مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال چهاردهم، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۴۰۱
ص ۴۷۳-۴۸۵
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI):10.22034/ijf.2022.319698.1835
شناسه دیجیتال (DOR):20.1001.1.20086113.1401.14.4.8.0

کارایی مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته در تعیین معادلات قطر- ارتفاع درختان افرا پلت و انجیلی

پروانه قادری[۱]، جهانگیر محمدی[۲*]، شعبان شتایی[۳]، رامین رحمانی[۴] و نرگس کریمی‌نژاد[۵]

[۱] کارشناسی ارشد مدیریت جنگل، دانشکدهٔ علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
[۲] نویسنده مسئول، استادیار دانشکدهٔ علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
[۳] استاد دانشکدهٔ علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
[۴] دانشیار دانشکدهٔ علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
[۵] استادیار، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴)

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته در برآورد ارتفاع درختان افرا پلت (*Acer velutinum* Bioss) و انجیلی (*Parrotia persica* (DC.) C.A.M.) و مقایسهٔ آن با مدل‌های غیرخطی در توده‌های نامنظم آمیخته در سری یک و دو جنگل شصت‌کلاتهٔ گرگان بوده است. در این تحقیق ۳۰۸ قطعه نمونهٔ دایره‌ای به مساحت ۰/۱ هکتار پیاده و مشخصه‌های نوع گونه، قطر برابرسینه و ارتفاع درختان اندازه‌گیری شد. ابتدا با استفاده از ۲۰ مدل غیرخطی قطر-ارتفاع، رابطهٔ ارتفاع و قطر برابرسینه بررسی و سپس با در نظر گرفتن مشخصه‌های قطر سطح مقطع متوسط، سطح مقطع در هکتار، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت مورد نظر، تعداد درختان در هکتار و حجم در هکتار با استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته، ارتفاع درختان برآورد شد. نتایج برازش مدل‌های غیرخطی برای گونهٔ افرا پلت نشان داد که مدل‌های Curtis و Michailoff دارای بیشترین ضریب تبیین ۰/۷۴ و کمترین جذر میانگین مربعات خطا ۳/۴۳ و ۳/۲۴ متر بودند. برای گونهٔ انجیلی نیز مدل‌های Naslund و Michailoff با ضریب تبیین ۰/۴۲ برای هر دو مدل و جذر میانگین مربعات خطای ۲/۹۲ و ۲/۹۱ متر به‌عنوان بهترین مدل‌ها انتخاب شدند. نتایج برازش مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته نشان داد که در مقایسه با مدل‌های غیرخطی، مقدار ضریب تبیین برای گونهٔ افرا پلت و انجیلی به‌ترتیب ۲۰ و ۲۳ درصد، افزایش و مقدار جذر میانگین مربعات خطا نیز برای افرا پلت و انجیلی به‌ترتیب ۱/۷۵ و ۰/۴۵ متر کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: شصت‌کلاته، مدل قطر- ارتفاع، Curtis، Michailoff، Naslund.

مقدمه

اکوسیستم‌های جنگلی از مهم‌ترین و باارزش‌ترین مؤلفه‌ها در چرخهٔ کربن جهان هستند که حدود ۸۶ درصد از کربن روی زمین و ۷۳ درصد کربن زیر زمین در آنها ذخیره شده است. این اکوسیستم‌های جنگلی حدود ۳۰/۶ درصد از مساحت کل زمین را شامل می‌شوند (FAO, 2020; Ali et al., 2021). بنابراین لازمهٔ دستیابی به مدیریت پایدار و برنامه‌ریزی صحیح این منابع جنگلی، داشتن اطلاعات دقیق و باکیفیت از مشخصه‌های کمّی حجم سرپا، زی‌توده در وضعیت حال و آینده است (Moridi et al., 2021). جنگل‌های خزری از مهم‌ترین و باارزش‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی جهان

*نویسندهٔ مسئول شمارهٔ تماس: ۰۱۷۳۲۴۷۰۵۰ ایمیل: Mohamadi.jahangir@gmail.com

است که به‌صورت نواری باریک و بلند، روی دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز به طول ۸۰۰ کیلومتر و عرض ۷۰ کیلومتر و مساحت ۱/۸۵ میلیون هکتار واقع شده است (Mohammadi et al., 2020; Abbasnezhad et al., 2018). جنگل‌های طبیعی پهن‌برگ خزری باقی‌ماندهٔ دوران سوم زمین‌شناسی و جزء جنگل‌های غنی از گونه (۸۰ گونه درختی و ۵۰ گونه درختچه‌ای) هستند. این جنگل‌ها اهمیت زیادی در تأمین چوب مصرفی، ذخیرهٔ کربن و حفاظت آب دارند. افرا پلت (*Acer velutinum* Bioss) و انجیلی (*Parrotia persica* (DC.) C.A.M.) از درختان باارزش جنگل‌های خزری هستند. افرا پلت از نظر قطر و ارتفاع از بزرگ‌ترین درختان جنگل‌های خزری است و انجیلی نیز از فراوان‌ترین درختان جنگل‌های خزری است. براساس آمار سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، افرا پلت و انجیلی حدود ۵/۸ و ۵/۴ درصد حجم سرپا و ۲/۷ و ۱۰/۵ درصد تراکم جنگل خزری را به‌ترتیب تشکیل می‌دهند و از نظر محیط زیستی و تجاری جزء گونه‌های باارزش جنگل‌های خزری‌اند که به‌صورت آمیخته با گونه‌های دیگر مانند راش، ممرز، توسکا و غیره دیده می‌شود. اطلاعات دقیق و به‌روز برای اهداف متعددی از جمله برآورد زی‌توده و بررسی عملکردهای مدیریتی و غیره ضروری است. به‌طور معمول این اطلاعات از نمونه‌برداری در جنگل با اندازه‌گیری قطر برابرسینه و ارتفاع به‌دست می‌آید و استفاده می‌شود. قطر برابرسینه و ارتفاع از مهم‌ترین مشخصه‌ها برای بررسی ساختار جنگل هستند. تعیین حجم، زی‌توده، ذخیرهٔ کربن، رویش، محصول، حاصلخیزی رویشگاه، ضریب شکل، قدکشیدگی و غیره نیازمند اطلاعات دقیق ارتفاع درخت در سطح تک‌درخت، قطعه نمونه یا توده هستند. اندازه‌گیری ارتفاع درختان نسبت به قطر برابرسینه به‌دلیل نیاز به زمان بیشتر برای اندازه‌گیری، احتمال خطای مشاهداتی و موانع موجود برای دید رفتن به بن و نوک درختان، مشکل‌تر، زمان‌بر و پرهزینه‌تر است. با توجه به وجود رابطهٔ قوی بین ارتفاع و قطر برابرسینه برای پیش‌بینی دقیق ارتفاع سایر درختان باید از مدل‌های قطر- ارتفاع دقیق استفاده شود. با توجه به رویکرد جدید مدیریت جنگل‌های هیرکانی در سال‌های اخیر براساس اهداف جنگلداری چندمنظوره، مدیران برای ارزیابی پیش‌بینی مدل‌های زی‌توده، ذخیرهٔ کربن، رویش و حجم و دیگر روابط آلومتریک در زمینهٔ مدیریت پایدار این منابع به روابط قطر- ارتفاع دقیق نیاز دارند؛ بنابراین دقت این مدل‌ها برای محاسبه و پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر ارتفاع بسیار ضروری است.

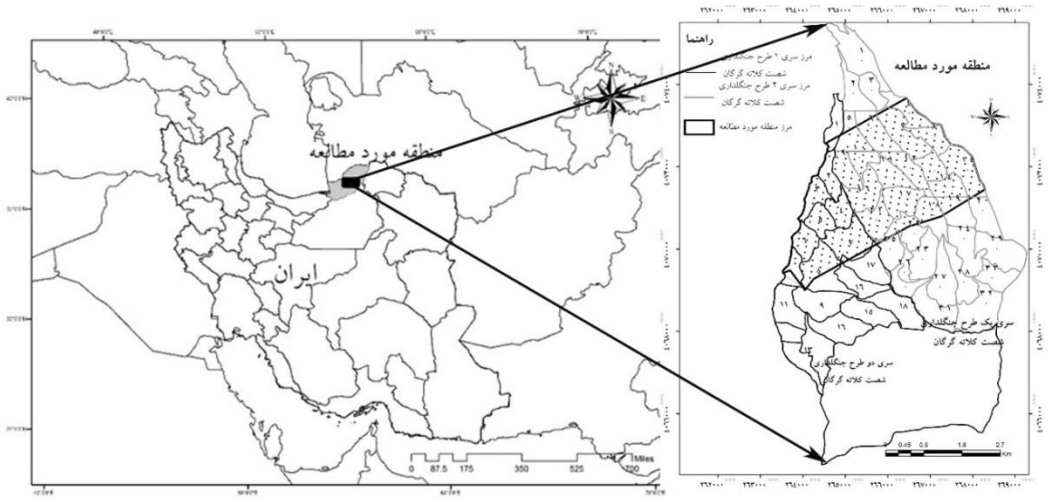
مدل‌های قطر و ارتفاع به دلایلی مانند تفاوت در اقلیم، توپوگرافی در رویشگاه‌های مختلف، برای گونه‌های مختلف، متفاوت‌اند و حتی در توده‌های همسال و خالص نیز در همهٔ موقعیت‌ها و شرایط یکسان نیستند. در توده‌های آمیختهٔ ناهمسال پهن‌برگ، درختان از نظر گونه، سن، اندازه، تاج، تراکم و موقعیت نسبی درختان در توده متفاوت‌اند و اجرای شیوهٔ تک‌گزینی و تغییرات پویایی توده نیز سبب ایجاد برخی تغییرات می‌شود؛ بنابراین روابط قطر- ارتفاع در این توده‌ها همیشه ثابت نیست. افزون‌بر این رابطهٔ قطر- ارتفاع نیز با گذشت زمان در همان توده متفاوت است. با توجه به اینکه کوچک‌ترین خطا در محاسبهٔ ارتفاع سبب افزایش خطا در برآورد دیگر مشخصه‌های مانند حجم و زی‌توده می‌شود، باید از مدل‌هایی با افزودن دیگر مشخصه‌های توده مانند قطر سطح مقطع متوسط، تعداد درختان در هکتار، حجم در هکتار، سطح مقطع در هکتار، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت مورد نظر که متأثر از شرایط اقلیمی و توپوگرافی و دخالت‌های انسان هستند برای افزایش دقت برآورد ارتفاع استفاده کرد. مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته (Mixed-effects model) ابزار مناسبی برای افزایش دقت رابطهٔ قطر- ارتفاع هستند. این مدل‌ها افزون‌بر در نظر گرفتن همزمان مؤلفه‌های ثابت (ویژگی‌های مشترک در کل جمعیت) و تصادفی (ویژگی‌های مشترک در هر قطعه نمونه) برای یک مدل، اجازهٔ تغییرپذیری در موقعیت‌ها و زمان‌های مختلف بعد از مشخص کردن ساختار ثابت معلول تابع را می‌دهند.

در این روش هم تغییرات درون قطعه نمونه و هم تغییرات بین قطعات نمونهٔ مدنظر محاسبه می‌شود. در واقع مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته امکان گنجاندن همهٔ انواع تغییرپذیری را در مدل فراهم می‌کنند و دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهند. اثرات آمیخته ممکن است خطی یا غیرخطی باشند. در بسیاری از تحقیقات از مدل‌های غیرخطی اثرات آمیخته برای برآورد ارتفاع استفاده کرده‌اند که مشخصه‌های تراکم توده، سطح مقطع، قطر سطح مقطع متوسط و ارتفاع غالب به‌عنوان متغیرهای سطح توده در نظر گرفته شده‌اند (Adame et al., 2008; Castano-Santamaria et al., 2013; Temesgen et al., 2014; Sharma et al., 2016; Crecente-Campo et al., 2010; Özçelik et al., 2018; Ferraz et al., 2018;Ogana et al., 2020). بیشتر این تحقیقات برای توده‌های همسال و جنگلکاری‌ها استفاده شده‌اند (Temesgen et al., 2014; Bronisz et al., 2020) و مطالعات کمی برای توده‌های ناهمسال و آمیخته انجام گرفته است. بررسی منابع موجود نیز در رابطه با مدل‌های مختلف رگرسیونی غیرخطی قطر- ارتفاع نشان می‌دهد که نتایج با توجه به مناطق تحت مطالعه و توده‌های جنگلی تحت بررسی متفاوت بوده است. مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته ابزاری مهم برای ارزیابی صحیح و دقیق موجودی حجمی، زی‌توده و دیگر مشخصه‌های کمّی ساختار توده‌های جنگلی پهن‌برگ آمیختهٔ شمال ایران هستند؛ بنابراین هدف این تحقیق برآورد ارتفاع دو گونهٔ باارزش افرا پلت و انجیلی با استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته و مقایسهٔ آنها با مدل‌های غیرخطی رگرسیونی در جنگل‌های ناهمسال پهن‌برگ آمیختهٔ خزری در سری یک و دو شصت‌کلاتهٔ گرگان است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

این تحقیق در سری یک و دو شصت‌کلاتهٔ گرگان در جنوب شرقی شهر گرگان با طول جغرافیایی ´۲۴ °۵۴ تا ´۲۵ °۵۴ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸ °۳۶ تا ´۴۲ °۳۶ شمالی انجام گرفت (شکل ۱) مساحت سری یک و دو طرح جنگلداری شصت کلاته ۳۷۱۶ هکتار است مساحت منطقهٔ پژوهش در سری یک (پارسل‌های ۴ تا ۲۲) ۷۶۲ هکتار و در سری ۲ (پارسل‌های ۲ تا ۷) ۳۳۸ هکتار است. منطقه براساس اطلاعات ایستگاه کلیماتولوژی هاشم‌آباد در فاصلهٔ ۵ کیلومتری شمال آن، از نظر طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه دارای اقلیم مرطوب معتدل است. مقدار بارندگی متوسط سالیانه ۱۵/۴ درجهٔ سانتی‌گراد، میانگین رطوبت نسبی سالیانه ۶۳/۲ درصد و فصل رویش حدود ۱۰ ماه است (Doctor Bahramnia, 2008).



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ پژوهش در ایران و استان گلستان

Figure 1. Location of study area in Golestan province, Iran

شیوهٔ اجرای پژوهش

نمونه‌برداری برای برداشت اطلاعات قطر برابرسینه و ارتفاع به روش منظم با شروع تصادفی با شبکهٔ ۲۰۰×۱۵۰ متر و قطعات نمونهٔ دایره‌ای با مساحت ۰/۱ هکتار انجام گرفت، به‌طوری که ۳۰۸ قطعه نمونه در منطقهٔ پژوهش پیاده شد اطلاعات نوع گونه، قطر برابرسینه و ارتفاع همهٔ درختان افرا پلت و انجیلی اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس مشخصه‌های قطر سطح مقطع متوسط، تعداد درختان در هکتار، حجم در هکتار، سطح مقطع در هکتار و سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت مورد نظر محاسبه و به‌عنوان متغیرهای در سطح قطعه نمونه به مدل‌های غیرخطی اثرات آمیخته برای دو گونهٔ افرا پلت و انجیلی اضافه شد.

روش تحلیل

ابتدا بررسی اولیهٔ آماره‌های توصیفی و نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف صورت گرفت و ۷۵ درصد در فرایند مدل‌سازی و ۲۵ درصد برای ارزیابی استفاده شد. سپس با استفاده از مدل‌های غیرخطی رگرسیونی ارتباط بین ارتفاع به‌عنوان متغیر وابسته و قطر، به‌عنوان متغیر مستقل بررسی و با اعتبارسنجی آنها بهترین مدل‌ها برای برآورد ارتفاع انتخاب شد. براساس سوابق تحقیق، ۲۰ مدل از بهترین مدل‌های رگرسیونی غیرخطی قطر- ارتفاع برای بررسی رابطهٔ قطر- ارتفاع انتخاب شد (جدول ۱). همهٔ تجزیه‌وتحلیل‌های آماری با استفاده از بسته‌های Lmfor و Lme4 در نرم‌افزار R انجام گرفت (Chambers, 2008).

جدول ۱- مدل‌های قطر- ارتفاع رگرسیونی به‌کاررفته در تحقیق

Table 1. Height-diameter models used in this study

شماره مدل Model number	اسم مدل Model name	مدل Model	شمارهٔ مدل Model number	اسم مدل Model name	مدل Model
1	Naslund	$H = 1.30 + \frac{DBH^2}{(\beta0 + \beta1 DBH)^2}$	2	Curtis	$H = 1.30 + \beta0(\frac{DBH}{1 + DBH})^{\beta1}$
3	Michailoff	$H = 1.30 + \beta0 e^{-\beta1 DBH^{-1}}$	4	Meyer	$H = 1.30 + \beta0(1 - e^{-\beta1 DBH})$
5	Power	$H = 1.30 + \beta0 DBH^{\beta1}$	6	Naslund2	$H = 1.30 + \frac{DBH^2}{(\beta0 + e^{\beta1} DBH)^2}$
7	Naslund3	$H = 1.30 + \frac{DBH^2}{(e^{\beta0} + \beta1 DBH)^2}$	8	Naslund4	$H = 1.30 + \frac{DBH^2}{(e^{\beta0} + e^{\beta1} DBH)^2}$
9	Michaelis-Menten	$H = 1.30 + \frac{\beta0 DBH}{\beta1 + DBH}$	10	Michaelis-Menten2	$H = 1.30 + \frac{DBH}{\beta0 + \beta1 \times DBH}$
11	Wykoff	$H = 1.30 + \exp(\beta0 + \frac{\beta1}{DBH + 1})$	12	Prodan	$H = 1.30 + \frac{DBH^2}{\beta0 + \beta1 DBH + \beta2 DBH^2}$
13	Logistic	$H = 1.30 + \frac{\beta0}{1 + \beta1 e^{-\beta2 DBH}}$	14	Chapman-Richards	$H = 1.30 + \beta0(1 - e^{-\beta1 DBH})^{\beta2}$
15	Weibull	$H = 1.30 + \beta0(1 - e^{-\beta1 DBH^{\beta2}})$	16	Gomperz	$H = 1.30 + \beta0 \exp(-\beta1 \exp(-\beta2 DBH))$
17	Sibbesen	$H = 1.30 + \beta0 DBH^{\beta1 DBH^{-\beta2}}$	18	Korf	$H = 1.30 + \beta0 \exp(-\beta1 DBH^{-\beta2})$
19	Ratkowsky	$H = 1.30 + \beta0\ exp(\frac{-\beta1}{DBH + \beta2})$	20	Hossfeld IV	$H = 1.30 + \frac{\beta0}{1 + \frac{1}{\beta1 DBH^{\beta2}}}$

DBH قطر برابرسینه برحسب سانتی‌متر، H ارتفاع کل درختان برحسب متر و $\beta0$، $\beta1$ و $\beta2$ ضرایب مدل

DBH: diameter at breast height (cm), H: tree height (m), β_0,β_1,β_2 are coefficient model

فرمول عمومی مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته به‌صورت زیر است (رابطه‌های ۱ تا ۵).

$$H_{ij} = f\left(\beta_{ij}, DBH_{ij}\right) + \varepsilon_{ij},$$
$$i = 1,\ldots,M,\ j = 1,\ldots,n_i$$
$$\varepsilon_{ij} \sim N[0, R_i(\beta, b_i, \rho)$$

رابطهٔ ۱

که در آن H_{ij} برابر است با j امین مشاهده (ارتفاع درخت) در پلات i، DBH_i اندازهٔ قطر برابرسینهٔ درخت در قطعه نمونهٔ i، f تابع غیرخطی و β_i بردار پارامترهای مدل در قطعه نمونهٔ i است که می‌توان آن را به مؤلفه‌های ثابت و تصادفی تقسیم کرد. M تعداد قطعات نمونه و n_i تعداد مشاهدات در i امین قطعه نمونه است. مؤلفهٔ ثابت برای جمعیت مشترک و مؤلفه تصادفی در قطعات نمونه مختلف متفاوت است؛ بنابراین k امین عنصر پارامتر در بردار β_{ij} به‌عنوان تابع خطی ثابت و خطی با اثرات تصادفی طبق معادلهٔ زیر مدل‌سازی می‌شود (رابطهٔ ۲).

$$\beta_{ijk} = \left(X'_{ijk}\beta_k + Z'_{ijk}b_{ik}\right),$$
$$k = 0,\ldots,p-1,\ b_{ik} \sim N\left(0, \Psi_k\right)$$

رابطهٔ ۲

به‌صورت ماتریس، معادله‌های ۱ و ۲ را می‌توان به‌صورت زیر نوشت (رابطهٔ ۳):

$$\beta_i = \left(X_i\beta + Z_i b_i\right),\quad b_i \sim N\left(0, \Psi\right)$$

رابطهٔ ۳

این دو معادله را می‌توان ترکیب کرد (رابطهٔ ۴):

$$H_{ij} = f\left(X_i, \beta, Z_i, b_i\right) + \varepsilon_{ij}$$

رابطهٔ ۴

تفاوت بردارهای پارامتر در قطعات نمونه مختلف یکی از ویژگی‌های اصلی مدل‌های اثرات آمیخته است؛ بنابراین β بردار $p \times 1$ از پارامترهای ثابت جمعیت که به نوع رویشگاه بستگی ندارد (p : تعداد پارامترهای ثابت مدل)، b_i بردار $q \times 1$ اثرات تصادفی در قطعه نمونهٔ i، (q: تعداد مشخصه‌های تصادفی مدل) و Z_i و X_i به‌ترتیب ماتریس‌های $q \times r$ و $p \times r$ (r: کل مشخصه‌های مدل) برای اثرات ثابت تصادفی در هر قطعه نمونه یا هر رویشگاه هستند. عناصر این ماتریس‌ها به‌طور معمول صفر و ۱ یا مقدار کوواریانس‌های مرتبط با اثرات ثابت و تصادفی هستند. $R_i(\beta, b_i, \rho)$ و Ψ به‌ترتیب ماتریس کوواریانس برای مشاهدات تکراری $(n_i \times n_i)$ و اثرات تصادفی $(q \times q)$ در قطعه نمونهٔ i است و $\varepsilon_i = (\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2}, \ldots, \varepsilon_{in_i})^T$ خطاهای تصادفی در قطعه نمونهٔ i است (Özçelik et al., 2018). امکان استفاده از این بردارها بسته به نوع رویشگاه و درختان موجود در آن رویشگاه، امکان استفاده از متغیرهای تصادفی سطح قطعه نمونه را ممکن می‌کند. این متغیرها به‌صورت غیرخطی وارد مدل می‌شوند و آنها را به مدل غیرخطی با اثرات آمیختهٔ چندسطحی تبدیل می‌کنند.

هنگامی‌که متغیری تصادفی مانند قطر برابرسینهٔ درخت به مدل اضافه شود رابطهٔ ۲ برابر می‌شود با رابطهٔ ۵:

$$\beta_{0ij} = \beta_0 + b_i,\quad b_i \sim N\left(0, D\right)$$

رابطهٔ ۵

در این تحقیق مشخصه‌های سطح مقطع در هکتار ($BA(m^2.ha^{-1})$)، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت مورد نظر (BAL)، حجم در هکتار ($V/h(m^3.ha^{-1})$)، قطر سطح مقطع متوسط (QM(cm)) و تعداد درختان در هکتار ($N/h(N.ha^{-1})$) در هر قطعه نمونه تحت عنوان متغیرهای تصادفی در قطعات نمونه در مدل‌های غیرخطی مذکور گنجانده شد (رابطهٔ ۶):

$$\beta_{0ij} = \beta_{00} + +\beta_{01}BA_{ij} + \beta_{02}BAL_{ij} + \beta_{03}V/h_{ij} + \beta_{04}QM_{ij} + \beta_{05}N/h_{ij} + b_i,\ b_i \sim N\left(0, D\right)$$

رابطهٔ ۶

و به‌عنوان مدل با اثرات آمیخته در نظر گرفته شد (جدول ۲).

با در اختیار داشتن مقادیر تخمینی ($\hat{y}_i$) و مقادیر حقیقی (y_i) با استفاده از معیارهای آماری ضریب تبیین (R^2) جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد میانگین تفاوت‌ها ($\bar{D}\%$) اعتبار مدل‌های آماری ارزیابی شد (رابطه‌های ۷ تا ۹).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{y}i - yi\right)^2} \Big/ n$$

رابطهٔ ۷

رابطهٔ ۸ $$\bar{D} = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}i - yi) \Big/ n$$

رابطهٔ ۹ $$\bar{D}\% = \bar{D} / \bar{\varepsilon}_i \times 100$$

n تعداد نمونه‌های ارزیابی، $\hat{y}_i$ مقدار تخمین‌زده‌شده، y_i مقدار مشاهده‌شده $\bar{y}_i$ و میانگین مقادیر مشاهده‌شده است.

نتایج

براساس بررسی آماره‌های توصیفی درختان افرا پلت و انجیلی میانگین، کمینه و بیشینهٔ قطر برابرسینهٔ گونه افرا پلت به‌ترتیب ۳۵/۱، ۹ و ۱۶۵ سانتی‌متر و ارتفاع به‌ترتیب ۲۰/۲۴، ۸/۶ و ۳۵ متر، و میانگین، کمینه و بیشینهٔ قطر برابرسینهٔ گونهٔ انجیلی نیز به‌ترتیب ۲۷/۴۳، ۱۲ و ۱۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع به‌ترتیب ۱۷/۲۴، ۵ و ۳۲/۹ متر بود (جدول ۲). نتایج آماره‌های توصیفی مشخصهٔ دو گونه نشان داد که دامنهٔ تغییرات این مشخصه‌ها زیاد است که نشان‌دهندهٔ کل دامنهٔ مشخصه‌های کمّی ساختار توده‌های جنگلی بررسی‌شده است (جدول ۳).

جدول ۲- مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیختهٔ انتخاب‌شده، برای گونه‌های افرا پلت و انجیلی

Table 2. Nonlinear mixed-effects model selected for *A. velutinum* and *P. persica*

گونه Species	مدل غیرخطی با اثرات آمیخته Nonlinear mixed-effects model
افرا پلت *A. velutinum*	$H = 1.30 + \beta 0 \left(\frac{DBH}{1+DBH}\right)^{\beta 1}$ $\beta_0 = a_0 + a_1 \times BA + a_2 \times BAL + a_3 \times Vh + a_4 \times QM + a_5 \times Nh$ $H = 1.30 + \beta 0 e^{-\beta 1 DBH^{-1}}$ $\beta_0 = a_0 + a_1 \times BA + a_2 \times BAL + a_3 \times Vh + a_4 \times QM + a_5 \times Nh$
انجیلی *P. persica*	$H = 1.30 + \frac{DBH^2}{(\beta 0 + \beta 1 DBH)^2}$ $\beta_0 = a_0 + a_1 \times BA + a_2 \times BAL + a_3 \times Vh + a_4 \times QM + a_5 \times Nh$ $H = 1.30 + \beta 0 e^{-\beta 1 DBH^{-1}}$ $\beta_0 = a_0 + a_1 \times BA + a_2 \times BAL + a_3 \times Vh + a_4 \times QM + a_5 \times Nh$

جدول ۳- آماره‌های توصیفی مشخصه‌های بررسی‌شدهٔ درختان افرا پلت و انجیلی

Table 3. Descriptive statistics of investigated characteristics of *A. velutinum* and *P. persica*

متغیرها Variables	قطر برابرسینه DBH (cm)	ارتفاع Height (m)	تعداد درختان در هکتار tree density	میانگین کوادراتیک قطر Quadratic mean (cm) DBH	سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت مورد نظر (m^2/ha)BAL	سطح مقطع Basal area (m^2/ha)	حجم در هکتار Stand volume (m^3/ha)
افرا پلت *A. velutinum*							
میانگین Mean	35.1	20.24	284.97	21.12	1.46	7.05	77.75
حداکثر Max	165	35	550	135	3.77	35.68	471.14
حداقل Min	9	8.6	80	0.34	0.01	0.095	0.6
انحراف از معیار S.D	25.65	6.48	140.46	23.11	1.06	5.28	65.88
انجیلی *P. persica*							
میانگین Mean	27.46	17.24	148.45	8.75	1.39	9.99	95.1
حداکثر Max	110	32.9	420	55.04	5.58	28.79	304.84
حداقل Min	12	5	10	0.54	0.01	0.15	0.8
انحراف از معیار S.D	13.42	4.2	78.26	4.39	0.92	5.21	54.02

در این تحقیق برای برآورد ارتفاع درختان انجیلی از مجموع ۳۴۵۱ جفت مشاهدهٔ قطر- ارتفاع، ۷۵ درصد (۲۵۸۸ درخت) در فرایند مدل‌سازی به‌کار گرفته شد و ۲۵ درصد (۸۶۳ درخت) بقیه برای ارزیابی مدل‌های برآوردی استفاده شد. همچنین برای برآورد ارتفاع درختان افرا پلت نیز از مجموع ۴۶۸ جفت مشاهدهٔ قطر- ارتفاع، ۷۵ درصد (۳۵۱ درخت) در فرایند مدل‌سازی و ۲۵ درصد (۱۱۷ درخت) برای ارزیابی استفاده شد. نتایج برازش مدل‌های رگرسیونی غیرخطی نشان داد که برای گونهٔ انجیلی، دو مدل رگرسیونی غیرخطی Naslund و Michailoff با ضریب تبیین ۰/۴۲ برای هر دو مدل، جذر میانگین مربعات خطا به‌ترتیب ۲/۹۲ و ۲/۹۱ متر دارای بهترین برازش بودند (جدول ۴). همچنین نتایج نشان داد که مدل غیرخطی Naslund مقادیر ارتفاع را کمتر از مقدار واقعی و مدل Michailoff مقادیر ارتفاع را کمتر از مقدار واقعی برآورد کردند. نتایج برازش مدل‌های رگرسیونی غیرخطی برای گونهٔ افرا پلت نیز نشان داد که مدل‌های Curtis و Michailoff با ضریب تبیین ۰/۷۴ برای هر دو مدل و جذر میانگین مربعات خطای به‌ترتیب ۳/۴۳ و ۳/۲۴ متر، بهترین مدل غیرخطی رگرسیونی هستند (جدول ۴). همچنین مدل غیرخطی Curtis مقادیر ارتفاع را بیشتر از مقدار واقعی و مدل Michailoff مقادیر ارتفاع را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرد. البته شایان ذکر است که نتایج مدل‌ها، تفاوت زیادی در معیارهای ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا با یکدیگر نداشت.

نتایج آزمون کولموگروف- اسمیرنوف نشان داد که مشخصه‌های ارتفاع و قطر برابرسینه از توزیع نرمال پیروی می‌کنند (p-value >0.05). بررسی و تحلیل باقی‌مانده‌های مدل‌های مذکور نشان می‌دهد که میانگین باقی‌مانده‌ها به‌طور تقریبی صفر و دارای توزیع نرمال بود. همچنین هیستوگرام باقی‌مانده‌ها چولگی نداشت و نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر تطبیق‌یافته از پراکنش یکنواخت در دو سوی محور صفر و ثبات واریانس داشت که نشان از تناسب مدل‌ها داشت. نتایج برازش مدل‌های غیرخطی اثرات آمیخته برای گونهٔ افرا پلت نشان داد که مدل‌های Curtis و Michailoff با ضریب تبیین ۰/۹۴ و جذر میانگین مربعات خطا ۱/۵۳ متر برای هر دو مدل، ارتفاع درختان افرا پلت را برآورد کردند. مدل‌های Naslund و Michailoff با ضریب تبیین ۰/۶۵ برای هر دو مدل، جذر میانگین مربعات خطای نسبی را به‌ترتیب ۲/۴۷ و ۲/۴۶ متر و ارتفاع درختان انجیلی را برآورد کردند (جدول ۵).

نتایج حاصل از آنالیز باقی‌مانده‌ها در برابر مقادیر نسبی قطر برابرسینه درختان انجیلی نشان داد که باقی‌مانده‌ها هیچ‌گونه روندی ندارند و در دو طرف صفر، تقریباً برابرند. Michailoff دارای کمترین اشتباه معیار باقی‌مانده است (شکل ۲، B). همچنین برای گونهٔ افرا پلت نیز باقی‌مانده‌ها روندی ندارند و در دو طرف صفر تقریباً برابرند و برای این‌گونه مدل Michailoff دارای کمترین اشتباه معیار یا باقی‌مانده است (شکل ۲ C).

جدول ۴- ضرایب و اعتبارسنجی مناسب‌ترین مدل‌های رگرسیونی غیرخطی

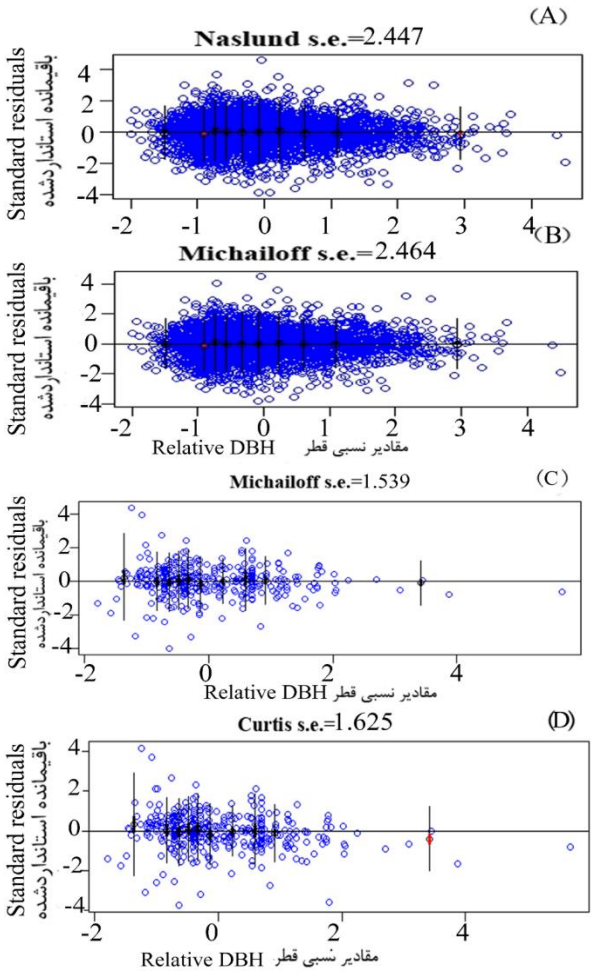
Table 4. Coefficients and validation of the selected nonlinear regression models

	شمارهٔ مدل Model number	ضرایب مدل‌ها Coefficients			اعتبارسنجی مدل‌ها Validation		
		$\beta 0$	$\beta 1$	$\beta 2$	R^2	RMSE	$\overline{D\%}$
افراپلت *A. velutinum*	Model 2	32.39	12.35	-	0.74	3.43	12.33
	Model 3	31.045	12.75	-	0.74	3.24	11.33
انجیلی *P. persica*	Model 1	1.3	0.2	-	0.42	2.92	13.5
	Model 3	22.41	10.57	-	0.42	2.91	13.42

جدول ۵- برازش مدل‌های اثرات آمیخته غیرخطی و ضرایب اثرات تصادفی و ثابت

Table 5. Nonlinear mixed-effects model ans fixed and random coefficients

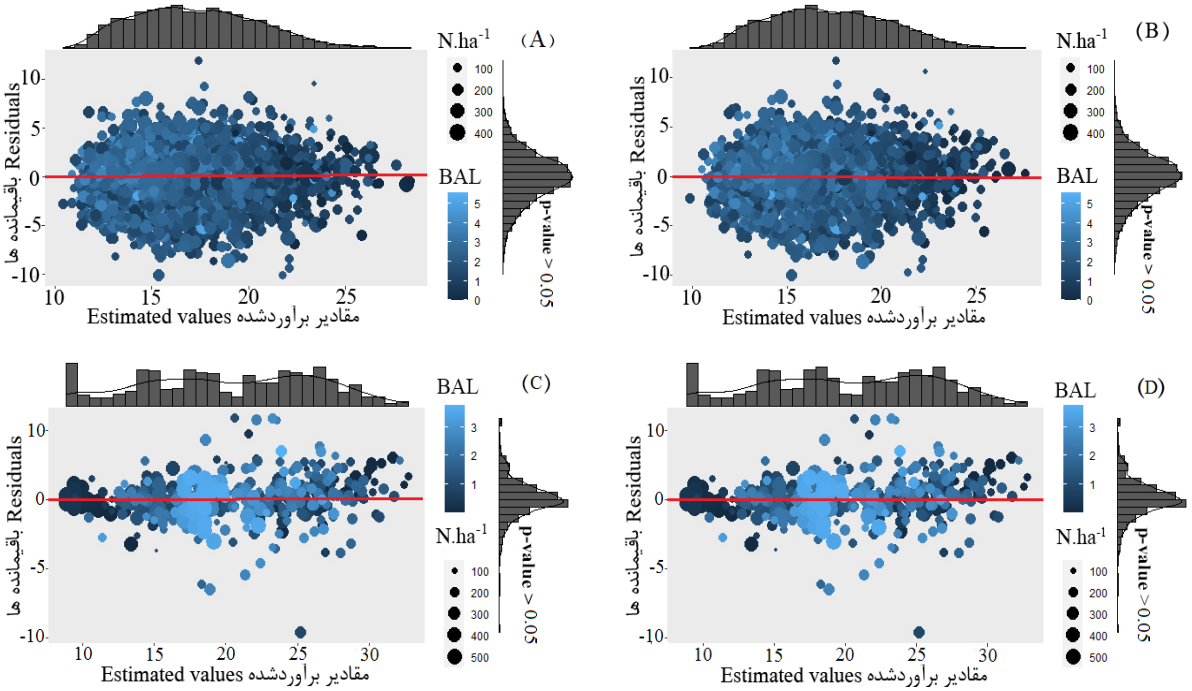
$\bar{D}$%	RMSE	R^2	ضرایب تصادفی Random coefficients		ضرایب ثابت Fixed coefficients		مدل اثرات آمیخته Nonlinear mixed-effects model	
			a_2	a_1	$\beta 1$	$\beta 0$		
5.1	1.53	0.94	12.16	32.13	11.48	29.49	Curtis	افراپلت *A. velutinum*
5.11	1.53	0.94	12.55	30.77	11.055	29.28	Michailoff	
10.93	2.46	0.65	10.24	24.10	9.48	23.91	Michailoff	انجیلی *P. persica*
10.86	2.47	0.65	0.20	1.29	0.2	1.24	Naslund	



شکل ۲- مقادیر باقی‌ماندهٔ مدل‌های Michailoff و Naslund برای گونهٔ انجیلی (الف و ب) و مدل‌های Michailoff و Curtisبرای گونهٔ افرا پلت (ج و د) با نقاط آبی باقی‌مانده استانداردشده و نقاط سیاه روی خط y = ۰ میانگین باقی‌مانده‌ها در ۱۰ طبقه قطری استانداردشده را نشان می‌دهند. خطوط عمودی باریک نشان‌دهندهٔ فاصلهٔ اطمینان از مشاهدات فردی (میانگین ± ۱/۹۶ انحراف معیار) است و خطوط عمودی ضخیم (درون نقاط سیاه) نشان‌دهندهٔ فاصله اطمینان ۹۵ درصد از میانگین طبقات است. خطوط ضخیمی که از خط افقی y = ۰ عبور نمی‌کنند بارنگ قرمز نشان داده می‌شوند.

Figure 2- Residual values of Michailoff and Naslund models for *P.persica* species (a and b) and Michailoff and Curtis models for the *A. velutinum* species (c and d) with standardized residual blue point and black point on the 0 line y = average residuals that showes 10 DBH class standardized. Thin vertical lines indicate the confidence interval of individual observations (mean ± 1.96 standard deviations), and thick vertical lines (within black dots) indicate the 95% confidence interval of the class mean. Thick lines that do not cross the horizontal line y = 0 are shown in red

نتایج حاصل از تحلیل باقی‌مانده‌های مدل Naslund و Michailoff گونهٔ انجیلی نشان داد که میانگین باقی‌مانده‌های درختان تقریباً صفر و دارای توزیع نرمال‌اند (p-value>۰/۰۵) و هیستوگرام باقی‌مانده‌ها چولگی ندارد و نمودار باقی‌مانده‌ها نشان از پراکنش یکنواخت در دو سوی محور صفر و ثبات واریانس دارد (شکل ۳). همچنین تحلیل باقی‌مانده‌های مدل Curtis و Michailoff گونهٔ افرا پلت نیز نتایج مشابهی داشت. به‌طور کلی نمودارها مؤید تناسب مدل‌هاست.



شکل ۳- نمودار باقی‌مانده‌ها، هیستوگرام و نرمال باقی‌مانده‌ها مدل‌های Naslund (A) وMichailoff (B) برای گونهٔ انجیلی و مدل‌های Michailoff (C) و Curtis (D) برای گونهٔ افرا پلت با نقاط آبی در برابر مقادیر برآوردشدهٔ ارتفاع و رابطهٔ آنها با تعداد درختان در هکتار ($N.ha^{-1}$) که با اندازهٔ دایره مشخص می‌شود و سطح مقطع بزرگ‌ترین درختان (BAL) که با رنگ آبی مشخص می‌شود.

Figure 3- Residuals, normal and histogram residuals diagram of Naslund (A) and Michailoff (B) models for the *P.persica* species and Michailoff (C) and Curtis (D) models for *A. velutinum* species with blue dots against estimated tree height and their relationship with the tree density ($N.ha^{-1}$) which is determined by the size of the circle and the BAL is determined by the blue color.

بحث

در مورد معادلات رگرسیونی غیرخطی قطر- ارتفاع برای برآورد ارتفاع درختان افرا پلت و انجیلی در جنگل‌های شمال ایران و به‌ویژه استان گلستان مطالعات بسیار کمی انجام گرفته است. افزون‌بر آن تاکنون معادلات غیرخطی با اثرات آمیخته برای برآورد ارتفاع دو گونهٔ باارزش مذکور در جنگل‌های شمال ایران انجام نگرفته است. بنابراین تعیین معادلات دقیق قطر- ارتفاع برای دو گونهٔ افرا پلت و انجیلی در جنگل‌های شمال ایران در جنگل‌های ناهمسال آمیخته و نامنظم اهمیت زیادی دارد. با توجه به نتایج این پژوهش، در جنگل‌های ناهمسال آمیخته و نامنظم، در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های غیرخطی قطر- ارتفاع با مقدار جذر میانگین مربعات حاصل‌شده در این تحقیق برای گونهٔ انجیلی حدود ۲/۹ متر و ضریب تبیین ۰/۴۲ توانسته ارتفاع درختان انجیلی را با دقت مناسب برآورد کند. جذر میانگین مربعات حاصل‌شده برای گونهٔ انجیلی

(حدود ۲/۹۰ متر) در مقایسه با پژوهش‌های Mohammadi & Shataee (2017), Alemi et al. (2020),Abedi & Abedi (2020) نیز تفاوت زیادی نداشت. عواملی مانند نوع توده (پهن‌برگ یا سوزنی‌برگ)، ناهمسال یا همسال بودن، منظم یا نامنظم بودن، نوع مدل مورد استفاده و شیوه‌های مختلف مدیریتی از دلایل این تفاوت‌هاست. برای گونهٔ افرا پلت نیز در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های غیرخطی قطر- ارتفاع با مقدار جذر میانگین مربعات حاصل‌شدهٔ حدود ۳/۳ متر و ضریب تبیین ۰/۷۴ توانسته‌اند ارتفاع درختان را با دقت مناسب برآورد کنند. جذر میانگین مربعات حاصل‌شده در این تحقیق برای گونهٔ افرا پلت (حدود ۳/۳ متر) در مقایسه با پژوهش Temesgen et al. (2014), Ahmadi et al. (2016), Kalbi et al. (2018), Alemi et al. (2020), Sharma (2009),Sharma et al. (2016) با جذر میانگین مربعات خطا (۲ تا ۴ متر) تفاوت چندانی نداشت. نتایج این تحقیق مطابق با یافته‌های Mehtätalo et al. (2015)، نشان داد که مدل‌های Curtis و Naslund مناسب‌ترین مدل قطر- ارتفاع هستند. با افزودن مشخصه‌های سطح مقطع در هکتار، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت مورد نظر، حجم در هکتار، قطر سطح مقطع متوسط و تعداد درختان در هکتار تحت عنوان متغیرهای تصادفی در مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته مقدار ضریب تبیین در حدود ۲۰ درصد برای گونه افرا پلت و نیز در حدود ۱۳ درصد برای گونه انجیلی افزایش و مقدار خطا در حدود دو متر برای گونه افرا پلت کاهش پیدا کرد و برای گونهٔ انجیلی ۰/۵ متر کاهش یافت که با نتایج پژوهش Adame et al. (2008), Castano-Santamaria et al. (2013), Temesgen et al. (2014), Sharma et al. (2016), Crecente-Campo et al. (2010), Özçelik et al. (2018), Ogana et al. (2020), Ferraz et al. (2018) مطابقت دارد و مؤید این است که مدل‌های با اثرات آمیخته در مقایسه با مدل های غیرخطی، ارتفاع درختان را با دقت بهتری برآورد می‌کنند. در مورد تفاوت نتایج جذر میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین حاصل از این تحقیق با برخی پژوهش‌ها می‌توان به عوامل مختلفی از جمله ناهمگن بودن منطقه از نظر پراکنش، نوع جنگل (سوزنی‌برگ، پهن‌برگ و مخلوط سوزنی‌برگ و پهن‌برگ)، زیاد بودن دامنهٔ تغییر در مقدار ارتفاع و غیره اشاره داشت. امید می‌رود پژوهش‌های تکمیلی دربارهٔ برازش مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته قطر- ارتفاع برای گونه‌های دیگر در بقیهٔ رویشگاه‌ها، افزایش تعداد درختان انتخاب‌شده برای پردازش مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته و استفاده از دیگر متغیرهای کمّی توده در مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته انجام گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته در مقایسه با مدل‌های غیرخطی رگرسیونی سبب بهبود دقت برآورد ارتفاع درختان به‌ویژه در توده‌های ناهمسال نامنظم آمیخته می‌شود و مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته با در نظر گرفتن متغیرهای تصادفی سطح توده افزون‌بر حفظ رابطهٔ قطر- ارتفاع سبب بهبود دقت مدل‌ها می‌شوند و این مدل‌ها تغییرات توده را به‌خوبی نشان می‌دهند؛ بنابراین می‌توان از این رویکرد به‌عنوان روشی مناسب و جایگزین مدل‌های غیرخطی معمول علی‌رغم پژوهش‌های بسیار کم در این زمینه استفاده کرد. امید می‌رود که مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته برای همهٔ گونه‌های مهم خزری تهیه شود تا بتوان از اطلاعات دقیق در برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع جنگلی و برنامه‌های حفاظتی استفاده کرد و به‌صورت عملیاتی از این مدل‌ها در برنامه‌ریزی جنگل بهره گرفت.

References

Abbasnezhad, A., Darvish Sefat, A.A., & Bazrafshan, J. (2018). Comparison of landsat 8 satellite data and SEBAL model for estimating evapotranspiration of Caspian forests with combined Penman Monteith. *Iranian Journal of Forest, 10*(3), 389-402.

Abedi, R., & Abedi, T. (2020). Some non-linear height-diameter models performance for mixed stand in forests in Northwest Iran. *Journal of Mountain Science*, *17*(5), 1084-1095. https://doi.org/10.1007/s11629-019-5870-4.

Adame, P., del Río, M., & Canellas, I. (2008). A mixed nonlinear height–diameter model for pyrenean oak (Quercus pyrenaica Willd.). *Forest ecology and management, 256* (1-2), 88-98. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.006.

Ahmadi, K., & Alavi, S.J. (2016). Generalized height-diameter models for *Fagus orientalis* Lipsky in Hyrcanian forest, Iran. *Journal of forest science, 62*(9), 413-421. https://doi.org/10.17221/51/2016-JFS.

Alemi, A., oladi, J., fallah, A., & maghsodi, Y. (2020). Evaluating of Different Height-Diameter Nonlinear Models for Hornbeam in Uneven-Aged Stands (Case Study: Golestan Rezaeian Forest). *Ecology of Iranian Forest, 8*(16), 29-38.

Ali, H., Mohammadi, J., & Shataee, Sh. (2021). Determination of allometric equations for estimating stem biomass of three species of Pinus brutia Ten., Pinus pinea L. and Cupressus sempervirens L. in the Arabdagh reforests, Golestan province. *Iranian Journal of Forest*, *13*(3), 251-270. https://doi.org/10.22034/ijf.2021.279462.1772.

Bronisz, K., & Mehtätalo, L. (2020). Mixed-effects generalized height–diameter model for young silver birch stands on post-agricultural lands. *Forest Ecology and Management, 460*, 117901. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117901.

Castano-Santamaria, J., Crecente-Campo, F., Fernandez-Martinez, J.L., Barrio-Anta, M., & Obeso, J.R. (2013). Tree height prediction approaches for uneven-aged beech forests in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management, 307*, 63-73. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.014

Chambers, J.M. (2008). Software for data analysis: programming with R (Vol. 2). New York: Springer, 504p.

Crecente-Campo, F., Tomé, M., Soares, P., & Diéguez-Aranda, U. (2010). A generalized nonlinear mixed-effects height–diameter model for *Eucalyptus globulus* L. in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management, 259*(5), 943-952. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.036.

Doctor Bahramnia Forestry Plan district one. (2008). Forest Science Faculty, Gorgan university of Agricultural Sciences and Natural Recourses, 478p.

FAO. (2020). The State of the World's Forests, 46p.

Ferraz, A.C., Mola-Yudego, B., Ribeiro, A., Scolforo, J.R.S., Loos, R.A., & Scolforo, H.F. (2018). Height-diameter models for Eucalyptus sp. plantations in Brazil. *Cerne, 24*, 9-17. https://doi.org/10.1590/01047760201824012466.

Kalbi, S., Fallah, A., Bettinger, P., Shataee, S., & Yousefpour, R. (2018). Mixed-effects modeling for tree height prediction models of *Oriental beech* in the Hyrcanian forests. *Journal of Forestry Research, 29*(5), 1195-1204. https://doi.org/10.1007/s11676-017-0551-z.

Mehtätalo, L., de-Miguel, S., & Gregoire, T.G. (2015). Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian Journal of Forest Research, 45*(7), 826-837. https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0054.

Mohammadi, J., & Shataee, S. (2017). Study of different height-diameter models for hornbeam *(Carpinus betulus L.)* in uneven-aged stands of Shastkalateh forest of Gorgan. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 24*(4), 700-712, https://doi.org/10.22092/ijfpr.2016.109448.

Mohammadi, J., Shataee, S., & Næsset, E. (2020). Modeling tree species diversity by combining ALS data and digital aerial photogrammetry. *Science of Remote Sensing, 2*, p.100011,1-11. https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100011.

Moridi, M., Fallah, A., Pourmajidian, M.R., & Sefidi, K. (2021). Quantitative Analysis of Forest Structure at Growing Up Volume Stage in the Evaluation of Natural Beech Stands (Case Study: Kheyroud Forest). *Iranian Journal of Forest*, *13*(2), 115-128. https://doi.org/10.22034/ijf.2021.136934.

Ogana, F.N., & Gorgoso-Varela, J.J. (2020). A nonlinear mixed-effects tree height prediction model: Application to *Pinus pinaster* Ait in Northwest Spain. *Trees, Forests and People, 1,* p.100003, 1-6. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100003.

Özçelik, R., Cao, Q.V., Trincado, G., & Göçer, N. (2018). Predicting tree height from tree diameter and dominant height using mixed-effects and quantile regression models for two species in Turkey. *Forest Ecology and Management, 419*, 240-248. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.051.

Sharma, R.P. (2009). Modelling height-diameter relationship for Chir pine trees. *Banko Janakari, 19*(2), 3-9.

Sharma, R.P., Vacek, Z., & Vacek, S. (2016). Nonlinear mixed effect height-diameter model for mixed species forests in the central part of the Czech Republic. *Journal of Forest Science, 62*(10), 470-484. https://doi.org/10.17221/41/2016-JFS.

Temesgen, H., Zhang, C.H., & 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. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.035.

Iranian Journal of Forest
Vol. 14, No. 4, Winter 2023
pp. 473-485

Research Article

Efficiency of nonlinear mixed-effects model in determining height-diameter equations of velvet maple and ironwood trees

P. Ghaderi [1], J. Mohammadi[2*], Sh. Shataee[3], R. Rahmani[4], N. Kariminejad[5]

[1] M.Sc. Student, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran
[2] Assistant Prof., Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran.
[3] Prof., Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran
[4] Associate Prof., Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran
[5] Assistant Prof., Faculty of agriculture, Shiraz university, Shiraz, I. R. Iran.

(Received: 20 December 2021; Accepted: 04 June 2022)

Abstract

The aim of this study was to develop a mixed-effects model and compare it with nonlinear models for estimating the heights of velvet maple and ironwood trees in the uneven-aged, mixed Shast-kalateh forests of Gorgan. We applied a systematic sampling method to collect field data within a 150×200 m network, comprising of 308 circular sample plots, and measured the height, diameter at breast height (DBH), and tree species in each plot. Model fitting was done in two stages: In the first stage, we used a fixed-effect approach to select candidate models, where height was the dependent variable and DBH was the independent variable. In the second stage, the dominant height, mean DBH, basal area, basal area of trees larger than the desired tree, tree density, and volume of trees were refitted using a mixed-effect approach. We used adjusted coefficient of determination and root mean square error to assess the models. The results of fitting nonlinear models for velvet maple species showed that the Curtis and Michailief models with R2 values of 0.74 and the lowest RMSE values of 3.43 and 3.24, respectively, were the best models. For ironwood trees, the Nassland and Michailoff models with R2 values of 0.42 and the RMSE values of 2.92 and 2.91 m were selected as the best models. The results of fitting the nonlinear mixed-effect model showed that compared to the nonlinear models, the R2 values for velvet maple and ironwood species increased by 20% and 23%, respectively, and the RMSE improved to 1.75 m for velvet maple and 0.45 m for ironwood.

Keywords: Shast-Kalateh, Curtis, height-diameter model, Michailov and Nesland.

[*]Corresponding author Tel: +98 173247050 Email:mohamadi.jahangir@gmail.