5
	$V = a_0 + a_1 g$	Hummel 2	6
	$V = a_1 D^{a_2}$	Berkhout	7
دو عامله Double entry	$V = a_0 + a_1 D^2 H$	Spurr 1	8
	$V = D^2 / (a_0 + a_1 (1/H))$	Honner	9
	$V = D^2 (a_0 + a_1 H)$	Ogaya	10
	$V = a_0 + a_1 D^2 + a_2 D^2 H + a_3 H$	Stoate	11
	$\ln(V) = a_0 + a_1 \ln(D^2 H)$	Spurr 2	12
	$\ln(V) = a_0 + a_1 \ln(D) + a_2 \ln(H)$	Schumacher-Hall 1	13
	$V = a_0 D^{a_1} H^{a_2}$	Schumacher-Hall 2	14
	$V = a_1 D^2 + a_2 D^2 H + a_3 D H + a_4 H^2$	Näslund	15
	$V = D^2 H (a_0 + a_1 D)^{-1}$	Takata	16

D : قطر برابر سینه بر حسب سانتی متر، H : ارتفاع کل درختان بر حسب متر، V : حجم تنه بر حسب مترمکعب و a_0 تا a_4 ضرایب مدل هستند.

D : diameter at breast height (cm), H : total height of trees (m), V : stem volume (m^3) and a_0 to a_4 are the model coefficient.

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

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad \text{رابطه ۵}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$WI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

به طوری که x_i مقادیر واقعی، y_i مقادیر برآورد شده، \bar{x} میانگین مقادیر واقعی، \bar{y} میانگین مقادیر برآورد شده، n تعداد نمونه‌ها، k تعداد عامل‌های مدل آماری و L مقدار حداکثر تابع درست‌نمایی مدل است.

پس از محاسبه شاخص‌های پنج‌گانه بالا برای هر مدل در نرم‌افزار R، رتبه‌بندی مدل‌ها براساس جمع مقادیر رتبه‌های به‌دست آمده برای هر مدل انجام شد و هر مدلی از طبقه یک‌عامله یا دوعامله که کمترین جمع را در رتبه‌ها به‌دست آورده بود، به‌عنوان بهترین مدل برای برآورد حجم تنه درختان صنوبر انتخاب و براساس آن جداول حجم یک‌عامله یا دوعامله مربوطه تهیه شد.

نتایج

ارزیابی صحت اندازه‌گیری قطر با دستگاه لایکا

پس از اندازه‌گیری قطر تنه ۱۳ درخت قطع شده صنوبر در ارتفاع‌های مختلف به‌وسیله دو دستگاه کالیپر و لایکا، در مجموع ۶۲ جفت داده متناظر قطر تولید شد که کمینه قطر در این داده‌ها پنج و بیشینه ۲۱ سانتی‌متر و تا ارتفاع ۱۴ متری تنه بوده است. سپس از آزمون تی جفتی برای بررسی معنی‌دار بودن یا نبودن تفاوت مقادیر اندازه‌گیری شده قطر به‌وسیله این دو دستگاه استفاده شد. جدول ۳ نتیجه آزمون تی جفتی را برای این داده‌ها نشان می‌دهد.

سپس با استفاده از بخش‌های Stats و Lmtest در نرم‌افزار R (نسخه ۴.۰.۱) مدل‌های غیرخطی مذکور به داده‌ها برازش داده شد و ضرایب مدل و شاخص‌های نکویی برازش مورد محاسبه قرار گرفتند. برای ارزیابی عملکرد این مدل‌ها و در نهایت انتخاب بهترین مدل از نظر مقدار خطا و کارایی از پنج معیار نکویی برازش که با مقایسه مقادیر واقعی با مقادیر برآورد شده و همچنین بررسی پیچیدگی مدل در برابر دقت آن مدل‌ها را ارزیابی می‌کنند استفاده شد. این پنج معیار عبارتند از:

۱- معیار کارایی آکایک (Akaike): AIC (Information Criterion) که هر چه مقدار آن کمتر باشد عملکرد مدل بهتر است (Burnham and Anderson., 2004).

۲- مقدار جذر میانگین مربعات خطای مدل (RMSE: Root Mean Square Error) که هر چه مقدار آن کمتر باشد عملکرد مدل بهتر است (Chai and Draxler., 2014).

۳- میانگین خطای مطلق مدل (MAE: Mean Absolute Error) که هر چه مقدار آن کمتر باشد عملکرد مدل بهتر است (Chai and Draxler., 2014).

۴- ضریب کارایی نش‌ساتکلیف (NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency) که هر چه مقدار آن بیشتر باشد عملکرد مدل بهتر است (Nash and Sutcliffe., 1970).

۵- شاخص ویلموت (WI: Willmott Index of Agreement) که هر چه مقدار آن بیشتر باشد عملکرد مدل بهتر است (Willmott, 1981).

معیارها و شاخص‌های یادشده براساس روابط ۳ تا ۷ محاسبه می‌شوند:

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad \text{رابطه ۳}$$

جدول ۳- نتایج آزمون تی جفتی مقایسه بین مقادیر متناظر قطرهای اندازه‌گیری شده ۱۳ درخت صنوبر قطع شده به وسیله دو دستگاه کالیپر و لایکا

Table 3. Results of pair sample t-test in comparison of the corresponding diameters of 13 felled poplar trees measured by two devices: caliper and Leica

معنی داری Sig.	آماره t t-Statistics	درجه آزادی df	انحراف معیار تفاوت‌ها Std. Deviation of differences	میانگین تفاوت‌ها Mean of differences	جفت داده‌ها Paired data
0.051 ^{ns}	2.009	61	0.632	0.161	لایکا- کالیپر Leica- caliper

ns: non-significant difference

ns: عدم وجود تفاوت معنی دار

با توجه به جدول ۳ ($P\text{-Value} = 0.051$) مشاهده می‌شود که تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده قطرهای متناظر بین دو دستگاه کالیپر و لایکا معنی دار نیست ($P > 0.05$). به عبارت دیگر دو دستگاه برای اندازه‌گیری قطر یکسان عمل می‌کنند.

در ادامه آزمون تی جفتی بر روی ۲۰ جفت داده قطر برابر سینه و قطر در ارتفاع دو متری تنه ۱۰ درخت سرپا نیز اجرا شد. جدول ۴ نتیجه آزمون تی جفتی را برای این داده‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج آزمون تی جفتی مقایسه بین مقادیر متناظر قطرهای اندازه‌گیری شده ۱۰ درخت سرپای صنوبر به وسیله دو دستگاه کالیپر و لایکا

Table 4. Results of pair sample t-test in comparison of the corresponding diameters of 10 standing poplar trees measured by two devices: caliper and Leica

معنی داری Sig.	آماره t t-Statistics	درجه آزادی df	انحراف معیار تفاوت‌ها Std. Deviation of differences	میانگین تفاوت‌ها Mean of differences	جفت داده‌ها Paired data
0.359 ^{ns}	0.941	19	0.21	0.045	لایکا- کالیپر Leica- caliper

ns: non-significant difference

ns: عدم وجود تفاوت معنی دار

با توجه به جدول ۴ ($P\text{-Value} = 0.359$) مشاهده می‌شود که تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده قطرهای متناظر بین دو دستگاه کالیپر و لایکا معنی دار نیست ($P > 0.05$). به عبارت دیگر دو دستگاه برای اندازه‌گیری قطر یکسان عمل می‌کنند.

جدول ۵ آماره‌های توصیفی متغیرهای اندازه‌گیری شده از ۵۷ درخت نمونه گونه تبریزی در استان آذربایجان غربی را ارائه می‌دهد. این متغیرها شامل قطر برابر سینه، ارتفاع کل و حجم واقعی درختان هستند که به عنوان متغیرهای کلیدی در ارزیابی زیست‌سنجی و برآورد حجم چوب تنه مورد تحلیل قرار گرفتند.

متغیرهای زیست‌سنجی

جدول ۵- مشخصه‌های آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده در ۵۷ درخت نمونه

Table 5. Statistical characteristics of the measured variables in selected trees

متغیر	قطر برابر سینه (سانتی متر)	ارتفاع کل (متر)	حجم واقعی تنه (مترمکعب)
Variable	DBH (cm)	Total height (m)	Actual stem volume (m ³)
کمینه	9.2	10.5	0.03
Minimum			
بیشینه	29.4	27.2	0.73
Maximum			
میانگین	19.9	17.9	0.29
Mean			
انحراف معیار	6.1	5.1	0.2
Standard deviation			
اشتباه معیار	0.81	0.68	0.03
Standard error			
ضریب تغییرات (درصد)	30.6	28.5	68.9
Coefficient of variation (%)			

حجم‌های غیرمنطقی به دلایل یادشده در بالا کنار گذاشته شد و از مدل بعدی یعنی مدل Takata با رتبه دو برای تهیه جدول حجم دو عامله استفاده شد. رابطه نهایی دو مدل یک عامله و دو عامله استفاده شده برای تهیه جدول حجم به صورت روابط ۸ و ۹ است:

$$V = 0.0261463 - 0.0087329 \times D + 0.0010169 \times D^2 \quad \text{رابطه ۸}$$

مدل دو عامله Takata:

$$V = D^2 \times H / (6.20136 + 0.401 \times D) \quad \text{رابطه ۹}$$

به طوری که D قطر برابر سینه بر حسب سانتی متر، H ارتفاع کل درختان بر حسب متر و V حجم تنه بر حسب مترمکعب است.

در نهایت براساس دو رابطه بالا جدول حجم یک عامله هفت و دو عامله هشت برای گونه تبریزی در استان تهیه شد.

در ادامه ۱۶ مدل مورد استفاده برای تهیه جداول حجم یک عامله و دو عامله گونه تبریزی در استان آذربایجان غربی براساس پنج معیار به کار رفته بررسی و سپس بهترین مدل برای تهیه هر کدام از جداول یک و دو عامله انتخاب شدند. نتیجه رتبه بندی مدل‌های استفاده شده در این پژوهش به شرح جدول ۶ است.

براساس جدول ۶ در بین مدل‌های یک عامله (مدل‌های شماره یک تا هفت)، مدل شماره دو یعنی Dissecsu-Meyer با رتبه ۱۰ بهترین مدل بود که باید انتخاب می‌شد. اما این مدل به دلیل وجود ضرایب منفی در شاخص‌های مدل، عدد حجمی که برای قطرهای کم تولید می‌کرد منفی بود که قابل قبول و منطقی نبود. بنابراین از مدل بعدی یعنی مدل Hohenadl_Krenn با رتبه ۱۱ برای تهیه جدول حجم یک عامله استفاده شد. همچنین در بین مدل‌های دو عامله (مدل‌های شماره هشت تا ۱۶)، مدل شماره ۱۵ یعنی Näsland با رتبه یک بهترین مدل بود که آن هم به علت تولید

جدول ۶- نتیجه رتبه‌بندی مدل‌های استفاده شده برای تهیه جداول حجم یک‌عامله و دوعامله

Table 6. Ranking result of the used models to develop single- and double-entry volume tables

نوع مدل Model Type	ردیف No.	نام مدل Model Name	AIC		RMSE		MAE		NSE		WI		جمع رتبه‌ها Rank sum	رتبه‌بندی مدل‌ها Model ranking
			مقدار Value	رتبه Rank	مقدار Value	رتبه Rank	مقدار Value	رتبه Rank	مقدار Value	رتبه Rank	مقدار Value	رتبه Rank		
یک‌عامله Single entry	1	Kopezky-Gehrhardt	-137.76	10	0.067	14	0.052	15	0.887	14	0.97	14	67	14
	2	Dissecsu-Meyer	-138.32	8	0.067	11	0.05	12	0.889	11	0.97	10	52	10
	3	Hohenadl_Krenn	-136.39	11	0.067	10	0.05	11	0.889	10	0.97	11	53	11
	4	Hummel 1	-9.81	14	0.067	13	0.05	13	0.888	13	0.97	13	66	13
	5	Brenac	-8.69	15	0.068	15	0.05	10	0.885	15	0.97	12	67	14
	6	Hummel 2	-137.76	10	0.067	14	0.052	15	0.887	14	0.97	14	67	14
	7	Berkhout	-137.98	9	0.067	12	0.051	14	0.888	12	0.969	15	62	12
دوعامله Double entry	8	Spurr 1	-181.69	5	0.045	8	0.028	9	0.949	8	0.987	9	39	9
	9	Honner	-182.42	3	0.045	5	0.028	7	0.949	5	0.987	7	27	5
	10	Ogaya	-181.44	6	0.045	9	0.028	5	0.948	9	0.987	8	37	8
	11	Stoate	-181.1	7	0.044	4	0.028	8	0.952	4	0.987	2	25	4
	12	Spurr 2	-74.02	12	0.045	7	0.026	1	0.949	7	0.987	5	32	6
	13	Schumacher-Hall 1	-72.97	13	0.045	6	0.026	2	0.949	6	0.987	6	33	7
	14	Schumacher-Hall 2	-183.41	2	0.044	2	0.028	6	0.952	2	0.987	4	16	3
	15	Näslund	-182.14	4	0.044	1	0.027	4	0.953	1	0.988	1	11	1
	16	Takata	-185.28	1	0.044	3	0.027	3	0.952	3	0.987	3	13	2

جدول ۷- جدول حجم یک‌عامله برای قسمتی از تنه گونه تبریزی که قطر بیشتر از پنج سانتی‌متر دارد براساس مدل

$$V = 0.0261463 - 0.0087329 \times D + 0.0010169 \times D^2$$

در استان آذربایجان غربی

Table 7. Single- entry (one-way) volume table for the stem part of *P. nigra* that is more than 5 cm in diameter, based on the equation $V = 0.0261463 - 0.0087329 \times D + 0.0010169 \times D^2$ in West

Azerbaijan province	
قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	حجم تنه (مترمکعب)
DBH (cm)	Stem volume (m ³)
9	0.030
10	0.041
11	0.053
12	0.068
13	0.084
14	0.103
15	0.124
16	0.147
17	0.172
18	0.198
19	0.227
20	0.258
21	0.291
22	0.326
23	0.363
24	0.402
25	0.443
26	0.487
27	0.532
28	0.579
29	0.628
30	0.679

بحث

Šrámek et al. (2023) در دو مزرعه صنوبر با دوره بهره‌برداری کوتاه‌مدت در اروپا، به‌کارگیری این روش را تأیید کرده و با توجه به مزایای آن، استفاده از آن را توصیه کرده‌اند. همچنین Vandendaele et al. (2022) در پژوهش خود با استفاده از لیزر اسکن زمینی، حجم تنه و تاج درختان صنوبر را به‌صورت غیرمخرب مدلسازی کردند و دقت مناسبی را گزارش کردند. Liu et al. (2019) در چین نیز مدل‌های غیرمخرب حجم را برای گونه‌های مختلف صنوبر توسعه داده و اعتبار این روش‌ها را با داده‌های میدانی تأیید کرده است. این بررسی‌ها با توجه به دقت و قابلیت اجرایی زیاد، استفاده از روش‌های غیرمخرب را در برآورد حجم درختان صنوبر توصیه می‌کنند.

تعیین مدل‌های حجمی مناسب با کمترین تخریب و بیشترین دقت از گام‌های مهم در شناخت وضعیت توده و برنامه‌ریزی برای حال و آینده است. در این پژوهش جداول حجم یک‌عامله و دوعامله برای گونه صنوبر تبریزی (*P. nigra*) در استان آذربایجان غربی با استفاده از روش غیرمخرب تهیه شد. روش‌های غیرمخرب به دلیل حفظ سلامت درختان و جلوگیری از قطع غیرضروری، اهمیت زیادی دارند. اندازه‌گیری مشخصه‌هایی مانند قطر برابر سینه و ارتفاع کل درخت به‌صورت غیرمخرب، امکان برآورد دقیق حجم چوب را فراهم می‌کند و علاوه بر کاهش هزینه و زمان، امکان پایش مکرر و مدیریت بهینه منابع چوبی را نیز تسهیل می‌کند. اهمیت این رویکرد در بررسی‌های متعدد داخلی و بین‌المللی به اثبات رسیده است. به‌طور مثال،

قبولی در برآورد حجم گونه‌های بومی داشت. علاوه بر این در پژوهش‌های (Raptis et al. (2020 و Alcudia- Aguilar et al. (2019 نیز این مدل به‌عنوان مدلی مؤثر در برآورد حجم گونه‌های مختلف جنگلی مورد استفاده قرار گرفته است.

بنابراین انتخاب مدل Hohenadl-Krenn در این پژوهش با توجه به نتایج بررسی‌های پیشین، هم از نظر دقت آماری و هم کاربرد عملی، به‌طور کامل منطبق با یافته‌های علمی معتبر بوده و می‌تواند به‌عنوان مدلی قابل اعتماد برای تهیه جدول حجم یک‌عامله در صنوبرکاری‌های استان آذربایجان غربی مورد استفاده قرار گیرد.

در تهیه جدول حجم دوعامله نیز مانند جدول حجم یک‌عامله، از مدل‌های متعددی بهره گرفته شد تا بهترین مدل براساس معیارهای آماری انتخاب شود. مدل Näsland به‌عنوان بهترین مدل دوعامله شناسایی شد که با استفاده از قطر در ارتفاع برابر سینه و ارتفاع کل درخت، حجم را برآورد می‌کند. این مدل در بسیاری از بررسی‌های به‌عنوان مدلی معتبر برای گونه‌های مختلف جنگلی شناخته شده است (Kanabus and Nigul et al., 2021; Miscicki, 2021). با این حال، همانند برخی مدل‌های حجم دیگر، در مواردی که قطر درختان کم است، این مدل به‌دلیل ضرایب خاص خود، حجم منفی یا غیر واقعی تولید می‌کند که از نظر کاربردی مشکل‌ساز است و می‌تواند منجر به خطا در برآورد حجم درختان جوان یا کم‌قطر شود. این محدودیت در پژوهش‌هایی همچون تحقیق Mehtätalo et al. (2015) که به ارزیابی مدل‌های حجم درختان جنگلی پرداخته‌اند، مورد تأکید قرار گرفته و توصیه شده که در چنین شرایطی از مدل‌های جایگزین یا اصلاح شده استفاده شود تا دقت برآورد در تمام دامنه‌های قطر حفظ شود.

در این پژوهش مدل‌های مختلفی از منابع معتبر برای تهیه جداول حجم یک‌عامله و دوعامله انتخاب و با استفاده از روش‌های آماری مختلف امتیازبندی شدند. در میان مدل‌های یک‌عامله، مدل Dissecsu-Meyer بهترین عملکرد را از نظر معیارهای آماری نشان داد. با این حال، این مدل به‌دلیل ضرایب خاص خود در قطرهای کم، حجم منفی تولید می‌کند که از نظر عملی غیرقابل قبول بود و منجر به خطا در برآورد حجم درختان کوچک می‌شد. به این نکته در پژوهش‌هایی مانند بررسی (Muukkonen (2007 اشاره شده است که بعضی از مدل‌ها در قطرهای کم به‌دلیل ضرایب خاص خود ممکن است برآوردهای نامناسبی داشته باشند که در برخی موارد شامل حجم منفی یا غیرمنطقی است. این محدودیت‌ها سبب شده است که استفاده از مدل‌های دوعامله یا یک‌عامله اصلاح شده برای بهبود دقت برآورد حجم در قطرهای پایین توصیه شود.

در تهیه جدول حجم یک‌عامله، با توجه به محدودیت‌هایی که در مدل قبلی (Dissecsu-Meyer) مشاهده شد، مدل Hohenadl-Krenn به‌عنوان گزینه بعدی و با بیشترین امتیاز انتخاب شد. این مدل که به‌صورت یک معادله چندجمله‌ای با ضرایب خطی و درجه دوم برای قطر در ارتفاع برابر سینه تعریف شده است، در تعدادی از بررسی‌های معتبر گذشته به‌عنوان مدلی دقیق و قابل اعتماد برای برآورد حجم درختان مطرح شده است. به‌طور مثال، در پژوهش (Giri et al. (2021) که به بررسی معادلات حجم در جنگل‌های شمال شرقی هند پرداخته‌اند، مدل Hohenadl-Krenn به دلیل دقت زیاد و پایداری در دامنه‌های مختلف قطر، یکی از بهترین مدل‌ها معرفی شده است. همچنین (De Cauwer et al. (2020 در پژوهشی در آفریقای جنوبی این مدل را در میان مدل‌های حجم‌سنجی یک‌عامله به‌عنوان گزینه‌ای مناسب معرفی کردند که دقت قابل

را مؤثر در پیش‌بینی حجم کل تنه و قابل اعتماد دانسته است. این پژوهش با تحلیل داده‌های گسترده نشان داد که مدل Takata می‌تواند به‌خوبی حجم درختان را با گونه‌ها و شرایط متفاوت برآورد کند.

در نهایت، استفاده از مدل Takata به‌عنوان جایگزین مدل Näslund، ضمن رفع مشکل تولید حجم منفی در قطرهای کم، موجب افزایش دقت و قابلیت اعتماد جداول حجم دوعامله شده و امکان بهره‌برداری بهینه و پایدارتر از منابع زراعت چوب را فراهم می‌آورد. این انتخاب براساس ارزیابی‌های آماری دقیق و تطابق با نتایج بررسی‌های معتبر انجام شده که می‌تواند به‌عنوان مدلی استاندارد در بررسی‌های مشابه و در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

تهیه جداول حجم یک‌عامله و دوعامله برای گونه صنوبر سیاه یا تبریزی (*Populus nigra L.*) در صنوبرکاری‌های استان آذربایجان غربی با استفاده از روش‌های غیرمخرب، اهمیتی راهبردی در مدیریت و توسعه زراعت چوب در این منطقه دارد. این پژوهش نشان داد که روش‌های غیرمخرب با حفظ سلامت درختان و جلوگیری از قطع غیرضروری، ابزاری کارآمد برای جمع‌آوری دقیق اطلاعات لازم برای برآورد حجم درختان سرپا هستند. این رویکرد، ضمن کاهش هزینه‌ها و زمان آماربرداری، امکان پایش مستمر و مدیریت بهینه صنوبرکاری‌ها را فراهم می‌آورد. با توجه به اینکه استان آذربایجان غربی ظرفیت زیادی برای زراعت چوب صنوبر دارد، دسترسی به جداول دقیق حجم برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و اقتصادی بسیار حیاتی است. این پژوهش همچنین نشان داد که در انتخاب مدل‌های حجمی مناسب باید به محدودیت‌های برخی مدل‌ها برای قطرهای کم توجه ویژه داشت. برخی از

در تهیه جدول حجم دوعامله، پس از شناسایی محدودیت‌های مدل Näslund در تولید حجم منفی برای قطرهای کم، مدل Takata به‌عنوان گزینه دوم و با بیشترین امتیاز انتخاب شد. مدل Takata که نخستین بار در سال ۱۹۵۸ معرفی شد، یکی از مدل‌های کلاسیک و پرکاربرد در برآورد حجم تنه درختان است که براساس مشخصه‌های قطر در ارتفاع برابر سینه و ارتفاع کل درخت طراحی شده است. ساختار ریاضی این مدل به‌گونه‌ای است که علاوه بر سادگی، توانایی تطبیق با گونه‌ها و شرایط اقلیمی مختلف را دارد و به‌همین دلیل در بسیاری از بررسی‌ها به‌عنوان مدلی دقیق و قابل اعتماد برای برآورد حجم درختان مطرح شده است (Miguel et al., 2015).

بررسی‌های متعددی کارایی زیاد مدل Takata را برای گونه‌های مختلف جنگلی و مناطق اقلیمی متفاوت تأیید کرده‌اند که می‌تواند مهر تأییدی بر صحت نتایج این پژوهش بر استفاده از این مدل در تهیه جدول حجم دوعامله برای گونه صنوبر تبریزی در استان آذربایجان غربی باشد. به‌عنوان نمونه، Borges et al. (2023) در پژوهشی بر روی گونه اکالیپتوس در سیستم‌های بیشه-زراعی، مدل Takata را دقیق‌ترین مدل در برآورد حجم درختان گزارش کردند. این مدل بیشترین مقادیر ضریب تبیین تعدیل شده ($R^2=0.93$) و کمترین خطای استاندارد را داشت که نشان از دقت و قابلیت اطمینان آن دارد. در پژوهشی دیگر، Souza et al. (2024) در جنگل‌های منطقه ساراوادای برزیل، مدل Takata را به‌عنوان یکی از مدل‌های کلیدی و مؤثر در محاسبات حجم درختان معرفی کردند که دقت زیادی در انواع گونه‌ها و طبقات قطری مختلف ارائه می‌دهد. علاوه بر این، پژوهش انجام شده توسط Monárrez-González et al. (2024) در توده‌های جنگلی در مکزیک، استفاده از مدل Takata

صنوبر در استان آذربایجان غربی استفاده کرد تا تولید چوب بهینه شده و سودآوری اقتصادی افزایش یابد.

۴- آموزش و توانمندسازی ذی‌نفعان: برگزاری کارگاه‌های آموزشی و ترویجی برای صنوبرکاران، کارشناسان منابع طبیعی و دانشجویان در مورد اهمیت و نحوه استفاده از جداول حجم و روش‌های غیرمخرب می‌تواند به بهبود مدیریت صنوبرکاری‌ها در سطح منطقه کمک کند.

در نهایت می‌توان بیان کرد که این پژوهش با ارائه جداول حجمی دقیق و تأکید بر روش‌های غیرمخرب، گام مهمی در راستای مدیریت پایدار صنوبرکاری‌ها در استان آذربایجان غربی برداشته است. امید است نتایج این تحقیق، مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه و راهبردی در زمینه توسعه زراعت چوب در این منطقه باشد و به تحقق اهداف توسعه پایدار منابع طبیعی کمک کند.

تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم (INSF) برگرفته از طرح شماره ۴۰۰۵۱۴۴ انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از بنیاد ملی علم (صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور) بابت حمایت مالی از این پژوهش و همچنین از موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور اعلام می‌دارند.

References

- Abedi, R. Biomass, stem volume, and carbon sequestration based on allometric equations for *Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall. *Polish Journal of Natural Sciences* **2023**, 38 (3), 317–330.
- Alaejos, J.; Tapias, R.; López, F.; Romero, D.; Ruiz, F.; Fernández, M. Biomass production and quality of twelve fast-growing tree taxa in short rotation under

مدل‌ها با وجود عملکرد آماری مناسب، در قطرهای کم دچار تولید حجم منفی می‌شوند که کاربرد عملی آنها را برای درختان جوان و کم‌قطر با چالش مواجه می‌کند. در مقابل، مدل‌های جایگزین، دقت و پایداری لازم را در دامنه‌های مختلف قطر ارائه کردند. این مدل‌های بهینه‌شده، ابزاری مطمئن برای برآورد حجم در صنوبرکاری‌های منطقه خواهند بود که می‌توانند به افزایش بهره‌وری و پایداری این منابع کمک شایانی کنند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش می‌توان پیشنهادها را زیر را برای موفقیت بیشتر استان در زمینه صنوبرکاری ارائه داد:

۱- استانداردسازی و ترویج روش‌های غیرمخرب: با توجه به مزایای اثبات‌شده روش‌های غیرمخرب در برآورد حجم، پیشنهاد می‌شود این روش‌ها به‌عنوان شیوه‌نامه استاندارد در تمامی فعالیت‌های آماربرداری و مدیریت صنوبرکاری‌ها در استان آذربایجان غربی ترویج و پیاده‌سازی شوند.

۲- توسعه مدل‌های حجمی برای سایر گونه‌های اقتصادی: پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی بر توسعه مدل‌های حجمی بومی‌سازی شده برای دیگر گونه‌های اقتصادی با استفاده از روش‌های غیرمخرب انجام شود.

۳- بهره‌برداری بهینه از جداول حجم: از جداول حجم یک‌عامله و دوعامله تهیه‌شده در این پژوهش می‌توان برای برنامه‌ریزی دقیق‌تر کاشت، داشت و برداشت

Mediterranean climate. *Forests* **2023**, 14 (6), 1156.

- Alcudia-Aguilar, A.; Martínez-Zurimendi, P.; van der Wal, H.; Castillo-Uzcanga, M. M.; Suárez-Sánchez, J. Allometric estimation of the biomass of *Musa* spp. in homegardens of Tabasco, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* **2019**, 22 (1), 43–56.
- Bagheri, R.; Namiranian, M.; Zobeiry, M.; Modir Rahmati, A. R. Determination of

- volume tables for Zanjan-Rood River native poplars. *Iranian Journal of Forest & Poplar Research* **2002**, *9* (1), 1–36. (In Persian)
- Blanco, R.; Blanco, J. A. Empowering forest owners with simple volume equations for poplar plantations in the Órbigo River Basin (NW Spain). *Forests* **2021**, *12* (2), 124.
- Borges, W. L. B.; Freitas, R. S.; da Silva, G. S.; Silvestre, M. A. M.; de Moraes, M. L. T. Volumetric models for quantifying the wood volume of two eucalyptus hybrids in an agrosilvipastoral system. *Australian Journal of Crop Science* **2023**, *17* (4), 332–342.
- Bornand, A.; Rehus, N.; Morsdorf, F.; Thürig, E.; Abegg, M. Individual tree volume estimation with terrestrial laser scanning: Evaluating reconstructive and allometric approaches. *Agricultural and Forest Meteorology* **2023**, *341*, 109654.
- Burnham, K. P.; Anderson, D. R. Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research* **2004**, *33* (2), 261–304.
- Chai, T.; Draxler, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development* **2014**, *7* (3), 1247–1250.
- Chianucci, F.; Puletti, N.; Grotti, M.; Ferrara, C.; Giorcelli, A.; Coaloa, D.; Tattoni, C. Nondestructive tree stem and crown volume allometry in hybrid poplar plantations derived from terrestrial laser scanning. *Forest Science* **2020**, *66* (6), 737–746.
- Daugaviete, M.; Makovskis, K.; Lazdiņš, A.; Lazdiņa, D. Suitability of fast-growing tree species (*Salix* spp., *Populus* spp., *Alnus* spp.) for the establishment of economic agroforestry zones for biomass energy in the Baltic Sea region. *Sustainability* **2022**, *14* (24), 16564.
- De Cauwer, V.; Beeckman, H.; Kleinn, C.; Moses, M.; Nott, A.; Seifert, T.; Muys, B. Improving the knowledge base for tropical dry forest management in southern Africa: Regional volume models for *Pterocarpus angolensis*. *Forest Ecology and Management* **2020**, *477*, 118485.
- De Lima, Q. S.; da Cunha, T. A.; Amaro, M. A.; Figueiredo, E. O.; Parente, P. R. F. Volume estimate for three timber species with commercial interest from the diameter of the stump. *Floresta* **2021**, *51* (3), 776–784.
- Gao, S.; Zhang, Z.; Cao, L. Individual tree structural parameter extraction and volume table creation based on near-field LiDAR data: A case study in a subtropical planted forest. *Sensors* **2021**, *21* (23), 8162.
- Giri, K.; Chandra, G.; Jayaraj, R. S. C.; Borah, R. K.; Kardong, P.; Borah, S.; Goswami, A. K. Regression models for estimating stem volume of *Aquilaria malaccensis* (Lam.) in northeast India. *Environmental Challenges* **2021**, *5*, 100279.
- Gong, S.; Liu, S.; Li, F.; Xu, G.; Chen, J.; Jia, L.; Shi, Z. Natural forests vs. plantations: A meta-analysis of consequences for soil organic carbon functional fractions. *Journal of Environmental Management* **2025**, *377*, 124673.
- Gorji Bahri, Y. Preparation of volume table for *Populus euramericana* I-214. *Journal of Forest & Rangeland Research Institute* **1992**, *82*, 25–32. (In Persian)
- Henareh, J.; Ahmadloo, F.; Pato, M. Evaluation of yield and financial advantage of intercropping of poplar (*Populus nigra* 62/154) with alfalfa (*Medicago sativa* L.) at Saatlou Poplar Research Station of Urmia. *Forest Research and Development* **2025**, *10* (4), 453–477. (In Persian)
- Hjelm, B.; Johansson, T. Volume equations for poplars growing on farmland in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* **2012**, *27*, 561–566.
- Hosein Zadeh, O. Analysis of poplar process value chain in West Azerbaijan Province aimed at upgrading. *Iranian Journal of*

- Wood & Paper Industry* **2015**, 6 (1), 41–52. (In Persian)
- Imana-Encinas, J.; Antunes-Santana, O.; Riesco-Muñoz, G. Selection of a volumetric equation for *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake in the central region of the State of Goiás, Brazil. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* **2019**, 16 (39), 2–9.
- Jahani, A.; Calagari, M.; Modirrahmati, A. R.; Ghasemi, R. Determining the best stem form factor equation for *Populus deltoides* in poplar plantations of Alborz Research Station, Karaj. *Iranian Journal of Forest & Poplar Research* **2014**, 22, 216–224. (In Persian)
- Kanabus, R.; Miścicki, S. Evaluation of the methods of tree height estimation on reference sample plots for the assessment of growing stock volume using airborne laser scanning. *Sylwan* **2021**, 165 (8), 611–622.
- Liu, J.; Feng, Z.; Mannan, A.; Khan, T. U.; Cheng, Z. Comparing non-destructive methods to estimate volume of three tree taxa in Beijing, China. *Forests* **2019**, 10 (2), 92.
- Mehtätalo, L.; de-Miguel, S.; Gregoire, T. G. Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian Journal of Forest Research* **2015**, 45 (7), 826–837.
- Miguel, E. P.; Cerdeira, A. L. N.; Azevedo, G. B.; Azevedo, G. T. O. S.; Pereira, R. S. Compatibility between wood volume estimation methods in a *Eucalyptus* stand. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* **2015**, 9 (36), 20–26.
- Mirakhorlou, Kh. *Survey, Distribution and Area of Populus spp. Plantations in Iran Using Sentinel-2 Satellite Data*; Final Research Report; Research Institute of Forests and Rangelands: Tehran, Iran, 2020. (In Persian)
- Monárrez-González, J. C.; Márquez-Linares, M. A.; López-Hernández, J. A.; Pérez-Verdín, G.; Quiñonez-Barraza, G.; García-Cuevas, X. Total-stem volume and taper equations for commercial species in the temperate ecosystem of the State of Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* **2024**, 15 (84), 4–28.
- Mura, M.; Scotti, R. Evaluation of methods to improve the direct estimation of standing tree volume. *iForest – Biogeosciences and Forestry* **2025**, 18 (2), 87–95.
- Muukkonen, P. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research* **2007**, 126 (2), 157–166.
- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **1970**, 10 (3), 282–290.
- Nazarnejad, H.; Shahhossein, T.; Asadzadeh, F. Spatiotemporal variations of rainfall erosion in West Azerbaijan Province. *Geography and Environmental Sustainability* **2018**, 8 (2), 89–99. (In Persian)
- Nigul, K.; Padari, A.; Kiviste, A.; Noe, S. M.; Korjus, H.; Laarmann, D.; Kangur, A. The possibility of using the Chapman-Richards and Näslund functions to model height-diameter relationships in hemiboreal old-growth forest in Estonia. *Forests* **2021**, 12 (2), 184.
- Oliveira, X. M.; Ribeiro, A.; Ferraz Filho, A. C.; Mayrinck, R. C.; Lima, R. R.; Scolforo, J. R. S. Volume equations for *Khaya ivorensis* A. Chev. plantations in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **2018**, 90 (4), 3285–3298.
- Pascual, A.; Pukkala, T.; de-Miguel, S.; Pesonen, A.; Packalen, P. Influence of timber harvesting costs on the layout of cuttings and economic return in forest planning based on dynamic treatment units. *Forest Systems* **2018**, 27 (1), e001.
- Raptis, D. I.; Kazana, V.; Kazaklis, A.; Stamatiou, C. Development and testing of volume models for *Pinus nigra* Arn., *Fagus sylvatica* L., and *Quercus pubescens* Willd. *Southern Forests* **2020**, 82 (4), 331–341.
- Sagheb-Talebi, Kh. Volume table of *Populus euramericana* I-448. *Research*

- & *Reconstruction* **1996**, *30*, 58–61. (In Persian)
- Şahin, A.; Çomak, A. Suitability of various volume equations for log volume calculation. *Forestist* **2023**, *73* (2), 121–130.
- Santos, F. M.; Terra, G.; Chaer, G. M.; Monte, M. A. Modeling the height-diameter relationship and volume of young African mahoganies established in successional agroforestry systems in northeastern Brazil. *New Forests* **2019**, *50* (3), 389–407.
- Singhdoha, A.; Bangarwa, K. S.; Johar, V.; Hooda, B. K.; Dhillon, R. S. Assessment of general volume table for *Populus deltoides* in northern Haryana. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* **2018**, *7* (1), 1665–1668.
- Souza, Y. F.; Miguel, E. P.; Lima, A. J. N.; Souza, Á. N.; Matricardi, E. A. T.; Rezende, A. V.; Biali, L. J. Generic and specific models for volume estimation in forest and savanna phytophysionomies in the Brazilian Cerrado. *Plants* **2024**, *13* (19), 2769.
- Šrámek, M.; Weger, J.; Bubeník, J.; Matoušková, M.; Lengálová, K.; Matula, R. Effective woody biomass estimation in poplar short-rotation coppices—*Populus nigra* × *P. maximowiczii*. *iForest – Biogeosciences and Forestry* **2023**, *16* (4), 202–210.
- Tenzin, J.; Wangchuk, T.; Hasenauer, H. Form factor functions for nine commercial tree species in Bhutan. *Forestry* **2017**, *90* (3), 359–366.
- Vandendaele, B.; Martin-Ducup, O.; Fournier, R. A.; Pelletier, G.; Lejeune, P. Mobile laser scanning for estimating tree structural attributes in a temperate hardwood forest. *Remote Sensing* **2022**, *14* (18), 4522.
- Vornicu, L.; Okros, A.; Şmuleac, L.; Paşcalău, R.; Petcov, A.; Zoican, Ş.; Zoican, C. Energetic poplars and their importance for the environment. *Research Journal of Agricultural Science* **2023**, *55* (2), 320–327.
- Wang, Y.; Kershaw, J. A.; Ducey, M. J.; Sun, Y.; McCarter, J. B. What diameter? What height? Influence of measures of average tree size on area-based allometric volume relationships. *Forest Ecosystems* **2024**, *11*, 100171.
- Willmott, C. J. On the validation of models. *Physical Geography* **1981**, *2* (2), 184–194.
- Yusup, A.; Halik, Ü.; Keyimu, M.; Aishan, T.; Abliz, A.; Dilixiati, B.; Wei, J. Trunk volume estimation of irregular-shaped *Populus euphratica* riparian forest using TLS point cloud data and multivariate prediction models. *Forest Ecosystems* **2023**, *10*, 100082.