



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

علمی-پژوهشی

ارزیابی مدل‌های غیرخطی قطر-ارتفاع دو گونه مهم سوزنی برگ دست کاشت کاج بروسیا و زرین (مطالعه موردنی: حوزه عرب داغ)

علی مستوری^۱، شعبان شتاوی^{۲*}، محمدهدادی 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 درخت (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 دست کاشت کاج بروسیا (*Pinus brutia*) و زرین (*Cupressus sempervirens var. horizontalis*) در منطقه عرب داغ (شمال شرق استان گلستان) ارزیابی شد. داده‌های موردنیاز برای گونه‌های زرین و کاج بروسیا به ترتیب از ۱۱۴ و ۹۸ قطعه‌نمونه، با استفاده از یک شبکه آماربرداری خوش‌های سیستماتیک با فاصله خوش‌های ۶۰۰×۴۰۰ متر جمع‌آوری شد. در تمام قطعات نمونه، مشخصه‌های گونه، قطر برای سیستماتیک تمام درختان با قطبی‌تر از ۷/۵ سانتی‌متر و ارتفاع درختان اندازه‌گیری و ثبت شد. در مجموع ۲۹۹ و ۳۸۹ گجت مشاهده قطر-ارتفاع به ترتیب برای زرین 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 برآش 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 ۰/۵۵ تا ۰/۵۹ و بازه RMSE از ۱۵/۳۲ تا ۱۱/۰۹ و ۰/۵۱ تا ۰/۰۷ و بازه R^2 از ۲۲/۸۷ تا ۱۵/۸۷ و آمد و مدل‌های سیپسن، میکاپیل-منتن، توانی، پرودان و چاپمن-ریچارد برای گونه‌های زربین و کاج بروسیا به دست میکایلوف و رانکوفسکی برای گونه کاج بروسیا، بهتر توانستند مشخصه ارتفاع را برآورد کنند؛ بنابراین، آنچه مدل‌ها دارای نتایج نسبتاً مشابه با دقت مناسب بودند و می‌توانند در برآورد ارتفاع درختان جنگل‌های دست‌کاشت بروسیا و زربین در سایر مناطق قادر 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 جنگل‌کاری وجود دارد که با گونه‌های مختلف سوزنی برگ 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، به طوری که منطقه عرب داغ (مطالعه موردي) هرسال خسارات جبران‌ناپذیری را تجربه می‌کند (اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، ۱۳۹۵). به همین 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 (عالی 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; Gao et al., 2016). ارتفاع درخت برای برآورد متغیرهای مهم مربوط به رویش جنگل‌استفاده می‌شود (Stark et al., 2009; Ö兹çelik et al., 2013). بهر حال اندازه‌گیری ارتفاع تمام درختان در یک توده جنگلی پرهزینه و زمان بر 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, 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 به خصوص حجم و بیوماس (Johansson, 2012; Ahmadi et al., 2013)، تحلیل و تجزیه ساختار توodeh (Gadow et al., 2001)، تعیین ارتفاع غالب و شاخص رویشگاه (Yuancai and Parresol, 2001)، پایداری توodeh و ارزیابی خسارت (Parresol, 1992) استفاده می‌شود؛ بنابراین با توجه به رویکرد جدید سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور مبنی بر استراحت جنگل‌های طبیعی پهنه‌برگ 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 توodeh‌های همسال و خالص نیز در همه موقعیت‌ها یکسان نیستند (Dorado et al., 2006) و درختان از نظر سن، اندازه، گونه، تاج، تراکم توodeh، کیفیت رویشگاه و موقعیت نسی در توodeh متفاوت هستند و شیوه‌های مدیریتی و تغییرات دینامیک توodeh 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 در زمینه برآش 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 Lumbres et al. (2011)، ۶ مدل قطر-ارتفاع را برای سه گونه کاج و یک گونه لاریکس در کره‌جنوبی توسعه و اعتبارسنجی کردند و نشان دادند که مدل‌های اصلاح شده لجستیک ولوند کویست/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., 2011)

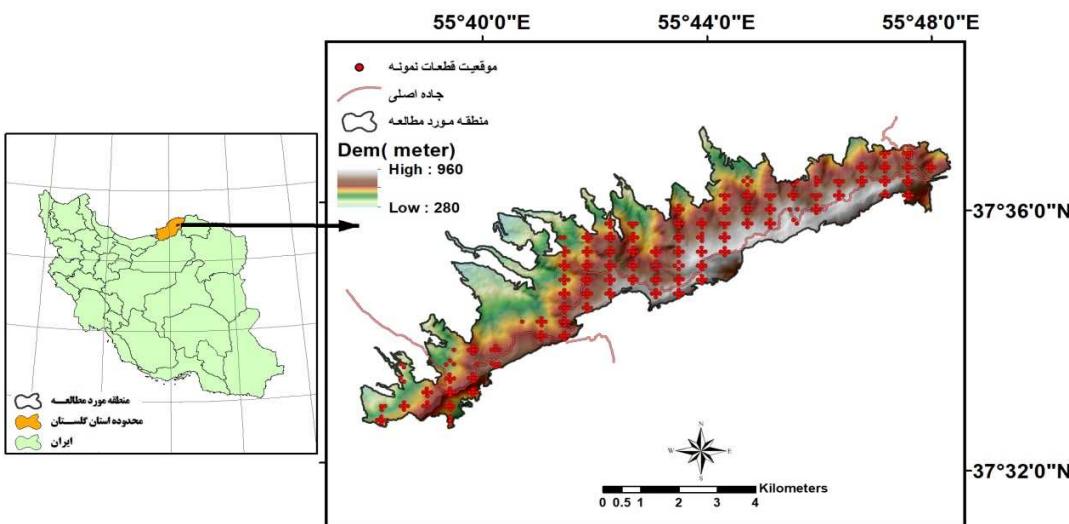
2017) برای ۵۵۰۳ درخت سکویای چینی ۷ مدل خطی و ۴۶ مدل غیرخطی قطر-ارتفاع را مورد برآش قراردادند. ایشان مدل‌ها را همچنین به دو دسته ساده و چند متغیره بر اساس تعداد متغیرهای مستقل تقسیم کردند. نتایج نشان داد که معادلات آلومتریک ارتفاع که از متغیر قطر برابر سینه به عنوان متغیر مستقل استفاده کردند، بهتر توانستند تغییرات ارتفاع را مدل‌سازی کنند و همچنین در این مطالعه مدل‌های تربیی دقت بالاتری در مقایسه با مدل‌های ساده داشته‌اند. همچنین نتایج این مطالعه حاکی از آن است که برآش 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 برآش مدل‌های قطر-ارتفاع صورت گرفته است، اما اغلب آن‌ها در جنگل‌های طبیعی و ناهم سال متتمرکز شده‌اند که از آن جمله می‌توان به نتایج تحقیقات محمدعلی‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) با مدل‌های توزیع واپول، گاما، نرمال و لگنرمال، محمدعلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) با مدل‌های توزیع نمایی، گاما و لگ نرمال، امان‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) با مدل‌های توزیع‌های واپول 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 به کارگیری 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

عرضه جنگل‌کاری عرب داغ در ۴۰ کیلومتری شمال شهر کلاله و در حوزه مدیریتی اداره منابع طبیعی شهرستان کلاله و در محدوده $37^{\circ}38'19''/43^{\circ}37^{\circ}30'19'$ طول شرقی و $55^{\circ}25'42''/5^{\circ}55'46'$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). مساحت این عرضه ۳۵۰۰ هکتار است که از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۹ با گونه‌های زربین، کاج بروسیا، کاج بادامی و سرو نقره‌ای با فاصله کاشت 3×3 متر، جنگل‌کاری شده است. از نظر زمین‌شناسی عرضه جنگل‌کاری عرب داغ، از نهشته‌های رسویی لسی تشکیل شده است. عرضه مورد نظر در دامنه ارتفاعی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریا قرار گرفته است. متوسط بارندگی منطقه $536/8$ میلی‌متر و متوسط دمای ماهیانه $16/9$ 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 برداشی و جمع آوری اطلاعات

داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی ارتباط قطر و ارتفاع در سال ۱۳۹۷ با استفاده از یک شبکه آماربرداری خوش‌های سیستماتیک (هر خوشه ۵ پلات) با فاصله خوشه‌ها 400×400 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 دایره‌های شکل به مساحت ۴۰۰ متر مربع در بازه ارتفاعی منطقه با در نظر گرفتن وضعیت توپوگرافی، بیانده 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 $7/5$ 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.

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 اندازه- گیری 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 به عنوان متغیر وابسته و قطر به عنوان متغیر مستقل برای دو گونه زربین و کاج بروسیا به طور جداگانه در منطقه عرب داغ بررسی و تجزیه و تحلیل شد (جدول ۱).

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	سیبیسن	$h(d) = bh + ad^{bd-c}$
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	لجمستیک	$h(d) = bh + \frac{a}{1+be^{-cd}}$
۱۰	مایر	$h(d) = bh + a(1 - e^{-bd})$
۱۱	میکایبل-منتن	$h(d) = bh + \frac{ad}{b+d}$
۱۲	میکایبل-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	$h(d) = bh + \frac{a}{1+\frac{1}{hd^c}}$
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 برابریسینه بر حسب سانتی‌متر، bh عدد ثابت برابر ۱/۳۰، a و b و c ضریب‌های مدل

در پژوهش پیش رو بهمنظور ارزیابی و برآش 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 کنار گذاشته شدند و با در اختیار داشتن مقادیر برآورده (ŷ_i) و مقادیر واقعی (y_i) با استفاده از معیارهای آماری ضریب تبیین (R²) و جذر میانگین مربعات خطای مطلق و نسبی (RMSE) اعتبار مدل‌های آماری ارزیابی شد (روابط ۱ تا ۳).

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

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

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

بهطوری که n تعداد نمونه ارزیابی، (ŷ_i) مقادیر برآورده و (y_i) مقادیر واقعی بود. همچنین علاوه بر معیارهای مذکور، تفاوت‌های بین مقادیر واقعی ارتفاع با مقادیر برآورده داده‌های آزمون با استفاده از داده‌ها و مدل‌های مذکور نیز مورد مقایسه قرار گرفت. برای بررسی معنی‌دار بودن میانگین تفاوت‌های مقادیر واقعی با مقادیر برآورده شده با استفاده از مدل‌های مذکور، از آزمون تی جفتی استفاده شد.

نتایج

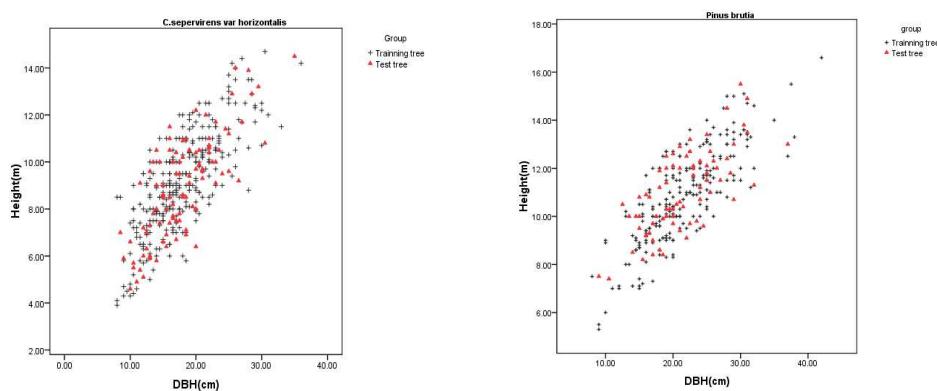
بررسی آماره‌های توصیفی قطر برابرسینه و ارتفاع کل درختان

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

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

ارتفاع (متر)					قطر (سانتی‌متر)					نام گونه	نوع داده	تعداد درخت
انحراف معیار	بیشی نه	کمی نه	میانگین		انحراف معیار	بیشی نه	کمی نه	میانگین				
۲/۱	۱۴/۷	۳/۹	۹/۱۶	۱/۸۳	۵/۱	۳۶	۸	۱/۹۲	۷	۲۹۲	مدل	زربین
۲/۱۷	۱۴/۵	۴/۶	۹		۵/۱۵	۳۵	۸/۵	۱/۰۲	۸	۹۷	آزمون	
۱/۹۱	۱۶/۶	۵/۳	۱/۸۳	۰	۵/۶۸	۴۲	۸	۲/۴۲	۱	۲۲۵	مدل	کاج
۱/۷	۱۵/۵	۷/۴	۱/۰۱	۱	۵/۴	۳۷	۹	۲/۳۵	۱	۷۴	آزمون	بروسیا

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 برآش 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

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

ادامه جدول ۳

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

نتایج ارزیابی نشان داد که درصد جذر میانگین مربعات خطای اکثر مدل‌های رگرسیونی برآش شده برای گونه زرین با ضریب تبیین ۵۹/۰ و کاچ بروسیا با ضریب تبیین ۵۱/۰ به ترتیب در بازه ۱۵ تا ۱۶ و ۱۲-۱۱ 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. به طور کلی تفاوت بین مقادیر برآورده شده همه مدل‌ها با مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار نبود.

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

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

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 بهنگام، بهخصوص ارزیابی قابل اطمینان ارتفاع به عنوان یک متغیر پایه برای برآورده سایر متغیرهای توده، بهمنظور هرگونه برنامه‌ریزی حفاظتی و مدیریت منابع جنگلی امری اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود.

بررسی نتایج تجزیه و تحلیل آمارهای توصیفی اطلاعات زمینی قطر برابر سینه (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 از یک‌طرف حاکی از آن است که فراوانی قطعات نمونه مناسب بوده، انتخاب و پراکنش قطعات نمونه در منطقه به خوبی 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 et al., 2009) در مکزیک و لیو و همکارانش (Larreta et al., 2017) در چین به تأثیرگذاری این فاکتورها در تغییرات دامنه قطر و ارتفاع اشاره کرداند. بر اساس یافته به دست آمده 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 فوق الذکر اهمیت این تحقیق و بالتبع تهیه برنامه‌های دخالت پرورشی را در چنین توده‌هایی دوچندان می‌کند.

نتایج به دست آمده از آنالیز و مدل‌سازی رابطه قطر-ارتفاع با استفاده از ۲۰ مدل رگرسیونی غیرخطی نشان داد که مدل‌های رگرسیونی غیرخطی سبیسن، میکایل - منتن، توائی، پرودان و چاپمن- ریچارد برای گونه زربین با ضریب تبیین ۰/۵۹ و درصد جذر میانگین مربعات خطای به ترتیب ۱۵/۳۵، ۱۵/۳۴، ۱۵/۳۲، ۱۵/۲۳ و ۱۵/۳۶ و مدل‌های رگرسیونی غیرخطی گومپرز، کرف، واپول، میکایلوф و راتکوفسکی برای گونه کاج بروسیا با ضریب تبیین تقریباً ۰/۵۱ و درصد جذر میانگین مربعات خطای به ترتیب ۱۱/۰۹، ۱۱/۱۷، ۱۱/۱۷، ۱۱/۱۸ و ۱۱/۳۸ بهتر توانستند ارتفاع درختان را برآورد کنند. به طور کلی نتایج به دست آمده از معیارهای ارزیابی درصد جذر میانگین مربعات خطای و انحراف معیار تفاوت‌های مقادیر برآورده شده با مقادیر واقعی تفاوت

زیادی با یکدیگر نداشتند و از نظر آماری نیز تفاوت معنی داری بین مقادیر برآورده شده با استفاده از مدل های مختلف با مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۹ درصد وجود نداشت و پنج مدل ذکر شده دارای بالاترین مقدار ضریب تبیین بودند. همچنین عدم چولگی هیستوگرام باقیمانده ها، میانگین به طور تقریب صفر باقیمانده ها، توزیع نرمال و پراکنش یکنواخت در دو سوی محور صفر مؤید تناسب مدل های رگرسیونی باداده ها بود. بهترین مدل های پیشنهادی این تحقیق با نتایج برخی مطالعات از جمله (Zhang, 1997; Petrás et al., 2014) همخوان بوده است. به طوری که Lumbres et al., (2011) در کره جنوبی ضمن تأیید یافته به دست آمده، به این نتیجه رسیدند که مدل کرف نسبت به سایر مدل ها مورد بررسی، در برآورد متغیر ارتفاع سوزنی برگان عملکرد بهتری را نشان داده است. از طرفی دیگر یافته های حاصل تحقیق حاضر با نتایج برخی از مطالعات مانند (Mehtätalo et al., 2015) همسو نبوده است. همچنین درصد جذر میانگین مربعات خطای به دست آمده در این پژوهش برای گونه کاج بروسیا در مقایسه با مطالعات دیگر تفاوت زیادی نداشت (محمدی و شتایی، ۱۳۹۵؛ عالمی و همکاران، ۱۳۹۷). درنهایت می توان چنین نتیجه گیری کرد که مدل های رگرسیونی غیرخطی گومپرز، کرف، واپیول، میکایلوف و راتکوفسکی برای گونه کاج بروسیا و مدل های رگرسیونی غیرخطی سیبسن، میکایل - منتن، توانی، پرودان و چاپمن - ریچارد برای گونه گزین، با توجه به این که اختلاف جذر میانگین مربعات خطای درصد مدل ها کمتر از یک درصد بوده است؛ توانایی خوبی در تخمین ارتفاع درختان باقیمانده داشتند. بنابراین این مدل ها می توانند در برآورد ارتفاع درختان سوزنی برگ زرین و کاج بروسیا در صورت تکرار در قالب طرح های تجدید نظر، تهیه طرح های پرورشی پایه که در اکثر عرصه های جنگل کاری اتفاق نیفتاده است و یا دیگر مطالعات و برنامه ریزی ها مرتبط مورد استفاده قرار بگیرد. مقایسه نتایج به دست آمده از پژوهش های انجام شده نشان داد که اختلاف درصد جذر میانگین مربعات خطای و انحراف معیار تفاوت های به دست آمده برای ارتفاع زیاد است. این موضوع علاوه بر نوع توode (پهن برگ یا سوزنی برگ) به عواملی مانند ناهمساal یا همسال بودن، منظم یا نامنظم بودن، نوع و شدت دخالت ها و مدیریت ها، نوع مدل، ساده یا مرکب بودن توابع، نوع و تعداد متغیرهای مستقل، شدت تأثیر آشفتگی های طبیعی و انسانی و همچنین به نوع الگوریتم ها و غیره بستگی دارد (محمدی و شتایی، ۱۳۹۵)؛ بنابراین نتایج چنین مطالعاتی می تواند برای مدیران جنگل در تصمیم گیری ها و برنامه ریزی های مدیریتی به خصوص برای مناطق وسیع جنگل کاری شده در سطح کشور که در بیش از پنج دهه اتفاق افتاده و تاکنون مطالعات و دخالت های جدی و هدفمند در آن ها انجام نشده است، بسیار مفید باشند.

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):
- عالیمی، ا، اولادی، ج، فلاخ، ا، مقصودی، ای. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل‌های غیرخطی قطر-ارتفاع گونه توسکا در جنگل‌های هیرکانی (مطالعه موردی: جنگل رضاییان). مجله اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۱۲(۲): ۱-۱۲.
- محمدعلیزاده، خ، زبیری، م، نمیرانیان، م، هورفر، ع، مروی مهاجر، م.ر. ۱۳۸۸. برآش 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 (مطالعه موردی: بخش گرازبن جنگل خیرود). نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۶۶(۳): ۱۶۵-۱۵۵.
- محمدی، ج، شتایی جویباری، ش. ۱۳۹۵. بررسی مدل‌های مختلف قطر-ارتفاع ممرز (*Carpinus betulus* L.) در توده‌های جنگلی ناهمسال شصت کلاته گرگان. مجله تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۴(۴): ۷۱۲-۷۰۰.
- واحدی، ع.ا. ۱۳۹۳. تبیین مدل‌های محاسباتی و بهی نه زی توده تنۀ ممرز (*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. 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., CrecenteCampو, 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., Bošel'a, 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.