

آماده انتشار

تهیه جداول حجم برای گونه صنوبر کبوده (*Populus alba* L.) به روش غیرمخرب در استان چهارمحال و بختیاری

چکیده

سابقه و هدف: برآورد موجودی حجمی صنوبرکاری‌ها نقش مهمی در شناخت وضعیت موجود و مدیریت پایدار این منابع به‌منظور برنامه‌ریزی تولید و بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برای توسعه زراعت چوب دارد. جداول حجم، به‌عنوان یکی از این ابزارهای کلیدی، امکان برنامه‌ریزی اقتصادی و بهینه‌سازی بهره‌برداری را فراهم می‌کنند. برای توسعه این جداول، استفاده از روش‌های غیرمخرب که امکان برآورد حجم را بدون آسیب به درختان فراهم می‌کنند، اهمیت بسیاری دارد. هدف تحقیق حاضر تهیه جدول حجم یک و دو عامله برای گونه صنوبر کبوده در استان چهارمحال و بختیاری است تا در نتیجه امکان فروش چوب صنوبر به‌صورت حجمی فراهم شود.

مواد و روش‌ها: برای اجرای این تحقیق، ابتدا با عملیات میدانی، اغلب توده‌های صنوبرکاری در سطح استان چهارمحال و بختیاری شناسایی شدند. سپس در ۱۰ توده مختلف صنوبرکاری با گونه کبوده (*Populus alba* L.) در مجموع ۶۷ اصله درخت به روش نمونه‌برداری طبقه‌ای-تصادفی (Stratified random sampling) براساس طبقات قطری از ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شدند. پس از انتخاب درختان نمونه، قطر برابرسینه (DBH) و ارتفاع کل آنها اندازه‌گیری و از محل یقه تنه هر درخت نمونه، محل قطعات دومتری با استفاده از دستگاه لیزری لایکا مدل D810 مشخص و سپس قطر آن ارتفاع با استفاده از همین دستگاه به صورت سرپا و بدون قطع درخت اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد حجم کل واقعی تنه هر درخت از مجموع حجم بینه‌های ۲ متری با استفاده از رابطه اسمالیان به‌دست آمد. به‌منظور ارزیابی صحت اندازه‌گیری قطر درختان در ارتفاعات مختلف تنه با استفاده از دستگاه لایکا از تعداد ۱۳ اصله درخت صنوبر که از قبل برای قطع برنامه‌ریزی شده بودند، استفاده شد، به‌طوری‌که قطر این درختان در ارتفاعات مختلف تنه قبل و پس از قطع به‌ترتیب با استفاده از دستگاه لایکا و کالیپر اندازه‌گیری و با استفاده از آزمون تی جفتی مقایسه شدند. برای تهیه جداول حجم، داده‌های قطر، ارتفاع و حجم تنه درختان نمونه با استفاده از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی تحلیل شدند. برای این منظور از تعداد ۷ مدل یک عامله (فقط براساس قطر برابرسینه) و ۹ مدل دو عامله (براساس قطر برابرسینه و ارتفاع کل) به‌ترتیب برای برازش داده‌های قطر با حجم واقعی تنه و قطر و ارتفاع با حجم واقعی تنه درختان استفاده شد. سپس از شاخص‌های کارایی آکائیکه (AIC)، مقدار جذر میانگین مربعات خطای مدل (RMSE)، میانگین خطای مطلق مدل (MAE)، ضریب کارایی نش‌ساتکلیف (NSE) و شاخص ویلموث (WI) برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها و در نهایت انتخاب بهترین مدل استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج آزمون تی جفتی نشان داد که تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده قطرهای متناظر بین دو دستگاه کالیپر و لایکا معنی‌دار نیست، به‌عبارت دیگر دو دستگاه برای اندازه‌گیری قطر یکسان عمل می‌کنند. برای برآورد حجم و تهیه جداول حجم یک‌عامله و دوعامله در بین مدل‌های دوعامله از مدل شوماخر- هال ۲ (Schumacher-Hall 2) با $RMSE\% = 10\%$ و $R^2 = 0.98$ در بین مدل‌های یک‌عامله از مدل برک‌هوت (Berkhout) با $RMSE\% = 17\%$ و $R^2 = 0.95$ به‌عنوان بهترین مدل استفاده شد. جدول حجم یک‌عامله براساس مدل $V = 0.0000276 \times D^{2.295} \times H^{0.7785}$ و جدول حجم دوعامله براساس مدل $V = 0.00003776 \times D^{2.969}$ تهیه شد.

نتیجه‌گیری: مدل‌های رگرسیونی استفاده شده در این مطالعه می‌توانند به طور مؤثری برای محاسبه حجم سرپای درختان کبوده استفاده شده و به بهبود مدیریت صنوبرکاری‌ها و فروش حجمی چوب کمک کنند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند اطلاعات مبنایی باارزشی برای استفاده در تعیین حجم دقیق سرپا و قابل فروش هر توده صنوبر، برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در مورد برداشت، تحلیل رشد و راهبردهای مدیریت پایدار در زمینه توسعه زراعت چوب و توسعه صنایع مرتبط در استان چهارمحال و بختیاری باشد.

واژه‌های کلیدی: حجم تنه، حجم سرپا، شاخص‌های نکویی برازش، طبقات قطری، مدل‌های رگرسیونی.

مقدمه

زراعت چوب صنوبر به‌عنوان یکی از الگوهای اقتصادی، مورد توجه دست اندرکاران تأمین چوب در کشور است. با افزایش تقاضا برای چوب و ممنوعیت بهره‌برداری از جنگل‌های کشور، میزان تقاضا برای چوب صنوبر به‌شدت افزایش یافته است (۱). بدیهی است که اتخاذ سازوکارهای حمایتی مناسب و ارائه تسهیلات لازم می‌تواند فضا را برای مشارکت بخش خصوصی در فعالیت زراعت چوب آماده کند. زراعت چوب با استفاده از گونه‌های تندرُشد صنوبر به‌عنوان منبعی مهم در تولید چوب به شمار می‌رود که نقش مهمی در حمایت از معیشت مردم روستایی و اشتغال آنها، کمک به توسعه پایدار و تأمین مواد خام برای صنایع چوب و کاغذ داخلی دارد (۲). از سوی دیگر برنامه‌ریزی دقیق برای تأمین نیاز اولیه کارخانه‌های صنایع چوب، نیازمند آگاهی از موجودی حجمی و تولید درختان در توده‌های صنوبر است (۱).

گونه‌های صنوبر به‌لحاظ سرشت اکولوژیکی و اقلیمی از گذشته در مناطق مختلف ایران سازگار شده‌اند. در این راستا، گونه بومی کبوده (*Populus alba L.*) گونه غالب توده‌های صنوبر موجود در استان چهارمحال و بختیاری است که به شیوه سنتی کاشته می‌شود. مساحت توده‌های صنوبر کبوده در این استان در سال ۱۳۷۶ برابر ۵۰۰۰ هکتار برآورد شده است (۲) که این سطح به دلایلی همچون خشکسالی، مزیت اقتصادی پائین در شیوه کاشت سنتی و همچنین بازگشت ۱۰ تا ۱۵ ساله و دیرهنگام سرمایه و درآمد و تبدیل به سایر کشت‌های زراعی در سال ۱۳۹۸ به ۱۵۸۰ هکتار کاهش یافته است (۳). هر گونه برنامه‌ریزی و اعمال مدیریت تولید چوب و بازار فروش مستلزم شناخت کافی از شرایط موجود، ارزیابی دقیق موجودی حجمی، ارزش‌گذاری اقتصادی و سیستم خرید و فروش چوب است. براساس تحقیقات انجام شده، خرید و فروش چوب صنوبر در ۸۸ درصد صنوبرکاری‌ها به‌دلیل فقدان جداول حجم ملی برای هر یک از گونه‌های صنوبر به‌صورت وزنی است. به‌عبارت دیگر چوب به ازای هر کیلوگرم وزن تر فروخته می‌شود و فقط در ۱۲ درصد توده‌ها به‌صورت سرپا و یکجا به فروش می‌رسد (۴). این روش فروش چوب سرپا در مناطق کوهستانی و به دور از کارگاه‌های چوب‌بری و صنایع چوب اتفاق می‌افتد و دلالتان چوب درختان صنوبر را به قیمت ارزان خریداری کرده و عملیات قطع و برش و حمل و نقل را نیز خودشان انجام می‌دهند.

اگر بهره‌برداران برآورد نسبتاً دقیقی از حجم واقعی تنه تجاری درختان خود به‌صورت سرپا داشته باشند می‌توانند آنها را به‌صورت حجمی به فروش برسانند و یا اینکه با داشتن جرم حجمی هر گونه صنوبر که مشخص است، این حجم را به وزن تبدیل کرده و سپس درختان صنوبر خود را به‌صورت سرپا و برابر ارزش واقعی آن به فروش برسانند.

اصولاً برای فروش چوب باید حجم تنه تجاری درخت را به‌صورت دقیق محاسبه کرد. شایان ذکر است در مواقعی که تولید چوب به‌صورت کیفی انجام می‌شود، فروش آن به‌صورت حجمی ارزش افزوده بیشتری در مقایسه با روش وزنی خواهد داشت. به‌طور کلی روش‌های برآورد حجم تنه درختان را می‌توان به دو دسته اصلی (۱) استفاده از فرمول‌های حجم‌یابی (با به‌کارگیری ضریب شکل تنه) و (۲) استفاده از جداول حجم موجود تقسیم‌بندی کرد. در روش دوم ابتدا با استفاده از یکسری از داده‌های حاصل از نمونه‌برداری و اندازه‌گیری قطر و ارتفاع درختان نمونه و همچنین استفاده از داده‌های محاسبه حجم تنه این درختان به روش آنالیز تنه، یک رابطه رگرسیونی یک عامله (بین قطر با حجم) و یا دو عامله (بین قطر و ارتفاع با حجم) محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از این رابطه جدول حجم یک عامله (تاریف) و یا دو عامله برای هر گونه درختی تهیه می‌شود تا با استفاده از آن بتوان حجم تنه سایر درختان را با دقتی مناسب برآورد کرد. بنابراین هنگامی که از یک مدل حجمی استفاده می‌شود دیگر نیازی به استفاده از ضریب شکل تنه نیست.

اما در حال حاضر، عدم وجود جدول حجم یک‌عامله یا دو عامله که بهره‌بردار صنوبر بتواند به‌سادگی و با اندازه‌گیری قطر تنه یا قطر و ارتفاع تنه به حجم آن دست یابد، معمولاً منجر به فروش چوب صنوبر به‌صورت وزنی می‌شود. در صورتی که بتوان بدون قطع درخت و به‌روش غیرمخرب آنالیز تنه را انجام و براساس آن جداول حجم صنوبرها را تهیه کرد، به دلیل سهولت و سرعت انجام کار، هم در هزینه و زمان صرفه‌جویی می‌شود و هم تعداد درخت بیشتری را می‌توان به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار داد، ضمن اینکه در این حالت دیگر به ابزار توزین چوب (مانند باسکول) نیز نیازی نیست.

تهیه جدول حجم برای گونه‌های مختلف درختی در مطالعات متعددی در مناطق مختلف ایران و جهان انجام شده است. گرجی‌بحری (۱۹۹۲) در ایستگاه تحقیقات خوشامیان کلارآباد استان مازندران براساس روابط بین قطر و حجم درختان قطع شده، جدول حجم یک‌عامله برای صنوبر دورگ اورامریکن کلن I-214 تهیه کرد (۵). همچنین ثاقب طالبی (۱۹۹۶) نیز در همین ایستگاه برای صنوبر دورگ اورامریکن کلن I-448 براساس روابط بین قطر و ارتفاع با حجم ۱۲۰ درخت صنوبر قطع شده، جدول حجم

دو عامله تهیه کرد که با در نظر گرفتن دو متغیر قطر و ارتفاع موجب افزایش دقت برآورد حجم درختان می‌شد (۶). یلم و

یوهانسون (۲۰۱۲) برازش معادلات حجمی برای صنوبرکاری‌های سوئد را با استفاده از داده‌های ۷۲ پایه صنوبر از ۳۷ توده در مرکز

و جنوب سوئد انجام دادند. آنها یک معادله حجمی ساده با سه پارامتر را برای برآورد حجم صنوبر با قطر برابر سینه و ارتفاع کل

به‌عنوان متغیرهای مستقل برازش دادند که بهترین عملکرد از نظر مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای مطلق،

معادلات توسعه یافته توسط اریکسون و اسکات به‌دست آمد (۷). باقری و همکاران (۲۰۰۲) جدول حجم دو عامله را برای دو گونه

صنوبر آلبا (کبوده) و نیگرا (تبریزی) در منطقه زنجان‌رود استان زنجان با انتخاب نمونه‌های لازم از ۹۸ توده صنوبرکاری براساس

روابط بین قطر و ارتفاع با حجم تهیه کردند (۸). قرآنی و همکاران (۲۰۱۴) در صنوبرکاری‌های شرکت جنگل شفارود واقع در

غرب استان گیلان، میزان حجم تک پایه‌های ۳۷۰ اصله صنوبر دلتوئیدس در طبقه‌های قطری یک سانتی‌متری (۷ تا ۴۳ سانتی‌متر)

با تعداد ۱۰ اصله از هر طبقه قطری را به دو روش هوبر و اسمالیان محاسبه کردند. نتایج آنها نشان داد که بین میانگین حجم گونه

صنوبر به دو روش هوبر و اسمالیان اختلاف معنی‌دار آماری وجود ندارد (۹). در پردیس نازلو دانشگاه ارومیه روش‌های حجم‌یابی

ساده، هوبر و هوه‌نادل در سه توده دست کاشت صنوبر تبریزی در سه فاصله کاشت ۱/۵×۱، نامنظم ۱/۵×۱ و ۳×۱ متر توسط

فعال‌خواه و همکاران (۲۰۱۷) مقایسه شد. نتایج آنها نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین میانگین حجم محاسبه شده با سه روش

یاد شده وجود ندارد و برای تعیین حجم توده‌های دست‌کاشت صنوبر با شرایط مشابه (نوع گونه، فاصله کاشت و سن توده)،

نیازی به استفاده از روش زمان‌بر و پرهزینه هوه‌نادل و یا حتی هوبر نیست و می‌توان روش ساده را برای حجم‌یابی به کار برد

(۱۰). سینگدوها و همکاران (۲۰۱۸) جداول حجم یک‌عامله و دو عامله را برای گونه صنوبر دلتوئیدس با استفاده از داده‌های ارتفاع

درخت و قطر برابر سینه ۹۱ اصله درخت در شمال ایالت هاریانا هندوستان تهیه کردند. آنها مدل دو عامله Schumacher-Hall با

$R^2 = 0.941$ و مدل یک عامله با $R^2 = 0.902$ را به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی حجم درختان صنوبر در ایالت هاریانای

هند معرفی کردند (۱۱). یلم (۲۰۲۱) معادلات تجمعی حجم تجاری تنه صنوبرکاری‌های سوئد را ارائه کرد. داده‌ها از ۱۱۲ درخت

در ۴۲ توده به‌دست آمد. نتایج تحقیق نشان داد که معادله برای قطرهای زیاد، عملکرد بهتری نسبت به معادله بر اساس طول تنه

داشت. او پیشنهاد داد که معادلات ارائه شده را می‌توان برای بهینه‌سازی کارایی و سوددهی صنوبر در هنگام برداشت درختان با

قطرهای بزرگتر، استفاده کرد. همچنین این معادلات را می‌توان در برآورد حجم تجاری درختان سرپا در صنوبرکاری‌ها استفاده کرد

(۱۲). محمد و همکاران (۲۰۲۴) با مطالعه بر روی صنوبر تبریزی (*Populus nigra*) در شمال عراق، روابط بین رشد قطری

(جابجایی از یک طبقه قطری به طبقه بالاتر) و قطر برابرسینه را با استفاده از مدل‌های ریاضی انجام دادند. طبق نتایج و براساس

جدول توده، عوامل تراکم درختان، رشد قطری، قطر برابرسینه و ارتفاع کل در میزان حجم برآوردی مؤثر بودند (۱۳).

با توجه به سوابق تحقیق ذکر شده می‌توان بیان کرد که با وجود گسترش زراعت چوب در استان چهارمحال و بختیاری و

اهمیت اقتصادی و اکولوژیکی گونه کبوده (*Populus alba L.*) در این منطقه، تاکنون جداول حجم دقیق و بومی برای این گونه

تهیه نشده است؛ به طوری که فقدان مدل‌های حجمی دقیق خلایبی جدی در فرآیند تصمیم‌سازی، پیش‌بینی بهره‌برداری و ارزیابی

عملکرد کمی زراعت چوب در این استان ایجاد کرده است.

بنابراین این پژوهش با هدف تهیه جداول حجم دقیق برای گونه کبوده در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از روش

غیرمخرب انجام شده تا صنوبرکاران منطقه بتوانند با داشتن چنین جداولی حجم واقعی چوب قابل فروش و در نتیجه ارزش واقعی

تولیدات چوبی خود را در اختیار داشته باشند. در حقیقت ترویج و جایگزینی روش فروش حجمی چوب صنوبر با روش فروش

وزنی که در حال حاضر در این استان رایج است و معمولاً به ضرر صنوبرکار تمام می‌شود، از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد که

موجب تقویت بخش خصوصی از طریق اقتصادی کردن فروش چوب صنوبر خواهد شد.

شایان ذکر است که تاکنون آنالیز تنه گونه صنوبر به صورت سرپا و غیرمخرب و با استفاده از ابزارهای لیزری اندازه‌گیری قطر

درخت در ارتفاعات مختلف تنه در داخل کشور به منظور تهیه جداول حجم انجام نشده که از نوآوری‌های این تحقیق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: استان چهارمحال و بختیاری با مساحتی حدود ۱۶۴۱۱ کیلومترمربع در محدوده ۹' ۳۱° تا ۴۷' ۳۲° عرض

شمالی و ۲۹' ۴۹° تا ۲۶' ۵۱° طول شرقی در ناحیه غربی کشور قرار دارد. این استان با ارتفاع متوسط ۲۱۵۳ متر از نظر توپوگرافی

یک سرزمین تپه ماهوری با دشت‌های میان کوهی است که در امتداد سلسله کوه‌های زاگرس واقع شده است. متوسط دما در

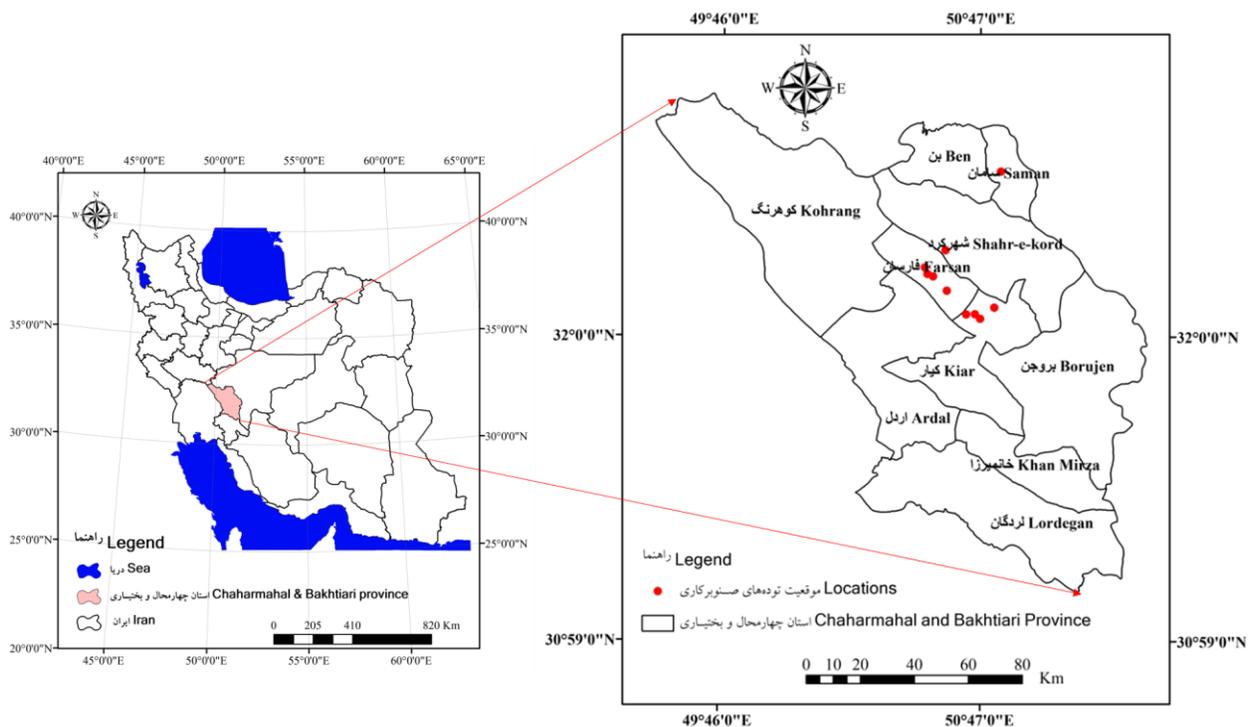
ایستگاه‌های استان بین ۸/۵ درجه در ایستگاه کوه‌رنگ و ۲۰ درجه در ایستگاه مرغک در نوسان است. همچنین میزان بارش استان

بیز بین ۲۵۴ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر در ایستگاه‌های بروجن و کوهرنگ می‌باشد. به‌طور کلی متوسط بارش سالیانه استان حدود ۷۰۷

میلی‌متر می‌باشد (۱۴).

این استان دارای ۱۱ شهرستان شهرکرد، بروجن، فارس، لردگان، اردل، کوهرنگ، کیار، سامان، بن، خانمیرزا و فلارد است (شکل ۱). برای انجام این تحقیق ۱۰ توده مختلف صنوبرکاری با گونه کیبوده (*Populus alba L.*) در نقاط مختلف شهرستان‌های فارس (سورشجان، گوجان)، کیار (شلمزار، دستنآه) و سامان (سوادجان) که از مناطق عمده صنوبرکاری با گونه کیبوده در این استان هستند برای اندازه‌گیری درختان صنوبر به‌صورت تصادفی انتخاب شدند (شکل ۱).

جدول ۱ مشخصات توده‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت استان چهارمحال و بختیاری در کشور و موقعیت توده‌های صنوبرکاری مورد مطالعه در سطح این استان (نقاط قرمز)

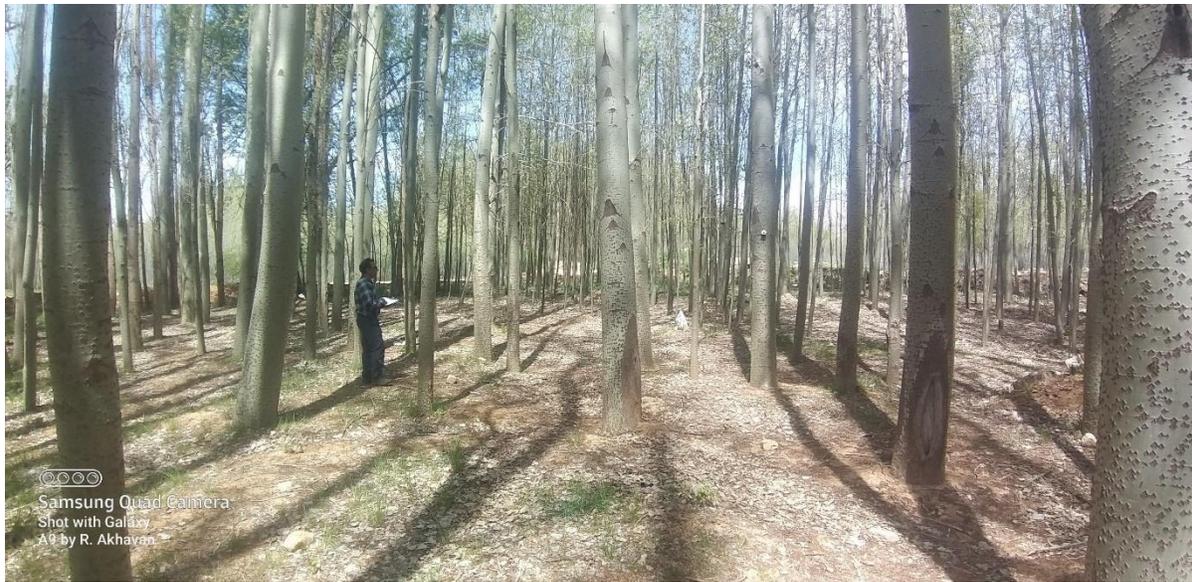
Figure 1. The location of study area in the Chaharmahal & Bakhtiari province in Iran and studied white poplar stands in the province (red dots)

جدول ۱- مشخصات توده‌های صنوبرکاری مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری

Table 1. The characteristics of studied white poplar stands in the Chaharmahal & Bakhtiari province

شکل زمین Land form	سن توده (سال) Stand Age (Years)	فاصله کاشت (متر) Planting Spacing (m)	ارتفاع از سطح دریا (متر) Elevation (m)	نام منطقه Location	ردیف No.
مسطح Flat	8	2 × 2	2086	فارسان - سورشجان Farsan – Sureshjan	1
مسطح Flat	10	1 × 1	2041	فارسان - گوجان ۱ Farsan – Gojan 1	2
مسطح Flat	متفاوت Mixed	نامنظم Irregular	2013	فارسان - گوجان ۲ Farsan – Gojan 2	3
مسطح Flat	16	1 × 1	2016	فارسان - ده چشمه ۱ Farsan – Deh Cheshmeh 1	4
مسطح Flat	15	2 × 2	2026	فارسان - ده چشمه ۲ Farsan – Deh Cheshmeh 2	5
مسطح Flat	15	1 × 2	1991	شلمزار - امیرآباد Shalamzar – Amirabad	6
مسطح Flat	7	1 × 1	2020	کیار - سلم Kiar – Salam	7
شیبدار Sloped	12	2 × 2	2060	کیار - دستنآ Kiar – Dastena	8
مسطح Flat	10	1 × 2	2023	شلمزار - خراجی Shalamzar – Kharaji	9
مسطح Flat	25	2 × 2	1906	سامان - سوادجان Saman – Savadjan	10

تصاویری از توده‌های صنوبرکاری مورد آماربرداری در این تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- دو نمونه از توده‌های صنوبرکاری شده با گونه کبوده در استان چهارمحال و بختیاری

Figure 2- Two examples of poplar stands planted by white poplar in Chaharmahal and Bakhtiari province

روش پژوهش

انتخاب و اندازه‌گیری درختان نمونه: در این تحقیق به منظور انتخاب درختان نمونه از روش نمونه‌برداری طبقه‌ای- تصادفی (Stratified random sampling) براساس طبقات قطری درختان صنوبر استفاده شد. طبقات قطری براساس بررسی‌های قبلی و منابع موجود برای گونه صنوبر کبوده از طبقه قطری ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و با فاصله هر طبقه ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در

نتیجه در کل ۱۱ طبقه قطری برای بررسی وجود داشت (طبقات قطری ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۲۸ و ۳۰ سانتی‌متر) و برای هر طبقه قطری ۲ سانتی‌متری باید حداقل ۵ پایه به عنوان تکرار (۱۵) به صورت تصادفی در ۵ توده مختلف از گونه کبوده اندازه‌گیری می‌شد (در مجموع ۵۵ درخت سرپا). با این حال، با این روش در مجموع تعداد ۶۷ اصله درخت صنوبر کبوده در سطح استان انتخاب و اندازه‌گیری شدند.

پس از انتخاب درختان نمونه، قطر برابر سینه آنها در ارتفاع ۱/۳۰ متری از سطح زمین با استفاده از دستگاه کالیپر دیجیتال هاگلوب تا دقت میلی‌متر و سپس ارتفاع کل درخت نیز با استفاده از دستگاه ورتکس (Vertex III) با دقت سانتی‌متر اندازه‌گیری و ثبت شد. در هر درخت منتخب صنوبر، از ارتفاع هم سطح زمین یعنی محل یقه هر درخت، قطر دو سر قطعات دو متری (که حجم آنها اختلاف ناچیزی با حجم استوانه خواهد داشت) تا ارتفاعی که قطر تنه برابر ۵ سانتی‌متر شود، بدون قطع درخت و به صورت سرپا با استفاده از دستگاه لیزری لایکا (Leica) مدل D810 Touch ساخت کشور سوئیس اندازه‌گیری و تعیین شد.

لازم به ذکر است که دستگاه لیزری لایکا علاوه بر اندازه‌گیری فاصله افقی و ارتفاع قادر است 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 ۸ تا ۱۲ متر بسته به ارتفاع درخت هدف) بر روی سه پایه آن در توده صنوبرکاری قرار گرفته و تراز می‌شود (شکل ۳). سپس نور لیزر دستگاه بر روی تنه درخت در ارتفاع برابر سینه که قبلاً به صورت دستی مشخص و علامت‌گذاری شده است تنظیم می‌شود (شکل ۴). 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 مانندی که در دو طرف عکس رقومی تنه درخت قرار دارند (شکل ۵) 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 عکس‌برداری 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 نشان داده می‌شود.



شکل ۵- محاسبه قطر در ارتفاع بالاتر از برابر سینه تنه درخت صنوبر

Figure 5. Calculating the diameter at height above breast height of a poplar tree stem



شکل ۴- برخورد نور لیزر دستگاه لایکا به تنه صنوبر برای اندازه گیری قطر

Figure 4. Laser beam from a Leica device hitting a poplar stem to measure the diameter



شکل ۳- نحوه استقرار دستگاه لایکا در توده صنوبر کاری

Figure 3. Installation the Leica device in a poplar plantation stand

پس از ثبت قطر تنه در ارتفاع مشخص (مثلاً ۱/۳۰ متر)، با استفاده از پیچ تنظیمی که در کنار دستگاه قرار دارد، شیب دستگاه افزایش داده می شود تا نور لیزر در راستای تنه درخت به ارتفاع بالاتری برای نقطه اندازه گیری بعدی انتقال داده شود که همزمان دستگاه فاصله ارتفاعی طی شده را محاسبه و بر روی صفحه نمایش نشان می دهد. به عنوان مثال با طی کردن ۷۰ سانتی متر از محل قطر برابر سینه (۱/۳ متر) به محل ارتفاع ۲ متری تنه رسیده می شود که با تکرار مراحل قبلی، قطر در ارتفاع ۲ متری تنه محاسبه و تعیین می شود و به همین ترتیب کار ادامه می یابد تا به محلی رسیده شود که قطر تنه درخت کمتر از ۵ سانتی متر (حداقل قطر تجاری) باشد که در این نقطه کار اندازه گیری متوقف می شود. در نتیجه با این روش اندازه قطر برای ابتدا و انتهای هر قطعه دو متری از تنه درخت صنوبر تعیین خواهد شد که با استفاده از آنها می توان حجم واقعی هر قطعه دو متری و در نهایت حجم واقعی کل تنه را محاسبه کرد. شایان ذکر است که برای سهولت اندازه گیری ها به وسیله دستگاه لایکا و وضوح بیشتر دید به قطر تنه

درخت در ارتفاعات بالاتر از برابرسینه درختان صنوبر باید تمامی اندازه‌گیری‌ها در فصل‌های پاییز، زمستان و اوایل بهار یعنی در زمان بی‌برگ بودن درختان صنوبر انجام شود تا نور لیزر دستگاه به تنه درختان صنوبر برخورد نماید.

ارزیابی صحت اندازه‌گیری قطر با دستگاه لایکا: به‌منظور 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 از قبل در ایستگاه تحقیقات البرز کرج برای قطع در نظر گرفته شده بودند، استفاده شد. بدین ترتیب که قبل از قطع این درختان ابتدا قطر در ارتفاع ۱/۳ متری، ۲ متری، ۴ متری، ۶ متری و تا ۱۴ متری (بسته به ارتفاع درختان نمونه) این درختان به‌صورت سرپا با استفاده از دستگاه لایکا به‌طور دقیق اندازه‌گیری شد. سپس این درختان شماره‌گذاری و مشخص شدند تا پس از قطع مجدداً 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 از دستگاه کالیپر تعیین قطر شدند. به‌منظور مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده قطر با دو دستگاه کالیپر و لایکا و تعیین اینکه آیا تفاوت‌های موجود معنی‌دار هستند یا خیر از آزمون تی جفتی استفاده شد.

محاسبه حجم درخت: براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، حجم هر قطعه دو متری با استفاده از رابطه اسمالیان (که برخلاف

رابطه هوبر از قطر دو سر هر بینه برای محاسبه حجم استفاده می‌کند و در نتیجه دقیق‌تر است)، محاسبه شد (۱۶) (رابطه ۱):

$$V_i = \frac{g_{1i} + g_{2i}}{2} \times h \Rightarrow g = \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (1)$$

به‌طوری که d_i : قطر ابتدا یا انتهای هر بینه به متر، V_i : حجم هر بینه به مترمکعب، g_1 : سطح مقطع ابتدای هر بینه به مترمربع، g_2 : سطح مقطع انتهای هر بینه به مترمربع، h : طول هر بینه به متر می‌باشد (معادل ۲ متر، البته طول بینه انتهایی ممکن است کمتر از ۲ متر باشد).

سپس حجم واقعی کل درخت از مجموع حجم قطعات ۲ متری به‌دست آمد (رابطه ۲).

$$V_T = \sum_{i=1}^n v_i \quad (2)$$

به‌طوری که V_T حجم واقعی کل تنه درخت به مترمکعب است.

انتخاب بهترین مدل برای تهیه جداول حجم یک‌عامله و دوعامله: در این تحقیق به منظور تعیین بهترین مدل از نظر میزان

خطا و کارایی برای برآورد حجم تنه درختان صنوبر براساس متغیرهای قطر و ارتفاع اندازه‌گیری شده و حجم‌های واقعی به دست

آمده، ابتدا براساس منابع موجود (۷، ۱۱، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰) تعداد ۱۶ مدل^۱ پر کاربرد برای برآورد حجم تنه درختان که شامل ۷ مدل^۲

یک‌عامله (فقط براساس قطر برابر سینه) و ۹ مدل^۳ دو عامله (براساس قطر برابر سینه و ارتفاع کل) بود، انتخاب شدند. مشخصات این

مدل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های حجم استفاده شده

Table 2. The characteristics of used volume models

نوع مدل Model Type	منبع Reference	رابطه مدل Formula	نام مدل Model Name	ردیف No.
یک‌عامله Single- entry	(21)	$V = a_0 + a_1 D^2$	Kopezky-Gehrhardt	1
	(22)	$V = a_1 D + a_2 D^2$	Dissecsu-Meyer	2
	(23)	$V = a_0 + a_1 D + a_2 D^2$	Hohenadl_Krenn	3
	(19)	$\ln(V) = a_0 + a_1 \ln(D)$	Hummel 1	4
	(24)	$\ln(V) = a_0 + a_1 \ln(D) + a_2 D^{-1}$	Brenac	5
	(19)	$V = a_0 + a_1 g$	Hummel 2	6
	(19)	$V = a_1 D^{a_2}$	Berkhout	7
دو عامله Double- entry	(25)	$V = a_0 + a_1 D^2 H$	Spurr 1	8
	(19)	$V = D^2 / (a_0 + a_1 (1/H))$	Honner	9
	(19)	$V = D^2 (a_0 + a_1 H)$	Ogaya	10
	(19)	$V = a_0 + a_1 D^2 + a_2 D^2 H + a_3 H$	Stoate	11
	(25)	$\ln(V) = a_0 + a_1 \ln(D^2 H)$	Spurr 2	12
	(26)	$\ln(V) = a_0 + a_1 \ln(D) + a_2 \ln(H)$	Schumacher-Hall 1	13
	(26)	$V = a_0 D^{a_1} H^{a_2}$	Schumacher-Hall 2	14
	(19)	$V = a_1 D^2 + a_2 D^2 H + a_3 D H + a_4 H^2$	Naslund	15
(19)	$V = D^2 H (a_0 + a_1 D)^{-1}$	Takata	16	

D : قطر برابر سینه بر حسب سانتی‌متر، H : ارتفاع کل درختان بر حسب متر، V : حجم تنه بر حسب مترمکعب و a_0 تا a_4

ضرایب مدل می‌باشند

D : diameter at breast height (cm); H : total tree height (m); V : stem volume (m^3); a_0 to a_4 : model coefficients

سپس با استفاده از تابع nls از بسته Stats در نرم‌افزار R (نسخه 4.4.1) 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 میزان خطا و کارایی از ۵ شاخص 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 ۵ شاخص و معیار عبارتند از:

- ۱- معیار کارایی آکائیکه (AIC^1) که هر چه مقدار آن کمتر باشد عملکرد مدل بهتر است.
- ۲- مقدار جذر میانگین مربعات خطای مدل ($RMSE^2$) که هر چه مقدار آن کمتر باشد عملکرد مدل بهتر است.
- ۳- میانگین خطای مطلق مدل (MAE^3) که هر چه مقدار آن کمتر باشد عملکرد مدل بهتر است.
- ۴- ضریب کارایی نش-ساتکلایف (NSE^4) که هر چه مقدار آن بیشتر باشد عملکرد مدل بهتر است.
- ۵- شاخص ویلموت (WI^5) که هر چه مقدار آن بیشتر باشد عملکرد مدل بهتر است.

معیارها و شاخص‌های یاد شده براساس رابطه‌های ۳ تا ۷ محاسبه شدند:

$$AIC = 2k - 2Ln(L) \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$WI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (7)$$

در روابط بالا 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 پارامترهای مدل آماری و L مقدار حداکثر تابع درستنمایی برای مدل برآورد شده است.

-
- 1-Akaike Information Criterion
 - 2- Root Mean Square Error
 - 3- Mean Absolute Error
 - 4- Nash-Sutcliffe Efficiency
 - 5-Wilmout Index of Agreement

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 بدست آورده بود به‌عنوان بهترین مدل برای برآورد حجم تنه درختان صنوبر انتخاب و براساس آن جداول حجم یک‌عامله یا دوعامله مربوطه تهیه شد (۱۷).

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 حداقل قطر در این داده‌ها ۵ و حداکثر ۲۱ سانتی‌متر و تا ارتفاع ۱۴ متری تنه بوده است. سپس از آزمون تی‌جفتی به‌منظور بررسی معنی‌دار بودن یا نبودن تفاوت مقادیر اندازه‌گیری شده قطر به‌وسیله این دو دستگاه با استفاده از این تعداد جفت داده استفاده شد. جدول ۳ نتیجه آزمون تی‌جفتی را برای این داده‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمون تی‌جفتی مقایسه بین مقادیر متناظر قطرهای اندازه‌گیری شده صنوبر به‌وسیله دو دستگاه کالیپر و لایکا

Table 3. Results of the paired student's t-test comparing corresponding diameter measurements of white poplar trees using caliper and Leica devices

معنی‌داری p-value	آماره t	درجه آزادی Degree of freedom	انحراف معیار تفاوت‌ها Standard deviation of difference	میانگین تفاوت‌ها Mean difference	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 معنی‌دار

با توجه به ستون معنی‌داری جدول ۳ (Sig.= 0.051) تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده قطرهای متناظر بین دو دستگاه کالیپر و لایکا معنی‌دار نیست ($P > 0.05$). به‌عبارت دیگر دو دستگاه برای اندازه‌گیری قطر یکسان عمل می‌کنند.

متغیرهای زیست‌سنجی: جدول ۴ آماره‌های توصیفی متغیرهای اندازه‌گیری شده از ۶۷ درخت نمونه گونه کبوده در استان چهارمحال و بختیاری را ارائه می‌دهد که به‌عنوان متغیرهای کلیدی در برآورد حجم چوب تنه مورد تحلیل قرار گرفتند.

جدول ۴- مشخصه‌های آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده از ۶۷ درخت نمونه

Table 4. Statistical characteristics of the measured variables in sample trees

متغیر	قطر برابر سینه (سانتی‌متر)	ارتفاع کل (متر)	حجم واقعی تنه (مترمکعب)
Variable	DBH (cm)	Total height (m)	Actual stem volume (m ³)
کمینه	9.7	12.3	0.04
Minimum			
بیشینه	31.0	35.0	1.17
Maximum			
میانگین	19.4	20.3	0.33
Mean			
انحراف معیار	6.1	5.1	0.28
Standard deviation			
ضریب تغییرات (درصد)	31.4	25.1	84.8
Coefficient of variation(%)			

جداول حجم یک عامله و دو عامله: به منظور تهیه جداول حجم با استفاده از بهترین مدل‌ها، رتبه‌بندی مدل‌ها بر اساس پنج شاخص نکویی برازش انجام شد. نتیجه رتبه‌بندی مدل‌های استفاده شده برای برآورد حجم تنه گونه کبوده در این استان در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- نتیجه رتبه‌بندی مدل‌های استفاده شده برای تهیه جداول حجم یک‌عامله و دوعامله برای گونه کبوده

Table 5. Ranking result of the used models to develop single- and double-entry volume tables of white poplar trees

رتبه‌بندی مدل‌ها	جمع رتبه‌ها	WI (m ³ /ha)		NSE (m ³ /ha)		MAE (m ³ /ha)		RMSE (m ³ /ha)		AIC		نام مدل	ردیف	نوع مدل
		رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	رتبه	مقدار			
Model Ranking	Rank Sum	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Model Nme	No.	Model Type
14	71	15	0.9827	15	0.9341	15	0.0500	15	0.0723	11	-155.736	Kopezky-Gehrhardt	1	یک‌عامله
13	66	14	0.9854	14	0.9437	14	0.0462	14	0.0669	10	-166.270	Dissecsu-Meyer	2	
11	58	12	0.9882	12	0.9544	13	0.0415	12	0.0601	9	-178.455	Hohenadl_Krenn	3	
12	64	13	0.9864	13	0.9502	11	0.0395	13	0.0629	14	-53.397	Hummel 1	4	
11	58	11	0.9882	11	0.9557	10	0.0387	11	0.0593	15	-52.895	Brenac	5	
14	71	15	0.9827	15	0.9341	15	0.0500	15	0.0723	11	-155.736	Hummel 2	6	
10	50	10	0.9889	10	0.9561	12	0.0409	10	0.0590	8	-183.052	Berkhout	7	
5	25	5	0.9956	6	0.9826	2	0.0227	6	0.0371	6	-245.156	Spurr 1	8	دوعامله
6	29	7	0.9955	5	0.9827	7	0.0230	5	0.0370	5	-245.613	Honner	9	
7	34	8	0.9955	7	0.9825	5	0.0229	7	0.0372	7	-244.683	Ogaya	10	
4	22	3	0.9959	3	0.9840	9	0.0236	3	0.0356	4	-246.768	Stoate	11	
8	35	6	0.9956	8	0.9825	1	0.0227	8	0.0372	12	-119.705	Spurr 2	12	
9	43	9	0.9954	9	0.9821	3	0.0228	9	0.0377	13	-117.741	Schumacher-Hall 1	13	
1	8	1	0.9963	1	0.9854	4	0.0229	1	0.0340	1	-254.833	Schumacher-Hall 2	14	
2	16	2	0.9960	2	0.9844	8	0.0234	2	0.0351	2	-248.483	Naslund	15	
3	21	4	0.9958	4	0.9833	6	0.0229	4	0.0364	3	-247.671	Takata	16	

براساس جدول ۵ در بین مدل‌های دوعامله (مدل‌های شماره ۸ تا ۱۶) مدل شماره ۱۴ یعنی Schumacher-Hall 2 با رتبه ۱

بهترین مدل است که از آن برای تهیه جدول حجم دوعامله استفاده شد. همچنین در بین مدل‌های یک‌عامله (مدل‌های شماره ۱ تا

۷) مدل شماره ۷ یعنی Berkhout با رتبه ۱۰ بهترین مدل است که از آن برای تهیه جدول حجم یک‌عامله استفاده شد. رابطه نهایی

دو مدل یک‌عامله و دو عامله استفاده شده برای تهیه جداول حجم یک‌عامله و دو عامله به صورت رابطه‌های ۸ و ۹ می‌باشد:

$$V = 0.0000276 \times D^{2.295} \times H^{0.7785} \quad \text{مدل دو عامله شوماخر - هال ۲ (رابطه ۸)}$$

$$V = 0.00003776 \times D^{2.969} \quad \text{مدل یک‌عامله برک‌هوت (رابطه ۹)}$$

D: قطر برابر سینه بر حسب سانتی‌متر، H: ارتفاع کل درختان بر حسب متر، V: حجم تنه بر حسب متر مکعب

در نهایت براساس دو مدل بالا جدول حجم یک‌عامله ۶ و دو عامله ۷ برای گونه کبوده در استان تهیه شد.

جدول ۶- جدول حجم یک‌عامله برای قسمتی از تنه گونه کبوده که قطر بیشتر

از ۵ سانتی‌متر دارد براساس مدل $V = 0.00003776 \times D^{2.969}$ در استان چهارمحال و بختیاری

Table 6. Single- entry (one- way) volume table for a part of white poplar stem that is more than 5 cm in diameter, based on the equation $V = 0.00003776 \times D^{2.969}$ in Chaharmahal & Bakhtiari province

حجم تنه (مترمکعب) Stem volume (m ³)	قطر برابر سینه (سانتی‌متر) DBH (cm)	حجم تنه (مترمکعب) Stem volume (m ³)	قطر برابر سینه (سانتی‌متر) DBH (cm)
0.275	20	0.026	9
0.318	21	0.035	10
0.365	22	0.047	11
0.417	23	0.060	12
0.473	24	0.077	13
0.534	25	0.095	14
0.600	26	0.117	15
0.671	27	0.142	16
0.748	28	0.170	17
0.830	29	0.201	18
0.917	30	0.236	19

جدول ۷- جدول حجم دو عامله برای قسمتی از تنه گونه کبوده که قطر بیشتر از ۵ سانتی متر دارد براساس مدل $V = 0.0000276 \times D^{2.295} \times H^{0.7785}$ در استان چهارمحال و بختیاری

Table 7. Double- entry (two- way) volume table for a part of white poplar stem that is more than 5 cm in diameter, based on the equation $V = 0.0000276 \times D^{2.295} \times H^{0.7785}$ in Chaharmahal & Bakhtiari province

ارتفاع (متر)																								قطر (سانتی متر)				
H (m)																									D (cm)			
35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	
																				0.035	0.033	0.031	0.030	0.028	0.026	0.024	0.022	9
																				0.045	0.042	0.040	0.038	0.035	0.033	0.030		10
																			0.059	0.056	0.053	0.050	0.047	0.044	0.041	0.037		11
																	0.078	0.075	0.072	0.068	0.065	0.061	0.057	0.054	0.050			12
																	0.094	0.090	0.086	0.082	0.078	0.073	0.069	0.064				13
													0.121	0.117	0.112	0.107	0.102	0.097	0.092	0.087	0.082							14
													0.148	0.142	0.137	0.131	0.125	0.120	0.114	0.108	0.102	0.096						15
												0.184	0.178	0.171	0.165	0.158	0.152	0.145	0.139	0.132	0.125	0.118						16
												0.211	0.204	0.197	0.190	0.182	0.175	0.167	0.159	0.151	0.144	0.136						17
										0.257	0.249	0.241	0.233	0.224	0.216	0.208	0.199	0.190	0.182	0.173	0.164							18
								0.309	0.300	0.291	0.282	0.273	0.263	0.254	0.245	0.235	0.225	0.216	0.206	0.196	0.185							19
							0.358	0.348	0.338	0.327	0.317	0.307	0.296	0.286	0.275	0.264	0.254	0.242	0.231	0.220								20
							0.400	0.389	0.378	0.366	0.355	0.343	0.331	0.320	0.308	0.296	0.284	0.271	0.259	0.246								21
								0.445	0.433	0.420	0.407	0.395	0.382	0.369	0.356	0.342	0.329	0.315	0.302	0.288								22
						0.506	0.493	0.479	0.465	0.451	0.437	0.423	0.408	0.394	0.379	0.364	0.349	0.334										23
						0.558	0.543	0.528	0.513	0.497	0.482	0.466	0.450	0.434	0.418	0.402	0.385											24
					0.630	0.613	0.597	0.580	0.563	0.546	0.529	0.512	0.495	0.477	0.459	0.441												25
				0.707	0.689	0.671	0.653	0.635	0.616	0.598	0.579	0.560	0.541	0.522	0.502													26
			0.790	0.771	0.751	0.732	0.712	0.692	0.672	0.652	0.632	0.611	0.590	0.569	0.548													27
		0.880	0.859	0.838	0.817	0.795	0.774	0.752	0.731	0.709	0.686	0.664	0.642	0.619														28
	0.976	0.953	0.931	0.908	0.885	0.862	0.839	0.816	0.792	0.768	0.744	0.720	0.695	0.671														29
1.079	1.055	1.031	1.006	0.982	0.957	0.932	0.907	0.881	0.856	0.830	0.804	0.778	0.752	0.725														30

D: diameter at breast height (cm); H: total height (m) and V: stem volume (m³)

D: قطر برابر سینه بر حسب سانتی متر، H: ارتفاع کل درختان بر حسب متر، V: حجم تنه بر حسب مترمکعب

بحث و نتیجه گیری

چوب یک محصول راهبردی و مورد نیاز مبرم کشور است که سبب راه اندازی و فعالیت بسیاری از صنایع مرتبط می شود. بنابراین برنامه ریزی برای تولید دائمی آن جزء اولویت های اصلی ارگان های اجرایی کشور است. تعیین حجم تنه درخت برای مدیریت بازار خرید و فروش چوب صنوبر بسیار مهم است. تعیین مدل های حجمی با دقت مناسب از گام های مهم در شناخت وضعیت توده و برنامه ریزی برای حال و آینده است. در این مطالعه جداول حجم یک عامله و دو عامله برای گونه صنوبر کبوده در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از روش غیرمخرب تهیه شد.

در جدول حجم یک عامله، قطر برابر سینه تنها متغیری است که کشاورزان و برنامه ریزان می توانند به راحتی آن را اندازه گیری کنند و از این رو متغیری است که در تصمیم گیری های مدیریتی و تعیین میزان حجم چوب از آن استفاده می شود. اما در جدول حجم دو عامله، اندازه گیری دقیق ارتفاع درخت بدون دستگاه ارتفاع سنج دشوار است.

در این پژوهش مدل های مختلفی از منابع معتبر برای تهیه جداول حجم یک عامله و دو عامله انتخاب و با استفاده از شاخص های آماری مختلف امتیازبندی شدند که از بین آنها مدل یک عامله Berkhout با $R^2 = 0.95$ و $RMSE = 17\%$ و مدل دو عامله Schumacher-Hall 2 با $R^2 = 0.98$ و $RMSE = 17\%$ با بیشترین کارایی و کمترین خطا انتخاب شدند که به عنوان مدل های مناسب به ترتیب برای تهیه جدول حجم یک عامله و دو عامله در صنوبرکاری های استان چهارمحال و بختیاری مورد استفاده قرار گرفتند.

مدل Schumacher-Hall قبلاً توسط سینگدوها و همکاران (۲۰۱۸) (۱۱) و همچنین آمینو و همکاران (۲۰۱۹) به عنوان مناسب ترین مدل برای پیش بینی حجم درختان صنوبر در هند معرفی شده اند (۳۳). همچنین تواری (۲۰۰۷) گزارش کرد که مدل Schumacher-Hall مناسب ترین مدل برای پیش بینی حجم درختان *Tecomella undulata* در منطقه گرم و خشک هند براساس رابطه $V = aH^{b1}D^{b2}$ است (۳۲).

نتایج این تحقیق براساس مقادیر دقت و خطای مدل های به کار گرفته شده ($RMSE$ % به ترتیب برای مدل های برک هوت و مدل شوماخر- هال ۲ برابر ۱۷٪ و ۱۰٪ و MAE % به ترتیب برابر ۱۲٪ و ۷٪) نشان می دهد که جداول حجم تهیه شده از درجه اعتبار

بسیار خوبی برخوردار بوده و قابل استفاده برای سازمان‌های اجرایی، صنوبرکاران، چوب‌بری‌ها و خریداران چوب، صنایع تولید کننده چوب و کارشناسان جنگل در امور فنی و برنامه‌ریزی هستند.

در تحقیق حاضر جدول حجم یک‌عامله و دوعامله برای گونه کبوده در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از دستگاه لیزری

لایکا برای اندازه‌گیری قطر در ارتفاعات مختلف تنه و به صورت غیر مخرب 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 به صورت غیرمخرب، امکان برآورد دقیق حجم چوب را فراهم و علاوه بر کاهش هزینه و زمان، امکان پایش مکرر و مدیریت بهینه منابع چوبی را نیز تسهیل می‌کند.

تاکنون در داخل کشور تحقیقی در مورد تهیه جدول حجم درختان با استفاده از روش غیرمخرب و اندازه‌گیری قطر تنه درختان

در ارتفاعات بالاتر از برابر سینه به صورت سرپا انجام نشده است. اما در تحقیقات قبلی در خارج از کشور، وارجو و همکاران

(۲۰۰۶) روشی را برای برآورد ارتفاع و حجم درخت با استفاده از تصاویر رقومی به کار بردند. عمده‌ترین مشکلاتی که محققان به آن اشاره کرده‌اند، کیفیت تصاویر و مشکل جداسازی درخت از پس زمینه بود. البته بخشی از مشکل بعدها با بهبود کیفیت دوربین‌ها و مشکل جداسازی درخت از پس‌زمینه با استفاده از شاخص طراحی و نصب شده در اطراف درخت برطرف شد (۲۷).

کوئلیو و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از یک دوربین و شاخص طراحی شده با نصب در نزدیکی درخت، قطر و ارتفاع تنه درختان را از روی تصاویر برآورد و حجم تنه درخت را با ۴ درصد خطا در برآورد ارتفاع درخت محاسبه کردند. محققین عنوان کردند که برای نتایج بهتر، تصویر باید کیفیت خوبی داشته باشد و درخت اندازه‌گیری شده باید به طور کامل در تصویر قابل مشاهده باشد که در این صورت برآورد حجم در هر دو تراکم کم و زیاد توده تفاوتی ندارد (۲۸). هی و همکاران (۲۰۱۶) برای اندازه‌گیری حجم

واقعی چوب تعداد ۱۷۵ درخت سرپای لاریکس (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) و ۱۹۰ درخت سرپای صنوبر (*Populus*

tomentosa Carrière) از یک تئودولیت الکترونیکی استفاده کردند که به ترتیب دارای خطای ۱/۶۲ و ۸/۴ درصد بود. در حالی که

در این تحقیق میزان خطای دستگاه لایکا برابر ۴/۶ درصد به دست آمد (۲۹). واندنائل و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود با

استفاده از لیزر اسکن زمینی، حجم تنه و تاج درختان صنوبر را به صورت غیرمخرب مدل‌سازی و دقت مناسبی را گزارش کردند

(۳۰). لیو و همکاران (۲۰۱۹) در چین نیز مدل‌های غیرمخرب حجم را برای گونه‌های مختلف صنوبر توسعه داده و اعتبار این

روش‌ها را با داده‌های میدانی تأیید کردند (۳۱). آمینو و همکاران (۲۰۱۹) نیز با استفاده از دستگاه هاگا و بدون قطع درخت،

بهترین مدل حجمی برای صنوبر دلتوئیدس را معرفی کردند (۳۳). این مطالعات با توجه به دقت و قابلیت اجرایی زیاد، استفاده از

روش‌های غیرمخرب را در برآورد حجم درختان صنوبر توصیه می‌کنند.

تعیین موجودی حجمی دقیق صنوبرکاری‌های استان چهارمحال و بختیاری، زمینه مناسبی را برای توسعه کشت صنوبر و ظرفیت‌یابی زراعت چوب از طریق شناخت در مورد مقدار تولید، قابلیت منطقه برای زراعت چوب و سپس ساماندهی مناطق صنعتی و مرتبط با ماده اولیه چوب و انتقال آنها به مجاورت مراکز تولید چوب و یکپارچه‌سازی و تجمیع اراضی خرد و پراکنده زراعت چوب فراهم می‌کند. استقرار صنایع چوب در مجاورت عرصه‌های تولید صنوبر و اطلاع از وضعیت دقیق حجم چوب سرپا سبب افزایش سود می‌شود که خود عاملی برای توسعه کاشت صنوبر است.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به اینکه استان چهارمحال و بختیاری ظرفیت زیادی برای زراعت چوب با صنوبر دارد، دسترسی به جداول دقیق حجم برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و اقتصادی بسیار ضروری است. جداول حجم یک‌عامله و دوعامله تهیه شده بر اساس معادلات Berkhout و Schumacher-Hall 2 ابزار مفیدی است که به صنوبرکاران کمک می‌کند تا به هنگام فروش چوب، حجم درختان سرپای مزرعه خود را با دقتی قابل قبول برآورد کنند. از جداول حجم یک‌عامله و دوعامله تهیه شده در این پژوهش می‌توان برای برنامه‌ریزی دقیق‌تر کاشت، داشت و برداشت صنوبر در استان چهارمحال و بختیاری استفاده کرد تا تولید چوب بهینه شده و سودآوری اقتصادی آن افزایش یابد.

سپاسگزاری

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.

1. Ahmadloo, F., Dehghan, R., Salehi, A., & Escandari, S. (2023). Surveying and study on the biometric variables of poplar plantations in Guilan province. *Iranian Journal of Forest*. 15(2), 195-210. [In Persian]
2. Talebi, M., Modirrahmati, A., Jahanbazi, H., Hemati, A., & Haghghian, F. (2007). Investigation on growth characteristics of Poplar clones in research nursery of Boldaji station. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 15(4), 349-364. [In Persian]
3. Talebi, M., Calagari, M., Iranmanesh, Y., Derakhshan, S., & Gholipour, Z. (2025). Quantitative and production status of wood in poplar plantations of Chaharmahal and Bakhtiari province, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 33(1), 86-100. [In Persian]
4. Calagari, M., Mirakhorlou, Kh., Salehi, A., Ahmadloo, F., Teimouri, S., Jafari, A., Eskandari, S., Bagheri, R., Araghi, M. K., Khodayi, M. B., & Ghasemi, R. (2022). Implementation of the national plan for the development of wood farming is essential for forests conservation and the supply of wood raw materials in the country. *Journal of Iran Nature*. 7(1), 9-19. [In Persian]
5. Gorji Bahri, Y. (1992). Preparation of volume table for *Populus euramericana* I- 214. *Journal of Forest and Rangeland*. Publications of Research Institute of Forests and Rangelands. 82, 25–32. [In Persian]
6. Sagheb-Talebi, Kh. (1996). Volume table of *Populus euramericana* I-448. *Research & Construction*. 30, 58–61. [In Persian]
7. Hjelm, B., & Johansson, T. (2012). Volume equations for poplars growing on farmland in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 27(6), 561–566.
8. Bagheri, R., Namiranian, M., Zobeiry, M., & Modir Rahmati, A. R. (2002). Determination of volume tables for Zanjan-Rood river native poplars. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 9(1), 1-36. [In Persian]
9. Ghorani, M., Jahani, A., & Sardabi, H. (2014). Estimation of standing volume in *Populus deltoides* Marsh plantations by Huber and Smalian methods at Shafaroud forest, Guilan province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 22(1), 74-81. [In Persian]
10. Faal-Khah, I., Ramezani Kakroudi, E., Alijanpour, A., & Banj Shafiei, A. (2017). The effect of spacing on quantitative and qualitative characteristics of black poplar (*Populus nigra* L.). *Forest Research and Development*. 2(4), 337-351. [In Persian]
11. Singhdoha, A., Bangarwa, K. S., Johar, V., Hooda, B. K., & Dhillon, R. S. (2018). Assessment of general volume table for *Populus deltoides* in northern Haryana. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 7(1), 1665-1668.

12. Hjelm, B. (2021). Cumulative merchantable stem volume equations for poplar plantations on farmland in Sweden. *Journal of Agricultural Science and Technology B*. 11(1), 15-25.

13. Mohammed, A.J., Hanna, S. A., & Saadallah, H. GH. (2024). Estimating growth of *Populus nigra* stand using stand table method. *Sabrao journal of breeding and genetics*. 56(2), 794-801.

14. Statistical Center of Iran, (2022). Data and statistical information. The Statistical Yearbook, Publications of Management and Planning Organization of Chaharmahal and Bakhtiari province, Shahrekord, Iran. 52p. [In Persian]

15. Jahani, A., Kalagari, M., Modirrahmati, A. R., & Ghasemi, R. (2014). Determining the best stem form factor equation for *Populus deltoides* in poplar plantations of Alborz Research Station, Karaj. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 22(2), 216- 224. [In Persian]

16. Zobeiri, M. (1994). Forest inventory. Tehran University Press, Tehran, 401p. [In Persian]

17. De Oliveira, X. M., Ribeiro, A., Filho, A. C. F., Mayrinck, R., De Lima, R., & Scolforo, J. R. S. (2018). Volume equations for *Khaya ivorensis* A. Chev. plantations in Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*. 90(4), 3285-3298.

18. Santos, F. M., Terra, G., Chaer, G. M., & Monte, M. A. (2018). Modeling the height–diameter relationship and volume of young African mahoganies established in successional agroforestry systems in northeastern Brazil. *New Forests*. 50(7–8), 1-19.

19. Imana- Encinas, J., Antunes-Santana, O., & Riesco-Munoz, G. (2019). Selection of a volumetric equation for *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake in the central region of the state of Goias, Brazil. *Revista Forestal Mesoamericana Kuru*. 16(39), 2-9.

20. de Lima, Q.S., da Cunha, T.A., Amaro, M.A., Figueiredo, E.O., & Parente, P.R.F. (2021). Volume estimate for three timber species with commercial interest from the diameter of the stump. *Floresta*. 51(3), 776-784.

21. Assmann, E. (1970). The principles of forest yield study. Pergamon Press, Oxford, 506p.

22. Van Laar, A., & Akca, A. (2007). Forest mensuration. Vol.13. Springer Science, Dordrecht, 383p.

23. Loetsch, F., Zöhrer, F., & Haller, K.E. (1973). Forest inventory. Vol II, 1st edn. BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, 469 p.

24. Possu, W.B., Brandle, J.R., Domke, G.M., Schoeneberger, M., & Blankenship, E. (2016). Estimating carbon storage in windbreak trees on U.S. agricultural lands. *Agroforestry Systems*. 90(5), 889-904.

25. Spurr, S. (1952). Forest inventory. The Ronald Press, New York, 333p.

26. Schumacher, F.X., & Hall, F.S. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*. 47, 719-734.

27. Varjo, J., Henttonen, H., Lappi, J., Heikkonen, J., & Juujärvi, J. (2006). Digital horizontal tree measurements for forest inventory. In Working Papers of the Finnish Forest Research Institute; Finnish Forest Research Institute: Joensuu, Finland, 23p.
28. Coelho, J., Fidalgo, B., Crisóstomo, M. M., Salas-González, R., Coimbra, A. P., & Mendes, M. (2021). Non-destructive fast estimation of tree stem height and volume using image processing. *Symmetry*. 13(3), 374.
29. He, C., Hong, X., Liu, K. Z., Zhang, S., & Wang, Q. (2016). An improved technique for non-destructive measurement of the stem volume of standing wood. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*. 78(1), 53 - 60.
30. Vandendaele, B., Martin-Ducup, O., Fournier, R. A., Pelletier, G., & Lejeune, P. (2022). Mobile laser scanning for estimating tree structural attributes in a temperate hardwood forest. *Remote Sensing*. 14(18), 4522.
31. Liu, J., Feng, Z., Mannan, A., Khan, T. U., & Cheng, Z. (2019). Comparing non-destructive methods to estimate volume of three tree taxa in Beijing, China. *Forests*. 10(2), 92.
32. Tewari, V.P. (2007). Total wood volume equations and their validation for *Tecomella undulate* plantations in hot arid region of India. *Indian Forester*. 133, 1648-1658.
33. Aminu, S.A., Daniel, S., & Yakubu, I. (2019). Tree volume equation for *Populus deltoides* (Poplar) tree under agroforestry based. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(2), 1470-1475.

Development of volume tables for white poplar (*Populus alba* L.) trees using a non-destructive sampling in the Chaharmahal & Bakhtiari province of Iran

Abstract

Background and objectives: Estimating the volume stock of poplar plantations is crucial for understanding their current status and ensuring sustainable management in order to production planning and enhances decision-making for the development of wood farming. Volume tables, as one of these key tools, enable economic planning and optimization of exploitation. For the development of these tables, the use of non-destructive sampling that allow estimating volume without damaging the trees is of great importance. The aim of this research is to prepare a single- and double-entry volume tables for white poplar (*Populus alba* L.) species in Chaharmahal & Bakhtiari province, so that it is possible to sell poplar wood based on volume and provide more profit to the poplar farmer.

Materials and methods: To conduct this research, first, main poplar stands in Chaharmahal & Bakhtiari province were identified through field operations. Then, in 10 different poplar stands with *Populus alba* L., a total of 67 trees were selected by using stratified random sampling method, based on diameter classes from 10 to 30 cm. For each selected tree, diameter at breast height (DBH) and total height were measured. Using a Leica D810 laser-based device, from the stem collar of each sample tree, diameters at both ends

of each 2-m log along the stem were measured without felling the trees. In the next step, the actual stem volume of each tree was then calculated by summing the volumes of the 2-m logs, obtained from the Smalian's formula. To evaluate the accuracy of the Leica D810 device in measuring stem diameters at various heights, a set of 13 poplar trees, which were previously scheduled for felling, were used. The diameters of these trees at different stem heights before and after felling were measured using a Leica device and Caliper, respectively, and compared using a paired Student's t-test. To develop volume tables, data on diameter, height, and stem volume of sample trees were analyzed using nonlinear regression models. For this purpose, seven single-entry models (based on DBH alone) and nine double-entry models (based on both DBH and total height) were fitted for the data of diameter with actual stem volume and diameter and height with actual stem volume of trees, respectively. Then, model performance was evaluated using AIC (Akaike Information Criterion), RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), and WI (Willmott Index of Agreement) to select the best model.

Results: The results of the paired t-test showed that no significant difference between the Leica and caliper in diameter measurements, in other words, the two devices performed the same for measuring the diameter. For estimating the volume stock and prepare a single- and double-entry volume tables, among the models, Schumacher-Hall model (RMSE%= 10% & $R^2= 0.98$) performed best for double-entry, while the Berkhout model (RMSE%= 17% & $R^2= 0.95$) showed the highest accuracy for single-entry. Single-entry (one- way) volume table was obtained based on the equation $V=0.00003776 \times D^{2.969}$ and double-entry (two- way) volume table was prepared based on the equation $V=0.0000276 \times D^{2.295} \times H^{0.7785}$.

Conclusion: The regression models developed in this study can be effectively used to estimate the standing volume of white poplar trees, aiding in plantation management and wood volume-based sales. The findings of this study can be valuable baseline information for use in determining the accurate standing and saleable volume of each poplar stand, planning and management decisions regarding harvesting, growth analysis, and sustainable management strategies in the field of wood farming development and related industries development in Chaharmahal & Bakhtiari province.

Keywords: Diameter classes, Goodness of fit, Regression models, Standing volume, Stem volume.