مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هفدهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۴
ص ۲۵۸-۲۴۱
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2025.495245.2027
CC BY 4.0

معادلات آلومتری زی‌توده و اندوختهٔ کربن دو گونه بادام طاووسی (*Prunus arabica* (Olivier) Meikle) و بادام برگ‌سنجدی (*Prunus elaeagrifolia* (Spach) Fritsch) در جنگل‌های کره‌بس چهارمحال و بختیاری

سهراب غفاری[۱]، یعقوب ایران‌منش[۲*]، محمدکاظم پارساپور[۳] و حمیدرضا ریاحی بختیاری[۴]

[۱]دانشجوی دکتری، گروه علوم جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
[۲]دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان
[۳]پژوهشگر پسادکتری، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد
[۴]استادیار پژوهش، گروه علوم جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸)

چکیده

مقدمه: جنگل‌ها از بوم‌سازگان‌های پیچیده و حیاتی هستند که در فرایند مدیریت تغییرات اقلیمی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار اثرگذارند. حفظ و مدیریت جنگل‌ها با توجه به اهمیت آنها در ذخیره‌سازی کربن و قرار داشتن در معرض تهدیدهای ناشی از فعالیت‌های انسانی ضروری است. برآورد دقیق زی‌توده و ذخیرهٔ کربن، به‌ویژه در جنگل‌های زاگرس، برای طراحی راهبردهای مدیریتی اهمیت دارد. این تحقیق به بررسی و برآورد زی‌توده و ذخیرهٔ کربن دو گونهٔ مهم جنگلی، بادام طاووسی (*Prunus arabica* (Olivier) Meikle) و بادام برگ‌سنجدی (*Prunus elaeagrifolia* (Spach) Fritsch) می‌پردازد و برای نخستین بار مناسب‌ترین مدل‌های آلومتریک را برای این گونه‌ها ارائه می‌دهد. این مدل‌ها با استفاده از ویژگی‌های سنجش‌پذیر درختان، برآوردهای بسیار دقیقی ارائه می‌دهند.

مواد و روش‌ها: این تحقیق در رویشگاه طبیعی بادام جنگلی کره‌بس در شهرستان خانمیرزا در استان چهارمحال و بختیاری انجام گرفت. با پیاده کردن ۳۰ قطعه نمونهٔ ۱۰۰۰ متر مربعی در منطقه به روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌ای، ۳۰ پایه (۱۵ پایه از هر گونه) از طبقات مختلف تاجی انتخاب و پارامترهای کمّی آنها شامل قطر متوسط تاج، قطر قطورترین جست، تعداد جست و ارتفاع کل اندازه‌گیری شد. درختچه‌های انتخاب‌شده، قطع و در عرصه توزین شدند و نمونه‌برداری برای تعیین وزن خشک و درصد کربن انجام گرفت. درصد کربن در آزمایشگاه به روش احتراق اندازه‌گیری شد. مدل‌های یک و چندمتغیره برای ایجاد معادلات آلومتریک استفاده و اعتبارسنجی شدند.

یافته‌ها: نتایج پژوهش نشان داد که در بادام طاووسی، مدل‌های تک‌متغیرهٔ توانی با متغیر قطر متوسط تاج دارای بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۸) و کمترین خطای پیش‌بینی (۱۶/۴ درصد) بودند. همچنین مدل‌های دومتغیره با ترکیب قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست و نیز متغیرهای ارتفاع و قطر قطورترین جست نتایج مشابهی ارائه دادند و ضریب تبیین آنها به ۰/۹۳ رسید. در مورد بادام برگ‌سنجدی، بهترین مدل معادلهٔ تک‌متغیرهٔ توانی برمبنای قطر متوسط تاج با ضریب تبیین ۰/۹۳ و خطای ۱۶/۱ درصد بود. افزون‌بر این، همهٔ مدل‌های دومتغیرهٔ این گونه نیز با ضریب تبیین حدود ۰/۸۰ بودند، اما مقدار خطای برآوردی در آنها زیاد بود.

نتیجه‌گیری: این پژوهش به اهمیت زی‌توده به‌منزلهٔ شاخصی اساسی در سنجش بهره‌وری و سلامت بوم‌سازگان‌های جنگلی و نقش آن در ارزیابی ذخایر کربن و مدیریت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تأکید دارد. مدل‌های آلومتریک، به‌ویژه معادلات توانی، برای برآورد دقیق زی‌توده و اندوختهٔ کربن در گونه‌های بادام طاووسی و برگ‌سنجدی به‌خوبی استفاده می‌شوند. قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست، بهترین پیش‌بینی‌کننده‌ها برای زی‌توده شناسایی شدند. همچنین معادلات چندمتغیره در بوم‌سازگان‌های خاص، به‌ویژه جنگل‌های زاگرس که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارند توصیه می‌شود. در کل، نتایج نشان‌دهندهٔ توان زیاد مدل‌های آلومتریک برای بهبود دقت برآوردهای زی‌توده و کربن در مناطق جنگلی است. نتایج این پژوهش به افزایش دانش علمی دربارهٔ دینامیک زی‌توده و کربن کمک می‌کند و می‌تواند در بهینه‌سازی سیاست‌های مدیریتی، حفاظتی و ارزشگذاری این بوم‌سازگان‌ها مؤثر باشد و آسیب‌های ناشی از روش‌های تخریبی را به حداقل برساند.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیمی، پویایی زی‌توده، ذخیره‌سازی کربن، مدل‌های تک‌متغیره، معادلات توانی.

*نویسندهٔ مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۳۱۸۴۲۳۰۱ ایمیل: y_iranmanesh@yahoo.com

مقدمه

جنگل‌ها از مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های طبیعی هستند و اهمیت زیادی در مقابله با تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی دارند. این بوم‌سازگان‌ها با ذخیره‌سازی مقادیر زیادی کربن، به کاهش دی‌اکسید کربن جو و حفظ تعادل اکولوژیکی زمین کمک می‌کنند (Ordibehesht et al., 2024). با توجه به افزایش روزافزون انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، حفظ و مدیریت بهینهٔ جنگل‌ها به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است (Bahrian et al., 2024; Iranmanesh & Parsapour, 2025). در این زمینه، برآورد دقیق مقدار زی‌توده و ذخیرهٔ کربن در جنگل‌ها، به‌ویژه در مناطق باارزشی مانند جنگل‌های زاگرس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این برآوردها هم سبب درک بهتر وضعیت موجود می‌شوند و هم در جایگاه ابزاری مهم در طراحی و اجرای راهبردهای مؤثر مدیریتی، در حفاظت و ارزشگذاری این منابع طبیعی کاربرد خواهند داشت (Rawat et al., 2021). تحقیقات دقیق در این زمینه همچنین می‌توانند در شناسایی تأثیرات ناشی از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر چرخهٔ کربن و تنوع زیستی جنگل‌ها به ما بینشی عمیق‌تر بدهد.

برای به دست آوردن زی‌تودهٔ روی زمینی درختان جنگل، دو روش اصلی وجود دارد: اندازه‌گیری‌های مستقیم و برآوردهای غیرمستقیم. اندازه‌گیری‌های مستقیم شامل روش‌های سنتی همچون قطع و سنجش درختان، به‌دلیل هزینه‌بر، زمان‌بر و تخریبی بودن، برای برآورد زی‌توده در جنگل در مقیاس وسیع مناسب نیستند. به همین دلیل از روش‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود. این برآوردها اغلب از طریق مدل‌های آلومتری انجام می‌گیرند (Lu et al., 2022). آلومتری به‌عنوان ابزاری علمی، به بررسی رابطهٔ میان ابعاد مختلف موجودات زنده و اندازهٔ اندام‌های آنها می‌پردازد. طبق تعریف Niklas (1994)، این مفهوم شامل معادلات خاصی است که ممکن است تک‌متغیره، دومتغیره و حتی چندمتغیره باشند. این معادلات به‌عنوان ابزارهایی مؤثر برای تخمین وزن درختان، به‌ویژه با اتکا بر ویژگی‌های سنجش‌پذیر مانند قطر برابرسینه یا ارتفاع استفاده می‌شوند (Komiyama et al., 2005). در این رویکرد، وزن خشک درخت یا مقدار کربن موجود در آن، متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود، درحالی که ویژگی‌هایی که به‌راحتی می‌توان آنها را در جنگل یا محیط طبیعی اندازه‌گیری کرد مانند قطر برابرسینه و یا ارتفاع درخت، به‌عنوان متغیرهای مستقل عمل می‌کنند. استفاده از معادلات آلومتری و توسعهٔ آنها برای گونه‌های مختلف، نه‌تنها برآورد زی‌تودهٔ این گونه‌ها را به فرایندی سریع و آسان تبدیل می‌کند، بلکه تا حد زیادی از نیاز به روش‌های تخریبی که به‌طور معمول وقتگیر و پرهزینه‌اند جلوگیری می‌کند (Sohrabi et al., 2015).

تحقیقات متنوعی در زمینهٔ برآورد و توسعهٔ مدل‌های آلومتریک به‌منظور تعیین دقیق زی‌توده و اندوختهٔ کربن در گونه‌های درختی و درختچه‌ای جنگلی انجام گرفته است. این تحقیقات به شناسایی و تحلیل ویژگی‌های مختلف گونه‌های گیاهی پرداخته‌اند تا دقت و اعتبار نتایج به‌دست‌آمده را افزایش دهند. شایان ذکر است که برای درختان بزرگ در بوم‌سازگان‌های مختلف، مدل‌های آلومتریک برای تخمین زی‌توده توسعه یافته‌اند، اما معادلات زی‌تودهٔ اندکی برای درختان کوچک و گونه‌های درختچه‌ای وجود دارند (Nyamukuru et al., 2023). در ادامه، به تعدادی از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود. Iranmanesh et al. (2012)، به بررسی زی‌توده و مقدار کربن بذر بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) در جنگل‌های زاگرس پرداختند و مدل‌های رگرسیونی مختلفی برای پیش‌بینی زی‌توده و مقدار کربن بذر ارائه دادند. در درختان تک‌پایه، قطر متوسط تاج بهترین پیش‌بینی‌کننده برای به دست آوردن مدل‌های آلومتریک بود، درحالی که در جست‌گروه‌ها، بهترین مدل برمبنای ارتفاع کل جست‌گروه‌ها ارزیابی شد. این

نتایج نشان‌دهندهٔ امکان استفاده از معادلات آلومتریک مناسب برای برآورد زی‌توده و مقدار کربن در بذر بلوط ایرانی است. Parsapour et al. (2013) به بررسی چهار گونه صنوبر در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. آنها با نمونه‌برداری از هر درخت و اندازه‌گیری مشخصات درختان مانند قطر برابرسینه و ارتفاع، به تحلیل زی‌تودهٔ درختان پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های قابل اعتمادی برای برآورد زی‌توده در هر یک از گونه‌ها وجود دارد. در گونه‌های *Populus alba* و *Populus alba* × *Populus euphratica*، قطر برابرسینه به‌عنوان متغیر مستقل با دقت زیاد بهترین مدل را ارائه داد، درحالی که در *Populus nigra* و *Populus euphratica* × *Populus alba*، قطر تاج برای برآورد زی‌تودهٔ قسمت‌های چوبی قوی‌تر عمل کرد. معادلات آلومتریک برای برآورد زی‌تودهٔ درختان ارس توسط Maghsoudlou nejad et al. (2020) تعیین شدند. در این بررسی، از ۳۵ درخت نمونه‌برداری شد و معادلات آلومتریک با استفاده از مدل‌های رگرسیونی توانی، نمایی و چندجمله‌ای تعیین شدند. نتایج نشان داد که قطر برابرسینه و سطح تاج بهترین شاخص‌ها برای مدل‌سازی هستند و معادلات توانی و چندجمله‌ای نتایج بهتری نسبت به مدل نمایی ارائه می‌دهند. Bahrian et al. (2024)، در پژوهشی به بررسی مدل‌های آلومتریک برای تخمین زی‌توده و اندوختهٔ کربن در کنده‌ها و ریشه‌های درختان صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoids* Bartr. ex Marsh) پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های مبتنی بر قطر کنده‌ها، ضریب تعیین بزرگ و دقت زیادی در پیش‌بینی زی‌توده و کربن ذخیره‌شده داشتند. در مقابل، مدل‌هایی که از ارتفاع کنده‌ها استفاده کردند، نتوانستند نتایج پذیرفتنی ارائه دهند. همچنین، مدل توانی به‌عنوان دقیق‌ترین مدل برای برآورد زی‌توده و کربن شناسایی شد. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب صحیح مدل‌ها در ارزیابی اندوختهٔ کربن تأکید دارند.

زی‌تودهٔ روی زمینی سه گونه کاج و سرو در استان گلستان ایران با استفاده از مدل‌های آلومتریک به‌دقت بررسی شد. برای این منظور، مدل‌های آلومتریک خاص هر گونه توسعه داده شدند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر قطر برابرسینهٔ درخت (DBH) و ارتفاع توانسته‌اند پیش‌بینی دقیقی از زی‌تودهٔ روی زمینی ارائه دهند. همچنین استفاده از مدل‌های چندمتغیره نتایج بهتر و پیش‌بینی دقیق‌تری به همراه داشته است (Ali et al., 2023). Panahi et al. (2014) در پژوهشی به بررسی آلومتری و ذخیرهٔ کربن برگ‌های سه گونه بلوط در باغ گیاه‌شناسی ملی ایران پرداختند. آنها با استفاده از نمونه‌برداری تصادفی و اندازه‌گیری قطر برابرسینه و قطر تاج، زی‌توده و ذخیرهٔ کربن برگ‌ها را محاسبه کردند. زی‌تودهٔ متوسط برای گونه‌های برودار، مازودار و ویول به‌ترتیب ۲۸۲/۱، ۲۱۶/۳ و ۱۵۲/۳ کیلوگرم در هکتار و مقدار ذخیرهٔ کربن به‌ترتیب ۱۴۰/۲، ۱۰۷/۳ و ۷۵/۶ کیلوگرم برآورد شد. برآورد زی‌تودهٔ روی زمینی گونهٔ *Prunus tangutica* (Batalin) Koehne در جنوب غربی چین، با استفاده از پارامترهای مورفولوژیکی به‌صورت دقیق مدل‌سازی شد. در این بررسی، به‌منظور پیش‌بینی و برآورد زی‌تودهٔ روی زمینی، از متغیرهایی مانند قطر، ارتفاع و مساحت تاج استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که متغیرهای قطر و ارتفاع بیشترین همبستگی و دقت را در پیش‌بینی زی‌تودهٔ روی‌زمینی دارند (Wei & Bao, 2021). Schindler et al. (2023) در بررسی *Prunus avium* L.، مجموعه‌ای از مدل‌های آلومتریک را برای برآورد زی‌توده و کربن اندوخته در این درختان ارائه کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که مدل‌های توسعه‌داده‌شده براساس قطر در ارتفاع برابرسینه (DBH)، دارای ضریب تبیین (R^2) بزرگی در پیش‌بینی حجم و زی‌توده و به‌تبع آن کربن اندوختهٔ درختان بودند. تحقیقات دربارهٔ روابط بین متغیرهای زیستی در جنگل‌های غرب آمازون نشان

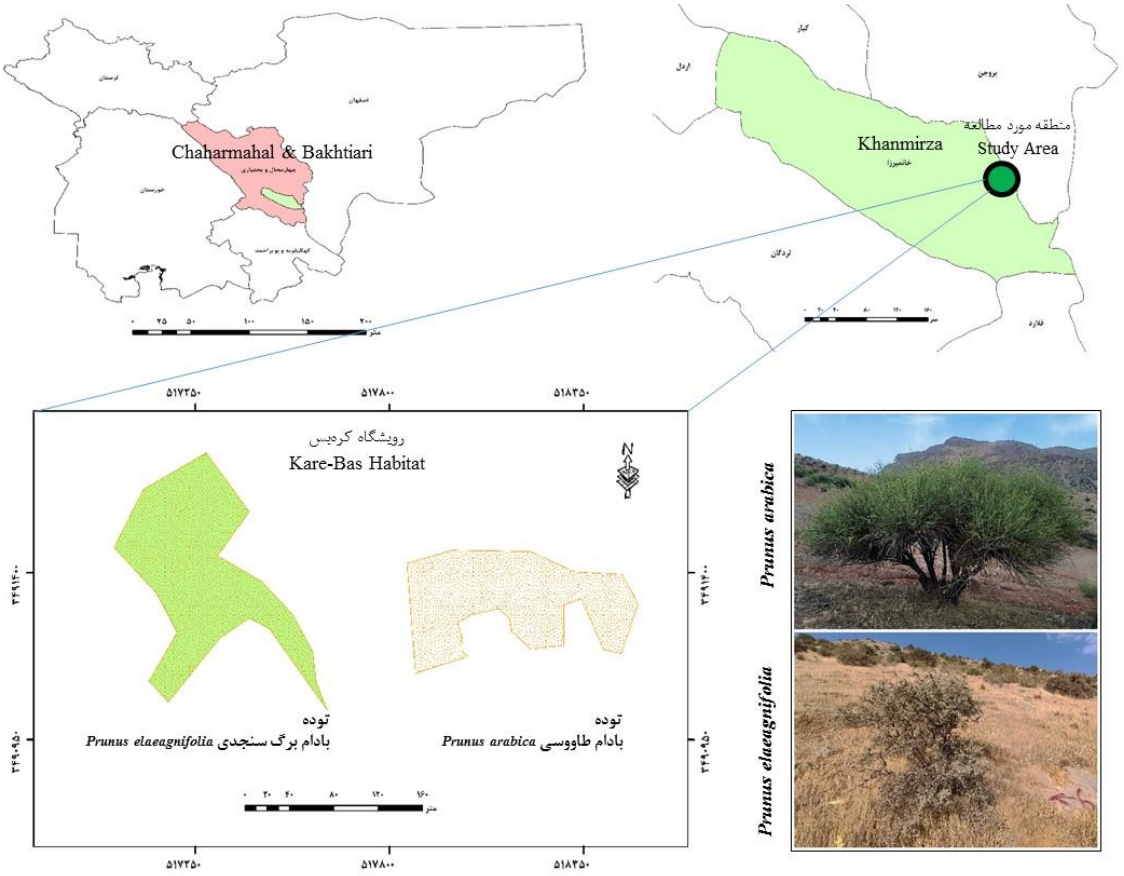
می‌دهد که معادلات رگرسیونی ارائه‌شده با ضریب تعیین (R^2) بیش از ۰/۷۰، توانایی خوبی در توصیف روابط بین ارتفاع کل و قطر تاج درختان با زی‌توده و کربن موجود در سطح زمین دارند. افزون‌بر این، پیشنهاد شده است که برای برآورد زی‌توده و کربن، از معادلات تک‌مؤلفه‌ای استفاده شود که در آن قطر تنه متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شود (de Sousa et al., 2023).

تحقیق حاضر با هدف رفع کاستی‌های موجود در درک پویایی جنگل‌ها تحت شرایط محیطی در حال تغییر، به بررسی و برآورد دقیق زی‌توده و اندوختهٔ کربن دو گونهٔ مهم جنگلی یعنی بادام طاووسی (*Prunus arabica* (Olivier) Meikle) و بادام برگ‌سنجدی (*Prunus elaeagrifolia* (Spach) Fritsch) در جنگل کره‌بس استان چهارمحال و بختیاری می‌پردازد. با توجه به مرور منابع موجود، هیچ پژوهش جامع و دقیقی در زمینهٔ برآورد زی‌تودهٔ این گونه‌ها با استفاده از معادلات آلومتریک انجام نگرفته است. از این‌رو این پژوهش نخستین بار مدل‌های آلومتریک مناسب را برای این گونه‌های مهم جنگلی زاگرس ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

در این تحقیق، منطقه‌ای با مساحت تقریبی ۵۰۷ هکتار به‌عنوان رویشگاه طبیعی بادام جنگلی کره‌بس بررسی شد. این منطقه در شهرستان خانمیرزا در فاصلهٔ ۱۱۰ کیلومتری جنوب غربی شهرکرد (مرکز استان چهارمحال و بختیاری) قرار دارد. منطقه در محدودهٔ طول شرقی″۹ ′۱۰ ۵۱ تا ″۴۲ ′۱۲ °۵۱ و عرض شمالی ″۵۸ ′۳۲ °۳۱ تا ″۴۵ ′۳۵ °۳۱ واقع است (شکل ۱). این رویشگاه به‌دلیل ویژگی‌های طبیعی و اقلیمی خاص، از باارزش‌ترین و منحصربه‌فردترین رویشگاه‌های بادام جنگلی در استان شناخته می‌شود. در سطح اقلیمی، میانگین بارندگی سالانهٔ منطقه ۵۸۴/۹ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد گزارش شده است. بیشترین دمای روزانه در مردادماه با ۳۱/۵ درجهٔ سانتی‌گراد و کمترین دمای روزانه در دی‌ماه با منفی ۱۰/۵ درجهٔ سانتی‌گراد ثبت شده است. این منطقه در حدود ۱۲۰ روز از سال از اوایل خرداد تا پایان شهریور به‌طور کامل خشک است (Sharifpoor et al., 2016). یکی از ویژگی‌های بارز این رویشگاه، تنوع گونه‌ای آن است. این منطقه به‌دلیل شرایط مناسب اقلیمی و زیستگاهی، مأمن چهار گونهٔ اصلی بادام جنگلی شامل *Prunus scoparia* (Spach) C.K.Schneid, *Prunus arabica*, *Prunus haussknechtii* C.K.Schneid و *Prunus elaeagrifolia* است. در تحقیق حاضر، دو گونه بادام طاووسی (*Prunus arabica*) و بادام برگ‌سنجدی (*Prunus elaeagrifolia* Spach.) به‌عنوان گونه‌های غالب منطقه انتخاب شدند (شکل ۱). بادام طاووسی گونه‌ای از خانوادهٔ گل‌سرخ (Rosaceae) است که در مناطق خشک و کوهستانی خاورمیانه به‌ویژه در ایران و کشورهایی مانند افغانستان و پاکستان رشد می‌کند. این گونه به‌دلیل نشانه‌های زینتی و میوه‌های خوراکی مورد توجه است. این گونه به‌طور معمول در مناطقی با شرایط نامساعد آب‌وهوایی و خاک‌های شنی و سنگلاخی به‌خوبی رشد می‌کند (Khadivi-Khub & Anjam, 2014). بادام برگ‌سنجدی نیز از خانوادهٔ گل‌سرخ و بومی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران و قفقاز است. این درخت به‌دلیل مقاومت در برابر خشکی و دماهای زیاد شناخته شده است و گونهٔ مهمی در بوم‌سازگان‌های محلی به شمار می‌رود (Mirheidari et al., 2020).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقهٔ پژوهش
Figure 1. The location of the study area

شیوهٔ اجرای پژوهش

انتخاب پایه‌های بادام برای اندازه‌گیری زی‌توده و اندوختهٔ کربن روی زمینی و در پی آن به دست آوردن معادلات آلومتریک، به‌روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌ای انجام گرفت. به این منظور ابتدا جمعیت درختچه‌های موجود از هر گونه با توجه به طبقات مختلف تاجی به پنج طبقه تقسیم شدند. سپس در هر طبقه به‌طور تصادفی سه پایه (پانزده پایه از هر گونه) و در مجموع سی درختچهٔ بادام انتخاب شدند. پایه‌های انتخاب‌شده نشانه‌گذاری شده و پارامترهای کمّی آنها از قبیل قطر قطورترین جست، ارتفاع کل، قطر تاج (میانگین قطر بزرگ و قطر عمود بر آن) و تعداد جست اندازه‌گیری شدند. با توجه به ساختار رویشی درختان، پایه‌ها به چند قسمت جداگانه تقسیم می‌شوند (Ketterings et al., 2001). پس از قطع و جداسازی، قسمت‌های تفکیک‌شده به‌صورت جداگانه، در عرصه به‌کمک ترازوی عقربه‌ای با دقت ۰/۵ کیلوگرم (برای تنه‌های قطور) و ترازوی رقومی با دقت ۱۰ گرم (برای وزن‌های کمتر) توزین شدند (Losi et al., 2003). پس از نمونه‌برداری از قسمت‌های مختلف، تمامی نمونه‌ها در عرصه بلافاصله توزین و در بسته‌بندی‌های جداگانه، به‌منظور اندازه‌گیری وزن خشک و مقدار کربن به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از تعیین وزن خشک نمونه‌ها، وزن خشک کل محاسبه شد. برای محاسبهٔ وزن خشک (زی‌توده) کل اندام‌های هوایی، وزن خشک تمامی قسمت‌ها با همدیگر جمع شدند. به‌منظور اندازه‌گیری درصد کربن آلی نمونه‌های گیاهی، از روش احتراق در کورهٔ الکتریکی استفاده شد (MacDicken, 1997). معادلات آلومتریک که به‌طور معمول تک، دو و گاهی چندمتغیره هستند، ابزاری توانمند برای برآورد وزن درخت از طریق متغیرهای مستقل مانند قطر برابرسینه یا ارتفاع هستند که قابلیت اندازه‌گیری در

توده را دارند. در این روش، وزن خشک یا مقدار کربن درخت، متغیر وابسته و یکی از متغیرها که به‌سادگی بتوان در جنگل یا عرصه آن را اندازه‌گیری کرد، مانند قطر یا ارتفاع درخت، متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شود. هنگام برآورد زی‌تودهٔ درخت یا زی‌تودهٔ اجزای آن، متداول‌ترین شکل معادلهٔ مورد استفاده، معادلهٔ توانی تک‌متغیرهٔ $Y=aX^b$ است (Pajtík et al., 2008). در این معادله، Y متغیر وابسته یا همان وزن خشک یا محتوای کربن کل، X متغیر مستقل مانند قطر برابرسینه یا ارتفاع درخت یا قطر متوسط تاج و a و b ضرایب معادلهٔ رگرسیون هستند. استفاده از معادلات آلومتریک و تولید این معادلات برای گونه‌های مختلف سبب می‌شود که برآورد زی‌تودهٔ گونه‌ها به سهولت انجام گیرد و از روش‌های تخریبی که بسیار پرهزینه و وقتگیرند تا حد امکان جلوگیری شود. برای مدل‌سازی آلومتریکی، با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری‌شده از درختچهٔ سرپا، معادلات رگرسیونی برمبنای حداقل مربعات برازش داده شد. در این تحقیق از مدل‌های مختلف ازجمله مدل رگرسیون تک‌متغیره (خطی و توانی) و چندمتغیره استفاده شد.

روش تحلیل

به‌منظور بررسی اطلاعات برداشت‌شده، ابتدا تبعیت داده‌ها از توزیع نرمال با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف بررسی شد. در بررسی مدل‌های آلومتری برآورد زی‌تودهٔ روی زمینی از مدل‌های تک‌متغیره و چندمتغیره استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل‌ها از معیارهای ضریب تبیین، انحراف معیار مدل برازش‌یافته، تحلیل واریانس رگرسیون، تبعیت توزیع مقادیر باقی‌مانده‌ها از توزیع نرمال و درصد خطا (RMSE) استفاده شد. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE%) از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شد (Mahmood et al., 2020).

رابطهٔ ۱
$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum(P_i-O_i)^2}{n}}$$

رابطهٔ ۲
$$RMSE(\%)=100\times\frac{RMSE}{\overline{O}}$$

O_i بیانگر مقدار واقعی، P_i مقدار برآوردی مشاهدهٔ i-ام، n تعداد مشاهدات و $\bar{O}$ میانگین زی‌تودهٔ واقعی است.

نتایج

معادلات آلومتری برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی در بادام طاووسی

نتیجهٔ برازش مدل‌های خطی برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام طاووسی نشان داد که از بین متغیرها، قطر متوسط تاج، ارتفاع کل و قطر قطورترین جست، متغیرهای مناسب‌تری برای پیش‌بینی زی‌تودهٔ روی‌زمینی هستند. بیشترین مقدار ضریب تبیین (۰/۹۸) مربوط به مدل تک‌متغیرهٔ توانی برمبنای متغیر مستقل قطر متوسط تاج است. البته مدل‌های تک‌متغیرهٔ توانی با متغیر ارتفاع و قطر قطورترین جست و مدل تک‌متغیرهٔ خطی برمبنای قطر قطورترین جست نیز ضریب تبیین بیش از ۹۰ درصد را نشان دادند. کمترین مقدار خطا (۱۶/۴ درصد) در مدل برآوردی زی‌تودهٔ روی زمینی تک‌متغیرهٔ توانی برمبنای قطر متوسط تاج مشاهده شد (جدول ۱).

جدول ۲ نتیجهٔ برازش مدل‌های دومتغیره برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام طاووسی را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود، مدل‌های دومتغیره برمبنای قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست و مدل مبتنی بر ارتفاع و قطر قطورترین جست، بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۳) و کمترین درصد خطا را به خود اختصاص داده‌اند. در این دو مدل مقدار همخطی بین متغیرهای مستقل (VIF) کمتر از ۱۰ است. مدل برمبنای متغیرهای قطر متوسط تاج و ارتفاع، مدل قابل اعتمادی است؛ اما نسبت به دو مدل قبلی از خطای برآوردی بیشتری برخوردار است. همچنین شکل ۲، ابر نقاط و منحنی خطی و توانی برازش‌یافته برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام طاووسی برمبنای متغیرهای تحت بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- نتیجهٔ تحلیل رگرسیون تک‌متغیره برای تعیین مدل برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام طاووسی برمبنای متغیرهای مختلف

Table 1. The result of the univariate regression analysis for determining the aboveground biomass estimation model of *Prunus arabica* based on various variables

متغیر مستقل Independent Variable	Model Type	df	$R^2_{(adj)}$	F	Sig.	Std. Error	RMSE%	معادله Equation
قطر متوسط تاج Average Crown Diameter	تک‌متغیرهٔ خطی Linear Univariate	13	0.77	48.16	***	2.46	47.9	$Y = 17.138\ X - 25.515$
	تک‌متغیرهٔ توانی Power Univariate	13	0.98	559.7	***	0.131	16.4	$Y = 0.475\ X^{3.091}$
ارتفاع Height	تک‌متغیرهٔ خطی Linear Univariate	13	0.61	23.39	***	5.83	55.4	$Y = 28.18\ X - 34.76$
	تک‌متغیرهٔ توانی Power Univariate	13	0.94	237.5	***	0.281	31.5	$Y = 0.481\ X^{4.332}$
قطر قطورترین جست Thickest Shoot Diameter	تک‌متغیرهٔ خطی Linear Univariate	13	0.92	170.50	***	0.046	32.4	$Y = 0.601\ X - 7.911$
	تک‌متغیرهٔ توانی Power Univariate	13	0.95	300.26	***	0.106	32.1	$Y = 0.012\ X^{1.837}$

شرح علائم: Y زی‌تودهٔ روی زمینی به کیلوگرم، X متغیر مستقل، df درجهٔ آزادی خطا، $R^2_{(adj)}$ ضریب تعیین تطبیق‌یافته (Adjusted coefficient of determination)، F آمارهٔ تجزیهٔ واریانس، Std. Error انحراف معیار مدل، RMSE درصد خطای مدل و *** معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ است.

Description of symbols: Y represents aboveground biomass in kilograms, X is the independent variable, df is the degrees of freedom for error, $R^2_{(adj)}$is the adjusted coefficient of determination, F is the analysis of variance statistic, Std. Error is the standard deviation of the model, RMSE is the percentage error of the model, and *** indicates significance at the .001 level.

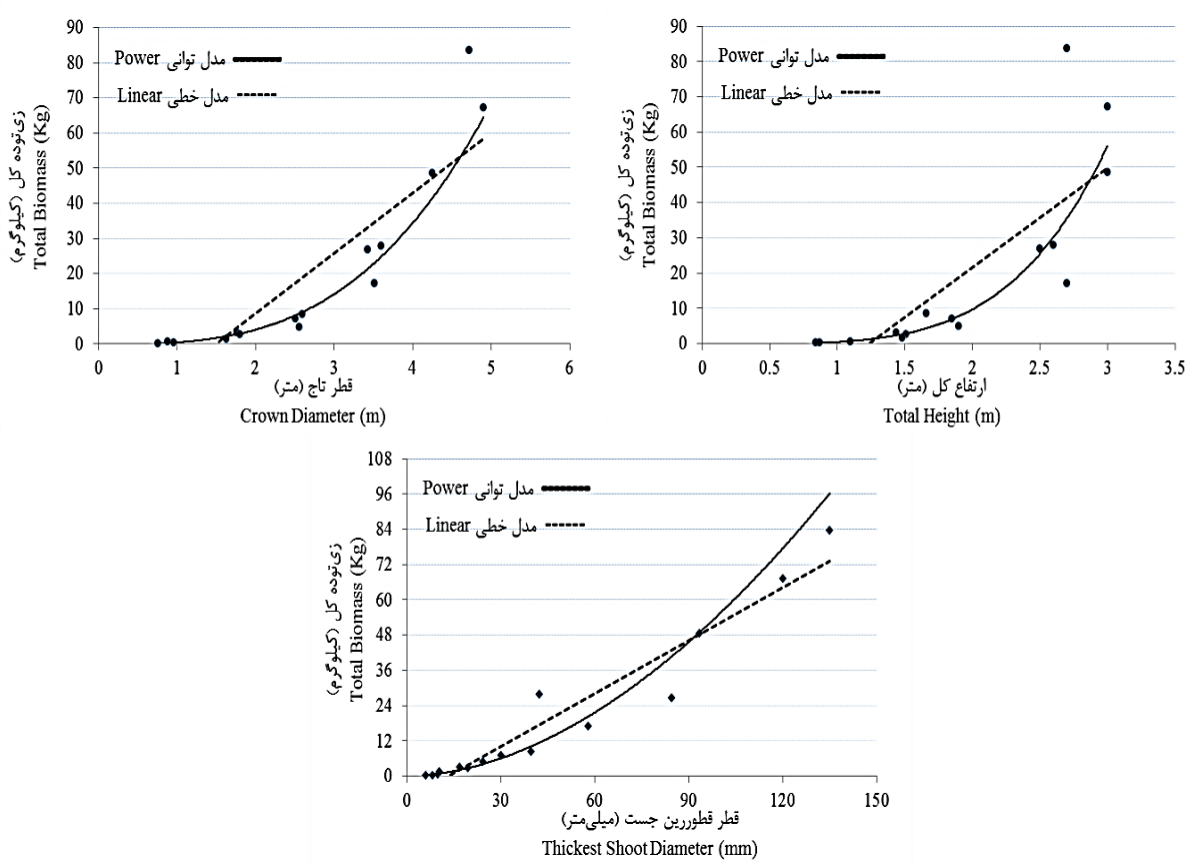
جدول ۲- نتیجهٔ تحلیل رگرسیون چندمتغیره برای تعیین مدل برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام طاووسی برمبنای متغیرهای مختلف

Table 2. The result of the multivariate regression analysis for determining the aboveground biomass estimation model of *Prunus arabica* based on various variables

متغیرهای مستقل Independent Variables	Model Type	df	$R^2_{(adj)}$	F	Sig.	Std. Error	VIF	RMSE%	Equation
قطر متوسط تاج و ارتفاع Average Crown Diameter and Height	Enter	12	0.86	35.58	***	10.69	18.3	46.2	$Y = 38.127C - 39.288H - 4.913$
قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست Average Crown Diameter and Thickest Shoot Diameter	Enter	12	0.93	79.21	***	5.84	7.26	32.6	$Y = 0.633D - 1.077C - 6.55$
ارتفاع و قطر قطورترین جست Height and Thickest ShootDiameter	Enter	12	0.93	82.83	***	7.04	3.89	32.6	$Y = 0.662D - 3.98H - 3.003$

شرح علائم: Y زی‌تودهٔ روی زمینی به کیلوگرم، C قطر متوسط تاج به متر، H ارتفاع به متر، D قطر قطورترین جست به میلی‌متر، df درجهٔ آزادی خطا، $R^2_{(adj)}$ ضریب تعیین تطبیق‌یافته (Adjusted coefficient of determination)، F آمارهٔ تجزیهٔ واریانس، Std. Error انحراف معیار مدل، RMSE درصد خطای مدل و *** معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ است.

Description of the symbols: Y represents the aboveground biomass in kilograms, C is the average crown diameter in meters, H indicates the height in meters, D denotes the diameter of the thickest shoot in millimeters, df refers to the degrees of freedom for error, $R^2_{(adj)}$is the adjusted coefficient of determination, F is the ANOVA statistic, Std. Error represents the standard deviation of the model, RMSE indicates the percentage error of the model, and the significance level denoted by *** indicates that the result is significant at the .001 level.



شکل ۲- ابرنقاط و منحنی خطی و توانی برازش‌یافته برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام طاووسی برمبنای متغیرهای بررسی‌شده

Figure 2 - Scatter plot and fitted linear and power curves for estimating the aboveground biomass of *Prunus arabica* based on various variables

معادلات آلومتریک برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی در بادام برگ‌سنجدی

نتیجهٔ برازش مدل‌های خطی برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام برگ‌سنجدی نشان داد که از بین متغیرهای بررسی‌شده، قطر متوسط تاج، قطر قطورترین جست و ارتفاع کل، متغیرهای مناسب‌تری برای پیش‌بینی زی‌تودهٔ روی‌زمینی هستند. بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۳) مربوط به مدل تک‌متغیرهٔ توانی برمبنای متغیر مستقل قطر متوسط تاج و مدل برمبنای قطر قطورترین جست است. البته مدل تک‌متغیرهٔ توانی با متغیر ارتفاع نیز ضریب تبیین ۹۰ درصد را نشان دادند. کمترین مقدار خطا (۱۶/۱ درصد) در مدل برآوردی زی‌تودهٔ روی زمینی تک‌متغیرهٔ توانی برمبنای قطر متوسط تاج مشاهده شد (جدول ۳).

جدول ۴ نتیجهٔ برازش مدل‌های دومتغیره برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام برگ‌سنجدی را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود. همهٔ مدل‌های دومتغیره دارای ضریب تبیین حدود ۰/۸۰ هستند. همچنین مقدار خطای هر سه مدل به‌نسبت پذیرفتنی است. شکل ۳ نیز ابر نقاط و منحنی خطی و توانی برازش‌یافته برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام برگ‌سنجدی برمبنای متغیرهای بررسی‌شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتیجهٔ تحلیل رگرسیون تک‌متغیره برای تعیین مدل برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی برگ‌سنجدی برمبنای متغیرهای مختلف

Table 3. The result of the univariate regression analysis for determining the aboveground biomass estimation model of *Prunus elaeagrifolia* based on various variables

متغیر مستقل Independent Variable	Model Type	df	$R^2_{(adj)}$	F	Sig.	Std. Error	RMSE%	معادله Equation
قطر متوسط تاج Average Crown Diameter	تک‌متغیرهٔ خطی Linear Univariate	13	0.80	56.36	***	3.01	40.4	Y = 22.629 X - 29.695
	تک‌متغیرهٔ توانی Power Univariate	13	0.93	169.6	***	0.198	16.1	$Y = 1.388 X^{2.579}$
ارتفاع Height	تک‌متغیرهٔ خطی Linear Univariate	13	0.69	31.77	***	6.72	48.1	Y = 37.87 X - 38.894
	تک‌متغیرهٔ توانی Power Univariate	13	0.90	126.05	***	0.302	42.9	$Y = 2.046 X^{3.394}$
قطر قطورترین جست Thickest Shoot Diameter	تک‌متغیرهٔ خطی Linear Univariate	13	0.81	61.80	***	0.118	32.2	Y = 0.927 X - 26.005
	تک‌متغیرهٔ توانی Power Univariate	13	0.93	190.2	***	0.186	31.1	$Y = 0.0005 X^{2.568}$

شرح علائم: Y زی‌تودهٔ روی زمینی به کیلوگرم، X متغیر مستقل، df درجهٔ آزادی خطا، $R^2_{(adj)}$ ضریب تعیین تطبیق‌یافته (Adjusted coefficient of determination)، F آمارهٔ تجزیهٔ واریانس، Std. Error انحراف معیار مدل، RMSE درصد خطای مدل و *** معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ است.

Description of symbols: Y represents aboveground biomass in kilograms, X is the independent variable, df is the degrees of freedom for error, $R^2_{(adj)}$is the adjusted coefficient of determination, F is the analysis of variance statistic, Std. Error is the standard deviation of the model, RMSE is the percentage error of the model, and *** indicates significance at the .001 level.

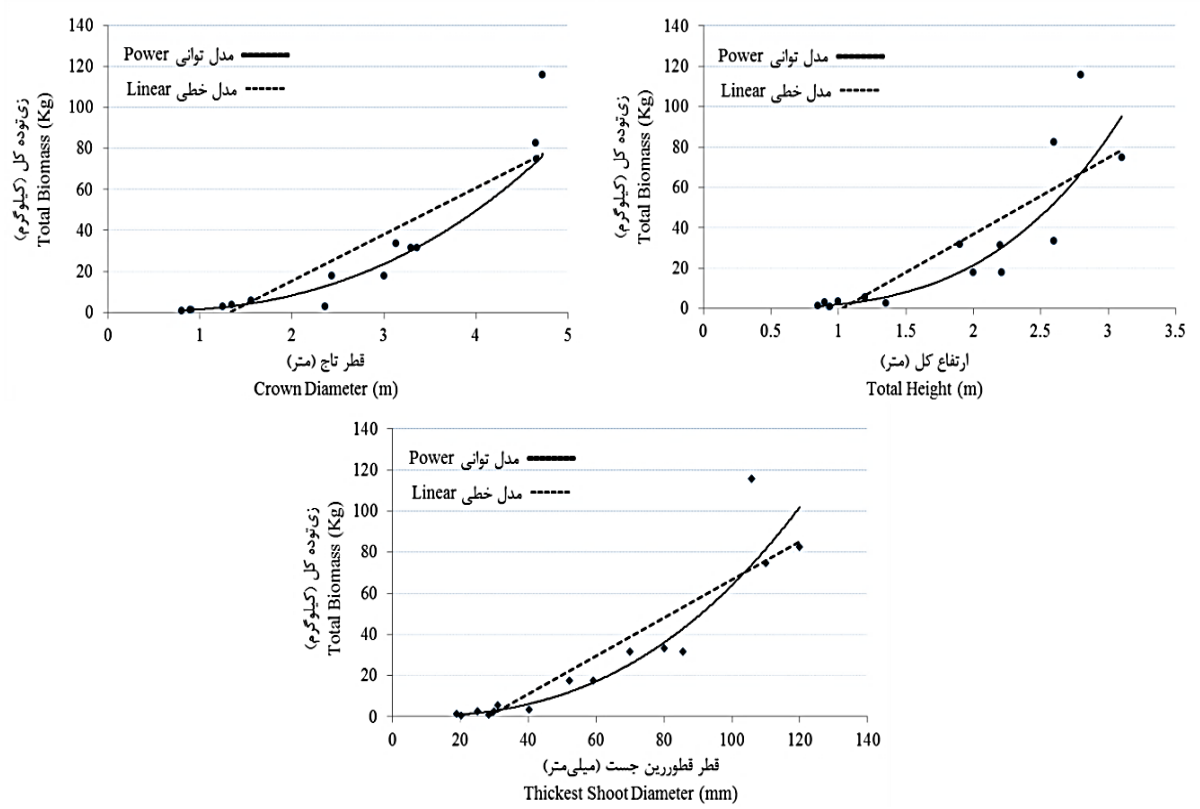
جدول ۴- نتیجهٔ تحلیل رگرسیون چندمتغیره برای تعیین مدل برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام برگ‌سنجدی برمبنای متغیرهای مختلف

Table 4. The result of the multivariate regression analysis for determining the aboveground biomass estimation model of *Prunus elaeagrifolia* based on various variables

متغیرهای مستقل Independent Variables	ModelType	df	$R^2_{(adj)}$	F	Sig.	Std. Error	VIF	RMSE%	Equation
قطر متوسط تاج و ارتفاع Average Crown Diameter and Height	Enter	12	0.79	26.65	***	11.79	11.2	40.7	Y=27.489C-9.12H-25.973
قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست Average Crown Diameter and Thickest Shoot Diameter	Enter	12	0.81	31.13	***	8.48	11.6	32.9	Y=0.56D+9.46C-28.721
ارتفاع و قطر قطورترین جست Height and Thickest Shoot Diameter	Enter	12	0.80	28.53	***	11.32	6.8	32.3	Y=0.91D+0.811H-26.448

شرح علائم: Y زی‌تودهٔ روی زمینی به کیلوگرم، C قطر متوسط تاج به متر، H ارتفاع به متر، D قطر قطورترین جست به میلی‌متر، df درجهٔ آزادی خطا، $R^2_{(adj)}$ ضریب تعیین تطبیق یافته (Adjusted coefficient of determination)، F آمارهٔ تجزیهٔ واریانس، Std. Error انحراف معیار مدل، RMSE درصد خطای مدل و *** معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ است.

Description of the symbols: Y represents the aboveground biomass in kilograms, C is the average crown diameter in meters, H indicates the height in meters, D denotes the diameter of the thickest shoot in millimeters, df refers to the degrees of freedom for error, $R^2_{(adj)}$is the adjusted coefficient of determination, F is the ANOVA statistic, Std. Error represents the standard deviation of the model, RMSE indicates the percentage error of the model, and the significance level denoted by *** indicates that the result is significant at the .001 level.



شکل ۳- ابر نقاط و منحنی خطی و توانی برازش‌یافته برای برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی بادام برگ‌سنجدی برمبنای متغیرهای بررسی‌شده

Figure 3 - Scatter plot and fitted linear and power curves for estimating the aboveground biomass of *Prunus elaeagrifolia* based on various variables

معادلات آلومتریک برای برآورد اندوختهٔ کربن روی‌زمینی در بادام طاووسی

نتیجهٔ برازش مدل‌های تک و چندمتغیره برای برآورد اندوختهٔ کربن روی‌زمینی بادام طاووسی نشان داد که از بین مدل‌های بررسی‌شده، مدل‌های تک‌متغیرهٔ توانی برمبنای قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست و مدل دومتغیره برمبنای ارتفاع و قطر قطورترین جست مناسب‌ترین مدل‌های پیش‌بینی اندوختهٔ کربن روی‌زمینی بادام طاووسی هستند. در هر سه مدل مقدار ضریب تبیین بیش از ۰/۹ و مقدار خطا در مدل تک‌متغیرهٔ توانی کمتر (۱۶/۳ درصد) است (جدول ۵).

معادلات آلومتریک برای برآورد اندوختهٔ کربن روی‌زمینی در بادام برگ‌سنجدی

نتیجهٔ بررسی مدل‌های مختلف برای برآورد اندوختهٔ کربن روی‌زمینی بادام برگ سنجدی نشان داد که از بین مدل‌های بررسی‌شده، مدل تک‌متغیرهٔ توانی برمبنای قطر متوسط تاج مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی اندوختهٔ کربن روی‌زمینی بادام برگ سنجدی با ضریب تبیین ۰/۹۳ و خطای ۱۷/۲ درصد است (جدول ۶).

در نهایت، به‌طور کلی و برمبنای مشخصه‌های ارزیابی و اعتبارسنجی مدل شامل ضریب تبیین، درصد خطا و همخطی متغیرهای مستقل، مناسب‌ترین مدل‌های برآوردی برای دو گونه در جدول ۷ ارائه شده است.

بحث

زی‌توده شاخصی اساسی برای پایش بهره‌وری و سلامت بوم‌سازگان جنگل است؛ از این‌رو نقش اساسی در ارزیابی ذخایر کربن جنگل و حمایت از توسعهٔ برنامه‌های مدیریت جنگل دارد. برای برآورد زی‌تودهٔ

جدول ۵- نتیجهٔ تحلیل رگرسیون تک‌متغیره برای تعیین مدل برآورد اندوختهٔ کربن روی‌زمینی بادام طاووسی برمبنای متغیرهای مختلف

Table 5. The result of the univariate regression analysis for determining the aboveground carbon stock estimation model of *Prunus arabica* based on various variables

متغیر مستقل Independent Variable	Model Type	df	$R^2_{(adj)}$	F	Sig.	Std. Error	RMSE%	Equation
قطر متوسط تاج Average Crown Diameter	تک‌متغیرهٔ توانی Power Univariate	13	0.98	552.5	***	0.131	16.3	$Y = 0.225\ X^{3.084}$
قطر قطورترین جست Thickest Shoot Diameter	تک‌متغیرهٔ توانی Power Univariate	13	0.95	293.5	***	0.107	30.4	$Y = 0.006\ X^{1.832}$
ارتفاع و قطر قطورترین جست Height and Thickest Shoot Diameter	Enter	12	0.93	81.32	***	3.301	29.3	$Y = 0.306D-1.722H-1.505$

شرح علائم: Y اندوختهٔ کربن روی زمینی به کیلوگرم، H ارتفاع به متر، D قطر قطورترین جست به میلی‌متر، df درجهٔ آزادی خطا، $R^2_{(adj)}$ ضریب تعیین تطبیق یافته (Adjusted coefficient of determination)، F آمارهٔ تجزیهٔ واریانس، Std. Error انحراف معیار مدل، RMSE درصد خطای مدل و ❋❋❋معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ است.

Description of Variables:Y represents aboveground carbon stock in kilograms, H denotes height in meters, D indicates the diameter of the thickest shoot in millimeters, df refers to degrees of freedom for error, $R^2_{(adj)}$ is the adjusted coefficient of determination, F is the ANOVA statistic, Std. Error signifies the standard error of the model, RMSE reflects the percentage error of the model, and significance is denoted by $p < .001$.

جدول ۶- نتیجهٔ تحلیل رگرسیون تک‌متغیره برای تعیین مدل برآورد اندوختهٔ کربن روی‌زمینی بادام برگ‌سنجدی برمبنای متغیرهای مختلف

Table 6. The result of the univariate regression analysis for determining the aboveground carbon stock estimation model of *Prunus elaeagrifolia* based on various variables

متغیر مستقل Independent Variable	Model Type	df	$R^2_{(adj)}$	F	Sig.	Std. Error	RMSE%	Equation
قطر متوسط تاج Average Crown Diameter	تک‌متغیرهٔ توانی Power Univariate	13	0.93	170.01	***	0.199	17.2	$Y = 0.630\ X^{2.590}$

شرح علائم: Y اندوختهٔ کربن روی زمینی به کیلوگرم، X متغیر مستقل، df درجهٔ آزادی خطا، $R^2_{(adj)}$ ضریب تعیین تطبیق‌یافته (Adjusted coefficient of determination)، F آمارهٔ تجزیهٔ واریانس، Std. Error انحراف معیار مدل، RMSE درصد خطای مدل و ❋❋❋معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ است.

Description of Symbols: Y is the aboveground carbon stock in kilograms, X is the independent variable, df is the degrees of freedom for error, $R^2_{(adj)}$is the adjusted coefficient of determination, F is the analysis of variance statistic, Std. Error is the standard deviation of the model, RMSE is the percentage error of the model, and *** indicates significance at the .001 level.

جدول ۷– مناسب‌ترین مدل‌های برآورد زی‌توده و اندوختهٔ کربن روی‌زمینی بادام طاووسی و برگ‌سنجدی
Table 7. The most suitable models for estimating the biomass and aboveground carbon stocks of *Prunus arabica* and *Prunus elaeagrifolia*

گونه Species	متغیر وابسته Dependent Variable	متغیر مستقل Independent Variable	Model Type	$R^2_{(adj)}$	RMSE%	معادله Equation
بادام طاووسی *Prunus arabica*	زی‌توده Biomass	قطر متوسط تاج Average Crown Diameter	توانی تک‌متغیره Power Univariate	0.98	16.4	$Y = 0.475\ X^{3.091}$
	زی‌توده Biomass	قطر قطورترین جست Thickest Shoot Diameter	توانی تک‌متغیره Power Univariate	0.95	32.1	$Y = 0.012\ X^{1.837}$
	زی‌توده Biomass	ارتفاع و قطر قطورترین جست Height and Thickest Shoot Diameter	Enter	0.93	32.6	$Y = 0.662D-3.98H-3.003$
	کربن Carbon	قطر متوسط تاج Average Crown Diameter	توانی تک‌متغیره Power Univariate	0.98	16.3	$Y = 0.225\ X^{3.084}$
بادام برگ‌سنجدی *Prunus elaeagrifolia*	زی‌توده Biomass	قطر متوسط تاج Average Crown Diameter	توانی تک‌متغیره Power Univariate	0.93	16.1	$Y = 1.388\ X^{2.579}$
	کربن Carbon	قطر متوسط تاج Average Crown Diameter	توانی تک‌متغیره Power Univariate	0.92	17.2	$Y = 0.629\ X^{2.590}$

شرح علائم: Y زی‌توده و اندوختهٔ کربن روی زمینی به کیلوگرم، X متغیر مستقل، H ارتفاع به متر، D قطر قطورترین جست به میلی‌متر، $R^2_{(adj)}$ ضریب تعیین تطبیق‌یافته (Adjusted coefficient of determination)، RMSE درصد خطای مدل و *** معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ است.
Description of Symbols: Y is the aboveground biomass and carbon stock in kilograms, X is the independent variable, H denotes height in meters, D refers to the diameter of the thickest shoot diameter in millimeters, $R^2_{(adj)}$ is the adjusted coefficient of determination, RMSE is the percentage error of the model, and *** indicates significance at the .001 level.

بوم‌سازگان‌های گیاهی از رویکردهای تجربی و داده‌های آلومتری استفاده می‌شود (Saed Mocheshei et al., 2019). مفهوم آلومتری چارچوبی مهم به‌منظور تشریح الگوی تخصیص زی‌توده و کربن در گیاهان است که ارتباط درون‌گونه‌ای و بین‌گونه‌ای میان زی‌تودهٔ قسمت‌های مختلف را پیش‌بینی می‌کند (Sebrala et al., 2022). محققان استفاده از مدل‌های آلومتری را برای برآورد زی‌توده و اندوختهٔ کربن در گیاهان چوبی به‌دلیل دقت مناسب و کارایی آنها پیشنهاد می‌کنند (Rathore et al., 2021). پژوهش‌های مختلف نشان داده است که معادلات توانی، شکلی بسیار عمومی از معادلات برآورد زی‌تودهٔ کل درخت و اجزای مختلف آن هستند (Zianis & Mencuccini, 2004; Suchomel et al., 2012).

استفاده از متغیر قطر به‌عنوان یک متغیر پیش‌بینی برای زی‌توده، به‌صورت گسترده در منابع گزارش شده است، به‌طوری که به‌طور تقریبی می‌توان گفت این متغیر عمومیت پیدا کرده است (Zianis & Mencuccini, 2004). هم نتایج پژوهش حاضر و هم بررسی Schindler et al. (2023) در زمینهٔ مدل‌های آلومتریک برای زی‌توده در گونهٔ جنگلی *Prunus avium* L. در آلمان، بر اهمیت مدل‌های آلومتریک تأکید دارند. در پژوهش حاضر، از متغیرهای قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست به‌عنوان بهترین پیش‌بینی‌کننده‌ها برای زی‌توده استفاده شد که همسو با نتایج آنهاست که نشان دادند از قطر برابرسینهٔ درخت به‌عنوان عاملی مهم برای برآورد زی‌توده استفاده می‌شود (Schindler et al., 2023). نتایج پژوهش حاضر در مقایسه با یافته‌های Morhart et al. (2016) در زمینهٔ تخصیص زی‌تودهٔ روی زمینی در

گونه *Prunus avium* L. حائز اهمیت است. هر دو پژوهش، التزام به استفاده از مدل‌های آلومتریک برای برآورد دقیق زی‌توده و ذخایر کربن را نشان می‌دهند. یافته‌های پژوهش آنها بر دقت زیاد مدل‌های برآوردی بر مبنای قطر برابرسینه تأکید دارد که با نتایج پژوهش حاضر در خصوص بهترین پیش‌بینی‌کننده‌ها برای زی‌توده که براساس قطر درخت بود همسو است. Bazrgar et al. (2024) در توسعهٔ مدل‌های آلومتری در کانادا پنج گونه را بررسی کردند. در این تحقیق از گونه *Quercus rubra* L.، دوازده پایه، از گونهٔ *Juglans nigra* L. شانزده پایه، از گونهٔ *Robinia pseudoacacia* L. ده پایه، از گونهٔ *Fraxinus Americana* L. پانزده پایه و از گونهٔ *Picea abies* (L.) H.Karst. سیزده پایه انتخاب و قطع شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین مدل، معادلهٔ توانی با یک متغیر قطر برابرسینه یا معادلهٔ توانی با ترکیب دو متغیر قطر برابرسینه و ارتفاع است که دارای ضریب تبیین بیشتر از ۹۷ درصد و خطای کمتر از ۴۰ درصد هستند. در تحقیق حاضر نیز معادلات توانی نسبت به معادلات خطی بهترین برازش را برای برآورد زی‌توده نشان دادند.

از بین متغیرهای مستقل استفاده‌شده در تحقیق حاضر، قطر متوسط تاج، قطر قطورترین جست و ارتفاع کل درختچه‌ها در هر دو گونهٔ بادام طاووسی و برگ‌سنجدی معادلاتی با شاخص‌های مدل‌سازی پذیرفتنی تولید کردند. در بادام طاووسی مدل تک‌متغیرهٔ توانی با متغیر قطر متوسط تاج دارای ضریب تبیین بیشتر (۰/۹۸) و خطای پذیرفتنی (۱۶/۴ درصد) و در بادام برگ‌سنجدی همین نوع از معادله با مقدار خطای کمتر از ۲۰ درصد (۱۶/۱) مدل‌های برآوردی مناسب‌تری را نسبت به مدل‌های دیگر ارائه دادند. Hengl et al. (2004) اظهار داشتند که مقادیر جذر میانگین مربع خطای نسبی کمتر از ۴۰، حاکی از تخمین صحیح و مقادیر بزرگ‌تر از ۷۱ به‌معنای عدم قطعیت زیاد پیش‌بینی است. Suchomel et al. (2012) در بررسی معادلات آلومتریک بلوط سفید *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.، تنها با استفاده از یک متغیر قطر برابرسینه در معادلات توانی، به ضریب تبیین ۹۷ درصد برای برآورد زی‌تودهٔ روی زمینی دست پیدا کردند. در مورد معادلات دومتغیره در گونهٔ بادام طاووسی معادلات مبتنی بر ترکیب قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست و همچنین ترکیب ارتفاع و قطر قطورترین جست دارای ضریب تبیین بیشتر از ۹۰ درصد بود که در عین‌حال کمتر از ۵ درصد خطای برآوردی در آنها نسبت به معادلات تک‌متغیره کاهش یافته بود. Schindler et al. (2023) نیز بیان می‌کنند که معادلات توانی با یک متغیر (قطر برابرسینه)، به‌دلیل برآوردهای دقیق با استفاده از حداقل داده‌ها و نیز سهولت اندازه‌گیری یک متغیر در جنگل، کاربرد بیشتری دارند. همچنین افزودن متغیر ثانویه‌ای مانند ارتفاع درخت، به‌ندرت می‌تواند دقت برآورد را بیشتر از ۵ درصد افزایش دهد که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

در گونهٔ بادام برگ‌سنجدی، افزودن متغیرهای ثانویه نه‌تنها ضریب تبیین معادله را بهبود نبخشید، بلکه مقدار خطای برآوردی را نیز افزایش داد. بر این اساس، معادلات تک‌متغیره در این گونه پاسخ مناسب‌تری برای برآورد زی‌توده داشته‌اند؛ علت را می‌توان شکل مشخص درختچه‌ای این گونه دانست، زیرا در بادام برگ طاووسی به‌دلیل وجود جست‌های بیشتر و پراکندگی جست‌ها، شکل درختچه‌ای، متنوع‌تر از بادام برگ‌سنجدی است (Ghafari et al., 2025) که این موضوع ضرورت استفاده از معادلات دومتغیره در بادام طاووسی را موجب شده است. البته گفتنی است که استفاده از معادلات دومتغیره در جنگل‌های زاگرس به‌دلیل دخالت‌های انسانی در گونه‌های درختچه‌ای و درختی ضرورت دارد؛ زیرا در جنگل‌های زاگرس به‌دلیل وابستگی معیشتی مردم به جنگل، بهره‌برداری‌های مختلفی از گونه‌های جنگلی

انجام می‌گیرد که این موضوع با تاج‌بری درختان همراه است (Iranmanesh et al., 2024). در مورد گونه‌های بادام نیز این مسئله گسترده‌تر است، زیرا افزون‌بر بهره‌برداری از میوهٔ بادام برای مصارف خوراکی و دارویی، از شاخه‌های انواع بادام ازجمله بادام طاووسی برای تهیهٔ سبدهای چوبی (سله) و بادام برگ‌سنجدی برای چوب‌دستی استفاده می‌شود. این موضوع در بسیاری از مناطق، تقارن تاج را برهم می‌زند و گاهی سبب می‌شود که معادلات تک‌متغیره برآوردهای اشتباهی داشته باشند. به همین دلیل در چنین مواردی توصیه می‌شود با توجه به شکل ظاهری گیاه و تغییرات ایجادشده در آن از معادلات چندمتغیره استفاده شود. Nyamukuru et al. (2023) بیان کردند که در گونه‌های درختچه‌ای، مدل‌های دومتغیره برمبنای ترکیب قطر تاج و ارتفاع مدل‌های مناسبی هستند و در عین‌حال اشاره می‌کنند که استفاده از مدل‌های با متغیرهای کمتر ارجح‌اند؛ زیرا اندازه‌گیری متغیرهای اضافه، وقتگیر و پرزحمت بوده و اعتبارسنجی متغیرها نیازمند دقت زیاد است.

در تحقیق حاضر، قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست در بادام طاووسی و قطر متوسط تاج در بادام برگ‌سنجدی بهترین متغیرها در برآورد زی‌تودهٔ روی‌زمینی شناخته شدند. علت را می‌توان شکل درختچه‌ای، جست‌گروه بودن و تاج گستردهٔ گونه‌های بررسی‌شده دانست. به‌عبارت دیگر بخش بزرگ زی‌تودهٔ روی‌زمینی در گونه‌های بادام را تاج این گونه‌ها تشکیل می‌دهد که موجب می‌شود تغییرات زی‌توده را بتوان برمبنای قطر تاج به‌خوبی توجیه کرد. Nyamukuru et al. (2023) در توسعهٔ مدل‌های آلومتری گونه‌های درختچه‌ای در بوم‌سازگان ساوان آفریقا، قطر تاج را مناسب‌ترین مشخصه در مدل‌های برآوردی تک‌متغیره زی‌توده معرفی کردند. اندوختهٔ کربن گونه‌های گیاهی درصدی از زی‌تودهٔ گیاه محسوب می‌شود؛ بنابراین مدل‌های برآوردی اندوختهٔ کربن از نظر صحت و دقت با مدل‌های برآوردی زی‌توده همخوانی دارند و بر همین مبنا مدل‌های تک‌متغیره و دومتغیره برآورد اندوختهٔ کربن روی زمینی دو گونهٔ بادام طاووسی و برگ‌سنجدی (جدول‌های ۵ و ۶) ارائه شده‌اند. به‌طور کلی و برمبنای پارامترهای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل شامل ضریب تبیین، درصد خطا و همخطی متغیرهای مستقل، مناسب‌ترین مدل‌های برآوردی برای دو گونه در جدول ۷ ارائه شده‌اند که البته استفاده از معادلات دومتغیره برای درختچه‌های با قطر بیشتر از ۱ متر و در شرایط بوم‌سازگان‌های دخالت‌شده توصیه می‌شود. درمجموع نتایج این تحقیق دربارهٔ مدل‌های رگرسیون به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که استقرار معادلات آلومتریک مناسب برای برآورد زی‌توده و اندوختهٔ کربن روی‌زمینی گونه‌های بادام طاووسی و برگ‌سنجدی به‌خوبی ممکن است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بر اهمیت زی‌توده به‌عنوان شاخصی مهم در سنجش بهره‌وری و سلامت بوم‌سازگان‌های جنگلی و همچنین ابزاری مؤثر در ارزیابی ذخایر کربن و توسعهٔ برنامه‌های مدیریت جنگل تأکید می‌کند. استفاده از مدل‌های آلومتریک، به‌ویژه معادلات توانی، نشان‌دهندهٔ توانایی زیاد در برآورد دقیق زی‌توده و اندوختهٔ کربن در گونه‌های بادام طاووسی و برگ‌سنجدی است. متغیرهای قطر متوسط تاج و قطر قطورترین جست بهترین پیش‌بینی‌کننده‌ها برای زی‌توده شناخته شدند و نشان دادند که بخش بزرگی از زی‌تودهٔ روی‌زمینی این گونه‌ها به‌خوبی با استفاده از این متغیرها پیش‌بینی‌پذیر است. این پژوهش بر ضرورت استفاده از معادلات دومتغیره برای مناطقی که اکوسیستم دچار تخریب شده و به‌ویژه برای درختچه‌های با قطر متوسط تاج بیشتر از ۱ متر نیز تأکید می‌کند. در مجموع، نتایج این تحقیق بیانگر توانایی خوب مدل‌های آلومتریک برای بهبود دقت برآوردهای زی‌توده و کربن در بوم‌سازگان‌های جنگلی است. با

استفاده از روابط آلومتریک به‌منظور پیش‌بینی دقیق زی‌توده و پتانسیل ذخیره‌سازی کربن درختان می‌توان بدون نیاز به روش‌های تخریبی مانند قطع درختان باارزشی همچون بادام، به ارزیابی پایداری و کارایی مدیریت آنها در مقابله با چالش‌های اقلیمی از جمله کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخت. این رویکرد هم به کاهش آسیب‌های اکولوژیکی ناشی از قطع کمک می‌کند و هم می‌تواند سبب بهبود چشمگیر در برنامه‌ریزی مجدد جنگلکاری و احیای جنگل‌های آسیب‌دیده با استفاده از گونه‌های پیشگام شود.

سپاسگزاری

از همکاری و مساعدت دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد، بنیاد ملی علم ایران (INSF) و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی در خصوص طرح پسادکتری دکتر محمدکاظم پارساپور به شمارهٔ ۴۰۲۰۲۹۲ و بخش تحقیقات منابع طبیعی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری و همچنین مهندس احسان مرادی، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

References

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. https://doi.org/10.1093/forsci/fxad013

Bahrian, J., Firouzan, A.H., Naghdi, R., & Hashemi, S.A. (2024). Estimation and modeling of the biomass and carbon storage in the stump and root of *Populus deltoides*. *Environmental Challenges*, *15*, 100884. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100884

Bazrgar, A.B., Thevathasan, N., Gordon, A., & Simpson, J. (2024). Allometric equations for estimating aboveground biomass carbon in five tree species grown in an intercropping agroforestry system in southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, *98*(3), 739-749. https://doi.org/10.1007/s10457-023-00942-z

de Sousa Lopes, L.S., Pauletto, D., Gomes, E.S.C., da Silva, Á.F., de Sousa Oliveira, T.G., da Silva, J.A.G., Baloneque, D.D., & Martorano, L.G. (2023). Dendrometric Relationships and Biomass in Commercial Plantations of *Dipteryx* spp. in the Eastern Amazon. *Forests*, *14*(11), 2167. https://doi.org/10.3390/f14112167

Ghafari, S., Iranmanesh, Y., Parsapour, M.K., & Riahi Bakhtiari, H.R. (2025). Comparative analysis of leaf area index and carbon stocks in litter and soil of *Prunus arabica* (Olive) and *Prunus elaeagrifolia* (Spach) in Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Forest and Wood Products*, *77*(4), 423-438. doi: 10.22059/jfwp.2025.387003.1319. (In persian)

Hengl, T., Heuvelink, G.B., & Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, *120*(1-2), 75-93. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.018

Iranmanesh, Y., Pourhashemi, M., Jahanbazi Goujani, H., Haidari, M., Fani, B., Parsapour, M.K., & Mokhtarpour, T. (2024). Assessment of canopy cover changes in the northern and southern Zagros forests (Case study: Kurdistan and Chaharmahal and Bakhtiari provinces). *Forest and Wood Products*, *77*(2), 139-152. doi: 10.22059/jfwp.2024.371768.1282. (In persian)

Iranmanesh, Y., & Parsapour, M. (2025). Biomass and carbon stock in deadwood, litter, and soil of Persian oak (.*Quercus brantii* Lindl) stands in Lordegan County, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *32*(4), 373-389. doi: 10.22092/ijfpr.2024.365345.2156. (In persian)

Iranmanesh, YG., Jalali, S.G.A., Sagheb-Talebi, K., Hosseini, S.M., & Sohrabi, H. (2012). Allometric equations of biomass and carbon stocks for *Quercus brantti* acorn and its nutrition elements in Lordegan, Chaharmahal Va Bakhtiari. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *20*(4), 564-551. https://doi: 10.22092/IJFPR.2012.107461. (In persian)

Ketterings, Q.M., Coe, R., van Noordwijk, M., & Palm, C.A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and management*, *146*(1-3), 199-209. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00460-6

Khadivi-Khub, A., & Anjam, K. (2014). Morphological characterization of *Prunus scoparia* using multivariate analysis. *Plant systematics and evolution*, *300*, 1361-1372. https://doi.org/10.1007/s00606-013-0967-7

Komiyama, A., Poungparn, S., & Kato, S. (2005). Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of tropical ecology*, *21*(4), 471-477. https://doi.org/10.1017/S0266467405002476

Losi, C.J., Siccama, T.G., Condit, R., & Morales, J.E. (2003). Analysis of alternative methods for estimating carbon stock in young tropical plantations. *Forest ecology and Management*, *184*(1-3), 355-368. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00160-9

Lu, C., Xu, H., Zhang, J., Wang, A., Wu, H., Bao, R., & Ou, G. (2022). A Method for Estimating Forest Aboveground Biomass at the Plot Scale Combining the Horizontal Distribution Model of Biomass and Sampling Technique. *Forests, 13(*10), 1612. https://doi.org/10.3390/f13101612

MacDicken, K.G. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. WinrockInternationl Institute forAgricultural Development, Forest Carbon Monitoring Program. 87p.

Maghsoudlou nejad, M., bonyad, A.E., & Shataei, Sh. (2020). Determine the most suitable Allometric equations for Estimating Above-ground Biomass of the *Juniperus excelsa*. *Journal of Plant Ecosystem Conservation, 7*(15), 89-105. https://doi://sid.ir/paper/259624/en

Mahmood, H., Siddique, M.R.H., Islam, S.Z., Abdullah, S.R., Matieu, H., Iqbal, M.Z., & Akhter, M. (2020). Applicability of semi-destructive method to derive allometric model for estimating aboveground biomass and carbon stock in the Hill zone of Bangladesh. *Journal of Forestry Research*, *31*, 1235-1245. https://doi.org/10.1007/s11676-019-00881-5

Mirheidari, F., Khadivi, A., Moradi, Y., & Paryan, S. (2020). Phenotypic characterization of *Prunus haussknechtii* Bornm., P. elaeagrifolia Spach, and P. orientalis Mill. *Scientia Horticulturae*, *265*, 109273. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109273

Morhart, C., Sheppard, J.P., Schuler, J.K., & Spiecker, H. (2016). Above-ground woody biomass allocation and within tree carbon and nutrient distribution of wild cherry (*Prunus avium* L.)–a case study. *Forest Ecosystems*, *3*, 1-15. https://doi.org/10.1186/s40663-016-0063-x

Niklas, K.J. (1994). *Plant allometry: the scaling of form and process.* University of Chicago Press.

Nyamukuru, A., Whitney, C., Tabuti, J.R., Esaete, J., & Low, M. (2023). Allometric models for aboveground biomass estimation of small trees and shrubs in African savanna ecosystems. *Trees, Forests and People*, *11*, 100377. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100377

Ordibehesht, M., Matinizadeh, M., Shirvany, A., Ravanbakhsh, H., & Tavakoli Neko, H. (2024). Impact of canopy and seasoning on soil biological characteristics in *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix hispida* habitats of Qom province. *Iranian Journal of Forest*, *21*(2), 282-267. https://doi: 10.22034/ijf.2024.424128.1953. (In Persian)

Pajtík, J., Konôpka, B., & Lukac, M. (2008). Biomass functions and expansion factors in young Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) trees. *Forest Ecology and Management*, *256*(5), 1096-1103. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.013

Panahi, P., Pourhashemi, M., & Hasaninejad, M. (2014). Allometric equations of leaf biomass and carbon stocks of oaks in National Botanical Garden of Iran. *Journal of Plant Research, 27*(1), 12-22. 20.1001.1.23832592.1393.27.1.2.0. (In Persian)

Parsapour, M.K., Sohrabi, H., Soltani, A., & Iranmanesh, Y. (2013). Allometric equations for estimating biomass in four poplar species at Charmahal and Bakhtiari province. *Iranian Journal of forest and poplar Research, 21*(3),517-528. https:// doi:10.30466/JFRD.2023.54690.1666. (In persian)

Rathore, A.C., Mehta, H., Islam, S., Saroj, P.L., Sharma, N.K., Jayaprakash, J., Gupta, A.K., Dubey, R.K., Ghosh, B.N., Prasad, R., & Kumar, D. (2021). Biomass, carbon stocks estimation and predictive modeling in mango based land uses on degraded lands in Indian Sub-Himalayas. *Agroforestry Systems*, *95*, 1563-1575. https:// doi. org/ 10. 1007/ s10457- 021- 00660-4

Rawat, D., Sati, S.P., Khanduri, V.P., Riyal, M., Mishra, G. (2021). Carbon Sequestration Potential of Different Land Use Sectors of Western Himalaya. In: Pant, D., Kumar Nadda, A., Pant, K.K., Agarwal, A.K. (eds) Advances in Carbon Capture and Utilization. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0638-0_12

Saed Mocheshei, A., Pir Bavaghar, M., Shabanian, N., & Fatehi, P. (2019). Possibility of estimating the woody species diversity using Sentinel optical imagery (Case study: Marivan forests). *Forest and Wood Products*, *72*(2), 101-110. https://doi 10.22059/JFWP.2019.271590.984. (In persian)

Schindler, Z., Seifert, T., Sheppard, J.P., & Morhart, C. (2023). Allometric models for above-ground biomass, carbon and nutrient content of wild cherry (*Prunus avium* L.) trees in agroforestry systems. *Annals of Forest Science, 80*(1), 28. https://doi.org/10.1186/s13595-023-01196-6

Sebrala, H., Abich, A., Negash, M., Asrat, Z., & Lojka, B. (2022). Tree allometric equations for estimating biomass and volume of Ethiopian forests and establishing a database. *Trees, Forests and People*, *9*, 100314. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100314

Sharifpoor, R., Jafari, A., & Gojani, H.J. (2016). Effects of aspect on age dependent quality and quantity of mountain almond (*Amygdalus arabica* Olivier) oil (case study: Karebas, Cheharmahal-va-Bakhtiary).

Sohrabi, H., Parsapour, M.K., Soltani, A., & Iranmanesh, Y. (2015). Early differentiation in biomass production and carbon sequestration of white poplar and its two hybrids in Central Iran. *Journal of forestry research*, *26*, 65-69. https://doi.org/10.1007/s11676-015-0020-5

Suchomel, C., Pyttel, P., Becker, G., & Bauhus, J. (2012). Biomass equations for sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and hornbeam (*Carpinus betulus* L.) in aged coppiced forests in southwest Germany. *Biomass and Bioenergy*, *46*, 722-730.https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.021

Wei, D.D., & Bao, W.K. (2021). Aboveground biomass prediction models for Amygdalus tangutica (Batal.) Korsh. in the arid valley along the Minjiang river.10.19675/j.cnki.1006-687x.2021.01059

Zianis, D., & Mencuccini, M. (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest ecology and management*, *187*(2-3), 311-332. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007

Iranian Journal of Forest
Vol. 17, No. 2, Summer 2025
pp. 241-258
Research Article

DOI: 10.22034/ijf.2025.495245.2027
CC BY 4.0

Allometric equations for biomass and carbon stock of *Prunus arabica* (Olivier) Meikle and *Prunus elaeagrifolia* (Spach) Fritsch in the Kareh-bas forest of Chaharmahal and Bakhtiari Province

S. Ghaffari[1], Y. Iranmanesh[2*], M.K. Parsapour[3], and H.R. Riahi Bakhtiari[4]

[1]Ph.D. Student, Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, I. R. Iran
[2]Associate Prof., Forests and Rangelands Research Dept. Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Isfahan, I. R. Iran
[3]Postdoctoral Researcher., Forests and Rangelands Research Dept. Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Shahrekord, I. R. Iran
[4]Assistant Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, I. R. Iran

(Received: 29 December 2024; Accepted: 6 February 2025)

Abstract

Introduction: Forests play a vital role as ecosystems in combating climate change and reducing greenhouse gases. Due to their high significance in carbon storage and exposure to anthropogenic threats, effective conservation and management of forests are essential. Accurate estimation of biomass and carbon storage, especially in Zagros forests, is crucial for designing management strategies. This study investigates and estimates the biomass and carbon stock of two important forest species, *Prunus arabica* (Olivier) Meikle and *Prunus elaeagrifolia* (Spach) Fritsch, and presents suitable allometric models for these species for the first time. The models offer non-destructive and precise estimates using measurable tree characteristics.

Material and Methods: This research was conducted in the natural habitat of the wild almond in Kareh-Bas, Khanmirza County, Chaharmahal and Bakhtiari Province. Thirty sample plots (1000 square meters) were established in the area and 30 individuals (15 individuals of each species) were selected using stratifed random sampling from different crown classes and their quantitative parameters including average crown diameter, diameter of the thickest shoot, number of shoots and total height were measured. The selected shrubs were cut and weighed in the field and sampling was carried out to determine dry weight and carbon percentage. Carbon percentage was measured in the laboratory and by combustion method. Univariate and multivariate models were used to develop allometric equations and their validation was investigated.Results: The results indicated that for *Prunus arabica*, single-variable (univariate) power models using average crown diameter had the highest coefficient of determination (0.98) and the lowest prediction error (16.4%). Additionally, two-variable models combining average crown diameter with the diameter of the thickest shoot and either height or diameter also yielded similar results, attaining a coefficient of determination of 0.93. For *Prunus elaeagrifolia*, the best models included univariate power models based on average crown diameter with a coefficient of determination of 0.93 and an error of 16.1%. All multivariate models for this species were also deemed valid, with a coefficient of determination around 0.80 and an approximate error in them is high.

Conclusion: This study emphasizes the importance of biomass as a key indicator in assessing the productivity and health of forest ecosystems and its role in evaluating carbon reserves and management of reduction of greenhouse gases. Allometric models, particularly power equations, are effective for accurately estimating biomass and carbon storage in *Prunus arabica* and *Prunus elaeagrifolia* species. Average crown diameter and the diameter of the thickest shoot were identified as the best predictors of biomass. The study also highlights the need for multivariate equations in specific ecosystems, particularly in the Zagros forests, which are influenced by human activities. Overall, the results demonstrate the high potential of allometric models to improve the accuracy of biomass and carbon estimates in forests. The results of this study contribute to a greater scientific understanding of biomass and carbon dynamics, which can inform optimized management and conservation policies, ecosystem valuation, and the minimization of damage from destructive practices.

Keywords: Biomass dynamics, Carbon storage, Climate change, Power equations, Single-variable models.

[*]Corresponding author Tel: +98 9131842301 Email: iranmanesh@areeo.ac.ir