

مقایسه توابع غیرخطی ارتفاع و قطر برابر سینه برای گونه راش شرقی در یک جنگل ناهمسال آمیخته خزری (مطالعه موردی: جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس)

کورش احمدی^۱، سیدجلیل علوی^{۲*}، مسعود طبری کوچکسرای^۳ و ویم آرستن^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استادیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس

^۳ دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس

^۴ استادیار گروه بوم‌شناسی و مدیریت جنگل، دانشگاه کاتولیک لوون، بلژیک

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۹)

چکیده

معادلات ارتفاع و قطر برابر سینه اغلب برای برآورد ارتفاع درختان، زمانی که فقط قطر درختان اندازه‌گیری می‌شوند به کار می‌روند. از آنجا که اندازه‌گیری قطر درخت ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است و خطای اندازه‌گیری کمتری نسبت به ارتفاع درخت دارد، از این معادلات برای پیش‌بینی ارتفاع درخت استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر نوزده مدل غیرخطی ارتفاع و قطر برای داده‌های گونه راش (*Fagus orientalis* Lipsky) در جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس برازش داده شدند. داده‌ها به دو دسته تقسیم شدند. ۳۱۵ پایه درخت برای مدلسازی و ۲۹۰ پایه برای اعتبارسنجی استفاده شد. برای انتخاب مناسب‌ترین مدل از معیارهای مجذور میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین تعدیل‌یافته، معیار اطلاعاتی آکائیک و میانگین خطا و بررسی بیولوژیک مدل استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌های مورد استفاده توانسته‌اند ۷۰ تا ۷۶ درصد تغییرات را توجیه کنند. به‌منظور بررسی بیشتر، داده‌های اعتبارسنجی به کلاسه‌های قطری ۵ سانتی‌متری تقسیم و میانگین خطا یا اریبی برای هر مدل در هر کلاسه محاسبه شد و نمودار مربوط ترسیم شد. با در نظر گرفتن جنبه‌های ریاضی و بیولوژیک مدل‌ها، مدل‌های Schnute، Weibul و Richards عملکرد قابل قبول‌تری دارند که از بین آنها مدل Richards با توجه به کارایی بهتر در مقایسه با دو مدل دیگر، به‌عنوان مدل نهایی برای پیش‌بینی ارتفاع درخت راش در منطقه تحقیق پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جنگل خزری، راش، رگرسیون غیرخطی، مدل‌های رویشی.

مقدمه و هدف

مدیریت صحیح و اصولی جنگل‌ها نیازمند اطلاعات دقیقی از توده‌های جنگلی است. قطر برابر سینه و ارتفاع کل درخت متغیرهایی هستند که به منظور برآورد موجودی جنگل، شاخص رویشگاه، شبیه‌سازی جنگل، بررسی نظریه رشد درختان، توصیف توده و... اندازه‌گیری می‌شوند (Huang *et al.*, 1992). به دلیل اینکه اندازه‌گیری قطر برابر سینه مقرون به صرفه‌تر و دقیق‌تر از اندازه‌گیری ارتفاع درخت است، ارتفاع کل در جنگل کمتر از قطر برابر سینه اندازه‌گیری می‌شود (Sharma, 2009)، علاوه بر این، اندازه‌گیری ارتفاع درخت زمان‌بر است و در برآورد آن احتمال اشتباه شخص اندازه‌گیر و همچنین خطای دید وجود دارد (Colbert *et al.*, 2002)؛ به همین دلیل مدیران جنگل برای برآورد ارتفاع صحیح و دقیق درختان، نیازمند آگاهی از رابطه صحیح بین قطر و ارتفاع درختان هستند و برای برآورد ارتفاع کل از مدل‌های ارتفاع و قطر برابر سینه استفاده می‌کنند. مدل‌های مختلفی از رابطه ارتفاع و قطر در منابع مختلف ارائه شده که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره داشت. (Huang *et al.*, 1992) بیست تابع غیرخطی ارتفاع و قطر را برای گونه *Populus tremuloides* Michx و *Picea glauca* Voss Fang and Baily (1998) مقایسه و انتخاب کردند. سی‌وسه معادله ارتفاع و قطر را برای جنگل‌های استوایی جزیره Hainan در جنوب چین بررسی کردند. (Sanchez *et al.*, 2003) بیست‌وشش تابع خطی و غیرخطی ارتفاع و قطر را برای *Pinus radiata* در شمال شرق اسپانیا برآورد کردند. (Sonmez, 2009) هفده مدل غیرخطی را برای گونه *Picea orientalis* Fallah (2009) هفده مدل را برای بررسی رابطه ارتفاع و قطر *Picea abies* در منطقه کلاردشت به کار گرفت. (Özel *et al.*, 2010) رابطه ارتفاع و قطر برابر سینه گونه راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky) را بررسی و مدل Richards را به عنوان مدل مناسب معرفی کردند.

فدایی (۱۳۸۴) به منظور بررسی رابطه بین ارتفاع و قطر گونه *Pinus taeda* در منطقه تالش از بیست و چهار تابع خطی و غیرخطی استفاده کرد. نمیرانیان (۱۳۷۹) از مدل Prodan برای بررسی ارتفاع و قطر گونه راش استفاده کرد. سیاهی پور (۱۳۸۱) رابطه بین ارتفاع و قطر گونه دست‌کاشت *Picea abies* در منطقه کلاردشت را بررسی و مدل غیرخطی ارتفاع و قطر را برای این گونه پیشنهاد کردند. به دلیل ماهیت غیرخطی روابط ارتفاع و قطر برابر سینه، توابع غیرخطی از ارتفاع و قطر درخت به‌طور گسترده در پیش‌بینی‌های ارتفاع استفاده شده است.

با توجه به اینکه جنگل‌های خالص و آمیخته راش از مهم‌ترین، غنی‌ترین و اقتصادی‌ترین جنگل‌های ایران به‌شمار می‌رود و گونه راش حدود ۳۰ درصد از کل حجم سرپا و حدود ۲۳ درصد از کل تعداد درختان این جنگل‌ها را به خود اختصاص داده است (مشتاق، ۱۳۷۸)، هدف پژوهش حاضر بررسی مدل‌های مختلف رابطه ارتفاع و قطر برابر سینه و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای گونه راش در یک جنگل ناهمسال آمیخته شمال کشور است.

مواد و روش‌ها

- منطقه مورد بررسی

پژوهش حاضر در جنگل آموزشی و پژوهشی صلاح‌الدین کلا متعلق به دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس صورت گرفته است. این منطقه در سری ۳ حوضه ۴۶ کجور واقع شده است. مساحت منطقه ۱۷۸۱ هکتار و ارتفاع از سطح دریا از ۱۰۰ تا ۲۷۰۰ متر است. منطقه تحقیق بین عرض جغرافیایی $36^{\circ}29'23''$ تا $36^{\circ}32'56''$ و طول جغرافیایی $51^{\circ}43'20''$ تا $51^{\circ}47'39''$ قرار گرفته است. مقدار بارندگی در این ناحیه بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی نوشهر ۱۳۰۸ میلی متر در سال است. گرم‌ترین ماه سال تیر و مرداد، با میانگین دمای $29/2$ و سردترین ماه سال، بهمن با میانگین دمای $2/6$ درجه

– برآورد پارامترها و مقایسه مدل‌ها

نوزده مدل ارتفاع و قطر با استفاده از رگرسیون غیرخطی و روش حداقل مربعات در نرم‌افزارهای SigmaPlot 12 و JMP 10 برازش داده شد. به منظور ارزیابی مدل‌ها و انتخاب بهترین مدل از معیارهای معنی‌داری پارامترهای برآورد شده ($p < 0.05$)، مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$)، ضریب تبیین تعدیل‌یافته (R^2_{adj})، معیار AIC^2 ، میانگین خطا (MD^3) استفاده شد که در همه این معیارها \hat{h}_i و \bar{h} به ترتیب ارتفاع مشاهده شده، ارتفاع پیش‌بینی شده توسط هر یک از مدل‌ها برای مشاهده i ام و مقدار میانگین ارتفاع مشاهده شده‌اند. n ، تعداد مشاهده‌ها و p نیز تعداد پارامترهای مدل است (رابطه‌های ۱ تا ۴).

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

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (h_i - \hat{h}_i)^2}{(n-p) \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$AIC = n \ln(RMSE) + 2p \quad \text{رابطه ۳}$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)}{n} \quad \text{رابطه ۴}$$

علاوه بر محاسبه MD برای هر یک از مدل‌ها، داده‌های اعتبارسنجی به کلاس‌های قطری ۵ سانتی‌متری تقسیم و مقدار MD برای هر یک از مدل‌ها در هر یک از کلاس‌های قطری محاسبه می‌شود. با نمودار مقدار MD در مقابل کلاس‌های قطری در مورد مناسب بودن مدل قضاوت صورت می‌گیرد.

سانتی‌گراد است. همچنین میانگین دمای سالانه برابر با ۱۵/۹ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است (کوچ و همکاران، ۱۳۹۱).

– جمع‌آوری داده‌ها

به منظور جمع‌آوری اطلاعات لازم از قطعات نمونه دایره‌ای با مساحت ۱۰۰۰ مترمربع که به روش آمار برداری منظم تصادفی در شبکه‌ای به ابعاد ۲۰۰ × ۱۰۰ متر طراحی شد، استفاده شد. از آنجا که هدف این مطالعه، بررسی رابطه ارتفاع و قطر برابرسینه گونه راش بوده است، پس از بررسی نقشه تیپ‌بندی و جنگل گردشی، در توده‌هایی که در آنها گونه راش غالب بوده است، دو خط نمونه از این شبکه آماربرداری انتخاب و در مرحله بعد ۴۳ قطعه نمونه در جنگل در سطحی حدود ۲۰۰ هکتار که دارای دامنه ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر از سطح دریا بودند پیاده شد. در داخل هر قطعه نمونه، مشخصه‌های هر درخت از جمله نوع گونه، قطر برابرسینه و همچنین ارتفاع سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری ارتفاع کامل درختان راش در هر قطعه نمونه با استفاده از دستگاه Vertex 3 انجام گرفت. در مجموع ۶۰۵ پایه از درختان راش در منطقه بررسی و در قطعات نمونه اندازه‌گیری شد. ۳۱۵ پایه از درختان به‌منظور مدل‌سازی و ۲۹۰ پایه برای اعتبارسنجی انتخاب شدند. در جدول ۱ آماره‌های داده‌های مدل‌سازی و اعتبارسنجی ارائه شده است.

از گذشته تا کنون مدل‌های زیادی برای بررسی رابطه ارتفاع و قطر درختان جنگلی توسعه یافته است که هر یک از آنها مزایا و معایبی در پیش‌بینی ارتفاع درختان دارند. در جدول ۲ مدل‌های غیرخطی استفاده شده در این مطالعه به همراه مرجع این مدل‌ها ارائه شده است که مدل‌های ۱ تا ۹ دو پارامتری و مدل‌های ۱۰ تا ۱۹ سه پارامتری هستند.

¹ Root Mean Square Error

² Akaike Information Criterion

³ Mean Difference

جدول ۱- آماره‌های داده‌های مدلسازی و اعتبارسنجی

ارتفاع (متر)			قطر (سانتی‌متر)			تعداد درختان	میانگین حداکثر	انحراف معیار	میانگین	حداقل حداکثر	انحراف معیار
حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل						
۳۱۵	۲۸/۴۶	۱۰/۹	۴۴	۷/۰۷۷	۴۰/۲۱	۷	۱۲۰	۲۵/۲۶	۲۴/۱۱	۲۹۰	۲۷/۶۶
۲۹۰	۲۷/۶۶	۱۲	۴۴/۱	۶/۵۳	۳۷/۶۰	۷	۱۱۰	۲۴/۱۱	۲۴/۱۱	۲۹۰	۲۷/۶۶

جدول ۲- مدل‌های غیرخطی استفاده شده

مدل	عبارت جبری	مرجع
(۱)	$h = 1.3 + a \cdot DBH^b$	Stoffels and van Soeset, 1953; Stage, 1975; Schreuder <i>et al.</i> , 1979
(۲)	$h = 1.3 + e^{\frac{a+b}{(DBH+1)}}$	Wykoff <i>et al.</i> , 1982
(۳)	$h = 1.3 + \frac{a \cdot DBH}{b + DBH}$	Bates and Watts, 1980; Rtkowsky, 1990
(۴)	$h = 1.3 + a \cdot (1 - e^{-b \cdot DBH})$	Farr <i>et al.</i> , 1989; Moffat <i>et al.</i> , 1991
(۵)	$h = 1.3 + \frac{DBH^2}{(a + b \cdot DBH)^2}$	Loetsch <i>et al.</i> , 1973
(۶)	$h = 1.3 + a \cdot e^{\frac{b}{DBH}}$	Burkhart and Strub, 1974; Burk and Burkhart, 1984; Buford, 1986
(۷)	$h = 1.3 + 10^a \cdot DBH^b$	Larson, 1986
(۸)	$h = 1.3 + \frac{a \cdot DBH}{(DBH + 1)} + b \cdot DBH$	Watts, 1983
(۹)	$h = 1.3 + a \cdot \left(\frac{DBH}{(1 + DBH)} \right)^b$	Curtis, 1967; Prodan, 1968
(۱۰)	$h = 1.3 + a \cdot e^{(-b \cdot DBH^c)}$	Zeide, 1983
(۱۱)	$h = 1.3 + \frac{a}{(1 + b \cdot e^{-c \cdot DBH})}$	Pearl and Reed, 1920
(۱۲)	$h = 1.3 + a \cdot (1 - e^{-b \cdot DBH})^c$	Richards, 1959
(۱۳)	$h = 1.3 + a \cdot (1 - e^{-b \cdot DBH^c})$	Yang <i>et al.</i> , 1978
(۱۴)	$h = 1.3 + a \cdot e^{-b \cdot e^{-c \cdot DBH}}$	Winsor, 1932
(۱۵)	$h = H1^b + ((H2^b - H1^b) * (1 - Exp(-a * (DBH - DBHmin)))) / (1 - Exp(-(DBHmax - DBHmin)^a))$	Schnute, 1981
(۱۶)	$h = 1.3 + \left(\frac{DBH^2}{a + b \cdot DBH + c \cdot DBH^2} \right)$	Curtis, 1967; Prodan, 1968
(۱۷)	$h = 1.3 + a \cdot DBH^{b \cdot DBH^{-c}}$	Sibbesen, 1981
(۱۸)	$h = 1.3 + a \cdot e^{\frac{b}{(DBH+c)}}$	Ratkowsky, 1990
(۱۹)	$h = 1.3 + \frac{a}{(1 + b^{-1} \cdot DBH^{-c})}$	Ratkowsky and Reedy, 1986

a, b و c پارامترهای مدل، h ارتفاع درخت، H₁ برابر ۱/۳۰ متر، DBH_{MAX}: ۱۵۰ سانتی‌متر است.

نتایج

برازش مدل‌ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی نشان داد که تمامی پارامترهای مدل در سطح $p < 0.01$ معنی‌دار است. در جدول‌های ۳ و ۴ پارامترهای مدل به‌طور جداگانه برای مدل‌های دو و سه پارامتری ارائه شده است. مدل‌های استفاده شده توانسته‌اند ۷۰ تا ۷۶ درصد از تغییرات کل در ارتفاع درخت را توجیه کنند (جدول ۵). آنالیز باقی‌مانده برای هر یک از مدل‌ها در خصوص ارزیابی فرض همگنی واریانس نشان داد که روند مشخصی در نمودار باقی‌مانده studentized در مقابل ارتفاع پیش‌بینی شده وجود ندارد که نشان‌دهنده برقرار بودن این فرض است.

نتایج برازش نوزده مدل غیرخطی از جمله ضریب تبیین تعدیل‌یافته، RMSE، مقدار AIC و MD در جدول ۵ ارائه شده است.

نتایج R^2_{adj} برای داده‌های مدلسازی و اعتبارسنجی در جدول ۵ نشان می‌دهد که برای هر یک از مدل‌ها این مقدار در حالت مدلسازی و اعتبارسنجی اختلاف چندانی نداشته است و در داده‌های مدلسازی، بیشترین مقدار را مدل ۱۰ و کمترین را مدل ۴

داشته‌اند. این معیار برای داده‌های اعتبارسنجی برای مدل ۱۲ بیشترین مقدار را داشت. مقدار RMSE برای داده‌های مدلسازی بین ۳/۴۸۸۱ تا ۳/۸۷۳۷ متغیر است که کمترین مقدار مربوط به مدل ۱۰ و بیشترین مقدار مربوط به مدل ۴ است. در داده‌های اعتبارسنجی این مقدار بین ۳/۳۰۲۳ تا ۳/۶۷۴۸ است. در داده‌های اعتبارسنجی، مدل ۱۰ و ۱۲ مقادیر RMSE کمتری در مقایسه با دیگر مدل‌ها داشتند. مقادیر AIC برای داده‌های مدلسازی بین ۳۹۹/۵۴۷۵ تا ۴۳۰/۵۷۴۱ متغیر بود که کمترین مقدار را مدل ۱۰ داشت. در داده‌های اعتبارسنجی این مقادیر برای کل مدل‌ها کمتر از مدلسازی بود و مدل‌های ۱، ۷ و ۱۲ مقادیر کمتری داشتند. مقدار MD برای داده‌های مدلسازی از ۰/۰۱۱ تا ۰/۱۴۷۷ و برای داده‌های اعتبارسنجی از ۰/۰۵۵۶ تا ۰/۲۶۰۶ متغیر بوده است. در داده‌های مدلسازی کمترین مقدار به مدل ۱۷ و بیشترین مقدار به مدل ۴ تعلق دارد. در داده‌های اعتبارسنجی، مدل‌های ۴ و ۶ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار MD را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۳- برآورد مقدار پارامترهای مدل‌های ۹-۱ (دوپارامتری)

پارامتر	مدل								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
A	۴/۷۲	۳/۸۱۳	۵۲/۲۹۵	۴۰/۳۶	۲/۰۴۷	۴۳/۸۰۵	۰/۶۷۴	۱۵/۵۴	۴۴/۰۷۵
B	۰/۴۴۲	-۱۹/۱۸۷	۴۳/۴۲۴	۰/۰۲۴	۰/۱۴۵	-۱۹/۲۰۲	۰/۴۴۲	۰/۲۰۳	۱۹/۸۵۴

جدول ۴- برآورد مقدار پارامترهای مدل‌های ۱۰-۱۹ (سه پارامتری)

پارامتر	مدل									
	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹
A	۱۰۲/۶۸	۴۰/۵۳۱	۴۷/۷۷۳	۴۹/۰۴۴	۴۱/۶۲۵	۰/۰۵	-۲/۴۸۸	۶۹/۸۳۲	۵۴/۴۱۴	۶۲/۸۴۶
B	-۴/۹۸۴	۲/۸۵۳	۰/۰۱۱	۰/۰۴۷	۱/۵۳۷	۱/۸۳۵	۰/۹۶۲	-۴/۳۳۴	-۴۸/۲۹۱	۰/۰۳۱
C	-۰/۳۴۴	۰/۰۳۳	۰/۶۱۱	۰/۷۲۸	۰/۰۲۵	۱۰	۰/۰۱۸	۰/۷۵۲	۲۰/۷۷۹	۰/۸۱۹

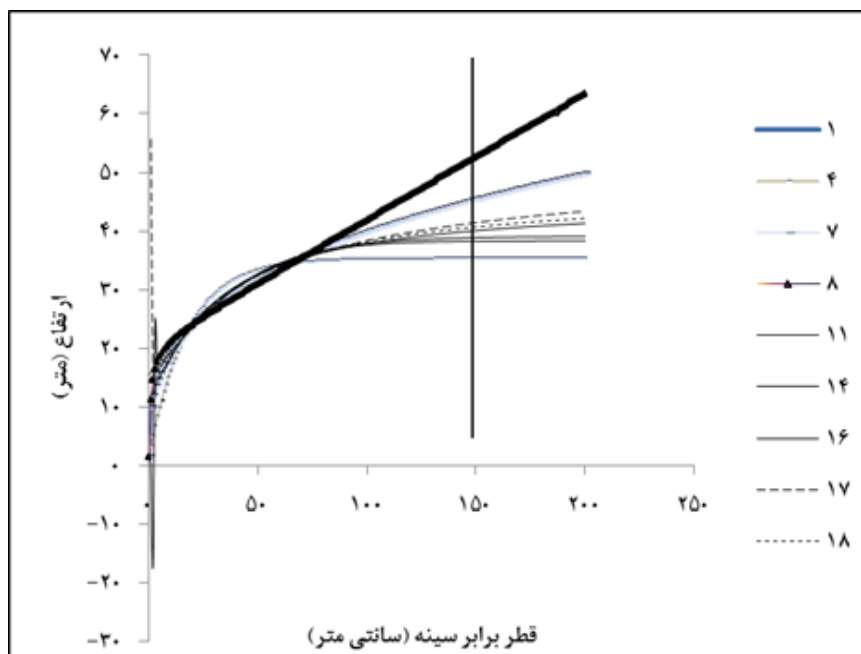
جدول ۵- اشتباه معیار، مقدار MD، ضریب تبیین تعدیل یافته و AIC برای مدل سازی و اعتبارسنجی نوزده مدل غیرخطی

اعتبارسنجی				مدلسازی				مدل
MD	AIC	R^2_{adj}	RMSE	MD	AIC	R^2_{adj}	RMSE	
۰/۲۰۷۵	۳۵۲/۱۲۲	۰/۷۵۱۵	۳/۳۲۱۵	۰/۰۱۳۹	۴۰۰/۷۵۳	۰/۷۵۱۴	۳/۵۲۳۸	۱
۰/۲۴۷۵	۳۷۳/۳۰۴	۰/۷۱۵۹	۳/۵۷۳۲	۰/۰۳۵۳	۴۱۷/۶۷۶	۰/۷۲۳۶	۳/۷۱۸۳	۲
۰/۱۸۴۷	۳۶۰/۰۶۱	۰/۷۴۱۱	۳/۴۱۳۷	۰/۰۲۶۸	۴۰۵/۸۶۷	۰/۷۴۳۷	۳/۵۸۱۵	۳
۰/۰۵۵۶	۳۸۱/۴۳۶	۰/۷۱۱۴	۳/۶۷۴۸	۰/۱۴۷۷	۴۳۰/۵۷۴	۰/۷۰۷۴	۳/۸۷۳۷	۴
۰/۲۱۰۳	۳۶۷/۸۵۱	۰/۷۲۷۰	۳/۵۰۶۶	۰/۰۴۳۱	۴۱۲/۶۹۶	۰/۷۳۲۵	۳/۶۶۰۰	۵
۰/۲۶۰۶	۳۷۸/۱۲۵	۰/۷۰۶۶	۳/۶۳۳۱	۰/۰۴۱۶	۴۲۱/۸۷۷	۰/۷۱۶۴	۳/۷۶۸۲	۶
۰/۲۰۷۵	۳۵۲/۱۲۲	۰/۷۵۱۵	۳/۳۲۱۵	۰/۰۱۳۹	۴۰۰/۷۵۳	۰/۷۵۱۴	۳/۵۲۳۸	۷
۰/۲۳۵۶	۳۷۰/۴۸۷	۰/۷۱۷۴	۳/۵۳۸۷	۰/۰۲۷۳	۴۲۳/۶۲۸	۰/۷۱۲۸	۳/۷۸۹۲	۸
۰/۲۵۳۹	۳۷۵/۶۶۰	۰/۷۱۱۴	۳/۶۰۲۴	۰/۰۳۸۴	۴۱۹/۷۱۸	۰/۷۲۰۱	۳/۷۴۲۵	۹
۰/۲۰۶۰	۳۵۳/۱۲۵	۰/۷۵۴۱	۳/۳۱۰۱	۰/۰۰۱۸	۳۹۹/۵۴۷	۰/۷۵۶۴	۳/۴۸۸۱	۱۰
۰/۱۹۶۹	۳۵۳/۲۹۲	۰/۷۵۳۴	۳/۳۱۲۰	۰/۰۰۱۴	۴۱۲/۸۷۱	۰/۷۳۴۹	۳/۶۳۸۸	۱۱
۰/۲۰۲۶	۳۵۲/۴۴۱	۰/۷۵۵۰	۳/۳۰۲۳	۰/۰۰۶۱	۴۰۱/۱۲۸	۰/۷۵۳۹	۳/۵۰۵۷	۱۲
۰/۲۰۴۰	۳۵۲/۶۰۴	۰/۷۵۴۸	۳/۳۰۴۲	۰/۰۰۵۳	۴۰۰/۴۱۳	۰/۷۵۵۰	۳/۴۹۷۷	۱۳
۰/۱۸۶۹	۳۵۲/۷۸۶	۰/۷۵۴۶	۳/۳۰۶۲	۰/۰۰۷۱	۴۰۹/۳۸۹	۰/۷۴۰۷	۳/۵۹۸۸	۱۴
۰/۲۰۲۴	۳۵۲/۴۸۳	۰/۷۵۵۰	۳/۳۰۲۸	۰/۰۰۵۴	۴۰۰/۹۴۴	۰/۷۵۴۲	۳/۵۰۳۶	۱۵
۰/۱۷۸۷	۳۵۴/۱۸۰	۰/۷۵۳۰	۳/۳۲۲۲	۰/۰۰۷۸	۴۰۳/۴۹۹	۰/۷۵۰۲	۳/۵۳۲۱	۱۶
۰/۱۹۳۸	۳۵۲/۹۲۴	۰/۷۵۴۵	۳/۳۰۷۸	۰/۰۰۱۱	۴۰۱/۲۶۷	۰/۷۵۳۷	۳/۵۰۷۲	۱۷
۰/۱۸۹۲	۳۵۲/۸۹۱	۰/۷۵۴۶	۳/۳۰۷۵	۰/۰۰۱۳	۴۰۲/۶۶۴	۰/۷۵۱۵	۳/۵۲۲۸	۱۸
۰/۲۰۴۳	۳۵۲/۷۹۸	۰/۷۵۴۶	۳/۳۰۶۴	۰/۰۰۲۸	۴۰۰/۰۶۷	۰/۷۵۵۶	۳/۴۹۳۹	۱۹

بحث

به منظور مدل سازی روابط ارتفاع و قطر درخت راش نوزده مدل غیرخطی استفاده شده است. عملکرد این مدل ها با استفاده از معیارهای مختلف ارزیابی شد. علاوه بر این معیارها، خصوصیات ریاضی مدل ها، تفسیر بیولوژیکی پارامترها و پیش بینی رضایت بخش رابطه ارتفاع و قطر نیز باید در نظر گرفته شود (Krisnawati et al., 2010). به منظور بررسی بیولوژیکی مدل ها، منحنی ارتفاع برای قطرهای ۱۵۰-۰ سانتی متر ترسیم شد و این بررسی نتایج متفاوتی را در مورد مدل ها در برداشت. یکی از اشکال های وارد بر مدل های ۱۱، ۱۴ و ۱۸ این است که این مدل ها برای قطر صفر، ارتفاع درخت را بیشتر

از ۱۰ متر پیش بینی می کنند، در صورتی که مدل های تحت بررسی باید از نظر تئوری برای قطر صفر ارتفاع ۱/۳۰ متر را پیش بینی کنند، از این رو این مدل ها از ادامه بررسی برای انتخاب بهترین مدل کنار گذاشته شدند. مدل ۴ نیز از نظر بیولوژیکی رفتار غیرعادی دارد، چرا که از قطر ۸۵ سانتی متر به بعد روند یکنواختی در پیش بینی ارتفاع درختان وجود دارد. برای مدل ۱۶ مقدار ارتفاع برای قطرهای کم منفی برآورد شد و مدل ۱۷ نیز مقدار ارتفاع را برای قطرهای کم خیلی زیاد پیش بینی کرد. برای سه مدل ۱، ۷ و ۸ نیز رفتار منحنی ارتفاع غیرواقع بینانه است، زیرا ارتفاع از مدل های دیگر خیلی بیشتر پیش بینی شده است. بنابراین این سه مدل نیز بیشتر تجزیه و تحلیل نشدند (شکل ۱).

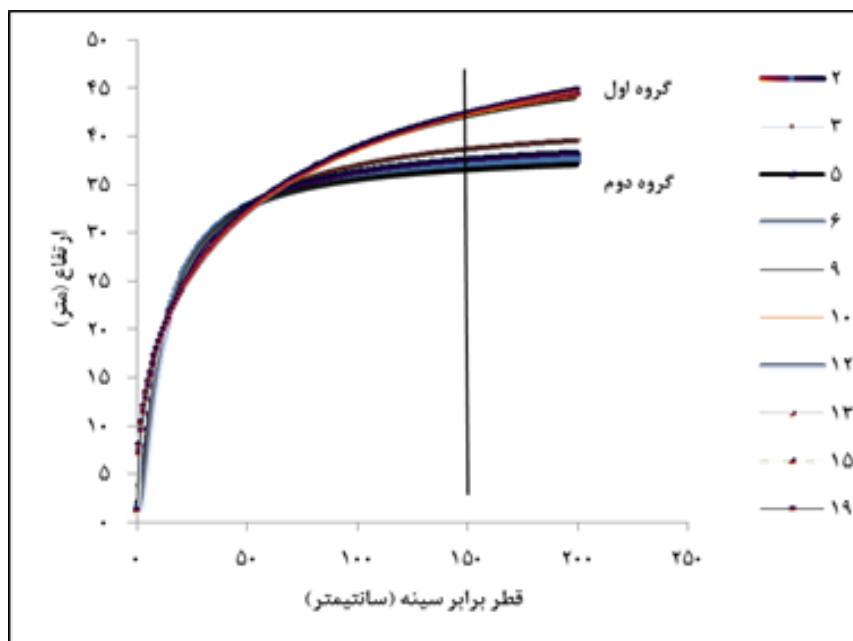


شکل ۱- مدل‌های ۱، ۴، ۷، ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۱۷ و ۱۸

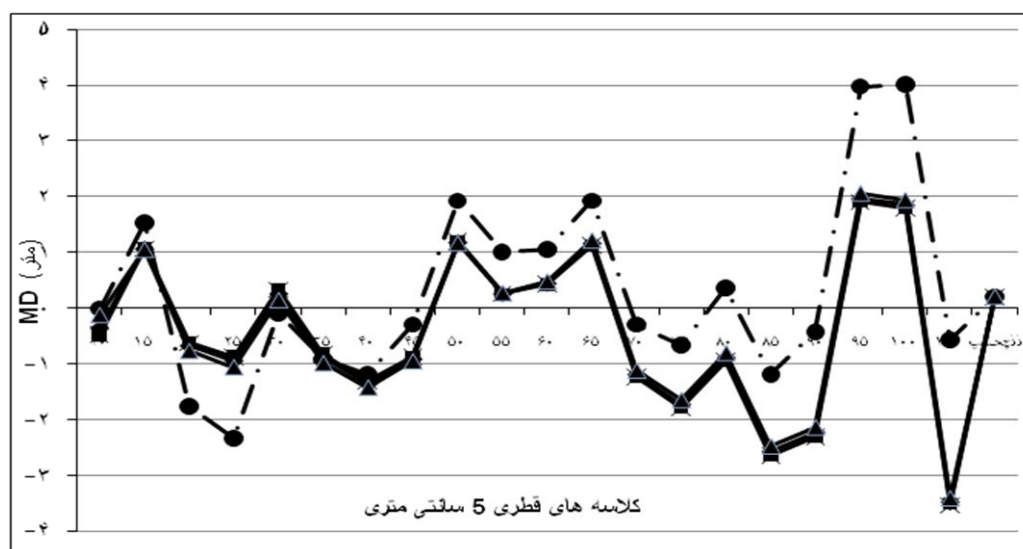
مستقل دیگر (برای داده‌هایی با قطر بیشتر از ۱۰۰ سانتی‌متر)، مدل‌های ۱۰، ۱۹، ۱۳، ۱۵ و ۱۲ به‌عنوان مدل‌های منتخب در نظر گرفته شدند. تشکیل کلاسه‌های قطری ۵ سانتی‌متری و محاسبه MD در هر یک از کلاسه‌ها و نمودار آن نشان داد که مدل ۱۹، بدترین عملکرد را با توجه به اریب بیشتر این مدل در مقایسه با مدل‌های دیگر دارد (شکل ۳).

با در نظر گرفتن تمامی جنبه‌ها در بررسی مدل‌ها، مدل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۵ که در منابع مختلف به‌ترتیب به مدل‌های Richards، Weibull و Schnute معروفند، به‌عنوان مدل‌های مناسب در پیش‌بینی ارتفاع درخت راش در منطقه تحت بررسی معرفی می‌شود. با توجه به معیارهای ارزیابی مدل‌ها برای داده‌های اعتبارسنجی، مدل ۱۲ (مدل Richards)، بهترین مدل برای پیش‌بینی ارتفاع گونه راش در جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس به‌شمار می‌رود. این نتایج با پژوهش Özel et al. (2010) در ترکیه در مورد گونه راش (*Fagus orientalis*)، Peng (1999) و Zhang (1997) مطابقت دارد.

بعد از حذف مدل‌های مسئله‌دار (مدل‌های ۱، ۴، ۷، ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۱۷ و ۱۸)، باقی‌مانده مدل‌ها در پیش‌بینی ارتفاع بر اساس شکل ۲ به دو گروه تقسیم می‌شوند. اختلاف اصلی این مدل‌ها برای قطرهای بالاتر از ۶۰ سانتی‌متر است. گروه اول مدل‌های ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۵ و ۱۹ را شامل می‌شود که ارتفاع را بیشتر از گروه دوم شامل مدل‌های ۲، ۳، ۵، ۶ و ۹ برآورد می‌کنند. با مراجعه به شکل ۲ ملاحظه می‌شود که اختلاف اصلی دو گروه مدل، در پیش‌بینی ارتفاع درختان قطور است. به‌منظور انتخاب مدل یا مدل‌های مناسب از بین این مدل‌ها از یک مجموعه داده مستقل دیگر (درختان با قطرهای زیاد) که از همان منطقه جمع‌آوری شده بود، استفاده شد. به‌کارگیری این مجموعه داده مستقل نشان داد که مدل‌های گروه دوم (مدل‌های ۲، ۳، ۵، ۶ و ۹)، ارتفاع را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کردند، بنابراین مدل‌های گروه دوم برای تجزیه و تحلیل بیشتر در نظر گرفته نشدند. پس از بررسی بیولوژیکی مدل‌ها و شناسایی تعدادی از مدل‌های نامناسب با استفاده از مجموعه داده‌های



شکل ۲- مدل‌های ۲، ۳، ۵، ۶، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۵ و ۱۹



شکل ۳- میانگین خطای پیش‌بینی کلاس‌های ۵ سانتی‌متری برای پنج مدل

۱۰ (■)، ۱۲ (▲)، ۱۹ (●)، ۱۵ (×) و ۱۳ (◆)

ممکن در یک جنگل مناسب نباشد. توسعه یک مدل ارتفاع و قطر برابر سینه به‌طور مجزا برای هر توده، یا استفاده از مدل‌های تعمیم‌یافته ارتفاع و قطر که در آن تغییرپذیری رویشگاه و توده با لحاظ متغیرهای توده غیر از قطر درخت (شامل سطح مقطع توده،

هر چند مدل Richards دارای بهترین عملکرد در منطقه مورد بررسی است، اما به دلیل تغییرات شرایط رویشگاهی و توده، رابطه قطر و ارتفاع در یک جنگل نیز ممکن است تغییر کند. بنابراین یک رابطه تنها از ارتفاع و قطر ممکن است برای پیش‌بینی تمام روابط

Buford, M.A., 1986. Height-diameter relationship at age 15 in loblolly pine seed sources, *forest sciences*, 32: 812-818.

Burkhart, H.E. and M.R. Strub, 1974. A model for simulation of planted loblolly pine stands, In growth models for tree and stand simulation, Edited by J. Fries. Royal College of Forestry, Stockholm, Sweden, 128-135.

Burkhart, H.E., R.C. Parker, M.R. Strub and R.G. Oderwald, 1972. Yield of old-field loblolly pine plantations, School of Forestry and Wildlife Resources, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Publication, FWS, 3-72.

Bi, B., V. Jurskis and J. O'Gara, 2000. Improving height prediction of regrowth eucalypts by incorporating the mean size of site trees in a modified Chapman-Richards equation, *Australian Forest*, 63: 257-266

Colbert, K.C., D.R. Larsen and J.R. Lootens, 2002. Height diameter equations for thirteen Midwestern bottomland hardwood species, *Northern Journal of Applied Forestry*, 19 (4): 171-176.

Curtis, R.O., 1967. Height-Diameter and Height-Diameter-Age Equations for Second-Growth Douglas-Fir, *Forest Science*, 13 (4):365-75.

Fallah, A., 2009. Determination of the best diameter-height model for the Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) in Kelardasht afforestation (North of Iran), *Journal of Applied Sciences*, 9 (21): 3870-3875.

Fang, Z.X. and R.L. Bailey, 1998. Height-diameter models for tropical forests on Hainan Island in southern China, *Forest Ecology and Management*, 110: 315-327.

Farr, W.A, D.J. DeMars, and J.E. Dealy, 1989. Height and crown width related to diameter for open-grown western hemlock and Sitka spruce, *Canadian Journal of Forest Research*, 19: 1203-1207.

سن، تعداد در هکتار، ارتفاع غالب، قطر غالب و شاخص رویشگاه و...)، دو رویکرد جایگزین برای این مسئله است. رویکرد اول زمان بر و پرهزینه است، در صورتی که رویکرد دوم جنبه عملی دارد و برآوردهای دقیق تری از ارتفاع درخت را فراهم می کند (Bi et al., 2000; Staudhammer et al., 2000;) (Sánchez et al., 2003; Sharma and Zhang, 2004).

منابع

سیاهی پور، ذوقعلی، تیمور رستمی، خسرو ثاقب طالبی و کامبیز طاهری، ۱۳۸۱. بررسی میزان موفقیت *Picea abies* در جنگل کاری های استان گیلان، تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۱۰: ۱-۵۵.

کوچ، یحیی، سید محسن حسینی، جهانگرد محمدی و سید محمد حجتی، ۱۳۹۱. بررسی ساختار مکانی خصوصیات خاک در یک توده جنگلی راش با استفاده از روش زمین آمار، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۶ (۶۰): ۲۳۹-۲۵۰.

فدایی، فرهاد، ۱۳۸۴. بررسی رویش کاج تدا در توده های دست کاشت استان گیلان به روش آنالیز تنه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه مازندران، ۱۰۰ ص.

مشتاق کهنمویی، محمدحسن، ۱۳۷۸. وضعیت کمی و کیفی جنگل های شمال، بازنگری طرح جامع مقدماتی جنگل های شمال کشور، سازمان جنگل ها و مراتع کشور، معاونت امور جنگل های شمال، دفتر فنی جنگلداری، ۱۰۳ ص.

نمیرانیان، منوچهر، ۱۳۷۹. مطالعه شاخص های مهم اندازه ای گونه راش در بخش گرازین از جنگل خیرودکنار، مجله منابع طبیعی ایران، ۵۷ (۴): ۶۸۹-۷۰۲.

Bates, D.M. and D.G. Watts, 1980. Relative curvature measures of nonlinearity, *Journal of the Royal Statistical Society*, 42: 1-16.

- Huang, S., S.J. Titus and D.P. Wiens, 1992. Comparison of nonlinear height–diameter functions for major Alberta tree species, *Canadian Journal of Forest Research*, 22: 1297-304.
- Krisnawati, H., Y. Wang and P.K. dan Ades, 2010. Generalised height-diameter model for *Acacia mangium* Willd. plantations in South Sumatra, *Journal of Forestry Research*, 7 (1): 19-21.
- Larson, B.C., 1986. Development and growth of even-aged stands of Douglas-fir and grand fir, *Canadian Journal of Forest Research*, 16: 367–372.
- Loetsch, F., F. Zohrer and K.E. Haller, 1973. Forest inventory, Vol. 2. BLV Verlagsgesellschaft mbH, Munich, Germany. 469 p.
- Moffat, A.J., R.W. Matthews and J.E. Hall, 1991. The effects of sewage sludge on growth and foliar and soil chemistry in pole-stage Corsican pine at Ringwood Forest, Dorset, UK, *Canadian Journal of Forest Research*, 21: 902-909.
- Özel, H. B., U. Karadavut and M. Ertekin, 2010. The use of growth models in investigating oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky.) natural juvenilities growth performance, *African Journal of Agricultural Research*, 5 (18): 2544-2550
- Pearl, R. and L.J. Reed, 1920. On the rate of growth of the population of the United States since 1790 and its mathematical representation, *Proceedings of National Academy Sciences*, 6: 275-288.
- Peng, C.H., 1999. Nonlinear height–diameter models for nine tree species in Ontario boreal forests, Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute, 28. 135pp.
- Prodan, M., 1968. Forest biometrics. English ed. Pergamon Press, Oxford. [German ed., 1961]
- Ratkowsky, D.A, 1990. Handbook of nonlinear regression, Marcel Dekker, Inc., New York, 264p.
- Ratkowsky, D.A. and T.J. Reedy, 1986. Choosing near-linear parameters in the four-parameter logistic model for radioligand and related assays, *Biometrics*, 42: 575-582.
- Richards, F.I., 1959. A flexible growth function for empirical use, *Journal of Experimental Biology*, 10: 290-300.
- Sánchez, C.A.L., J.G. Varela, F.C. Doradoa, A.R. Alboreca, R.R. Soalleiro, J.G.A. Gonzalez and F.S. Rodriguez, 2003. A height–diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (North-west Spain), *Annals of Forest Science*, 60: 237–245.
- Schnute, J., 1981. A versatile growth model with statistically stable parameters, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38: 1128-1140.
- Schreuder, H.T., W.L. Hafley and F.A. Bennett, 1979. Yield prediction for unthinned natural slash pine stands, *Forest Sciences*, 25: 25-30.
- Sharma, M. and S.Y. Zhang, 2004. Height–diameter models using stand characteristics for *Pinus banksiana* and *Picea mariana*, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19: 442–451.
- Sibbesen, E., 1981. Some new equations to describe phosphate sorption by soils, *Journal of Soil Sciences*, 32: 67-74.
- Stage, A.R., 1975. Prediction of height increment for models of forest growth, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Ogden, Utah, 18p.
- Staudhammer, C. and V. Lemay, 2000. Height prediction equations using diameter and stand density measures, *The Forestry Chronicle*, 76: 303-309.
- Stoffels, A. and J. van Soest, 1953. The main problems in sample plots. 3. height regression, *Ned Bosbouw tijdschr*, 25: 190-199, [English summary in *Forestry*. Abstract. 15: 77.]
- Sharma, R.P., 2009. Modeling height – diameter relationship for chir pine, *Banko Janakari*, 30: 1066-1070.
- Sonmez, T., 2009. Generalized height-diameter models for *Picea orientalis* L, *Journal of Environment Biology*, 30(5):767-772.
- Watts, S.B., 1983. Forestry handbook for British Columbia. 4th ed. Forestry Undergraduate Society, Vancouver, B.C, 773 pp.

Winsor, C.P., 1932. The Gompertz curve as a growth curve, *Proceedings of National Academy Sciences, U.S.A*, 18: 1-7.

Wykoff, W.R., N.L. Crookston and A.R. Stage, 1982. User's guide to the stand prognosis model, USDA Forest Service. General Technical Report, 112pp.

Yang, R.C., A. Kozak and J.H.G. Smith, 1978. The potential of Weibull-type functions as a flexible growth curves, *Canadian Journal of Forest Research*, 8: 424-431.

Zeide, B., 1993. Analysis of growth equation, *Forest Science*, 39:594-616.

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

**Comparison of non-linear height and diameter functions for oriental beech
(*Fagus orientalis* Lipsky.) in a mixed and uneven-aged Caspian forest
(Case Study: Tarbiat Modares University forest research station)**

K. Ahmadi¹, S.J Alavi^{2*}, M.Tabari Kouchaksarai³, and W.Aertsen⁴

¹ M.Sc Student, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, I.R. Iran

² Assistant Prof., Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, I.R. Iran

³ Associate Prof., Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, I.R. Iran

⁴ Assistant Prof., Division Forest, Nature and Landscape, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium

(Received: 13 February 2013, Accepted: 31 July 2013)

Abstract

Height - diameter equations are often used to estimate tree height, when tree diameter is the only measured variable. Considering that tree diameter measuring is often easier and inexpensive than tree height, height-diameter functions are generally used to estimate tree height. In this study, nineteen non-linear height-diameter equations were fitted using data of *Fagus orientalis* Lipsky in the Experimental and Educational Forest of Tarbiat Modares University. The data were split into two groups: 315 individual trees for model calibration and 290 for validation. Root Mean Square Error, adjusted R^2 , Akaike Information Criterion and Mean Difference criteria, as well as biological evaluation were applied to select the most appropriate model. Moreover, validation datasets were divided into 5-cm DBH classes and Mean Difference was computed for each model in each class. The results showed that the used models could explain a variation amount of 0.70 – 0.76. Weibull, Schnute, and Richards appeared to be suitable models with regard to mathematical and biological features. We recommend the Richards model as the best model to predict beech height trees for its better performance than the others in the Experimental and Educational Forest of Tarbiat Modares University.

Keywords: Beech tree, Caspian forests, Growth model, Non-linear regression.