Journal of Wood and Forest Science and Technology

Print ISSN: 2322-2077
Online ISSN: 2322-2786

Modeling of height-diameter for Chestnut-leaved Oak using nonlinear mixed-effects model in Golestan forests

Abdol Ahad Kalte[1], Jahangir Mohammadi[*2], Manoochehr Babanejad[3], Davoud Moghadasi[4]

1. M.Sc. Graduate of Forest Management, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: kalteh.69@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mohamadi.jahangir@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Statistics, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran. E-mail: mbaba22@yahoo.com
4. Ph.D. Student of Forest Management, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: davoodmoghadasi30@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 04.22.2024
Revised: 07.26.2024
Accepted: 07.26.2024

Keywords:
Gomperz,
Korf,
Nonlinear mixed-effect models,
Oak,
Weibull

ABSTRACT

Background and Objectives: Accurately estimating tree height is crucial for assessing forest stand volume and above-ground biomass. Nonlinear mixed-effects models, incorporating random effects to address variation between plots while preserving the diameter-height relationship, enhance model precision by accounting for both intergroup and intragroup variation. Consequently, this study aimed to develope a Height-Diameter relationship for Oak (*Quercus Castanefolia* C.A.M) using nonlinear models and nonlinear mixed-effect models within uneven-aged broadleaved stands situated in Golestan province, specifically within the Shast-kalateh, Jafar-abad, and Loveh forestry areas.

Materials and Methods: We employed a systematic sampling approach to collect field data across a 150×200 m grid (comprising 71 circular plots), where we recorded tree species, height, and diameter at breast height (DBH) for all trees in each plot. Initially, we scrutinized 20 non-linear diameter-height models to identify candidate models. Subsequently, in the second stage, these models were refined using a mixed-effect model incorporating dominant height, mean quadratic DBH, basal area, BAL, stand volume, and tree density as covariates.

Results: The results of fitting non-linear models for Oak indicated that RMSE and R^2 ranged between 15-17% (3-4 meters) and 0.4-0.62, respectively. Integrating dominant height, mean quadratic DBH, basal area, BAL, stand volume, and tree density as random effects in the nonlinear mixed-effect model enhanced R^2 by approximately 10 to 16%, while reducing RMSE by about 2-3% (0.2-1 m).

Conclusion: The study demonstrated that employing the nonlinear mixed-effect method, as opposed to traditional nonlinear regression models, enhanced the accuracy of height estimation, particularly within uneven-aged broadleaved stands. These models effectively capture height variability within stands, presenting a viable alternative for height estimation despite limited prior research in this domain. Further investigations into employing nonlinear mixed-effect models for key species in the Hyrcanian forests and other vegetation regions of Iran are

imperative. The precise insights derived can inform sustainable forest management and conservation strategies, with potential applications in forest planning endeavors.

Cite this article: Kalte, Abdol Ahad, Mohammadi, Jahangir, Babanejad, Manoochehr, Moghadasi, Davoud. 2024. Modeling of height-diameter for Chestnut-leaved Oak using nonlinear mixed-effects model in Golestan forests. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (2), 71-90.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JWFST.2024.22344.2060
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۷۷
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۸۶

تعیین رابطه قطر – ارتفاع بلوط بلندمازو با استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته در توده‌های جنگلی استان گلستان

عبدالاحد کلته[۱]، جهانگیر محمدی*[۲]، منوچهر بابانژاد[۳]، داود مقدسی[٤]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مدیریت جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: kalteh.69@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mohamadi.jahangir@gau.ac.ir

۳. دانشیار گروه آمار، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: mbaba22@yahoo.com

٤. دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: davoodmoghadasi30@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۰۲/۰۳
تاریخ ویرایش: ۱٤۰۳/۰۵/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۳/۰۵/۰۵

واژه‌های کلیدی:
بلندمازو،
کورف،
گومپرتز،
مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته،
ویبول

چکیده

مقدمه و هدف: لازمه ارزیابی صحیح و دقیق موجودی حجمی و زی‌توده، برآورد دقیق ارتفاع درختان می‌باشد. در این زمینه مدل‌های غیرخطی با توجه به در نظر نگرفتن متغیرهای تصادفی سطح توده (مانند تعداد درختان در هکتار و غیره) که متأثر از شرایط اقلیمی و توپوگرافی رویشگاه هستند اجازه تغییرپذیری در موقعیت‌ها و زمان‌های مختلف را به ساختار ثابت مدل نمی‌دهند و باعث می‌شود که این مدل‌ها تغییرات توده را به‌خوبی نشان ندهند؛ بنابراین، هدف اصلی این پژوهش برآورد ارتفاع گونه بلوط بلندمازو از گونه‌های مهم جنگل‌های هیرکانی با استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته و مقایسه آن با مدل‌های غیرخطی رگرسیونی در جنگل‌های ناهمسال آمیخته پهن‌برگ استان گلستان در سه طرح جنگل‌داری شصت‌کلاته گرگان، لوه در گالیکش و جعفرآباد در علی‌آباد می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش ۷۱ قطعه‌نمونه دایره‌ای شکل به مساحت ۱۰ آر در سه طرح جنگلداری شصت‌کلاته، جعفرآباد و لوه پیاده و مشخصه‌های نوع گونه، قطر برابرسینه و ارتفاع درختان اندازه‌گیری و ثبت شد. ابتدا با استفاده از ۲۰ مدل غیرخطی قطر-ارتفاع، ارتباط بین ارتفاع و قطر برابر سینه بررسی و سپس با در نظر گرفتن مشخصه‌های میانگین کوادراتیک قطر، سطح مقطع در هکتار، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت موردنظر، تعداد درختان در هکتار، حجم در هکتار و ارتفاع غالب، با استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته ارتفاع درختان برآورد شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از برازش مدل‌های غیرخطی برای برآورد ارتفاع درختان بلندمازو نشان داد که میزان جذر میانگین مربعات خطای حاصل‌شده در این پژوهش برای هر سه رویشگاه به‌طور جداگانه و با هم حدود ۱۵ تا ۱۷ درصد (۳ تا ٤ متر) و ضریب تبیین مدل‌های حاصل‌شده بین ۰/٤ تا ۰/٦۲ بود. با اضافه کردن مشخصه‌های میانگین کوادراتیک قطر، سطح مقطع در هکتار، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت موردنظر، تعداد درختان در هکتار، حجم در هکتار و ارتفاع غالب تحت عنوان متغیرهای تصادفی در مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته میزان ضریب تبیین در حدود ۱۰ تا ۱٦ درصد و جذر میانگین مربعات خطا حدود ۰/۲ تا ۱ متر (حدود ۲ تا ۳ درصد) بهبود یافت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته در مقایسه با مدل‌های غیرخطی رگرسیونی باعث بهبود دقت برآورد ارتفاع درختان می‌شود و این مدل‌ها تغییرات توده را بهتر از مدل‌های غیرخطی نشان می‌دهند؛ بنابراین این رویکرد می‌تواند روشی مناسب و جایگزین مدل‌های غیرخطی معمول می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین پژوهش‌های تکمیلی در مورد استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته برای سایر گونه‌های هیرکانی و سایر مناطق رویشی ایران لازم و ضروری است تا بتوان از اطلاعات دقیق در برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع جنگلی و برنامه‌های حفاظتی استفاده نمود و به‌صورت عملیاتی بتوان از این مدل‌ها در برنامه‌ریزی جنگل استفاده کرد.

استناد: کلته، عبدالاحد، محمدی، جهانگیر، بابانژاد، منوچهر، مقدسی، داود (۱۴۰۳). تعیین رابطه قطر- ارتفاع بلوط بلندمازو با استفاده از مدل های غیرخطی با اثرات آمیخته در توده‌های جنگلی استان گلستان. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۱ (۲)، ۹۰-۷۱.

DOI: 10.22069/JWFST.2024.22344.2060

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

جنگل‌ها یکی از مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های زمینی، با وسعت حدود ۱۳ میلیارد هکتار یا ۳۰/٦ درصد از کل مساحت زمین، نقش اساسی در ذخیره کربن و کاهش تغییرات اقلیم جهانی دارند؛ بنابراین مدیریت صحیح و پایدار و پایش این بوم‌سازگان‌ها نیازمند اطلاعات دقیق از مشخصه‌های کمی ساختار توده مانند حجم سرپا و زی‌توده روی زمین است (۱). علاوه بر آن تصمیم‌گیری‌های مربوط به تغییرات اقلیمی، ارزیابی ساختار توده و عملکرد بوم‌سازگان، تولید جنگل و ذخیره کربن و ارزش‌گذاری فرآیندهای اقتصادی نیازمند اطلاعات دقیق از مشخصه‌های کمی ساختار توده است. معمولاً این اطلاعات از طریق نمونه‌برداری جنگل با اندازه‌گیری قطر برابر سینه و ارتفاع به‌عنوان مشخصه‌های اساسی و اولیه به دست می‌آید و این مشخصه‌ها از مهم‌ترین مشخصه‌های بررسی ساختار توده‌های جنگلی و ویژگی‌های ظاهری درختان جنگلی و به‌عنوان یک مؤلفه اساسی در درک بوم‌سازگان‌های جنگلی بوده و در مواردی از جمله تعیین حجم و زی‌توده (۲)، ترسیم منحنی ارتفاع، محاسبه ضرایب شکل و قد کشیدگی (۳)، شاخص رویشگاه، شبیه‌سازی جنگل و اندازه‌گیری رویش کاربرد دارند.

یکی از مهم‌ترین و باارزش‌ترین بوم‌سازگان‌های جنگلی جهان، جنگل‌های هیرکانی است که با منابع مهم تنوع ژنتیکی و زیستی با مساحت حدود ۱/۸۵ میلیون هکتار، سهم قابل‌توجهی در موجودی حجمی و زی‌توده دارد (٤). بلوط بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.M) گونه نورپسند، به‌طورکلی از نظر قطر و ارتفاع، بزرگ‌ترین درخت و دومین گونه باارزش جنگل‌های شمال محسوب می‌شوند. بلوط‌ها حدود ۸ درصد از حجم سرپا و ۷/٦ درصد از تعداد درختان جنگل‌های هیرکانی را تشکیل می‌دهند و از نظر تجاری جزء گونه‌های باارزش جنگل‌های هیرکانی است که به‌صورت آمیخته و با ساختاری دو اشکوبه دیده می‌شود، به همین دلیل برآورد دقیق ارتفاع این‌گونه باارزش دارای اهمیت بالایی است (۵).

اندازه‌گیری ارتفاع درختان در مقایسه با مشخصه قطر برابر سینه به‌دلیل صرف زمان بیش‌تر برای اندازه‌گیری، احتمال بروز خطای مشاهداتی و موانع موجود برای دید رفتن به بن و نوک درختان به‌ویژه در جنگل‌های آمیخته و پهن‌برگ چند اشکوبه هیرکانی، مشکل‌تر، زمان‌برتر و پرهزینه‌تر است (۸، ۷، ٦، ۱). در آماربرداری جنگل معمولاً ارتفاع تعداد محدودی از درختان اندازه‌گیری می‌شود درحالی‌که قطر برابر سینه تمامی درختان واقع در قطعه‌نمونه اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به ارتباط قوی قطر برابر سینه و ارتفاع درختان برای برآورد ارتفاع سایر درختان، از مدل‌های قطر-ارتفاع آن‌گونه استفاده می‌شود. با توجه به رویکرد جدید مدیریت جنگل‌های هیرکانی در سال‌های اخیر بر اساس اهداف جنگلداری چندمنظوره، مدیران برای پیش‌بینی حجم سرپا، رویش، زی‌توده و ذخیره کربن به روابط قطر-ارتفاع دقیق نیاز دارند؛ بنابراین دقت این مدل‌ها برای برآورد هرچه دقیق‌تر ارتفاع بسیار ضروری است.

مدل‌های قطر- ارتفاع در رویشگاه‌های مختلف به‌دلیل تفاوت شرایط اقلیمی و توپوگرافی برای گونه‌های مختلف، متفاوت هستند و حتی در توده‌های همسال و خالص نیز در همه موقعیت‌ها یکسان نیستند (۷). در توده‌های ناهمسال و نامنظم، درختان ازنظر گونه، سن، اندازه، تاج، کیفیت رویشگاه، تراکم و ساختار توده و موقعیت نسبی درختان در توده متفاوت بوده و اجرای شیوه‌های جنگل‌شناسی و تغییرات دینامیک توده نیز باعث ایجاد تغییرات می‌شود بنابراین ضرایب روابط قطر- ارتفاع در این توده‌ها همیشه ثابت نیستند و در زمان‌های مختلف تغییر می‌کنند.

در بسیاری از مطالعاتی که از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته برای توصیف رابطه قطر–ارتفاع استفاده کرده‌اند، از مشخصه‌های تراکم توده، تعداد در هکتار، سطح مقطع، میانگین کوادراتیک قطر، قطر غالب و ارتفاع غالب، به‌عنوان متغیرهای سطح توده در نظر گرفته شد (۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹). پژوهش‌های مختلف دیگری نیز ازجمله کاستانو و همکاران (۲۰۱۳)، تمسگن و همکاران (۲۰۱٤)، برونیز و مهتالو (۲۰۲۰) و ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) از روش مدل‌سازی اثرات آمیخته و همچنین اثرات آمیخته تعمیم‌یافته برای مدل‌سازی قطر– ارتفاع استفاده کرده‌اند (۱۷، ۱٦، ۱۵، ۱٤)؛ که کم‌تر برای توده‌های پهن‌برگ ناهمسال و آمیخته بوده است و پژوهش‌های کمی درزمینه مدل‌سازی اثرات آمیخته برای توده‌های جنگلی ایران انجام‌شده است (۱۹، ۱۸، ۷، ۱). بررسی منابع موجود نیز در رابطه با مدل‌های مختلف رگرسیونی غیرخطی قطر– ارتفاع نشان می‌دهد که نتایج با توجه به مناطق مورد مطالعه و توده‌های جنگلی مورد بررسی متفاوت بوده است (۲۱، ۲۰، ۱٦، ۱۰). بااین‌حال ضرایب رابطه قطر– ارتفاع در توده‌های مختلف متفاوت بوده و حتی درون همان توده در یک دوره زمانی نیز پایدار نیست. به‌منظور حداقل کردن این سطح از واریانس، برازش مدل‌های قطر–ارتفاع محلی برای هر رویشگاه، مستلزم نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های بیش‌تر و دقیق‌تری است که مستلزم صرف زمان و هزینه‌های زیادی است؛ بنابراین استفاده از مدل‌هایی مانند مدل با اثرات آمیخته می‌تواند به‌عنوان یک راهکار باعث بهبود برآورد ارتفاع شود. این مدل‌ها ابزاری مهم برای اهداف مدیریتی در جنگل‌های پهن‌برگ، ناهمسال و نامنظم هیرکانی به‌منظور ارزیابی صحیح و دقیق موجودی حجمی، زی‌توده و ذخایر کربن، جنگل‌ها ضروری هستند. با توجه به این‌که کم‌ترین اشتباه در محاسبه ارتفاع باعث افزایش خطا در برآورد سایر مشخصه‌هایی مانند حجم و زی‌توده می‌شود، لازم است از مدل‌هایی که با افزودن سایر متغیرها ازجمله ارتفاع غالب، قطر سطح مقطع متوسط، تعداد درختان در هکتار، حجم در هکتار، سطح مقطع در هکتار و سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت موردنظر که متأثر از شرایط اقلیمی و توپوگرافی رویشگاه هستند برای افزایش دقت برآورد ارتفاع استفاده کرد. مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته ابزار مناسبی برای افزایش این سطح از دقت رابطه قطر–ارتفاع هستند. مدل‌های غیرخطی اثرات آمیخته علاوه بر درنظرگرفتن هم‌زمان مؤلفه‌های ثابت (ویژگی‌های مشترک درکل جمعیت) و تصادفی (ویژگی‌های مشترک در هر قطعه‌نمونه) برای یک مدل، اجازه تغییرپذیری در موقعیت‌ها و زمان‌های مختلف بعد از مشخص کردن ساختار ثابت معمول تابع را می‌دهند (۲۲، ۷، ۱). در این روش هر دو متغیر درون و بین قطعه‌نمونه موردنظر محاسبه می‌شوند. در واقع مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته امکان گنجاندن همه انواع تغییرپذیری را در مدل فراهم کرده و دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهند (۲۳). اثرات آمیخته می‌توانند خطی (اگر مدل مبنا خطی باشد) و یا غیرخطی (اگر مدل مبنا غیرخطی باشد) باشند (۲۲). در بسیاری از مطالعاتی که از مدل‌های غیرخطی اثرات آمیخته برای توصیف رابطه قطر–ارتفاع استفاده کرده‌اند، از مشخصه‌های تراکم توده، سطح مقطع، قطر سطح مقطع متوسط و ارتفاع غالب، به‌عنوان متغیرهای سطح توده در نظر گرفته شد (۱۲، ۹).

کاستانو و همکاران (۲۰۱۳)، روش‌های مختلف برآورد ارتفاع درختان توده راش ناهمسال در شمال غرب اسپانیا را با استفاده از ۱۱۲ قطعه‌نمونه مورد بررسی قراردادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد بهترین مدل غیرخطی رگرسیونی، مدل ریچارد با

جذر میانگین مربعات خطا ۳/٤٥ بود (١٤). مهتاتالو و همکاران (۲۰۱۵)، روابط قطر و ارتفاع ۲۸ مجموعه داده با استفاده از ١٦ مدل غیرخطی در اروپا، آسیا و آمریکا مورد بررسی و تجزیه‌وتحلیل قراردادند. نتایج نشان داد که مدل‌های کورتیس، ناسلند و گومپرز بهترین مدل بودند که میزان میانگین مجذور مربعات خطا بین ۰/٦١ تا حدود ۳ متر حاصل شد (۲۲). پژوهش‌های مختلف دیگری نیز ازجمله آدام و همکاران، (۲۰۰۸)، کریسنت و همکاران، (۲۰۱۰)، تمسگن و همکاران (۲۰۱٤)، فیرز و همکاران (۲۰۱۸)، اوزلیک و همکاران (۲۰۱۸)، برونیز و مهتالو (۲۰۲۰)، ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) و اوگانا و همکاران (۲۰۲۰) از روش مدل‌سازی اثرات آمیخته و اخیراً از اثرات آمیخته تعمیم‌یافته برای مدل‌سازی قطر- ارتفاع استفاده کرده‌اند (۱۷، ١٦، ١٥، ١٤، ١٣، ١٢، ١١، ١٠، ٩) و پژوهش‌های کمی درزمینه مدل‌سازی اثرات آمیخته برای توده‌های جنگلی ایران انجام‌شده است (۱۹، ۷، ۱) و برای گونه بلند مازو، پژوهش مدونی در دسترس نیست. قادری و همکاران، (۲۰۲۳)، کارایی مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته در تعیین معادلات قطر- ارتفاع درختان افرا پلت و انجیلی را مورد بررسی و مطالعه قراردادند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل کورتیس و میچالیف برای گونه افرا پلت دارای بیش‌ترین ضریب تبیین ۰/۷٤ و کم‌ترین جذر میانگین مربعات خطا ۳/٤۳ و ۳/۲٤ متر بودند. برای گونه انجیلی نیز مدل‌های ناسلند و میچالیف با ضریب تبیین ۰/٤۲ 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 به ترتیب ۲۰ و ۲۳ درصد، افزایش و مقدار جذر میانگین مربعات خطا نیز برای افرا پلت و انجیلی به ترتیب ۱/۷۵ و ۰/٤٥ متر کاهش یافت (۷). مسعودی و همکاران (۲۰۲۲)، ارتفاع درختان راش و ممرز با استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرهای آمیخته را برآورد نمودند. نتایج نشان داد که برای گونه راش مدل‌های کورتیس و ناسلند دارای بیش‌ترین ضریب تبیین ۰/۷ و کم‌ترین جذر میانگین مربعات خطا ۳/۳٥ و ۳/٤ متر حاصل‌شده بود. برای گونه نیز مدل‌های ناسلند و میچایلف با ضریب تبیین ۰/٤ و جذر میانگین مربعات خطای ۲/۹٥ و ۲/۹ حاصل شد. نتایج برازش مدل‌های غیرخطی با اثرهای آمیخته نشان داد که در مقایسه با مدل‌های غیرخطی میزان ضریب تبیین برای گونه‌های راش و ممرز به ترتیب ۱۰ و ۳۰ درصد افزایش یافت و میزان جذر میانگین مربعات خطا نیز برای راش به ۲/۷ و برای ممرز به ترتیب ۲/۳ متر به‌دست آمد (۱). بررسی منابع موجود نیز در رابطه با مدل‌های مختلف رگرسیونی غیرخطی قطر- ارتفاع نشان می‌دهد که نتایج با توجه به مناطق موردمطالعه و توده‌های جنگلی موردبررسی متفاوت بوده است.

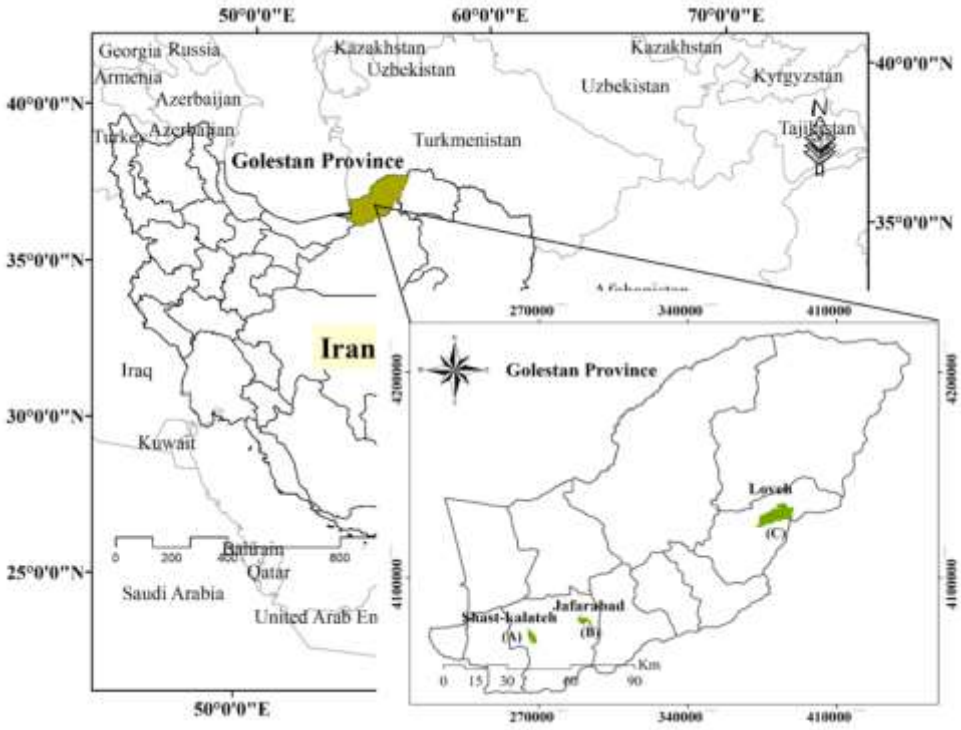
تعیین مدل‌های دقیق غیرخطی با اثرات آمیخته جهت ارزیابی صحیح و دقیق موجودی حجمی و زی‌توده برای اهداف مدیریتی در جنگل‌های پهن‌برگ، ناهمسال و نامنظم هیرکانی لازم و ضروری هستند. با توجه به اهمیت و پراکنش بلوط بلندمازو در استان گلستان و میزان خطای بالای مدل‌های معمول در برآورد ارتفاع، استفاده از مدل‌هایی با اثرات آمیخته می‌تواند به‌عنوان یک راهکار باعث بهبود برآورد ارتفاع شود. علاوه براین، با توجه به این‌که کم‌ترین اشتباه در محاسبه ارتفاع درختان، باعث افزایش خطا در برآورد سایر مشخصه‌هایی مانند حجم و زی‌توده می‌شود، لازم است از مدل‌هایی که با افزودن سایر

متغیرها ازجمله قطر سطح مقطع متوسط، تعداد درختان در هکتار، حجم در هکتار، ارتفاع غالب و سطح مقطع در هکتار که متأثر از شرایط اقلیمی و توپوگرافی رویشگاه هستند برای افزایش دقت برآورد ارتفاع استفاده کرد. هدف اصلی پژوهش پیش رو ارزیابی مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته متغیرهای ثابت (مانند قطر برابر سینه) و تصادفی (مانند تراکم توده، سطح مقطع، قطر سطح مقطع متوسط و ارتفاع غالب) در برآورد ارتفاع بلوط بلندمازو و مقایسه آن با مدل‌های غیرخطی رگرسیونی در جنگل‌های ناهمسال آمیخته پهن‌برگ استان گلستان در سه طرح جنگل‌داری شصت‌کلاته گرگان، لوه در گالیکش و جعفرآباد در علی‌آباد می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این پژوهش در سه رویشگاه طرح جنگلداری لوه، شصت‌کلاته و جعفرآباد استان گلستان انجام شد. طرح جنگلداری شصت‌کلاته در حوزه آبخیز ۸۵ اداره کل منابع طبیعی استان گلستان و در جنوب شرقی شهر گرگان با طول جغرافیایی ´۲۴ °۵۴ تا ´۲۵ °۵۴ شرقی و عرض جغرافیایی ´۳۸ °۳۶ تا ´۴۲ °۳۶ شمالی قرار دارد. جنگل شصت‌کلاته بر اساس اطلاعات ۱۰ ساله ایستگاه کلیماتولوژی هاشم‌آباد، از نظر طبقه‌بندی اقلیمی آمپرژه، اقلیم مرطوب معتدل دارد. میزان بارندگی متوسط سالانه آن ۶۴۹ میلی‌متر است. ارتفاع از سطح دریا منطقه مورد مطالعه که بخش از جنگل شصت‌کلاته می‌باشد حدود ۵۰۰ متر می‌باشد (۲۴).

طرح جنگلداری لوه تحت مدیریت اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان در محدوده طول جغرافیایی ´۵۵ °۴۱ تا ´۴۶ °۵۵ ۵۵ شرقی و عرض جغرافیایی ´۳۷ °۱۷ تا ´۳۷ °۲۲ شمالی قرار دارد. این طرح در ۲۴ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان گالیکش در حوزه استحفاظی اداره منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان گالیکش استان گلستان واقع گردیده است مساحت طرح ۱۰۶۸۰ می‌باشد. میزان بارندگی متوسط سالانه برابر با ۴۶۱ میلی‌متر، دمای متوسط سالانه برابر با ۱۵/۰۵ درجه سانتی‌گراد است ارتفاع از سطح دریا منطقه مورد مطالعه که بخش از جنگل لوه می‌باشد حدود ۹۰۰ متر می‌باشد (۲۵). طرح جنگلداری جعفرآباد تحت مدیریت اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان با طول جغرافیایی ´۴۵ ° ۵۴ و عرض شمالی ″۳۰ ´۴۲ °۳۶ و ´۵۲ °۳۶ است. طرح جنگلداری جعفرآباد در فاصله ۵ کیلومتری ۲۰ جاده گرگان- علی‌آباد و در جنوب آن واقع شده است. مساحت کل طرح ۱۷۷۰ هکتار در حوزه آبخیز شماره ۸۶ قرار دارد. بارندگی متوسط سالانه طرح جعفرآباد ۶۱۰/۶۲ میلی‌متر است. ارتفاع از سطح دریا منطقه مورد مطالعه که بخش از جنگل جعفرآباد می‌باشد حدود ۲۵۰ متر می‌باشد (۲۶). گونه‌های غالب منطقه مورد مطالعه شامل *Quercus castaneifolia* C.A.M, *Acer cappadoicicum* Gled., *Acer velutium* Boiss., *Alnus subcordata* C.A.M., *Carpinus betulus* L., *Parrotia persica* C.A.M. and *Zelkova carpinifolia* Dipp. است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ پژوهش شصت‌کلاته (A)، جعفرآباد (B) و لوه (C) در ایران و استان گلستان.

Figure 1. Location of study area Shast-kalateh (A), Jafarabad (B) and Loveh (C) in Golestan province, Iran.

روش پژوهش: با توجه به این‌که هدف اصلی این پژوهش، بررسی رابطه قطر- ارتفاع گونه بلندمازو با استفاده از مدل‌های غیرخطی و سپس مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته است؛ بنابراین نیاز به اطلاعات قطر-ارتفاع، برای برآورد ارتفاع درختان به‌عنوان مجموعه داده‌های آموزش و مجموعه داده‌های آزمون بود. نمونه‌برداری به روش منظم با شروع تصادفی با شبکه ۱۵۰×۲۰۰ متر و قطعات نمونه دایره‌ای شکل به مساحت ۱۰ آر در بخشی از طرح‌های جنگلداری مورد مطالعه انجام شد، به‌طوری‌که ۷۱ قطعه‌نمونه در سه منطقه موردمطالعه (شصت‌کلاته (۲۳ قطعه نمونه)، جعفرآباد (۱۰ قطعه نمونه) و لوه (۳۸ قطعه نمونه)) پیاده شدند. در تمام قطعات نمونه، مشخصه نوع گونه، قطر برابرسینه و ارتفاع تمام درختان بلندمازو با قطر برابرسینه بیش‌تر از ۱۲/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری و سپس مشخصه‌های قطر سطح مقطع متوسط، تعداد درختان در هکتار، حجم در هکتار، سطح مقطع در هکتار و سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت موردنظر و ارتفاع غالب نیز محاسبه و به مدل‌های غیرخطی اثرات آمیخته برای گونه موردنظر اضافه شد.

روش تحلیل: ابتدا بررسی اولیه آماره‌های توصیفی و نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف صورت گرفت و برای برآورد ارتفاع از مجموع ۹۰۸ جفت مشاهده قطر-ارتفاع در کل منطقه مورد مطالعه، ۷۵ درصد (۶۸۵ درخت) در فرآیند مدل‌سازی به‌کارگرفته شدند و ۲۵ درصد (۲۲۳ درخت) بقیه برای ارزیابی مدل‌های برآوردی مورد استفاده قرار گرفتند. 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 شدند. بر اساس سوابق پژوهش، ۲۰ مدل از بهترین مدل‌های

رگرسیونی غیرخطی قطر- ارتفاع برای بررسی رابطه قطر- ارتفاع انتخاب شد (جدول ۱). همه تجزیه‌وتحلیل‌های آماری با استفاده از بسته‌های Lmfor و Lme4 در نرم‌افزار R انجام گرفت (۲۷).

جدول ۱- مدل‌های قطر- ارتفاع رگرسیونی به‌کاررفته در پژوهش.

Table 1. Height-diameter models used in this study.

شماره مدل Model number	اسم مدل Model name	مدل Model	شماره 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)، (۱۲، ۷، ۱).

$$H_{ij} = f(\beta_{ij}, DBH_{ij}) + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, n_i, \quad \varepsilon_{ij} \sim N[0, R_i(\beta, b_i, \rho)] \qquad (۱)$$

که در آن، H_{ij} برابر است با j امین مشاهده (ارتفاع درخت) در پلات i، DBH_i اندازه قطر برابرسینه درخت در قطعه نمونه i، f تابع غیرخطی و β_i بردار پارامترهای مدل در قطعه نمونه 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 معادله زیر مدل‌سازی می‌شود (رابطه ۲).

$$\beta_{ijk} = \left(X'_{ijk}\beta_k + Z'_{ijk}b_{ik}\right), \quad k = 0, \dots, p-1, \; b_{ik} \sim N(0, \Psi_k) \qquad (۲)$$

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

$$\beta_i = (X_i\beta + Z_i b_i), \quad b_i \sim N(0, \Psi) \qquad (۳)$$

این دو معادله را می‌توان ترکیب کرد (رابطه ٤):

$$H_{ij} = f(X_i, \beta, Z_i, b_i) + \varepsilon_{ij} \qquad (٤)$$

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 نمونه i، (q: تعداد مشخصه‌های تصادفی مدل) و Z_i و X_i به ترتیب 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 به‌طورمعمول صفر و ۱ یا مقدار کوواریانس‌های مرتبط با اثرات ثابت و تصادفی هستند. $R_i(\beta, b_i, \rho)$ و Ψ به ترتیب ماتریس کوواریانس برای مشاهدات تکراری $(n_i \times n_i)$ و اثرات تصادفی $(q \times q)$ در قطعه نمونه i است و $\varepsilon_i = (\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2}, \dots, \varepsilon_{in_i})^T$ خطاهای تصادفی در قطعه نمونه i است (۱۲). 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 آمیخته چند سطحی تبدیل می‌کنند.

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

$$\beta_{0ij} = \beta_0 + b_i, \quad b_i \sim N(0, D) \qquad (۵)$$

در این پژوهش مشخصه‌های سطح مقطع در هکتار (BA ($m^2.ha^{-1}$))، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از بزرگ‌ترین سطح مقطع در قطعه نمونه (BAL)، حجم در هکتار (V ($m^3.ha^{-1}$))، قطر سطح مقطع متوسط (QM (cm))، تعداد درختان در هکتار (N ($N.ha^{-1}$))، میانگین ارتفاع لوری (H (m)) و ارتفاع غالب (DH (m)) در هر قطعه نمونه تحت عنوان متغیرهای تصادفی در قطعات نمونه در مدل‌های غیرخطی مذکور گنجانده شد (رابطه ٦):

$$\beta_{0ij} = \beta_{00} + +\beta_{01}BA_{ij} + \beta_{02}BAL_{ij} + \beta_{03}V_{ij} + \beta_{04}QM_{ij} + \beta_{05}N_{ij} + \beta_{06}DH_{ij} + \beta_{07}H_{ij} + b_i, \; b_i \sim N(0, D) \qquad (٦)$$

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

جدول ۲- مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته انتخاب‌شده، برای گونه بلندمازو.

Table 2. Nonlinear mixed-effects model selected for *Q. castaneifolia*.

شماره مدل Model Number	مدل غیرخطی با اثرات آمیخته Nonlinear mixed-effects model
15	$H = 1.30 + \beta0 \exp(-\beta1\exp(-\beta2 DBH))$ $\beta_0 = a_0 + a_1 \times BAL + a_2 \times BA + a_3 \times HD + a_4 \times V + a_5 \times QM + a_6 \times N + a_7 \times H$
16	$H = 1.30 + \beta0 \exp(-\beta1\exp(-\beta2 DBH))$ $\beta_0 = a_0 + a_1 \times BAL + a_2 \times BA + a_3 \times HD + a_4 \times V + a_5 \times QM + a_6 \times N + a_7 \times H$
18	$H = 1.30 + \beta0 \exp(-\beta1 DBH^{-\beta2})$ $\beta_0 = a_0 + a_1 \times BAL + a_2 \times BA + a_3 \times HD + a_4 \times V + a_5 \times QM + a_6 \times N + a_7 \times H$
20	$H = 1.30 + \frac{\beta0}{1 + \frac{1}{\beta1 DBH^{\beta2}}}$ $\beta_0 = a_0 + a_1 \times BAL + a_2 \times BA + a_3 \times HD + a_4 \times V + a_5 \times QM + a_6 \times N + a_7 \times H$

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) اعتبار مدل‌های آماری ارزیابی شد (رابطه‌های ۷ و ۸).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}i - yi)^2}/n \quad (۷)$$

$$RMSE\% = RMSE/\bar{y}_i \times 100 \quad (۸)$$

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

نتایج

از ۷۱ قطعه نمونه برداشت‌شده (۲۳ قطعه نمونه در شصت‌کلاته، ۱۰ قطعه نمونه جعفرآباد و ۳۸ قطعه نمونه لوه)، ۹۰۸ جفت مشاهده قطر-ارتفاع اندازه‌گیری و ثبت شد. میانگین مشخصه‌های قطر برابر سینه، ارتفاع کل درخت، تعداد درختان در هکتار، سطح مقطع در هکتار و حجم در هکتار برای همه رویشگاه‌ها به ترتیب ٤٤/٤٩ سانتی‌متر، ۲۳/۲۲ متر، ۲۰٤/۰۸ درخت در هکتار، ۳۳/٦۷ مترمربع، ٤۸۳/۲۹ مترمکعب در هکتار می‌باشد. بررسی آماره‌های توصیفی نشان داد که دامنه تغییرات این مشخصه‌ها زیاد بوده و نشان‌دهنده کل دامنه مشخصه‌های کمی ساختار توده جنگلی منطقه مورد مطالعه می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳- آماره‌های توصیفی مشخصه‌های بررسی‌شده بلندمازو در کل منطقه مورد مطالعه.

Table 3. Descriptive statistics of investigated characteristics of *Q. castaneifolia* in.

متغیرها Variables	قطر برابر سینه DBH (cm)	میانگین ارتفاع Height Mean (m)	ارتفاع غالب Dominant Height (m)	میانگین کوادراتیک قطر Quadratic Mean DBH (cm)	تعداد درختان در هکتار Tree density ($n.ha^{-1}$)	سطح مقطع درختان در هکتار Basal Area ($m^2.ha^{-1}$)	حجم در هکتار Volume ($m^3.ha^{-1}$)	سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت موردنظر BAL ($m^2.ha^{-1}$)
میانگین Mean	44.49	23.22	24.49	46.77	204.08	33.67	483.9	2.28
حداکثر Max	165	39.8	32.61	93.07	380	71.77	1124.09	7.17
حداقل Min	12.5	8	12.35	26.10	70	10.70	120.54	0
انحراف از معیار St. Dev	25.54	5.97	4.17	10.65	62.98	11.55	208.31	1.35

جدول ٤ نتایج ضرایب حاصل از برازش ۲۰ مدل رگرسیونی انتخاب‌شده را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مقایسه ۲۰ مدل رگرسیونی انتخاب‌شده در برآورد ارتفاع درختان بلوط بلندمازو با استفاده از قطر برابر سینه نشان داد که مدل رگرسیونی غیرخطی ویبول (مدل شماره ۱۵)، گومپرتز (مدل شماره ١٦)، کورف (مدل شماره ۱۸) و هاسفلد (مدل شماره ۲۰) با درصد مجذور میانگین مربعات خطا (۱۷/۸۳، ۱۷/۸۸، ۱۷/۸۱ و ۱۷/۸٦ درصد) به ترتیب و ضریب تبیین (۰/۵۵، ۰/۵٤، ۰/٥٤١ و ۰/٥٤) به ترتیب بهتر توانسته‌اند مشخصه ارتفاع را برآورد کنند (جدول ٤). البته شایان‌ذکر است که نتایج مدل‌ها، تفاوت زیادی در معیارهای ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا با یکدیگر نداشت.

جدول ٤- ضرایب و اعتبارسنجی مناسب‌ترین مدل‌های رگرسیونی غیرخطی.

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

شماره مدل Model Number	اسم مدل Name	ضرایب مدل Coefficients			R^2	RMSE	RMSE%
		β_0	β_1	β_2			
1	Naslund	1.69	11.93	-	0.526	4.42	18.76
2	Curtis	32.08	12.29	-	0.504	4.36	18.48
3	Michailoff	30.70	0.011	-	0.52	4.44	18.82
4	Meyer	50.05	0.38	-	0.522	6.08	26.17
5	Power	5.31	-1.77	-	0.552	4.227	17.93
6	Naslund2	1.69	1.17	-	0.526	4.42	18.76
7	Naslund3	0.53	-1.08	-	0.526	4.42	18.76
8	Naslund4	0.53	26.70	-	0.526	4.40	18.66
9	Michaelis-Menten	36.31	0.03	-	0.536	4.40	18.66

ادامه جدول ٤-

Continue Table 4.

RMSE%	RMSE	R^2	ضرایب مدل Coefficients			اسم مدل Name	شماره مدل Model Number
			β_2	β_1	β_0		
20.21	4.76	0.536	-	-12.30	0.74	Michaelis-Menten2	10
19.09	4.5	0.507	-	11.93	3.424	Wykoff	11
19.09	4.5	0.493	0.02	1.42	-13.44	Prodan	12
18.11	4.27	0.534	0.02	2.27	50.05	Logistic	13
18.75	4.42	0.5	0.87	0.04	27.50	Chapman-Richards	14
17.83	**4.20**	**0.55**	**0.51**	**0.09**	**50.05**	**Weibull**	**15**
17.88	**4.22**	**0.54**	**0.09**	**1.27**	**50.05**	**Gomperz**	**16**
18.43	4.35	0.529	0.18	1.96	0.5	Sibbesen	17
17.81	**4.2**	**0.541**	**0.45**	**4.22**	**50.05**	**Korf**	**18**
18.45	4.35	0.524	5	17.39	32.88	Ratkowsky	19
17.86	**4.21**	**0.54**	**0.66**	**0.08**	**50.05**	**Hossfeld IV**	**20**

نتایج حاصل از بررسی میانگین تفاوت‌های مقادیر مشاهده‌شده با مقادیر برآورد شده مشخصه ارتفاع با استفاده از ۲۰ مدل انتخاب‌شده نشان داد که مدل‌های رگرسیونی غیرخطی ویبول، گومپرتز، کورف و هاسفلد به ترتیب دارای انحراف معیار مقادیر تفاوت‌ها (۲/۳۲، ۲/۴۲، ۲/۲۹، ۲/۴۰ متر) می‌باشد. هم‌چنین، تفاوت بین مقادیر برآورد شده همه مدل‌ها با مقادیر واقعی در سطح احتمال ۹۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد. 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 تطبیق یافته از پراکنش یکنواخت در دو سوی محور صفر و ثبات واریانس داشت که نشان از تناسب مدل‌ها داشت (شکل ۳).

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که میزان جذر میانگین مربعات خطای ارتفاع برای گونه بلندمازو (حدود ٤/۲ متر) در مقایسه مسعودی و محمدی (۱٤۰۰)، (۳/۳۵ متر)، قادری و همکاران، (۱٤۰۱)، (۳/۲٤)، محمدی و شتایی (۱۳۹۵)، (۳ متر)، عالمی و همکاران (۱۳۹۷)، (۲/۵) و عابدی و همکاران (۱۳۹۸)، (۲/۵ متر)، مهتانلو و همکاران (۲۰۱۵) (۳ متر)، شارما و همکاران (۲۰۱٦)، (۲ متر)، جاویر کاستانو و همکاران (۲۰۱۳)، (۳/٤۵ متر) و کلبی و همکاران (۲۰۱۸)، (۳/۷ متر) بیش‌تر بود (۲۹، ۲۸، ۲۲، ۲۰، ۱۹، ۱٤، ۷، ٦، ۱). نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ضریب تبیین حاصل‌شده برای گونه بلندمازو (۰/۵۵) در مقایسه با مطالعات مسعودی و محمدی (۱٤۰۰)، قادری و همکاران، (۱٤۰۱)، عابدی و عابدی (۱۳۹۸)، شارما و همکاران (۲۰۱٦) کم‌تر بود (۲۸، ۷، ۱) اما در مقایسه با مطالعات مستوری و همکاران (۱۳۹۸) تقریباً یکسان بود (۳۰).

تفاوت در میزان جذر میانگین مربعات و ضریب تبیین حاصل‌شده در این پژوهش در مقایسه با سایر مطالعات انجام‌شده ممکن است به عواملی مانند پراکنش مکانی منطقه مورد مطالعه (سه طرح جنگلداری شصت‌کلاته، جعفرآباد و لوه) در این

پژوهش در مقایسه با سایر مطالعات انجام‌شده و درنتیجه آن تغییرات زیاد داده‌های زمینی، نوع مدل مورد استفاده، نوع توده (پهن‌برگ یا سوزنی‌برگ)، ناهمسال یا همسال بودن، منظم یا نامنظم بودن و شیوه‌های مختلف مدیریتی برگردد.

مطابق با مطالعات انجام‌شده مدل‌های ویبول، گومپرتز، کورف و هاسفلد بهتر توانسته‌اند ارتفاع درختان بلندمازو را برآورد نمایند و نتایج تقریباً یکسانی در برآورد ارتفاع درختان بلندمازو داشتند (۲۸، ۲۲، ۱۹، ۵).

هم‌چنین بررسی میانگین مقادیر برآورد شده ارتفاع با مقادیر واقعی ارتفاع نشان داد که مدل‌های ویبول، گومپرتز و هاسفلد مقادیر ارتفاع را کم‌تر از مقدار واقعی و مدل کورف مقادیر ارتفاع را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد نموده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه و مقایسه آن با سایر مطالعات، درنهایت چنین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که مدل‌های رگرسیونی غیرخطی ویبول، گومپرتز، کورف و هاسفلد نتایج تقریباً مشابه و نزدیک به هم داشتند و توانایی برآورد ارتفاع درختان بلندمازو را با دقت قابل‌قبول دارند و این مدل‌ها می‌توانند در برآورد ارتفاع درختان بلندمازو در صورت تأیید و تکرار این نتایج در سایر مناطق جنگلی شمال ایران، در جنگل‌های پهن‌برگ شمال ایران مورد استفاده قرار گیرند.

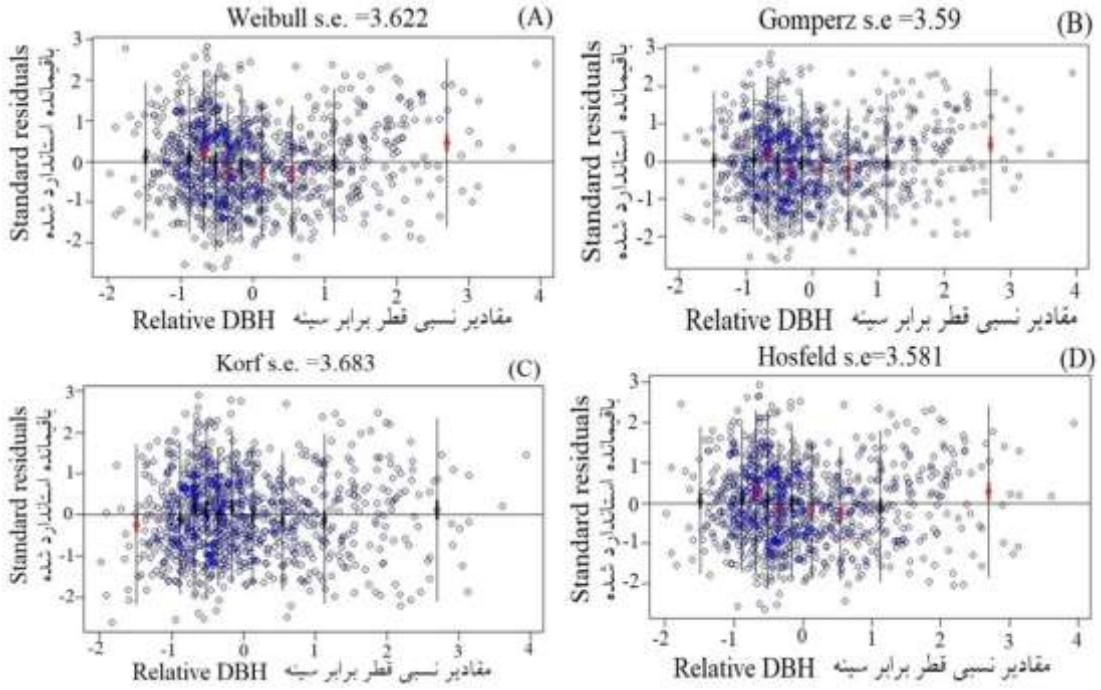
نتایج حاصل از برازش مدل‌های غیرخطی اثرات آمیخته برای گونه بلندمازو در منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن مشخصه‌های ارتفاع غالب، سطح مقطع در هکتار، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت موردنظر، حجم در هکتار، میانگین کوادراتیک قطر، ارتفاع لوری و تعداد درختان در هکتار تحت عنوان متغیرهای تصادفی در مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته نشان داد که مدل‌های ویبول، گومپرتز، کورف و هاسفلد با ضریب تبیین حدود ۰/٦٤ و درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی به ترتیب ۱۵/۵٤، ۱۵/٤، ۱۵/۸ و ۱۵/۳۷ درصد ارتفاع درختان بلندمازو را برآورد کردند (جدول ۵). با اضافه کردن مشخصه‌های ارتفاع غالب، سطح مقطع در هکتار، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت موردنظر، حجم در هکتار، میانگین کوادراتیک قطر، ارتفاع لوری و تعداد درختان در هکتار تحت عنوان متغیرهای تصادفی در مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته میزان ضریب تبیین در حدود ۱۰ درصد افزایش و میزان جذر میانگین مربعات خطا حدود ۰/٦ متر بهبود یافت (جدول ۵).

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

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

RMSE%	RMSE	R^2	ضرایب تصادفی Random coefficients			ضرایب ثابت Fixed coefficients			مدل اثرات آمیخته Nonlinear mixed-effects model
			a_3	a_2	a_1	β_2	β_1	β_0	
15.54	3.62	0.63	1.12	2.68	3.41	7.02	10.86	31.47	Weibull
15.40	3.59	0.64	7.32	6.93	4.09	12.82	20.1	33.42	Gomperz
15.8	3.68	0.62	1.21	3.9	7.88	0.024	1.57	33.8	Korf
15.37	3.57	0.64	7.19	2.05	1.51	13.68	25.9	36.12	Hossfeld

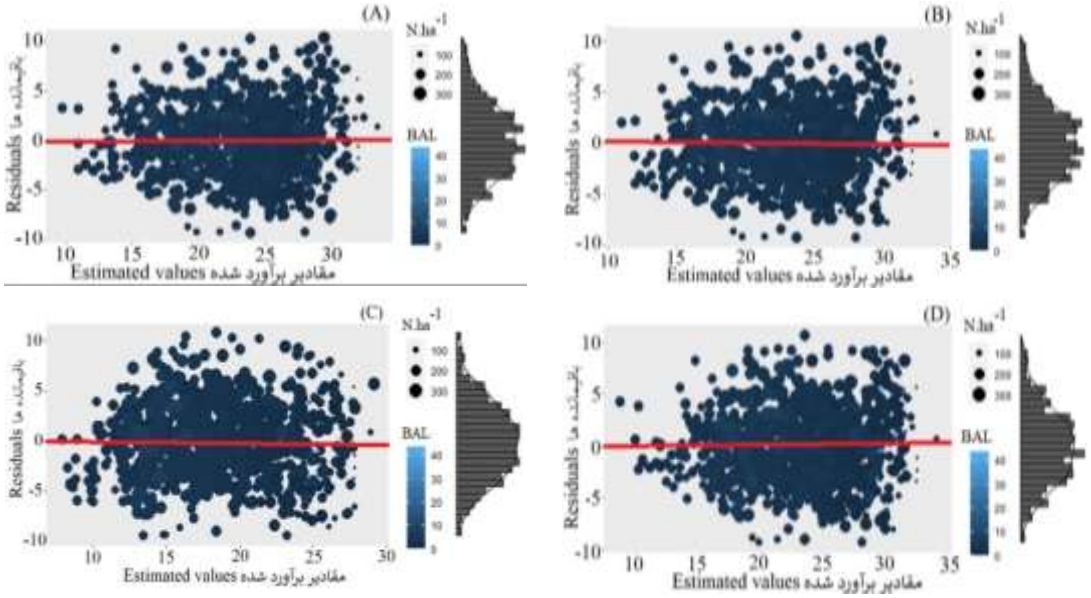
نتایج حاصل از آنالیز باقی‌مانده‌ها در برابر مقادیر نسبی قطر برابرسینه درختان نشان داد که باقی‌مانده‌ها هیچ‌گونه روندی ندارند و در دو طرف صفر، تقریباً برابرند. هاسفلد دارای کم‌ترین اشتباه معیار باقی‌مانده است (شکل ۲).



شکل ۲- مقادیر باقی‌مانده مدل‌های Weibull (A)، Gomperz (B)، Korf (C) و Hossfeld (D) 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 نشان‌دهنده فاصله اطمینان از مشاهدات فردی (میانگین ± ۱/۹۶ انحراف معیار) است و خطوط عمودی ضخیم (درون نقاط سیاه) نشان‌دهنده فاصله اطمینان ۹۵ درصد از میانگین طبقات است. خطوط ضخیمی که از خط افقی y=۰ عبور نمی‌کنند با رنگ قرمز نشان داده می‌شوند.

Figure 2. Residual values of Weibull (A), Gomperz (B), Korf (C) and Hosfeld (D) models with standardized residual blue point and black point on the 0-line y = average residuals that shows 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 مدل‌های ویبول، گومپرتز، کورف و هاسفلد برای بلندمازو نشان داد که میانگین باقیمانده‌های درختان تقریباً صفر و دارای توزیع نرمال می‌باشند (p-value>۰/۰۵) و هیستوگرام باقی‌مانده‌ها، چولگی ندارد و نمودار باقی‌مانده‌ها نشان از پراکنش یکنواخت در دو سوی محور صفر و ثبات واریانس دارند (شکل ۳). به‌طورکلی نمودارها بیانگر تناسب مدل‌ها می‌باشند.



شکل ۳- نمودار باقی‌مانده‌ها، هیستوگرام و نرمال باقی‌مانده‌ها مدل‌های (A) Weibull، (B) Gomperz، (C) Korf و (D) Hossfeld با نقاط آبی در برابر مقادیر برآوردشده ارتفاع و رابطه آن‌ها با تعداد درختان در هکتار ($N.ha^{-1}$) که با اندازه دایره مشخص می‌شود و سطح مقطع بزرگ‌ترین درختان (BAL) که با رنگ آبی مشخص می‌شود.

Figure 3. Residuals, normal and histogram residuals diagram of Weibull (A), Gomperz (B), Korf (C) and Hosfeld (D) 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.

نتایج حاصل از این پژوهش مطابق با نتایج مطالعات مسعودی و محمدی (۱٤۰۰)، قادری و همکاران، (۱٤۰۱)، آدام و همکاران (۲۰۰۸)، کاستانو و همکاران (۲۰۱۳)، تمسگن و همکاران (۲۰۱٤) و شارما و همکاران (۲۰۱٦) نشان داد که با اضافه کردن مشخصه‌های سطح مقطع در هکتار، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت موردنظر، حجم در هکتار، میانگین کوادراتیک قطر، ارتفاع غالب و تعداد درختان در هکتار تحت عنوان متغیرهای تصادفی در مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته میزان ضریب تبیین در حدود ۱۰ درصد و جذر میانگین مربعات خطا حدود ۰/٦ متر بهبود یافت (۱۵، ۱٤، ۹، ۷، ۱).

نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای در مورد تعیین معادلات قطر-ارتفاع برای برآورد ارتفاع درختان بلندمازو در جنگل‌های شمال ایران و به‌ویژه استان گلستان انجام نشده بود پژوهش حاضر به‌منظور برآورد ارتفاع بلوط بلندمازو با استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته انجام شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه و مقایسه آن با سایر مطالعات، درنهایت می‌توان نتیجه‌گیری نمود که میزان جذر میانگین مربعات حاصل‌شده در این پژوهش حدود ٤ تا ٤/۵ متر و ضریب تبیین حاصل‌شده بین ۰/۵ تا ۰/۵۵ مدل‌های قطر ارتفاع توانسته‌اند ارتفاع درختان بلندمازو را با دقت قابل‌قبول برآورد نمایند. با اضافه کردن مشخصه‌های سطح مقطع در هکتار، سطح مقطع درختان بزرگ‌تر از درخت موردنظر، حجم در هکتار، میانگین کوادراتیک قطر، ارتفاع غالب و تعداد درختان در هکتار تحت عنوان متغیرهای تصادفی در مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته میزان ضریب تبیین در حدود ۱۰ درصد و جذر میانگین مربعات خطا

حدود ۰/٦ متر بهبود یافت. مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با برخی از مطالعات انجام‌شده نشان داد که درصد جذر میانگین مربعات خطا به‌دست‌آمده در این پژوهش برای ارتفاع، بالاتر می‌باشد که علت آن عوامل مختلف از جمله ناهمگن بودن منطقه از نظر پراکنش، نوع جنگل (سوزنی‌برگ، پهن‌برگ و مخلوط سوزنی‌برگ و پهن‌برگ)، بالا بودن دامنه تغییر در مقدار ارتفاع برمی‌گردد. نتایج نشان داد که استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته در مقایسه با مدل‌های غیرخطی رگرسیونی باعث 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 علاوه بر حفظ رابطه قطر-ارتفاع باعث بهبود دقت مدل‌ها می‌شوند و این مدل‌ها تغییرات توده را به‌خوبی نشان می‌دهند؛ بنابراین مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته می‌توانند روشی مناسب و جایگزین مدل‌های معمول علی‌رغم مطالعات بسیار کم مورد استفاده قرار گیرند. امید می‌رود پژوهش‌های تکمیلی در مورد استفاده از مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته برای سایر گونه‌های مهم خزری و سایر مناطق رویشی ایران و هم‌چنین سایر مناطق مختلف ایران انجام شود تا بتوان از اطلاعات دقیق در برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع جنگلی و برنامه‌های حفاظتی استفاده نمود. هم‌چنین انتظار می‌رود پژوهش‌های تکمیلی در مورد جهت پردازش مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته تعداد درختان نمونه‌برداری شده را افزایش داد و هم‌چنین از سایر متغیرهای کمی توده در مدل‌های غیرخطی با اثرات آمیخته استفاده نمود.

منابع

1. Masoudi, N., & Mohammadi, J. (2022). Estimation beech (*Fagus Orientalis* L.) and hornbeam (*Carpinus betulus* L.) trees height using nonlinear models and mixed-effects model. *Forest and Wood Products*. 74 (4), 433-443.
2. Sullivan, M. J., Lewis, S. L., Hubau, W., Qie, L., Baker, T. R., Banin, L. F., Chave, J., Cuni-Sanchez, A., Feldpausch, T. R., Lopez-Gonzalez, G., & Arets, E. (2018). Field methods for sampling tree height for tropical forest biomass estimation. *Methods in Ecology and Evolution*. 9 (5), 1179-1189.
3. Kordi, M. R., Mohammadi, J., Moayyeri, M. H., & Sadeghian, J. (2018). Determination of form factor for oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in Golestan province. *Iranian J. of Forest and Poplar Research*. 25 (4), 598-608.
4. Ali, H., Mohammadi, J., & Shataee Jouibary, S. (2023). Allometric models and biomass conversion and expansion factors to predict total tree-level aboveground biomass for three conifers species in Iran. *Forest Science*. 69 (4), 355-370.
5. Natural Resources and Watershed Management Organization (NRWO). (2019). Natural Resources and Watershed Management Organization. Iran.
6. 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 J. of Forest and Poplar Research*. 24 (4), 700-712.
7. Ghaderi, P., Mohammadi, J., Shataee, Sh., Rahmani, R., & Kariminezhad, N. (2023). Efficiency of nonlinear mixed-effects model in determining height-diameter equations of velvet maple and ironwood trees. *Iranian J. of Forest*. 14 (4), 473-485.
8. Castedo, F., Dieguez-Aranda, U., Barrio, M., Sanchez, M.R., & von Gadow, K. (2006). A generalized height-diameter model including random components for radiate pine. *Forest Ecology and Management*. 299 (1-3), 202-213.

9.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.
10.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.
11.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.
12.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.
13.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 (100003), 1-6.
14.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.
15.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.
16.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.
17.Zhang, B., Sajjad, S., Chen, K., Zhou, L., Zhang, Y., Yong, K.K., & Sun, Y. (2020). Predicting tree height–diameter relationship from relative competition levels using quantile regression models for Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) in Fujian province, China. *Forests*. 11 (2), 183.
18.Ahmadi, K., & Alavi, S. J. (2016). Generalized height-diameter models for *Fagus orientalis* Lipsky in Hyrcanian forest, Iran. *J. of forest science*. 62 (9), 413-421.
19.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. *J. of Forestry Research*. 29 (5), 1195-1204.
20.Abedi, R., & Abedi, T. (2020). Some non-linear height-diameter models performance for mixed stand in forests in Northwest Iran. *J. of Mountain Science*. 17 (5), 1084-1095.
21.Duan, G., Gao, Z., Wang, Q., & Fu, L. (2018). Comparison of different height-diameter modelling techniques for prediction of site productivity in natural uneven-aged pure stands. *Forests*. 9 (2), 63.
22.Mehtätalo, L., de-Miguel, S., & Gregoire, T. G. (2015). Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian J. of Forest Research*. 45 (7), 826-837.
23.Trincado, G., VanderSchaaf, C. L., & Burkhart, H. E. (2007). Regional mixed-effects height–diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations. *European J. of Forest Research*. 126 (2), 253-262.
24.Forest, Range and Watershed Organization. (2008). Forest Management Plan of Shast-kalateh, district one. General Office of Natural Resources, Golestan Province. 478p.
25.Forest, Range and Watershed Organization. (2013). Forest Management Plan of Loveh, district one. General Office of Natural Resources, Golestan Province. 462p.
26.Forest, Range and Watershed Organization. (2006). Forest Management Plan of Jafar-abad, General Office of Natural Resources, Golestan Province. 417p.

27. Chambers, J. M. (2008). Software for data analysis: programming with R (Vol. 2). New York: Springer. 504p.
28. 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.
29. 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. *J. of Forest Science*. 62 (10), 470-484.
30. Mastouri, A., Shataee, S., Moayeri, M., & Saghebtalebi, K. (2021). Evaluation of nonlinear height-diameter models of two important species of Turkish Pine (*Pinus brutia*) and Mediterranean Cypress (*Cupressus sempervirens* var. horizontalis), in the planted forests. *J. of Plant Ecosystem Conservation*. 8 (17), 263-279.