

## بررسی مدل‌های مختلف قطر - ارتفاع ممرز (*Carpinus betulus* L.) در توده‌های جنگلی ناهمسال شصت کلاته گرگان

جهانگیر محمدی<sup>۱\*</sup> و شعبان شتابی<sup>۲</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، استادیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

پست الکترونیک: mohamadi.jahangir@gmail.com

۲- دانشیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۰۴

### چکیده

بررسی دقیق توسعه توده در طول زمان به دقت مدل‌های قطر - ارتفاع وابسته است. در پژوهش پیش‌رو قابلیت به‌کارگیری مدل‌های مختلف قطر - ارتفاع برای برآورد دقیق ارتفاع درختان ممرز (*Carpinus betulus* L.) در توده‌های ناهمسال آمیخته نامنظم در بخشی از سری‌های یک و دو جنگل شصت کلاته گرگان ارزیابی شد. ۳۰۸ قطعه نمونه دایره‌ای شکل به مساحت ۱۰ آر و به روش تصادفی - منظم به ابعاد شبکه ۱۵۰×۲۰۰ متر و با شدت ۳/۳۳ درصد در جنگل مورد مطالعه پیاده شد. در تمام قطعات نمونه، مشخصه‌های گونه، قطر برابر سینه و ارتفاع تمام درختان ممرز با قطر برابر سینه بیشتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری و ثبت شد. در مجموع ۲۱۷۷ جفت مشاهده قطر - ارتفاع اندازه‌گیری و ثبت شد که ۷۵ درصد (۱۶۳۱ درخت) در فرآیند مدل‌سازی و ۲۵ درصد (۵۴۶ درخت) برای ارزیابی مدل‌های برآوردی استفاده شدند. با استفاده از ۱۸ مدل رگرسیونی غیرخطی، ارتباط بین ارتفاع به‌عنوان متغیر وابسته و قطر به‌عنوان متغیر مستقل بررسی و تجزیه و تحلیل شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که نتایج معیارهای ارزیابی مدل، تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند و از نظر آماری به‌جز مدل پرودان، تفاوت معنی‌داری بین مقادیر برآورد شده با استفاده از مدل‌های مختلف و مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۵ درصد وجود نداشت. همچنین چهار مدل رگرسیونی غیرخطی هایپربولیک، راتکوفسکی، چاپمن - ریچارد و ویبول با درصد مجذور میانگین مربعات خطای به ترتیب ۱۲/۹۱، ۱۲/۹۲، ۱۳/۰۱ و ۱۳/۰۱ درصد و در صد اریبی به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۲۱، ۰/۲۲ و ۰/۲۲ درصد، نتایج مشابه و نزدیک به هم داشتند و توانایی خوبی برای برآورد ارتفاع درختان ممرز با دقت مناسب داشتند. این مدل‌ها می‌توانند در برآورد ارتفاع درختان ممرز در صورت تأیید و تکرار این نتایج در مناطق جنگلی دیگر شمال ایران، در جنگل‌های پهن‌برگ استفاده شوند.

واژه‌های کلیدی: آماربرداری، شصت کلاته گرگان، مدل قطر - ارتفاع، ممرز.

### مقدمه

جنگل‌های هیرکانی است که در دهه‌های اخیر به دلایل متعدد دستخوش تغییرات زیادی شده است که حفظ، دوام و بقای آن، پایش مداوم، چاره‌اندیشی و تمهیدات همه‌جانبه را می‌طلبد. به همین دلیل کسب اطلاعاتی دقیق و به‌هنگام از

مدیریت پایدار و برنامه‌ریزی صحیح منابع جنگلی به اطلاعات دقیق و با کیفیت زیاد از وضعیت حال و آینده جنگل نیازمند است. یکی از این بوم‌سازگان‌های حیاتی،

مهم است (Peng et al., 2001; Özçelik et al., 2013). تاکنون مدل‌های خطی و غیرخطی زیادی برای گونه‌های مختلف در مناطق مختلف پیشنهاد شده است که اغلب برای توده‌های همسال یا جنگل‌کاری‌ها استفاده شده‌اند. مدل‌های قطر- ارتفاع در رویشگاه‌های مختلف و برای گونه‌های مختلف، متفاوت هستند و حتی در توده‌های همسال و خالص نیز در همه موقعیت‌ها یکسان نیستند (Dorado et al., 2006). در توده‌های ناهمسال و نامنظم، درختان از نظر سن، گونه، اندازه، تاج، کیفیت رویشگاه، تراکم توده و موقعیت نسبی درختان در توده متفاوت هستند و اجرای شیوه تک‌گزینی و تغییرات دینامیک توده نیز باعث ایجاد تغییرات می‌شود (Vargas-Larreta et al., 2009)، بنابراین روابط قطر- ارتفاع در این توده‌ها همیشه ثابت نیست و به‌سختی می‌توان آن را برازش داد.

مطالعات زیادی در خارج از کشور در مورد برازش مدل‌های قطر- ارتفاع برای گونه‌های مختلف انجام شده است، درحالی‌که مطالعات کمی در ایران در مورد به‌کارگیری مدل‌های مختلف قطر- ارتفاع در شرایط رویشگاهی متفاوت انجام شده است. Ahmadi و همکاران (۲۰۱۳) مدل‌های غیرخطی قطر- ارتفاع را برای راش در جنگل آموزشی- پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس، بررسی و تجزیه و تحلیل کردند. نتایج به‌دست‌آمده از این بررسی نشان داد که میانگین مجذور مربعات خطا بین سه تا چهار متر بود و مدل چاپمن ریچارد به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. Huang و همکاران (۱۹۹۲) با استفاده از مدل‌های غیرخطی، مناسب‌ترین مدل برای گونه‌های اصلی را بررسی و انتخاب کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آنها نشان داد که مدل‌های وایبول، لجستیک متعادل‌شده، چاپمن ریچارد و اسنات نتایج خوبی را داشتند. Zhang (۱۹۹۷) شش مدل غیرخطی را برای رابطه قطر- ارتفاع درختان در جنگل‌های شمال غرب ایالات متحده آمریکا برازش داد و نتایج مطالعه وی نشان داد که مدل اسنات، وایبول و ریچارد چاپمن بهتر توانسته‌اند ارتفاع درختان را برآورد کنند. Fang و Bailey (۱۹۹۸) مدل قطر- ارتفاع را برای جنگل‌های تروپیکال

وضعیت کمی این منابع جنگلی در برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح این منابع، از اولویت زیادی برخوردار است. مشخصه‌های قطر برابر سینه و ارتفاع درختان، از مهم‌ترین مؤلفه‌های مورد نیاز در آماربرداری جنگل هستند. اندازه‌گیری ارتفاع درختان نسبت به قطر برابر سینه به‌دلیل نیاز به زمان بیشتر برای اندازه‌گیری، احتمال خطای مشاهداتی و موانع موجود برای دید رفتن به بن و نوک درختان، مشکل‌تر، زمان‌برتر و پرهزینه‌تر است (Castedo et al., 2009; Vargas-Larreta et al., 2006; al., 2009). در آماربرداری جنگل در بیشتر کشورها، فقط ارتفاع تعداد محدودی از درختان اندازه‌گیری می‌شود (Castedo et al., 2011; Lumbres et al., 2006). با توجه به رابطه قوی و تنگاتنگ قطر برابر سینه و ارتفاع درختان، برای پیش‌بینی دقیق ارتفاع درختان دیگر، باید از مدل‌های قطر- ارتفاع دقیق استفاده شود (Castano-Santamaria et al., 2013). این مدل‌ها ابزاری مهم برای اهداف مدیریتی در جنگل‌های پهن‌برگ، ناهمسال و نامنظم هیرکانی هستند. مدل‌های قطر- ارتفاع، کاربردهای زیادی در مدیریت جنگل مانند برآورد زی‌توده، ذخیره کربن و موجودی سرپا (Huang et al., 2007; Newton & Amponsah, 1992)، تجزیه و تحلیل ساختار توده (Morrison et al., 1992; Gadow et al., 2001)، تعیین مدل‌های محصول و رویش درختان (Sharma & Zhang, 2004)، تعیین ارتفاع غالب و شاخص رویشگاه (Yuancai & Parresol, 2001) و پایداری توده و ارزیابی خسارت (Parresol, 1992) دارند.

با توجه به رویکرد جدید مدیریت جنگل‌های هیرکانی در سال‌های اخیر براساس اهداف جنگل‌داری چندمنظوره، مدیران برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی رویش و محصول در راستای مدیریت پایدار این منابع، به روابط قطر- ارتفاع دقیق نیاز دارند، بنابراین مدل‌های قطر- ارتفاع برای درک بهتر روابط مختلف در طبیعت، توصیف و بررسی تفاوت‌ها و تأثیرگذاری در توسعه اکوسیستم‌های جنگلی ضروری هستند و دقت این مدل‌ها برای تهیه جداول حجم دقیق و پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر مدل‌های رویش و محصول بسیار

همسال یا جنگل‌کاری بوده‌اند و کمتر برای توده‌های ناهمسال و آمیخته انجام شده‌اند و مجذور میانگین مربعات خطا بین دو تا چهار متر به دست آمده است. مدل‌های قطر-ارتفاع در رویشگاه‌های مختلف، گونه‌های مختلف و حتی در موقعیت‌های مختلف و نامنظم بودن درختان از نظر سن، گونه، اندازه، تاج، کیفیت رویشگاه، تراکم توده و موقعیت نسبی درختان متفاوت است. روابط قطر-ارتفاع در این توده‌ها همیشه ثابت نیست و به سختی می‌توان آنها را برازش داد. این مدل‌ها ابزاری مهم برای اهداف مدیریتی در جنگل‌های پهن‌برگ، ناهمسال و نامنظم هیرکانی برای تهیه جدول حجم تاریخ دقیق هستند، بنابراین هدف از پژوهش پیش‌رو به‌کارگیری مدل‌های مختلف قطر-ارتفاع و انتخاب بهترین مدل برای یکی از گونه‌های مهم اقتصادی جنگل‌های هیرکانی یعنی مرمر (*Carpinus betulus* L.) بود که در توده‌های ناهمسال آمیخته و نامنظم در بخشی از سری‌های یک و دو جنگل شصت‌کلاته گرگان انجام شد.

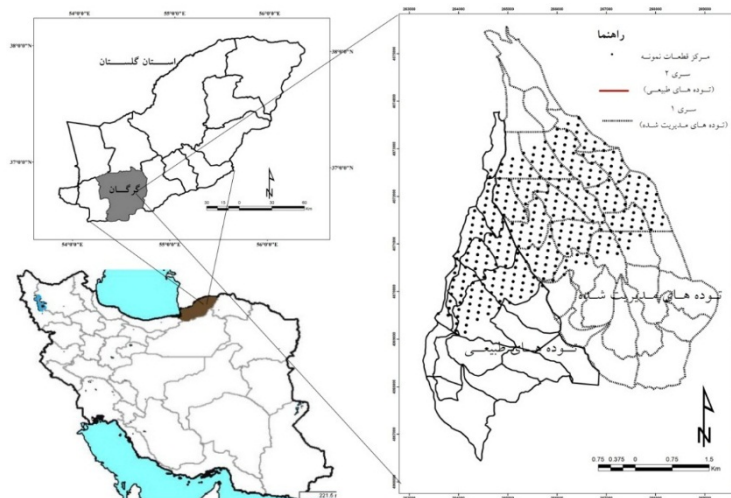
### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در سری‌های یک و دو طرح جنگل‌داری دکتر بهرام‌نیا (شصت‌کلاته) در حوزه آبخیز ۸۵ اداره کل منابع طبیعی استان گلستان و در جنوب شرقی شهر گرگان با طول جغرافیایی  $24^{\circ} 54'$  تا  $25^{\circ} 54'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $38^{\circ} 36'$  تا  $36^{\circ} 42'$  شمالی واقع شده است (شکل ۱). جهت عمومی دامنه این جنگل‌ها شمال غربی است و در محدوده ارتفاعی ۲۲۰ تا ۱۲۰۰ متری از سطح دریا واقع شده‌اند. مساحت کل سری یک (توده مدیریت‌شده) و سری دو (توده طبیعی) به ترتیب ۱۷۱۴ و ۱۹۹۲ هکتار است. جنگل آموزشی دکتر بهرام‌نیا براساس اطلاعات ۱۰ساله ایستگاه کلیماتولوژی هاشم‌آباد در فاصله پنج کیلومتری شمال منطقه طرح، از نظر طبقه‌بندی اقلیمی آمیزه، اقلیم مرطوب معتدل دارد. میزان بارندگی متوسط سالانه آن ۶۴۹ میلی‌متر است که بین ۵۲۸ تا ۸۱۷ میلی‌متر متغیر است.

جزیره هاینان چین مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار دادند و نتایج آنها نشان داد که میانگین مجذور مربعات خطا بین دو تا چهار متر بود. Peng و همکاران (۲۰۰۱) شش مدل غیرخطی را برای بررسی رابطه قطر-ارتفاع نه گونه اصلی جنگل‌های بورآل استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل چاپمن ریچارد، وایبول و اسنات بهتر توانسته‌اند ارتفاع درختان را برآورد کنند. Lumbres و همکاران (۲۰۱۱) مدل‌های قطر-ارتفاع سه گونه کاج و لاریکس را در جنوب کره بررسی کردند. نتایج به دست آمده از تحقیق آنها نشان داد که مدل لجستیک بهینه‌شده و مدل لاندکویست-کورف در مقایسه با مدل‌های دیگر نتایج بهتری را ارائه داده‌اند. Özçelik و همکاران (۲۰۱۳) پیش‌بینی ارتفاع درختان ارس (*Juniperus excelsa*) جنوب و جنوب غرب ترکیه را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل غیرخطی با اثرات آمیخته و مدل‌های غیرخطی کلاسیک بررسی کردند. نتایج به دست آمده از پژوهش آنها نشان داد که دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل غیرخطی با اثرات آمیخته دارای دقت بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر بودند و میانگین مجذور مربعات خطا را در حدود ۲۰ درصد در مقایسه با مدل‌های غیرخطی کلاسیک کاهش دادند. Castano-Santamaria و همکاران (۲۰۱۳) روش‌های برآورد ارتفاع توده‌های ناهمسال شمال غرب اسپانیا را بررسی و تجزیه و تحلیل کردند. نتایج به دست آمده از تحقیق آنها نشان داد که مدل‌های با اثرات آمیخته، میزان میانگین مجذور مربعات خطا را در حدود ۲۲ درصد نسبت به مدل‌های غیرخطی کاهش داده‌اند. Temesgen و همکاران (۲۰۱۴) مدل‌های قطر-ارتفاع را در جنگل‌های آمیخته چنداشکوبه شمال شرق چین بررسی کردند. نتایج به دست آمده از تحقیق آنها نشان داد که خطای میانگین مجذور مربعات خطا بین دو تا چهار متر بود.

جمع‌بندی و بررسی منابع موجود در مورد برازش مدل‌های مختلف قطر-ارتفاع نشان می‌دهد که نتایج با توجه به مناطق مورد مطالعه و توده‌های جنگلی مورد بررسی متفاوت بوده است. اغلب مطالعات برای توده‌های



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

#### روش پژوهش

با توجه به این که هدف اصلی پژوهش پیش‌رو بررسی رابطه قطر- ارتفاع ممرز بود، نیاز به تعدادی قطعات نمونه برای برآورد ارتفاع درختان به‌عنوان مجموعه داده‌های آموزش و مجموعه داده‌های آزمون بود. بدین منظور ابتدا با شناسایی اولیه منطقه، نمونه‌برداری در سری‌های یک و دو به روش تصادفی- منظم با شبکه‌ای به ابعاد  $150 \times 200$  متر، با شدت  $3/3$  درصد (شدت متداول سازمان جنگلها و مراتع کشور) و قطعات نمونه دایره‌ای شکل به مساحت  $10$  آر انجام شد (شکل ۱)؛ به طوری که  $308$  قطعه نمونه در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری شدند. در تمام قطعات نمونه، مشخصه‌های گونه، قطر برابر سینه و ارتفاع تمام درختان ممرز با قطر برابر سینه بیشتر از  $12/5$  سانتی‌متر اندازه‌گیری شدند. در مجموع  $2177$  جفت مشاهده قطر- ارتفاع اندازه‌گیری و ثبت شد. برای اندازه‌گیری قطر برابر سینه از خط کش دوبازو و متر نواری و برای اندازه‌گیری ارتفاع درختان از دستگاه ورتکس لیزری ( Vertex Laser VL ) استفاده شد.

#### تحلیل آماری داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌های کمی قطر و ارتفاع از طریق بررسی اولیه آماره‌های توصیفی این داده‌ها انجام شد. برای شناسایی اعداد پرت از رسم نمودار جعبه‌ای و پراکنش باقیمانده‌ها در برابر مقادیر مشاهده شده ( $Y_i$ ) استفاده شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-سمیرنوف بررسی شد. در پژوهش پیش‌رو برای محاسبات آماری، اجرای مدل‌های رگرسیونی غیرخطی و پردازش اطلاعات جمع‌آوری شده از عملیات زمینی مربوط به قطر و ارتفاع و از نرم‌افزارهای R، Curve Expert و Excel استفاده شد. از  $2177$  درخت ممرز اندازه‌گیری شده،  $75$  درصد ( $1631$  درخت) در فرآیند مدل‌سازی به کار گرفته شدند و  $25$  درصد ( $546$  درخت) بقیه برای ارزیابی مدل‌های برآوردی استفاده شدند. با استفاده از انواع مدل‌های رگرسیونی غیرخطی، ارتباط بین ارتفاع به‌عنوان متغیر وابسته و قطر به‌عنوان متغیر مستقل بررسی و تجزیه و تحلیل شد. براساس بررسی سوابق تحقیق،  $18$  مدل قطر- ارتفاع برای بررسی رابطه قطر- ارتفاع انتخاب شدند که بیشتر در مطالعات دیگر استفاده شده‌اند (جدول ۱).

جدول ۱- مدل‌های قطر- ارتفاع مورد استفاده در پژوهش پیش‌رو

شماره مدل	مدل	منبع
۱	لگاریتمی $H = a + b \ln DBH$	
۲	لجستیک $H = \frac{a}{1 + b e^{-c DBH}}$	(Pearl & Reed, 1920; Hung <i>et al.</i> , 1992)
۳	لجستیک تعدیل شده $H = 1.30 + \frac{a}{1 + b^{-1} \times DBH^{-c}}$	(Ratkowsky & Reedy, 1986; Hung <i>et al.</i> , 1992)
۴	گوپرتز $H = a e^{-e^{b-c DBH}}$	(Hung <i>et al.</i> , 1992)
۵	هایپربولیک $H = a + b / DBH$	
۶	هایپربولیک $H = a DBH / (b + DBH)$	(Ratkowsky & Reedy, 1986)
۷	هایپربولیک $H = DBH^2 / (a + b DBH)^2$	(Hung <i>et al.</i> , 1992)
۸	توانی $H = a DBH^b$	
۹	نمایی $H = e^{a + b DBH^c}$	(Larsen & Hann, 1987)
۱۰	نمایی $H = a e^{\frac{b}{DBH} + c}$	(Ratkowsky, 1990; Hung <i>et al.</i> , 1992)
۱۱	راتکوفسکی $H = 1.30 + a e^{\left(\frac{b}{DBH+c}\right)}$	(Ratkowsky, 1990)
۱۲	نمایی $H = a(1 - e^{-b DBH})$	(Meyer, 1940; Farr <i>et al.</i> , 1989)
۱۳	نمایی $H = a e^{\frac{b}{DBH}}$	(Buford, 1986)
۱۴	پرودان $H = 1.30 + \frac{DBH^2}{a DBH^2 + b DBH + c}$	(Prodan & Gardiner, 1968; Curtis, 1967)
۱۵	چاپمن-ریچارد $H = 1.30 + a [1 - e^{-b DBH^c}]^c$	(Richard, 1959)
۱۶	ویبول $H = 1.30 + a [1 - e^{-b DBH^c}]$	(Bailey, 1979)
۱۷	لانداکویست-کورف $H = 1.30 + a \times e^{(-b DBH^c)}$	(Stage, 1975)
۱۸	هندسی تعدیل شده $H = a \times DBH \left(\frac{b}{DBH}\right)$	

DBH قطر برابر سینه بر حسب سانتی متر، H ارتفاع کل درختان بر حسب متر و a, b, c ضریب‌های مدل

اعتبارسنجی مدل‌ها به شیوه‌های مختلفی انجام می‌شود.

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

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$BIAS\% = \frac{BIAS}{\bar{y}} \times 100 \quad \text{رابطه (۴)}$$

به طوری که n تعداد نمونه‌های ارزیابی،  $\hat{y}_i$  مقدار تخمین زده شده و  $y_i$  مقدار مشاهده شده بود. همچنین علاوه بر معیارهای مذکور، تفاوت‌های بین مقادیر واقعی ارتفاع با

در پژوهش پیش‌رو به منظور ارزیابی و برازش مدل‌ها، ۲۵ درصد از داده‌ها به صورت تصادفی انتخاب شدند و به عنوان مجموعه داده‌های ارزیابی از کلیه تجزیه و تحلیل‌ها کنار گذاشته شدند. با در اختیار داشتن مقادیر تخمینی ( $\hat{y}_i$ ) و مقادیر حقیقی ( $y_i$ ) با استفاده از معیارهای آماری مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و اریبی (Bias) به صورت مطلق و نسبی، اعتبار مدل‌های آماری ارزیابی شد (رابطه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴).

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

میانگین، کمینه و بیشینه قطر برابر سینه به ترتیب ۳۸/۹۱، ۱۲/۵ و ۱۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع به ترتیب ۲۳/۳۷، ۸/۵ و ۳۴/۸ متر بود. بررسی آماره‌های توصیفی مشخصه‌های قطر برابر سینه و ارتفاع نشان داد که دامنه تغییرات این مشخصه‌ها زیاد بود که نشان‌دهنده کل دامنه مشخصه‌های کمی ساختار توده جنگلی مورد مطالعه است. بین آماره‌های توصیفی کل داده‌ها و داده‌های آموزش و آزمون تفاوت زیادی وجود نداشت (جدول ۲).

مقادیر برآوردشده داده‌های آزمون با استفاده از داده‌ها و مدل‌های مذکور نیز مقایسه شد. برای بررسی معنی‌دار بودن میانگین تفاوت‌های مقادیر واقعی با مقادیر برآوردشده با استفاده از مدل‌های مذکور، از آزمون تی جفتی استفاده شد.

### نتایج

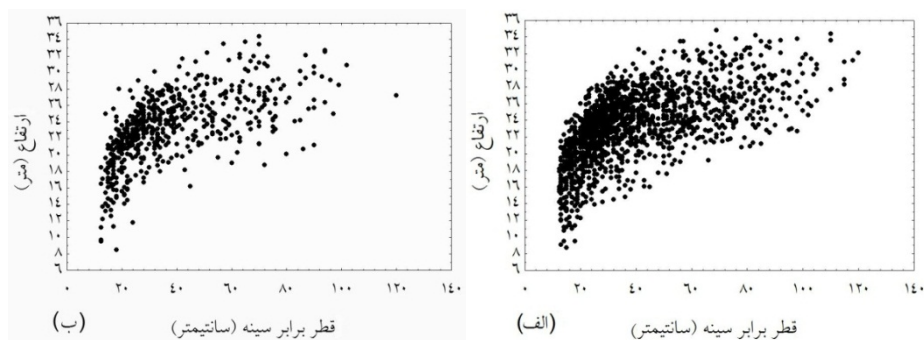
بررسی آماره‌های توصیفی قطر برابر سینه و ارتفاع کل درختان ممرز

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

آماره‌های توصیفی	قطر برابر سینه (سانتی‌متر)			ارتفاع (متر)		
	کل	مدل	ارزیابی	کل	مدل	ارزیابی
میانگین	۳۸/۹۱	۳۸/۹۶	۳۸/۷۴	۲۳/۳۷	۲۳/۳۸	۲۳/۳۵
مدیان	۳۳	۳۳	۳۳	۲۳/۷	۲۳/۷	۲۳/۶۵
حداقل	۱۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۸/۵	۸/۷	۸/۵
حداکثر	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۳۴/۸	۳۴/۸	۳۴/۴
دامنه	۱۰۷/۵	۱۰۷/۵	۱۰۷/۵	۲۶/۳	۲۶/۱	۲۵/۹
ضریب تغییرات	۵۳/۹۱	۵۴/۳۹	۵۲/۵۱	۱۷/۷۶	۱۷/۷۱	۱۷/۹۳
انحراف از معیار	۲۰/۹۸	۲۱/۱۹	۲۰/۳۴	۴/۱۵	۴/۱۴	۴/۱۸
چولگی	۱/۱۲	۱/۱۵	۱/۰۲	-۰/۳۳	-۰/۳۲۳	-۰/۳۶۶
کشیدگی	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۴۱	۰/۴۶۷	۰/۴۴۳	۰/۵۴
تعداد	۲۱۷۷	۱۶۳۱	۵۴۶	۲۱۷۷	۱۶۳۱	۵۴۶

۲- ب، ابر نقاط ارتفاع درختان ممرز در برابر قطر درختان را برای داده‌های آموزش و آزمون نشان می‌دهند.

بررسی توزیع داده‌ها نشان داد که مشخصه‌های قطر و ارتفاع از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. شکل‌های ۲- الف و



شکل ۲- ابر نقاط ارتفاع درختان ممرز در برابر قطر درختان برای داده‌های آموزش (الف) و آزمون (ب)

جدول ۳ نتایج ضریب‌های به‌دست‌آمده از برازش ۱۸ مدل رگرسیونی انتخاب‌شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- ضرایب مدل‌های رگرسیونی انتخاب‌شده

شماره مدل	مدل	ضریب‌های مدل		
		a	b	c
۱	لگاریتمی	۴/۳۹	۵/۳۸	-
۲	لجستیک	۲۶/۶۷	۱/۷۱	۰/۰۸۳
۳	لجستیک تعدیل‌شده	۲۶/۹۹	۰/۰۲۵	۱/۵۲
۴	گومپرتز	۲۶/۷۹	۰/۱۹	۰/۰۷۳
۵	هایپربولیک	۲۹/۱۷	-۱۷۳/۸۶	-
۶	هایپربولیک	۳۰/۹۹	۱۰/۳۸	-
۷	هایپربولیک	-۰/۰۸	-۰/۱۸	-
۸	توانی	۱۰/۶۹	۰/۲۲	-
۹	نمایی	۰/۴۸	۵۳۳۴/۴۳	۰/۰۸۱
۱۰	نمایی	۳/۰۱۳	-۷/۷۳	۲/۳
۱۱	نمایی	۳۰/۰۱	-۷/۷۳	-
۱۲	راتکوفسکی	۲۷/۹۸	-۶/۴۱	-۳/۰۹۵
۱۳	نمایی	۲۶/۶۸	۰/۰۷۱	-
۱۴	پرودان	۰/۰۳۶	۰/۱۸	۲/۸۷
۱۵	چاپمن-ریچارد	۲۵/۷۹	۰/۰۵۷	۰/۸
۱۶	ویبول	۲۵/۹۹	۰/۰۹۸	۰/۸۷
۱۷	لاندکویست-کورف	۴۶/۴۳	۲/۳۸	-۰/۳۳
۱۸	هندسی تعدیل‌شده	۳۲/۸۷	-۳/۱۸	-

به استناد نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شد که مدل رگرسیونی غیرخطی هایپربولیک (مدل پنج)، راتکوفسکی (مدل ۱۲)، چاپمن-ریچارد (مدل ۱۵) و ویبول (مدل ۱۶) با درصد مجذور میانگین مربعات خطای به ترتیب ۱۲/۹۱، ۱۳/۰۱ و ۱۳/۰۱ درصد) و درصد آریبی به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۲۱، ۰/۲۲ و ۰/۲۲ درصد بهتر توانسته‌اند مشخصه ارتفاع را برآورد کنند (جدول ۴). البته لازم به ذکر است که نتایج همه مدل‌ها، تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند.

به استناد نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شد که مدل رگرسیونی غیرخطی هایپربولیک (مدل پنج)، راتکوفسکی (مدل ۱۲)، چاپمن-ریچارد (مدل ۱۵) و ویبول (مدل ۱۶) با درصد مجذور میانگین مربعات خطای به ترتیب ۱۲/۹۱، ۱۳/۰۱ و ۱۳/۰۱ درصد) و درصد آریبی به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۲۱، ۰/۲۲ و ۰/۲۲ درصد بهتر توانسته‌اند مشخصه ارتفاع را برآورد کنند (جدول ۴). البته لازم به ذکر است که نتایج همه مدل‌ها، تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند.

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریبی و درصد اریبی برای مشخصه ارتفاع با استفاده از ۱۸ مدل انتخاب شده

درصد اریبی	اریبی	درصد مجذور میانگین مربعات خطا	مقدور میانگین مربعات خطا	R	مدل	نوع مدل
۰/۱۲۸	۰/۰۲۹۸	۱۳/۴۱	۳/۱۳۲	۰/۶۶۹	$H = a + b \ln DBH$	لگاریتمی
۰/۲۲	۰/۰۵۱	۱۳/۰۵	۳/۰۵	۰/۶۸	$H = \frac{a}{1 + be^{-cDBH}}$	لجستیک
۰/۰۲۱	۰/۰۴۹	۱۲/۹۵	۳/۰۲۳	۰/۶۸۸	$H = 1.30 + \frac{a}{1 + b^{-1} \times DBH^{-c}}$	لجستیک تعدیل شده
-۰/۰۷۳	-۰/۰۱۷	۱۳/۰۲۱	۳/۰۴	۰/۶۸۱	$H = ae^{-b-cDBH}$	گومیرتز
۰/۲۱	۰/۰۴۹	۱۲/۹۱	۳/۰۱۵	۰/۶۸۹	$H = a + \frac{b}{DBH}$	هایربولیک
۰/۲	۰/۰۰۲	۱۳/۰۹۶	۳/۰۵۷	۰/۶۸۴	$H = aDBH / (b + DBH)$	هایربولیک
۰/۱۹	۰/۰۵	۱۳/۰۴	۳/۰۴	۰/۶۸۶	$H = \frac{DBH^2}{(a + bDBH)^2}$	هایربولیک
۰/۱۳	۰/۰۳	۱۳/۶۱	۳/۱۸	۰/۶۵۸	$H = aDBH^b$	توانی
۰/۱۱	۰/۰۲۵	۱۳/۶۸	۳/۱۹	۰/۶۵۴	$H = e^{a+bDBH^c}$	نمایی
۰/۲	۰/۰۵	۱۲/۹۸	۳/۰۳	۰/۶۸۷	$H = ae^{\frac{b}{DBH}+c}$	نمایی
۰/۲	۰/۰۴۷	۱۲/۹۸	۳/۰۳۲	۰/۶۸۷	$H = ae^{\frac{b}{DBH}}$	نمایی
۰/۲۱	۰/۰۴۹	۱۲/۹۲	۳/۰۲	۰/۶۸۹	$H = 1.30 + ae^{\left(\frac{b}{DBH+c}\right)}$	راتکوفسکی
۰/۲	۰/۰۵	۱۲/۹۷	۳/۰۳	۰/۶۸۲	$H = a(1 - e^{-bDBH})$	نمایی
-۵/۳۵	-۱/۲۵	۱۴/۰۰۵	۳/۲۷	۰/۶۸۸	$H = 1.30 + \frac{DBH^2}{aDBH^2 + bDBH + c}$	پرودان
۰/۲۲	۰/۰۵۲	۱۳/۰۱	۳/۰۳	۰/۶۸۴	$H = 1.30 + a[1 - e^{-bDBH}]^c$	چاپمن- ریچارد
۰/۲۲	۰/۰۵۲	۱۳/۰۱	۳/۰۳۸	۰/۶۸۸	$H = 1.30 + a[1 - e^{-bDBH^c}]$	ویبول
۰/۱۴	۰/۰۳۲	۱۳/۳۵	۳/۱۲	۰/۶۷۲	$H = 1.30 + a \times e^{(-bDBH^c)}$	لاندکویست- کورف
۰/۱۸	۰/۰۴	۱۳/۱۸	۳/۰۸	۰/۶۸	$H = a \times DBH^{\left(\frac{b}{DBH}\right)}$	هندسی تعدیل شده

کمترین انحراف معیار مقادیر تفاوتها (به ترتیب با مقادیر ۳/۰۲، ۳/۰۲، ۳/۰۴ و ۳/۰۴ متر) بودند. همچنین به جز مدل پرودان، تفاوت بین مقادیر برآورد شده همه مدلها با مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار نبود (جدول ۵).

نتایج به دست آمده از بررسی میانگین تفاوت های مقادیر مشاهده شده با مقادیر برآورد شده مشخصه ارتفاع با استفاده از ۱۸ مدل انتخاب شده نشان داد که مدل های رگرسیونی غیرخطی هایربولیک (مدل پنج)، راتکوفسکی (مدل ۱۲)، چاپمن- ریچارد (مدل ۱۵) و ویبول (مدل ۱۶) دارای



جدول ۵- تفاوت‌های مقادیر واقعی با مقادیر برآورد شده مشخصه ارتفاع با استفاده از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی انتخاب شده

مدل	میانگین واقعی	میانگین برآورد شده	آماره t	معنی‌داری	میانگین تفاوت‌ها	انحراف از معیار تفاوت‌ها
لگاریتمی	23/35	23/38	-0/22	0/82 <sup>ns</sup>	-0/03	3/13
لجستیک	23/35	23/4	-0/39	0/7 <sup>ns</sup>	0/051	3/05
لجستیک تعدیل شده	23/35	23/4	-0/38	0/7 <sup>ns</sup>	-0/05	3/026
گومپرتز	23/35	23/33	0/13	0/9 <sup>ns</sup>	0/017	3/04
هایربولیک	23/35	23/4	0/38	0/7 <sup>ns</sup>	0/05	3/02
هایربولیک	23/35	23/39	-0/35	0/72 <sup>ns</sup>	-0/05	3/06
هایربولیک	23/35	23/39	-0/36	0/72 <sup>ns</sup>	0/047	3/047
توانی	23/35	23/4	-0/22	0/82 <sup>ns</sup>	-0/03	3/18
نمایی	23/35	23/37	0/18	0/85 <sup>ns</sup>	-0/025	3/2
نمایی	23/35	23/4	-0/36	0/72 <sup>ns</sup>	-0/05	3/034
نمایی	23/35	23/39	-0/365	0/72 <sup>ns</sup>	-0/047	3/035
راتکوفسکی	23/35	23/4	-0/38	0/7 <sup>ns</sup>	0/049	3/02
نمایی	23/35	23/39	0/36	0/72 <sup>ns</sup>	-0/045	3/022
پرودان	23/35	22/096	9/67	0/000**	1/25	3/023
چایمن- ریچارد	23/35	23/4	-0/399	0/69 <sup>ns</sup>	-0/05	3/04
ویبول	23/35	23/4	-0/4	0/69 <sup>ns</sup>	-0/05	3/04
لاندکویست- کورف	23/35	23/38	-0/24	0/81 <sup>ns</sup>	-0/032	3/12
هندسی تعدیل شده	23/35	23/39	-0/32	0/75 <sup>ns</sup>	-0/04	3/08

\*\* معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد؛ <sup>ns</sup> غیرمعنی‌دار

### بحث

هدف اصلی آماربرداری جنگل، آماده کردن اطلاعات دقیق و به‌هنگام برای برنامه‌ریزی، مدیریت منابع جنگلی، توسعه سیاست‌ها و برنامه‌های حفاظتی است که این تصمیم‌گیری‌ها نیازمند اطلاعات دقیق از کل منطقه است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از آماره‌های توصیفی داده‌های زمینی قطر برابر سینه و ارتفاع نشان داد که این داده‌ها واریانس و دامنه تغییرات زیادی در منطقه مورد مطالعه داشتند که بیان‌کننده این مطلب است که قطعات نمونه زمینی از یک دامنه وسیع قطر برابر سینه ۱۲/۵ تا ۱۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۸/۵ تا ۳۴/۸ متر انتخاب شده‌اند. این مسأله بیان‌گر

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل باقیمانده‌های مدل‌های رگرسیونی غیرخطی هایربولیک (مدل پنج)، راتکوفسکی (مدل ۱۲)، چایمن- ریچارد (مدل ۱۵) و ویبول (مدل ۱۶) نشان داد که میانگین باقیمانده‌ها به‌طور تقریبی صفر و دارای توزیع نرمال بود. همچنین هیستوگرام باقیمانده‌ها چولگی نداشت و نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر تطبیق‌یافته نشان از پراکنش یکنواخت در دو سوی محور صفر و ثبات واریانس داشت که مؤید تناسب مدل‌های رگرسیونی به داده‌ها بود.

میانگین مقادیر برآوردشده ارتفاع با مقادیر واقعی ارتفاع نیز نشان داد که مدل‌های هایپربولیک و راتکوفسکی مقادیر ارتفاع را بیشتر از مقدار واقعی و مدل‌های چاپمن-ریچارد و ویبول مقادیر ارتفاع را کمتر از مقدار واقعی برآورد کردند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش پیش‌رو و مقایسه آن با مطالعات دیگر، درنهایت می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های رگرسیونی غیرخطی هایپربولیک، راتکوفسکی، چاپمن-ریچارد و ویبول، نتایج مشابه و نزدیک به یکدیگر داشته و توانایی خوبی در برآورد ارتفاع درختان ممرز با دقت مناسب داشتند، بنابراین این مدل‌ها می‌توانند در برآورد ارتفاع درختان ممرز در صورت تأیید و تکرار این نتایج در مناطق جنگلی دیگر شمال ایران در جنگل‌های پهن‌برگ استفاده شوند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش پیش‌رو با مطالعات دیگر انجام‌شده نشان داد که درصد مجذور میانگین مربعات خطا و انحراف معیار تفاوت‌های به‌دست‌آمده در پژوهش پیش‌رو برای ارتفاع بیشتر است که به عامل‌هایی مانند نوع توده (پهن‌برگ یا سوزنی‌برگ)، ناهمسال یا همسال بودن، منظم یا نامنظم بودن و نوع مدل مورد استفاده و به‌کارگیری الگوریتم‌های دیگر مانند شبکه عصبی مصنوعی و غیره برمی‌گردد. امید است که تحقیقات تکمیلی در مورد استفاده از الگوریتم‌های دیگر برآورد، مانند مدل‌های تعمیم‌یافته، رندوم فورست، SVM، Knn، شبکه عصبی مصنوعی، GAM و Mixed Model Effects در برآورد ارتفاع درختان ممرز و همچنین گونه‌های دیگر در مناطق دیگر جنگل‌های هیرکانی انجام شود تا بتوان از اطلاعات دقیق در برنامه‌ریزی، مدیریت پایدار منابع جنگلی و برنامه‌های حفاظتی استفاده کرد و بتوان این مدل‌ها را به‌صورت عملیاتی در برنامه‌ریزی جنگل به‌کار برد.

## References

- Ahmadi, K., Alavi, J., Tabari, M., and Aertsen, W., 2013. Non-linear height-diameter models for oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Hyrcanian forests, Iran. *Biotechnology*,

وضعیت متفاوت ساختار توده جنگلی در منطقه مورد مطالعه است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که منطقه مورد مطالعه نمونه خوبی از جنگل‌های خزری بوده است و به‌طور تقریب تمامی قطر و ارتفاع درختان ممرز را دربرگرفته است.

نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی رابطه قطر- ارتفاع با استفاده از ۱۸ مدل رگرسیونی غیرخطی نشان داد که مدل‌های رگرسیونی غیرخطی هایپربولیک، راتکوفسکی، چاپمن-ریچارد و ویبول با میزان درصد مجذور میانگین مربعات خطای به ترتیب ۱۲/۹۱، ۱۲/۹۲، ۱۳/۰۱ و ۱۳/۰۱ درصد، در صد اریبی به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۲۱، ۰/۲۲ و ۰/۲۲، میانگین تفاوت‌های مقادیر برآوردشده با مقادیر واقعی به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۴۹، ۰/۰۵ و ۰/۰۵- و انحراف معیار تفاوت‌های مقادیر برآوردشده با مقادیر واقعی به ترتیب ۳/۰۲، ۳/۰۲، ۳/۰۴ و ۳/۰۴، بهتر توانستند ارتفاع درختان ممرز را برآورد کنند. به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده از معیارهای ارزیابی (درصد مجذور میانگین مربعات خطا، اریبی و انحراف معیار تفاوت‌های مقادیر برآوردشده با مقادیر واقعی) تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند و از نظر آماری نیز به‌جز مدل پرودان، تفاوت معنی‌داری بین مقادیر برآوردشده با استفاده از مدل‌های مختلف با مقادیر واقعی در سطح اطمینان ۹۵ درصد وجود نداشت و چهار مدل ذکرشده دارای کمترین مقدار درصد مجذور میانگین مربعات خطا بودند. همچنین عدم چولگی هیستوگرام باقیمانده‌ها، میانگین به‌طور تقریب صفر باقیمانده‌ها، توزیع نرمال و پراکنش یکنواخت در دو سوی محور صفر مؤید تناسب مدل‌های رگرسیونی با داده‌ها بود.

مجذور میانگین مربعات خطای به‌دست‌آمده در پژوهش پیش‌رو (حدود سه متر) در مقایسه با مطالعات دیگر که حدود دو تا چهار متر بود (Fang & Baily, 1998; Castedo *et al.*, 2006; Ahmadi *et al.*, 2013; Temesgen *et al.*, 2014)، تفاوت زیادی نداشت. همچنین همسو با مطالعات انجام‌شده پیشین (Zhang, 1997; Ahmadi *et al.*, 2013)، مدل‌های ریچارد-چاپمن و ویبول بهتر توانستند ارتفاع درختان ممرز را برآورد کنند. بررسی

- Forest Recourse Laboratory, USA, 49p.
- Lumbres I.R.C., Lee, Y.J., Seo, Y.O., Kim, S.H., Chio, J.K. and Lee, W.K., 2011. Development and validation of nonlinear height-DBH models for major coniferous tree species in Korea. *Forest Science and Technology*, 7: 117-125.
  - Meyer, H.A., 1940. A mathematical expression for height curves. *Journal of Forestry*, 38: 415-420.
  - Morrison, M.L., Marcot, B.G. and Mannan, R.W., 1992. *Wildlife Habitat Relationships: Concepts and Applications*. University of Wisconsin Press, Madison, 343p.
  - Newton, P.F. and Amponsah, I.G., 2007. Comparative evaluation of five height-diameter models developed for black spruce and jack pine stand-types in terms of goodness-of-fit, lack-of-fit and predictive ability. *Forest Ecology and Management*, 247: 149-166.
  - Özçelik, R., Diamantopoulou, M.J., Crecente-Campo, F. and 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.
  - Pearl, R. and Reed, L.J., 1920. On the rate of growth of the population of the United States since 1790 and its mathematical representation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 6. Baltimore, Maryland, 15 June 1920: 275-288.
  - Peng, C., Zhang, L. and Liu, J., 2001. Developing and validating nonlinear height-diameter models for major tree species of Ontario's boreal forest. *Northern Journal Application of Forestry*, 18: 87-94.
  - Prodan, M. and Gardiner, S.H., 1968. *Forest Biometrics*. Pergamon Press, Oxford, 447p.
  - Ratkowsky, D.A. and Reedy, T.J., 1986. Choosing near-linear parameters in the four-parameter logistic model for radioligand and related assays. *Biometrics*, 42: 575-582.
  - Sharma, M. and Zhang, S.Y., 2004. Height-diameter models using stand characteristics for *Pinus banksiana* and *Picea mariana*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19: 442-451.
  - Stage, A.R., 1975. Prediction of Height Agronomy, Society and Environment Journal, 17(3): 431-440 (In Persian).
  - Bailey, R.L., 1979. The potential of Weibull-type functions as flexible growth curves: Discussion. *Canadian Journal of Forest Research*, 10: 117-118.
  - Buford, M.A., 1986. Height-diameter relationship at age 15 in loblolly pine seed sources. *Forest Science*, 32: 812-818.
  - Castano-Santamaria, J., Crecente-Campo, F., Fernandez-Martinez, J.L., Barrio-Anta, M. and Obeso, J.R., 2013. Tree height prediction approaches for uneven-aged beech forests in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 307: 63-73.
  - Castedo, F., Dieguez-Aranda, U., Barrio, M., Sanchez, M.R. and von Gadow, K., 2006. A generalized height-diameter model including random components for radiate pine plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 229: 202-213.
  - Curtis, R.O., 1967. Height-diameter and height-diameter-age equations for secondgrowth Douglas-fir. *Forest Science*, 13: 365-375.
  - Dorado, F.C., Dieguez-Aranda, U., Rodriguez, M.S., Sanchez, M. and 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.
  - Fang, Z. and Bailey, R.L., 1998. Height-diameter models for tropical forest on Hainan Island in southern China. *Forest Ecology and Management*, 110: 315-327.
  - Farr, W.A., DeMars, D.J. and Dealy, J.E., 1989. Height and crown width related to diameter for open-grown western hemlock and Sitka spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 19: 1203-1207.
  - Gadow, K.V., Real, P. and Alvarez Gonzalez, J.G., 2001. Modelización del Crecimiento y la Evolución de los Bosques. *IUFRO World Series*, Vol. 12, Vienna, 21p.
  - Huang, S., Titus, S.J. and Wiens, D.P., 1992. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 22: 1297-1304.
  - Larsen, D.R. and Hann, D.W., 1987. *Height-diameter Equations for Seventeen Tree Species in Southwest Oregon*. Oregon State University,

- Cobos, 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. and Parresol, B.R., 2001. Remarks on height-diameter modelling. Research Note SE-10, USDA, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, USA, 8p.
  - Zhang, L., 1997. Cross-validation of nonlinear growth functions for modeling tree height-diameter distributions. *Annals of Botany*, 79: 251-257.
  - Increment for Models of Forest Growth. Research Paper INT-164, Published by U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, USA, 32p.
  - Temesgen, H., Zhang, C.H. and Zhao, X.H., 2014. Modelling tree height-diameter relationships in multi-species and multi-layered forests: A large observational study from northeast China. *Forest Ecology and Management*, 316: 78-89.
  - Vargas-Larreta, B., Dorado, F.C., Lvarez-Gonzalez, G.J., Barrio-Anta, M. and Cruz-

## Study of different height-diameter models for hornbeam (*Carpinus betulus* L.) in uneven-aged stands of Shastkalateh forest of Gorgan

J. Mohammadi<sup>1\*</sup> and Sh. Shataee<sup>2</sup>

1\*- Corresponding author, Assistant Prof., Department of Forestry, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: mohamadi.jahangir@gmail.com

2- Associate Prof., Department of Forestry, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 23.02.2016

Accepted: 06.04.2016

### Abstract

Projection of stand development over time relies on accurate height-diameter functions. In this study, we evaluated the capability of 18 nonlinear models to estimate hornbeam heights in a portion Shastkalateh experimental forest in Gorgan, Golestan province. We applied a systematic random sampling method to collect field data within a 150×200 meter network (3.33% intensity). It resulted in 308 circular plots with 17.84 m (0.1 ha) radius. In each plot tree species, height and diameter at breast height (DBH) of all trees with DBH>12.5 cm were measured, resulting in 2177 pairs of measured height-diameter. From the available dataset, we included 75% in the model development and the remaining 25% to validate the models. The relationship between height (dependent variable) and DBH (independent variable) was analyzed using 18 non-linear regression models. The results showed no significant difference between the applied model diagnostics, and the applied t-test showed non-significant mean stand height estimation using all models and actual height at 99% confidence level, with the exception of the Prodan model. In addition, the results of Hyperbolic, Ratkofsky, Richard-chapman and Weibull models with RMSE% of 12.91%, 12.92%, 13.01% and 13.01% and Bias% of 0.21%, 0.21%, 0.22% and 0.22%, respectively were almost similar in that they were better predictors of hornbeam height. Based on the results, we conclude that these models can be used for predicting hornbeam height in similar broadleaved stands of northern Iran, provided that comparative studies are conducted elsewhere to approve the results obtained here.

**Keywords:** Height-diameter model, hornbeam, inventory, Shast Kalate of Gorgan.