



دانشگاه گنبد کاووس
نشریه "حفاظت زیست بوم گیاهان"
دوره هشتم، شماره هفدهم
<http://pec.gonbad.ac.ir>

علمی-پژوهشی

ارزیابی مدل‌های غیر خطی قطر-ارتفاع دو گونه مهم سوزنی‌برگ دست‌کاشت کاج بروسیا و زربین (مطالعه موردی: حوزه عرب داغ)

علی مستوری^۱، شعبان شتایی^{۲*}، محمدهادی معیری^۳، خسرو ثاقب طالبی^۴

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

^۲ استاد گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

^۳ دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

^۴ استاد پژوهشی موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۵

چکیده

شناخت ارتباط بین ارتفاع درخت (H) و قطر در ارتفاع برابر سینه (D) برای برنامه‌ریزی جنگل، نظارت، برآورد زیست‌توده و توصیف پویایی توده بسیار مهم است. در این تحقیق ۲۰ مدل مختلف قطر-ارتفاع برای برآورد دقیق ارتفاع درختان همسال دست‌کاشت کاج بروسیا (*Pinus brutia*) و زربین (*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 قطعه نمونه، با استفاده از یک شبکه آماربرداری خوشه‌ای سیستماتیک با فاصله خوشه‌ها ۶۰۰×۴۰۰ متر جمع‌آوری شد. در تمام قطعات نمونه، مشخصه‌های گونه، قطر برابر سینه تمام درختان با قطر بیشتر از ۷/۵ سانتی‌متر و ارتفاع درختان اندازه‌گیری و ثبت شد. در مجموع 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

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^2 در مرحله اعتبارسنجی از ۰/۵۹ 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 سیسن، میکایل-متن، توانی، پرودان و چاپمن-ریچارد برای گونه زربین و مدل‌های گومپرز، کرف، وایبول، میکایلو 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 شتابی، ۱۳۹۵). در استان گلستان حدود ۸۰ هزار هکتار عرصه جنگل کاری 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 قرار داده است، به‌طوری‌که منطقه عرب داغ (مطالعه موردی) هر سال 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 در ارتفاع برابر سینه (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., 2009; Stark et al., 2016). 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

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, 2009; Lei et al., 2009; Robinson and Wykoff, 2004). 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 و تغییرات 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 پیش‌بینی‌کننده برای تخمین ارتفاع کل درخت استفاده شده است (Inoue and Yoshida, 2004). مطالعات زیادی در خارج از کشور در زمینه برآزش مدل‌های قطر-ارتفاع برای گونه‌های سوزنی‌برگ دست‌کاشت انجام شده 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 مدل‌ها را به‌عنوان بهترین مدل تخمین‌گر ارتفاع توده نتیجه‌گیری کردند. لامبرس و همکاران (Lumbres et al., 2011)، ۶ مدل قطر-ارتفاع را برای سه گونه کاج و یک گونه لاریکس در کره جنوبی 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 رضایت‌بخش‌ترین مدل را بر اساس خطای MS و R^2 تعیین کرد. لیو و همکاران (Liu et al., 2009) نیز در مطالعه‌ای مشابه در استان خراسان رضوی، ۱۷ مدل غیرخطی را برای گونه کاج رادیاتا در استان خراسان رضوی، ۱۷ مدل غیرخطی را مورد مطالعه قرار داد و رضایت‌بخش‌ترین مدل را بر اساس خطای MS و R^2 تعیین کرد.

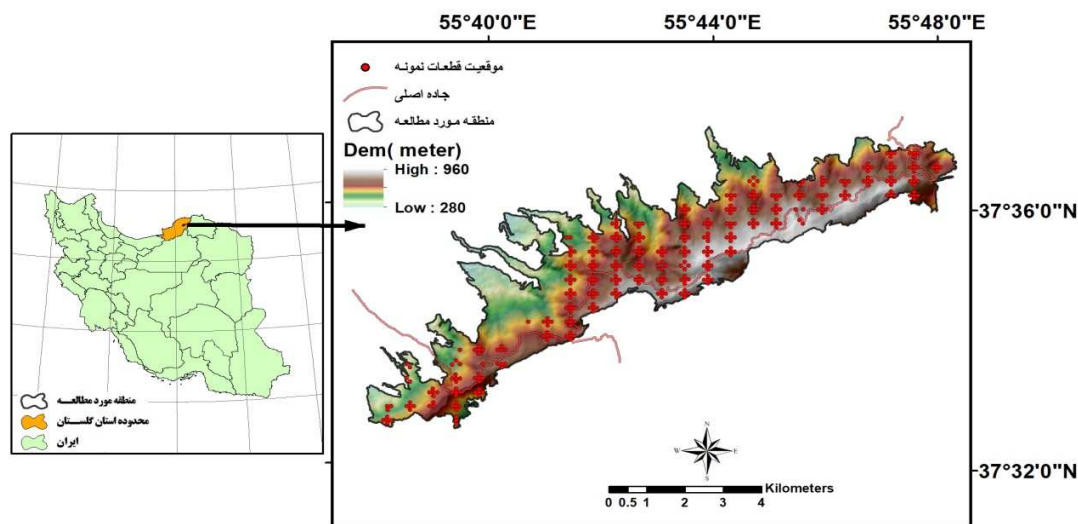
2017) برای ۵۵۰۳ درخت سکویای چینی ۷ مدل خطی و ۴۶ مدل غیرخطی قطر- ارتفاع را مورد برآزش قرار دادند. ایشان مدل‌ها را همچنین به دو دسته ساده و چند متغیره بر اساس تعداد متغیرهای مستقل تقسیم کردند. نتایج نشان داد که معادلات آلومتریک ارتفاع که از متغیر قطر برابرسینه به عنوان متغیر مستقل استفاده کردند، بهتر توانستند 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 برآزش 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 برآزش 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 پارامتری و 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 (*Cupressus sempervirens var. horizontalis*) در منطقه عرب داغستان 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 $37^{\circ}38'19''/43''$ تا $37^{\circ}30'46''/1''$ طول شرقی و $55^{\circ}51'5/9''$ تا $55^{\circ}35'4/2''$ عرض شمالی قرار گرفته 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 تشکیل شده است. عرصه مورد نظر در دامنه ارتفاعی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار گرفته است. متوسط بارندگی منطقه ۵۳۶/۸ میلی‌متر و متوسط دمای ماهیانه ۱۶/۹ درجه سانتی‌گراد و نوع اقلیم منطقه بر اساس ضریب خشکی دومارتن



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

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

نمونه برداری و جمع آوری اطلاعات

داده‌های مورد استفاده برای مدل سازی ارتباط قطر و ارتفاع در سال ۱۳۹۷ با استفاده از یک شبکه آمار برداری خوشه‌ای سیستماتیک (هر خوشه ۵ پلات) با فاصله خوشه‌ها ۶۰۰×۴۰۰ متر و فاصله پلات‌ها در هر خوشه ۱۰۰ متر جمع آوری شد. در مجموع برای گونه‌های زربین و کاج بروسیا به ترتیب ۱۱۴ و ۹۸ قطعه نمونه دایره‌ای شکل به مساحت ۴۰۰ مترمربع در بازه 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 برابر سینه تمام درختان زربین و بروسیا با قطر برابر سینه بیشتر از ۷/۵ سانتی متر با کالیپر و ارتفاع ۳ تا ۴ درخت (نزدیک‌ترین به مرکز پلات، قطورترین و شاهد) با استفاده از Vertex IV اندازه‌گیری و ثبت شد.

روش تحلیل

آنالیز اولیه داده‌های کمی قطر و ارتفاع از طریق 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 اندازه‌گیری شده، 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).

جدول ۱- مدل‌های قطر - ارتفاع مورد استفاده 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	$h(d) = bh + a \exp(-b \exp(-cd))$
۹	لجستیک	$h(d) = bh + \frac{a}{1 + be^{-cd}}$
۱۰	مایر	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd})$
۱۱	میکائیل-منتن	$h(d) = bh + \frac{ad}{b+d}$
۱۲	میکائیل-منتن ۲	$h(d) = bh + \frac{d}{a + b * d}$
۱۳	میکایلوو	$h(d) = bh + ae^{-bd^{-1}}$
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	$h(d) = bh + \frac{a}{1 + \frac{1}{hd^c}}$
۱۹	وایبول	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd^c})$
۲۰	وایکف	$h(d) = bh + \exp\left(a + \frac{b}{d+1}\right)$

d قطر برابر سینه بر حسب سانتی‌متر، bh عدد ثابت برابر ۱/۳۰ و a، b و c ضریب‌های مدل

در پژوهش پیش‌رو به منظور ارزیابی و برازش مدل‌ها، ۲۵ درصد از داده‌ها (۹۷ درخت برای زربین و ۷۴ درخت برای گونه کاج بروسیا) به صورت تصادفی به عنوان مجموعه داده‌های آزمون و ارزیابی از کلیه آنالیزها کنار گذاشته شدند و با در اختیار داشتن مقادیر برآوردی (\bar{Y}_i) و مقادیر 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 ۱ تا ۳).

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

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

به طوری که n تعداد نمونه ارزیابی، (\bar{Y}_i) مقادیر برآوردی و (y_i) مقادیر واقعی بود. همچنین علاوه بر معیارهای مذکور، تفاوت‌های بین مقادیر واقعی ارتفاع با مقادیر برآورد شده داده‌های آزمون با استفاده از داده‌ها و مدل‌های مذکور نیز مورد مقایسه قرار گرفت. برای بررسی معنی‌دار بودن میانگین تفاوت‌های مقادیر واقعی با مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل‌های مذکور، از آزمون تی جفتی استفاده شد.

نتایج

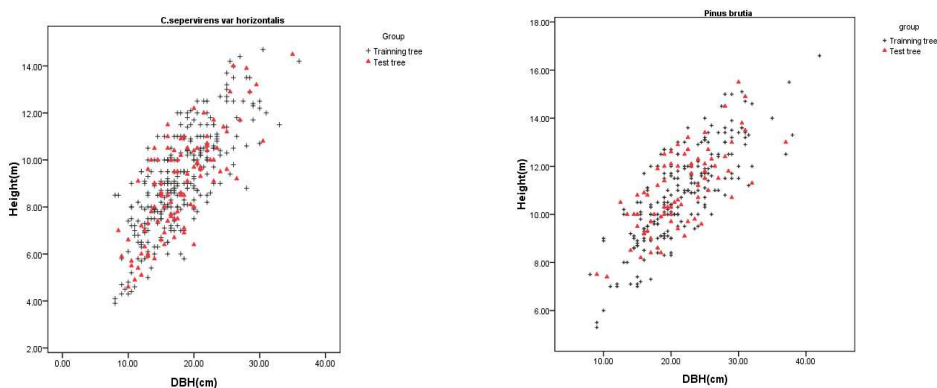
بررسی آماره‌های توصیفی قطر برابر سینه و ارتفاع کل درختان

کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار دو گونه کاج بروسیا و زربین به ترتیب برای قطر برابر سینه ۸، 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.

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	کمی نه	بیشی نه	انحراف معیار	میانگین	کمی نه	بیشی نه	انحراف معیار
زربین	مدل	۲۹۲	۱/۹۲	۸	۳۶	۵/۱	۳/۹	۱۴/۷	۲/۱	
	آزمون	۹۷	۱/۰۲	۸/۵	۳۵	۵/۱۵	۴/۶	۱۴/۵	۲/۱۷	
کاج بروسیا	مدل	۲۲۵	۲/۴۲	۸	۴۲	۵/۶۸	۵/۳	۱۶/۶	۱/۹۱	
	آزمون	۷۴	۲/۳۵	۹	۳۷	۵/۴	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 آموزشی 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.

جدول ۳- ضرایب حاصله از مدل‌های رگرسیونی

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

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	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd^c})$	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 به ذکر 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. به‌طور کلی تفاوت بین مقادیر برآورد شده همه مدل‌ها با مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار نبود.

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

بروسیا		زربین		فرمول مدل	مدل	ردیف
RMSE/%	R ²	RMSE/%	R ²			
۱۱/۳۸۷	۰/۵۱۴	۱۵/۳۵۸	۰/۵۹۳	$h(d) = bh + \frac{d^2}{a + bd + cd^2}$	پرودان	۱
۱۱/۳۰۲	۰/۵۱۳	۱۵/۳۴۰	۰/۵۹۴	$h(d) = bh + ad^b$	توان	۲
۱۲/۲۰۲	۰/۵۱۴	۱۵/۳۶۰	۰/۵۹۳	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd})^c$	چاپمن-ریچاردز	۳
۱۱/۱۸۷	۰/۵۱۲	۱۵/۳۹۳	۰/۵۹۱	$h(d) = bh + a \exp\left(\frac{-b}{d+c}\right)$	راتکوفسکی	۴
۱۱/۲۸۵	۰/۵۱۴	۱۵/۳۲۳	۰/۵۹۵	$h(d) = bh + ad^{bd^{-c}}$	سیبسن	۵
۱۱/۱۷۶	۰/۵۰۸	۱۵/۷۳۹	۰/۵۸۳	$h(d) = bh + a \exp(-bd^{-c})$	کرف	۶
۱۴/۶۰۴	۰/۵۰۱	۲۱/۹۴۲	۰/۵۸۷	$h(d) = bh + a\left(\frac{d}{1+d}\right)^b$	کورتیس	۷
۱۱/۰۹۲	۰/۵۱۲	۱۵/۵۲۳	۰/۵۹۳	$h(d) = bh + a \exp(-b \exp(-cd))$	گومپرز	۸
۱۱/۲۱۸	۰/۵۰۸	۱۵/۴۹۱	۰/۵۹۰	$h(d) = bh + \frac{a}{1 + be^{-cd}}$	لجستیک	۹
۱۱/۷۳۶	۰/۵۱۴	۱۵/۷۱۴	۰/۵۹۳	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd})$	مایر	۱۰
۱۱/۴۰۱	۰/۵۱۴	۱۵/۳۲۳	۰/۵۹۵	$h(d) = bh + \frac{ad}{b+d}$	میکایل-منتن	۱۱
۱۱/۴۰۱	۰/۵۱۴	۶۹/۵۳۳	۰/۵۴۵	$h(d) = bh + \frac{d}{a + b * d}$	میکایل-منتن ۲	۱۲
۱۱/۱۸۵	۰/۵۰۲	۱۵/۶۳۰	۰/۵۸۰	$h(d) = bh + ae^{-bd^{-1}}$	میکایلو	۱۳
۱۱/۳۷۵	۰/۵۱۱	۱۵/۳۸۱	۰/۵۹۱	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(a + bd)^2}$	ناسلاند	۱۴
۱۱/۳۷۵	۰/۵۱۱	۱۵/۳۸۱	۰/۵۹۱	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(a + e^b d)^2}$	ناسلاند ۲	۱۵
۱۱/۳۷۵	۰/۵۱۱	۱۵/۳۸۱	۰/۵۹۱	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(e^a + bd)^2}$	ناسلاند ۳	۱۶
۱۱/۳۷۵	۰/۵۱۱	۱۵/۳۸۱	۰/۵۹۱	$h(d) = bh + \frac{d^2}{(e^a + e^b d)^2}$	ناسلاند ۴	۱۷
۱۵/۱۸۴	۰/۵۱۰	۲۲/۱۸۶۵	۰/۵۸۵	$h(d) = bh + \frac{1}{1 + \frac{1}{bd^c}}$	هاوسفلد ۴	۱۸
۱۱/۱۷۷	۰/۵۱۴	۱۵/۳۹۱	۰/۵۹۳	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd^c})$	وایبول	۱۹
۱۶/۰۰۱	۰/۵۰۳	۱۸/۷۵۵	۰/۵۸۱	$h(d) = bh + \exp\left(a + \frac{b}{d+1}\right)$	وایکف	۲۰

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به این که 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 (۳۱/۹ تا ۱۶/۶ متر) حاکی از آن بود که این داده‌ها واریانس و دامنه تغییرات زیادی در منطقه عرب داغ داشتند. این یافته از یک‌طرف 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، می‌تواند 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 یافته به‌دست‌آمده می‌توان بیان نمود، وضعیت متفاوت ساختار توده جنگل‌دور منطقه مورد مطالعه 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 سیپسن، میکایل-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

زیادی با یکدیگر نداشتند و از نظر 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 تقریبی صفر 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. به‌طوری‌که لامبرس 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 (Mehtatalo 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، میکایل - 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 در صورت 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 آشفته‌گی‌های طبیعی و انسانی و همچنین به نوع الگوریتم‌ها و غیره بستگی دارد (محمدی و شتایی، ۱۳۹۵)؛ بنابراین نتایج چنین مطالعاتی می‌تواند برای مدیران جنگل 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.

منابع

- اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان. ۱۳۹۵. کتابچه طرح پرورشی حوزه عرب داغ، شهرستان کلالة.
- 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): ۱-۱۲.
- محمدعلی‌زاده، خ.، زبیری، م.، نمیرانیان، م.، هورفر، ع.، مروی مهاجر، م. 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): ۱۱۶-۱۲۴.
- محمدعلی‌زاده، خ.، نمیرانیان، م.، زبیری، م.، هورفر، ع.، مروی مهاجر، م. ۱۳۹۲. مدل‌سازی توزیع فراوانی ارتفاع درختان در توده‌های ناهمسال (مطالعه موردی: بخش گرازبن جنگل خیرود). نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۶۶(۲): ۱۵۵-۱۶۵.
- محمدی، ج.، شتایی جویباری، ش. ۱۳۹۵. بررسی مدل‌های مختلف قطر-ارتفاع ممز (*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 به‌ی‌نه‌زی توده تنه ممز (*Carpinus betulus* L.) با استفاده از معادلات آلومتریک در جنگل‌های هیرکانی. فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۲(۲): ۲۳۶-۲۲۵.
- 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.

- Gadow, K.V., Real, P., AlvarezGonzalez, J.G. 2001. Modelización del crecimiento y la evolución 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., Bošela, 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.

- 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.