

بررسی مدل‌های قطر - ارتفاع بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) در جنگل‌های دانه‌زاد زاگرس میانیپیمان امیری^۱، جواد سوسنی*^۲ و حامد نقوی^۳

۱- دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. (peyman.amiri67@gmail.com)

۲- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. (soosani.j@lu.ac.ir)

۳- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. (naghavi.ha@lu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

چکیده

مقدمه و هدف: برای مدیریت پایدار و برنامه‌ریزی اصولی منابع جنگلی به اطلاعات کارآمد و باکیفیتی از وضعیت حال و آینده جنگل نیازمند است. جنگل‌های زاگرس به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ناحیه‌های رویشی ایران، تأثیر بسیار مهمی در تأمین آب، حفظ خاک، تعدیل آب و هوا و تعادل اقتصادی و اجتماعی در کل کشور دارند، از این‌رو، حفاظت و مدیریت پایدار این بوم‌سازگان‌های جنگلی به دغدغه اصلی محققان و مدیران در این ناحیه رویشی تبدیل شده است. گونه غالب این جنگل‌ها، گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) است. این گونه بر حسب شرایط جغرافیایی و محیطی دارای رویشگاه‌های متنوعی در ناحیه رویشی زاگرس میانی است. با توجه به جایگاه ارشمند گونه بلوط ایرانی در جنگل‌های زاگرس، اهمیت توسعه پژوهش‌های هرچه بیشتر در رابطه با این گونه امری ضروری است. مشخصه‌های قطر و ارتفاع درخت از مهم‌ترین مؤلفه‌های موردنیاز در آماربرداری جنگل هستند. این متغیرها از اصلی‌ترین متغیرها برای اندازه‌گیری خصوصیات ظاهری درختان جنگلی بوده و در مواردی از جمله تعیین حجم و ترسیم منحنی ارتفاع کاربرد دارند. با توجه به این‌که اندازه‌گیری ارتفاع تمام درختان جنگلی عملیاتی زمان‌بر و پرهزینه است، از این‌رو، استفاده از مدل‌های قطر و ارتفاع برای برآورد ارتفاع درختان توسعه پیدا کرده است. هدف از این پژوهش بررسی مدل‌های خطی و غیرخطی قطر - ارتفاع گونه بلوط ایرانی در جنگل‌های دانه‌زاد زاگرس میانی برای دستیابی به پاسخ این سوال که آیا امکان برآورد ارتفاع درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی به‌عنوان تابعی از قطر برابرسینه در این ناحیه رویشی وجود دارد یا خیر.

مواد و روش: این پژوهش در منطقه حفاظت‌شده سفیدکوه لرستان انجام شد. پوشش درختی غالب این منطقه مانند دیگر مناطق زاگرس از بلوط تشکیل شده است اما به گیاهان و درختان دیگری نظیر زالزالک، بادام

کوهی، گون و غیره می‌توان در آن اشاره کرد. برای انجام این پژوهش با انجام جنگل‌گردشی‌های متعدد و شناخت جنگل‌های منطقه، توده‌ای به مساحت تقریبی پنج هکتار که دارای ساختار رویشی دانه‌زاد بود انتخاب شد. در توده جنگلی انتخاب شده، مشخصه‌های قطر برابرسینه و ارتفاع کل تمامی درختان بلوط ایرانی که قطر برابرسینه بیش از ۱۲/۵ سانتی‌متر، مورد آماربرداری ۱۰۰ درصد قرار گرفت. در مجموع قطر برابرسینه و ارتفاع کل تعداد ۶۴۲ اصله درخت بلوط ایرانی اندازه‌گیری شد. برای برازش داده‌های قطر برابرسینه و ارتفاع درختان از مدل‌های خطی و غیرخطی استفاده شد که شامل انواع مدل‌های نمایی، توانی، تراکم - محصول، رویش، سیگموییدی و دیگر توابع است. در این پژوهش ۸۰ درصد داده‌ها در فرآیند مدل‌سازی و ۲۰ درصد برای ارزیابی به‌کار گرفته شدند. همچنین برای برازش داده‌ها و برآورد شاخص‌های هر یک از مدل‌ها از نرم‌افزار Curve Expert Professional استفاده شد. در فرآیند مدل‌سازی، داده‌های قطر به‌عنوان متغیر مستقل و داده‌های ارتفاع به‌عنوان متغیر وابسته بکار گرفته شدند. برای صحت‌سنجی مدل‌ها، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و اریبی (Bias) به‌صورت مطلق و نسبی و نیز ضریب تبیین (R^2) و معیار اطلاعات آیک (AIC) به‌عنوان شاخص‌های اعتبارسنجی محاسبه شدند.

یافته‌ها: براساس بررسی آماره‌های توصیفی درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی میانگین، کمینه و بیشینه قطر برابرسینه به ترتیب ۴/۴۲، ۵/۱۲ و ۱۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع به ترتیب ۶/۳، ۱/۲ و ۱۷ متر بود. مدل‌های استفاده‌شده بر اساس مقادیر R^2 ، ۶۲ تا ۸۶ درصد از تغییرات کل ارتفاع درختان را توجیه کردند. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های قطر - ارتفاع درختان نشان داد که مدل‌های Gompertz، MMF و Richard به‌ترتیب دارای بالاترین ضریب تبیین (۰/۸۶، ۰/۸۶، ۰/۸۶)، کمترین اشتباه معیار (۱/۳۰۷، ۱/۳۰۷، ۱/۳۰۷) و معیار اطلاعات آیک (۲۷۷/۰۴، ۲۷۷/۱۳، ۲۷۷/۰۳) بودند. نتایج حاصل از معیارهای استفاده‌شده برای اعتبارسنجی مدل‌های به‌کار رفته نشان داد که مدل‌های Gompertz، MMF و Richard با RMSE به‌ترتیب ۲۲/۲۰، ۲۲/۱۹ و ۲۲/۲۰ درصد و نیز MAE به‌ترتیب ۱۶/۶۹، ۱۶/۷۴ و ۱۶/۷۹ درصد بهتر توانستند مشخصه ارتفاع درختان را برآورد کنند. با توجه به نتایج ذکر شده مشخص شد که سه مدل Gompertz، MMF و Richard در مقایسه با دیگر مدل‌ها از توانایی بالاتری در برآورد مشخصه ارتفاع درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی برخوردار هستند.

نتیجه‌گیری کلی: در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های خطی و غیرخطی توانایی برآورد ارتفاع درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی را در ناحیه رویشی زاگرس میانی دارند، که از میان این مدل‌ها سه مدل غیرخطی Gompertz، MMF و Richard بر اساس معیارهای ارزیابی عملکرد از دقت بالاتری برخوردار بودند. بنابراین این مدل‌ها می‌توانند در مناطق جنگلی ناحیه رویشی زاگرس میانی که دارای ساختار و شرایط رویشگاهی مشابهی با منطقه موردبررسی هستند مورداستفاده قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده از مدل‌های تعمیم‌یافته ارتفاع و قطر استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون، بلوط ایرانی، مدل‌سازی، صحت‌سنجی، آماربرداری.

مقدمه

جنگل هستند. این متغیرها از اصلی‌ترین متغیرها برای اندازه‌گیری خصوصیات ظاهری درختان جنگلی بوده و در مواردی از جمله تعیین حجم، ترسیم منحنی ارتفاع، محاسبه ضرایب شکل و قدکشیدگی، شاخص رویشگاه، شبیه‌سازی جنگل، بررسی نظریه رشد درختان و مواردی از این دست کاربرد دارند (Ahmadi et al., 2014). روش‌های زیادی مانند انواع روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی، منطق فازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و غیره برای ارزیابی داده‌ها وجود دارد که به کمک آنها می‌توان به ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته دست یافت (Bayat et al., 2020)، مدل‌های قطر - ارتفاع درخت نمونه‌ای از این روش‌ها است که یکی از کاربردی‌ترین ابزارها در مدیریت جنگل هستند (Mohammadi and Shataee, 2016). از آنجایی که اندازه‌گیری ارتفاع همه درختان زمان‌بر، پرهزینه و دشوار است، معمولاً تعداد کمی از درختان در عمل برای اندازه‌گیری ارتفاع درخت نمونه‌برداری می‌شوند، درحالی‌که قطر به‌طور دقیق برای همه درختان در یک قطعه نمونه اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، مدل‌های قطر - ارتفاع اغلب برای پیش‌بینی ارتفاع کل سایر درختان ایجاد می‌شوند. تاکنون مدل‌های قطر - ارتفاع متعددی ایجاد شده‌اند که این مدل‌ها به ویژگی‌های ژنتیکی، سن توده، شرایط رویشگاه، رقابت و غیره وابسته هستند (Xu et al., 2022). از این مدل‌ها به‌عنوان مدل‌های تجربی قطر-ارتفاع یا مدل‌های پایه قطر-ارتفاع نام برده می‌شود (Cui et al., 2022). به‌طورکلی در مدل‌های قطر-ارتفاع، تنها قطر درخت به‌عنوان متغیر پیش‌بینی - کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد، اگرچه متغیرهای دیگری نظیر سن توده، شاخص رویشگاه، سطح مقطع، ارتفاع غالب و قطر غالب نیز می‌توانند در این مدل معرفی شوند (Petras et al., 2014). این رابطه‌ها برای

جنگل‌ها با ۴/۰۶ میلیارد هکتار حدود ۳۱ درصد از مساحت زمین را پوشش می‌دهند (Jafari et al., 2021)، برای انجام مدیریت پایدار و برنامه‌ریزی اصولی این منابع با ارزش، به اطلاعات کارآمد و باکیفیتی از وضعیت حال و آینده آنها نیاز است. جنگل‌های زاگرس از نظر بوم‌شناختی و اقتصادی از مهم‌ترین زیست‌بوم‌های کشور محسوب می‌شوند (Eshgh nimvari et al., 2003)، وجود گونه‌های متنوع گیاهی و جانوری، جنگل‌های زاگرس را متمایز از دیگر مناطق جنگلی ساخته و توجه بیشتر پژوهشگران علوم زیستی را به‌خود معطوف ساخته است (Zeynali Yadegari and Seyed, 2019). این جنگل‌ها تأثیر بسیار مهمی در تأمین آب، حفظ خاک، تعدیل آب و هوا و تعادل اقتصادی و اجتماعی در کل کشور دارند (Rahimi et al., 2020). از این‌رو، حفاظت و مدیریت پایدار بوم - سازگان‌های جنگلی در ناحیه رویشی زاگرس به دغدغه اصلی محققان و مدیران در این ناحیه رویشی تبدیل شده‌است (Salmani et al., 2021). در جنگل‌های زاگرس به‌طورکلی سه گونه عمده بلوط به نام‌های بلوط ایرانی (*Quercus brantii*)، دارمازو (*Q. infectoria*) و ویول (*Q. libani*) وجود دارد که گسترده‌ترین آنها گونه بلوط ایرانی است. این گونه در همه ارتفاعات، شیب‌ها و جهت‌های جغرافیایی و حتی انواع خاک و اقلیم رشد و پراکنش دارد (Fattahi, 1994) اما در اثر تخریب‌های بی‌رویه از فرم دانه‌زاد به فرم شاخه‌زاد تبدیل شده‌است و تنها در مناطق سخت‌گذر و عوارض طبیعی فرم دانه‌زاد آن باقی مانده‌است. با توجه به جایگاه ارزشمند گونه بلوط ایرانی در جنگل‌های زاگرس، اهمیت توسعه پژوهش‌های هرچه بیشتر در رابطه با این گونه امری ضروری است. مشخصه‌های قطر و ارتفاع درخت از مهم‌ترین مؤلفه‌های موردنیاز در آماربرداری

است که در دهه‌های اخیر به‌علت تخریب‌های گسترده بیشتر به شکل شاخه‌زاد تبدیل شده‌اند، چنانچه بخواهیم در غالب عملیات مدیریتی صحیح ساختار پایداری در این جنگل‌ها برقرار کنیم، می‌بایست مدیریت توده‌ها را به‌نحوی انجام دهیم که به سمت ساختار دانه‌زاد برگردد. از این‌رو، استخراج اطلاعات کمی و روابط آلومتریک در معود توده‌های دانه‌زاد باقی‌مانده بسیار اهمیت دارد. هدف اصلی این پژوهش عبارت است از آزمون برآزش مدل‌های خطی و غیرخطی به داده‌های قطر برابرسینه و ارتفاع درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی و انتخاب بهترین مدل بر اساس معیارهای ارزیابی عملکرد مدل برای دست‌یابی به پاسخ این سوال که آیا امکان برآورد ارتفاع درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی به‌عنوان تابعی از قطر برابرسینه در ناحیه ریشی زاگرس میانی وجود دارد یا خیر.

مواد و روش‌ها

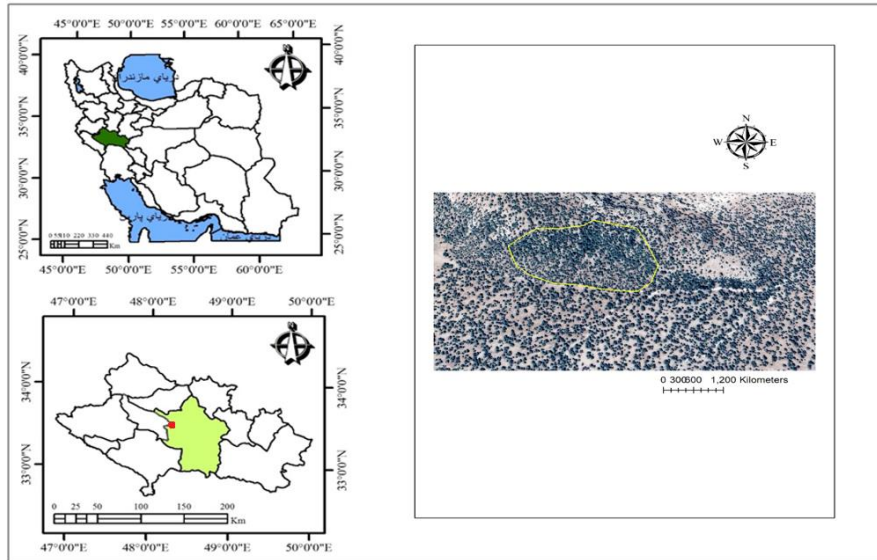
منطقه مورد بررسی

این پژوهش در منطقه حفاظت‌شده سفیدکوه لرستان، واقع در طول‌های جغرافیایی $۴۳^{\circ} ۴۷'$ تا $۴۸^{\circ} ۱۸'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $۳۰^{\circ} ۳۳'$ تا $۳۳^{\circ} ۴۸'$ شمالی انجام شد. منطقه حفاظت‌شده سفیدکوه به وسعت ۶۹۵۰۰ هکتار بین دامنه ارتفاعی ۳۱۷۰-۱۰۸۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است و طول تقریبی آن ۶۰ کیلومتر است. متوسط بارندگی و دمای متوسط سالیانه ۶۰۰ میلی‌متر و ۱۱ درجه سانتی‌گراد، منطقه را دارای اقلیم مدیترانه‌ای معتدل نموده است. سفیدکوه به‌علت شرایط خاص توپوگرافی و وجود رودخانه‌های پرآبی نظیر کریمه و کشکان یکی از مهم‌ترین زیستگاه‌های جانوری در غرب کشور به‌حساب می‌آید؛ به‌طوری‌که ۲۷۲ گونه گیاهی و ۱۳۸ گونه جانوری در آن شناسایی شده‌است. پوشش درختی غالب این منطقه مانند دیگر

گونه‌های درختی مختلف ایجاد می‌شوند و معمولاً به صورت خطی یا غیرخطی نمایش داده می‌شوند. نکته دارای اهمیت در مورد این معادلات این است که بین رویشگاه‌ها و مناطق مختلف و حتی در یک رویشگاه ثابت ولی در طی دوره‌های زمانی مختلف متفاوت هستند؛ بنابراین لازم است که این مدل‌ها برای یک بررسی جدید به‌روز شوند (Golob et al., 2018). در رابطه با مدل‌های قطر-ارتفاع درختان تاکنون بررسی‌های گسترده‌ای برای گونه‌های مختلف انجام شده است. Bolat et al. (2020) در پژوهشی به بررسی مدل‌های قطر-ارتفاع برای گونه *Quercus frainetto* در ترکیه پرداختند، نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل لجستیک نسبت به دیگر مدل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. Hamidi et al. (2021) رابطه بین قطر و ارتفاع گونه راش را در مازندران مورد بررسی قرار دادند و مدل‌های کورف، راتکوفسکی، نسلند و وایبول را مناسب‌تر تشخیص دادند. (Wang and Lam (2021). مدل‌های قطر - ارتفاع را بر روی گونه‌های *Acacia confusa*، *Pistacia chinensis* و *Fraxinus griffithii* در تایوان مورد پژوهش قرار دادند، نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل ویکوف مدل مناسب‌تری است. Aishan et al. (2016) روی مدل‌سازی قطر-ارتفاع گونه *Populus euophatica* در جنگل‌های کران‌رودی چین کار کردند، نتایج بررسی آنها نشان داد که مدل پرودان دقت بالاتری در مقایسه با دیگر مدل‌ها دارد. Ahmadi et al. (2013) در پژوهشی به بررسی مدل‌های غیرخطی قطر - ارتفاع برای گونه راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی پرداختند، نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل چمپن - ریچاردز دقت بالاتری در پیش‌بینی ارتفاع درختان دارد. نظر به این‌که گونه بلوط ایرانی دارای بیشترین وسعت در ناحیه ریشی زاگرس بوده و همچنین از آنجایی که فرم ریشی این درختان حالت دانه‌زاد و تک‌پایه بوده

کرد (Delpasand et al., 2017). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

مناطق زاگرس از بلوط تشکیل شده‌است اما به گیاهان و درختان دیگری نظیر بنه، گیلان وحشی، خینجوک، زالزالک، بادام کوهی، گون و غیره می‌توان در آن اشاره



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی توده‌های مورد بررسی

Figure 1. Geographical location of the investigated stands

تشخیص داده‌های پرت از رسم نمودار جعبه‌ای و پراکنش باقی‌مانده‌ها در برابر مقادیر مشاهده‌شده استفاده شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف سنجیده شد. برای برازش داده‌های قطر برابرسینه و ارتفاع درختان از مدل‌های خطی و غیرخطی استفاده شد که شامل انواع مدل‌های نمایی، توانی، تراکم - محصول، رویش، سیگموئیدی و سایر توابع است (جدول ۱). مدل‌های نمایی یا لگاریتمی بیشتر دارای شکل محدب یا معقر بوده ولی بعضی از این مدل‌ها دارای یک نقطه عطف و یک کمینه و بیشینه هستند. مدل‌های توانی دارای یک یا چند شاخص به‌عنوان توان متغیر مستقل بوده و البته در بعضی موارد مانند مدل خود متغیر مستقل به‌عنوان توان یک شاخص Hoerl مشخص قرار می‌گیرد، این مدل‌ها معمولاً مجموعه‌ای از منحنی‌های محدب و معقر هستند که دارای نقاط

روش پژوهش

برای انجام این پژوهش با انجام جنگل‌گردشی‌های متعدد و شناخت جنگل‌های منطقه، توده‌ای به مساحت تقریبی پنج هکتار که دارای ساختار رویشی دانه‌زاد بود انتخاب شد. در توده جنگلی انتخاب شده، مشخصه‌های قطر برابرسینه و ارتفاع کل تمامی درختان بلوط ایرانی که قطر برابرسینه آنها بیشتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر بود مورد آماربرداری ۱۰۰ درصد قرار گرفت. در مجموع قطر برابرسینه و ارتفاع کل تعداد ۶۴۲ اصله درخت بلوط ایرانی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری قطر برابرسینه از خط‌کش دوبازو و برای اندازه‌گیری ارتفاع درختان از دستگاه ارتفاع‌یاب لیزری TruPulse 360 استفاده شد.

تحلیل‌های آماری

تجزیه و تحلیل کمی داده‌های قطر و ارتفاع از طریق نرم-افزار SPSS-26 انجام شد (Aleml et al., 2021). برای

نزدیک می‌شود (Alijani et al., 2020). در این بررسی تعدادی از مدل‌ها در هیچکدام از طبقه‌بندی‌های ذکر شده قرار نگرفتند که تحت عنوان دیگر توابع در جدول ۱ قرار گرفتند. در این پژوهش ۸۰ درصد داده‌ها در فرآیند مدل‌سازی و ۲۰ درصد برای ارزیابی به کار گرفته شدند، همچنین برای برازش داده‌ها و برآورد شاخص‌های هر یک از مدل‌های یاد شده (a, b, c, d) از نرم‌افزار Curve Expert Professional که یک نرم‌افزار جامع برای برازش منحنی‌ها است استفاده شد (Hyams, 2010). در فرآیند مدل‌سازی داده‌های قطر به عنوان متغیر مستقل و داده‌های ارتفاع به عنوان متغیر وابسته بکار گرفته شدند.

عطف و کمینه و بیشینه هستند (Alijani et al., 2020). مدل‌های تراکم - محصول دارای کارکردهای متنوعی در علوم کشاورزی هستند، این مدل‌ها دارای دو شکل مجانب و سهمی شکل هستند. مدل‌های رویش که توسط یک رشد یکنواخت از یک ارزش خاص به یک خط مجانب توصیف می‌شوند؛ در علوم مربوط به مهندسی کاربرد گسترده‌ای دارند. از دیگر مدل‌های استفاده شده در این پژوهش مدل‌های سیگموییدی هستند که زیر مجموعه‌ای از مدل‌های رشد بوده و تحت عنوان مدل‌های S نامیده می‌شوند، این مدل‌ها از یک نقطه ثابت شروع شده و مقدار رشد آن به شکل یکنواخت تا رسیدن به یک نقطه عطف افزایش می‌یابد و سپس مقدار رشد به یک ارزش نهایی به شکل مجانب

جدول ۱- مدل‌های خطی و غیرخطی مورد استفاده (Hyams, 2010)

Table 1. Used linear and non-linear models (Hyams, 2010)

معادله Equation	شماره و نام مدل Model number and name	نوع مدل Model type
$y = a + bx$	1- Linear	
$y = a + bx + cx^2$	2- Quadratic	خطی
$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	3- Cubic	linear
$y = ae^{b/x}$	4- Modified exponential	
$y = a + b \ln x$	5- Logarithmic	نمایی
$y = e^{(a+b/x+c \ln x)}$	6- Vapor pressure	Exponential
$y = ae^{bx}$	7- Exponential	
$y = ax^b$	8- Power	توانی
$y = ax^{b/x}$	9- Modified Geometric	Power
$y = ab^x x^c$	10- Hoerl	
$y = \frac{1}{(a + bx^c)}$	11- Harris	تراکم - محصول Yield density model
$y = a(1 - e^{-bx})$	12- Exponential Association	رویش
$y = \frac{ax}{(b + x)}$	13- Saturation Growth Rate	Growth
$y = ae^{-e^{b-cx}}$	14- Gompertz	
$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$	15- Logistic	سیگموییدی
$y = \frac{ab + cx^d}{b + x^d}$	16- MMF	Sigmoidal

ادامه جدول ۱.

Continued table 1.

معادله Equation	شماره و نام مدل Model number and name	نوع مدل Model type
$y = a - be^{-cx^d}$	17- Weibull	
$y = \frac{a}{(1 + e^{b-cx})^{1/d}}$	18- Richards	سیگموئیدی Sigmoidal
$y = a/(1 + e^{b-cx})$	19- Ratkowsky	

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل

در پژوهش پیش‌رو برای صحت‌سنجی مدل‌های به‌دست آمده، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و اریبی (Bias) به صورت مطلق و نسبی و نیز ضریب تبیین (R^2) و معیار اطلاعات آیک (AIC) به‌عنوان شاخص‌های اعتبارسنجی محاسبه شد (رابطه‌های ۱ تا ۸). در این رابطه‌ها هرچه قدر میزان RMSE%، MAE% و AIC کمتر باشد مدل‌ها از کارایی بالاتری برخوردار خواهند بود، در صورتی که BIAS% بین دو مقدار +۱۰ و -۱۰ درصد باشد مدل‌ها دقت قابل قبولی خواهند داشت، همچنین مقدار R^2 بین صفر تا یک است که هر چه به یک نزدیک‌تر باشد برازش مدل بهتر است (Bihamta and Chahouki, 2008).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}^i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE\% = RMSE/\bar{y} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$MAE\% = \frac{MAE}{\bar{y}} \times 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$MAE = 1/n \sum |y_i - \hat{y}^i| \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$Bias = \sum_{i=1}^n (\hat{y}^i - y_i) / n \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Bias\% = \frac{Bias}{\bar{y}} \times 100 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$AIC = 2K - 2\ln(L) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این رابطه‌ها، n تعداد نمونه‌ها، L لگاریتم درست نمایی مدل رگرسیون، K تعداد شاخص، y_i مقدار

مشاهده شده، \hat{y}^i مقدار پیش‌بینی شده و \bar{y} میانگین مشاهده شده است.

در ادامه بعد از بررسی اولیه مدل‌ها برای مقایسه بیشتر و بهتر، مدل‌ها از نظر معیارهای عملکرد رتبه‌بندی شدند. مدل‌های دارای کمترین مقادیر شاخص‌های اعتبارسنجی بالاترین رتبه را به خود اختصاص دادند، سپس میانگین رتبه هر مدل به‌دست آمد و مدلی که دارای کمترین میانگین رتبه بود به‌عنوان بهترین مدل تشخیص داده شد.

همچنین علاوه بر معیارهای مذکور، تفاوت‌های بین مقادیر واقعی ارتفاع با مقادیر برآورد شده داده‌های آزمون با استفاده از داده‌ها و مدل‌های مذکور نیز مقایسه شد. برای بررسی معنی‌دار بودن میانگین تفاوت‌های مقادیر واقعی با مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل‌های یاد شده، از آزمون تی جفتی استفاده شد.

در آخر فرض همگنی واریانس با رسم نمودار باقی‌مانده‌های آموزش در برابر ارتفاع پیش‌بینی شده با استفاده از نرم‌افزار Curve Expert Professional بررسی شد. این نمودار تفاوت بین نتایج و داده‌ها را به‌عنوان تابعی از یک متغیر مستقل نشان می‌دهد، همچنین نمودار باقی‌مانده‌ها یک تناسب خط مستقیم با نقاط باقی‌مانده را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که این خط رگرسیونی نشان می‌دهد که آیا باقی‌مانده‌ها به سمت بالا یا پایین حرکت می‌کنند و یا این‌که به‌صورت منظم

۱/۲ و ۱۷ متر بود. بررسی آماره‌های توصیفی قطر برابر سینه و ارتفاع درختان نشان داد که دامنه تغییرات این مشخصه‌ها زیاد بود که این امر نشان‌دهنده کل دامنه مشخصه‌های کمی ساختار توده جنگلی مورد پژوهش است. همچنین این نتایج نشان داد که بین آماره‌های توصیفی کل داده‌ها و داده‌های آموزش و آزمون تفاوت زیادی وجود نداشت (جدول ۲).

پراکنش داشته که نشان‌دهنده ثبات واریانس و تناسب مدل مربوطه است (Hyams, 2010; Ahmadi et al., 2013).

نتایج

بر اساس بررسی آماره‌های توصیفی درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی میانگین، کمینه و بیشینه قطر برابر سینه به ترتیب ۶/۳، ۱۲/۵ و ۱۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع به ترتیب ۶/۳،

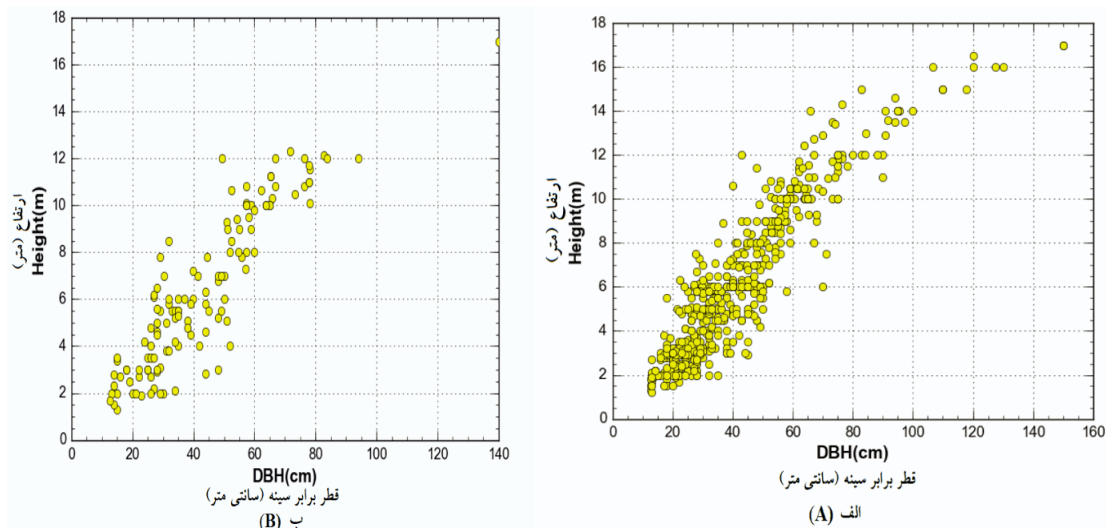
جدول ۲- آماره‌های توصیفی مشخصه‌های قطر برابر سینه و ارتفاع درختان

Table 2. Descriptive statistics of characteristics of DBH and height of trees

ارتفاع (متر) Height (m)			قطر برابر سینه (سانتی‌متر) DBH (cm)			آماره‌های توصیفی Descriptive statistics
ارزیابی Evaluation	مدل Model	کل Total	ارزیابی Evaluation	مدل Model	کل Total	
6.41	6.28	6.3	43.16	42.26	42.44	میانگین Average
1.3	1.2	1.2	12.5	12.5	12.5	کمینه Minimum
17	17	17	140	150	150	بیشینه Maximum
5.8	5.7	5.8	39	38	38	میانه Median
15.7	15.8	15.8	127.5	137.5	137.5	دامنه Range
0.45	0.78	0.72	1.07	1.54	1.42	چولگی Skewness
-0.6	-0.07	-0.17	2.55	3.44	3.25	کشیدگی Kurtosis
10.98	12.07	11.84	427	468.98	460	واریانس Variance
3.31	3.47	3.44	20.66	21.65	21.45	انحراف معیار Standard deviation
0.29	0.15	0.13	1.81	0.95	0.84	اشتباه معیار Standard Error
51.63	55.25	54.6	47.86	51.23	50.54	ضریب تغییرات Coefficient of variation
129	513	642	129	513	642	تعداد درخت Trees number

درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی در برابر قطر برابر سینه را برای داده‌های آموزش و آزمون را نشان می‌دهند. جدول ۳ شاخص‌های مدل حاصل از برازش ۲۴ مدل رگرسیونی خطی و غیرخطی را نشان می‌دهد.

بررسی نرمال بودن داده‌های قطر برابر سینه و ارتفاع درختان با استفاده آزمون کولموگروف - اسمیرنوف نشان داد که این مشخصه‌ها از یک توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. شکل‌های ۲ - الف و ۲ - ب ابر نقاط ارتفاع



شکل ۲- ابر نقاط ارتفاع درختان در برابر قطر برابر سینه برای داده‌های آموزش (الف) و آزمون (ب)
Figure 2. Hyperpoints of tree height against DBH for training data (A) and test (B)

جدول ۳- ضرایب رگرسیونی مدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش

Table 3. Regression coefficients of the models used in the current research

ضرایب				رابطه	مدل
Coefficients				Equation	Model
d	c	b	a		
		0.15	0.08	$y = a + bx$	Linear
	-0.0005	0.21	-1.38	$y = a + bx + cx^2$	Quadratic
-0.00001	0.00082	0.132	-0.17	$y = a + bx + cx^2 + dx^3$	Cubic
		-49.21	21.87	$y = ae^{b/x}$	modified expontial
		6.44	-17.08	$y = a + b \ln x$	logarithmic
	0.58	-19.55	0.16	$y = e^{(a+b/x+clnx)}$	Vapor pressure
		0.01	3.41	$y = ae^{bx}$	Expontial
		0.96	0.18	$y = ax^b$	Power
		-17.39	30.97	$y = ax^{b/x}$	Modified Geometric
	1.47	0.99	0.04	$y = ab^x x^c$	Hoerl
	-1.48	29.37	0.04	$y = \frac{1}{(a + bx^c)}$	Harris
		0.0025	64.91	$y = a(1 - e^{-bx})$	Expontial Association
		-	-	$y = \frac{ax}{(b + x)}$	Saturation Growth Rate
	0.03	1.16	17.96	$y = ae^{-e^{b-cx}}$	Gompertz

y: ارتفاع بر حسب متر، x: قطر برابر سینه بر حسب سانتی‌متر و a, b, c و d: ضرایب ثابت مدل

Y: height (m), x: DBH (cm) and a, b, c and d are constant coefficients of the model

ادامه جدول ۳.

Continued table 3.

ضرایب Coefficients				رابطه Equation	مدل Model
d	c	b	a		
	0.05	11.43	15.91	$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$	Logistic
2.28	19.34	14164.86	1.74	$y = \frac{ab + cx^d}{b + x^d}$	MMF
1.83	0.0004	15.43	16.76	$y = a - be^{-cx^d}$	Weibull
0.31	0.03	0.37	17.09	$y = \frac{a}{(1 + e^{b-cx})^{1/d}}$	Richards
	0.05	2.44	15.91	$y = a/(1 + e^{b-cx})$	Ratkowsky
		-186.63	11.85	$y = a + \frac{b}{x}$	Hyperbolic
3.92	0.02	9.55	6.84	$y = a + b\cos(cx + d)$	Sinusoidal
0.0001	-0.007	0.11	0.04	$y = \frac{a + bx}{1 + cx + dx^2}$	Rational
	-169.33	0.14	0.53	$y = a + bx + \frac{c}{x^2}$	Heat capacity
	54.53	118.67	16.34	$y = ae\left(\frac{-(x-b)^2}{2c^2}\right)$	Gaussian

y: ارتفاع بر حسب متر، x: قطر برابر سینه بر حسب سانتی متر و a، b، c و d: ضرایب ثابت مدل

Y: height (m), x: DBH (cm) and a, b, c and d are constant coefficients of the model

مدل‌های استفاده شده بر اساس مقادیر R^2 ، ۶۲ تا ۸۶ درصد از تغییرات کل ارتفاع درختان را توجیه کردند (جدول ۴). نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های قطر-ارتفاع درختان نشان داد که مدل‌های Gompertz، MMF و Richard به ترتیب دارای بالاترین ضریب تبیین (۰/۸۶، ۰/۸۶، ۰/۸۶)، کمترین اشتباه معیار (۱/۳۰۷، ۱/۳۰۷، ۱/۳۰۷)، معیار اطلاعات آیک (۲۷۷/۰۴، ۲۷۷/۱۳، ۲۷۷/۰۳) بوده و از دقت مناسب‌تری در مقایسه با دیگر مدل‌ها برخوردار هستند (جدول ۴).

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده ضریب تبیین، اشتباه معیار و معیار اطلاعات آیک جهت مدل‌سازی ۲۴ مدل خطی و غیرخطی
Table 4. Calculated values of R^2 , standard error and AIC for modeling 24 linear and non-linear models

AIC	Std-Err	R^2	مدل Model
349.94	1.406	0.83	Linear
295.69	1.332	0.85	Quadratic
285.60	1.318	0.85	Cubic
367.28	1.430	0.83	modified exponential
444.89	1.542	0.80	logarithmic
308.32	1.350	0.84	Vapor pressure
688.85	1.956	0.68	Exponential
344.11	1.398	0.83	Power
308.00	1.349	0.84	Modified Geometric
284.96	1.318	0.85	Hoerl
288.71	1.323	0.85	Harris
330.78	1.380	0.84	Exponential Association
350.30	1.406	0.83	Saturation Growth Rate
276.04	1.307	0.86	Gompertz

ادامه جدول ۴.

Continued table 4.

AIC	Std-Err	R ²	مدل Model
349.94	1.406	0.83	Linear
295.69	1.332	0.85	Quadratic
285.60	1.318	0.85	Cubic
367.28	1.430	0.83	modified expontial
444.89	1.542	0.80	logarithmic
308.32	1.350	0.84	Vapor pressure
688.85	1.956	0.68	Expontial
344.11	1.398	0.83	Power
308.00	1.349	0.84	Modified Geometric
284.96	1.318	0.85	Hoerl
288.71	1.323	0.85	Harris
330.78	1.380	0.84	Expontial Association
350.30	1.406	0.83	Saturation Growth Rate
276.04	1.307	0.86	Gompertz
278.66	1.311	0.85	Logistic
277.13	1.307	0.86	MMF
277.77	1.308	0.86	Weibull
277.03	1.307	0.86	Richards
278.66	1.311	0.85	Ratkowsky
779.87	2.138	0.62	Hyperbolic
283.84	1.316	0.85	Sinusoidal
281.67	1.313	0.85	Rational
346.40	1.400	0.83	Heat capacity
317.20	1.361	0.84	Gaussian

باتوجه به این نتایج مشخص شد که مدل‌های Linear، Saturation Growth، Cubic، Modified Expontial و Hyperbolic، Heat Capacity مقدار ارتفاع را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کردند. نتایج کامل اعتبارسنجی مدل‌های به‌کار رفته در جدول ۵ آورده شده‌است.

نتایج حاصل از معیارهای استفاده‌شده برای اعتبارسنجی مدل‌های به‌کار رفته نشان داد که مدل‌های Gompertz، MMF و Richard با RMSE به‌ترتیب ۲۲/۱۹، ۲۲/۲۰ و ۲۲/۲۰ درصد و نیز MAE به‌ترتیب ۱۶/۶۹، ۱۶/۷۴ و ۱۶/۷۹ درصد بهتر توانستند مشخصه ارتفاع درختان را برآورد کنند (جدول ۵). همچنین

جدول ۵- مقادیر محاسبه‌شده مجذور میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا، اریبی، معیار اطلاعات آیک و ضریب تبیین برای اعتبارسنجی ۲۴ مدل خطی و غیرخطی

Table 5. Calculated values of RMSE, MAE, Bias, AIC and R² for validation of 24 linear and non-linear models

AIC	R ²	Bias%	Bias	MAE%	MAE	RMSE%	RMSE	مدل Model
102.01	0.76	-0.012	-0.0008	17.36	1.11	22.79	1.46	Linear
99.86	0.79	0.62	0.039	16.91	1.085	22.42	1.43	Quadratic
99.59	0.78	-0.29	-0.019	16.84	1.080	22.22	1.42	Cubic
118.22	0.78	-0.43	-0.027	18.34	1.17	24.27	1.55	modified expontial
131.36	0.73	0.32	0.02	19.69	1.26	25.53	1.63	logarithmic
101.83	0.78	0.24	0.015	17.14	1.09	22.6	1.45	Vapor pressure

ادامه جدول ۵.

Continued table 5.

AIC	R ²	Bias%	Bias	MAE%	MAE	RMSE%	RMSE	مدل Model
172.89	0.28	0.52	0.033	24.61	1.58	29.99	1.92	Expontial
100.72	0.75	0.71	0.045	17.29	1.10	22.67	1.45	Power
103.65	0.79	0.18	0.011	17.22	1.10	22.93	1.47	Modified Geometric
98.95	0.79	0.61	0.039	16.80	1.07	22.34	1.43	Hoerl
99.20	0.79	0.53	0.034	16.83	1.08	22.37	1.43	Harris
98.63	0.75	1.37	0.088	17.16	1.10	22.49	1.44	Expontial Association
102.31	0.76	-0.25	-0.016	17.38	1.11	22.81	1.46	Saturation Growth Rate
97.13	0.79	0.99	0.063	16.69	1.07	22.19	1.42	Gompertz
98.45	0.79	1.46	0.094	17.08	1.09	22.30	1.43	Logistic
99.29	0.79	1.20	0.077	16.74	1.07	22.20	1.42	MMF
99.34	0.79	1.09	0.070	16.79	1.07	22.21	1.42	Weibull
99.26	0.79	1.15	0.073	16.79	1.07	22.20	1.42	Richards
98.45	0.79	1.46	0.094	17.08	1.09	22.30	1.43	Ratkowsky
199.91	0.46	-0.80	-0.051	27.24	1.74	33.31	2.13	Hyperbolic
99.62	0.79	0.81	0.052	16.83	1.07	22.23	1.42	Sinusoidal
99.46	0.79	0.76	0.049	16.81	1.07	22.22	1.42	Rational
104.30	0.76	-0.10	-0.006	17.49	1.12	22.81	1.46	Heat capacity
101.82	0.77	1.22	0.078	17.53	1.12	22.59	1.44	Gaussian

در ادامه مدل‌ها بر اساس مقادیر معیارهای عملکردی رتبه‌بندی شدند و میانگین رتبه بر اساس مجموع رتبه‌های به دست آمده محاسبه شد (جدول ۶). بر این اساس مدل‌های Hoerl, Richard, Gmpertz و MMF با میانگین رتبه به ترتیب ۴/۷، ۶/۷، ۷ و ۷/۷ بهترین رتبه را به خود اختصاص دادند (جدول ۶).

جدول ۶- رتبه‌بندی مدل‌های انتخابی بر اساس معیارهای عملکرد برای داده‌های اعتبار

Table 6. Ranking of selected models based on performance criteria for validity data

میانگین رتبه Average rank	AIC	Bias%	MAE%	RMSE%	R ²	مدل Model
14.2	17	1	17	17	19	Linear
11.8	13	12	10	12	12	Quadratic
9.4	11	6	9	6	15	Cubic
17	21	8	21	21	14	modified expontial
19	22	7	22	22	22	logarithmic
12.2	16	4	13	15	13	Vapor pressure
20.4	23	9	23	23	24	Expontial
15.8	14	13	16	16	20	Power
13.2	19	3	15	20	9	Modified Geometric
7	5	11	5	10	4	Hoerl
8.2	6	10	8	11	6	Harris
14.8	4	22	14	13	21	Expontial Association
15.4	18	5	18	19	17	Saturation Growth Rate
4.4	1	17	1	1	2	Gompertz
11	3	24	12	9	7	Logistic
7.4	9	20	2	3	3	MMF
7.8	9	18	3	4	5	Weibull
6.6	7	19	4	2	1	Richards
10.4	2	23	11	8	8	Ratkowsky
21.8	24	15	24	24	23	Hyperbolic
10.6	12	16	7	7	11	Sinusoidal

ادامه جدول ۶.

Continued table 6.

میانگین رتبه Average rank	AIC	Bias%	MAE%	RMSE%	R ²	مدل Model
9	10	14	6	5	10	Rational
15.4	20	2	19	18	18	Heat capacity
17.2	15	21	20	14	16	Gaussian

نتایج به دست آمده از بررسی میانگین تفاوت های مقادیر مشاهده شده با مقادیر برآورد شده مشخصه ارتفاع با استفاده از ۲۴ مدل انتخاب شده، نشان داد که مدل های Gompertz, MMF و Richard دارای کمترین انحراف معیار مقادیر تفاوت ها (به ترتیب با ۱/۴۲۷۷۶، ۱/۴۲۸۰۱ و ۱/۴۲۸۰۵ متر) بودند. همچنین تفاوت بین مقادیر برآورد شده همه مدل ها با مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار نبود (جدول ۷).

جدول ۷ - تفاوت های مقادیر واقعی با مقادیر برآورد شده مشخصه ارتفاع با استفاده از مدل های رگرسیونی خطی و غیرخطی انتخاب شده

Table 7. The differences between the actual values and the estimated values of the height characteristic using selected linear and non-linear regression models

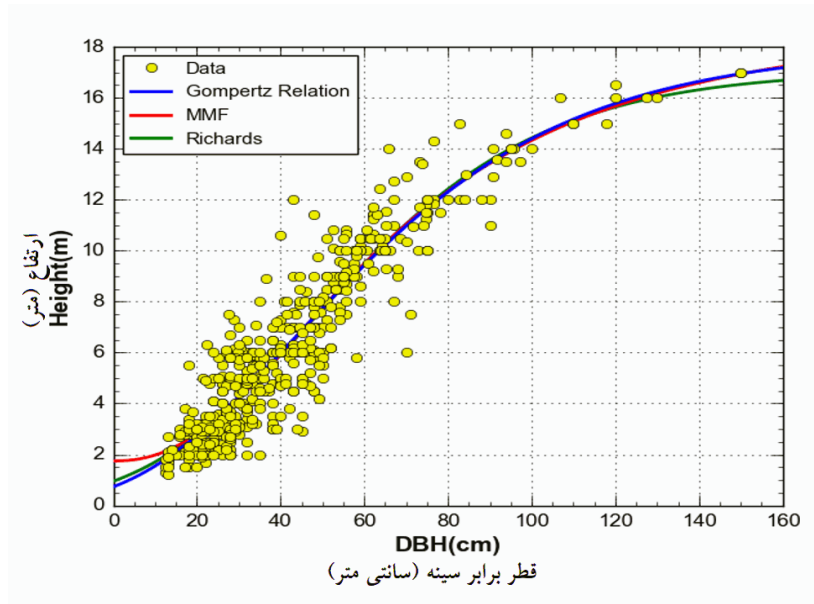
انحراف از معیار تفاوت ها Std. Error difference	میانگین تفاوت ها Mean differences	Sig.	t	میانگین برآورد شده Estimated average	میانگین واقعی Actual average	مدل Model
1.46787	0.00079	0.995 ^{ns}	0.006	6.4153	6.4151	Linear
1.44388	-0.03979	0.775 ^{ns}	-0.313	6.4549	6.4151	Quadratic
1.43147	0.01921	0.879 ^{ns}	0.152	6.3959	6.4151	Cubic
1.56278	0.02798	0.389 ^{ns}	0.203	6.3871	6.4151	modified expontial
1.64457	-0.02099	0.885 ^{ns}	-0.145	6.4361	6.4151	logarithmic
1.45538	-0.01576	0.902 ^{ns}	-0.123	6.4309	6.4151	Vapor pressure
1.93168	-0.03353	0.844 ^{ns}	-0.197	6.4486	6.4151	Expontial
1.45982	-0.04587	0.722 ^{ns}	-0.357	6.4610	6.4151	Power
1.47716	-0.01189	0.927 ^{ns}	-0.091	6.4270	6.4151	Modified Geometric
1.43877	-0.03944	0.756 ^{ns}	-0.311	6.4546	6.4151	Hoerl
1.44032	-0.03412	0.788 ^{ns}	-0.296	6.4492	6.4151	Harris
1.44606	-0.08812	0.490 ^{ns}	-0.692	6.5032	6.4151	Expontial Association
1.46946	0.01616	0.901 ^{ns}	0.125	6.3990	6.4151	Saturation Growth Rate
1.42776	-0.06391	0.612 ^{ns}	-0.508	6.4790	6.4151	Gompertz
1.43345	-0.09417	0.475 ^{ns}	-0.746	6.5093	6.4151	Logistic
1.42801	-0.07737	0.539 ^{ns}	-0.615	6.4925	6.4151	MMF
1.42865	-0.07019	0.578 ^{sn}	-0.588	6.4853	6.4151	Weibull
1.42805	-0.07378	0.558 ^{sn}	-0.587	6.4889	6.4151	Richards
1.43345	-0.09410	0.457 ^{sn}	-0.746	6.5092	6.4151	Ratkowsky
2.14458	0.05183	0.784 ^{sn}	0.275	6.3633	6.4151	Hyperbolic
1.43096	-0.05254	0.677 ^{sn}	-0.417	6.4677	6.4151	Sinusoidal
1.43022	-0.04918	0.697 ^{sn}	-0.391	6.4643	6.4151	Rational
1.46945	-0.00689	0.958 ^{sn}	0.053	6.4082	6.4151	Heat capacity
1.45330	-0.07862	0.540 ^{sn}	-0.614	6.4937	6.4151	Gaussian

ns: غیر معنی دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد.

ns: non-significant at the 95% confidence level

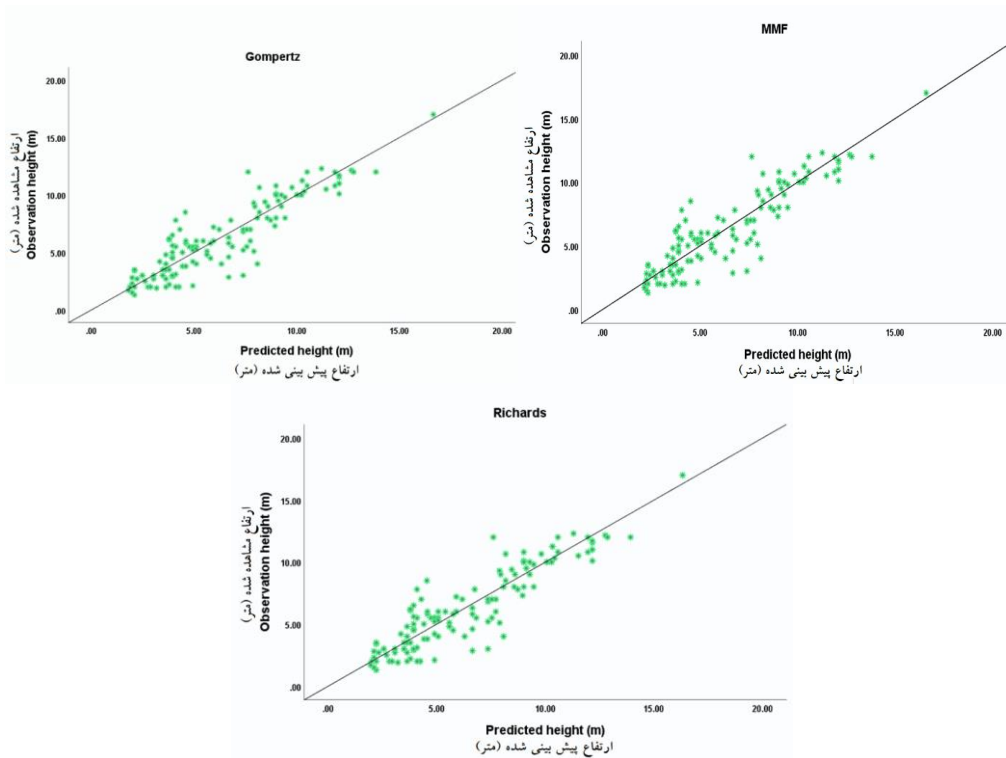
منحنی قطر و ارتفاع و شکل ۴ منحنی ارتفاع مشاهده-
شده در برابر ارتفاع برآورد شده سه مدل ذکر شده را
نشان می‌دهد.

باتوجه به نتایج ذکر شده مشخص شد که سه مدل
Richard و MMF، Gompertz در مقایسه با دیگر
مدل‌ها از توانایی بالاتری در برآورد مشخصه ارتفاع
درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی برخوردار هستند، شکل ۳



شکل ۳- منحنی قطر و ارتفاع سه مدل برتر

Figure 3. Diameter and height curve of three top models

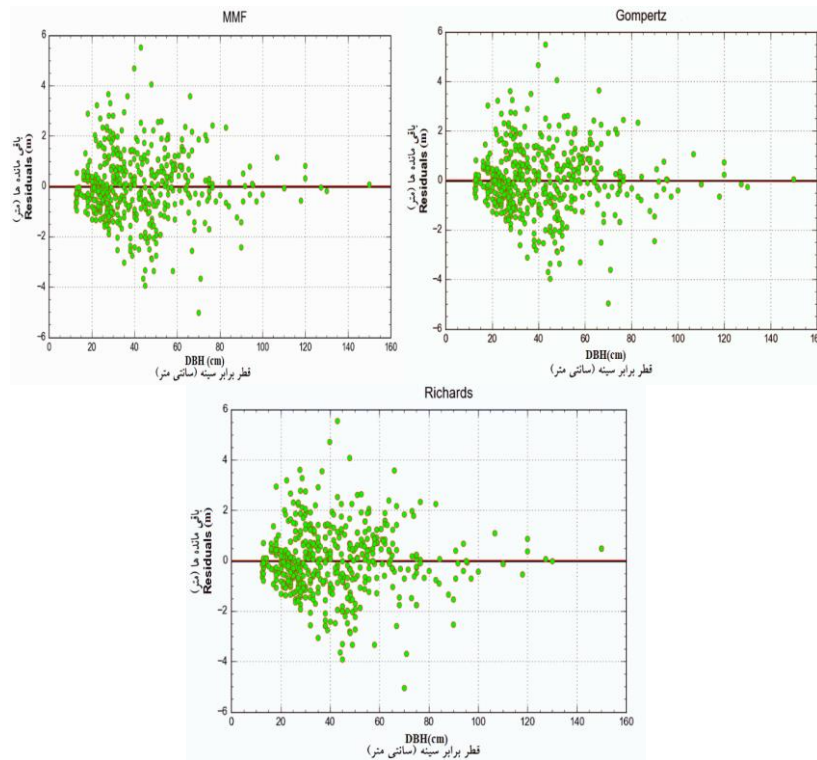


شکل ۴- منحنی ارتفاع مشاهده شده در برابر ارتفاع برآورد شده سه مدل منتخب (Richard و MMF، Gompertz)

Figure 4. The observed height curve against the estimated height of three selected models (Gompertz, MMF and Richard)

هیستوگرام باقی‌مانده‌ها چولگی نداشت و نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر تطبیق‌یافته از پراکنش یکنواخت در دو سوی محور صفر و ثبات واریانس داشت که نشان از تناسب این مدل‌ها است (شکل ۵).

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل باقی‌مانده‌های سه مدل رگرسیونی غیرخطی منتخب (MMF، Gompertz، و Richard) نشان داد که میانگین باقی‌مانده‌ها به‌طور تقریب صفر و دارای توزیع نرمال بوده و همچنین



شکل ۵- منحنی باقی‌مانده مدل‌های منتخب (Richard و MMF، Gompertz)

Figure 5. Residual curve of selected models (Gompertz, MMF and Richard)

جنگل به یک وضعیت مطلوب از اهمیت بالایی برخوردار است (Amiri et al., 2022). نتایج به‌دست‌آمده از ۲۴ مدل خطی و غیرخطی نشان‌دهنده برتری مدل‌های غیرخطی در مقایسه با مدل‌های خطی است؛ به‌طوری‌که مدل‌های رگرسیونی غیرخطی Gompertz، MMF و Richard بر اساس معیارهای ارزیابی مورد استفاده در این پژوهش (درصد مجذور میانگین مربعات خطای، درصد میانگین قدر مطلق خطای، درصد اریبی، ضریب تبیین، معیار اطلاعات آیک، میانگین تفاوت‌های مقادیر برآوردشده با مقادیر واقعی و انحراف معیار تفاوت‌های مقادیر

بحث

بررسی نتایج حاصل از آماره‌های توصیفی قطر و ارتفاع درختان نشان داد که واریانس و دامنه تغییرات زیادی دارند که نشان‌دهنده این مطلب است که این داده‌ها از یک دامنه وسیع قطر برابر سینه ۱۲/۵ تا ۱۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱/۲ تا ۱۷ متر انتخاب شده‌اند که این مورد بیانگر ناهمگن بودن توده جنگلی در منطقه مورد پژوهش است. همچنین وجود درختان با قطر و ارتفاع پایین که می‌تواند تضمین‌کننده آینده و دوام جنگل باشند و نیز پایه‌های قطور و بلندی که می‌توانند نقش پایه‌های مادری را ایفا کنند، از نظر جنگل‌شناسی در جهت رسیدن

ارتفاع درختان قطور است که خود این امر نشان‌دهنده توانایی مدل‌های غیرخطی خانواده سیگموئیدی در برآورد ارتفاع درختان قطور است. برتری مدل‌های غیرخطی در پژوهش‌های دیگر در زمینه مدل‌های قطر-ارتفاع نیز به اثبات رسیده است (Fang et al., 1998; Scaranello et al., 2012; Hamidi et al., 2021; Ghaderi et al., 2023). مقایسه نتایج این پژوهش با دیگر بررسی‌های انجام شده نشان داد که عواملی مانند ساختار توده، نوع توده و نوع مدل بکار گرفته شده در انتخاب مدل برتر بسیار مؤثر است، همچنین به دلیل تغییر شرایط رویشگاهی و توده، مدل‌های قطر و ارتفاع در یک جنگل نیز ممکن است که تغییر کند.

نتیجه‌گیری

در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های خطی و غیرخطی توانایی برآورد ارتفاع درختان دانه‌زاد بلوط ایرانی را در ناحیه رویشی زاگرس میانی دارند، که از میان این مدل‌ها سه مدل غیرخطی Gompertz، MMF و Richard بر اساس معیارهای ارزیابی عملکرد از دقت بالاتری برخوردار بودند. بنابراین این مدل‌ها می‌توانند در مناطق جنگلی ناحیه رویشی زاگرس میانی که دارای ساختار و شرایط رویشگاهی مشابهی با منطقه موردبررسی هستند مورداستفاده قرار گیرند. لازم به ذکر است که پژوهش حاضر تنها به پیش‌بینی ارتفاع درختان بر اساس قطر برابرسینه (متغیر مستقل) و همچنین مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی پرداخته است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده از مدل‌های تعمیم‌یافته ارتفاع و قطر که در آن تغییرپذیری رویشگاه و توده به‌لحاظ متغیرهای توده غیر از قطر درخت (سطح مقطع توده، سن توده، ارتفاع غالب، قطر غالب، شاخص رویشگاه و غیره) در نظر گرفته می‌شود و همچنین از الگوریتم‌هایی مانند ماشین‌بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی و غیره استفاده شود.

برآوردشده با مقادیر واقعی) بهتر توانستند ارتفاع درختان را تخمین بزنند که با بررسی‌های انجام‌شده پیشین (Alijani et al., 2020; Ahmadi et al., 2013; Mohamadi and Shattai, 2016; Zhang, 1997) همسو است. به‌طورکلی به جز دو مدل Exponential و Hyperbolic نتایج به‌دست‌آمده از معیارهای ارزیابی ذکرشده تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند و از نظر آماری نیز در سطح اطمینان ۹۵ درصد تفاوت معنی‌داری بین مقادیر برآوردشده با استفاده از مدل‌های مختلف با مقادیر مشاهده‌شده وجود نداشت و سه مدل بیان‌شده دارای کمترین مقدار درصد مجذور میانگین مربعات خطا بودند. مجذور میانگین مربعات خطای به‌دست‌آمده در پژوهش پیش رو (حدود ۱/۵ تا ۲ متر) با بررسی‌های Sharma et al. (2016) و Adame et al. (2008) اختلاف چندانی نداشت، در مورد تفاوت نتایج جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین حاصل از این پژوهش با برخی پژوهش‌ها می‌توان به عوامل مختلفی مثل ناهمگن بودن منطقه از نظر پراکنش، نوع جنگل (سوزنی برگ، پهن برگ و مخلوط سوزنی‌برگ و پهن‌برگ)، زیاد بودن دامنه تغییر در مقدار ارتفاع و غیره اشاره کرد (Ghaderi et al., 2023). بررسی میانگین مقادیر ارتفاع برآورد شده با مقادیر واقعی ارتفاع نیز نشان داد که مدل‌های Gompertz، MMF و Richard مقادیر ارتفاع را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کردند. برتری مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل‌های خطی از طریق تفسیر بیولوژیکی قابل توجیه است، به طوری که با افزایش قطر برابرسینه، ارتفاع با همان شدت افزایش نمی‌یابد و بیشتر در قطرهای بالاتر رویش ارتفاعی به کندی صورت می‌گیرد (Alijani et al., 2020). با مراجعه به شکل‌های ۳ و ۴ علت انتخاب مدل‌های Gompertz، MMF و Richard در پیش‌بینی

References

- Adame, P.; del Rio, M.; Canellas, I., A mixed nonlinear height-diameter model for pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Forest Ecology and Management* **2008**, *256*, 88 – 98.
- Ahmadi, K.; Alavi, S.J.; Kouchaksaraei, M.T.; Aertsen, W., Non-linear height-diameter models for oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Hyrcanian forests, Iran. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* **2013**, *17*, 431–440.
- Ahmadi, K.; Alavi, S.J.; Kouchaksaraei, M.T.; Aertsen, W., Comparison of non-linear height and diameter functions for oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky.) in a mixed and uneven-aged Caspian forest (Case Study: Tarbiat Modares University forest research station). *Iranian Journal of Forest* **2014**, *6* (1), 11 – 22. (In Persian)
- Aishan, T.; Halik, U.; Betz, F.; Gartner, P.; Cyffka, B., Modeling height-diameter relationship for *Populus euphratica* in the Tarim riparian forest ecosystem, Northwest China. *Journal of Forestry Research* **2016**, *27* (4), 889–900.
- Alemi, A.; Oladi, J.; Fallah, A.; Maghsodi, Y., Evaluating of different height-diameter nonlinear models for hornbeam in uneven-aged stands (Case Study: Golestan Rezaeian Forest). *Ecology of Iranian Forests* **2021**, *8* (16), 29 – 38. (In Persian)
- Alijani, V.; Namiranian, M.; Feghhi, J.; Bozorg – Hadad, O.; Etemad, V., Investigation of height-diameter models in different development stages of unmanaged beech Forest (Case Study: Educational and research forest of Kheirud). *Journal of Environmental Science and Technology* **2020**, *21* (12), 127 – 134. (In Persian)
- Amiri, P.; Soosani, J.; Naghavi, H.; Seyedna, V.; Nourmohamadi, K., Investigating the quantitative characteristics of the less degraded forest areas of the middle Zagros region (case study: the forests of Khoramabad Nozhian region). National congress of new findings in agricultural and natural resources, environment and tourism **2022**, 1 – 7. (In Persian)
- Bayat, M.; Hasani, M.; Heidari Masteali, S., Ten-year estimation of *Fagus orientalis* lipsky increment using artificial neural networks model and multiple linear regression Ramsar forests. *Forest Research and Development* **2020**, *6* (3), 381 – 394. (In Persian)
- Bolat, F.; Urker, O.; Günlü, A., Nonlinear height-diameter models for Hungarian oak (*Quercus frainetto* Ten.) in Dumanlı Forest Planning Unit, anakkale/Turkey. *Austrian Journal of Forest Science* **2022**, *139*, 199–220.
- Bihamta, M.R.; Zare Chahouki, M.R., *Principles of statistics for the natural resources science*. University of Tehran Press, 2008, 322p. (In Persian)
- Cui, K.; Wu, X.; Zhang, C.; Zhao, X.; Gadow, K., Estimating height-diameter relations for structure groups in the natural forests of Northeastern China. *Forest Ecology and Management* **2022**, *519*, 120298.
- Delpasand, S.; Maleknia, R.; Kazemi, Y., Evaluating the impact of climatic factors on vegetation changes in the protected area of Sefid Koh Lorestan using the MODIS sensor. Conference: National Geomatics Conference **2017**, 1 – 10. (In Persian)
- Eshagh Nimvari, J.; Zobeyri, M.; Sobhani, H.; Pourshafi Zanganeh, H., A comparison of randomized -systematic sampling with circle shape plot and transect method, based on precision and cost in west oak forest. *Iranian Journal of Natural Resources* **2003**, *56* (4), 383–395. (In Persian)
- Fattahi, M., *Investigation of Zagros oak forests and the most important factors of its destruction*. Research Institute of Forests and Rangelands Tehran press, **1994**. (In Persian)
- Fang, Z.; Bailey, R.L., Height-diameter models for tropical forest on Hainan Island in southern China. *Forest Ecology and Management* **1998**, *110*, 315–327.
- Ghaderi, P.; Mohammadi, J.; Shataee, Sh.; Rahmani, R.; Kariminejad, N., Efficiency of nonlinear mixed-effects model in determining height-diameter equations of velvet maple and ironwood trees. *Iranian Journal of Forest* **2023**, *14* (4), 473 – 485. (In Persian)
- Golob, Ch.; Ritter, T.; Vosptnic, S.; Wassermann, C.; Nuthtroft, A., A flexible height-diameter model for tree height imputation on forest inventory sample plots using repeated measures from the past. *Journal Forests* **2018**, *9* (368), 1 – 25.
- Hamidi, S.K.; Fallah, A.; Bayat, M.; Hosseini Yekani, S.A., Investigating the diameter and height models of beech trees in uneven age forest of northern Iran (Case study: Forest

- Farim). *Ecology of Iranian Forests* **2021**, 9 (17), 30-40. (In Persian)
- Hyams, D., Curve expert 1.40: A curve fitting system for Windows. 2010, <http://curveexpert.webhop.biz/>
- Mohammadi, J.; Shataee. Sh., Study of different height-diameter models for hornbeam (*Carpinus betulus L.*) in uneven-aged stands of Shastkalateh forest of Gorgan. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* **2016**, 24 (4), 700 – 712. (In Persian)
- Jafari, J.; Tabari, M.; Hosseini, V.; Sadati, S. E., Effect of artificial tree stands on physical, chemical properties and soil microbial biomass (case study: Zaghmarz of Neka). *Forest Research and Development* **2021**, 7 (1), 123-135. (In Persian)
- Petras, R.; Bosela, M.; Mecko, J., Height-diameter models for mixed-species forests consisting of spruce, fir, and beech. *Folia Forest Polonica* **2014**, 56, 93–104.
- Rahimi, GH.; Mohammadi Samani, K.; Shabaniyan, N.; Sharif Rahmani. M., Investigating some chemical soil properties in the pollarded and less-disturbed forest stands in the Northern Zagros (case study: Baneh forest, Kurdistan). *Journal of Environmental Science and Technology* **2020**, 22 (3), 68-55. (In Persian)
- Salmani, A.; Poursaeed, A.R.; Bayramzadeh, V.; Eshraghi Samani. R., Explaining the criteria and indicators of sustainable management of forests in Zagros basin from the point of view of forest specialists and experts. *Iranian Journal of Forest* **2021**, 13 (1), 43-58. (In Persian)
- Scaranello, M. A. S.; Alves, L. F.; Vieira, S. A.; Camargo, P. B. C.; Joly, C. A.; Martinelli, L. A., Height-diameter relationships of tropical Atlantic moist forest trees in southeastern Brazil. *Scientia Agricola* **2012**, 69 (1), 26-37.
- Sharma, R.P.; Vacek, Z.; Vacek, S., Nonlinear mixed effect height-diameter model for mixed species forests in the central part of the Czech Republic. *Journal of Forest Science* **2016**, 62 (10), 470–484.
- Wang, T. Y.; Lam, T. Y., Modelling height-diameter relationship of fifteen tree species planted on reclaimed agricultural lands with random species effects. *Tropical Forestry* **2021**, 1053, 1-5.
- Xu, Q.; Lei, X.; Zang, H.; Zeng, W., Climate change effects on height–diameter allometric relationship vary with tree species and size for larch plantations in northern and northeastern China. *Forests* **2022**, 13 (468), 1-16.
- Zeynali Yadegari, L.; Seyedi, N., Effect of altitude on seed germination and biomass of *Quercus brantii*. *Forest Research and Development* **2019**, 5 (3), 405-417. (In Persian)
- Zhang, L., Cross-validation of nonlinear growth functions for modeling tree heightdiameter distributions. *Annals of Botany* **1997**, 79, 251-257.

Investigating diameter-height models of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl) in height forests of Middle Zagros

Peyman Amiri¹, Javad Soosani^{*1} and Hamed Naghavi³

1- PhD student of Forest Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, I. R. Iran. (peyman.amiri67@gmail.com)

2- Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, I. R. Iran. (soosani.j@lu.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, I. R. Iran. (naghavi.ha@lu.ac.ir)

Received: 18 July 2023

Accepted: 19 October 2023

Abstract

Background and objectives: Efficient and high-quality information about the current and future state of the forest is needed for sustainable management and basic planning of forest resources. Zagros forests, as one of the most important vegetation areas of Iran, have a very important effect on water supply, soil conservation, climate adjustment and economic and social balance in the whole country, hence, the sustainable protection and management of these forest ecosystems. The main concern of researchers and managers in this area has become vegetation. The dominant species of these forests is Iranian oak (*Quercus brantii* Lindl). According to geographical and environmental conditions, this species has various habitats in the vegetation zone of the middle Zagros. Considering the noble position of the Iranian oak species in the forests of Zagros, the importance of developing more researches regarding this species is essential. The characteristics of tree diameter and height are the most important components needed in forest statistics. These variables are one of the main variables for measuring the appearance characteristics of forest trees and are used in cases such as determining the volume and drawing the height curve. Considering that measuring the height of all forest trees is a long and expensive operation, hence the use of diameter and height models to estimate the height of trees has been developed. The purpose of this research is to investigate the linear and non-linear diameter-height models of Iranian oak species (*Q. brantii* Lindl) in the high forests of the Middle Zagros in order to find the answer to the question of whether it is possible to estimate the height of Iranian oak high forest trees as There is a function of the diameter of the chest in this vegetative zone or not.

Methodology: This research was conducted in Sefidkoh protected area of Lorestan. The dominant tree cover of this area is made of oak, like other areas of Zagros, but other plants and trees such as *Cratagus persica pojark*, *Amygdalus sp*, *Astragalus sp*, etc. can be mentioned in it. To carry out this research, by conducting numerous forest tours and getting to know the forests of the region, a stand with an area of approximately five hectares, which had a high forest vegetation structure, was selected. In the selected forest stand, the characteristics of DBH and total height of all Iranian oak trees whose DBH was more than 12.5 cm were counted as 100%. In total, 642 Iranian oak trees were measured in DBH and height. Linear and non-linear models were used to fit the data of DBH and height of trees, which include various models of exponential, power, density-product, growth, sigmoid and other functions. In this research, 80% of the data were used in the modeling process and 20% were used for evaluation, as well as for fitting the data and estimating the indicators of each of the models from the Curve Expert Professional software, which is a software Comprehensive software was used to fit the curves. In the modeling process, diameter data were used as independent variables and height data were used as dependent variables. In the upcoming research, to verify the accuracy of the obtained models, the RMSE, MAE and Bias in absolute and relative terms, as well as the R^2 and the AIC was calculated as validation indices.

Results: Based on the descriptive statistics of Iranian oak trees, the average, minimum and maximum DBH was 42.42, 12.5 and 150 cm, respectively, and the height was 6.3, 1.2 and 17 meters, respectively. Based on R^2 values, the used models explained 62 to 86% of the total changes in tree height. The results

* Corresponding author

Tel: +989166598005

of tree height-diameter modeling showed that Gompertz, MMF and Richard models have the highest explanatory coefficient (0.86, 0.86, 0.86), respectively, and the lowest standard error (307.1, 1/307, 1/307) and AIC information criterion were (276/04, 277/13, 277/03). The results of the criteria used to validate the used models showed that the Gompertz, MMF and Richard models have RMSE of 22.22, 22.20 and 22.20%, respectively, as well as MAE respectively. 16.69, 16.74 and 16.79 percent were better able to estimate the characteristics of the height of trees. According to the mentioned results, it was found that Gompertz, MMF, and Richard models have a higher ability to estimate the characteristic height of Iranian oak trees compared to other models.

Conclusion: Overall, the results of this research showed that linear and non-linear models have the ability to estimate the height of Iranian oak high forest trees in the growing region of the middle Zagros, and among these models, three non-linear models are Gompertz, MMF and Richard based on evaluation criteria. The performance was more accurate. Therefore, these models can be used in the forest areas of the middle Zagros vegetation zone, which have the same structure and habitat conditions as the studied area. It is suggested to use the generalized models of height and diameter in future researches.

Keywords: Modeling, *Quercus brantii*, Regression, Statistics, Validation.