دانشگاه گنبدکاووس
نشریه "حفاظت زیست‌بوم گیاهان"
دوره هشتم، شماره هفدهم
http://pec.gonbad.ac.ir

علمی-پژوهشی

ارزیابی مدل‌های غیرخطی قطر–ارتفاع دو گونه مهم سوزنی‌برگ دست‌کاشت کاج بروسیاو زربین(مطالعه موردی: حوزه عرب داغ)

علی مستوری[1]، شعبان شتایی[*2]، محمدهادی معیری[3]، خسرو ثاقب طالبی[4]

[1] دانشجوی دکتری علوم و مهندسی جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان
[2] استاد گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان
[3] دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان
[4] استاد پژوهشی موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۲

چکیده

شناخت ارتباط بین ارتفاع درخت (H) و قطر در ارتفاع برابرسینه (D) برای برنامه‌ریزی جنگل، نظارت، برآورد زیست‌توده و توصیف پویایی توده بسیار مهم است. در این تحقیق ۲۰مدل مختلف قطر- ارتفاع برای برآورد دقیق ارتفاع درختان همسال دست‌کاشت کاج بروسیا (*Pinusbrutia*) وزربین (*Cupressus sempervirens* var.*horizontalis*) در منطقه عرب داغ (شمال شرق استان گلستان) ارزیابی شد. داده‌های موردنیاز برای گونه‌های زربین و کاج بروسیا به ترتیب از ۱۱۴ و ۹۸ قطعه‌نمونه،با استفاده از یک شبکه آماربرداری خوشه‌ای سیستماتیک بافاصله خوشه‌ها ۴۰۰×۶۰۰ متر جمع‌آوری شد. در تمام قطعات نمونه، مشخصه‌های گونه، قطر برابرسینه تمام درختان با قطربیشتر از ۷/۵ سانتی‌متر و ارتفاع درختان اندازه‌گیری و ثبت شد. درمجموع ۳۸۹ و ۲۹۹ جفت مشاهده قطر- ارتفاع به ترتیب برای زربین و کاج بروسیا اندازه‌گیری و ثبت شد که ۷۵ درصد آن‌ها در فرآیند مدل‌سازی و

[*] نویسنده مسئول: shataee@yahoo.com

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

۲۵ درصد برای ارزیابی مدل‌ها به کار گرفته شد. ارزیابی برازش مدل‌ها با استفاده از معیارهای آماری درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی (RMSE٪) و ضریب تبیین R^2 انجام شد. نتایج نشان داد که بازه R^2در مرحله اعتبارسنجی از ۰/۵۵ تا ۰/۵۹ و ۰/۵۰ تا ۰/۵۱ و بازه RMSE٪ از ۱۵/۳۲ تا ۲۲/۸۷ و ۱۱/۰۹ تا ۱۶ درصد به ترتیب برای گونه‌های زربین و کاج بروسیا به دست آمد و مدل‌های سیبسن، میکاییل- منتن، توانی، پرودان و چاپمن- ریچارد برای گونه زربین و مدل‌های گومپرز، کرف، وایبول، میکایلوف و راتکوفسکی برای گونه کاج بروسیا، بهتر توانستند مشخصه ارتفاع را برآورد کنند؛ بنابراین، اکثر مدل‌ها، دارای نتایج نسبتاً مشابه با دقت مناسب بودند و می‌توانند در برآورد ارتفاع درختان جنگل‌های دست‌کاشت بروسیا و زربین در سایر مناطق فاقد طرح پرورشی نیز به کار بسته شوند.

کلمات کلیدی: توده‌های همسال، مدل‌سازی آماری، ارتفاع، گونه‌های سوزنی برگ، حجم سرپا

مقدمه

مدیریت پایدار و برنامه‌ریزی صحیح منابع جنگلی به اطلاعات دقیق از وضعیت حال و آینده جنگل نیازمند است (محمدی و شتایی، ۱۳۹۵). در استان گلستان حدود ۸۰ هزار هکتار عرصه جنگل‌کاری وجود دارد که با گونه‌های مختلف سوزنی‌برگ به‌خصوص کاج بروسیا و زربین انجام گرفته است. سن بیشتر این توده‌ها بیش از ۳۰ سال است که اکثراً فاقد طرح و یا نسخه‌های پرورشی هستند. از طرف دیگر، آشفتگی‌های طبیعی مانند آتش‌سوزی، برف و باد به‌شدت این مناطق را تحت تأثیر قرارداده است، به‌طوری‌که منطقه عرب داغ (مطالعه موردی) هرسال خسارات جبران‌ناپذیری را تجربه می‌کند (اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، ۱۳۹۵). به‌همین دلیل کسب اطلاعاتی دقیق و بهنگام از وضعیت کمی این منابع جنگلی در برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح این منابع، از اولویت زیادی برخوردار است. در این راستا توسعه مدل‌های دقیق قطر و ارتفاع برای تهیه جداول حجم دقیق و پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر مدل‌های رویش و محصول بسیار حائز اهمیت است (عالمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Özçelik et al., 2013). ارتفاع (H) و قطر درختان درارتفاع برابرسینه (DBH) از مهم‌ترین عناصر آماربرداری در ساختار جنگل محسوب می‌شوند (Ahmadi et al., 2013; Zang et al., 2016). ارتفاع درخت برای برآورد متغیرهای مهم مربوط به رویش جنگلاستفاده می‌شود (Gao et al., 2016; Stark et al., 2009). به‌هرحال اندازه‌گیری ارتفاع تمام درختان در یک توده جنگلی پرهزینه و زمان‌بر است (Ahmadi et al., 2013) و همچنین احتمال خطای مشاهده‌گر و بروز موانع بینایی از اصلی‌ترین مشکلات در اندازه‌گیری آن محسوب می‌شود (Krisnawati et al., 2010)؛ بنابراین ارتفاع تعداد کمی از درختان در آمار برداری‌های جنگل مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرند، در حالی که قطر برای تمام درختان یک

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

پلات اندازه‌گیری می‌شود. از طرف دیگر، غالباً همبستگی بالایی بین قطر و ارتفاع درختان در یک توده وجود دارد و نمونه درختانی که قطر و ارتفاع برای آن‌ها اندازه‌گیری شده است برای ساختن مدل‌های قطر-ارتفاع برای پیش‌بینی ارتفاع سایر درختان موجود در پلات‌ها استفاده می‌شود (Staudhammer and LeMay, 2000; Robinson and Wykoff, 2004; Lei et al., 2009). این مدل‌ها ابزاری مهم برای اهداف مدیریتی در جنگل محسوب می‌شوند و برای محاسبه مقادیر قابل‌اندازه‌گیری مورد نیاز برای توصیف رشد و عملکرد جنگل به‌خصوص حجم و بیوماس (Johansson, 2012; Ahmadi et al., 2013)، تحلیل و تجزیه ساختار توده (Gadow et al., 2001)، تعیین ارتفاع غالب و شاخص رویشگاه (Yuancai and Parresol, 2001)، پایداری توده و ارزیابی خسارت (Parresol, 1992) استفاده می‌شود؛ بنابراین با توجه به رویکرد جدید سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور مبنی بر استراحت جنگل‌های طبیعی پهن‌برگ و تأکید بر حفظ و توسعه عرصه‌های جنگل‌کاری در سال‌های اخیر، مدیران برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی رویش و محصول در راستای مدیریت پایدار این منابع، به روابط قطر- ارتفاع دقیق نیاز دارند.

تعداد قابل توجهی از مدل‌های خطی و غیرخطی قطر- ارتفاع توسط محققان برای گونه‌های مختلف در سراسر جهان توسعه یافته‌اند که این مدل‌ها حتی در توده‌های همسال و خالص نیز در همه موقعیت‌ها یکسان نیستند (Dorado et al., 2006) و درختان از نظر سن، اندازه، گونه، تاج، تراکم توده، کیفیت رویشگاه و موقعیت نسبی در توده متفاوت هستند و شیوه‌های مدیریتی وتغییرات دینامیک توده نیز باعث تغییرات می‌شود (Vargas-Larreta et al., 2009)؛ بنابراین روابط قطر- ارتفاع همیشه ثابت نیست. در اکثر این مدل‌ها قطر یک متغیر پیش‌بینی کننده برای تخمین ارتفاع کل درخت استفاده شده است (Inoue and Yoshida, 2004). مطالعات زیادی در خارج از کشور درزمینه برازش مدل‌های قطر- ارتفاع برای گونه‌های سوزنی‌برگ دست‌کاشت انجام‌شده است، به‌طوری‌که سانچز و همکاران (Sánchez et al., 2003) از ۲۶ تابع خطی و غیرخطی قطر- ارتفاع برای گونه کاج رادیاتا در سراسر گالیسیا در شمال غربی اسپانیا استفاده کرد و مدل توم را به‌عنوان بهترین مدل تخمین‌گر ارتفاع‌آن توده نتیجه‌گیری کردند. لامبرس و همکاران (Lumbres et al., 2011)، ۶ مدل قطر- ارتفاع را برای سه گونه کاج و یک‌گونه لاریکس در کره‌جنوبی توسعه و اعتبارسنجی کردند و نشان دادند که مدل‌های اصلاح شده لجستیک ولوندکویست/کرف نسبت به سایر مدل‌ها بر اساس تجزیه و تحلیل رتبه عملکرد بهتری داشتند. به‌منظور تعیین مناسب‌ترین رابطه بین قطر و ارتفاع برای گونه دست‌کاشت پیسهآ در کلاردشت (در شمال ایران)، فلاح (Fallah, 2009) ۱۷ مدل غیرخطی را مورد مطالعه قرارداد و رضایت بخش‌ترین مدل را بر اساس خطای MS و R^2 تعیین کرد. لیو و همکاران (Liu et al.,

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

2017) برای ۵۵۰۳ درخت سکویای چینی ۷ مدل خطی و ۴۶ مدل غیرخطی قطر- ارتفاع را مورد برازش قراردادند. ایشان مدل‌ها را همچنین به دو دسته ساده و چند متغیره بر اساس تعداد متغیرهای مستقل تقسیم کردند. نتایج نشان داد که معادلات آلومتریک ارتفاع که از متغیر قطر برابرسینه به عنوان متغیر مستقل استفاده کردند، بهتر توانستند تغییرات ارتفاع را مدل‌سازی کنند و همچنین در این مطالعه مدل‌های ترکیبی دقت بالاتری در مقایسه با مدل‌های ساده داشته‌اند. همچنین نتایج این مطالعه حاکی از آن است که برازش مدل‌های قطر- ارتفاع با توجه به نوع منطقه و توده‌های جنگلی، سن، اندازه، گونه، تاج، تراکم توده، کیفیت رویشگاه و موقعیت نسبی درختان و توده‌ها متفاوت می‌باشد. در ایران نیز مطالعات زیادی در راستای برازش مدل‌های قطر- ارتفاع صورت گرفته است، اما اغلب آن‌ها در جنگل‌های طبیعی و ناهم سال متمرکز شده‌اند که از آن جمله می‌توان به نتایج تحقیقات محمدعلی‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) با مدل‌های توزیع وایبول، گاما، نرمال و لگ‌نرمال، محمدعلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) با مدل‌های توزیع نمایی، گاما و لگ نرمال، امان‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) با مدل‌های توزیع‌های وایبول دو و سه پارامتری، بتا، جانسون، نمایی یک و دو پارامتریو واحدی (۱۳۹۳) مانند مدل توانی و نمایی، اشاره کرد.

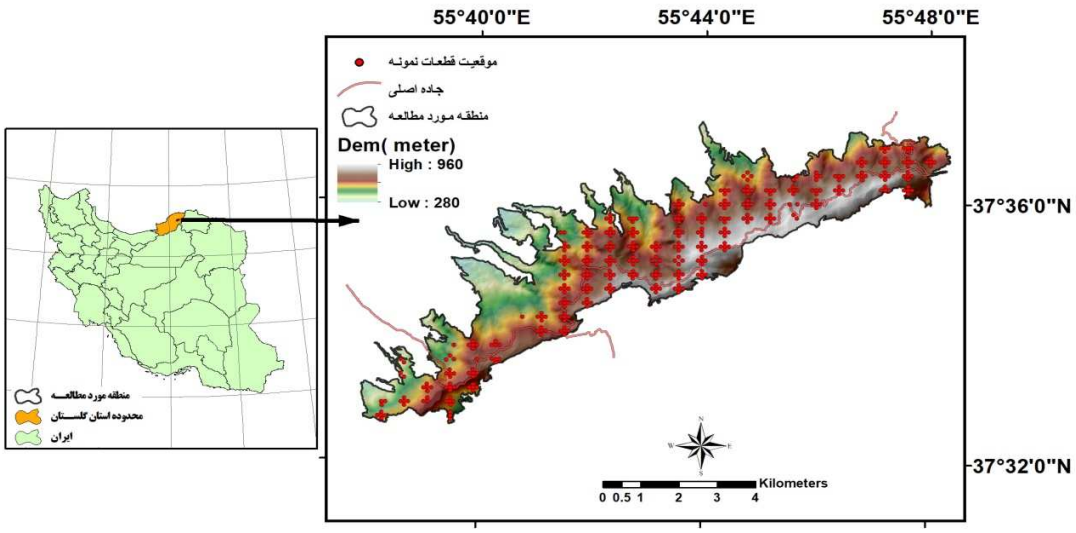
بنابراین تحقیق حاضر با هدف به‌کارگیری مدل‌های مختلف قطر- ارتفاع، به دنبال انتخاب بهترین مدل جهت برآورد ارتفاع درختان توده‌های دست‌کاشت کاج بروسیا (*Pinus brutia*) و زربین (*Cupressussempervirens* var.*horizontalis*) در منطقه عرب داغاستان گلستان است تا با توجه به نتایج به دست آمده از آن در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌های مدیریتی پایدار جنگل‌کاری‌های مناطق مشابه با تیپولوژی یکسان گامی اثرگذار برداشته شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

عرصه جنگل‌کاری عرب داغ در ۴۰ کیلومتری شمال شرق شهر کلاله و در حوزه مدیریتی اداره منابع طبیعی شهرستان کلاله و در محدوده ″۴/۲ ′۳۵ °۵۵ تا ″۵/۹ ′۵۱ °۵۵ طول شرقی و ″۴۶/۱ ′۳۰ °۳۷ تا ″۱۹/۴۳ ′۳۸ °۳۷ عرض شمالی قرارگرفته است (شکل ۱). مساحت این عرصه ۳۵۰۰ هکتار است که از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۹ با گونه‌های زربین، کاج بروسیا، کاج بادامی و سرو نقره‌ای بافاصله کاشت ۳×۳ متر، جنگل‌کاری شده است. از نظر زمین‌شناسی عرصه جنگل‌کاری عرب‌داغ، از نهشته‌های رسوبی لسی تشکیل‌شده است. عرصه مورد نظر در دامنه ارتفاعی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریا قرارگرفته است. متوسط بارندگی منطقه ۵۳۶/۸ میلی‌متر و متوسط دمای ماهیانه ۱۶/۹ درجه سانتی‌گراد و نوع اقلیم منطقه بر اساس ضریب خشکی دومارتن

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]



شکل ۱- موقعیت منطقه موردمطالعه در ایران و استان گلستان و موقعیت قطعات نمونه

نیمه‌خشک و بر اساس کلیموگرام آمبرژه نیمه‌خشک سرد است (اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان)

نمونه‌برداری و جمع‌آوری اطلاعات

داده‌های مورداستفاده برای مدل‌سازی ارتباط قطر و ارتفاع در سال ۱۳۹۷ با استفاده از یک شبکه آماربرداری خوشه‌ای سیستماتیک (هر خوشه ۵ پلات) بافاصله خوشه‌ها ۴۰۰×۶۰۰ متر و فاصله پلات‌ها در هر خوشه ۱۰۰ متر جمع‌آوری شد. در مجموع برای گونه‌های زربین و کاج بروسیا به ترتیب ۱۱۴ و ۹۸قطعه‌نمونه دایره‌ای شکل به‌مساحت ۴۰۰ مترمربع در بازهٔ ارتفاعی منطقه با در نظر گرفتن وضعیت توپوگرافی، پیاده شد که به ترتیب ۳۸۹ و ۲۹۹ جفت مشاهده قطر- ارتفاع برای زربین و کاج بروسیا را شامل می‌شد. همچنین مختصات مرکز پلات‌ها با DGPS ثبت شد (شکل ۱). در تمام قطعات نمونه، مشخصه‌های گونه، قطر برابرسینه تمام درختان زربین و بروسیا با قطر برابر سینه بیشتر از ۷/۵ سانتی‌متر با کالیپر و ارتفاع ۳ تا ۴ درخت (نزدیک‌ترین به مرکز پلات، قطورترین و شاهد) با استفاده از Vertex IV اندازه‌گیری و ثبت شد.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

روش تحلیل

آنالیز اولیه داده‌های کمی قطر و ارتفاع ازطریق آماره‌های توصیفی این داده‌ها انجام شد. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها و شناسایی داده‌های پرت به ترتیب از آزمون کولموگروف–اسمیرنوف و نمودار جعبه‌ای و پراکنش باقیمانده‌ها استفاده شد. در این پژوهش برای محاسبات و پردازش داده‌های صحرایی قطر و ارتفاع و همچنین اجرای مدل‌های رگرسیونی غیرخطی از نرم‌افزارهای SPSS، R و Excel استفاده شد. از کل درختان اندازه-گیری‌شده، ۷۵ درصد در فرآیند مدل‌سازی و ۲۵ درصد برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی به کار گرفته شد. سپس با استفاده از ۲۰ مدل رگرسیونی غیرخطی، ارتباط بین ارتفاع به‌عنوان متغیر وابسته و قطر به‌عنوان متغیر مستقل برای دو گونه زربین و کاج بروسیا به‌طور جداگانه در منطقه عرب داغ بررسی و تجزیه و تحلیل شد(جدول ۱).

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

جدول ۱ -مدل‌های قطر - ارتفاع مورداستفاده در پژوهشپیش‌رو

ردیف	مدل	فرمول مدل
۱	پرودان	$h(d) = bh + \frac{d^2}{a + bd + cd^2}$
۲	توان	$h(d) = bh + ad^b$
۳	چاپمن _ریچاردز	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd})^c$
۴	راتکوفسکی	$h(d) = bh + a\ exp\left(\frac{-b}{d + c}\right)$
۵	سیبسن	$h(d) = bh + ad^{bd^{-c}}$
۶	کرف	$h(d) = bh + a\ exp(-bd^{-c})$
۷	کورتیس	$h(d) = bh + a\left(\frac{d}{1 + d}\right)^b$
۸	گومپرز	$h(d) = bh + a\ exp\left(-bexp(-cd)\right)$
۹	لجستیک	$h(d) = bh + \frac{a}{1 + be^{-cd}}$
۱۰	مایر	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd})$
۱۱	میکاییل_منتن	$h(d) = bh + \frac{ad}{b + d}$
۱۲	میکاییل_منتن ۲	$h(d) = bh + \frac{d}{a + b * d}$
۱۳	میکایلوف	$h(d) = bh + ae^{-bd^{-1}}$
۱۴	ناسلاند	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(a + bd)^2}$
۱۵	ناسلاند ۲	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(a + e^b d)^2}$
۱۶	ناسلاند ۳	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(e^a + bd)^2}$
۱۷	ناسلاند ۴	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(e^a + e^b d)^2}$
۱۸	هاوسفلد ۴	$h(d) = bh + \frac{a}{1 + \frac{1}{bd^c}}$
۱۹	وایبول	$h(d) = bh + a\left(1 - e^{-bd^c}\right)$
۲۰	وایکف	$h(d) = bh + \exp\left(a + \frac{b}{d+1}\right)$

d قطر برابرسینه برحسب سانتی‌متر، bh عدد ثابت برابر ۱/۳۰ وa، b و cضریب‌های مدل

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

در پژوهش پیش‌رو به‌منظور ارزیابی و برازش مدل‌ها، ۲۵ درصد از داده‌ها (۹۷ درختبرای زربین و ۷۴ درخت برای گونه کاج بروسیا) به‌صورت تصادفی به‌عنوان مجموعه داده‌های آزمون و ارزیابی از کلیه آنالیزها کنارگذاشته شدند و با در اختیار داشتن مقادیر برآوردی ($\bar{y}_i$) ومقادیر واقعی (y_i) با استفاده از معیارهای آماری ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطای مطلق و نسبی (RMSE٪) اعتبار مدل‌های آماری ارزیابی شد (روابط ۱تا۳).

رابطه ۱

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

رابطه ۲

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

رابطه ۳

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100$$

به‌طوری‌که n تعداد نمونه ارزیابی، ($\bar{y}_i$) مقادیر برآوردی و (y_i) مقادیر واقعی بود. همچنین علاوه‌بر معیارهای مذکور،تفاوت‌های بین مقادیر واقعی ارتفاع با مقادیر برآوردشده داده‌های آزمون با استفاده از داده‌ها و مدل‌های مذکور نیز مورد مقایسه قرار گرفت. برای بررسی معنی‌دار بودن میانگین تفاوت‌های مقادیر واقعی با مقادیر برآوردشده با استفاده از مدل‌های مذکور، از آزمون تی جفتی استفاده شد.

نتایج

بررسی آماره‌های توصیفی قطر برابرسینه و ارتفاع کل درختان

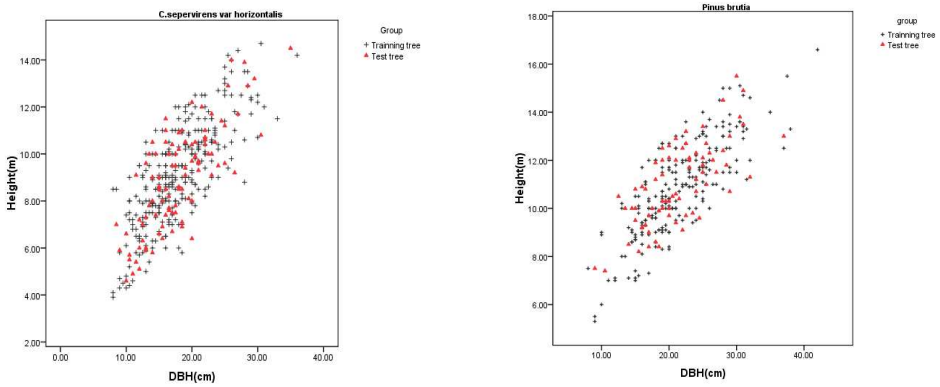
کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار دو گونه کاج بروسیا و زربین به ترتیب برای قطر برابرسینه۸، ۴۲، ۲۱/۴ و ۵/۶ سانتی‌متر و ۸، ۳۶، ۱۷/۹۵ و ۵/۱ سانتی‌متر و برای ارتفاع ۱۰/۱۶،۸۸/۵،۶/۳۰ و ۱/۸۶ متر و ۳/۹۰، ۱۴/۷، ۹/۱۲ و ۲/۱۱ متر بود. جدول ۲ آماره‌های توصیفی داده‌های آموزشی و آزمون دو گونه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

جدول ۲- آماره‌های توصیفی قطر برابرسینه و ارتفاع داده‌های آموزشی و آزمون دو گونه کاج بروسیا و زربین

نام گونه	نوع داده	تعداد درخت	قطر (سانتی‌متر)				ارتفاع (متر)			
			میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار
زربین	مدل	۲۹۲	۱/۹۲۷	۸	۳۶	۵/۱	۹/۱۶	۳/۹	۱۴/۷	۲/۱
	آزمون	۹۷	۱/۰۲۸	۸/۵	۳۵	۵/۱۵	۹	۴/۶	۱۴/۵	۲/۱۷
کاج بروسیا	مدل	۲۲۵	۲/۴۲۱	۸	۴۲	۵/۶۸	۱/۸۳۰	۵/۳	۱۶/۶	۱/۹۱
	آزمون	۷۴	۲/۳۵۱	۹	۳۷	۵/۴	۱/۰۱۱	۷/۴	۱۵/۵	۱/۷

مشخصه‌های قطر و ارتفاع دو گونه کاج بروسیا و زربین با توجه به بررسی پراکنش داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کردند. شکل ۲ ابر نقاط هر دو گونه (ارتفاع در برابر قطر) را به صورت مجزا برای داده‌های آموزش و آزمون ارائه می‌دهد. جدول ۳ ضریب‌های به دست آمده از نتایج برازش مدل‌های رگرسیونی دو گونه مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار ابر نقاط داده‌های مدل و آزمون دو گونه زربین (چپ) و کاج بروسیا (راست). نقاط سیاه نشان‌دهنده داده‌های آموزشی و نقاط قرمز برای داده‌های آزمون هستند.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

جدول ۳- ضرایب حاصله از مدل‌های رگرسیونی

ردیف	مدل	فرمول مدل	ضریب‌های مدل (زربین)			ضریب‌های مدل (بروسیا)		
			a	B	c	a	b	c
۱	پرودان	$h(d) = bh + \frac{d^2}{a + bd + cd^2}$	۳۷/۴	۱/۳۰	۰/۰۴	-۱/۳۰	۱/۵۲	۰/۰۴
۲	توان	$h(d) = bh + ad^b$	۰/۸۳	۰/۷۸	-	۱/۳۹	۰/۶۳	-
۳	چاپمن ـریچارد	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd})^c$	۱۶/۶۸	۰/۰۴	۱/۱۲	۱۶/۳۸	۰/۰۴	۰/۹۶
۴	راتکوفسکی	$h(d) = bh + a\ exp\left(\frac{-b}{d + c}\right)$	۲۰/۶۵	۲۱/۹۵	۵/۰۰	۱۹/۹۵	۱۹/۱۴	۵/۰۰
۵	سیبسن	$h(d) = bh + ad^{bd^{-c}}$	۰/۵۰	۱/۱۲	۰/۰۶	۰/۵۰	۱/۳۹	۰/۱۲
۶	کرف	$h(d) = bh + a\ exp(-bd^{-c})$	۱۷/۲۴	۱۱/۶۰	۰/۹۵	۱۹/۸۹	۸/۸۰	۰/۸۲
۷	کورتیس	$h(d) = bh + a\left(\frac{d}{1 + d}\right)^b$	۱۶/۹۰	۱۰/۹۱	-	۱۷/۶۶	۱۰/۲۹	-
۸	گومپرز	$h(d) = bh + a\ exp\left(-bexp(-cd)\right)$	۱۷/۴۲	۲/۰۵	۰/۰۵	۱۹/۸۹	۱/۷۲	۰/۰۴
۹	لجستیک	$h(d) = bh + \frac{a}{1 + be^{-cd}}$	۱۷/۴۲	۴/۹۷	۰/۰۸	۱۹/۸۹	۳/۶۷	۰/۰۶
۱۰	مایر	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd})$	۱۷/۴۲	۰/۰۴	-	۱۹/۸۹	۰/۰۳	-
۱۱	میکاییل_منتن	$h(d) = bh + \frac{ad}{b + d}$	۳۴/۳۴	۶۶/۵۵	-	۲۵/۳۰	۳۵/۳۰	-
۱۲	میکاییل_منتن ۲	$h(d) = bh + \frac{d}{a + b * d}$	۱/۸۳	۰/۰۳	-	۱/۴۰	۰/۰۴	-
۱۳	میکایلوف	$h(d) = bh + ae^{-bd^{-1}}$	۱۵/۸۹	۱۲/۲۶	-	۱۶/۴۱	۱۱/۲۰	-
۱۴	ناسلاند	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(a + bd)^2}$	۲/۴۴	۰/۲۲	-	۲/۱۰	۰/۲۲	-
۱۵	ناسلاند ۲	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(a + e^b d)^2}$	۲/۴۴	-۱/۵۱	-	۲/۱۰	-۱/۵۰	-

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

ادامه جدول ۳

ردیف	مدل	فرمول مدل	ضریب‌های مدل (زربین)			ضریب‌های مدل (بروسیا)		
			a	B	c	a	b	c
۱۶	ناسلاند ۳	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(e^a + bd)^2}$	۰/۸۹	۰/۲۲	-	۰/۷۴	۰/۲۲	-
۱۷	ناسلاند ۴	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(e^a + e^b d)^2}$	۰/۸۹	-۱/۵۱	-	۰/۷۴	-۱/۵۰	-
۱۸	هاوسفلد ۴	$h(d) = bh + \frac{a}{1 + \frac{1}{bd^c}}$	۱۷/۴۲	۰/۰۲	۱/۳۸	۱۹/۸۹	۰/۰۳	۱/۱۸
۱۹	وایبول	$h(d) = bh + a\left(1 - e^{-bd^c}\right)$	۱۷/۴۲	۰/۰۳	۱/۰۵	۱۹/۸۹	۰/۰۵	۰/۸۷
۲۰	وایکف	$h(d)=bh+\exp\left(a + \frac{b}{d+1}\right)$	۲/۷۷	-۱۲/۲۶	-	۲/۸۰	-۱۱/۲۰	-

نتایج ارزیابی نشان داد که درصد جذر میانگین مربعات خطای اکثر مدل‌های رگرسیونی برازش شده برای گونه زربین با ضریب تبیین ۰/۵۹ و کاج بروسیا با ضریب تبیین ۰/۵۱ به ترتیب در بازه ۱۵ تا ۱۶ و ۱۱-۱۲ قرار دارد(جدول ۴). لازم به‌ذکر است که نتایج مدل‌ها، تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند. همچنین نتایج نشان داد که میانگین باقیمانده‌های تمام مدل‌های رگرسیونی مورد بحث تقریباً نزدیک صفر و از توزیع نرمال تبعیت می‌کردند. به‌طورکلی تفاوت بین مقادیر برآوردشده همه مدل‌ها با مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار نبود.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

جدول ۴- مقادیر آماره‌های درصد جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین برای مشخصه ارتفاع با استفاده از ۲۰ مدل انتخاب‌شده

ردیف	مدل	فرمول مدل	زربین		بروسیا	
			R^2	RMSE٪	R^2	RMSE٪
۱	پرودان	$h(d)=bh+\frac{d^2}{a+bd+cd^2}$	۰/۵۹۳	۱۵/۳۵۸	۰/۵۱۴	۱۱/۳۸۷
۲	توان	$h(d)=bh+ad^b$	۰/۵۹۴	۱۵/۳۴۰	۰/۵۱۳	۱۱/۳۰۲
۳	چاپمن-ریچاردز	$h(d)=bh+a(1-e^{-bd})^c$	۰/۵۹۳	۱۵/۳۶۰	۰/۵۱۴	۱۲/۲۰۲
۴	راتکوفسکی	$h(d)=bh+a\,exp\left(\frac{-b}{d+c}\right)$	۰/۵۹۱	۱۵/۳۹۳	۰/۵۱۲	۱۱/۱۸۷
۵	سیبسن	$h(d)=bh+ad^{bd^{-c}}$	۰/۵۹۵	۱۵/۳۲۳	۰/۵۱۴	۱۱/۲۸۵
۶	کرف	$h(d)=bh+a\,exp(-bd^{-c})$	۰/۵۸۳	۱۵/۷۳۹	۰/۵۰۸	۱۱/۱۷۶
۷	کورتیس	$h(d)=bh+a\left(\frac{d}{1+d}\right)^b$	۰/۵۸۷	۲۱/۹۴۲	۰/۵۰۱	۱۴/۶۰۴
۸	گومپرز	$h(d)=bh+a\,exp(-bexp(-cd))$	۰/۵۹۳	۱۵/۵۲۳	۰/۵۱۲	۱۱/۰۹۲
۹	لجستیک	$h(d)=bh+\frac{a}{1+be^{-cd}}$	۰/۵۹۰	۱۵/۴۹۱	۰/۵۰۸	۱۱/۲۱۸
۱۰	مایر	$h(d)=bh+a(1-e^{-bd})$	۰/۵۹۳	۱۵/۷۱۴	۰/۵۱۴	۱۱/۷۳۶
۱۱	میکاییل_منتن	$h(d)=bh+\frac{ad}{b+d}$	۰/۵۹۵	۱۵/۳۲۳	۰/۵۱۴	۱۱/۴۰۱
۱۲	میکاییل_منتن ۲	$h(d)=bh+\frac{d}{a+b*d}$	۰/۵۴۵	۶۹/۵۳۳	۰/۵۱۴	۱۱/۴۰۱
۱۳	میکایلوف	$h(d)=bh+ae^{-bd^{-1}}$	۰/۵۸۰	۱۵/۶۳۰	۰/۵۰۲	۱۱/۱۸۵
۱۴	ناسلاند	$h(d)=bh+\frac{d^2}{(a+bd)^2}$	۰/۵۹۱	۱۵/۳۸۱	۰/۵۱۱	۱۱/۳۷۵
۱۵	ناسلاند ۲	$h(d)=bh+\frac{d^2}{(a+e^bd)^2}$	۰/۵۹۱	۱۵/۳۸۱	۰/۵۱۱	۱۱/۳۷۵
۱۶	ناسلاند ۳	$h(d)=bh+\frac{d^2}{(e^a+bd)^2}$	۰/۵۹۱	۱۵/۳۸۱	۰/۵۱۱	۱۱/۳۷۵
۱۷	ناسلاند ۴	$h(d)=bh+\frac{d^2}{(e^a+e^bd)^2}$	۰/۵۹۱	۱۵/۳۸۱	۰/۵۱۱	۱۱/۳۷۵
۱۸	هاوسفلد ۴	$h(d)=bh+\frac{a}{1+\frac{1}{bd^c}}$	۰/۵۸۵	۲۲/۸۶۵	۰/۵۱۰	۱۵/۱۸۴
۱۹	وایبول	$h(d)=bh+a\left(1-e^{-bd^c}\right)$	۰/۵۹۳	۱۵/۳۹۱	۰/۵۱۴	۱۱/۱۷۷
۲۰	وایکف	$h(d)=bh+\exp\left(a+\frac{b}{d+1}\right)$	۰/۵۸۱	۱۸/۷۵۵	۰/۵۰۳	۱۶/۰۰۱

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که منطقه مورد مطالعه یک عرصه دست‌کاشت سوزنی‌برگ است که در سن بهره‌برداری قرار دارد و مانند سایر مناطق دست‌کاشت فاقد طرح پرورشی است. لذا آماربرداری از این جنگل‌ها به‌منظور کسب اطلاعات دقیق و به‌هنگام، به‌خصوص ارزیابی قابل اطمینان ارتفاع به‌عنوان یک متغیر پایه برای برآورد سایر متغیرهای توده، به‌منظور هرگونه برنامه‌ریزی حفاظتی و مدیریت منابع جنگلی امری اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود.

بررسی نتایج تجزیه‌وتحلیل آماره‌های توصیفی اطلاعات زمینی قطر برابرسینه (۸ تا ۴۲ سانتی‌متر) و ارتفاع (۳/۹ تا ۱۶/۶ متر) حاکی از آن بود که این داده‌ها واریانس و دامنه تغییرات زیادی در منطقه عرب داغ داشتند. این یافته ازیک‌طرف حاکی از آن است که فراوانی قطعات نمونه مناسب بوده، انتخاب و پراکنش قطعات نمونه در منطقه به‌خوبی صورت گرفته و قطعات نمونه تقریباً تمامی قطر و ارتفاع درختان را دربرگرفته است. از طرف دیگر، هم‌زمان نبودن زمان کاشت پایه‌ها، کیفیت متفاوت رویشگاه بر اساس فاکتورهای مختلف و دخالت‌های مدیریتی پراکنده، می‌توانند از دلایل دیگر این امر باشند. وارگاس لارتا و همکاران (Vargas-Larreta et al., 2009) در مکزیک و لیو و همکارانش (Liu et al., 2017) در چین به تأثیرگذاری این فاکتورها در تغییرات دامنه قطر و ارتفاع اشاره کرده‌اند. بر اساس یافتهٔ به‌دست‌آمده می‌توان بیان نمود، وضعیت متفاوت ساختار توده جنگلیدر منطقه موردمطالعه می‌تواند ناشی از موارد مختلفی مانند ساختار نسبتاً ناهمسال توده (اختلاف سنی پایه‌ها تا ۵ سال هم می‌رسد)، متأثر بودن منطقه از مخاطرات طبیعی مانند آتش‌سوزی، برف و باد افتادگی، مسائل اقتصادی و اجتماعی حاکم در منطقه و شیوه معیشت مردم محلی باشد؛ بنابراین توصیف موارد فوق‌الذکر اهمیت این تحقیق و بالتبع تهیه برنامه‌های دخالت پرورشی را در چنین توده‌هایی دوچندان می‌کند.

نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز و مدل‌سازی رابطه قطر-ارتفاع با استفاده از ۲۰ مدل رگرسیونی غیرخطی نشان داد که مدل‌های رگرسیونی غیرخطی سیبسن، میکاییل- منتن، توانی، پرودان و چاپمن- ریچارد برای گونه زربین با ضریب تبیین ۰/۵۹ و درصد جذر میانگین مربعات خطای به‌ترتیب ۱۵/۲۳، ۱۵/۳۲، ۱۵/۳۴، ۱۵/۳۵ و ۱۵/۳۶ و مدل‌های رگرسیونی غیرخطی گومپرز، کرف، وایبول، میکایلوف و راتکوفسکی برای گونه کاج بروسیا با ضریب تبیین تقریباً ۰/۵۱ و درصد جذر میانگین مربعات خطای به‌ترتیب ۱۱/۰۹، ۱۱/۱۷، ۱۱/۱۷، ۱۱/۱۸ و ۱۱/۳۸ بهتر توانستند ارتفاع درختان را برآورد کنند. به‌طورکلی نتایج به‌دست‌آمده از معیارهای ارزیابی درصد جذر میانگین مربعات خطا و انحراف معیار تفاوت‌های مقادیر برآوردشده با مقادیر واقعی تفاوت

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

زیادی با یکدیگر نداشتند و ازنظر آماری نیز تفاوت معنی‌داری بین مقادیر برآوردشده با استفاده از مدل‌های مختلف با مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۹ درصد وجود نداشت و پنج مدل ذکرشده دارای بالاترین مقدار ضریب تبیین بودند. همچنین عدم چولگی هیستوگرام باقیمانده‌ها، میانگین به‌طور تقریبصفر باقیمانده‌ها، توزیع نرمال و پراکنش یکنواخت در دو سوی محور صفر مؤید تناسب مدل‌های رگرسیونی باداده‌ها بود. بهترین مدل‌های پیشنهادی این تحقیق با نتایج برخی مطالعات از جمله (Zhang, 1997; Petráš et al., 2014) همخوان بوده است. به‌طوری‌کهلامبرس و همکاران (Lumbres et al., 2011) در کره جنوبی ضمن تأیید یافته به‌دست‌آمده، به این نتیجه رسیدند که مدل کرف نسبت به سایر مدل‌ها مورد بررسی، در برآورد متغیر ارتفاع سوزنی‌برگان عملکرد بهتری را نشان داده است. از طرفی دیگر یافته‌های حاصل تحقیق حاضر با نتایج برخی از مطالعات مانند (Mehtätalo et al., 2015) همسو نبوده است. همچنین درصد جذر میانگین مربعات خطای به‌دست‌آمده در این پژوهش برای گونه کاج بروسیا در مقایسه با مطالعات دیگر تفاوت زیادی نداشت (محمدی و شتایی، ۱۳۹۵؛ عالمی و همکاران، ۱۳۹۷). درنهایت می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های رگرسیونی غیرخطی گومپرز، کرف، وایبول، میکایلوف و راتکوفسکی برای گونه کاج بروسیا و مدل‌های رگرسیونی غیرخطی سیبسن، میکاییل- منتن، توانی، پرودان و چاپمن- ریچارد برای گونه زربین، با توجه به این‌که اختلاف جذر میانگین مربعات خطا در ۸۰ درصد مدل‌ها کمتر از یک درصد بوده است؛ توانایی خوبی در تخمین ارتفاع درختان باقیمانده داشتند. بنابراین این مدل‌ها می‌توانند در برآورد ارتفاع درختان سوزنی‌برگ زربین و کاج بروسیا درصورت تکرار در قالب طرح‌های تجدید نظر، تهیه طرح‌های پرورشی پایه که در اکثر عرصه‌های جنگل‌کاری اتفاق نیفتاده است و یا دیگر مطالعات و برنامه‌ریزی‌ها مرتبط مورد استفاده قرار بگیرد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌های انجام‌شده نشان داد که اختلاف درصد جذر میانگین مربعات خطا و انحراف معیار تفاوت‌های به‌دست‌آمده برای ارتفاع زیاد است. این موضوع علاوه بر نوع توده (پهن‌برگ یا سوزنی‌برگ) به عواملی مانند ناهمسال یا همسال بودن، منظم یا نامنظم بودن، نوع و شدت دخالت‌ها و مدیریت‌ها، نوع مدل، ساده یا مرکب بودن توابع، نوع و تعداد متغیرهای مستقل، شدت تأثیر آشفتگی‌های طبیعی و انسانی و همچنین به نوع الگوریتم‌ها و غیره بستگی دارد (محمدی و شتایی، ۱۳۹۵)؛ بنابراین نتایج چنین مطالعاتی می‌تواند برای مدیرانجنگل در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی به‌خصوص برای مناطق وسیع جنگل‌کاری شده در سطح کشور که در بیش از پنج دهه اتفاق افتاده و تاکنون مطالعات و دخالت‌های جدی و هدفمند در آن‌ها انجام نشده است، بسیار مفید باشند.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

منابع

اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان. ۱۳۹۵. کتابچه طرح پرورشی حوزه عرب داغ، شهرستان کلاله.

امان‌زاده، ب.، ثاقب طالبی، خ.، فدایی خشک بیجاری، ف.، خانجانی شیراز، ب.، همتی، ا. ۱۳۹۰. ارزیابی توزیع‌های مختلف آماری در برآورد پراکنش تعداد در طبقات قطری توده‌های راش شفارود در مراحل مختلف تحولی جنگل. فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر، ۱۹(۲):

عالمی، ا.،اولادی، ج.، فلاح، ا.، مقصودی، ی. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل‌های غیرخطی قطر-ارتفاع گونه توسکا در جنگل‌های هیرکانی (مطالعه موردی: جنگل رضاییان). مجله اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۹(۲): ۱۲-۱.

محمدعلی‌زاده، خ.، زبیری، م.، نمیرانیان، م.، هورفر، ع.، مروی مهاجر، م.ر. ۱۳۸۸. برازش توزیع فراوانی قطر برابر سینه با به کارگیری برخی مدل‌های (توزیع‌های) آماری (مطالعه موردی: جنگل خیرودکنار- نوشهر). فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۷(۱):۱۲۴-۱۱۶.

محمدعلی‌زاده، خ.، نمیرانیان، م.، زبیری، م.، هورفر، ع.، مروی مهاجر، م.ر. ۱۳۹۲. مدل‌سازی توزیع فراوانی ارتفاع درختان در توده‌های ناهمسال (مطالعهٔ موردی: بخش گرازبن جنگل خیرود). نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۶۶(۲): ۱۶۵-۱۵۵.

محمدی، ج.، شتایی جویباری، ش. ۱۳۹۵. بررسی مدل‌های مختلف قطر- ارتفاع ممرز (*Carpinus betulus* L.) در توده‌های جنگلی ناهمسال شصت‌کلاته گرگان. مجله تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۴(۴): ۷۱۲-۷۰۰.

واحدی، ع.ا. ۱۳۹۳. تب‌یی‌ن مدل‌های محاسبات‌ی و به‌ی‌نه زی‌توده تنه ممرز (*Carpinus betulus* L.) با استفاده از معادلات آلومتریک در جنگل‌های هیرکانی. فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۲(۲): ۲۲۵-۲۳۶.

Ahmadi, K., Alavi S.J., Kouchaksaraei, M.T., Aertsen, W. 2013. Non-linear height-diameter models for oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Hyrcanian forests, Iran. Biotechnology, Agronomy, Society and Environment, 17: 431-440.

Dorado, F.C., Dieguez-Aranda, U., Rodriguez, M.S., Sanchez, M., Gadow, K.V. 2006. A generalized height-diameter model including random components for radiata pine plantations in northwestern Spain. Forest Ecology and Management, 229: 202-213.

Fallah, A. 2009. Determination of the best diameter-height model for the Norway spruce (*Picea abies* [L.] H.Karst.) in Kelardasht afforestation (North of Iran). J.Appl.Sci., 9: 3870-3875.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

Gadow, K.V., Real, P., AlvarezGonzalez, J.G. 2001. Modelizacion del crecimiento y la evolucion de los bosques. IUFRO World Series, Vol. 12, Vienna, 21p.

Gao, X., Li, Z., Yu, H., Jiang, Z., Wang, C., Zhang, Y., Shi, L. 2016. Modeling of the height–diameter relationship using an allometric equation model: a case study of stands of *Phyllostachys edulis*. Journal of forestry research, 27(2): 339-347.

Inoue, A., Yoshida, S. 2004. Allometric model of the height-diameter curve for even-aged pure stands of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*). J For Res, 9: 325-331.

Johansson, T. 2012. Site index curves for young hybrid larch growing on former farmland in Sweden. Forests, 3:723-735.

Krisnawati, H., Wang, Y., Ades, P.K. 2010. Generalized height-diameter model for Acacia mangium Willd. plantations in South Sumatra. J.For. Res., 7:1-19.

Lei, X., Peng, C., Wang, H.Zhou, X. 2009. Individual height-diameter models for young black spruce (*Picea mariana*) and jack pine (*Pinus banksiana*) plantations in New Brunswick, Canada. Forest. Chron, 85: 43-56.

Liu, M., Feng, Z., Zhang, Z., Ma, C., Wang, M., Lian, B.L., Zhang, L. 2017. Development and evaluation of height diameter at breast models for native Chinese Metasequoia. PloS one, 12(8): e0182170.

Lumbres, R. I. C., Lee, Y. J., Seo, Y. O., Kim, S. H., Choi, J. K., Lee, W. K. 2011. Development and validation of nonlinear height–DBH models for major coniferous tree species in Korea. Forest Science and Technology, 7(3): 117-125.

Mehtätalo, L., de-Miguel, S., Gregoire, T.G. 2015. Modeling height-diameter curves for prediction. Canadian Journal of Forest Research, 45(7): 826-837.

Özçelik, R., Diamantopoulou, M.J., CrecenteCampo, F., Eler, F. 2013. Estimating Crimean juniper tree height using nonlinear regression and artificial neural network models. Forest Ecology and Management, 306: 52-60.

Parresol, B.R. 1992. Bald cypress height diameter equations and their prediction confidence intervals. Canadian Journal of Forest Research, 22(9): 1429-1434.

Petráš, R., Bošeľa, M., Mecko, J., Oszlányi, J., Popa, I. 2014. Height-diameter models for mixed-species forests consisting of spruce, fir, and beech. Folia ForestaliaPolonica, 56(2): 93-104.

Robinson, A.P., Wykoff, W.R. 2004. Imputing missing height measures using a mixed-effects modeling strategy. Can.J.For. Res., 34: 2492-2500.

Sánchez, C.A.L., Varela, J.G., Dorado, F.C., Alboreca, A.R., Soalleiro, R.R., González, J.G.Á. 2003. A height-diameter model for Pinus radiata D. Don in Galicia (Northwest Spain). Ann.For. Sci., 60: 237-245.

Stark, H., Nothdurft, A., Bauhus, J. 2009. Allometries for widely spaced Populus ssp. and Betula ssp. in nurse crop systems. Forests, 4:1003-1031.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]

Staudhammer, C., LeMay, V. 2000. Height prediction equations using diameter and stand density measures. Forest. Chron., 76: 303-309.

Vargas-Larreta, B., Dorado, F.C., LvarezGonzalez, G.J., Barrio-Anta, M., CruzCobos, F. 2009. A generalized height-diameter model with random coefficients for uneven aged stands in El Salto, Durango (Mexico). Forestry, 82: 445-462.

Yuancai, L., Parresol, B.R. 2001. Remarks on height-diameter modeling. Research Note SE-10, USDA, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, USA, 8p.

Zang, H., Lei, X., Zeng, W. 2016. Height–diameter equations for larch plantations in northern and northeastern China: a comparison of the mixed-effects, quintiles regression and generalized additive models. Forestry: An International Journal of Forest Research, 89(4): 434-445.

Zhang, L. 1997. Cross-validation of non-linear growth functions for modeling tree height–diameter relationships .Annals of Botany, 79(3): 251-257.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-03]