

Research Article

Validation of smartphone imaging for leaf area index estimation in man-made needle and broad-leaved plantations in Chitgar Forest Park, Iran

Vahid Khalili¹, Vilma Bayramzadeh^{2*}, Pedram Attarod^{3*}, Ehsan Abdi⁴ and Omid Fathizadeh⁵

1- Ph.D. Student., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2*- Corresponding author, Associate Prof., Department of Wood and Paper Sciences and Technology, Ka. C., Islamic Azad University, Karaj, Iran. E-mail: vbayramzadeh@gmail.com

3*- Corresponding author, Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: attarod@ut.ac.ir

4- Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

5- Assistant Prof., Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tabriz, Ahar, Iran

Received: 30.05.2025

Revised: 27.09.2025

Accepted: 06.10.2025

Background and Objectives: Indirect methods for measuring the leaf area index (LAI), such as hemispherical photography using a digital camera equipped with a fisheye lens, provide high accuracy; however, they are often costly and logistically challenging for field applications. Recent advances in smartphone technology and the availability of clip-on fisheye lenses have created new opportunities for low-cost LAI estimation. This study aimed to evaluate the accuracy of hemispherical images acquired with a smartphone relative to those obtained with a digital camera for estimating LAI in stands of *Robinia pseudoacacia* L., *Pinus eldarica* Medw., *Celtis australis* L., and *Fraxinus rotundifolia* Mill. in Chitgar Forest Park, Tehran County, Iran.

Methodology: A total of 169 sampling points were selected across four stands, including 47 points in *R. pseudoacacia*, 36 in *P. eldarica*, 47 in *F. rotundifolia*, and 39 in *C. australis*. The first sampling point in each stand was selected randomly, and subsequent photographs were taken at 10-m intervals beneath the canopy. At each point, two hemispherical images were captured simultaneously using a digital camera and a smartphone. All photographs were taken at a height of 0.5 m under pre-sunrise conditions to ensure uniform lighting. LAI values were derived from the images using GLA software. Data normality was assessed in SPSS, followed by paired t-tests. For linear regression modeling, 70% of the data were randomly selected for model calibration and the remaining 30% for validation. Regression analyses were conducted in Microsoft Excel. The F-test was used to evaluate the overall significance of regression models, while root mean square error (RMSE), relative root mean square error (RRMSE), and bias were calculated to assess model performance.

Results: The mean LAI values measured by the digital camera were 0.80 (± 0.27 SD) for *R. pseudoacacia*, 0.89 (± 0.15 SD) for *P. eldarica*, 1.24 (± 0.16 SD) for *C. australis*, and 0.77 (± 0.27 SD) for *F. rotundifolia*. Corresponding smartphone-derived values were 0.66 (± 0.31 SD), 0.83 (± 0.19 SD), 1.07 (± 0.14 SD), and 0.75 (± 0.30 SD), respectively. Paired t-tests revealed significant differences ($p < 0.05$) between the two methods for *R. pseudoacacia*, *P. eldarica*, and *C. australis*, whereas no significant difference was found for *F. rotundifolia* ($p > 0.05$). Mean differences were positive for all species, with the largest difference observed in *C. australis* (0.20) and the smallest in *F. rotundifolia* (-0.028). All simple linear regression models were statistically significant



according to the F-test, while intercept terms were not significant based on the t-test. The coefficients of determination (R^2) were 0.53 for *R. pseudoacacia*, 0.59 for *P. eldarica*, 0.73 for *C. australis*, and 0.71 for *F. rotundifolia*. Validation using the remaining 30% of the dataset produced RMSE and RRMSE values of 0.07 and 9% for *P. eldarica*, 0.10 and 10% for *C. australis*, 0.18 and 25% for *F. rotundifolia*, and 0.18 and 33% for *R. pseudoacacia*. Direct smartphone measurements consistently underestimated LAI across all species, with the greatest underestimation observed in *C. australis* (13.7%) relative to reference values.

Conclusion: In this study, digital camera measurements were used solely as reference data for model calibration and validation. Once calibrated, the developed models enable smartphones to estimate LAI independently without requiring camera-derived measurements. However, the models were validated only for the species and environmental conditions examined and would require additional calibration and validation before application to other species or regions. Despite the lower image quality and accuracy of a mid-range smartphone equipped with a clip-on fisheye lens compared with a digital camera, this approach offers a practical and cost-effective alternative for LAI estimation in remote locations and large-scale field monitoring programs, particularly in stands with relatively homogeneous canopy structures.

Keywords: Fisheye lens, hemispherical photography, linear regression, model validation.

صحت‌سنجی تصاویر گوشی‌های هوشمند در برآورد شاخص سطح برگ توده‌های دست‌کاشت سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در پارک جنگلی چیتگر

وحید خلیلی^۱، ویلما بایرام‌زاده^{۲*}، پدرام عطار^{۳*}، احسان عبدی^۴ و امید فتحی‌زاده^۵

۱- دانشجوی دکتری، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. پست الکترونیک: vbayramzadeh@gmail.com

۳- نویسنده مسئول، استاد، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست

الکترونیک: attarod@ut.ac.ir

۴- استاد، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۵- استادیار، گروه جنگل‌داری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی اهر، دانشگاه تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰ تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴

چکیده

سابقه و هدف: اگرچه روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری شاخص سطح برگ (Leaf Area Index: LAI) با تصویربرداری نیم‌مکروی حاصل از دوربین دیجیتال مجهز به لنز چشم‌ماهی، دقت زیادی دارند، اما هزینه‌بر هستند و حمل‌ونقل آن‌ها نیز در عرصه دشوار است. پیشرفت فناوری در گوشی‌های هوشمند و ظهور لنزهای کلیسی، زمینه استفاده از این ابزارها را برای برآورد LAI فراهم کرده است. هدف این پژوهش، ارزیابی صحت تصاویر نیم‌مکروی گوشی هوشمند در مقایسه با دوربین دیجیتال برای برآورد شاخص سطح برگ در گونه‌های افاقیا (*Robinia pseudoacacia* L.)، کاج (*Pinus eldarica* Medw.)، داغداغان (*Celtis australis* L.) و ون (*Fraxinus rotundifolia* Mill.) در پارک جنگلی چیتگر در شهرستان تهران بود.

مواد و روش‌ها: در مجموع، از چهار توده در ۱۶۹ نقطه عکس‌برداری انجام شد (در توده‌های افاقیا: ۴۷ نقطه، کاج: ۳۶ نقطه، ون: ۴۷ نقطه و داغداغان: ۳۹ نقطه). برای نمونه‌برداری، اولین نقطه به‌صورت تصادفی در محل انتخاب شد. سپس، عکس‌برداری با فاصله‌های ۱۰ متر از زیر تاج پوشش ادامه یافت. در هر نقطه، دو تصویر نیم‌مکروی به‌طور هم‌زمان با دوربین دیجیتال و گوشی هوشمند ثبت شدند. عکس‌برداری در ارتفاع ۰/۵ متر و بیش از طلوع آفتاب انجام گرفت. شاخص سطح برگ با نرم‌افزار GLA استخراج و با استفاده از نرم‌افزار SPSS، آزمون نرمال بودن و آزمون تی جفتی انجام شد. ۷۰ درصد از داده‌ها برای مدل‌سازی رگرسیون خطی و ۳۰ درصد مابقی برای برازش و اعتبارسنجی مدل در نرم‌افزار Excel به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. آزمون F برای تعیین معنی‌داری کلی مدل و آزمون t نیز برای تعیین معنی‌داری ضریب‌های مدل به کار رفت. همچنین، از ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربع خطای نسبی (RRMSE) برای برآورد خطای مدل رگرسیونی و از اریبی (Bias) برای تعیین کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی مدل استفاده شد.

نتایج: میانگین شاخص سطح برگ در دوربین دیجیتال برای افاقیا ۰/۸ با انحراف معیار (SD) ۰/۲۷±، کاج ۰/۸۹ (SD=±۰/۱۵)، داغداغان ۱/۲۴ (SD=±۰/۱۶) و ون ۰/۷۷ (SD=±۰/۲۷) بود. این مقادیر برای گوشی هوشمند به ترتیب برابر با ۰/۶۶ (SD=±۰/۳۱)، ۰/۸۳ (SD=±۰/۱۹) و ۱/۰۷ (SD=±۰/۱۴) و ۰/۷۵ (SD=±۰/۳) به‌دست آمد. براساس نتایج آزمون تی جفتی، تفاوت میانگین‌ها در گونه‌های افاقیا، کاج و داغداغان معنی‌دار بود (Sig<۰/۰۵)، اما برای ون غیرمعنی‌دار (Sig>۰/۰۵) به‌دست آمد. میانگین اختلاف مقادیر برای همه گونه‌ها، مثبت و بیشترین مقدار آن در داغداغان (۰/۲) و کمترین آن در ون (-۰/۰۲۸) مشاهده شد. در مدل‌های رگرسیونی خطی ساده، همه مدل‌ها براساس آزمون F معنی‌دار بودند. براساس آزمون t نیز در همه مدل‌های رگرسیونی خطی، عرض از مبدأ معنی‌دار نبود. ضریب تعیین مدل‌ها در افاقیا R²=۰/۵۳، کاج R²=۰/۵۹، داغداغان R²=۰/۷۳ و ون R²=۰/۷۱ به‌دست آمد.

اعتبارسنجی با ۳۰ درصد داده‌ها نشان داد که مقادیر RMSE و RRMSE در کاج به ترتیب ۰/۰۷ و ۹، داغداغان ۰/۱ و ۱۰، ون ۰/۱۸ و ۲۵ و در اقاچیا ۰/۱۸ و ۳۳ درصد هستند. گویی هوشمند بدون مدل‌سازی در همه گونه‌ها، کم‌برآوردی داشت (به‌عنوان مثال در داغداغان ۱۳/۷ درصد کمتر از مقدار واقعی).

نتیجه‌گیری کلی: در پژوهش پیش‌رو، داده‌های دوربین دیجیتال فقط به‌عنوان مرجع برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. پس از توسعه مدل، گویی هوشمند قادر است به‌طور مستقل و بدون نیاز به داده‌های دوربین، شاخص سطح برگ را برآورد کند. با این حال، این مدل فقط در شرایط و گونه‌های مورد مطالعه اعتبارسنجی شده است و به‌کارگیری آن در مناطق یا گونه‌های دیگر، نیازمند صحت‌سنجی و کالیبراسیون مجدد خواهد بود. همچنین، در این پژوهش از گویی هوشمندی با کیفیت معمولی و یک لنز کلیسی چشم‌ماهی برای ایجاد میدان دید ۱۸۰ درجه استفاده شد. اگرچه دقت و کیفیت آن‌ها نسبت به دوربین دیجیتال کمتر است، اما در مناطق دورافتاده یا برای پایش‌های گسترده میدانی، به‌ویژه در گونه‌هایی با ساختار منظم تاج‌پوشش، آن‌ها می‌توانند جایگزینی عملی و مؤثر باشند.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی مدل، رگرسیون خطی، عکس‌برداری نیم‌کروی، لنز چشم‌ماهی.

مقدمه

شاخص سطح برگ (Leaf Area Index: LAI)، مؤلفه کلیدی مرتبط با مطالعه ساختار پوشش گیاهی در علوم کشاورزی، جنگل‌داری و بوم‌شناسی است (Yan et al., 2019). این شاخص در تجزیه و تحلیل ساختار پوشش گیاهی در بوم‌سازگان‌ها نیز کاربرد دارد (Khosravi et al., 2012; Bréda, 2008). علاوه بر این، LAI به‌طور گسترده‌ای برای پایش رشد و تغییرات پوشش گیاهی، زیست‌توده، رشد محصول و مدل‌های رویش جنگل و نیز در پژوهش‌های جهانی تغییر اقلیم استفاده می‌شود (Wang et al., 2018; Fang et al., 2019).

شاخص سطح برگ، به‌صورت سطح کل یک طرف برگ‌های گیاهان در واحد سطح زمین تعریف می‌شود (Tian et al., 2025). این شاخص، برای نخستین بار توسط واتسون در سال ۱۹۴۷ معرفی شد (Jonckheere et al., 2004). همچنین، این تعریف، مناسب توده‌های یهن‌برگ است و در توده‌های سوزنی‌برگ به‌صورت نصف سطح سوزن‌ها در واحد سطح زمین تعریف می‌شود (Chen, 1996). به دلیل آنکه این شاخص نسبت سطح برگ به سطح زمین است، بدون واحد است. دامنه LAI به‌طور معمول بین صفر برای خاک بدون پوشش گیاهی تا پنج برای باغ‌های متراکم متغیر است، اما ممکن است برای جنگل‌های بسیار متراکم تا ۱۰ نیز برسد

(Hussain et al., 2025). اندازه این شاخص به ترکیب گونه، مراحل نمو، شرایط رویشگاه، فصل و شیوه‌های مدیریت بستگی دارد. همچنین، LAI شاخصی پویا است که حتی به صورت روزانه تغییر می‌کند (Welles, 1990).

برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ از انواع روش‌های مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌شود. اگرچه روش‌های مستقیم، دقت زیادی دارند، اما مخرب، زمان‌بر و نیز نیازمند کار زیاد هستند (Raj et al., 2021; Rahimikhoob et al., 2023) و در بوم‌سازگان‌های جنگلی به سختی قابل‌استفاده هستند (Confalonieri et al., 2013)، بنابراین روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم با استفاده از حسگرهای نوری به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Wang et al., 2018). علاوه بر این، پیشرفت‌های فناوری، مانند ظهور دوربین‌های دیجیتال، قابلیت‌ها و محبوبیت این تکنیک را بسیار بهبود داده است (Fournier & Hall, 2017). این تکنیک با کمک لنزهای چشم‌ماهی (Fisheye) و میدان دید ۱۸۰ درجه، یک تصویر نیم‌کره دایره‌ای‌شکل بر روی حسگر دوربین ایجاد می‌کند (Arietta, 2022). عکس‌برداری نیم‌کروی از تاج‌پوشش، یک روش پرکاربرد برای تخمین شاخص سطح برگ و برخی دیگر از ویژگی‌های تاج‌پوشش جنگل است که از دهه ۱۹۶۰ به صورت گسترده در جنگل استفاده شده است (Chianucci, 2020). با اینکه این روش امروزه به‌عنوان پراستفاده‌ترین روش میدانی

بزرگ‌تر از ۰/۶۵ و ریشه میانگین مربع خطای کوچکتر از ۰/۳ بود (Wang et al., 2018). Arietta (۲۰۲۲) نیز با استفاده از تصاویر پانورامای کروی گوشی‌ها برای برآورد ساختار تاج پوشش و رژیم نوری جنگل، نتایج قابل مقایسه‌ای با دوربین‌های دیجیتال گزارش کرد. کاربرد چگالی‌سنج کروی و تصاویر نیم‌کروی حاصل از گوشی هوشمند نشان داد که تصاویر گوشی هوشمند، در مقایسه با چگالی‌سنج در تاج پوشش کمتر از ۱۰ درصد، دچار بیش‌برآوردی و در شرایط بیشتر از ۱۰ درصد، دچار کم‌برآوردی می‌شود (Beeles et al., 2022). Díaz (۲۰۲۳) نشان داد که عکاسی نیم‌کروی مبتنی بر گوشی‌های هوشمند، در صورت استفاده از پروتکل مناسب نوردهی و پردازش تصویر می‌تواند شاخص‌های تاج پوشش مانند باز بودن تاج و شاخص سطح گیاهی را با دقت قابل قبول (ریشه میانگین مربع خطا به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۴) برآورد کند و به‌عنوان روشی مقرون‌به‌صرفه در پایش جنگل‌ها به‌کار رود.

با وجود پژوهش‌های انجام شده در سطح جهانی، استفاده از گوشی‌های هوشمند هنوز به‌طور کامل توسعه نیافته و اعتبار آن در شرایط مختلف به‌طور کامل بررسی نشده است، بنابراین انجام پژوهش‌های تکمیلی و به‌روز برای تأیید دقت و قابلیت اعتماد این روش در برآورد شاخص سطح برگ، ضروری به‌نظر می‌رسد. در همین راستا، پژوهش پیش‌رو با هدف بررسی دقت گوشی هوشمند در توده‌های دست‌کاشت سوزنی‌برگ و یهن‌برگ و با استفاده از ابزارها و روش‌هایی قابل دسترس و مقرون‌به‌صرفه برای کاربران داخلی می‌تواند گامی مؤثر در توسعه کاربرد این فناوری در پایش پوشش گیاهی باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

برای این پژوهش، پارک جنگلی چیتگر به دلیل وجود گونه‌های متنوع یهن‌برگ و سوزنی‌برگ و شرایط دسترسی آسان انتخاب شد. این پارک، با وسعت ۹۲۴/۵ هکتار در

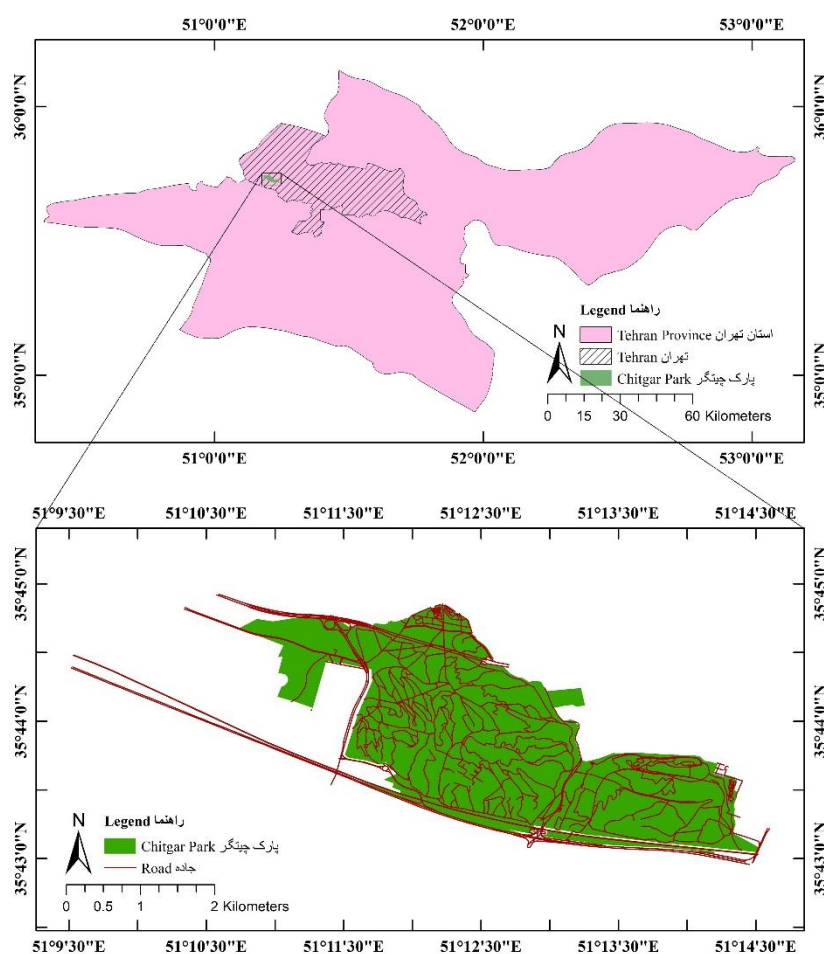
برای بررسی ساختار تاج پوشش و رژیم نوری جنگل مطرح است (Bianchi et al., 2017). محدودیت‌هایی مانند حساسیت نسبت به شرایط آب و هوایی را دارد. به نحوی که توصیه می‌شود عکس‌برداری در شرایط آسمان بدون ابر در غروب یا طلوع آفتاب با نور کافی و یا در شرایط ابری یکنواخت در طول روز انجام شود (Fournier & Hall, 2017).

اگرچه استفاده از روش عکس‌برداری نیم‌کروی ساده است، اما به تجهیزات گران‌قیمتی نیاز دارد. هزینه اولیه این تجهیزات زیاد و حمل‌ونقل آن‌ها نیز دشوار است. همچنین، در صورت آسیب دیدن دوربین و یا تجهیزات دیگر، تعمیر و نگهداری آن‌ها بسیار پرهزینه خواهد بود. امروزه با پیشرفت سریع فناوری گوشی‌های هوشمند و افزوده شدن قابلیت‌هایی مانند دوربین‌هایی باکیفیت و وضوح زیاد، این گوشی‌ها می‌توانند جایگزین مقرون‌به‌صرفه و خوبی برای تجهیزات گران‌قیمت دوربین‌های عکس‌برداری نیم‌کروی باشند. همچنین، گوشی‌های هوشمند به دلیل تلفیق هم‌زمان چند قابلیت در یک دستگاه، حمل آسان به دلیل وزن سبک نسبت به دوربین‌های دیجیتال و نیز امکان استفاده از نرم‌افزارهای تحلیلی، ابزارهایی کاربردی و در دسترس برای جمع‌آوری داده‌های میدانی محسوب می‌شوند. علاوه بر این، در دسترس بودن همگانی گوشی‌های هوشمند و آشنایی کاربران با نحوه استفاده از آن‌ها، هزینه آموزش و تجهیز تیم‌های پایش را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد.

در دهه اخیر، پژوهش‌های متعددی در خصوص قابلیت گوشی‌های هوشمند برای برآورد شاخص سطح برگ انجام شده است. در این پژوهش‌ها، ابزارها و روش‌های متنوعی با روش‌های سنتی مقایسه شده‌اند. به عنوان مثال، استفاده از لنز چشم‌ماهی گوشی‌های هوشمند و تولید تصاویر نیم‌کروی نشان داد که این تصاویر با ارائه نتایجی مشابه، جایگزینی مقرون‌به‌صرفه، قابل قبول و سریع برای دوربین‌های دیجیتال هستند (Bianchi et al., 2017). مقایسه شاخص سطح برگ در *Pinus yunnanensis* Franch. بین برآوردهای حاصل از LAI-2200 با استفاده از لنز چشم‌ماهی نصب‌شده روی گوشی هوشمند و تصاویر ماهواره‌ای GF-1 بیانگر ضریب تعیین

ترکیب درختان پارک را گونه‌های سوزنی‌برگ و ۴۷ درصد را گونه‌های پهن‌برگ تشکیل داده‌اند (Moosavi et al., 2016). کاج تهران (*Pinus eldarica* Medw.)، افاقیا (*Robinia pseudoacacia* L.) و ون (*Fraxinus rotundifolia* Mill.) با بیشترین سطح پوشش نسبت به کل سطح پارک، گونه‌های اصلی آن محسوب می‌شوند (Moosavi et al., 2016).

غرب شهر تهران (مختصات جغرافیایی $29/6^{\circ}$ $12' 51^{\circ}$ طول شرقی و $47/8^{\circ}$ $43' 35^{\circ}$ عرض شمالی) واقع شده است (شکل ۱). پارک چیتگر از شمال به زمین‌های دانشگاه امام حسین و زمین‌های زراعی کن، از غرب به پیکان‌شهر و مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، از شرق به جاده کوهک و از جنوب به اتوبان تهران-کرج محدود می‌شود. دامنه ارتفاعی این پارک بین ۱۲۲۵ تا ۱۳۱۳ متر و متوسط ارتفاع آن، ۱۲۶۹ متر از سطح دریا است. حدود ۵۳ درصد از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (پارک جنگلی چیتگر) در استان تهران

Figure 1. Geographical location of the study area (Chitgar Forest Park) in Tehran province, Iran

روش پژوهش

ابزارهای مورد استفاده

در این پژوهش، برای تولید داده‌های مبنا از دوربین دیجیتال *Canon EOS 6D* مجهز به لنز چشم‌ماهی ۱۸۰ درجه با فاصله کانونی ۸ تا ۱۵ میلی‌متر استفاده شد. این دوربین بر روی یک سه‌پایه ثابت قرار داشت. همچنین، گوشی هوشمند *Samsung Galaxy J7 Pro* به همراه لنز کلیپسی چشم‌ماهی (*IBOOLLO 8-in-1*) با ضریب بزرگنمایی ۰/۲۸

به‌عنوان ابزار آزمایشی به‌کار گرفته شد (شکل ۲). با توجه به فاصله کانونی معادل فول‌فریم این گوشی که حدود ۲۷ میلی‌متر است، فاصله کانونی مؤثر لنز چشم‌ماهی برابر با ۷/۶ میلی‌متر محاسبه شد. لنزهای چشم‌ماهی به دلیل داشتن زاویه دید بسیار عریض، امکان تصویربرداری از بخش بزرگی از تاج درختان را فراهم می‌کنند. این نوع لنز با ایجاد اعوجاج شعاعی در تصویر، نمایی نیمکره‌ای از تاج پوشش ایجاد می‌کند که برای برآورد شاخص سطح برگ بسیار مناسب است.



شکل ۲- الف) دوربین دیجیتال *Canon EOS 6D*، ب) لنز چشم‌ماهی *Canon Fisheye EF 8_15 mm*، ج) گوشی *Samsung*

و د) لنز کلیپسی چشم‌ماهی *8-in-1 IBOOLO Galaxy J7 pro*

Figure 2. a) *Canon EOS 6D* digital camera, b) *Canon Fisheye EF 8-15 mm* fisheye lens, c) *Samsung Galaxy J7 pro* phone, and d) *IBOOLLO 8-in-1* fisheye clip-on lens

روش نمونه‌برداری

پس از جنگل‌گردشی و بازدید میدانی، در شهریور ۱۴۰۱ (سپتامبر ۲۰۲۲)، در هریک از توده‌های خالص کاج، داغداغان، اقاچیا و ون، اولین نقطه به‌صورت تصادفی در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. سپس، عکس‌برداری با فاصله‌های ۱۰ متر از زیر تاج پوشش ادامه یافت (Weiss et al., 2004) (جدول ۱). ارتفاع دوربین دیجیتال به علت ارتفاع کم

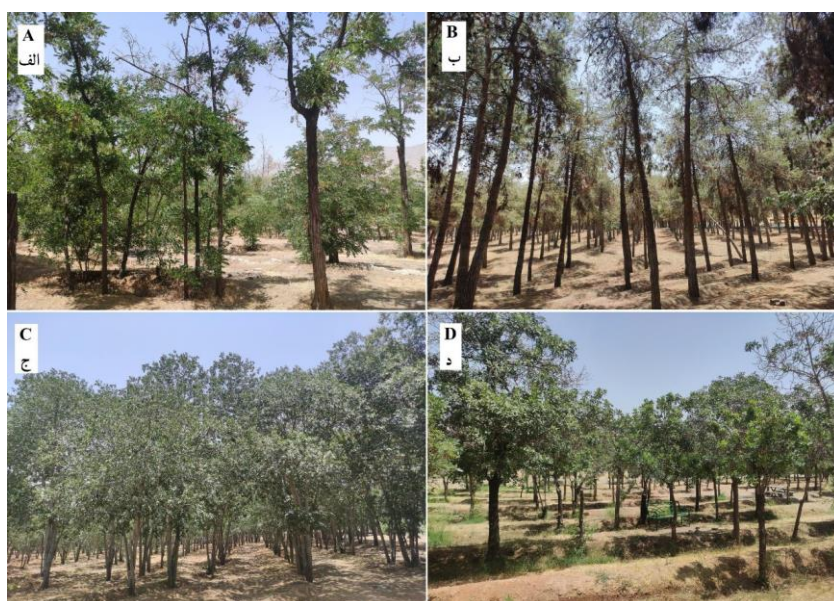
تاج پوشش، در پایین‌ترین سطح (ارتفاع ۰/۵ متری) تنظیم شد. برای اطمینان از یکنواختی شرایط نوری و پوشش تاج، ثبت تصاویر با دوربین دیجیتال و گوشی هوشمند به‌صورت متوالی و با فاصله زمانی کوتاه انجام شد. در هر نقطه نمونه‌برداری، ابتدا با دوربین دیجیتال و بلافاصله با گوشی هوشمند در همان موقعیت و ارتفاع دوربین دیجیتال، تصویر ثبت شد. همچنین، به علت نبود شرایط ابری، عکس‌برداری

در ساعت‌های اولیه صبح و پیش از طلوع آفتاب صورت گرفت تا از تغییرات ناگهانی نور جلوگیری شود.

جدول ۱- تاریخ نمونه‌برداری و تعداد نقاط نمونه‌برداری شده تصادفی از توده‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در پارک جنگلی چیتگر

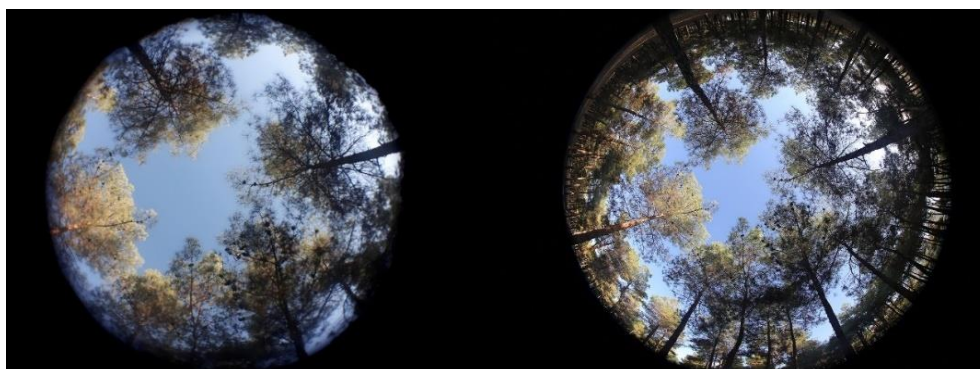
Table 1. Sampling dates and number of randomly sampled points from coniferous and broadleaf stands in Chitgar Forest Park

Stand	Sampling date	Number of sampling points
<i>Robinia pseudoacacia</i>	September 12 2022	47
<i>Pinus eldarica</i>	September 06 2022	36
<i>Celtis australis</i>	September 06 2022	39
<i>Fraxinus rotundifolia</i>	September 16 2022	47



شکل ۳- نمایی از توده‌های مورد مطالعه در پارک جنگلی چیتگر، الف) اقاویا، ب) کاج، ج) داغداغان و د) ون

Figure 3. Representation of the studied stands in Chitgar Forest Park, A) *Robinia pseudoacacia*, B) *Pinus eldarica*, C) *Celtis australis*, and D) *Fraxinus rotundifolia*



شکل ۴- نمونه‌ای از تصویر گرفته‌شده از توده کاج در یک نقطه ثابت. راست: دوربین دیجیتال، چپ: گوشی هوشمند

Figure 4. An example of an image taken from a *Pinus eldarica* stand at a fixed point. Right: digital camera; Left: smartphone

استخراج شاخص سطح برگ و تجزیه و تحلیل آماری

برای استخراج شاخص سطح برگ از نرم افزار GLA (Gap Light Analyzer) استفاده شد (Tering *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2025). این نرم افزار رایگان، رابط کاربری ساده دارد و به طور خاص برای تحلیل تصاویر تاج پوشش و برآورد شاخص های نوری و ساختاری در بوم سازگان های جنگلی طراحی شده است. همچنین، امکاناتی مانند تنظیم تباین (Contrast)، فام (Hue) و پردازش هیستوگرام را فراهم می کند تا جداسازی دقیق بین نواحی آسمان و تاج پوشش امکان پذیر شود. با اعمال آستانه گذاری (Thresholding) بر روی تصویر، پیکسل های نمایانگر آسمان (به صورت سفید) و تاج پوشش (به صورت سیاه) تفکیک می شوند. این تفکیک پایه محاسبه نسبت سطح برگ بر اساس میزان پوشش و خلأ موجود در تصویر است. به منظور آستانه بندی تصاویر برای تفکیک پیکسل های تاج پوشش و آسمان از یکدیگر، تنظیمات مربوطه به صورت خودکار و در موارد لزوم به صورت دستی اعمال شد. پس از استخراج داده های شاخص سطح برگ، با استفاده از نرم افزار SPSS v21، ابتدا آزمون نرمال بودن داده ها انجام شد. از آزمون تی جفتی نیز برای مقایسه اولیه داده های دوربین و گوشی استفاده شد. همچنین، با استفاده از نرم افزار Excel، ۷۰ درصد از داده ها برای مدل سازی رگرسیون خطی به صورت تصادفی انتخاب شدند. سپس، اعتبارسنجی مدل با ۳۰ درصد باقی داده ها انجام گرفت.

خطاسنجی مدل

از ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) برای برآورد خطای مدل رگرسیونی استفاده شد (رابطه ۱). RMSE، مقداری است که از صفر تا مثبت بی نهایت تغییر می کند. هر چه این مؤلفه به صفر نزدیک تر باشد، نشان دهنده دقت بیشتر مدل و خطای کمتر است.

$$\text{RMSE} = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، N بیانگر تعداد داده های مشاهده ای، P_i مقادیر پیش بینی شده توسط مدل (مقدار برآورد شده) و O_i بیانگر مقدار مشاهده شده (مقدار اندازه گیری شده) هستند. از ریشه میانگین مربع خطای نسبی (RRMSE) برای بیان خطای مدل به صورت درصدی نسبت به مقدار واقعی استفاده شد (رابطه ۲). این شاخص با نرمال سازی ریشه میانگین مربع خطا نسبت به میانگین مقادیر مشاهده شده محاسبه می شود و امکان مقایسه عملکرد مدل در مقیاس نسبی را فراهم می کند. هرچه RRMSE به صفر نزدیک تر باشد، بیانگر دقت بیشتر مدل و برآزش بهتر آن است.

$$\text{RRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{O}} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

از شاخص اریبی (Bias) نیز برای بررسی جهت خطای مدل استفاده شد (رابطه ۳). این شاخص، میانگین اختلاف بین مقادیر پیش بینی شده و مقادیر واقعی را نشان می دهد. مقدار مثبت آن بیانگر بیش برآوردی مدل و مقدار منفی آن نشان دهنده کم برآوردی است. هرچه مقدار اریبی به صفر نزدیک تر باشد، دقت مدل بیشتر خواهد بود.

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad \text{رابطه (۳)}$$

نتایج

مقادیر شاخص سطح برگ

در مجموع، ۳۳۸ عکس از توده های سوزنی برگ کاج (۷۲ عکس) و پهن برگ افاقیا (۹۴ عکس)، داغداغان (۷۸ عکس) و ون (۹۴ عکس) گرفته شد (جدول ۲). میانگین شاخص سطح برگ برای دوربین دیجیتال و گوشی هوشمند به ترتیب برای افاقیا در حدود ۰/۸ و ۰/۶۶، برای کاج ۰/۸۹ و ۰/۸۳، برای داغداغان ۱/۲۴ و ۱/۰۷ و برای ون در حدود ۰/۷۷ و ۰/۷۵ اندازه گیری شد (جدول ۲). بیشینه و کمینه مطلق

شاخص سطح برگ به ترتیب ۱/۶۱ (در توده داغداغان) و ۰/۱۴ (در توده افاقیا) به دست آمد (جدول ۲).

جدول ۲- آماره‌های توصیفی شاخص سطح برگ برای توده‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در پارک جنگلی چیتگر با دوربین دیجیتال و گوشی هوشمند

Table 2. Descriptive statistics of leaf area index for coniferous and broadleaf stands in Chitgar Forest Park with digital camera and smartphone

Tools	Species	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation	coefficient of variation (%)
Digital camera	<i>Robinia pseudoacacia</i>	0.39	1.51	0.8	0.27	34.42
	<i>Pinus eldarica</i>	0.63	1.29	0.89	0.15	13.04
	<i>Celtis australis</i>	0.9	1.61	1.24	0.16	16.63
	<i>Fraxinus rotundifolia</i>	0.32	1.36	0.77	0.27	34.12
Smartphone	<i>Robinia pseudoacacia</i>	0.14	1.33	0.66	0.31	39.42
	<i>Pinus eldarica</i>	0.42	1.22	0.83	0.19	12.9
	<i>Celtis australis</i>	0.77	1.37	1.07	0.14	22.66
	<i>Fraxinus rotundifolia</i>	0.22	1.46	0.75	0.3	46.62

شاخص سطح برگ برآورد شده با گوشی هوشمند و دوربین دیجیتال مشاهده نشد ($\text{sig} > 0.05$). در توده‌های دیگر، این اختلاف معنی‌دار بود ($\text{sig} < 0.05$) (جدول ۳).

آزمون تی جفتی

در سطح اطمینان ۹۵ درصد، نتایج آزمون تی جفتی نشان داد که فقط در توده ون، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر

جدول ۳- نتایج آزمون تی جفتی برای مقایسه بین شاخص سطح برگ برآورد شده با دوربین دیجیتال و گوشی هوشمند در توده‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ در پارک جنگلی چیتگر در سطح اطمینان ۹۵ درصد

Table 3. Results of the paired t-test comparing the estimated leaf area index obtained by the digital camera and the smartphone in broadleaf and coniferous stands of Chitgar Forest Park at a 95% confidence level

Species	Paired differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Standard deviation	Standard error mean	95% Confidence interval of the difference				
				Lower	Upper			
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0.117	0.219	0.032	0.053	0.182	3.66	46	0.001*
<i>Pinus eldarica</i>	0.061	0.117	0.019	0.021	0.101	3.12	35	0.004*
<i>Celtis australis</i>	0.169	0.094	0.015	0.139	0.2	11.2	38	0.000*
<i>Fraxinus rotundifolia</i>	0.022	0.173	0.025	-0.028	0.073	0.89	46	0.381 ^{ns}

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

در گونه‌هایی که اختلاف معنی‌دار بود، فاصله اطمینان بزرگ‌تر (مانند ۰/۱۳۹ تا ۰/۲ برای داغداغان)، نشان‌دهنده تغییرپذیری بیشتر داده‌ها و تفاوت زیاد بین دو روش است. در مقابل، فاصله اطمینان کوچک‌تر در گونه‌هایی که اختلاف معنی‌دار نیست (مانند ون)، ثبات بیشتر داده‌های گوشی

میانگین اختلاف مقادیر برای همه گونه‌ها مثبت بود. به عبارت دیگر، گوشی هوشمند به‌طور کلی مقادیر کمتری در مقایسه با دوربین دیجیتال ثبت کرد و نسبت به آن دارای کم‌برآوردی بود (جدول ۳). بیشترین میانگین اختلاف در توده داغداغان و کمترین مقدار در توده ون مشاهده شد. همچنین،

هوشمند و تطابق بهتر آن با دوربین دیجیتال را نشان می‌دهد.

مدل‌های رگرسیون خطی ساده و اعتبارسنجی

بر اساس نتایج مدل‌های رگرسیونی خطی بین مقادیر شاخص سطح برگ برآورد شده با دوربین دیجیتال و گوشی هوشمند با استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها بیشینه و کمینه ضریب تعیین به ترتیب در توده‌های داغداغان ($R^2=0.73$) و افاقیا ($R^2=0.53$) مشاهده شد. میانگین این ضریب برابر با ۰/۶۳ با انحراف معیار ۰/۱ به دست آمد (جدول ۴؛ شکل ۵).

برای ارزیابی صحت مدل رگرسیون خطی، ابتدا آزمون نرمال بودن باقی‌مانده‌ها برای همه گونه‌ها انجام شد. نتایج این آزمون نشان داد که باقی‌مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند که شرط لازم برای اعتبار مدل رگرسیونی را فراهم می‌کند. در ادامه، آزمون همگنی واریانس برای هر یک از گونه‌ها بررسی شد. نتایج این آزمون نشان داد که فرض همگنی واریانس برای داغداغان و ون تأیید می‌شود. به این معنی که واریانس باقی‌مانده‌ها در طول دامنه مقادیر متغیر مستقل، یکنواخت است، اما برای افاقیا و کاج، فرض همگنی واریانس نقض شد و واریانس ناهمگون مشاهده شد. برای بررسی امکان بهبود مدل، داده‌های مربوط به این دو گونه تحت تبدیل

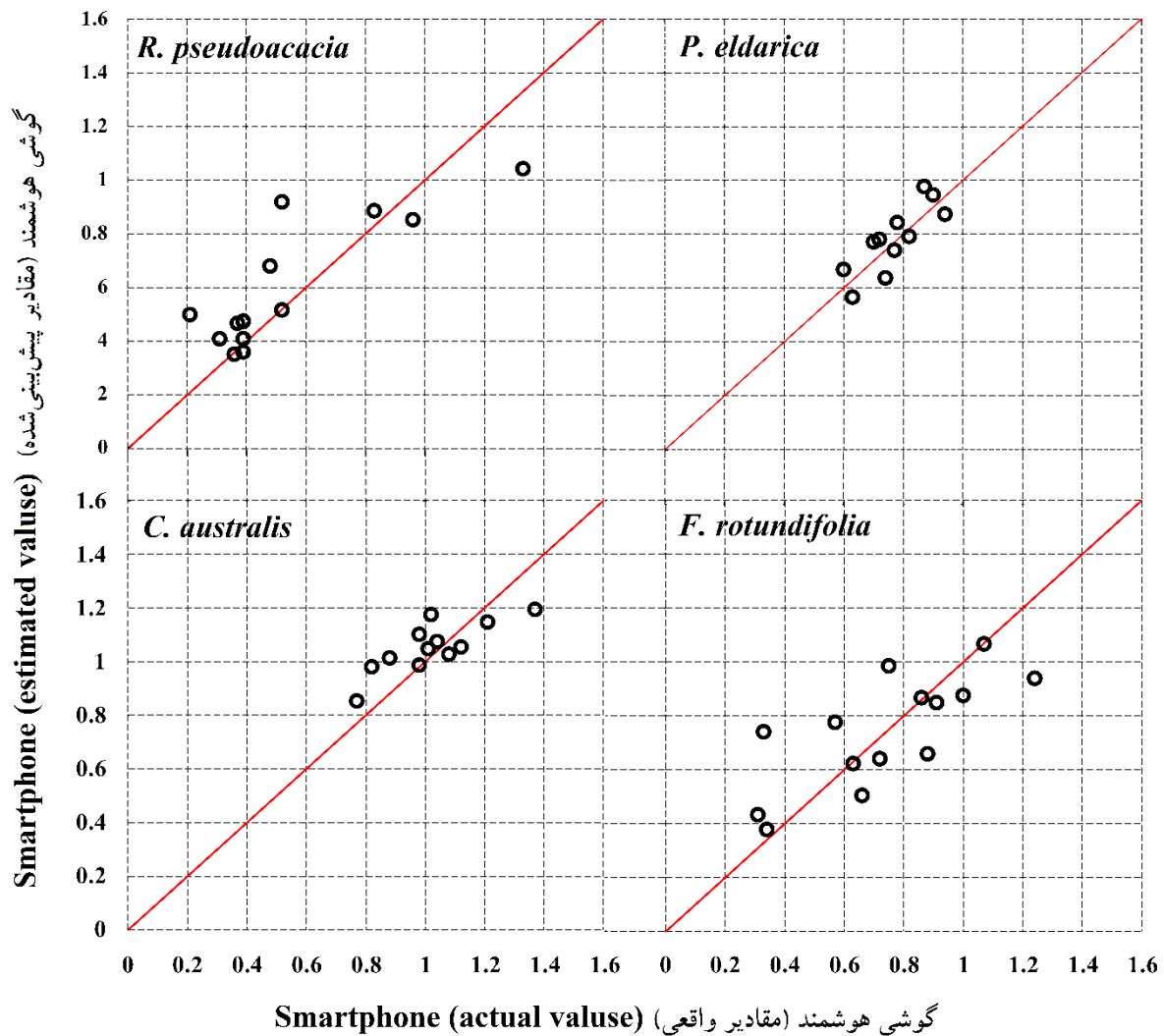
جذر قرار گرفتند. با وجود رفع ناهمگنی واریانس پس از تبدیل، نتایج مدل‌های اصلاح شده (از نظر ضریب تعیین، ریشه میانگین مربع خطا و اریبی) نسبت به مدل اولیه ضعیف‌تر بودند، بنابراین با توجه به برآزش بهتر مدل اولیه و عملکرد دقیق‌تر آن در پیش‌بینی، مدل بدون تبدیل برای گونه‌های افاقیا و کاج به عنوان مدل نهایی انتخاب شد.

در همه مدل‌های رگرسیونی، آزمون F برای بررسی معنی‌داری کلی مدل نشان داد که رگرسیون بین مقادیر حاصل از دوربین دیجیتال و گوشی هوشمند در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است ($P\text{-value} < 0.01$). همچنین، نتایج آزمون t نشان داد که عرض از مبدأ مدل‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌داری نبود ($P\text{-value} > 0.05$)، بنابراین در مرحله اعتبارسنجی مدل از مدل‌های بدون عرض از مبدأ استفاده شد. اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیون با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های باقی‌مانده نشان داد که بیشترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا مربوط به توده‌های افاقیا و ون (۰/۱۸) است. کمترین مقدار آن نیز در توده‌ی کاج (۰/۰۷) مشاهده شد. کمینه مقدار ریشه میانگین مربع خطای نسبی به توده کاج (۹ درصد) تعلق داشت، در حالی که بیشینه مقدار آن در توده‌ی افاقیا (۳۳ درصد) مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۴- رگرسیون خطی بین مقادیر شاخص سطح برگ برآورد شده با دوربین دیجیتال (محور X) و گوشی هوشمند (محور Y) (۷۰ درصد داده‌ها) و اعتبارسنجی مدل (۳۰ درصد داده‌ها)

Table 4. Linear regression between the estimated leaf area index values obtained by the digital camera (x-axis) and the smartphone (y-axis) (70% of the data) and model validation (30% of the data)

	Species	Regression model equation	R-squared (R^2)	RMSE	RRMSE (%)	Bias
Linear regression	<i>Robinia pseudoacacia</i>	$y=0.53x+0.37$	0.53	0.25	29.6	-0.13
	<i>Pinus eldarica</i>	$y=1.03x-0.08$	0.59	0.14	15.8	-0.06
	<i>Celtis australis</i>	$y=0.67x+0.25$	0.73	0.17	21.3	-0.02
	<i>Fraxinus rotundifolia</i>	$y=0.9x+0.05$	0.71	0.19	15.1	-0.17
Validation	<i>Robinia pseudoacacia</i>	$y=0.64x+0.26$	0.7	0.18	33	0.062
	<i>Pinus eldarica</i>	$y=0.97x+0.03$	0.69	0.07	9	0.011
	<i>Celtis australis</i>	$y=0.46x-0.58$	0.64	0.10	10	0.031
	<i>Fraxinus rotundifolia</i>	$y=0.54x-0.34$	0.55	0.18	25	0.005



شکل ۵- رابطه بین مقادیر واقعی (محور افقی) و برآورد شده (محور عمودی) برای شاخص سطح برگ با گوشی هوشمند در توده‌های اقاچیا، کاج، داغداغان و ون (خط قرمز، خط ۱:۱ است).

Figure 5. Relationship between actual (horizontal axis) and estimated (vertical axis) values of leaf area index with smartphone in stands of *Robinia pseudoacacia*, *Pinus eldarica*, *Celtis australis*, and *Fraxinus rotundifolia* (red line is the 1:1 line)

جایگزینی کم‌هزینه و کارآمد برای تجهیزات سنتی مانند دوربین‌های دیجیتال چشم‌ماهی مطرح شده است. براساس نتایج آزمون تی جفتی، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر شاخص سطح برگ برآورد شده با استفاده از دو روش برای همه گونه‌های مورد بررسی به جز ون وجود داشت. این موضوع می‌تواند به ساختار منظم تاج، اندازه بزرگ‌تر برگ‌ها و توزیع یکنواخت برگ‌ها در درختان ون مرتبط باشد. این

بحث

نظارت دقیق و مستمر بر شاخص سطح برگ در مقیاس وسیع، اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت منابع طبیعی، ارزیابی تولیدات جنگلی و تحلیل اثرات تغییر اقلیم فراهم می‌کند (Miri et al., 2024). با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری دوربین گوشی‌های هوشمند و نیز سهولت حمل و نقل و دسترسی عمومی به آن‌ها، امکان استفاده از آن‌ها به عنوان

که در گونه‌هایی مانند اقاچیا این مقدار تا ۳۳ درصد افزایش یافت. این موضوع ممکن است به ساختار نامنظم‌تر تاج پوشش، برگ‌های ظریف‌تر و پراکندگی بیشتر در داده‌های مربوط به اقاچیا نسبت داده شود. ساختار پیچیده و ناهمگن تاج اقاچیا می‌تواند دقت تصاویر نیم‌کروی را در استخراج شاخص سطح برگ کاهش دهد و موجب افزایش خطا در مدل‌سازی شود. براساس طبقه‌بندی مرسوم، مقدار ریشه میانگین مربع خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد، به‌عنوان دقت بسیار خوب، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد، خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد، متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد، ضعیف تلقی می‌شود (Hosseini et al., 2023)، بنابراین صحت مدل در برآورد شاخص سطح برگ برای کاج در سطح بسیار خوب، داغداغان در سطح خوب، ون در سطح متوسط و برای اقاچیا ضعیف ارزیابی شد. این تفاوت‌ها می‌توانند ناشی از ویژگی‌های ساختاری تاج پوشش و نحوه پراکنش برگ‌ها در گونه‌های بررسی شده باشند.

مقادیر اریبی نیز در همه گونه‌ها، کم و نزدیک به صفر بود (۰/۰۰۵ تا ۰/۰۶۲). این موضوع نشان‌دهنده عدم وجود انحراف سیستماتیک قابل توجه در مدل است. به عبارت دیگر، مدل به‌طور میانگین، تمایل چندانی به بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی نداشت و عملکرد آن در پیش‌بینی داده‌ها به‌نسبت بدون اریب بود. همچنین، در گونه‌های پهن‌برگ با افزایش سطح برگ، صحت مدل نیز بیشتر شد. مقایسه آماره‌های توصیفی مقادیر شاخص سطح برگ نشان داد که گوشی هوشمند در اقاچیا، ون و داغداغان به‌ترتیب ۲۱، سه و ۱۶ درصد و در کاج، هفت درصد کمتر از دوربین دیجیتال برآورد کرده است. همچنین، انحراف معیار و درصد ضریب تغییرات داده‌های برآوردشده با گوشی هوشمند به‌طور معمول بیشتر بود که نشان‌دهنده تغییرپذیری بیشتر این روش در مقایسه با دوربین دیجیتال است (جدول ۲). در پژوهش پیش‌رو، همانند Bianchi و همکاران (۲۰۱۷)، عکس‌برداری با گوشی هوشمند به شکل ساده و بدون استفاده از ابزارهایی مانند سه‌پایه انجام شد، اما برخلاف آن، عکس‌برداری با گوشی هوشمند بدون تکرار بود، بنابراین استفاده از میانگین

ویژگی‌ها باعث می‌شود که تصویر نیم‌کروی باکیفیت‌تری ثبت شود و آستانه‌گذاری دقیق‌تری انجام شود. در نتیجه، نتایج گوشی به دوربین نزدیک‌تر خواهد بود، اما در گونه‌هایی مثل داغداغان یا اقاچیا، برگ‌ها کوچک‌تر و تاج متراکم‌تر هستند. در این شرایط، گوشی ممکن است نتواند جزئیات را به‌خوبی ثبت کند. همچنین، وجود سایه‌های بیشتر و کنتراست کمتر باعث می‌شود که الگوریتم پردازش تصویر، عملکرد ضعیف‌تری داشته باشد. این عوامل می‌تواند دقت برآورد با گوشی را کاهش دهد و اختلاف با دوربین را بیشتر کند.

آماره t در همه گونه‌ها، مثبت و معنی‌دار به‌دست آمد (به‌غیر از ون که معنی‌دار نبود). این مسئله بیانگر این است که مقادیر شاخص سطح برگ به‌دست‌آمده از گوشی هوشمند به‌طور معمول کمتر از مقادیر دوربین دیجیتال هستند (کم برآوردی). علت این نتیجه می‌تواند مربوط به دلایلی مانند حسگر کوچک‌تر، لنز ساده‌تر، محدودیت‌های سخت‌افزاری دیگر و دقت کمتر گوشی هوشمند نسبت به دوربین باشد.

گونه‌ها در مرحله رگرسیون خطی ساده، مقادیر ضریب تعیین به‌نسبت زیادی را نشان دادند، اما در مرحله اعتبارسنجی، اگرچه در برخی گونه‌ها از جمله اقاچیا و کاج، مقدار ضریب تعیین افزایش یافت، اما در گونه‌های دیگر مانند داغداغان و ون، کاهش مشاهده شد. این تغییرات می‌تواند ناشی از تفاوت‌های ساختاری داده‌های آموزشی و داده‌های آزمون بین گونه‌های مختلف باشد. در مرحله برازش، پارامترهای مدل براساس داده‌های موجود بهینه می‌شوند، اما در مرحله اعتبارسنجی، مدل بر روی داده‌هایی ارزیابی می‌شود که پیش‌تر در فرایند برازش دخیل نبوده‌اند. همچنین، عواملی مانند پراکندگی بیشتر داده‌های آزمون، تفاوت در شرایط نوری، زاویه عکس‌برداری و نیز ویژگی‌های فیزیولوژیک و ساختاری گونه‌ها می‌توانند سبب کاهش و یا در مواردی، افزایش ضریب تعیین در مرحله اعتبارسنجی شوند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که صحت گوشی هوشمند در برآورد شاخص سطح برگ بسته به گونه درختی متغیر است. به‌طوری‌که در گونه‌هایی مانند کاج و داغداغان، ریشه میانگین مربع خطای نسبی فقط ۹ تا ۱۰ درصد بود، در حالی

می‌شد. همچنین، استفاده از لنز کلیسی به‌عنوان یک ابزار جانبی با قیمتی مناسب، گوشی‌هوشمند را قادر می‌سازد تا عکس‌هایی با میدان دید ۱۸۰ درجه ایجاد کند. با این حال، کیفیت لنز کلیسی مورد استفاده در کیفیت و وضوح عکس‌ها، اثر مستقیمی دارد و می‌تواند بر صحت برآورد اثر بگذارد.

باتوجه به موارد فوق و نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش پیش‌رو، گوشی‌های هوشمند به دلیل هزینه کمتر، سهولت حمل‌ونقل و در دسترس بودن می‌تواند با مقدار خطای قابل‌قبولی در پایش جنگل‌ها و نظارت بر تغییرات بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌ویژه در مناطق دورافتاده و کم‌برخوردار استفاده شوند. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده، تأثیر شرایط نوری، کیفیت تصاویر و تنظیمات پردازش تصویر بر دقت برآورد شاخص سطح برگ بررسی شود تا میزان کارایی این روش در شرایط متنوع به‌طور دقیق‌تری مورد ارزیابی قرار گیرد.

چندبرداشت می‌تواند به عنوان راهکاری برای افزایش پایداری و صحت نتایج حاصل از تصاویر گوشی‌هوشمند پیشنهاد شود.

با وجود آنکه داده‌های حاصل از گوشی‌های هوشمند در برآورد شاخص سطح برگ از دقت کافی برخوردار نیستند، نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که به‌کارگیری آن‌ها در چارچوب مدل‌سازی می‌تواند به برآوردهایی با صحت قابل‌قبول منجر شود که با یافته‌های Wang و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد. اگرچه گوشی‌های هوشمند، جایگزینی سبک و مقرون‌به‌صرفه برای ابزارهای حرفه‌ای محسوب می‌شوند، اما توسعه کاربرد آن‌ها، نیازمند احتیاط و بررسی بیشتر است. از سوی دیگر، نوع گوشی‌هوشمند نیز تأثیر زیادی بر صحت برآورد دارد. در پژوهش پیش‌رو، از گوشی‌هوشمند با کیفیت معمولی استفاده شد. اگر گوشی‌های هوشمند با دوربین‌های با کیفیت بهتر به‌کار گرفته می‌شد، نتایج آن به احتمال زیاد به یافته‌های دوربین دیجیتال نزدیک‌تر

References

- Arietta, A.Z.A., 2022. Estimation of forest canopy structure and understory light using spherical panorama images from smartphone photography. *Forestry*, 95(1): 38-48.
- Beeles, K.L., Tourville, J.C. and Dovciak, M., 2022. Characterizing canopy openness across large forested landscapes using spherical densiometer and smartphone hemispherical photography. *Journal of Forestry*, 120(1): 37-50.
- Bianchi, S., Cahalan, C., Hale, S. and Gibbons, J.M., 2017. Rapid assessment of forest canopy and light regime using smartphone hemispherical photography. *Ecology and Evolution*, 7(24): 10556-10566.
- Bréda, N., 2008. Leaf area index. In: Jørgensen, S.E. and Fath, B.D. (eds.), *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, pp. 2148-2154.
- Chen, J.M., 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80(2-4): 135-163.
- Chianucci, F., 2020. An overview of in situ digital canopy photography in forestry. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(3): 227-242.
- Confalonieri, R., Foi, M., Casa, R., Aquaro, S., Tona, E., Peterle, M., ... and Acutis, M., 2013. Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone: PocketLAI. *Computers and Electronics in Agriculture*, 91(0): 31-40.
- Confalonieri, R., Foi, M., Casa, R., Aquaro, S., Tona, E., Peterle, M., ... and Acutis, M., 2013. Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. *Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96: 67-74.
- Diaz, G.M., 2023. Optimizing forest canopy structure retrieval from smartphone-based hemispherical photography. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(3): 875-884.
- Fang, H., Baret, F., Plummer, S. and Schaepman-Strub, G., 2019. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 57(3): 739-799.
- Fournier, R.A. and Hall, R.J., 2017. Hemispherical photography in forest science: Conclusions, applications, limitations, and implementation perspectives: 287-302. In: Fournier, R.A. and Hall, R.J. (Eds.), *Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications*. Managing

- Forest Ecosystems, Vol. 28. Springer, Dordrecht, 306p.
- Hosseini, S.N., Fattahi, R., Ebrahimi Pak, N.A. and Veysi, Sh., 2023. Estimation and evaluation of reference evapotranspiration using ERA5 dataset. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(2): 353-368 (In Persian with English summary).
 - Hussain, S., Teshome, F.T., Tulu, B.B., Awoke, G.W., Hailegnaw, N.S. and Bayabil, H.K., 2025. Leaf area index (LAI) prediction using machine learning and UAV based vegetation indices. *European Journal of Agronomy*, 168: 127557.
 - Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M. and Baret, F., 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2): 19-35.
 - Khosravi, S., Namiranian, M., Ghazanfari, H. and 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.
 - Miri, N., Fatehi, P., Darvishsefat, A.A., Pir Bavaghar, M. and Homolová, L., 2024. Leaf area index estimation in the Zagros forests of Iran using Sentinel-2 image and Gaussian Process Regression. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 31(4): 323-337 (In Persian with English summary).
 - Moosavi, M., Jalilvand, H. and Asadi, H., 2016. Soil Seed Bank and above-ground vegetation at Chitgar Forest Park of Tehran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(3): 474-484 (In Persian with English summary).
 - Myneni, R.B., Hoffman, S. and Knyazikhin, Y., 2018. Leaf Area Index. *Agronomie*, 20(1): 3-22.
 - Rahimikhoob, H., Delshad, M. and Habibi, R., 2023. Leaf area estimation in lettuce: Comparison of artificial intelligence-based methods with image analysis technique. *Measurement*, 222: 113636.
 - Raj, R., Walker, J.P., Vinod, V., Pingale, R., Naik, B. and Jagarlapudi, A., 2021. Leaf area index estimation using top-of-canopy airborne RGB images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96: 102282.
 - Tering, R.R.G., Branzuela, N.E., Batiancela, M.A. and Tutor, R.P., 2025. Influence of elevation on *Falcataria moluccana* [Miq.] Barneby & J.W. Grimes gall rust incidence and severity in Agusan del Norte, Philippines. *Jurnal Sylva Lestari*, 13(1): 90-101.
 - Tian, X., Jia, X., Da, Y., Liu, J. and Ge, W., 2025. Evaluating the sensitivity of vegetation indices to leaf area index variability at individual tree level using multispectral drone acquisitions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 364: 110441.
 - Wang, J., Xiong, Q., Lin, Q. and Huang, H., 2018. Feasibility of using mobile phone to estimate forest Leaf Area Index: A case study in Yunnan Pine. *Remote Sensing Letters*, 9(2): 180-188.
 - Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I. and Coppin, P., 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1): 37-53.
 - Welles, J.M., 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews*, 5(1): 31-43.
 - Yan, G., Hu, R., Luo, J., Weiss, M., Jiang, H., Mu, X., ... and Zhang, Z.Z., 2019. Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265: 390-411.
 - Yang, J., Fang, J., Lu, D., Li, C., Shuai, X., Zheng, F. and Chen, H., 2025. Age-related changes in stand structure, spatial patterns, and soil physicochemical properties in *Michelia macclurei* plantations of South China. *Life*, 15(6): 917.