

Allometric modeling for fine woody debris biomass estimation in the Gorgan's Shastkolateh beech forests, Iran

A.A. Vahedi^{1*}, S.E. Sadati² and S. Shabani³

1* - Corresponding author, Assistant Prof., Forests and Rangelands Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran. E-mail: as.vahedi@areeo.ac.ir

2- Associate Prof., Forests and Rangelands Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran

3- Assistant Prof., Forests and Rangelands Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

Received: 13.03.2024

Accepted: 09.06.2024

Abstract

Background and objective: Fine woody debris (FWD) is a significant reservoir of carbon and bioenergy in the Hyrcanian forests. Therefore, monitoring changes in FWD biomass on the forest floor is essential for sustainable management, particularly concerning carbon dioxide emissions and carbon trading in both international and domestic markets. The primary objective of this research is to develop optimal allometric equations for accurately monitoring FWD in one of the beech (*Fagus orientalis* Lipsky) communities within the Hyrcanian forests of Iran.

Methodology: This study was conducted in the Shastkolateh research forest in Gorgan County, Iran. A random stratified method was employed for direct sampling and weighing of FWD. The FWD was categorized into three diameter classes: 1-2.5 cm, 2.5-4.5 cm, and 4.5-7.5 cm. For each diameter class, length and degree of decay were measured randomly in pure beech and mixed beech stands. Total weight was measured destructively using digital scales. To estimate biomass values of FWD, a power function allometric model based on curve estimation analysis was utilized. The middle diameter, length, dry wood density, and degree of decay of the weighed FWD were introduced as explanatory variables in the model input matrix. These explanatory variables were combined in various ways as independent variables in a log-transformed model. Model validation was conducted using adjusted regression coefficients (Adj.R²), variance inflation factors (VIF), and residual mean square (RMS). A t-test evaluated the significance of parameters in each model, while the fitting of a Loess curve between standardized residuals and estimations was used to assess the validity of the models.

Results: Model development indicated that incorporating middle diameter (D) and length (L) of FWDs into the exponential function of the log-transformed model increased variance explanation from 38% to 73% and reduced RMS from 0.6 to 0.26. Adding wood density (ρ) did not significantly enhance model accuracy or validity. Including degree of decay as a dummy variable slightly improved model accuracy, resulting in the top-ranked model with the highest variance explanation (Adj.R² = 0.78) and lowest RMS (0.22). Furthermore, introducing the biomass surrogate ($D^2 \times L \times \rho$) along with degree of decay considerably increased accuracy, yielding a second-ranked model (Adj.R² = 0.75; RMS = 0.24). Although some parameters were not statistically significant ($P > 0.05$), no collinearity was detected among the models presented (VIF < 5). The goodness-of-fit data indicated that the Loess curve remained linear around the zero line, with changes in residuals aligning with estimation changes around this line. Findings suggested that biomass estimation for *Diospyros lotus* L. and unidentified species may be unreliable due to standardized residuals falling outside the zero line range, indicating interdependence in error estimation for these species. Conversely, biomass estimates for *F. orientalis* and *Carpinus betulus* L. appeared reliable, with variations not being interdependent.

Conclusion In summary, biomass distribution and changes in FWD values exhibit significant variations based on middle diameter and length. Due to limited ranges of decay and dry wood density, these additional variables did not substantially enhance accuracy in log-transformed models. Approximately 22% to 25% of variance remains unexplained when estimating FWD biomass using selected optimal models, particularly regarding errors (standardized residuals). This discrepancy is most pronounced for *D. lotus* and unidentified species. Overall, the models developed in this research for pure beech and mixed beech-hornbeam forests demonstrate broad applicability within the study area.

Keywords: Bio-energy, carbon trade, carbon sink, fine woody debris, optimum allometric model.

مدل‌سازی آلومتریک زی‌توده خشک‌دارهای ریز در رانشستان‌های جنگل شصت‌کلاته در گرگان

علی اصغر واحدی^{۱*}، سیداحسان ساداتی^۲ و سعید شعبانی^۳

*- نویسنده مسئول، استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران. پست الکترونیک: as.vahedi@areeo.ac.ir

۲- دانشیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران

۳- استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

چکیده

سابقه و هدف: خشک‌دارهای ریز، یکی از مخازن اصلی کربن و منابع انرژی زیستی در جنگل‌های هیرکانی محسوب می‌شوند. از این رو، پایش تغییرات زی‌توده آن‌ها در ارزیابی مدیریت پایدار به‌منظور کاهش انتشار کربن آلی و طراحی تجارت کربن در بازارهای داخلی و بین‌المللی، بسیار ضروری و کاربردی است. هدف اصلی پژوهش پیش‌رو نیز ارائه مدل‌های محاسباتی بهینه آلومتریک برای پایش دقیق مقدار زی‌توده خشک‌دارهای ریز در یکی از رانشستان‌های شمال کشور است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در رانشستان جنگل پژوهشی شصت‌کلاته در شهرستان گرگان انجام گرفت. برای نمونه‌برداری و توزین مستقیم انواع خشک‌دارهای ریز در بستر جنگل از روش طبقه‌ای تصادفی استفاده شد. خشک‌دارهای ریز به سه طبقه قطری شامل یک تا ۲/۵، ۲/۵ تا ۴/۵ و ۴/۵ تا ۷/۵ سانتی‌متر تقسیم‌بندی شدند. از هر طبقه قطری، طول و درجه پوسیدگی چوب‌های افتاده به‌صورت تصادفی در سطح توده‌های جنگلی در تیپ‌های راش آمیخته و راش خالص اندازه‌گیری شد. همچنین، چوب‌های مزبور به‌صورت تخریبی توسط ترازوهای دیجیتالی در داخل عرصه توزین شدند. قطر میانی، طول، چگالی خشک و درجه پوسیدگی خشک‌دارهای توزین‌شده در قالب ماتریس ورودی به‌عنوان متغیرهای توصیفی در مدل معرفی شدند. برای برآورد زی‌توده خشک‌دارهای ریز از تحلیل تخمین منحنی و مدل آلومتریک پایه توانی استفاده شد. پس از تبدیل لگاریتمی متغیرهای ورودی، آن‌ها در ترکیب‌های مختلف و مستقل به‌صورت خطی چندگانه در مدل معرفی شدند. پس از بازتبدیل نمایی و محاسبه فاکتور تصحیح، مدل‌ها بر مبنای ضریب تبیین تعدیل‌یافته ($Adj.R^2$)، فاکتور تورم واریانس (VIF) و میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها (RMS) اعتبارسنجی شدند. آزمون t برای ارزیابی معنی‌داری مؤلفه‌های محاسباتی هر مدل به‌کار برده شد. برای تبیین نهایی صحت‌سنجی مدل‌های طراحی شده نیز از برازش منحنی لوئس (Loess curve) بین مقدار باقی‌مانده‌ها و مقدار برآوردی استفاده شد.

نتایج: معرفی قطر میانی (D) و طول (L) در مدل نمایی بازتبدیل لگاریتمی، توجیه واریانس ($Adj.R^2$) را نسبت به مدل توانی تک‌متغیره از ۳۸ درصد به ۷۳ درصد افزایش و میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها را از ۰/۶ به ۰/۲۶ کاهش داد. معرفی چگالی خشک (ρ) سبب تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در روند دقت و قطعیت مدل نشد. با افزودن درجه پوسیدگی خشک‌دارها به‌عنوان متغیر ساختگی، قطعیت و دقت برآوردی مدل، افزایش جزئی داشت (مدل منتخب اول با بیشینه توجیه واریانس و کمینه میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها: $Adj.R^2 = 0.78$; $RMS = 0.22$). متغیرهای مدل منتخب دوم را معرف زی‌توده خشک‌دارها ($D^2 \times L \times \rho$) به‌انضمام درجه پوسیدگی تشکیل دادند که سبب افزایش قطعیت و دقت مدل شدند ($Adj.R^2 = 0.75$; $RMS = 0.24$). نتایج مدل‌سازی نشان داد که اگر چه در بعضی از مدل‌های منتخب، برخی از مؤلفه‌های محاسباتی معنی‌دار نبود ($P < 0.05$)، اما بین متغیرهای مستقل، همبستگی خطی چندگانه وجود نداشت ($VIF < 5$). خروجی‌های مربوط به برازش بین باقی‌مانده‌های استاندارد یافته و تخمین مدل نشان داد که منحنی لوئس در اطراف خط صفر، خطی بود. تغییرات باقی‌مانده‌ها نیز در راستای تغییرات تخمین در اطراف خط صفر علاوه‌بر تراکم، دارای پراکندگی واگرا و همگرا نبودند. همچنین، مقدار استاندارد یافته باقی‌مانده‌های مدل‌های منتخب برای برآورد زی‌توده خشک‌دارهای ریز خرمندی (*Diospyros lotus L.*) و گونه‌های غیرقابل‌شناسایی، خارج از محدوده خط صفر بود و به نوعی خطای

آن‌ها به یکدیگر وابسته است. برخلاف آن، تغییرات زی‌توده خشک‌دانه‌های راش (*Fagus orientalis* Lipsky) و مرز (*Carpinus betulus* L.)، مستقل از یکدیگر بودند.

نتیجه‌گیری کلی: در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان اذعان کرد که توزیع و مقدار زی‌توده خشک‌دانه‌های ریز براساس قطر میانی و راستای طولی، تغییرات عدیده‌ای دارند. با توجه به دامنه محدود پوسیدگی و محدوده دقت برآورد چگالی خشک‌دانه‌های ریز، معرفی متغیرهای مزبور سبب افزایش قابل‌توجه در دقت و قطعیت برآورد مدل‌های بازتبدیلی لگاریتمی نشد. براساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان استنباط کرد که ۲۲ تا ۲۵ درصد از عدم توجه واریانس مدل‌های منتخب و بهینه برای تخمین زی‌توده خشک‌دانه‌های ریز مربوط به خطای (باقی‌مانده‌های استاندارد یافته) برآورد زی‌توده خشک‌دانه‌های ریز خرمندی و گونه‌های غیرقابل‌شناسایی است. به‌طورکلی، مدل‌های منتخب طراحی‌شده در این پژوهش برای راشستان خالص و تیپ‌های آمیخته راش با فراوانی مرز در جنگل مورد پژوهش، کاربرد وسیعی دارند.

واژه‌های کلیدی: انرژی زیستی، تجارت کربن، حوضچه کربن، ریزچوب، مدل بهینه آلومتریک.

مقدمه

خشک‌دانه‌های بزرگ یا قطور (Coarse woody debris): خشک‌دانه‌های کوچک یا ریز (Fine woody debris): یکی از اجزای مهم و تأثیرگذار در چرخه زیستی، سلامت (Jahdi & Shahamati Nejad, 2024)، کیفیت (Khalili et al., 2022) و خدمات بوم‌سازگان در جنگل‌های طبیعی محسوب می‌شوند. در تفکیک خشک‌دانه‌های قطور و ریز در انواع بوم‌سازگان‌های جنگلی، یک معیار جامع و مطلق وجود ندارد، اما به‌طور معمول، چوب‌های افتاده در بستر جنگل با قطر کمتر از هشت تا ۱۰ سانتی‌متر و با طول بیشتر از یک سانتی‌متر به‌عنوان خشک‌دانه‌های ریز مدنظر قرار می‌گیرند (Woodall et al., 2021; Korboulewsky et al., 2013). در بسیاری از مستندات علمی و گزارش‌های بین‌المللی، خشک‌دانه‌های ریز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی زیستی (زیست‌انرژی) و ذخایر کربن در بوم‌سازگان‌های جنگلی محسوب می‌شوند (Delcourt & Veraverbeke, 2022; Giuntoli et al., 2023; Hoffmann, 2022; Shabani et al., 2023). در عصر پیش‌رو به‌خصوص در جوامع پیشرفته، تقاضا برای انرژی زیستی در بوم‌سازگان‌های جنگلی افزایش یافته است، اما گسترش این تقاضا به‌ویژه برای انواع زی‌توده روی زمینی از جمله خشک‌دانه‌های ریز با پروتکل‌ها و دستورالعمل‌های مرتبط با پروژه‌ها و مؤلفه‌های مدیریتی

کاهش تغییر اقلیم، متناقض است (Giuntoli et al., 2022). در واقع، برخی از پژوهش‌ها گزارش کرده‌اند که مصارف زی‌توده روی زمینی از جمله استفاده از خشک‌دانه‌های ریز در قالب انرژی زیستی سبب هدررفت کربن آلی و به‌دنبال آن، موجب تشدید تغییر اقلیم می‌شوند (Booth, 2018; Moomaw et al., 2020). برخلاف این قاعده، تجارت سبز از جمله تجارت مبتنی بر کربن (با احتساب مقدار زی‌توده خشک‌دانه‌های ریز) عامل مهمی برای سیاست‌گذاری اصولی در چهارچوب طراحی‌های مربوط به کاهش انتشار کربن و افزایش ذخایر کربن اتمسفری است (Blanton et al., 2024). کاربرد انرژی زیستی به‌عنوان انرژی تجدیدپذیر، استفاده از آن به‌جای سوخت‌های فسیلی در یک چهارچوب زمانی کوتاه‌مدت و نیز برجسته‌سازی تجارت کربن در همین زمینه می‌تواند روندی مثبت و کاهنده بر تغییر اقلیم داشته باشند (Wang et al., 2015; Cowie et al., 2021). از این‌رو، پایش تغییرات زی‌توده چوب‌های افتاده از جمله خشک‌دانه‌های ریز بستر جنگل‌های طبیعی در ارزیابی مدیریت پایدار به‌منظور کاهش انتشار کربن آلی و در ارتباط با طراحی تجارت کربن در بازارهای داخلی و بین‌المللی، بسیار ضروری و کاربردی است.

راشستان‌های جنگل‌های هیرکانی با انواع جوامع گیاهی و تیپ‌های مختلف درختان از جمله رویشگاه‌هایی هستند که نسبت به جوامع گیاهی دیگر در جنگل‌های مذکور، تراکم و

بیشینه دقت و کمینه عدم قطعیت می‌تواند یک تکنیک استاندارد و کارا برای برآورد زی توده خشک‌دارهای ریز در مقیاس وسیع محسوب شود (Delcourt & Veraverbeke, 2022). آلومتری به بررسی ارتباط بین تغییرات ابعاد همبسته با نرخ رویشی و یا متغیرهای زیست‌فیزیکی مختلف گیاهان می‌پردازد. این تکنیک، کاربرد وسیعی در بوم‌سازگان‌های جنگلی برای اجزای مختلف درختان از جمله کنده، تنه، شاخه‌ها و ریزشاخه‌ها دارد (Vahedi, 2016; Delcourt & Veraverbeke, 2022). معادله‌های آلومتریکی، مدل‌های محاسباتی با بیشینه دقت و قطعیت هستند که متغیرهایی مانند زی توده و موجودی کربن را با استفاده از ابعاد هندسی و زیست‌فیزیکی اجزای مختلف درختان برآورد می‌کنند (Adinugroho *et al.*, 2023). هدف اصلی پژوهش پیش‌رو، ارائه مدل‌های محاسباتی بهینه برای برآورد روبه واقعیت زی توده خشک‌دارهای ریز در یکی از راشستان‌های هیرکانی است. در واقع با ارائه مدل‌های آلومتریکی با بیشینه دقت و قطعیت می‌توان به نمایه‌سازی واقعی مقدار زی توده خشک‌دارهای ریز دست‌یافت تا بتوان در آینده‌ای نزدیک، جایگاه این حوضچه‌های کربن را در مدیریت پایدار و سهم واقعی آن‌ها را در تجارت کربن در بازارهای داخلی و بین‌المللی مشخص کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سری‌های یک و دو از جنگل پژوهشی شصت‌کلاته در شهرستان گرگان انجام شد. سری اول با مساحت ۱۷۱۴ هکتار شامل ۳۳ پارسل بین عرض جغرافیایی $36^{\circ} 27' 27''$ تا $36^{\circ} 43' 27''$ شمالی و طول $54^{\circ} 21' 26''$ تا $54^{\circ} 24' 57''$ شرقی قرار دارد. سری دوم با مساحت ۱۹۹۲ هکتار نیز از ۳۱ پارسل تشکیل شده است که در عرض $36^{\circ} 42' 30''$ تا $36^{\circ} 43' 30''$ شمالی و طول

حجم قابل‌ملاحظه‌ای از زی توده روی زمینی را به خود اختصاص داده‌اند. این توده‌ها می‌توانند برای سرمایه‌گذاری اقتصادی در زمینه تجارت کربن مبتنی بر ذخایر کربن و انرژی زیستی مرتبط با انباشت خشک‌دارهای ریز به‌کار گرفته شوند. خشک‌دارهای ریز در روند مدیریت کلاسیک و همگام با طبیعت جنگل‌های هیرکانی، جایگاه ویژه‌ای نداشته‌اند و فقط به‌عنوان چوب‌های هیزمی و مازاد در بستر جنگل تلقی شده‌اند، اما خشک‌دارهای ریز علاوه بر اینکه به‌عنوان منابع انرژی زیستی و ذخایر کربن محسوب می‌شوند، طبق گزارش‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) و سکوی بین‌دولتی سیاست‌گذاری علمی درباره تنوع زیستی و خدمات بوم‌سازگان (IPBES)، نقش بسزایی در تنوع زیستی در مقیاس محلی دارند (IPBES, 2018; IPCC, 2019). به عبارت دیگر، برداشت حوضچه‌های مذکور از بوم‌سازگان‌های جنگلی سبب تأثیر منفی و استرس‌های مخرب بر تنوع زیستی خواهد شد (IPBES, 2019; IPCC, 2018). بنابراین لزوم برنامه‌ریزی‌های فنی در رابطه با مدیریت انباشت خشک‌دارهای ریز در جنگل‌های هیرکانی بیش‌ازپیش ضرورت دارد. تدوین چنین برنامه‌ریزی‌هایی هم از نظر عملیاتی و هم از نظر حفاظتی در طرح جایگزین مصوبه استراحت (تنفس) جنگل‌های هیرکانی نیز باید در دستورکار قرار گیرد. با این احتساب، ارائه تکنیک‌های تحلیلی به‌منظور پایش هر چه دقیق‌تر تغییرات زی توده خشک‌دارهای ریز سبب افزایش راندمان مدیریتی به‌منظور دستیابی به تکمیل مؤلفه‌های اصل توسعه پایدار در جنگل‌های هیرکانی می‌شود.

اولین گام برای پایش خشک‌دارهای ریز در بوم‌سازگان جنگلی هیرکانی، اندازه‌گیری و نمایه‌سازی مقدار واقعی زی توده خشک‌دارهای ریز در بستر جنگل‌های مورد اشاره است. انباشت حجمی خشک‌دارهای ریز در جنگل‌های هیرکانی، قابل‌ملاحظه و دارای گستره و پراکندگی زیادی است، بنابراین اندازه‌گیری، محاسبه و پایش دقیق زی توده آن‌ها، بسیار سخت، هزینه‌بر و در بسیاری از موارد تقریباً غیرممکن است. از این‌رو، طراحی معادله‌های آلومتریکی با

"۵۴° ۲۱' ۶" تا "۵۴° ۲۳' ۳۰" شرقی واقع شده است. سری اول از ارتفاع ۷۰۰ متر از سطح دریا تا بالاترین نقطه مرزی سری دو دارای تیپ‌های جنگلی مختلف است که گونه غالب آن را درختان راش (*Fagus orientalis* Lipsky) تشکیل می‌دهند (Karimi et al., 2019). در سری دو نیز از ارتفاعات میان‌بند به بالا، درختان راش و ممرز (*Carpinus betulus* L.) به ترتیب گونه‌های غالب هستند. از ارتفاع ۸۰۰ متر به بالا، درجه خلوص درختان راش در تیپ‌های مختلف بیشتر می‌شود (Karimi et al., 2019). پژوهش پیش‌رو در سری یک در محدوده ارتفاعی ۶۹۰ تا ۷۸۰ متر از سطح دریا در تیپ‌های آمیخته راش-ممرز و در سری دوم در محدوده ارتفاعی ۹۴۰ تا ۱۰۵۰ متر از سطح دریا در نزدیکی مرز سری اول در تیپ‌های خالص راش با بیشتر از ۹۰ درصد درجه خلوص انجام گرفت. براساس نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی، بارندگی متوسط سالانه منطقه مورد مطالعه حدود ۶۴۹ میلی‌متر است.

مزبور به صورت تخریبی توسط ترازوهای دیجیتالی در داخل عرصه اندازه‌گیری شد. چوب‌های طویل برای استقرار بر روی ترازوی دیجیتال به قطعه‌های مختلف تبدیل شدند. به طور معمول برای درجه پوسیدگی خشک‌داری‌های ریز، دو کلاسه شامل سالم و پوسیده در نظر گرفته می‌شود (Harmon et al., 2007). در پژوهش پیش‌رو نیز دو کلاسه مذکور برای خشک‌داری‌های توزین‌یافته در روند اندازه‌گیری‌ها ثبت شد. پس از توزین هر خشک‌دار، نمونه‌برداری (تکه‌برداری) از بخش‌های مختلف همه خشک‌دارها انجام گرفت. نمونه‌ها پس از توزین در عرصه به آزمایشگاه انتقال یافتند. حجم نمونه‌ها در آزمایشگاه توسط روش جایجایی آب محاسبه شد (Romashkin et al., 2021). همه نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آن تحت دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا خشک شوند و به وزن ثابت برسند (Henry et al., 2010; Romashkin et al., 2021). سپس، نمونه‌ها دوباره وزن شدند و بر مبنای نسبت وزن خشک به وزن تر اولیه، ضریب خشکی برای تبدیل وزن تر هر خشک‌دار به مقدار زی‌توده کل محاسبه شد (Henry et al., 2010; Romashkin et al., 2021).

تحلیل داده‌ها

برای محاسبه چگالی خشک (Wood dry density: ρ) خشک‌داری‌های ریز برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب از رابطه (۱) استفاده شد (Romashkin et al., 2021).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، M و V به ترتیب جرم خشک برحسب گرم و حجم سبز (تر) برحسب سانتی‌متر مکعب هستند. به منظور برآورد مقدار زی‌توده خشک‌داری‌های ریز (Y) از تحلیل تخمین منحنی (Curve Estimation) و مدل آلومتریکی پایه توانی استفاده شد. مدل توانی (رابطه ۲) به عنوان مدل پایه آلومتریکی، تابع تحلیلی تخمین منحنی

روش پژوهش

جمع‌آوری داده‌ها

در این پژوهش به منظور اجرای عملیات نمونه‌برداری و توزین مستقیم انواع خشک‌داری‌های ریز موجود در بستر جنگل از روش طبقه‌ای تصادفی استفاده شد. خشک‌داری‌های ریز به سه طبقه قطری یک تا ۲/۵، ۲/۵ تا ۴/۵ و ۴/۵ تا ۷/۵ سانتی‌متر تقسیم‌بندی شد (Harmon et al., 2007). از هر طبقه تعریف‌شده، قطر میانی و طول چوب‌های افتاده جنگل به صورت تصادفی در سطح توده‌های جنگلی در تیپ‌های راش خالص و راش آمیخته اندازه‌گیری شد. طول خشک‌داری‌هایی که انحنا و خمیدگی داشتند، براساس انحراف از خط افقی اندازه‌گیری شد. همچنین، وزن کل چوب‌های

رگرسیون است.

پژوهش‌ها نشان داده شد که مدل توانی، بهترین تابع محاسباتی مبتنی بر تحلیل رگرسیون برای برآورد زی‌توده اجزای درختان است. تابع مزبور نسبت به بقیه مدل‌های خطی و غیرخطی تخمین منحنی رگرسیون، دقت قابل توجهی در برآورد زی‌توده اجزای درختان دارد.

قطر میانی، طول، چگالی خشک و درجه پوسیدگی خشک‌دارهای توزین‌شده در قالب ماتریس ورودی به‌عنوان متغیرهای توصیفی در مدل معرفی شد. با احتساب تک‌متغیره بودن مدل پایه آلومتریک، مدل‌سازی براساس تحلیل خطی چندگانه (Multiple linear regression: MLR) انجام شد (رابطه ۳).

$$Y = ax^b \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، x نشان‌دهنده متغیر مستقل شامل ویژگی‌های زیستی و دندرومتریک اجزای درختان و ضریب‌های a و b بیانگر مؤلفه‌های محاسباتی هستند (Vahedi, 2016). در خصوص استفاده از معادله‌های آلومتریک برای برآورد زی‌توده اجزای درختان در زیست‌بوم‌های مختلف، مستندات علمی زیادی وجود دارد (Vahedi, 2016; Korboulewsky et al., 2021; Delcourt & Veraverbeke, 2022; Kuyah et al., 2024). در همه این

$$Y_n = \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \beta_p x_{np} + Z_n \rightarrow (x_{n1}, \dots, x_{np}) \beta + Z_n \quad \text{رابطه (۳)}$$

مبتنی بر تحلیل خطی چندگانه، مدل غیرخطی پایه آلومتریک پس از تبدیل لگاریتمی به مدل خطی تبدیل شد. پس از محاسبه فاکتور تصحیح (CF)، مدل خطی لگاریتمی بر مبنای بازتبدیل لگاریتمی به مقدار پیش از تبدیل لگاریتمی محاسبه شد. کلیات عنوان‌شده در رابطه (۵) مشهود است (Vahedi, 2016).

در تحلیل خطی چندگانه، برآورد و استنباط نتایج مؤلفه‌های β در رابطه (۴) نشان داده می‌شود (Bates & Watts, 1988):

$$\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]^T \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$Y = ax^b \xrightarrow{\text{Log-transformed}} \ln(Y) = \ln a + b \ln(x) \xrightarrow{CF = \exp\left(\frac{SEE^2}{2}\right) \rightarrow CF > 1} \checkmark \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Y = Biomass_{FWD} = (Exp\{\ln a + b \ln x\}) \times CF$$

انجام گرفت. آزمون t برای ارزیابی معنی‌داری مؤلفه‌های محاسباتی در هر مدل به‌کار برده شد. برای تبیین نهایی صحت‌سنجی مدل‌های طراحی‌شده از برازش بین باقی‌مانده‌ها و مقدار پیش‌بینی توسط هر مدل استفاده شد. در واقع، اگر برازش منحنی لوئس (Loess curve) واگرا یا همگرا نباشد و ابرنقاط در اطراف خط فرضی صفر به‌صورت

که در آن، SEE بیانگر اشتباه معیار تخمین رگرسیون و Y نشان‌دهنده مقدار زی‌توده خشک‌دار ریز برحسب گرم است.

اعتبارسنجی مدل‌های آلومتریک بر مبنای شاخص‌هایی از جمله ضریب تبیین تعدیل‌یافته ($Adj.R^2$)، فاکتور تورم واریانس (VIF) و میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها (RMS)

متمرکز و یکنواخت باشد، دقت و قطعیت مدل طراحی شده را نشان می‌دهد.

مطابق با نتایج به دست آمده، میانگین زی توده خشک دارهای توزین یافته حدود ۰/۵ کیلوگرم بود. بیشینه مقدار زی توده توزین شده ۳/۱ کیلوگرم به دست آمد. ضریب تغییرات و دقت برآورد مقدار زی توده خشک دارها در این پژوهش نسبت به مؤلفه‌های دیگر، زیادتر است (جدول ۱). از بین همه خشک دارهای نمونه برداری شده، ۴۹ درصد دارای کیفیت سالم و ۵۱ درصد پوسیده بودند.

نتایج

ویژگی‌های زیست فیزیکی خشک دارهای ریز در رانشستان مورد مطالعه جنگل شصت کلاته به اختصار در جدول ۱ نشان داده شد. با تعداد ۹۰ نمونه (Sample size)

جدول ۱- ویژگی‌های زیست فیزیکی خشک دارهای ریز در جنگل مورد پژوهش

Table 1. Biophysical attributes of the FWDs in the study forest

Parameter	Minimum	Maximum	Mean ± Standard error	CV (%)	E (%)
Middle diameter (cm)	1.2	7.4	3.51 ± 0.2	46.4	11.4
Length (m)	0.38	3.2	1.2 ± 0.06	52.2	10.3
Dry wood density (g.cm ⁻³)	0.35	0.94	0.72 ± 0.01	16.6	2.7
Biomass (kg)	0.03	3.1	0.47 ± 0.06	103.4	25.5

مربعات کمتری به دست آمد. بهترین مدل معرفی شده به مدل ۶ برحسب قطر میانی، طول، چگالی خشک و درجه پوسیدگی تعلق داشت که بیشینه ضریب تبیین تعدیل یافته ($Adj.R^2 = 0.78$) و کمینه میانگین مربعات باقی مانده‌ها ($RMS = 0.22$) را به خود اختصاص داد. از بین همه مدل‌های خطی معرفی شده، فقط همه مؤلفه‌های محاسباتی مدل ۸ معنی دار به دست آمدند، اما برخی از مؤلفه‌ها در مدل‌های دیگر معنی دار نبودند ($P > 0.05$).

در جدول ۲، مدل‌های مختلف آلومتریک برپایه مدل توانی برای برآورد مقدار زی توده خشک دارهای ریز در جنگل مورد پژوهش آمده است. نتایج نشان داد که ضریب تبیین تعدیل یافته و میانگین مربعات باقی مانده‌ها در مدل پایه توانی فقط برحسب قطر میانی یا برحسب طول خشک دارها، مقدار مشابهی داشتند. در مدلی که طول خشک دار به عنوان متغیر مستقر است، مؤلفه ثابت معنی دار نیست ($P < 0.05$). در مدل تبدیل یافته لگاریتمی برحسب قطر و طول باهم (مدل ۳)، ضریب تبیین تعدیل یافته زیادتر و مقدار میانگین

جدول ۲- مدل‌های آلومتریک زی توده خشک دارهای ریز در جنگل مورد پژوهش

Table 2. Allometric equations for the fine woody debris biomass in the study forest

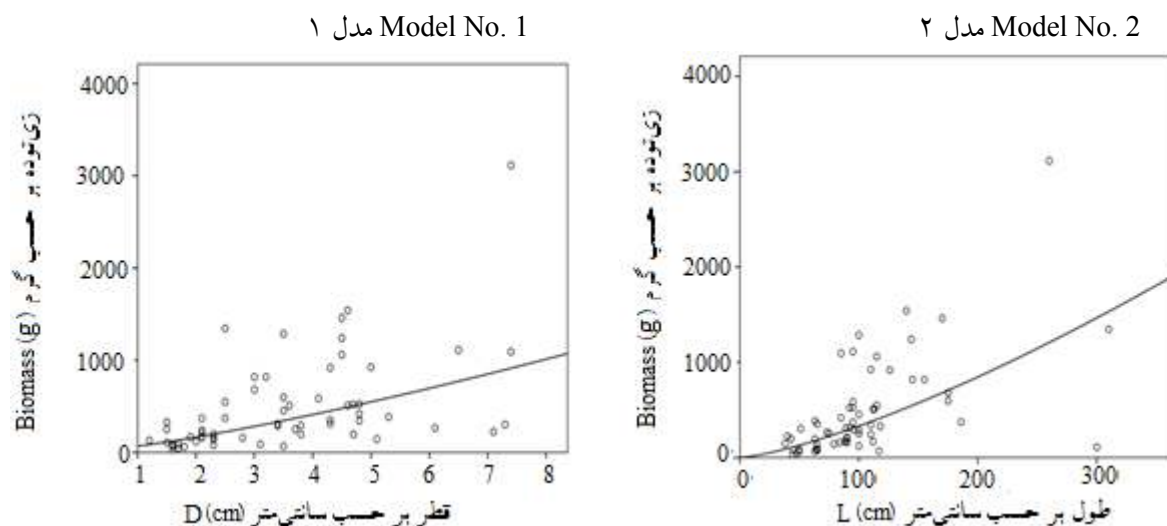
No.	Allometric models	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	Adj.R ²	RMS	VIF _{max}	CF
1	$Y = b_0(D)^{b_1}$	67.6**	1.3**	--	--	--	0.37	0.62	--	--
2	$Y = b_0(L)^{b_1}$	0.64 ^{ns}	1.3**	--	--	--	0.38	0.6	--	--
3	$Y = Exp(b_0 + b_1 \ln(D) + b_2 \ln(L))$	-1.5*	9.09**	9.1**	--	--	0.73	0.26	1.002	1.13
4	$Y = Exp(b_0 + b_1 \ln(D) + b_2 \ln(L) + b_3 \ln(\rho))$	-1.2 ^{ns}	1.3**	1.2**	0.74*	--	0.75	0.24	1.21	1.12
5	$Y = Exp(b_0 + b_1 \ln(D^2 \times L) + b_2 \ln(\rho))$	0.53 ^{ns}	0.8**	1.1**	--	--	0.7	0.32	1.1	1.15
6	$Y = Exp(b_0 + b_1 \ln(D) + b_2 \ln(L)) + b_3 \ln(\rho) + b_4(decay)$	-0.5 ^{ns}	1.4**	1.1**	0.5 ^{ns}	-0.3*	0.78	0.22	1.34	1.11
7	$Y = Exp(b_0 + b_1 \ln(D^2 \times L) + b_2 \ln(\rho) + b_3(decay))$	0.91*	0.84**	0.68 ^{ns}	-0.4**	--	0.75	0.24	1.24	1.12
8	$Y = Exp(b_0 + b_1 \ln(D^2 \times L \times \rho) + b_2(decay))$	0.92*	0.84**	-0.4**	--	--	0.75	0.24	1.03	1.12

: Significant at p<0.01; *: Significant at p<0.05; ns: non-significant**

.Y: Fine woody debris biomass (g), D: Middle diameter (cm), L: Length (cm), ρ: Dry wood density (g.cm⁻³), decay: 0 = Decayed and 1 = Undecayed

۲) نشان می‌دهد. براین اساس، مدل توانی برحسب طول تقریباً برازش مناسب‌تری است.

شکل ۱ برازش مقدار زی توده خشک‌دارهای ریز را در قالب مدل توانی برحسب قطر میانی (مدل ۱) و طول (مدل ۲)



شکل ۱- برازش مدل توانی زی توده خشک‌دارهای ریز با احتساب قطر میانی و طول

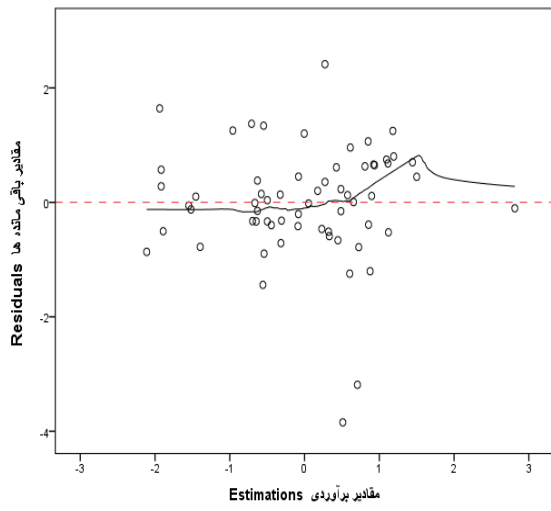
Figure 1. Goodness of fit data of power function for the fine woody debris biomass estimation including middle diameter (D) and length (L)

براساس هریک از مدل‌های بهینه در اطراف صفر را نشان می‌دهد. صرف‌نظر از برازش‌های صورت‌گرفته، نتایج نشان داد که راش، ممرز، خرمندی (*Diospyros lotus L.*) و گونه‌های غیرقابل‌شناسایی (Unknown) به ترتیب ۶۶/۷، ۲۲/۳، ۶/۶ و ۴/۴ درصد از فراوانی نسبی را در حجم نمونه‌برداری و روند تخریبی توزین به‌خود اختصاص دادند. براساس شکل ۳، میانگین باقی‌مانده‌های برآورد زی توده خرمندی و گونه‌های ناشناس، تغییرات بیشتری داشتند، اما این تغییرات برای راش و ممرز، کمتر بودند و در اطراف خط صفر، تمرکز بیشتری نشان دادند.

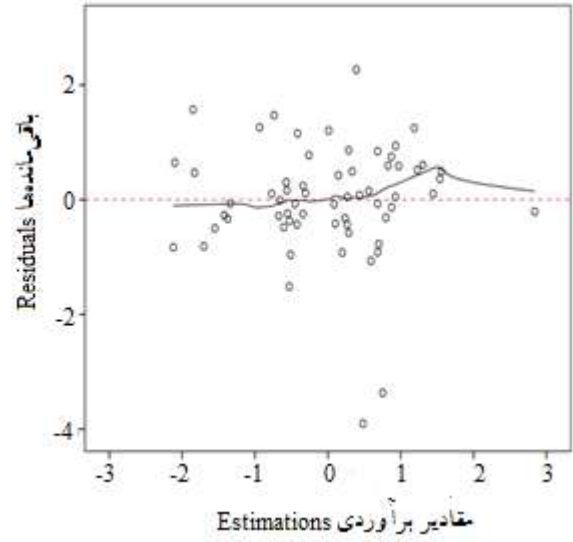
در شکل ۲ برازش بین برآورد و مقدار باقی‌مانده‌های حاصل از مدلسازی‌های بهینه آلومتریکی آمده است. همان‌طور که براساس خط مبنا نشان داده می‌شود، منحنی لوئس مبتنی بر برازش بین باقی‌مانده‌ها و تخمین مدل‌ها در حول صفر به‌صورت خطی است. در واقع، روند تمرکز ابر نقاط بر مبنای منحنی لوئس در اطراف صفر است. نتایج برازش منحنی لوئس برای مدل‌های ۶، ۷ و ۸ تمرکز بیشتری از ابر نقاط را در اطراف خط صفر نشان می‌دهد. در هیچ‌کدام از مدل‌ها، واگرایی و هم‌گرایی تغییرات باقی‌مانده‌ها در رابطه با مقدار تخمین مشاهده نمی‌شود.

شکل ۳، میانگین باقی‌مانده‌های زی توده به تفکیک گونه

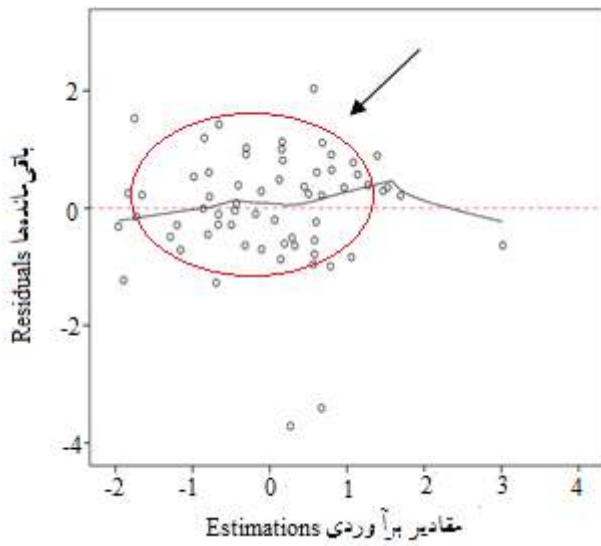
Model No. 3 مدل ۳



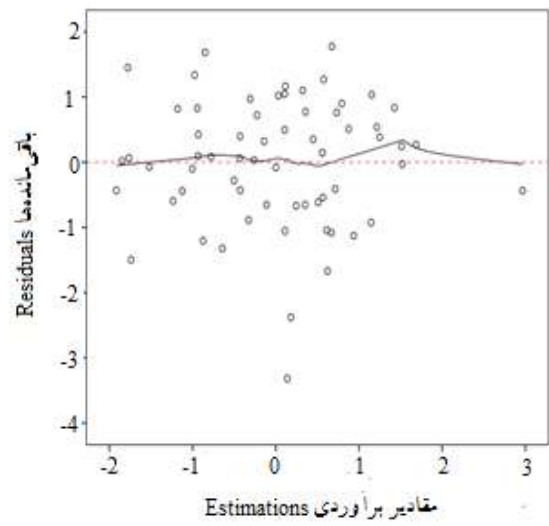
Model No. 4 مدل ۴

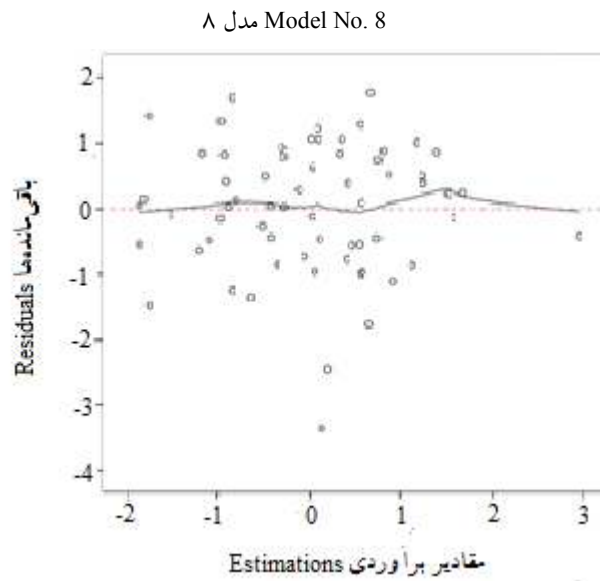


Model No. 6 مدل ۶



Model No. 7 مدل ۷

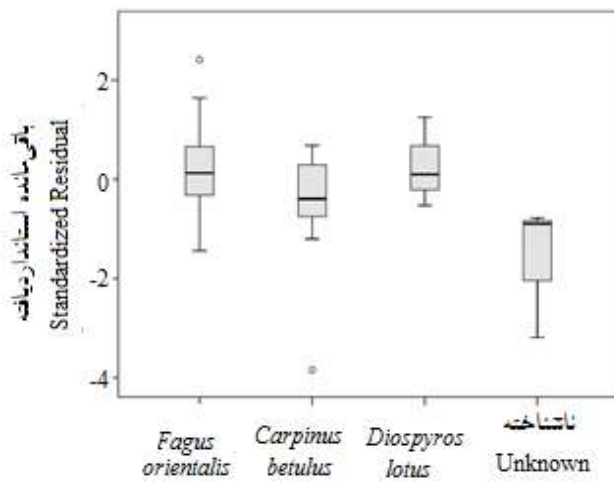




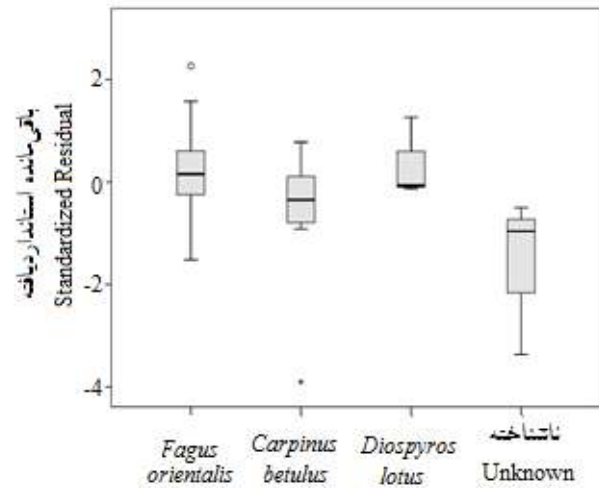
شکل ۲- برآزش بین باقی مانده‌ها و مقدار برآورد در مدل‌های بهینه آلومتریک بیضی قرمز رنگ در مدل ۶، ابر نقاط متمرکزتر در اطراف خط مبنا را نشان می‌دهد.

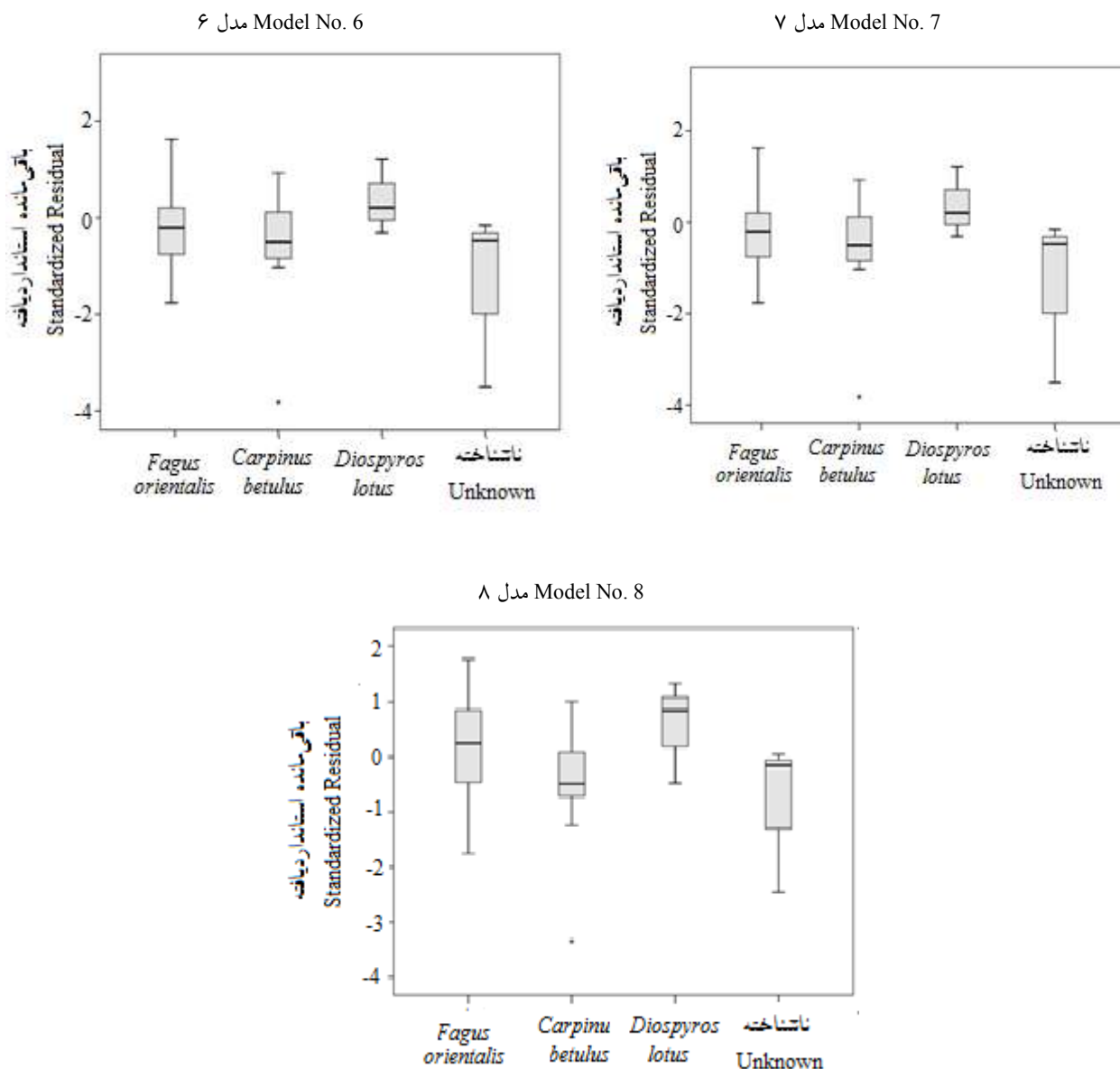
Figure 2. Goodness of fit data between the residuals and estimations of the optimum allometric models
In model no. 6, the red ellipse highlights a denser clustering of data points near the baseline.

Model No. 3 مدل ۳



Model No. 4 مدل ۴





شکل ۳- تغییرات باقی مانده های برآورد زی توده خشک داره های ریز در گونه های مختلف در جنگل مورد پژوهش

Figure 3. Variations of standardized residual in the fine woody debris biomass for different species in the study forest

بحث

(جدول ۱). دامنه تغییرات قطر میانی و طول خشک داره های توزین شده، مشابه یکدیگر هستند. دامنه قابل ملاحظه طبقه های قطر میانی و اندازه های مختلف طولی و نیز تغییرات واریانس مقدار زی توده در طبقه های مختلف قطری نشان دهنده قطعیت روند مدل سازی انجام گرفته در این پژوهش است.

براساس نتایج پژوهش پیش رو، ضریب تغییرات و دقت برآورد مقدار زی توده خشک داره های ریز در حجم نمونه های اندازه گیری شده زیاد است (CV = ۱۰۳/۴٪). با توجه به دامنه تغییرات زی توده خشک داره ها، کمینه و بیشینه مقدار عددی به دست آمده بین ۳۰ گرم تا ۳/۱ کیلوگرم به دست آمد

متغیرهای توصیفی علاوه بر قطر میانی و طول در مدل‌نمایی تبدیل لگاریتمی معرفی شد که تغییر خاصی در دقت و قطعیت مدل‌سازی ایجاد نکرد. در میان متغیرهای اندازه‌گیری شده، کمترین ضریب تغییرات به چگالی خشک تعلق داشت ($CV = 16/6\%$)، بنابراین استدلال قبلی مبنی بر اینکه روند تغییرات زی‌توده خشک‌دارهای ریز در راستای طولی، زیاد بود، بیانگر تغییرات زیاد چگالی نیست. بلکه تغییرات زی‌توده اغلب به تغییرات هم‌زمان قطر و طول آن‌ها برمی‌گردد.

مبتنی بر تئوری متابولیک بوم‌شناختی (Metabolic ecology theory: MET) مقدار تغییرات زی‌توده روی زمینی درختان متناسب است با $D^{8/3}$. در این صورت مقدار زی‌توده (Y) از طریق $Y = b_0(D)^{2.6}$ به دست خواهد آمد (Djomo et al., 2010; Alvarez et al., 2012; Sileshi, 2014). Vahedi (2016) عنوان کرد که عدد نمای مدل آلومتریکی پایه باید در محدوده ۲/۶ باشد. در غیر این صورت، مبتنی بر تئوری مزبور، مدل طراحی شده، کارایی لازم برای برآورد مقدار پاسخ (مقدار زی‌توده روی زمینی درختان) را نخواهد داشت. همچنین، برخلاف نمای عددی ثابت، تفاوت در مؤلفه ثابت و یا شیب مدل پایه آلومتریکی برحسب قطر است که به اختلاف مقدار پاسخ منجر می‌شود (Vahedi, 2016). در مدل پایه آلومتریکی پژوهش پیش‌رو، مقدار عددی نما برحسب قطر ۱/۳ را نشان داد (مدل ۱ در جدول ۲). نکته جالب این است که همین مقدار عددی برای نمای مدل برحسب طول خشک‌دار نیز مشاهده شد (مدل ۲). از آنجایی که در این پژوهش توجیه واریانس و خطای برآوردی مدل‌های پایه آلومتریکی فقط برحسب قطر میانی یا طول خشک‌دارهای ریز برخلاف مستندات مذکور، مقدار قابل توجهی نداشت، بنابراین می‌توان استدلال‌های عنوان شده را در این زمینه برای نمای عددی ۲/۶ تأیید کرد. در پژوهش Vahedi (2016) مدل توانی پایه با احتساب قطر دارای توجیه واریانس بیشتر از ۸۲ درصد بود. در صورتی که در پژوهش پیش‌رو، ضریب تبیین تعدیل‌یافته در مدل ۳۷ درصد به دست آمد. صرف‌نظر از تفسیرهای چالش‌برانگیز در

معرفی قطر میانی و طول خشک‌دارهای ریز به‌عنوان تنها متغیر توصیفی در مدل پایه آلومتریکی نشان داد که قطعیت و صحت این مدل‌ها به یکدیگر شبیه هستند (مدل‌های ۱ و ۲ در جدول ۲). اما جالب توجه بود که احتساب قطر میانی و طول خشک‌دارها با هم در مدل‌نمایی تبدیل لگاریتمی (مدل ۳) سبب افزایش ضریب تبیین تعدیل‌یافته از ۳۸ درصد به ۷۳ درصد و کاهش مربعات باقی‌مانده‌ها از ۰/۶ به ۰/۲۶ شد. این افزایش توجیه واریانس ($Adj.R^2$) و کاهش خطای برآورد با نتایج گزارش شده در رابطه با معادله‌های آلومتریکی طراحی شده برای زی‌توده روی زمینی (Above-ground biomass) درختان در زیست‌بوم‌های مختلف مغایرت دارد. Vahedi (2016) در رابطه با طراحی معادله‌های آلومتریکی برای تنه درختان در راشستان آمیخته گلندرود در جنگل‌های هیرکانی گزارش کرد که قطر برابر سینه درختان، بیشینه همبستگی را با مقدار زی‌توده و بیشترین سهم را در توجیه واریانس و کاهش خطای برآوردی به‌خود اختصاص داد. نتایج دیگر پژوهش مذکور نشان داد که با معرفی ارتفاع درختان علاوه بر قطر در مدل تبدیلی لگاریتمی، افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در توجیه واریانس و کاهش خطای برآوردی مشاهده نشد. Adinugroho و همکاران (2023) و Duangsathaporn و همکاران (2023) در خصوص مدل‌سازی آلومتریکی برای برآورد زی‌توده توده‌های درختان در تیپ‌های مختلف جنگل‌های استوایی با ارائه نتایج مشابهی در این زمینه عنوان کردند که قطر برابر سینه نسبت به ارتفاع، سهم زیادی را در افزایش توجیه واریانس و کاهش خطای برآوردی دارد. بدین ترتیب می‌توان عنوان کرد که توزیع تغییرات زی‌توده خشک‌دارهای ریز، برخلاف مقدار زی‌توده روی زمینی درختان سرپا، تغییرات زیادی در راستای مختلف طولی دارد. بر همین مبنای زی‌توده خشک‌دارهای ریز هم‌زمان با تغییرات قطر میانی و طولی، مقدار متفاوتی را نشان می‌دهد. به همین دلیل در مدل ۳ با افزودن طول خشک‌دارها به‌عنوان متغیر ثانویه، قطعیت و دقت برآوردی نسبت به مدل‌های ۱ و ۲ افزایش یافت. در مدل ۴، مقدار چگالی خشک نیز به‌عنوان یکی دیگر از

متغیر توصیفی تأثیرگذار در تخمین متغیر پاسخ محسوب می‌شود. به همین ترتیب، معرف مقدار زی‌توده در مدل ۸ سبب افزایش قطعیت و دقت مدل شد. از این رو در رابطه با مدل‌سازی آلومتریک زی‌توده خشک‌دارهای ریز می‌توان اذعان کرد که استدلال Picard و همکاران (۲۰۱۵) در خصوص توزیع و مقدار کل زی‌توده خشک‌دارهای ریز برمبنای ویژگی‌های هندسی با احتساب درجه پوسیدگی سنخیت دارد.

منحنی لوئس در رابطه با برازش بین باقی‌مانده‌ها و برآورد مدل‌های بهینه می‌تواند یکی از ملاک‌های انتخاب نهایی مدل باشد. نتایج پژوهش پیش‌رو حاکی از آن بود که همه مدل‌های انتخابی، کارایی مناسب برای تخمین مقدار زی‌توده خشک‌دارهای ریز در جنگل مورد پژوهش را دارند. در واقع، تمرکز ابر نقاط در برازش منحنی لوئس در اطراف صفر است و پراکنش ابر نقاط نیز تصادفی و مستقل است. همگنی یا ناهمگنی ابر نقاط در خصوص این برازش نیز تأثیرگذار است. در هر صورت واضح است که روند همگرایی یا واگرایی در پراکنندگی ابر نقاط در اطراف خط صفر بین باقی‌مانده‌ها و مقدار برآوردی مشاهده نشد. همگنی و تمرکز ابر نقاط برمبنای برازش بین باقی‌مانده‌ها و مقدار برآوردی در اطراف خط صفر بود که نشان‌دهنده کارایی استفاده از مدل‌ها است.

نتایج دیگر پژوهش پیش‌رو نشان داد که اغلب فراوانی نمونه‌های خشک‌دار ریز به ترتیب به راش و ممرز تعلق دارند. خرمندی و برخی دیگر از خشک‌دارهایی که شناسایی آن‌ها امکان‌پذیر نبود، کمینه فراوانی نسبی را به خود اختصاص دادند. نمودار جعبه‌ای مبتنی بر مقدار باقی‌مانده‌های استاندارد یافته در شکل ۳ نشان داد که روند تغییرات زی‌توده راش و ممرز نسبت به بقیه گونه‌ها در مدل‌های بهینه کمتر بود. در روند مدل‌سازی و براساس طراحی مدل‌های بهینه آلومتری، تغییرات زی‌توده خرمندی و ریزچوب‌های ناشناس، مستقل از هم نبودند، اما تغییرات زی‌توده راش و ممرز براساس شاخص باقی‌مانده‌های استاندارد یافته در اطراف مقدار صفر بود، براین اساس می‌توان

رابطه با مقدار عددی نمای ۲/۶، علاوه بر تئوری متابولیک بوم‌شناختی، تشابه در استرس‌های فیزیولوژی و فنولوژی درختان و ویژگی‌های الاستیسیته مربوط به هریک از گونه‌ها نیز می‌تواند بر مؤلفه‌های عددی از جمله مقدار نمای مدل پایه برحسب قطر تأثیرگذار باشند (Sileshi, 2014). خشک‌دارها به‌عنوان حوضچه‌های کف جنگل از پویایی رویش خارج شده‌اند، اما آن‌ها تحت استرس‌ها و تنش‌های محیطی و میکروبیولوژی قرار دارند. بر همین اساس، ماهیت تغییرات و توزیع زی‌توده خشک‌دارها در راستای طولی و قطری برخلاف تغییرات زی‌توده اندام‌های درختان سریا است.

براساس پژوهش Picard و همکاران (۲۰۱۵)، ویژگی‌های هندسی چوب‌ها از جمله انواع اندام‌های درختان، تأثیر بارزی بر توزیع و مقدار کل زی‌توده دارند، اما اهمیت ویژگی‌های الاستیکی و متابولیکی در این زمینه کمتر است. آن‌ها، متغیر ترکیبی مربع قطر برابر سینه و ارتفاع ($D^2 H$) را معرف حجمی و ترکیب آن با چگالی ($D^2 H \rho$) را معرف مقدار زی‌توده اجزای درختان در مدل‌سازی آلومتریک معرفی کردند. در این پژوهش، احتساب معرف حجمی به‌همراه چگالی خشک سبب کاهش توجیه واریانس در روند مدل‌سازی شد (مدل ۵). یکی از عواملی که تأثیر بارزی بر زی‌توده خشک‌دارها می‌تواند داشته باشد، درجه پوسیدگی است. در هر صورت اگر معرف حجمی خشک‌دارها تقریباً برابر باشد، بدیهی است آنچه که سبب اختلاف اساسی در مقدار زی‌توده خواهد شد، اختلاف در کیفیت و درجه پوسیدگی خشک‌دارها است. با توجه به ماهیت داده‌های مربوط به درجه پوسیدگی، مؤلفه مزبور به‌عنوان متغیر ساختگی (dummy variable) در مدل معرفی شد (Dieter & Elsasser, 2002). با افزودن درجه پوسیدگی در مدل ۶، توجیه واریانس ۷۸ درصد و میانگین مربعات باقی‌مانده‌ها با کمینه مقدار ۰/۲۲ به دست آمد، بنابراین این مدل با قطعیت و دقت زیادتر نسبت به مدل‌های دیگر به‌عنوان مدل منتخب معرفی شد. در مدل ۷ نیز معرف حجمی علاوه بر چگالی خشک و درجه پوسیدگی به‌عنوان

دادند (Vahedi, 2016). در پژوهش پیش‌رو در برخی مدل‌های منتخب (مدل‌های ۶ و ۷)، عرض از مبدأ و ضریب چگالی خشک، سطح معنی‌داری کمتر از پنج درصد داشتند. براساس نتایج آزمون t و با استناد به مبانی مطلق آماری می‌توان گفت که در مدل‌های ۶ و ۷ به حضور متغیر مستقل چگالی خشک نیازی نیست، اما با توجه به برازش منحنی لئوس و تمرکز و همگنی واریانس باقی‌مانده‌ها، این مدل می‌تواند قابل‌استناد و کاربردی باشد. بدین ترتیب می‌توان اذعان کرد که عدم معنی‌داری برخی از مؤلفه‌های محاسباتی نمی‌تواند مشکلی در برآورد مقدار پاسخ ایجاد کند. گفتنی است که مدل‌هایی که اغلب مؤلفه‌های آن‌ها غیرمعنی‌دار هستند، به‌عنوان مدل‌های مبهم (Dubious models) در نظر گرفته می‌شوند (Sileshi, 2014; Vahedi, 2016). همه مؤلفه‌های محاسباتی مدل ۸ (ترکیب معرف زی توده و درجه پوسیدگی) معنی‌دار بودند. مبتنی بر تحلیل‌های صرف و مطلق آماری، ابهامی در قطعیت کارایی این مدل به‌عنوان مدل بهینه منتخب وجود ندارد.

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان کرد که توزیع و مقدار کل زی توده خشک‌دارهای ریز با توجیه واریانس ۷۳ درصد به تغییرات قطر میانی و اندازه طولی آن‌ها بستگی دارد (مدل ۲). معرفی ماتریس ورودی متغیرهای توصیفی اعم از چگالی خشک و درجه پوسیدگی، افزایش قابل توجهی در قطعیت و صحت تخمین مدل‌ها ایجاد نکرد. نتایج دیگر مدلسازی نشان داد که معرف حجم و زی توده خشک‌دارهای ریز با احتساب درجه پوسیدگی صرف‌نظر از ضرورت معرفی چگالی خشک در مدل‌های آلومتریکی، دقت و قطعیت قابل‌استنادی داشت. درنهایت، روند مدلسازی زی توده خشک‌دارهای ریز نشان داد که مدل آلومتریکی با احتساب همه عوامل پیشگو به‌صورت

گفت که تغییرات متغیر پاسخ مربوط به این دو گونه در جنگل مورد پژوهش، مستقل از یکدیگر هستند. گفتنی است که با توجه به روند تصادفی نمونه‌برداری و توزین در پژوهش پیش‌رو، تغییرات تیپ توده‌ها به‌طور بارز مدنظر قرار نگرفت. به‌طورکلی، اغلب عملیات اندازه‌گیری و نمونه‌برداری در توده‌های خالص راش و توده‌های آمیخته راش - ممرز انجام شد، بنابراین این احتمال وجود دارد که آمیختگی گونه‌ها در تیپ‌های مختلف توده‌های جنگلی متفاوت باشد. به تبع آن، ترکیب گونه‌ای خشک‌دارهای ریز کف جنگل نیز می‌تواند متنوع و گسترده باشد، بنابراین انتظار می‌رود که در روند مدلسازی تغییرات زی توده خشک‌دارهای ریز از انواع گونه‌ها دارای عدم وابستگی و استقلال بیشتری از هم باشند.

نتایج مربوط به مدل‌های منتخب بهینه نشان داد که فقط همه مؤلفه‌های محاسباتی در مدل ۸ (متغیر ترکیبی معرف زی توده و درجه پوسیدگی) بر مبنای آزمون t معنی‌دار بودند، اما مدل‌های بهینه دیگر از جمله مدل ۶، ضریب‌های غیرمعنی‌دار نیز داشتند. براساس نظر Sileshi (۲۰۱۴) معنی‌داری و غیرمعنی‌داری مؤلفه‌های محاسباتی در مدل‌های آلومتریکی می‌تواند در روند تخمین رو به واقعیت مقدار پاسخ تأثیرگذار باشد. چنانچه فاکتور تورم واریانس، بیشتر از پنج باشد ($VIF > 5$)، بیانگر عدم کارایی مدل است. برخلاف آن، Picard و همکاران (۲۰۱۵) تأکید داشتند که اگر دقت مدل برآوردی زیاد باشد، معنی‌داری و غیرمعنی‌داری ضریب‌های محاسباتی نباید برجسته شوند. در واقع آنچه که احتمال حضور یا عدم حضور متغیر مستقل بر مبنای معنی‌داری یا عدم معنی‌داری ضریب آن را مشخص می‌کند، بستگی به دقت برآورد مدل و کمینه خطای تخمین نسبت به مشاهده‌ها دارد. مدلسازی معادله‌های آلومتریکی برای برآورد زی توده روی زمینی درختان در توده‌های راش آمیخته هیرکانی نشان داد که بعضی از مدل‌های بهینه آلومتریکی با اینکه برخی از مؤلفه‌های محاسباتی آن‌ها معنی‌دار نبود، در مقایسه با دقت الگوریتم‌های تحلیلی پیشرفته از جمله شبکه عصبی مصنوعی، دقت تخمینی زیاد و رتبه‌های بالاتری را به خود اختصاص

$$Y = \text{Exp}(-0.5 + 1.4 \ln(D) + 1.1 \ln(L)) + 0.5 \ln(\rho) - 0.3(\text{decay}) \times 1.1$$

ممکن است که ترکیب گونه‌ای درختان و به‌دنبال آن، ترکیب گونه‌ای ریزچوب‌ها متفاوت باشند. براین‌اساس پیشنهاد می‌شود که برای تیپ‌های تفکیک‌شده دیگر در راشستان‌ها نیز با استناد به روند طراحی‌های ارائه‌شده در این پژوهش، مدل‌سازی‌های استاندارد انجام شود تا بتوان به نتایج جامع در این زمینه دست‌یافت. گفتنی است که مدل‌های منتخب معرفی‌شده در این پژوهش برای راشستان‌های خالص، تیپ‌های راش-ممرز و تیپ‌های آمیخته راش با فراوانی قابل‌توجه ممرز، کاربرد وسیعی دارند و در راستای اهداف پژوهشی و رویکردهای اجرایی، قابل‌استناد هستند.

سیاسگزاری

نسخه حاضر بخشی از دستاوردهای طرح پژوهشی مصوب با شماره طرح ۴۰۰۰۹۷۴ است که با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری انجام شد. براین اساس از حمایت‌های صندوق در این زمینه سپاسگزاری می‌شود.

و مدل مزبور برحسب متغیر ترکیبی معرف زی‌توده و درجه پوسیدگی به صورت

$$Y = \text{Exp}(0.92 + 0.84 \ln(D^2 \times L \times \rho) - 0.4(\text{decay})) \times 1.1$$

به‌عنوان مدل‌های منتخب معرفی شدند (Y = زی‌توده خشک‌دار ریز (گرم)، D = قطر میانی (سانتی‌متر)، D = طول (سانتی‌متر)، ρ = چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و decay = پوسیدگی (صفر = پوسیده و یک = سالم)). تغییرات زی‌توده خشک‌دارهای ریز خرمندی و خشک‌دارهای غیرقابل‌شناسایی برخلاف زی‌توده خشک‌دارهای ریز راش و ممرز، وابسته بودند و نسبت به هم مستقل نیستند. از این رو می‌توان این احتمال را قائل بود که ۲۲ تا ۲۵ درصد عدم توجیه واریانس در رابطه با تخمین زی‌توده خشک‌دارهای ریز می‌تواند مربوط به خطای برآورد زی‌توده خشک‌دارهای ریز خرمندی و گونه‌های غیرقابل‌شناسایی باشد. با استناد به همه تفسیرهای صورت‌گرفته، مدل‌های آلومتریک طراحی شده، قابلیت کاربرد در راشستان‌های جنگل شصت‌کلاته را دارند. البته در تیپ‌های مختلف راشستان‌های جنگل مزبور

References

- Adinugroho, W.C., Krisnawati, H., Imanuddin, R., Siregar, C.A., Weston, C.J. and Volkova, L., 2023. Developing biomass allometric equations for small trees in mixed-species forests of tropical rainforest ecozone. *Trees, Forests and People*, 13: 100425.
- Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., De Las Salas, G., Del Valle, L., ... and Rodríguez, L., 2012. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267: 297-308.
- Bates, D.M. and Watts, D.G., 1998. *Nonlinear Regression Analysis and its Applications*, John Wiley & Sons, New York.
- Blanton, A., Mohan, M., Galgamuwa, G.A.P., Watt, M.S., Montenegro, J.F., Mills, F., ... and Ewane, E.B., 2024. The status of forest carbon markets in Latin America. *Journal of Environmental Management*, 14: 119921.
- Booth, M.S., 2018. Not carbon neutral: assessing the net emissions impact of residues burned for bioenergy. *Environmental Research Letters*, 13: 035001.
- Cowie, A.L., Berndes, G., Bentsen, N.S., Brandão, M., Cherubini, F., Egnell, G. and Ximenes, F.A., 2021. Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy. *GCB Bioenergy*, 13: 1210-1231.
- Delcourt, C.J.F. and Veraverbeke, S., 2022. Allometric equations and wood density parameters for estimating aboveground and woody debris biomass in Cajander larch (*Larix cajanderi*) forests of northeast Siberia. *Biogeosciences*, 19(18): 4499-4520.
- Dieter, M. and Elsasser, P., 2002. Quantification and

- monetary valuation of carbon storage in the forests of Germany in the framework of national accounting. Working Paper, Institute for Economics, University of Hamburg, Hamburg, Germany, 64p.
- Djomo, A.N., Ibrahima, A., Saborowski, J. and Gravenhorst, G., 2010. Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *Forest Ecology and Management*, 260: 1873-1885.
 - Duangsathaporn, K., Sangram, N., Omule, Y., Prasomsin, P., Palakit, K. and Lumyai, P., 2023. Formulating equations for estimating forest stand carbon stock for various tree species groups in Northern Thailand. *Forests*, 14: 1584.
 - Giuntoli, J., Barredo, J.I., Avitabile, V., Camia, A., Cazzaniga, N.E., Grassi, G., ... and Mubareka, S., 2022. The quest for sustainable forest bioenergy: win-win solutions for climate and biodiversity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159: 112180.
 - Harmon, M.E., Woodall, C.W., Fath, B. and Sexton, J., 2007. Woody detritus density and density reduction factors for tree species in the United States: A Synthesis. General Technical Report NRS-29, Northern Research Station, USDA Forest Service, Newtown Square, Pennsylvania, 90p.
 - Henry, M., Besnard, A., Asante, W.A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., ... and Saint-André, L., 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, 260: 1375-1388.
 - Hoffmann, R., 2022. Contextualizing climate change impacts on human mobility in African drylands. *Earth's Future*, 10(6): e2021EF002591.
 - IPBES, 2018. The IPBES Assessment Report on Land Degradation and Restoration. Montanarella, L., Scholes, R. and Brainich, A. (Eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 744p.
 - IPCC, 2019. Summary for policymakers: 3-35. In: Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Portner, H.O., Roberts, D.C., ... and Malley, J. (Eds.). *Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 864p.
 - Jahdi, R. and Shahamati Nejad, A., 2024. Analysis of factors affecting forest health based on DEMATEL-ANP (DANP) approach in Masouleh watershed, Guilan province. *Iranian Journal of Forest*, 15(4): 461-479 (In Persian with English summary).
 - Karimi, S., Varasteh Moridi, H., Rezaei, H.R. and Ghadim, M., 2019. Investigating the effect of environmental variables on distribution of three woodpecker species (Black woodpecker, Great spotted woodpecker and Green woodpecker) in Shast Kolateh Forest, Gorgan. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(1): 245-259 (In Persian with English summary).
 - Khalili, A., Mataji, A., Sagheb Talebi, Kh. and Hodjati, S.M., 2022. Spatial distribution pattern of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) coarse woody debris in managed and unmanaged stands of Caspian forests, Iran. *Iranian Journal of Forest*, 13(5): 43-55.
 - Korboulewsky, N., Bilger, I. and Bessad, A., 2021. How to evaluate downed fine woody debris including logging residues? *Forests*, 12(7): 881.
 - Kuyah, S., Muthuri, C., Wakaba, D., Cyamweshi, A.R., Kiprotich, P. and Mukuralinda, A., 2024. Allometric equations and carbon sequestration potential of mango (*Mangifera indica*) and avocado (*Persea americana*) in Kenya. *Trees, Forests and People*, 15: 100467.
 - Moomaw, W.R., Law, B.E and Goetz, S.J., 2020. Focus on the role of forests and soils in meeting climate change mitigation goals: summary. *Environmental Research Letters*, 15: 045009.
 - Picard, N., Rutishauser, E., Ploton, P., Ngomanda, A. and Henry, M., 2015. Should tree biomass allometry be restricted to power models? *Forest Ecology and Management*, 353:156-163.
 - Romashkin, I., Shorohova, E., Kapitsa, E., Galibina, N. and Nikerova, K., 2021. Substrate quality regulates density loss, cellulose degradation and nitrogen dynamics in downed woody debris in a boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 491: 119143.
 - Shabani, S., Vahedi, A.A., Ahmadi, A. and Faramarzi, H., 2023. Modeling changes in soil carbon stock concerning the soil beneath dead tree. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(1): 41-56 (In Persian with English summary).
 - Sileshi, G.W., 2014. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, 329: 237-254.
 - Vahedi, A.A., 2016. Artificial neural network application in comparison with modeling allometric equations for predicting above-ground biomass in the Hyrcanian mixed-beech forests of Iran. *Biomass*

- and Bioenergy, 88: 66-76.
- Wang, W., Dwivedi, P., Abt, R. and Khanna, M., 2015. Carbon savings with transatlantic trade in pellets: accounting for market-driven effects. *Environmental Research Letters*, 10(11): 114019.
 - Woodall, C.W., Walters, B.F., Oswalt, S.N., Domke, G.M., Toney, C. and Gray, A.N., 2013. Biomass and carbon attributes of downed woody materials in forests of the United States. *Forest Ecology and Management*, 305: 48-59.