

Research Paper

Evaluation of Allometric Relationships to Estimate Leaf Biomass, Carbon Sequestration, and Leaf Area Index of *Acer monspessulanum* subsp. *Cinerascens*

Ali Mahdavi ¹, Rohollah Yaghobi², Mehdi Omid³ and Hamidreza Naji⁴

1- Professor, Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran,
(Corresponding author: a.mahdavi@ilam.ac.ir)

2- M.Sc. in Forestry, Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

3- Assistant Professor, Department of Statistics and Mathematics, Faculty of Basic Sciences, Ilam University, Ilam, Iran

4- Associate Professor, Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.

Received: 29 January, 2025

Revised: 08 April, 2025

Accepted: 20 May, 2025

Extended Abstract

Background: The biomass estimation of different tree organs plays a key role in sustainable management and the estimation of forest carbon stocks. Relationships that relate the characteristics of tree size (such as the diameter and height) to its biomass are called allometric relationships. This study aimed to determine allometric equations for estimating biomass, carbon sequestration, and leaf area index (LAI) of *Acer monspessulanum* subsp. *cinerascens* species in the protected areas of Manshet and Ghalarnang forests in Ilam Province.

Methods: For this purpose, initially, the different sites of *Acer monspessulanum* in the study area were determined by a forest tour. Afterward, quantitative factors (such as large and small crown diameter, tree height, crown length, and collar diameter) were measured in 60 randomly selected *Acer monspessulanum* trees. To estimate the leaf biomass, a quarter to an eighth of the leaves of the tree crown were collected by the direct method of picking, according to the size and smallness of the tree crowns of the *A. monspessulanum* sample trees. The dry weight was measured in oven-dried leaves. The numbers obtained from a quarter or an eighth of the crown surface by multiplying by 4 or 8 were determined as the leaf dry weight of the entire tree crown. The percentage of organic carbon (0.47%) was obtained by burning a sufficient amount of dried leaves in an electric furnace. The LAI of *A. monspessulanum* subsp. trees was calculated using the specific surface area of the leaves through the weighing method. The average tree method was used to generalize the results obtained from the sample trees to the whole forest. The Kolmogorov-Smirnov test was used for the normality of the data. Linear and non-linear (logarithmic and power) regressions were used to examine the allometric relationships between biomass, carbon sequestration, and LAI as the dependent variables with the measured independent quantitative variables of the tree (such as average crown diameter and tree height). Based on the criteria of the coefficient of determination and the adjusted coefficient of determination, the best model was selected among the three investigated models. The decision to confirm or reject the assumption of no effect of the independent variable on the dependent variable was made based on the p-value.

Results: The results of the Kolmogorov-Smirnov test showed a normal distribution of the data. The average leaf biomass, average carbon storage in leaves, and average carbon dioxide absorption from the atmosphere by *A. monspessulanum* subsp. *Cinerascens* trees were estimated at 200.30, 94.16, and 345.68 kg/ha, respectively, in the protected areas of Manshet and Ghalarnang. The results of LAI estimation in the study area showed that the average LAI for *A. monspessulanum* subsp. *cinerascens* species was 1.52 per tree and 0.119 per ha, respectively. The results of the analysis of different models showed that the collar diameter as the independent variable did not affect LAI as the dependent variable in all the investigated regression models, with a p-value more than 0.05 for all three regression models, which shows no significant effect of the collar diameter on LAI. Meanwhile, the average crown diameter as the independent variable in all three investigated models showed a significant effect on the LAI as the dependent variable based on the p-values. Besides, the power model showed the highest coefficient of determination (0.407) and adjusted coefficient of determination (0.397) for the average crown diameter as the independent variable. The results revealed the significant effects of independent variables (collar diameter, average crown diameter, and average crown area) on leaf dry biomass (the dependent



Copyright ©2025 Mahdavi et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

variable) in *A. monspessulanum* subsp. *cinerascens* trees in linear, logarithmic, and power regression models based on the p-value of all three independent variables in all three investigated models. Among the other models, however, the power model had the highest coefficient of determination (0.433) and adjusted coefficient of determination (0.423) for the collar diameter as the independent variable. Therefore, the power model was chosen as the best model for the collar diameter (independent variable) and leaf dry biomass (the dependent variable). In addition, the results of the analysis of different models showed that the tree collar diameter (independent variable) could affect leaf carbon sequestration (the dependent variable) in all regression models, with a p-value < 0.05 for all three regression models, showing a significant effect of the tree collar diameter variable on leaf carbon sequestration (the dependent variable). Among the investigated models, the power model for the tree collar diameter (independent variable) has the highest coefficient of determination (0.434) and adjusted coefficient of determination and (0.424). Therefore, this model was chosen as the best model for the tree collar diameter and leaf carbon sequestration as the independent and dependent variables, respectively. Therefore, the examination of allometric relationships using regression equations showed that the power model had the best coefficient of determination and adjusted coefficient of determination for predicting dependent variables based on the mentioned independent variables.

Conclusion: The results of this study demonstrate the ability to measure biomass, carbon sequestration, and LAI of *A. monspessulanum* subsp. *cinerascens* trees using allometric equations.

Keywords: Carbon sequestration, Leaf area index, *Acer monespolinum*, Manesht, Ghelarang

How to Cite This Article: Mahdavi, A., Yaghobi, R., Omid, M., & Naji, H.R. (2025). Evaluation of Allometric Relationships to Estimate Leaf Biomass, Carbon Sequestration, and Leaf Area Index of *Acer monspessulanum* subsp. *Cinerascens*. *Ecol Iran For*, 13(2), 130-142. DOI: 10.61882/ifej.2025.549



مقاله پژوهشی

ارزیابی روابط آلومتریک برای برآورد زی توده، ترسیب کربن و شاخص سطح برگ درختان کیکم

علی مهدوی^۱، روح الله یعقوبی^۲، مهدی امیدی^۳ و حمیدرضا ناجی^۴

۱- استاد، گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، (نویسنده مسوول: a.mahdavi@ilam.ac.ir)

۲- کارشناسی ارشد جنگل‌داری، گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۳- استادیار، گروه آمار و ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۴- دانشیار، گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹
صفحه ۱۳۰ تا ۱۴۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: برآورد میزان زی توده اندام‌های مختلف درخت نقش کلیدی را در مدیریت پایدار و برآورد ذخایر کربن جنگل ایفا می‌کند. روابطی که مشخصات مربوط به اندازه‌ی درخت (مثل قطر و ارتفاع) را به زی توده آن مربوط می‌کنند روابط آلومتریک نامیده می‌شوند. این تحقیق با هدف تعیین معادلات آلومتریک برای برآورد زی توده، میزان ترسیب کربن و شاخص سطح برگ درختان کیکم در منطقه حفاظت شده مانشت و قلازنگ در جنگل‌های استان ایلام انجام گرفت. **مواد و روش‌ها:** برای این منظور، ابتدا با جنگل‌گردشی رویشگاه‌های مختلف کیکم در منطقه مورد مطالعه مشخص شدند. سپس با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی مجموعاً ۶۰ اصله از درختان کیکم انتخاب و فاکتورهای کمی مورد نظر آن‌ها (مانند قطر بزرگ و کوچک تاج، ارتفاع درخت، طول تاج و قطر یقه درختان) اندازه‌گیری شدند. برای برآورد زی توده برگ از روش مستقیم چین، یک چهارم تا یک هشتم برگ تاج درخت به نسبت بزرگی و کوچکی تاج درختان نمونه کیکم جمع‌آوری شد. پس از خشک کردن برگ‌ها در داخل آون، وزن خشک برگ‌ها اندازه‌گیری شد. اعداد به‌دست‌آمده از یک چهارم یا هشتم سطح تاج با ضرب در اعداد ۴ یا ۸ تبدیل به وزن خشک برگ کل تاج درخت شدند. ضریب درصد کربن الی (۰/۴۷) از طریق روش احتراق با سوزاندن مقدار کافی از برگ‌های خشک‌شده در کوره الکتریکی به‌دست‌آمد. شاخص سطح برگ درختان کیکم هم با اندازه‌گیری سطح ویژه برگ‌های کیکم، از طریق روش وزنی محاسبه شد. برای تمهیم نتایج به‌دست‌آمده از درختان نمونه به کل جنگل از روش درخت متوسط استفاده شد. برای نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. به‌منظور بررسی روابط آلومتریک بین متغیرهای وابسته زی توده، ذخیره کربن و شاخص سطح برگ با متغیرهای کمی مستقل اندازه‌گیری شده درخت (مانند قطر متوسط تاج و ارتفاع درخت)، از رگرسیون‌های خطی و غیرخطی (لگاریتمی و توانی) استفاده شد. بر اساس معیار ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده، بهترین مدل از میان سه مدل مورد بررسی انتخاب شد. تصمیم‌گیری برای تأیید یا رد فرض عدم تأثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته بر اساس مقدار p انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نشان دادند که داده‌ها توزیع نرمال داشتند. بر اساس نتایج، متوسط زی توده برگ، متوسط ذخیره کربن برگ و متوسط مقدار جذب دی‌اکسید کربن از جو توسط درختان کیکم در منطقه حفاظت‌شده مانشت و قلازنگ به‌ترتیب ۲۰۰/۳۰، ۹۴/۱۶، ۳۴۵/۶۸ کیلوگرم در هکتار برآورد شدند. نتایج برآورد شاخص سطح برگ در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که متوسط شاخص سطح برگ گونه کیکم برای هر درخت ۱/۵۲ و برای هر هکتار ۰/۱۱۹ به‌دست آمد. نتایج بررسی مدل‌های مختلف نشان دادند که متغیر مستقل قطر یقه بر متغیر وابسته شاخص سطح برگ در هیچ یک از مدل‌های رگرسیونی مورد بررسی اثرگذار نبود و مقدار p آن برای هر سه مدل رگرسیونی بیش از ۰/۰۵ به‌دست‌آمد که نشان می‌دهد قطر یقه بر شاخص سطح برگ اثر معنی‌داری ندارد. این در حالی است که متغیر مستقل قطر متوسط تاج در هر سه مدل مورد بررسی بر متغیر وابسته شاخص سطح برگ اثرگذاری معنی‌داری را براساس مقادیر ارزش p نشان داد و مدل توانی برای متغیر مستقل قطر متوسط تاج دارای بالاترین ضرایب تعیین (۰/۴۰۷) و ضرایب تعیین تعدیل شده (۰/۳۹۷) بود. نتایج بررسی اثرگذاری متغیرهای مستقل (قطر یقه درخت، قطر متوسط تاج و مساحت تاج پوشش) بر متغیر وابسته زی توده خشک برگ درختان کیکم در مدل‌های رگرسیون خطی، لگاریتمی و توانی نشان دادند که براساس مقدار p هر سه متغیر مستقل در هر سه مدل بررسی‌شده اثر معنی‌داری بر زی توده خشک برگ درختان کیکم داشتند. از این رو، مدل توانی به عنوان بهترین مدل برای متغیرهای مستقل قطر یقه و متغیر وابسته زی توده خشک برگ انتخاب شد. علاوه بر این، نتایج بررسی مدل‌های مختلف نشان دادند که متغیر مستقل قطر یقه درخت بر متغیر وابسته ترسیب کربن برگ نیز در تمامی مدل‌های رگرسیونی مورد بررسی اثرگذار بود و مقدار p آن برای هر سه مدل رگرسیونی کمتر از ۰/۰۵ به‌دست آمد که اثر معنی‌دار متغیر قطر یقه درخت را بر متغیر وابسته ترسیب کربن برگ نشان می‌دهد. این در حالی است که از میان مدل‌های مورد بررسی، مدل توانی برای متغیر مستقل قطر یقه درخت دارای بیشترین مقدار ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل یافته به‌ترتیب با مقادیر ۰/۴۳۴ و ۰/۴۲۴ بود. از این رو، این مدل به عنوان بهترین مدل برای متغیر مستقل قطر یقه درخت و متغیر وابسته ترسیب کربن برگ انتخاب شد. بنا بر این، بررسی روابط آلومتریک با استفاده از روابط رگرسیونی نشان داد که مدل توانی دارای بهترین ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته بر اساس متغیرهای مستقل مورد بررسی بود. **نتیجه‌گیری:** یافته‌های حاصل از این تحقیق توانایی اندازه‌گیری زی توده، ترسیب کربن و شاخص سطح برگ درختان کیکم را با استفاده از معادلات آلومتریک نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون خطی، رگرسیون لگاریتمی، رگرسیون توانی، روش درخت متوسط، مانشت و قلازنگ

مقدمه

موضوع تا حدی است که کنوانسیون تغییرات آب و هوایی سازمان ملل (UNFCCC, 2008) کشورهای عضو را ملزم به پایش منظم ذخایر کربن جنگلی و گزارش نتایج حاصل از مکانیسم‌هایی مانند REDD+ نموده است.

در زمینه روش‌شناسی برآورد زیست‌توده، تحولات چشم‌گیری در چند دهه اخیر رخ داده است. اگرچه روش‌های مستقیم و مخرب مانند قطع و توزین درختان (Clark et al.,

زیست‌توده جنگلی به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کمی در مدیریت پایدار جنگل‌ها شناخته می‌شود که نقش تعیین‌کننده‌ای را در مطالعات تولید چوب (Morgan & Moss, 1985)، ارزیابی پتانسیل تولید انرژی‌های زیستی، تحلیل ساختار جنگل (Chave et al., 2005) و محاسبه ذخایر کربن جهانی (Bombelli et al., 2009) ایفا می‌کند. اهمیت این

برآورد زی توده کل درختان به عنوان یک شاخص مهم برای ارزیابی رویشگاه از نظر بیواکولوژیکی و اقتصادی در نظر گرفته می شود (Cole & Ewel, 2006). با این وجود، زی توده انباشته شده در اندام های غیر از تنه به نسبت کم تر در نظر گرفته شده است و بیش تر روش های توسعه یافته برآورد زی توده موجود در تنه را مورد توجه قرار داده اند. مطالعات اخیر تأکید می کنند که زیست توده غیر ساقه ای (شامل شاخه ها، برگ ها و ریشه ها) نقش حیاتی را در عملکرد اکوسیستم های جنگلی ایفا می کند. براساس پژوهش های مرتبط، سهم زیست توده غیرساقه ای (از جمله برگ) می تواند بخش قابل توجهی از کل زیست توده درخت را تشکیل دهد. به طور مشخص، واریانس در کسر زیست توده برگ نسبت به زیست توده چوبی در گونه های درختی می تواند تا سه برابر در بین جمعیت های مختلف متغیر باشد (Veresoglou & Peñuelas, 2019). زیست توده برگ به عنوان محور اصلی فرآیندهای فیزیولوژیک درختان، نقشی حیاتی و چندبعدی در عملکرد اکوسیستم های جنگلی ایفا می کند (Poorter *et al.*, 2012). این نقش کلیدی از دو جنبه حائز اهمیت است: نخست، برگ ها به عنوان کارخانه های فتوسنتزی درختان، مسئول جذب بیش از ۹۰٪ دی اکسید کربن جوی هستند (Chen *et al.*, 2022)؛ دوم، با دارا بودن چرخه بازگشت سریع (به ویژه در گونه های خزان کننده) سهم قابل توجهی در چرخه مواد مغذی و حاصل خیزی خاک از طریق تجزیه سریع دارند (Berg & McLaugherty, 2014). مطالعات میدانی اخیر در ایران (Andalibi *et al.*, 2021) نیز نشان داده اند که تغییرات زیست توده برگ در اکوسیستم های نیمه خشک می توانند شاخص حساسی برای پایش سلامت جنگل و پاسخ به تغییرات محیطی باشند.

گونه کیکم (*Acer monspessulanum* L.) به عنوان یکی از گونه های کلیدی جنگل های زاگرس، با توجه به مقاومت به شرایط سخت محیطی و نقش آن در ترسیب کربن (Cole & Ewel, 2006)، نیازمند بررسی های دقیق تری است. اگرچه مطالعاتی مانند پژوهش های پناهی و همکاران (Panahi *et al.*, 2011, 2014) بر روی ویژگی های برگ گونه های مختلف تمرکز داشته اند، اما خلأ اطلاعاتی قابل توجهی در مورد روابط آلومتریک این گونه وجود دارد.

این پژوهش با هدف پرکردن این خلأ علمی، به توسعه معادلات آلومتریک برای برآورد زی توده برگ، ترسیب کربن و شاخص سطح برگ درختان کیکم می پردازد. روش شناسی این مطالعه از یک سو از تجربیات مطالعات پیشین در سایر گونه ها (Pilehvar *et al.*, 2015; Mahdavi & Mirzaei, 2020) و از سوی دیگر از نوآوری های روش شناختی جدید (Jucker *et al.*, 2022) بهره می برد. یافته های این تحقیق می توانند به بهبود مدیریت جنگل های زاگرس و دقت برآوردهای ذخیره کربن در این اکوسیستم منحصر به فرد کمک شایانی نمایند.

مواد و روش ها منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در منطقه حفاظت شده مانشت و قلازنگ استان ایلام در طول ۴۶ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۳۷ دقیقه شرقی و عرض

از ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی قرار دارد، اما محدودیت های عملی آنها از جمله هزینه بالا، زمان بر بودن و تخریب پذیری اکوسیستم، محققان را به سمت توسعه روش های غیر مخرب سوق داده است. در این میان، معادلات آلومتریک به عنوان پرکاربردترین و اقتصادی ترین روش (Rojas-García *et al.*, 2015) با فرمول عمومی زیر توسعه یافته اند:

$$B_A = \alpha D^\beta$$

در این رابطه B_A زی توده، D قطر برابر سینه و α و β پارامترهای مدل هستند. این رابطه برای گونه های متفاوت در سراسر جهان استفاده شده است. در روابط آلومتریک، پارامترهای مدل (α و β) به کمک آنالیز رگرسیون مشخص می شوند و در تعیین آنها باید دقت زیادی به عمل آید. بررسی ها نشان داده اند که اگر رابطه فوق در مقیاس محلی تهیه و استفاده شود، رابطه مؤثری خواهد بود.

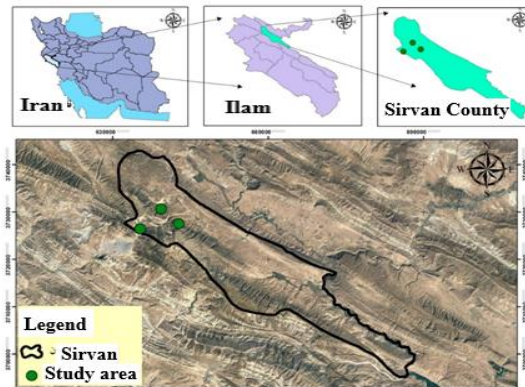
تحقیقات اخیر در این حوزه دو روند اصلی را دنبال می کنند: از یک سو، توسعه پایگاه های داده گسترده و استاندارد شده مانند پایگاه تالو (Tallo) (Jucker *et al.*, 2022) که با جمع آوری ۴۹۸ / ۸۳۸ رکورد از ۶۱ سایت جهانی، امکان انجام مطالعات مقایسه ای و تحلیل های کلان را فراهم آورده است. معادلات آلومتری متنوعی برای گونه های درختی و درختچه ای در سراسر دنیا توسعه داده شده اند (Vashum & Jayakumar, 2012)، مانند معادلات تعمیم یافته ای که برای پیش بینی زی توده برای گونه های گرمسیری ایجاد شده اند (Brown *et al.*, 1992; Chave *et al.*, 2005) و کورزوکین (Ter-Mikaelian & Korzukhin, 1997) فهرستی از معادلات زی توده را برای ۶۶ گونه درختی مناطق معتدله آمریکای شمالی گزارش کردند، و یا یک پایگاه داده از ۴۷۸ معادله آلومتریک برای برآورد زی توده درختان در جنگل های مکزیک تهیه شده است (Rojas-García *et al.*, 2015).

از سوی دیگر، تأکید فزاینده ای بر توسعه مدل های خاص گونه و منطقه (Segura & Kanninen, 2005) وجود دارد، زیرا مطالعات نشان داده اند که مدل های عمومی (Brown *et al.*, 1992; Vashum & Jayakumar, 2012) ممکن است در شرایط خاص اکولوژیک دقت لازم را نداشته باشند. این امر به ویژه در مورد گونه های با ویژگی های منحصر به فرد مانند اقا قیای سیاه (Tziaferidis *et al.*, 2022) یا آرگان (Oumasst *et al.*, 2024) اهمیت دوچندان می یابد.

در زمینه مطالعات منطقه ای، پژوهش های متعددی به بررسی روابط آلومتریک در جنگل های زاگرس پرداخته اند. از جمله می توان به مطالعات جامع روی بلوط ایرانی (Panahi *et al.*, 2015; Iranmanesh *et al.*, 2013)، بنه (Sohrabi & Shirvani, 2012) و کیکم (Afrozandeh, 2015) اشاره کرد. این مطالعات به خوبی نشان داده اند که علی رغم وجود مدل های عمومی و منطقه ای (Ter-Mikaelian & Korzukhin, 1997)، نیاز به توسعه معادلات خاص گونه در شرایط اکولوژیک مختلف جنگل های زاگرس (Khorsavi *et al.*, 2012) و (Pilehvar *et al.*, 2015) همچنان احساس می شود.

دارد (Attarod *et al.*, 2018). پوشش گیاهی منطقه را می‌توان به دو اشکوب فوقانی و تحتانی تقسیم کرد که اشکوب فوقانی گونه بلوط با ۹۰ درصد پوشش و اشکوب تحتانی شامل گونه‌های بنه، کیکم، محلب، شن، داغداغان و سایر گونه‌ها است (Darvishnia *et al.*, 2012).

۳۳ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). این منطقه در دامنه ارتفاعی بین ۱۱۰۵ تا ۲۶۵۰ متر از سطح دریا و با میانگین بارندگی سالیانه ۵۷۳ میلی‌متر بر اساس تقسیم‌بندی‌های اقلیمی دمارتن در دسته اقلیم مدیترانه‌ای قرار



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه
Figure 1. Location of the study area

به‌دست‌آمد (Brooks, 1998; ESA21, 2008; Mahdavi *et al.*, 2023).

شاخص سطح برگ درخت کیکم با اندازه‌گیری سطح ویژه برگ درخت با استفاده از روابط زیر محاسبه شد:

سطح ویژه برگ یک درخت (SLA_i) برابر است با مساحت برگ‌های یک درخت (A_i) تقسیم بر وزن خشک برگ‌ها (m_i):
رابطه (۱) $SLA_i = A_i / m_i$

چون اندازه‌گیری مساحت تمام برگ‌های درخت کاری سخت و زمان‌بر است، برای اندازه‌گیری سطح ویژه برگ یک درخت از $SLAs$ زیرنمونه‌هایی از برگ یک درخت استفاده می‌شود، به‌طوری‌که از زی‌توده خشک زیرنمونه‌ها برای محاسبه مساحت کل برگ‌های هر درخت استفاده می‌شود:

رابطه (۲) $SLA_i = SLAs = A_s / m_s$

که در آن، A_s (مساحت برگ‌های زیرنمونه) و m_s (وزن خشک زیرنمونه) هستند. آنگاه برای برآورد کل مساحت برگ‌های یک درخت (A_i)، سطح ویژه برگ زیرنمونه در زی‌توده خشک کل برگ‌های آن درخت ضرب می‌شود:

رابطه (۳) $m_i \times SLAs = A_i$

با محاسبه وزن خشک این برگ‌ها و با استفاده از رابطه بین سطح برگ با وزن خشک، سطح همه برگ‌های درختان و در نهایت با استفاده از رابطه ۴ شاخص سطح برگ گونه کیکم محاسبه شد (Khosravi *et al.*, 2012; Mahdavi *et al.*, 2023):

رابطه (۴) $LAI = \frac{d \times \sum A_i}{n \times 10000}$

LAI: شاخص سطح برگ

d: تعداد درختان (اصلاً در هکتار)

A_i : سطح برگ‌های یک اصله درخت (مترمربع)

n: تعداد نمونه‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌ها

روش تحقیق

درختان کیکم نمونه‌برداری شده در این مطالعه از رویشگاه‌های این گونه در منطقه حفاظت‌شده مانشت و قلا رنگ به‌روش تصادفی انتخاب شدند. مشخصه‌های کمی مانند قطر برزگ و کوچک تاج (CD)، ارتفاع درخت (H)، طول تاج (CL) و قطر یقه (DRC) ۶۰ درخت نمونه کیکم اندازه‌گیری شدند و میانگین تعداد در هکتار درختان کیکم منطقه نیز برآورد شد.

برای برآورد زی‌توده از روش مستقیم چیدن برگ یک چهارم تا یک هشتم (یک هشتم برای درختان بزرگ) تاج درختان نمونه و توزین آن‌ها استفاده شد. از هر درخت ۱۰ عدد برگ در مجموع ۶۰۰ برگ به‌طور تصادفی انتخاب و سطح برگ‌ها به‌وسیله دستگاه سطح برگ‌سنج CI-203 Handheld Laser Leaf Area اندازه‌گیری شد؛ سپس برگ‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۵ درجه در داخل آون و بعد به‌مدت ۳۰ تا ۴۵ دقیقه در دسیکاتور قرار گرفتند و وزن خشک آن‌ها پس از خشک شدن اندازه‌گیری شد. اعداد به‌دست‌آمده از یک چهارم یا هشتم سطح تاج تبدیل به وزن خشک برگ کل تاج درخت شدند (ضرب در ۴ یا ۸) (Adl, 2007; Panahi *et al.*, 2013; Akbari, 2021).

برای به‌دست‌آوردن درصد کربن آلی از روش احتراق خشک با جریان هوا در کوره الکتریکی استفاده شد (Losi *et al.*, 2003). در نهایت، مقدار ضریب کربن برگ‌های کیکم ۴۷ درصد بیوماس خشک برگ محاسبه شد. نتایج حاصل از مقدار ذخیره کربن برگ‌های نمونه به کل درخت (در اینجا کل برگ‌های درخت) تعمیم داده شدند؛ سپس از طریق روش درخت متوسط (Mean Tree Method) نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری درختان نمونه با ضرب نمودن در میانگین تعداد در هکتار درختان کیکم منطقه، به کل جنگل تعمیم داده شدند (Mahdavi & Mirzaei, 2020). مقدار جذب دی‌اکسید کربن از جو با ضرب کردن ضریب ۳/۶۷ در مقدار کربن ترسیب شده

$$\begin{aligned} \ln(Y_i) &= \ln(b_0 \times x_i^{b_1}) \\ &= \ln(b_0) + b_1 \ln(x_i) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۸)}$$

از این رو، خروجی مدل در مدل توانی برازش شده براساس مدل تبدیل شده ارایه می شود. در ادامه، براساس معیار ضریب تعیین بهترین مدل از میان این سه مدل انتخاب می شود. تصمیم گیری برای تایید یا رد فرض عدم تاثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته براساس p-مقدار انجام می پذیرد. به این صورت که اگر برای متغیری خاص مقدار p از ۰/۰۵ کمتر باشد آنگاه فرض صفر رد می گردد.

نتایج و بحث

نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنف توزیع نرمال داده ها را نشان دادند. آماره های کمی متغیرهای اندازه گیری شده به ازای اندازه های درخت متوسط در جدول ۱ نشان داده شده اند. جدول ۲ میانگین تعداد در هکتار، مقدار زی توده خشک برگ، ترسیب کربن در برگ، مقدار جذب دی اکسید کربن توسط برگ و شاخص سطح برگ درختان کیکم را نشان می دهد.

برای بررسی نرمال بودن داده ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنف استفاده شد. به منظور بررسی روابط آلومتریک بین متغیرهای زی توده، ذخیره کربن و شاخص سطح برگ با متغیرهای کمی درخت، از رگرسیون خطی و رگرسیون های غیرخطی لگاریتمی و توانی استفاده شد. شکل های کلی مدل های رگرسیونی مورد استفاده شامل توابع خطی ساده (رابطه ۵)، لگاریتمی (رابطه ۶) و توانی (رابطه ۷) به صورت روابط زیر هستند (Mirabdollahi shamsi et al., 2011; Mahdavi & Mirzaei, 2020).

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$Y_i = b_0 + b_1 \ln(X_i) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$Y_i = b_0 \times X_i^{b_1} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در این مدل ها:

Y_i : متغیر وابسته زی توده برگ، شاخص سطح برگ و ذخیره کربن برگ

X_i : متغیر مستقل شامل متوسط قطر تاج

b_0 : عدد ثابت مدل

b_1 : ضریب مدل

برای راحتی برازش مدل توانی به داده ها، این مدل با لگاریتم گرفتن از طرفین رابطه ۸ به صورت زیر خلاصه می شود:

جدول ۱- آماره های کمی متغیرهای اندازه گیری شده درخت متوسط

Table 1. Quantitative statistics of the measured variables of a mean tree

متغیر Variable	کمترین Minimum	بیشترین Maximum	میانگین Mean	انحراف معیار S.D	ضریب تغییرات (%) C.V %
ارتفاع (متر) Height	3.25	9	5.73	1.27	22.16
ارتفاع تاج (متر) Crown height	1.65	6.7	3.93	0.99	25.30
متوسط قطر تاج (متر) Mean crown diameter	2.55	7.3	5.07	1.01	19.96
مساحت تاج پوشش (مترمربع) Area of the crown	5.1	41.76	21.32	7.75	36.34
قطر یقه (سانتی متر) Collar diameter (cm)	7	55	31.26	9.69	31.00
میانگین وزن تک برگ نمونه ها (گرم) Mean weight of a single leaf (g)	0.08	0.2	0.113	0.054	31.56
میانگین سطح تک برگ (سانتی متر مربع) Mean area of a single leaf (Cm ²)	2.97	12.37	7.02	2.15	30.73
میانگین تعداد کل برگ درخت Mean total number of leaves	13840	95368	44132	860.33	42.12
مساحت کل برگ های یک درخت (Cm ²) (Cm ²) The total area of the average tree leaves	104733.97	606140	386528	10270.81	36.16
شاخص سطح برگ Leaf area index	0.55	7.03	1.52	0.88	37.89
زی توده کل برگ ها (گرم) Total biomass of leaves	1917.31	13068.8	4854	242.72	46.19
ترسیب کربن برگ ها (کیلوگرم) Carbon sequestration of leaves	0.48	4.21	2.17	0.85	38.59
جذب CO ₂ از جو (کیلوگرم) Atmosphere CO ₂ absorption	1.75	15.44	7.93	3.065	38.62

جدول ۲- زی توده برگ، ترسیب کربن برگ، مقدار جذب CO₂ از جو (کیلوگرم در هکتار) توسط برگ ها و شاخص سطح برگ درخت کیکم در منطقه مورد مطالعه

Table 2. Leaf biomass, leaf carbon sequestration and the amount of CO₂ absorption from the atmosphere (kg.ha⁻¹) by the leaves and Leaf Area Index of *Acer* trees in study area

گونه Species	تعداد در هکتار Number per hectare	زی توده برگ (کیلوگرم/هکتار) Leaf biomass (kg/ha)	ترسیب کربن برگ (کیلوگرم/هکتار) Carbon sequestration of leaf (kg/ha)	مقدار جذب CO ₂ از جو (کیلوگرم/هکتار) CO ₂ absorption from atmosphere (kg/ha)	شاخص سطح برگ Leaf Area Index
کیکم <i>Acer monspessulanum</i>	41.3	200.30	94.16	345.68	0.119

مدل‌های مختلف رگرسیونی برای متغیرهای وابسته مورد

بررسی

در این تحلیل‌ها، برای متغیرهای وابسته شاخص سطح برگ، بیوماس خشک برگ، و ترسیب کربن برگ، اثرگذاری متغیرهای مستقل شامل قطر یقه درخت، قطر متوسط تاج و مساحت تاج پوشش هر درخت به‌صورت جداگانه براساس مدل‌های رگرسیونی خطی، لگاریتمی و توانی مورد بررسی قرار گرفت.

مدل‌های رگرسیونی برای شاخص سطح برگ

نتایج بررسی مدل‌های مختلف نشان داد که متغیر مستقل قطر یقه بر متغیر وابسته شاخص سطح برگ در هیچ یک از مدل‌های رگرسیونی مورد بررسی اثرگذار نبود و مقدار p آن برای هر سه مدل رگرسیونی بیش از 0.05 به‌دست‌آمد که نبود

اثر معنی‌دار قطر یقه بر شاخص سطح برگ را نشان می‌دهد (جدول ۳). این در حالی است که متغیرهای مستقل قطر متوسط تاج و مساحت تاج‌پوشش در هر سه مدل مورد بررسی بر متغیر وابسته شاخص سطح برگ اثرگذاری معنی‌داری را بر اساس مقادیر ارزش p (جدول ۴) و ضرایب تعیین و ضرایب تعیین تعدیل‌شده نشان دادند (جدول ۵). همان‌طور که در جدول ۵ خلاصه ضرایب تعیین و ضرایب تعیین تعدیل‌شده مشاهده می‌شود، مدل توانی برای متغیر قطر متوسط تاج دارای بیشترین مقدار ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل یافته به‌ترتیب با مقادیر 0.407 و 0.397 از میان سایر مدل‌ها است. از این‌رو، این مدل به‌عنوان بهترین مدل برای متغیر مستقل قطر متوسط تاج و متغیر وابسته شاخص سطح برگ انتخاب می‌شود که نمودار این مدل به‌صورت شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳- ضرایب سه مدل رگرسیون خطی، لگاریتمی و توانی برای قطر یقه درخت و شاخص سطح برگ

Table 3. The coefficient of three regression models, linear, logarithmic, and power, for the collar diameter of the tree and the leaf area index

مدل	ضرایب Coefficients	ضرایب استاندارد نشده Unstandardized coefficients		ضرایب استاندارد شده Standardized coefficients		آماره T	p- مقدار P-value
		B	خطای معیار Std. error	Beta			
خطی Linear	ضریب ثابت Constant coefficient	2.042	0.383	-0.183		5.325	0.000
	قطر یقه درخت Collar Diameter	-0.017	0.012			-1.421	0.161
لگاریتمی Logarithmic	ضریب ثابت Constant coefficient	3.06	1.106	-0.181		2.768	0.008
	لگاریتم قطر یقه درخت Collar diameter logarithm	-0.454	0.325			-1.400	0.167
توانی Power	ضریب ثابت Constant coefficient	0.976	0.533	-0.160		1.831	0.072
	لگاریتم قطر یقه درخت Collar diameter logarithm	-0.194	0.157			-1.238	0.221

جدول ۴- ضرایب سه مدل رگرسیون خطی، لگاریتمی و توانی برای قطر متوسط تاج و شاخص سطح برگ

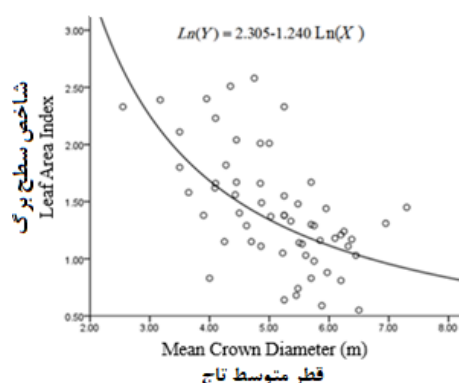
Table 4. The coefficients of three regression models, linear, logarithmic, and power, for the mean crown diameter and the leaf area index.

مدل Model	ضرایب Coefficients	ضرایب استاندارد نشده Unstandardized coefficients		ضرایب استاندارد شده Standardized coefficients		آماره T	p مقدار P-value
		B	خطای معیار ضرایب Std. error	Beta			
خطی Linear	ضریب ثابت Constant coefficient	4.055	0.483	-0.575		8.399	0.000
	قطر متوسط تاج Mean crown diameter	-0.500	0.093			-5.351	0.000
لگاریتمی Logarithmic	ضریب ثابت Constant coefficient	5.566	0.670	-0.625		8.312	0.000
	لگاریتم قطر متوسط تاج Mean crown diameter logarithm	-2.526	0.414			-6.095	0.000
توانی Power	ضریب ثابت Constant coefficient	2.305	0.317	-0.638		7.264	0.000
	لگاریتم قطر متوسط تاج Mean crown diameter logarithm	-1.240	0.196			-6.314	0.000

جدول ۵- مقادیر ضرایب تعیین و تعدیل‌شده متغیرهای مستقل و شاخص سطح برگ (متغیر وابسته) در مدل‌های مختلف

Table 5. The values of determination and adjusted coefficients for independent variables and the leaf area index (dependent variable) in linear, logarithmic, and power regression models

متغیر مستقل Independent variable	مدل Model	ضریب تعیین Coefficient of determination	ضریب تعیین تعدیل یافته Adjusted coefficient of determination
قطر یقه درخت Collar diameter	خطی (Linear)	0.034	0.017
	لگاریتمی (Logarithmic)	0.033	0.016
	توانی (Power)	0.026	0.09
قطر متوسط تاج Mean crown diameter	خطی (Linear)	0.331	0.319
	لگاریتمی (Logarithmic)	0.390	0.380
	توانی (Power)	0.407	0.397
مساحت تاج پوشش Area of the crown	خطی (Linear)	0.275	0.263
	لگاریتمی (Logarithmic)	0.395	0.384
	توانی (Power)	0.396	0.385



شکل ۲- رابطه آلومتریک-توانی بین متغیر قطر متوسط تاج و شاخص سطح برگ درختان کیکم
Figure 2. The logarithmic-power allometric relationship between the mean crown diameter variable and the leaf area index of *Acer monspessulanum* trees

طور که جدول ۷ نشان می‌دهد، مدل توانی از میان سایر مدل‌ها بیشترین مقادیر ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل یافته به ترتیب با مقادیر ۰/۴۲۳ و ۰/۴۲۳ را برای متغیر مستقل قطر یقه به خود اختصاص داد. از این رو، مدل توانی به عنوان بهترین مدل برای متغیرهای مستقل قطر یقه و متغیر وابسته زی توده خشک برگ انتخاب می‌شود که نمودارهای این مدل‌ها به صورت شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

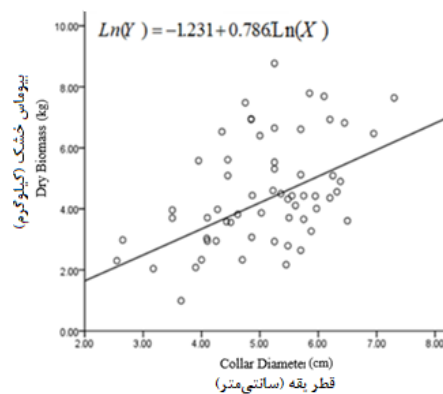
مدل رگرسیونی برای زی توده خشک برگ
نتایج بررسی اثرگذاری متغیرهای مستقل قطر یقه درخت، قطر متوسط تاج و مساحت تاج پوشش بر متغیر وابسته زی توده خشک برگ درختان کیکم در مدل‌های رگرسیون خطی، لگاریتمی و توانی نشان داد که بر اساس مقدار p هر سه متغیر مستقل در هر سه مدل بررسی شده اثرات معنی‌داری بر زی توده خشک برگ درختان کیکم دارند (جدول ۶). با این حال، همان

جدول ۶- ضرایب سه مدل رگرسیون خطی، لگاریتمی و توانی برای قطر یقه و زی توده خشک
Table 6. The coefficients of three regression models, linear, logarithmic, and power, for the collar diameter of the tree and leaf dry biomass

مقدار P-value	آماره T	ضرایب استاندارد شده Standardized coefficients		ضرایب استاندارد نشده Unstandardized coefficients		ضرایب Coefficients	مدل Model
		Beta		خطای معیار ضرایب Std. error	B		
0.111	1.619			0.598	0.969	ضریب ثابت Constant coefficient	خطی Linear
0.000	6.234	0.633		0.018	0.114	قطر یقه درخت Collar diameter	
0.001	-3.442			1.742	-5.998	ضریب ثابت Constant coefficient	لگاریتمی Logarithmic
0.000	6.077	0.624		0.511	3.108	لگاریتم قطر یقه درخت Collar diameter logarithm	
0.003	-3.061			0.402	-1.231	ضریب ثابت Constant coefficient	توانی Power
0.000	6.658	0.658		0.118	0.786	لگاریتم قطر یقه درخت Collar diameter logarithm	

جدول ۷- مقادیر ضرایب تعیین و تعدیل شده متغیرهای مستقل و زی توده خشک برگ (متغیر وابسته) در مدل‌های مختلف
Table 7. The values of determination and adjusted coefficients for independent variables and leaf dry biomass (dependent variable) in linear, logarithmic, and power regression models

ضریب تعیین تعدیل یافته Adjusted coefficient of determination	ضریب تعیین Coefficient of determination	مدل Model	متغیر مستقل Independent variable
0.391	0.401	خطی Linear	قطر یقه درخت Collar diameter
0.378	0.389	لگاریتمی Logarithmic	
0.423	0.433	توانی Power	
0.198	0.212	خطی Linear	قطر متوسط تاج Mean crown diameter
0.199	0.212	لگاریتمی Logarithmic	
0.235	0.248	توانی Power	
0.208	0.213	خطی Linear	مساحت تاج پوشش Area of the crown
0.212	0.225	لگاریتمی Logarithmic	
0.257	0.269	توانی Power	



شکل ۳- رابطه الومتریک-توانی بین متغیر قطر یقه درخت و زی‌توده خشک برگ کیکم

Figure 3. The logarithmic-power allometric relationship between the collar diameter variable and leaf dry biomass of *Acer monspessulanum* trees

متغیر مستقل قطر یقه درخت دارای بیشترین مقادیر ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل یافته به ترتیب با مقادیر ۰/۴۳۴ و ۰/۴۲۴ از میان سایر مدل‌ها است. از این رو، این مدل به عنوان بهترین مدل برای متغیر مستقل قطر یقه درخت و متغیر وابسته ترسیب کربن برگ انتخاب می‌شود که نمودار این مدل به صورت شکل ۴ نشان داده شده است.

مدل رگرسیونی برای ترسیب کربن برگ

نتایج بررسی مدل‌های مختلف نشان دادند که متغیر مستقل قطر یقه درخت بر متغیر وابسته ترسیب کربن برگ در تمامی مدل‌های رگرسیونی مورد بررسی اثرگذار بود و مقدار P آن برای هر سه مدل رگرسیونی کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد که اثر معنی‌دار قطر یقه را بر ترسیب کربن برگ نشان می‌دهد (جدول ۸). با این حال، براساس نتایج جدول ۹، مدل توانی برای

جدول ۸- ضرایب سه مدل رگرسیون خطی، لگاریتمی و توانی برای قطر یقه و ترسیب کربن برگ درختان کیکم

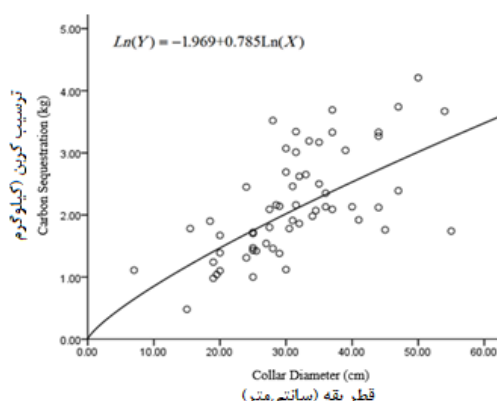
Table 8. The coefficient of three regression models, linear, logarithmic, and power, for the collar diameter of the tree and carbon leaf sequestration of *Acer monspessulanum* trees

مقدار -p P-value	آماره T	ضرایب استاندارد شده Standardized coefficients	ضرایب استاندارد نشده Unstandardized coefficients		ضرایب Coefficients	مدل Model
		Beta	خطای معیار ضرایب Std. error	B		
0.119	1.583		0.286	0.452	ضریب ثابت Constant coefficient	خطی Linear
0.000	6.269	0.636	0.009	0.055	قطر یقه درخت Collar Diameter	
0.001	-3.460		0.832	-2.880	ضریب ثابت Constant coefficient	لگاریتمی Logarithmic
0.000	6.090	0.625	0.244	1.488	لگاریتم قطر یقه درخت Collar diameter logarithm	
0.000	-4.908		0.401	-1.969	ضریب ثابت Constant coefficient	توانی Power
0.000	6.668	0.659	0.118	0.785	لگاریتم قطر یقه درخت Collar diameter logarithm	

جدول ۹- مقادیر ضرایب تعیین و تعدیل شده متغیرهای مستقل و ترسیب کربن برگ (متغیر وابسته) در مدل‌های مختلف

Table 9. The values of determination and adjusted coefficients for independent variables and leaf carbon sequestration (dependent variable) in linear, logarithmic, and power regression models

ضریب تعیین تعدیل یافته Adjusted coefficient of determination	ضریب تعیین Coefficient of determination	مدل Model	متغیر مستقل Independent variable
0.394	0.404	خطی Linear	قطر یقه درخت Collar diameter
0.380	0.390	لگاریتمی Logarithmic	
0.424	0.434	توانی Power	
0.196	0.210	خطی Linear	قطر متوسط تاج Mean crown diameter
0.196	0.210	لگاریتمی Logarithmic	
0.231	0.244	توانی Power	
0.203	0.217	خطی Linear	مساحت تاج پوشش Area of the crown
0.210	0.223	لگاریتمی Logarithmic	
0.253	0.265	توانی Power	



شکل ۴- رابطه الومتری-توانی بین متغیر قطر یقه درخت و ترسب کربن برگ درختان کیکم
Figure 4. The logarithmic-power allometric relationship between the collar diameter variable and leaf carbon sequestration of *Acer monspessulanum* trees

مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی شاخص سطح برگ، زی توده و میزان ترسب کربن در اندام‌های مختلف گونه‌های درختی در مناطق جنگلی ایران انجام شده‌اند (Naghsh Zargar, 2001; Adl, 2007; Panahi et al., 2011, 2013; Attarod et al., 2018; Mahdavi & Mirzaei, 2020; Mahdavi et al., 2023). در این پژوهش، با استفاده از متغیرهای مستقل شامل قطر یقه، قطر متوسط تاج و مساحت تاج پوشش، روابط آلومتریک مناسبی برای برآورد زی توده، اندوخته کربن و شاخص سطح برگ گونه کیکم توسعه داده شدند.

نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه با میانگین تراکم ۴۱/۳ اصله درخت در هکتار، مقادیر زی توده خشک برگ، اندوخته کربن برگ و جذب دی اکسید کربن به ترتیب ۲۰۰/۳۰، ۹۴/۱۶ و ۳۴۵/۶۸ کیلوگرم در هکتار برآورد شده‌اند (جدول ۲). مقایسه این نتایج با مطالعات انجام شده در سایر مناطق جهان نشان می‌دهد که میزان زی توده برگ در کیکم به طور قابل توجهی کمتر از گونه‌های مشابه در جنگل‌های معتدله اروپا و آمریکای شمالی است. به عنوان مثال، مطالعاتی بر روی ۶۶ گونه درختی در آمریکای شمالی نشان دادند که میانگین زی توده برگ بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوگرم در هکتار متغیر بود (Korzukhin & Ter-Mikaelian, 1997). همچنین، پژوهش‌های براون و همکاران (Brown et al., 1992) و چاو و همکاران (Chave et al., 2005) در جنگل‌های گرمسیری به مقادیر بسیار بالاتری (۲۰۰۰-۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار) اشاره دارند. این تفاوت‌ها می‌توانند ناشی از شرایط اقلیمی خشک‌تر منطقه زاگرس در مقایسه با این مناطق باشند.

مقادیر شاخص سطح برگ به دست آمده در این مطالعه در مقایسه با گونه زالزالک در استان ایلام که به ترتیب ۰/۰۹۵ و ۹/۰۸ برآورد شدند (Mahdavi et al., 2023) و همچنین سایر گونه‌های زاگرس مانند داغداغان (۳/۷)، جنگل‌های بلوط و بنه (۱/۲) و گونه *Quercus libani* (۱/۹۹)، (Adl, 2007; Pourhashemi et al., 2012; Khosravi et al., 2012) تفاوت‌های معناداری را نشان می‌دهند. این تفاوت‌ها عمدتاً به عوامل متعددی از جمله تعداد و تراکم درختان (۴۱/۳ اصله در هکتار)، ویژگی‌های خاص گونه‌ای، مراحل مختلف توالی اکولوژیک، شرایط فصلی و همچنین تأثیرات مدیریتی و تخریبی رویشگاه مرتبط هستند (Adl, 2007; Mahdavi et al., 2023). به طور کلی، شاخص سطح برگ بالاتر نشان‌دهنده پتانسیل بیشتر برای تبادلات گازی بین تاج درخت و اتمسفر است که در گونه کیکم با مقدار ۰/۱۱۹ در هکتار، این پتانسیل نسبت به سایر گونه‌های مورد مطالعه کمتر است.

مدل سازی رگرسیونی و بررسی‌های روابط آلومتریک

مقایسه با نتایج مطالعات انجام شده روی سایر گونه‌های جنگلی زاگرس هم نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی است. به عنوان مثال، میزان زی توده خشک برگ برای گونه بلوط و بنه در جنگل‌های یاسوج به ترتیب ۱۳۱۷/۳ و ۵۷/۲ کیلوگرم در هکتار گزارش شد (Adl, 2007). همچنین، مقادیر برای گونه بلوط در جنگل‌های شهنشاه استان لرستان ۸۶۰/۲۱ کیلوگرم در هکتار (Pilevar et al., 2016)، برای گونه داغداغان در سندج ۱۲۶۲ کیلوگرم در هکتار (Pourhashemi et al., 2012) و برای گونه‌های ارغوان و زالزالک در استان ایلام به ترتیب ۵۳/۵۵ و ۹۹/۱۸ کیلوگرم در هکتار برآورد شدند (Mahdavi

این یافته‌ها با نتایج اکبری (Akbari, 2021)، در مورد گونه زالزالک از نظر نوع مدل (توانی) همخوانی دارند، اگرچه در آن مطالعه متغیرهای مرتبط با تاج عملکرد بهتری نشان دادند.

مقایسه با مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که ضریب تعیین به‌دست آمده در این پژوهش (۰/۴۳۳) در مقایسه با مطالعاتی که در جنگل‌های مرطوب‌تر انجام شدند و به ضرایب تعیین بالاتری (۰/۸۰ - ۰/۶۵) دست یافتند، پایین‌تر است. این تفاوت را می‌توان به عوامل متعددی (Calva-Alvarado et al., 2008; Pokorný & Tomaskova, 2007) مانند تراکم پایین‌تر درختان (۴۱/۳ اصله در هکتار)، شرایط نیمه‌خشک منطقه (میانگین بارندگی ۵۷۳ میلی‌متر) و ویژگی‌های خاص گونه کیکم (Attarod et al., 2018) نسبت داد. مطالعه هیرو و همکاران (Hierro et al., 2000) بر روی درختان شاخه‌زاد (*Cavanilles.erinaceae*) نیز نشان داد که در چنین گونه‌هایی، معیارهای اندازه‌گیری متفاوتی (مانند قطر بلندترین ساقه) ممکن است نتایج بهتری ارائه دهد. باید توجه داشت که زی‌توده شاخه و برگ وابستگی زیادی به شرایط رویشگاهی دارد (Socha & Wezyk, 2007). بنا بر این، لازم است در هر رویشگاهی تحقیقی مستقل برای بررسی امکان پیش‌بینی این متغیرها انجام شود.

متغیر وابسته ترسیب کربن برگ

در مورد ترسیب کربن برگ، مدل توانی مجدداً بهترین عملکرد را، با ضرایب تعیین ۰/۴۳۴ برای قطر یقه، ۰/۲۴۴ برای قطر متوسط تاج و ۰/۲۶۵ برای مساحت تاج‌پوشش، نشان داد. این نتایج با یافته‌های افروزنده و همکاران (Afrozandeh et al., 2015) و اکبری (Akbari, 2021)، همسو هستند، اما با نتایج مهدوی و میرزایی (Mahdavi & Mirzaei, 2020)، در مورد گونه ارغوان که مدل‌های نمایی و خطی را پیشنهاد کردند، تفاوت دارند. همچنین، این نتایج با مطالعه ادل (Adl, 2007) که برای گونه بنه یک مدل لگاریتمی خطی با ضریب تعیین ۰/۹۵ گزارش کرد، قابل مقایسه‌اند. این تفاوت‌ها مجدداً بر اهمیت توسعه معادلات خاص گونه تأکید دارند.

به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که در گونه کیکم، قطر یقه به‌عنوان مؤثرترین متغیر مستقل برای پیش‌بینی زی‌توده خشک برگ و ترسیب کربن عمل می‌کند. این یافته احتمالاً ناشی از ویژگی‌های رشد چندانقه‌ای این گونه و شرایط خاص رویشگاهی منطقه است. با این حال، همان‌طور که سوچا و وزی (Socha & Wezyk, 2007) اشاره کرده‌اند، وابستگی شدید روابط آلومتریک به شرایط رویشگاهی، لزوم انجام مطالعات مستقل در هر منطقه را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این تحقیق توانایی اندازه‌گیری زی‌توده، ترسیب کربن و شاخص سطح برگ گونه کیکم با استفاده از معادلات آلومتریک را نشان دادند. نتایج بررسی روابط آلومتریک با استفاده از روابط رگرسیونی نشان دادند که مدل توانی دارای بهترین ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل‌شده برای اکثر متغیرهای مستقل مورد بررسی با متغیرهای وابسته زی‌توده، ترسیب کربن و شاخص سطح برگ درختان کیکم در جنگل‌های مورد مطالعه استان ایلام بودند.

در این مطالعه، مدل‌سازی روابط آلومتریک برای پیش‌بینی زی‌توده برگ، ترسیب کربن و شاخص سطح برگ (LAI) در گونه کیکم (*A. monspessulanum* L.) با استفاده از سه متغیر مستقل شامل قطر یقه درخت، قطر متوسط تاج و مساحت تاج‌پوشش و همین‌طور با استفاده از سه مدل رگرسیونی (خطی، لگاریتمی و توانی) انجام شد.

متغیر وابسته شاخص سطح برگ

نتایج نشان دادند که از میان سه مدل مورد بررسی، مدل توانی با ضریب تعیین ۰/۴۰۷ برای قطر متوسط تاج و ۰/۳۹۶ برای مساحت تاج‌پوشش، بهترین عملکرد را در پیش‌بینی شاخص سطح برگ داشت (جدول ۴ و ۵). این در حالی است که براساس نتایج جدول ۳ برای این سه مدل مورد بررسی قطر یقه درخت تأثیر معناداری بر LAI نداشت.

یافته‌های حاضر با نتایج پناهی و همکاران (Panahi et al., 2011)، مهدوی و میرزایی (Mahdavi & Mirzaei, 2020) و اکبری (Akbari, 2021) که بر اهمیت قطر متوسط تاج در پیش‌بینی LAI تأکید داشتند، همخوانی دارند، اما با مطالعه ادل (Adl, 2007) که قطر برابر سینه را به‌عنوان متغیر کلیدی معرفی کرده بود، در تضاد هستند. این تفاوت‌ها احتمالاً ناشی از ویژگی‌های مورفولوژیک خاص گونه کیکم و شرایط اکولوژیک منطقه مورد مطالعه هستند.

در مقایسه با مطالعات بین‌المللی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که روابط آلومتریک در گونه کیکم از الگوهای متفاوتی نسبت به گونه‌های مناطق معتدله و گرمسیری پیروی می‌کنند. به‌عنوان مثال، مطالعات ترمیکائیلیان و کورزوکین (۱۹۹۷) بر روی ۶۶ گونه درختی در آمریکای شمالی نشان دادند که مدل‌های خطی و لگاریتمی معمولاً عملکرد بهتری در پیش‌بینی LAI دارند، در حالی که در این تحقیق مدل توانی بهترین برازش را نشان داد (Ter-Mikaelian & Korzukhin, 1997). همچنین، ضریب تعیین به‌دست آمده در این مطالعه (۰/۴۰۷) در مقایسه با تحقیقات مشابه در جنگل‌های مرطوب معتدله با R^2 بین ۰/۶۵ - ۰/۸۵ پایین‌تر است که می‌تواند ناشی از تنوع کمتر نمونه‌ها و شرایط نیمه‌خشک منطقه باشد. از سوی دیگر، پژوهش‌های روجاس گریک و همکاران (Rojas-García et al., 2015) در جنگل‌های مکزیکی و اوماست و همکاران (Oumasst et al., 2024) بر روی گونه آرگان در مراکش نشان دادند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، متغیرهای مرتبط با تاج (مانند قطر متوسط تاج و مساحت تاج‌پوشش) معمولاً تأثیر بیشتری بر LAI داشتند که با یافته‌های این مطالعه همسو است. این شباهت‌ها احتمالاً بازتاب استراتژی‌های سازگاری مشابه گونه‌های مناطق خشک در مواجهه با محدودیت منابع آبی هستند.

متغیر وابسته زی‌توده خشک

در تحلیل روابط آلومتریک برای پیش‌بینی زی‌توده خشک برگ در گونه کیکم، نتایج نشان دادند که مدل توانی با ضریب تعیین ۰/۴۳۳ ($R^2 = 0.433$) زمانی که قطر یقه به‌عنوان متغیر مستقل استفاده شد، بهترین عملکرد را داشت. در حالی که استفاده از قطر متوسط تاج و مساحت تاج‌پوشش به‌ترتیب ضریب تعیین ۰/۲۴۸ و ۰/۲۶۹ را تولید کردند (جدول ۶ و ۷).

References

- Adl, H.R. (2007). Estimation of leaf biomass and leaf area index of two major species in Yasuj forests, *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 15(4), 417-426. [In Persian]
- Akbari, M. (2021). Estimation of leaf biomass and leaf area index of *Crataegus aronia* in forests of Ilam. MSc. thesis. Dept. Forest Sciences, Ilam University. 88 p. [In Persian]
- Afrozandeh, A., Kiani, B., & Atarod, P. (2015). Modeling the Standing Traits to Estimate Tree Volume and Biomass of *Acer monspessulanum* Subsp. *cinerascens* (Boiss.) using Multiple Regression, *Ecology of Iranian Forests*, 3(6), 9-18. [In Persian]
- Andalibi, L., Ghorbani, A., Moameri, M., Hazbavi, Z., Nothdurft, A., Jafari, R., & Dadjou, F. (2021). Leaf Area Index Variations in Ecoregions of Ardabil Province, Iran. *Remote Sensing*, 13(15), 2879.
- Attarod, P., Miri, S., Shirvany, A., & Bayramnejad, V. (2018). Variations in Leaf Area Index of *Quercus brantii* trees in response to changing climate. *Journal of Agriculture Science and Technology*, 20(7), 1417-1429. [In Persian]
- Berg, B., & McClaugherty, C. (2014). Plant litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration (3rd ed.). Springer.
- Bombelli, A., Avitabile, V., BelettiMarchesini, L., Balzter, H., Bernoux, M., Hall, R., Henry, M., Law, B.E., Manlay, R., Marklund, L.G., & Shimabukuro, Y.E. (2009). Assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables: biomass. Food and Agriculture Organization- Global Terrestrial Observation System, Rome.
- Brown, S., & Lugo A. E. (1992). Above ground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia*, 17, 8-18.
- Brooks, R. (1998). Carbon Sequestration, what's that? UI Extension Forestry Information Series, *Forest Management* No: 32, 2 pp.
- Calvo-Alvarado, J., Mcdowell, N., & Waring, R. (2008). Allometric relationships predicting foliar biomass and leaf area: sapwood area ratio from tree height in five Costa Rican rain forest species. *Tree Physiology*, 28, 1601-1608.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chamber, J. Q., Eamus, D., Folester, H., Formard, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balans in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87-99.
- Clark, D.A., Brown, S., Kicklighter, D.W., Chambers, J.Q., Thomlinson, J.R. Ni J., & Holland, E.A. (2001). Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, 11, 371-384.
- Cole, T.G., & Ewel, J.J. (2006). Allometric equations for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 229, 351-360.
- Darvishnia, H., Dehghani kazemi, M., Forghani, A.H., & Kavyanifard, A.A. (2012). Study and introduction of the flora of Manshet and Qalarang protected areas in Ilam province. *Taxonomy and Biosystematics*, 11(4), 47-60.
- Dudley, N.S., & Fownes, J.H. (1992). Preliminary biomass equations for eight species of fast-growing tropical trees. *Journal of Tropical Forest Science*, 5(1), 68-73.
- Environmental science activities for the 21st century (ESA21). (2008). Trees and carbon, 13pp.
- Hakkila, P. (1989). Utilization of residual forest biomass. In Utilization of residual forest biomass (pp. 352-477). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hierro, J.L., Branch, L.C., Villarreal, D., & Clark, K. (2000). Predictive equations for biomass and fuel characteristics of Argentine shrubs. *Journal of Range Management*, 53, 617-621.
- Iranmanesh, Y., Sagheb Talebi, kh., Sohrabi, H., Jalali, S. Gh., & Hosseini, S.M. (2015). Biomass and carbon stock of Brant's Oak (*Quercus brantii* Lindl.) in two vegetation forms in Lordegan, Charmahal & Bakhtiari Forests. *Iranin Journal of Forest and Popolar Research*, 22(4), 749-762. [In Persian]
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 19-35.
- Khosravi, S., Namiranian, M., Ghazanfari, H., & Shirvani, A. (2012). Estimation of leaf area index and assessment of its allometric equations in oak forests: Northern Zagros, Iran. *Journal of Forest Science*, 58(3), 116-122.
- Losi, C.J., Siccama, T.G., Juan, R.C., & Morales, E. (2003). Analysis of alternative methods for estimating carbon stock in young tropical plantations. *Forest Ecology and Management*, 184, 355-366.
- Mahdavi, A., & Mirzaei M. (2020). Estimation of leaf biomass, leaf carbon sequestration and leaf area index of *Cercis siliquastrum* L. in forests of Ilam. *The Journal of Plant Research*, 33(1), 205-213.
- Mahdavi, A., Akbari, M., Omid, M. & Naderi, M. (2023). Evaluation of leaf biomass, leaf carbon sequestration and leaf area index of Hawthorn (*Crataegus aronia* L.) in Ilam forests. *Journal of Forest Resrach and Development*, 9(3), 145-159. [In Persian]
- Mirabdollahi, S. M., Bonyad, A. E., Torkaman, J., & Bakhshandeh, N. B. (2011). Modeling of Effective Variables on Bark Thickness of *Fagus orientalis* Lipsky in the Asalem Forest Area. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 18(3), 79-90. [In Persian]

- Morgan, W.B., & Moss, P.A. (1985). Biomass energy and urbanization: commercial factors in the production and use of biomass fuels in tropical Africa. *Biomass Bioenergy*, 6, 285-299.
- Olfati, F., Mosleh Arani, A., & Azimzadeh, H.R. (2013). Estimation of carbon sequestration of four species of *Pistacia atlantica*, *Acer monspessulanum*, *Amygdalus scoparia*, and *Ephedra procera* in the protected area of Bagh Shadi Herat (Yazd Province). *Journal of Plants and Ecosystems*, 9(36), 65-75.
- Panahi, P., Pourhashemi M., & Hassaninejad, M. (2011). Estimation of leaf biomass and leaf carbon sequestration of *Pistacia atlantica* in National Botanical Garden of Iran, *Iranian Journal of Forest*, 3(1), 1-12. [In Persian]
- Panahi, P., Pourhashemi, M., & Hassaninejad, M. (2013). Comparison of Specific Leaf Area in Three Native Oaks of Zagros in National Botanical Garden of Iran. *Iranian Forest Ecology*, 1(2), 12-26. [In Persian]
- Panahi, P., Pourhashemi M., & Hassaninejad, M. (2014). Allometric of leaf biomass and carbon stocks if oaks in National Botanical Garden of Iran. *Journal of Plant Research*, 27(1), 12-22. [In Persian]
- Pilehvar, B., Mirazadi, Z., Taheri Abkenar, K., & Vayskarami, Z. (2015). Estimation of Leaf biomass, leaf carbon sequestration and leaf area of oak trees in central of Zagros Forests (Case study: Shahanshah forests of Lorestan Province). *Plant and Ecosystem*, 10(41), 81-92.
- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30-50.
- Pourbabaee, H., Babaeeian, M., Bonyad, A. E., & Adel, M.N. (2014). Autecology of Montpellier maple (*Acer monspessulanum* subsp. *cinerascens*) in forests of Fars Province. *Journal of Plant Research*, 27(3), 376-385.
- Pourhashemi, M., Eskandari, S., Dehghani, M., Najafi, T., Asadi, A., & Panahi, P. (2012). Biomass and leaf area index of Caucasian Hackberry (*Celtis caucasica* Willd.) in Taileh urban forest, Sanandaj. Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 19(4), 609-620. [In Persian]
- Rojas-García, F., De Jong, B.H.J., Martinez-Zurimendi, P., & Paz-pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72, 835-864.
- Segura, M., & Kanninen, M., (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica*, 37, 2-8.
- Sohrabi, H., & Shirvani, A. 2012. Allometric equations for estimating biomass of Atlantic Pistacche (*Pistacia atlantica* var. *mutica*) in Khojir National Park. *Iranian Journal of Forest*, 4(1), 55-64. [In Persian]
- Socha, J., & Wezyk, P. (2007). Allometric equations for estimating the foliage biomass of Scots pine. *Europuran Journal of Forest Research*, 126, 263-270.
- Ter-Mikaelian, M.T., & Korzukhin, M.D. (1997). Biomass equations for sixty-five North America tree species. *Forest Ecology and Management*, 97(1), 1-24.
- Pokorny, R., & Tomaskova, I. (2007). Allometric relationships for surface area and dry mass of young Norway spruce aboveground organs. *Journal of Forest Science*, 53(12), 548-554.
- UNFCCC. (2008). Report of the Conference of the Parties on its thirteenth session, held in Bali from 3 to 15 December 2007. Addendum, Part 2. Document FCCC/CP/2007/6/Add.1. UNFCCC, Bonn, Germany.
- Vashum, K.T., & Jayakumar, S. (2012). Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests-a review. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 2(4), 1-7.
- Veresoglou, S. D., & Peñuelas, J. (2019). Variance in biomass-allocation fractions is explained by distribution in European trees. *New Phytologist*, 222(3), 1352-1363.
- Wang, H., Hall, C. A., Scatena, F. N., Fetcher, N., & Wu, W. (2003). Modeling the spatial and temporal variability in climate and primary productivity across the Luquillo Mountains, Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 179(1-3), 69-94.