

Research Article

Evaluating the efficiency of two close-range photogrammetry and smartphone LiDAR approaches in estimating the characteristics of diameter at breast height and stem height of trees (Case study: Oak forests of Lorestan province, Iran)

Elham Karimzadeh Jafari ¹, Javad Soosani ^{2*}, Masood Varshosaz ³, Hamed Naghavi ⁴ and Ali Hosseini Naveh Ahmadabadian ³

1- Ph.D. Student of Forestry, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2*- Corresponding author, Associate Prof., Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: soosani.j@lu.ac.ir

3- Associate Prof., Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

4- Associate Prof., Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Received: 10.08.2024

Revised: 12.12.2024

Accepted: 14.12.2024

Abstract

Background and objectives: Over the last two decades, the use of 3D remote sensing technologies such as mobile phone LiDAR and photogrammetric methods to extract point cloud information in forestry has grown significantly. Mobile phone LiDAR, due to its laser scanning capability, allows accurate 3D measurements of objects in a short time for single trees. This study measured crown base height and diameter at breast height under similar atmospheric and lighting conditions using close-range photogrammetry and mobile phone LiDAR approaches. The measurement process time from data collection to dense point cloud generation was also considered. The aim was to evaluate and compare the performance of these two methods in terms of accuracy for breast diameter and stem height estimation and acquisition time for 3D tree stem modeling.

Methodology: Sixteen individual oak trees were selected from four central Zagros sites in western Iran. The close-range photogrammetry method involved capturing images with a 360-degree rotation around the tree under manual focus and adequate lighting. For mobile LiDAR, the stem was scanned by walking around the tree. After image acquisition, processing steps included interior orientation, camera location determination, and input of control and check lengths previously marked on the stems, to produce 3D visualizations and dense point clouds. The iPhone LiDAR data were processed using Scaniverse software. Control and check lengths were measured directly with calipers before data collection. In Metashape, distances between check and control points were optimized by marking. Statistical parameters including RMSE, RMSE%, MAE, and MAE% were calculated by comparing intervals from photogrammetry and LiDAR point clouds to direct caliper measurements.

Results: The photogrammetry workflow and processing steps averaged across the 16 trees are tabulated. Obtaining a dense point cloud via photogrammetry requires completing ten processing steps. Processing time depends on the system used. In terms of timing, close-range photogrammetry requires ten steps after data acquisition to produce dense point clouds, whereas mobile phone LiDAR only involves two stages: scanning and direct processing. Results showed



that the time needed to generate dense point clouds using photogrammetry was roughly 21 times longer than with mobile LiDAR for each tree. The photogrammetry approach yielded better accuracy for crown base height (RMSE = 6.63%), while mobile phone LiDAR performed better for breast height diameter estimation (RMSE = 1.86%).

Conclusion: Zagros oak trees, being monoecious and seed-propagated, provide a suitable test case for applying these technologies in forest cover studies. Tree characteristics such as thin crowns, sufficient light penetration to the stem, low altitude, and low crown branching facilitate measuring stem height. Comparing photogrammetric and LiDAR methods remains challenging due to different quality and accuracy criteria used since these technologies emerged. Ultimately, the choice between these technologies depends on whether the focus is single-tree or mass tree measurements.

Keywords: Environmental science, Metashape, Photogrammetry, point cloud, scanning, sensor.

ارزیابی کارایی دو رویکرد تصویرسنجی برد کوتاه و LiDAR گوشی هوشمند در برآورد مشخصه‌های قطر برابر سینه و ارتفاع تنه درختان (مطالعه موردی: جنگل‌های بلوط در استان لرستان)

الهام کریم‌زاده جعفری^۱، جواد سوسنی^{۲*}، مسعود ورشوساز^۳، حامد نقوی^۴ و علی حسینی نوه احمدآبادیان^۳

۱- دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. پست الکترونیک: soosani.j@lu.ac.ir

۳- دانشیار، گروه تصویرسنجی و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰ تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۹/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

چکیده

سابقه و هدف: در طول دو دهه اخیر، استفاده از فناوری‌های سنجش‌ازدور سه‌بعدی همانند LiDAR تلفن همراه و رویکردهای تصویرسنجی (Photogrammetry) برای استخراج اطلاعات ابر نقاط در بخش جنگل‌داری، رشد فزاینده‌ای داشته است. LiDAR تلفن همراه به سبب دارا بودن اسکن لیزری، امکان ساخت سه‌بعدی‌های دقیق و اندازه‌گیری اجسام را در زمانی کوتاه برای تک‌درختان فراهم می‌کند. در پژوهش پیش‌رو در شرایطی مشابه (شرایط جوی و نور)، ارتفاع تنه تا محل شروع تاج درختان و قطر برابر سینه با دو رویکرد تصویرسنجی برد کوتاه و LiDAR تلفن همراه با احتساب زمان از مرحله اخذ داده تا رسیدن به ابر نقاط متراکم اندازه‌گیری شد. هدف از این پژوهش، بررسی عملکرد تصویرسنجی برد کوتاه و حسگر LiDAR تلفن همراه و مقایسه این دو رویکرد از نظر دقت محاسبه قطر برابر سینه و ارتفاع تنه درختان و نیز زمان اکتسابی برای سه‌بعدی‌سازی تنه درختان بود.

مواد و روش: ۱۶ درخت بلوط ایرانی تک‌پایه در چهار منطقه زاگرس مرکزی انتخاب و بررسی شد. در روش تصویرسنجی برد کوتاه با گردش ۳۶۰ درجه به دور درخت و با اخذ تصاویر به صورت زوج تصویر در شرایط فوکوس دستی و با داشتن نور کافی عکس‌برداری شد. برای LiDAR تلفن همراه نیز فرایند اسکن تنه با قدم زدن در اطراف درخت صورت گرفت. پس از تهیه تصاویر و معرفی آن‌ها به نرم‌افزار، توجیه داخلی انجام شد. در مرحله بعد، تعیین موقعیت ایستگاه عکس‌برداری و معرفی طول کنترل و طول چک که از قبل روی تنه درختان قرار داده شده بودند، اندازه‌گیری شدند و برای تولید جسم سه‌بعدی، ایجاد ابر نقاط اولیه و ابر نقاط متراکم تهیه شدند. پردازش LiDAR گوشی آیفون نیز با استفاده برنامه کاربردی Scaniverse تکمیل شد. صحت‌سنجی طول چک و طول کنترل تا دقت میلی‌متر توسط کولیس سنجیده شد. در محیط نرم‌افزار Metashape فاصله‌های بین نقاط چک و نقاط کنترل با نقطه‌یابی و سرشکنی نقاط به دست آمد. برای ارزیابی فاصله‌های متناظر طول چک و طول کنترل حاصل از محصولات تصویرسنجی و LiDAR تلفن همراه (داده‌های برآوردی) و فاصله‌های متناظر با اندازه‌گیری مستقیم کولیس (داده‌های واقعی) از آماره‌های RMSE، RMSE%، MAE و MAE% استفاده شد.

نتایج: گردش کار و مراحل پردازش تصویرسنجی برد کوتاه به صورت میانگین برای ۱۶ اصله درخت نمونه در جدولی تنظیم شد. برای دستیابی به ابر نقطه متراکم با تکنیک تصویرسنجی برد کوتاه لازم است که ده مرحله طی شود. مدت پردازش باتوجه به نوع سیستم مورد استفاده متفاوت است. در زمان‌بندی دو رویکرد تصویرسنجی برد کوتاه و LiDAR تلفن همراه، تصویرسنجی برد کوتاه شامل ده مرحله پردازشی است تا ابر نقاط متراکم پس از گذشت زمانی به نسبت طولانی اخذ شود، درحالی‌که LiDAR تلفن همراه شامل فقط دو مرحله اسکن درخت و پردازش مستقیم برای اخذ ابر نقاط متراکم است. نتایج نشان داد که برای هر درخت، مدت اکتسابی برای رسیدن به ابر نقاط متراکم در رویکرد تصویرسنجی حدود ۲۱ برابر مدت صرف‌شده توسط رویکرد LiDAR تلفن همراه است. رویکرد تصویرسنجی برد کوتاه در برآورد ارتفاع تنه با $RMSE=6/63\%$ و رویکرد LiDAR تلفن همراه در برآورد قطر برابر سینه با $RMSE=1/86\%$ بهتر و دقیق‌تر عمل کردند.

نتیجه‌گیری کلی: درختان تک‌پایه و دانه‌زاد بلوط زاگرس، گزینه مناسبی برای آزمودن فناوری LiDAR آیفون در پوشش جنگل هستند. شرایطی مانند تاج تنک، رسیدن نور کافی به تنه، ارتفاع کم و انشعاب‌های تاج درختان در ارتفاع پایین‌تر، ارتفاع تنه را قابل‌اندازه‌گیری می‌کند. مقایسه‌ی منصفانه دو رویکرد تصویرسنجی و فناوری LiDAR دشوار است. زیرا از زمان ظهور این فناوری، پژوهش‌هایی با تمرکز بر کیفیت و دقت حاصله از محصولات این فناوری انجام گرفته‌اند که از معیارها و تعاریف متفاوتی استفاده کرده‌اند. از طرفی، انتخاب از بین این دو، منوط به در نظر گرفتن درختان به صورت هم‌زمان در شرایط تک‌درخت و در شرایط توده است.

واژه‌های کلیدی: ابر نقاط، اسکن، حسگر، فتوگرامتری، علوم محیطی، Metashape.

مقدمه

در قرن گذشته، منابع اطلاعاتی سنجش‌ازدور برای دسترسی، ارزیابی و نظارت بر جنگل‌ها، رشد روزافزونی داشته‌اند. چراکه داده‌های سه‌بعدی سنجش‌ازدور، قادر به توصیف اطلاعاتی مانند ارتفاع و یا تاج‌پوشش درختان هستند که قابلیت زیادی را در آماربرداری جنگل ایجاد می‌کنند (Lim et al., 2003; Iglhaut et al., 2019; Poorazimy et al., 2023; Fallah et al., 2024). به‌طور سنتی، آماربرداری در علوم زمین به سرمایه‌گذاری زیاد، مدیریت دقیق منابع، آموزش پیچیده کاربران و پردازش گسترده داده نیاز دارد. به‌تازگی، پهنادهای آماده و موجود در بازار (off-the-shelf) به‌همراه حسگرهای نوری، هزینه‌های دستیابی به داده‌های با قدرت تفکیک زیاد از سطح زمین را به‌مقدار قابل‌توجهی کاهش داده‌اند. با این وجود، هزینه‌ها و پیچیدگی‌های مرتبط با نقشه‌برداری همچنان زیاد هستند (Luetzenburg et al., 2021).

بدون شک، فناوری اسکنر لیزر زمینی (Terrestrial Laser Scanner) به دلایلی مانند دقت اندازه‌گیری، اخذ داده با زمانی کوتاه و پرداختن به جزئیات در جمع‌آوری اطلاعات مکانی جنگل، این پتانسیل را دارد تا چشم‌اندازی سه‌بعدی را برای مطالعه در بوم‌شناختی و پویایی جنگل فراهم کند (Van Leeuwen & Nieuwenhuis, 2010; Trochta et al., 2017; Naghibi Rad et al., 2024). درحالی‌که فناوری‌های اسکن لیزری از روش‌های ارجح برای سه‌بعدی‌سازی اشکوب زیرین جنگل است، اما در مواردی، بزرگ‌ترین محدودیت آن یعنی هزینه زیاد، پژوهشگران را به انتخاب بین کیفیت و هزینه

ملزم می‌کند (Murtiyoso et al., 2022). یک راه‌حل جایگزین برای این مشکل، استفاده از تکنیک‌هایی مانند تصویرسنجی (Photogrammetry) است (Fol et al., 2022; Murtiyoso et al., 2022).

تصویرسنجی زمینی با استفاده از دوربین‌های دیجیتال و براساس الگوریتم ساختار در حرکت (Structure from motion)، در حال تبدیل به یک روش ساده عملیاتی با هزینه‌ای کم و دقت زیاد در آماربرداری منابع جنگلی است (Xu et al., 2023). تکنیک اندازه‌گیری به‌روش تصویرسنجی، روشی غیرمخرب و بدون تماس مستقیم با پدیده است که می‌تواند اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی کم‌هزینه و آسان را فراهم کند (Jiang et al., 2008). ساختار اصلی تصویرسنجی بر استفاده از تصاویر متوالی اخذشده از یک شیء یا یک ناهمواری استوار است. در این فرایند، با بهره‌گیری از تصاویر دوبعدی، مدل سه‌بعدی از شیء یا محیط بازسازی می‌شود که یکی از مسائل بنیادین در حوزه بینایی ماشین (Computer Vision) به شمار می‌رود. این ساختار از نحوه ادراک جسم توسط چشم انسان الگوبرداری می‌کند. چراکه ناظر با حرکت دادن چشم، اطلاعات زیادی در مورد محیط پیرامون سه‌بعدی کسب می‌کند (Zamani et al., 2019). یکی از اهداف تصویرسنجی، دستیابی به اطلاعات هندسی، رادیومتریکی و تشخیص عوارض در دنیای سه‌بعدی است (Naeimaei & Ghanbari Parmehr, 2023). استفاده از تصویرسنجی برد کوتاه، دستیابی به داده‌های سه‌بعدی را در جنگل‌داری تغییر می‌دهد. زیرا این تکنیک، آماربرداری در جنگل را با هزینه‌ای کمتر، اما با تخصص و بُعد فنی بیشتر

قطعه‌نمونه حاکی از عملکرد بهتر در سه قطعه‌نمونه با نرخ تشخیص ۷۶ درصد بود (Forsman et al., 2016). همچنین، قطر ۴۰ درصد از تنه‌ها با RMSE حدود ۲/۸ تا ۹/۵ سانتی‌متر به دست آمد. Karimzadeh Jafari و همکاران (۲۰۲۳) با تمرکز بر دقت ابر نقاط حاصل از فناوری LiDAR آیفون در جنگل‌های دانه‌زاد و تک‌پایه زاگرس میانی در استان لرستان، ۳۷ اصله بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) را در جهت‌های طولی و عرضی بررسی کردند. صحت زیاد ابر نقاط این فاصله‌ها به همبستگی زیاد بین ابر نقاط تولیدشده و واقعی منجر شد. RMSE برای فاصله‌های طولی ۱/۳۳ درصد و برای فاصله‌های عرضی ۲/۲۳ درصد به دست آمد. مقایسه LiDAR آپید پرو و اسکنر لیزر زمینی (TLS) برای اندازه‌گیری مشخصه‌های ساختاری درختان حاکی از برآورد مشابه هر دو دستگاه در اندازه‌گیری قطر برابر سینه بود (Çakir et al., 2021). میانگین خطای باقی‌مانده برای آپید پرو ۱/۹ سانتی‌متر و برای اسکنر لیزر زمینی ۴/۸ سانتی‌متر گزارش شد. بررسی گوشی هوشمند Huawei p30 پرو با هدف توسعه الگوریتم حسگر LiDAR در سه جنگل مختلف حاکی از RMSE برابر با ۳/۷ سانتی‌متر بود (Holcomb et al., 2023).

از زمان ظهور فناوری LiDAR تلفن همراه، پژوهشگران خارج از کشور، مطالعه‌های متعددی با تمرکز بر مقایسه‌ها و تعریف جنبه‌های مختلف عملیاتی آن انجام داده‌اند. در پژوهش پیش‌رو با در نظر گرفتن عملکرد تصویرسنجی برد کوتاه و حسگر LiDAR تلفن همراه (آیفون) به مقایسه دو رویکرد مذکور از نظر دقت در اندازه‌گیری قطر برابر سینه و ارتفاع تنه درختان و نیز مدت اکتسابی برای سبب‌سازی تنه درختان پرداخته شد. سؤال اصلی پژوهش پیش‌رو این است که در جنگل‌های دانه‌زاد و تک‌پایه بلوط زاگرس برای برآورد مشخصه‌های درختان، کدام یک از دو رویکرد تصویرسنجی برد کوتاه و حسگر LiDAR تلفن همراه می‌تواند کاربردی‌تر باشد؟

ارائه می‌دهد (Iglhaut et al., 2019). تصویرسنجی دیجیتال و مکان‌محور و سیستم‌های مبتنی بر LiDAR در جمع‌آوری داده‌های میدانی در نسل جدید گوشی‌های هوشمند و تبلت‌ها در کاربرد سنجش‌ازدور برد نزدیک، تحولی در علوم محیطی ایجاد کرده‌اند (Pavlis et al., 2010; Micheletti et al., 2015; Jaud et al., 2019; Corradetti et al., 2021; Luetzenburg et al., 2021; An et al., 2022; Tavani et al., 2022). سال ۲۰۲۰، کمپانی اپل، آیفون ۱۲ پرو و آپید پرو را با حسگر LiDAR یکپارچه، با هدف بهبود و تکمیل پروژه‌ی واقعیت افزوده (Augmented reality) بدون انتشار اطلاعاتی درخصوص دقت نسبی و مطلق عرضه کرد. عدم اطلاع از دقت حسگر، کنجکاوی در جامعه علوم زمین را برانگیخت و با استفاده از برنامه‌های کاربردی سه‌بعدی، قابلیت‌های حسگر برای کارایی آن آزمایش شد (Chase et al., 2022).

فناوری LiDAR شامل اندازه‌گیری‌هایی از نوع دوربین‌های زمان پرواز (Time of Flight) است. به این صورت که LiDAR یک پالس یا سیگنال نور تعدیل‌شده و زمان بازگشت موج را اندازه می‌گیرد (Schuon et al., 2008; Vogt et al., 2021; Karimzadeh Jafari et al., 2023). اپل، اطلاعات دقیقی در مورد حسگرهای تعبیه‌شده در محصولات خود ارائه نکرده است، اما به نظر می‌رسد که اجزای مشابهی را در همه محصولات خود استفاده کرده است، بنابراین اطلاعات مشابهی را نیز تولید می‌کنند (Luetzenburg et al., 2021).

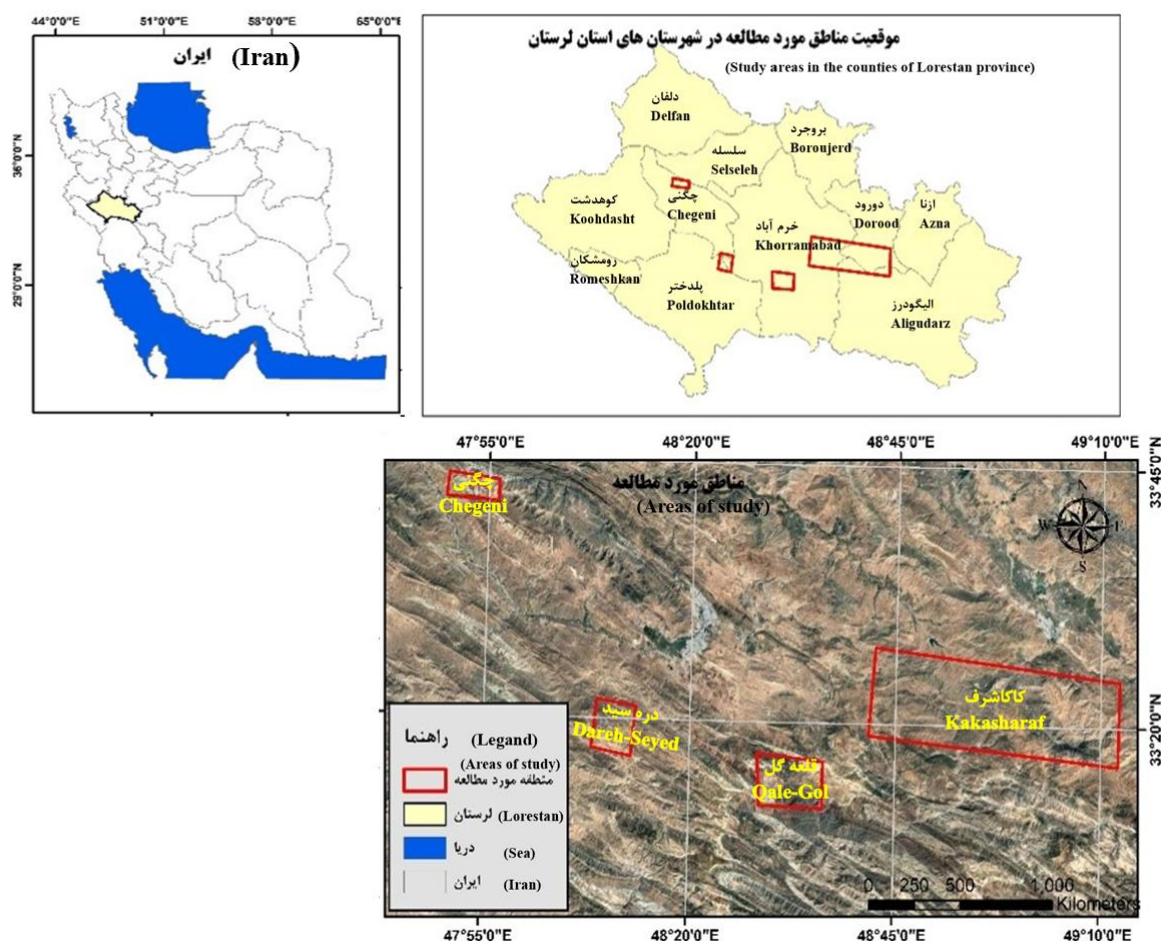
به کارگیری یک دوربین نیمه حرفه‌ای Canon EOS 700D در تصویرسنجی زمینی به منظور برآورد مشخصه‌های قطر در ارتفاع میانه نهال، قطر در ارتفاع برابر سینه، متوسط قطر تاج و حجم ساقه‌ی نهال و درختان با مدل‌های تولیدشده از روش SfM-MVS نشان داد که در مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط تصویرسنجی زمینی در هر سه سطح نهال، تک‌درخت و قطعه‌نمونه، RMSE کمتر از دو درصد است (Sadeghian et al., 2022). برآورد قطر برابر سینه درختان با تصویرسنجی برد کوتاه و به کارگیری چند دوربین متصل به هم در ۲۵

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه شامل چهار منطقه جنگلی تک پایه و دانه‌زاد واقع در استان لرستان هستند که در بهار ۱۴۰۲ تصویربرداری شدند. منطقه اول، جنگل دره‌سید از توابع شهرستان خرم‌آباد در محدوده جغرافیایی $33^{\circ}17'$ تا $33^{\circ}21'$ عرض شمالی و $48^{\circ}8'$ تا $48^{\circ}13'$ طول شرقی، منطقه دوم از جنگل‌های شهرستان چگنی در محدوده $33^{\circ}42'$ تا $33^{\circ}43'$ عرض شمالی و $47^{\circ}50'$ تا $47^{\circ}56'$ طول شرقی، منطقه سوم،

جنگل کاکاشرف واقع در $33^{\circ}20'$ تا $33^{\circ}22'$ عرض شمالی و $48^{\circ}29'$ تا $48^{\circ}30'$ طول شرقی و منطقه چهارم، جنگل قلعه‌گل در عرض $33^{\circ}14'$ تا $33^{\circ}16'$ شمالی و طول $48^{\circ}31'$ تا $48^{\circ}34'$ شرقی انجام گرفت. از مجموع چهار منطقه جنگلی مذکور، ۱۶ اصله درخت بلوط ایرانی انتخاب و بررسی شد (شکل ۱). این بوم‌سازگان‌ها بخشی از جنگل‌های زاگرس مرکزی هستند که بلوط ایرانی، عمده پوشش گیاهی این مناطق را تشکیل می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه در استان لرستان و ایران

Figure 1. The location of the studied areas in Lorestan province and Iran



شکل ۲- تصویری از جنگل‌های بلوط زاگرس (قلعه‌گل- استان لرستان)

Figure 2. A picture of the oak forests of Zagros (Qale-Gol Lorestan province, Iran)

روش پژوهش
عملیات میدانی

تمرکز پژوهش پیش‌رو بر درختان تک‌پایه‌ای بود که در جنگل‌های زاگرس، اهمیت ویژه‌ای از نظر حفظ خاک، زادآوری، تولید بذر، ساختار اصلی جنگل و حفاظت از گونه‌های گیاهی و جانوری دارند. به علاوه، فاصله‌ی مناسب از جست‌های کناری از ملزومات این پژوهش بود. چهار منطقه‌ی رویشی متفاوت انتخاب شد تا نمونه‌ها در سطح استان لرستان پراکنده باشند. برآورد قطر در ارتفاع برابر سینه توسط نوار قطرسنج از جمله ابزار رایج و متداول در آماربرداری جنگل محسوب می‌شود. همچنین، اندازه‌گیری ارتفاع تنه درختان تا نقطه‌ای که شاخه‌های اصلی ظاهر می‌شوند، از دیگر روش‌های رایج در این حوزه است. این مشخصه‌ها با استفاده از فناوری Arkit (فناوری واقعیت افزوده در بستر سیستم عامل iOS) اندازه‌گیری شدند. بررسی فناوری مذکور در پژوهش دیگری نشان داد که دقت این فناوری در اندازه‌گیری ارتفاع در مقایسه با ارتفاع‌یاب لیزری (Trupulse 360)، اختلاف معناداری ندارد (Karimzadeh Jafari & Soosani, 2021).

حسگر LiDAR تلفن همراه

اسکن LiDAR از فناوری VCSEL (Vertical-Cavity)

Surface Emitting Laser) یا لیزر تابش سطحی با کاواک عمودی استفاده می‌کند که خود شامل یک دوربین عادی، یک دوربین مادون قرمز، یک سنسور جانبی، یک پروژکتور نقطه‌ای و نیز یک دریچه نورگیر است. پروژکتور نقطه‌ای، بیشتر از ۳۰۰۰۰ نقطه نور مادون قرمز را ساطع می‌کند که بر روی سطح منعکس می‌شود. پروژکتور، شبکه‌ای از پالس‌های لیزر مادون قرمز نزدیک با طول موج ۸۵۰ نانومتر را به شکل شبکه ۲۴ در ۲۴ نقطه ارسال می‌کند (Chase et al., 2022). اسکن ابر نقاط درختان توسط گوشی هوشمند مبتنی بر LiDAR، آیفون ۱۲ پرو (Apple Inc., Cupertino, CA, USA, 2020) در بستر برنامه نصب‌شده Scaniverse انجام شد. پیش از شروع اسکن، برنامه این قابلیت را به کاربر می‌دهد که براساس اندازه شیء یا مکان مورد نظر، سطح اسکن را انتخاب کنید (سطوح کوچک، متوسط و بزرگ). پس از فرایند اسکن نیز دستگاه، نوع پردازش را می‌پرسد. نوع پردازش برحسب سرعت، میزان فضای اسکن‌شده و یا برحسب بافت اسکن، متفاوت خواهد بود (جدول ۱). پس از پردازش نیز داده‌های ابر نقاط را می‌توان روی یک USB هارد ذخیره کرد تا به راحتی به رایانه منتقل کرد. جدول ۱، اطلاعات رئوس هندسی و مثلث‌بندی، اندازه و نوع پردازش در ایجاد مدل سه‌بعدی توسط برنامه کاربردی Scaniverse به تفکیک هر درخت را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات اسکن با برنامه کاربردی Scaniverse به تفکیک هر درخت

Table 1. Scanning features of Scaniverse application

Tree. No	Geometry	Size	Processing
1	275 k. vertices, 478 k. Triangles	662.8 MB	Detail mode- 8k texture
2	291 k. vertices, 549 k. Triangles	723.8 MB	Detail mode- 8k texture
3	243 k. vertices, 464 k. Triangles	451.7 MB	Detail mode- 8k texture
4	261 k. vertices, 495 k. Triangles	700.8 MB	Detail mode- 8k texture
5	249 k. vertices, 477 k. Triangles	951.8 MB	Detail mode- 8k texture
6	282 k. vertices, 531 k. Triangles	632.8 MB	Detail mode- 8k texture
7	128 k. vertices, 195 k. Triangles	428.5 MB	Detail mode- 8k texture
8	282 k. vertices, 533 k. Triangles	511.4 MB	Detail mode- 8k texture
9	181k. vertices, 337 k. Triangles	360.2 MB	Detail mode- 8k texture
10	176 k. vertices, 327 k. Triangles	285.7 MB	Detail mode- 8k texture
11	180 k. vertices, 332 k. Triangles	283 MB	Detail mode- 8k texture
12	176 k. vertices, 320 k. Triangles	269.7 MB	Detail mode- 8k texture
13	165 k. vertices, 304 k. Triangles	346 MB	Detail mode- 8k texture
14	175 k. vertices, 322 k. Triangles	328.2 MB	Detail mode- 8k texture
15	174 k. vertices, 323 k. Triangles	320.5 MB	Detail mode- 8k texture
16	180 k. vertices, 332 k. Triangles	342 MB	Detail mode- 8k texture

زمین در محدوده تشخیص هسته و کیت پردازنده امکان پذیر است. در خصوص زمان اسکن در شرایط نور مناسب طی روز به طور معمول محدودیتی وجود ندارد.

پردازش ابر نقاط توسط برنامه کاربردی Scaniverse پردازش LiDAR گوشی آیفون با استفاده برنامه کاربردی Scaniverse تکمیل شد (جدول ۱). ابرهای نقاط با موقعیت های دوربین توسط الگوریتم SLAM (Simultaneous localization and mapping) برآورد شدند. آن ها با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی تکرار و سپس تصحیح شدند. الگوریتم بهینه سازی سعی می کند تا تفاوت های بین موقعیت های نقاط کنترلی که مختصات آن ها به دقت تعیین شده است را به حداقل برساند، در حالی که موقعیت های متوالی دوربین که توسط الگوریتم SLAM تخمین زده شده اند، به یک حد آستانه هم گرا می شوند. این قضیه موجب می شود تا موقعیت اهداف کنترلی در طول اسکن شناسایی شود و با موقعیت های تعریف شده آن ها مطابقت داشته باشد (Chase et al., 2022) (شکل ۵-الف). با استفاده از این اپلیکیشن از روش گرافیک کامپیوتری 3D Gaussian splatting با رندرینگ (Rendering: تولید تصویر از صفحه مجازی)، ایجاد صفحات

اسکن تنه درختان توسط برنامه کاربردی Scaniverse عمده اپلیکیشن های اسکن در این فناوری از نوعی تراز دیجیتال برای کنترل آزمون دوربین برخوردار هستند. هنگام اسکن کافی است که دوربین در زاویه مناسب نسبت به شیء هدف قرار گیرد تا اطمینان حاصل شود همه نقاط مورد نظر در میدان دید دوربین قرار دارند. هنگام استفاده از برنامه مذکور، یک مثلث بندی در حال حرکت با زیروسکوپی که از سه محور داخلی تشکیل شده است و همانند یک واحد اندازه گیری است، شکل می گیرد. این مثلث بندی داخلی ایل با غلبه بر محدودیت های اندازه تاحدی با دقت مدل های سه بعدی برابری می کند (Karimzadeh Jafari et al., 2023). هنگام اسکن، حرکت دوربین باید آرام و پایدار باشد تا از ثبت داده های ناقص جلوگیری شود. برای هر درخت با قدم زدن در اطراف آن فقط یک بار اسکن می شود. طی اسکن باید پیشرفت اسکن درخت با صفحه نمایشگر گوشی هوشمند کنترل شود تا اطمینان حاصل شود که درخت به طور کامل اسکن شده است. کج بودن زاویه درخت و یا شیب دار بودن سطح به راحتی توسط فناوری Arkit موجود، قابل تشخیص و کنترل است. این فناوری توان تشخیص کلی توپوگرافی عرصه را دارد. این کیت اختصاصی با قابلیت مثلث بندی و توپوگرافی

سه بعدی در زمان واقعی امکان پذیر می شود. به طوری که با استفاده از تکنیک های مبتنی بر شبکه عصب مصنوعی، امکان ایجاد تصاویری با کیفیت زیاد را فراهم می کند.

تصویرسنجی برد کوتاه

در این پژوهش، عکس برداری توسط دوربین سونی، مدل آلفا - DSLR-A850 انجام شد. عکس برداری در شرایط نور کافی به نحوی که کمترین میزان سایه اتفاق افتد، از ساعت ۱۱ تا ۱۲:۳۰ ظهر و در روزهای به طور کامل آفتابی (با اجتناب از روزهای ابری و وزش باد) صورت گرفت. عکاسی در حالت ایست - رو با حفظ فاصله تقریبی یک تا دو متری از هر درخت در ارتفاع ۱/۶ متری انجام شد. فاصله های بین ایستگاه های عکس برداری به طور نامنظم تنظیم شد و با گردش ۳۶۰ درجه به دور درخت، تصاویر به صورت زوج تصویر با حالت فوکوس دستی بدون استفاده از سه پایه با زاویه ۹۰ درجه با حفظ حالت تراز دوربین حین تصویربرداری ثبت شدند. این فرایند براساس طراحی شبکه ایستگاه های عکس برداری تصویرسنجی برد کوتاه از ۴۵ ایستگاه هم گرا انجام شد. همچنین، به منظور افزایش دقت بعد سوم و با هم پوشانی ۸۰ درصد به صورت عمودی (۹۰ درجه نسبت به سطح زمین) عکس برداری شد. گفتنی است که تصویربرداری در حالت مایل سبب ایجاد سایه و اعوجاج در تصویر می شود (شکل ۳).

پردازش ابر نقاط تصویرسنجی برد کوتاه توسط نرم افزار Metashape

نرم افزار Metashape به صورت خودکار از عکس های متوالی ثبت شده از تنه درختان، تصاویر سه بعدی می سازد. به سبب پوست ناصاف و انحنای تنه درختان، امکان نصب

تارگت ها به راحتی مسیر نشد. به منظور قرارگیری اندازه ها در مقیاس واقعی، طول کنترل طراحی شد. همچنین، برای جهت گیری مناسب مدل و ارزیابی دقت، طول چک طراحی شد (شکل ۴). این طول ها در واقع نقاط کنترل زمینی را در پژوهش تشکیل می دهند. فاصله بین تارگت ها توسط کولیس اندازه گیری شد. در نهایت، آن ها در ارتفاع های مختلف دور تا دور درخت نصب شدند. سپس، عکس برداری انجام شد. پس از تهیه تصاویر و معرفی آن ها به نرم افزار، توجیه داخلی (شامل: فاصله کانونی، اندازه پیکسل و پارامترهای اعوجاج) انجام شد. در مرحله بعد، موقعیت ایستگاه عکس برداری و معرفی طول کنترل و طول چک که پیش از عکس برداری روی تنه درختان قرار داده شده بودند، اندازه گیری شدند و برای تولید جسم سه بعدی، ابر نقاط اولیه و ابر نقاط متراکم تهیه شدند (شکل ۵-ب).

تجزیه و تحلیل آماری

اعتبارسنجی طول چک و طول کنترل تا دقت میلی متر توسط کولیس سنجیده شد. در محیط نرم افزار Metashape فاصله های نقاط طول چک و نقاط طول کنترل با تناظر یابی و سرشکنی دسته اشعه یا Bundle Adjustment به دست آمد. برای ارزیابی دقت هندسی فاصله های متناظر طول چک و طول کنترل حاصل از محصولات تصویرسنجی و LiDAR تلفن همراه (داده های برآوردی) و فاصله های متناظر که با اندازه گیری سنتی توسط کولیس به دست آمده بودند (داده های واقعی) از معیارهای آماری RMSE، MAE% و MAE% استفاده شد (رابطه های ۱ تا ۴). آن ها به ترتیب بیانگر آماره های مجذور میانگین مربعات خطا، درصد مجذور میانگین مربعات خطا، میانگین خطای مطلق و درصد میانگین خطای مطلق هستند (شکل ۶).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

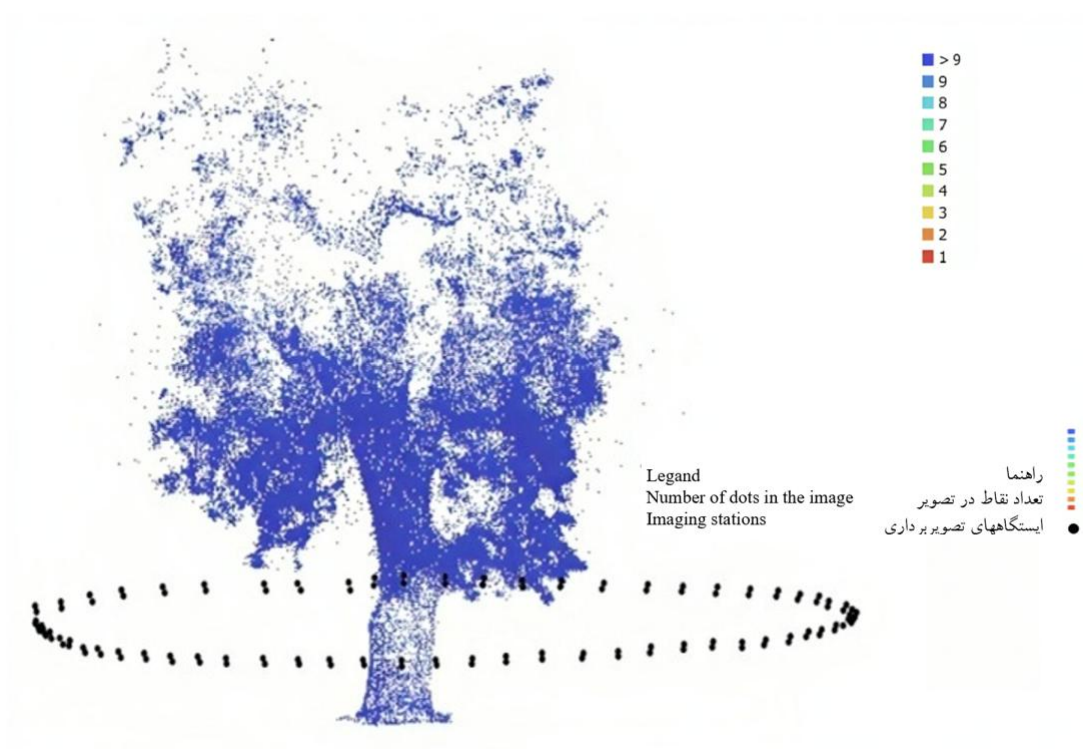
رابطه (۱)

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i}{n}\right)} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$MAE\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right| \times 100 \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن‌ها، $\hat{y}_i$ مقدار اندازه‌گیری شده، y_i مقدار برآورده شده و n تعداد درختان هستند.



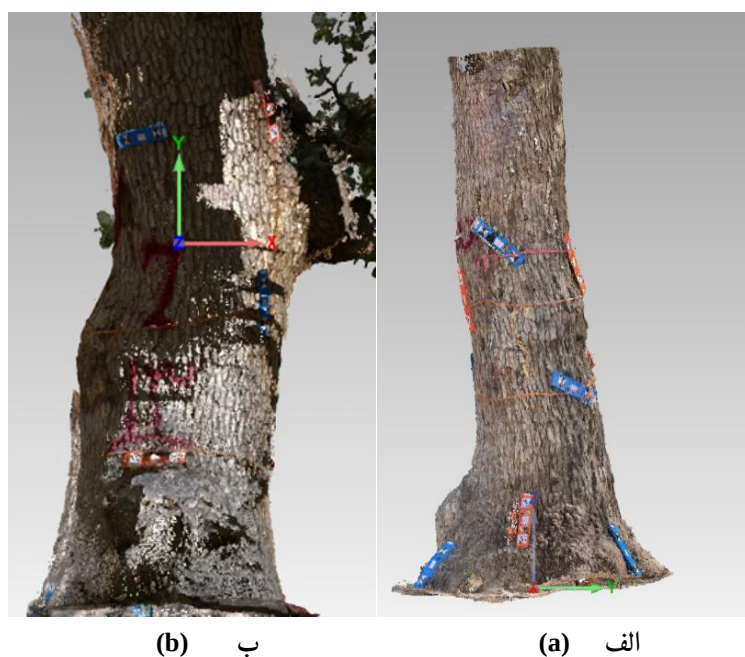
شکل ۳- هم‌پوشانی تصاویر، وضعیت قرارگیری و فاصله دوربین تا درخت (متر) از گزارش Metashape

Figure 3. Overlay of images, position and distance of camera to tree (meters), from the Metashape report



شکل ۴- شمایی نزدیک از طول تارگت و طول چک‌های نصب‌شده بر روی تنه درختان

Fig 4. A close-up of the length of the target and the length of the checks installed on the tree stems

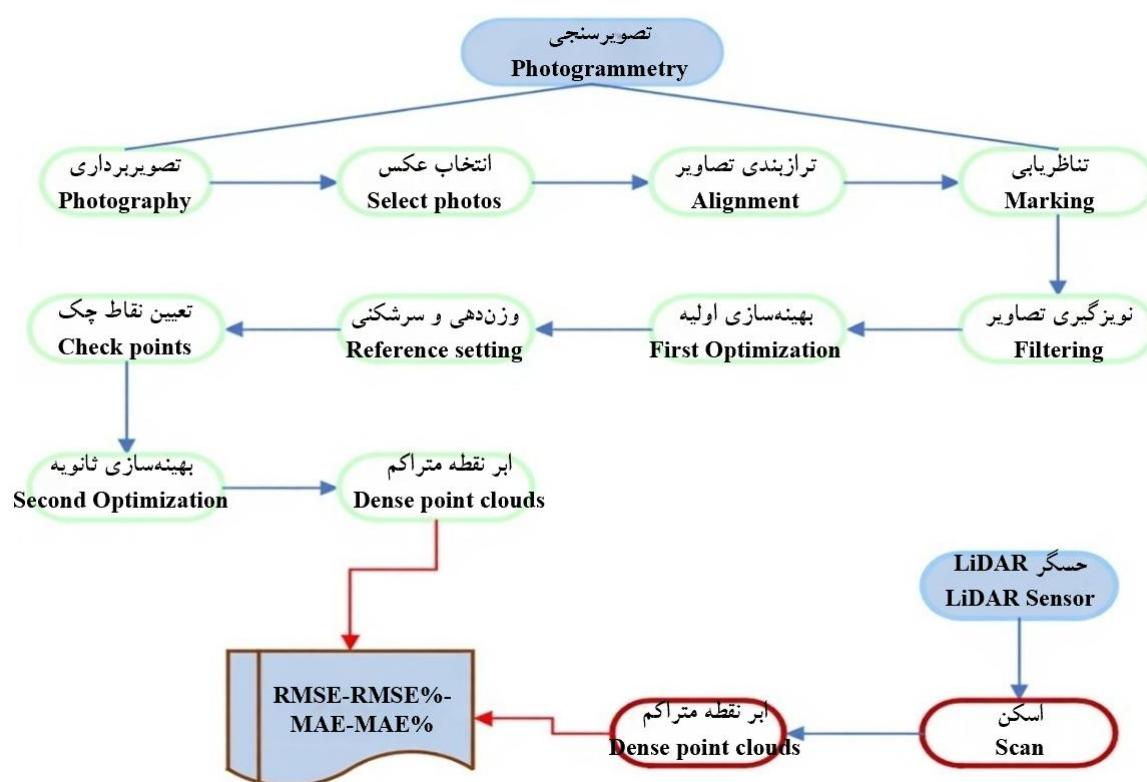


ب (b)

الف (a)

شکل ۵- الف) کیفیت ابر نقطه متراکم از اسکن تنه درخت توسط LiDAR تلفن همراه و ب) کیفیت ابر نقطه متراکم تنه درخت توسط تصویرسنجی برد کوتاه

Figure 5. a) Dense point cloud quality from tree stem scanning by mobile phone LiDAR, b) Dense point cloud quality of tree stem by close-range photogrammetry



شکل ۶- گردش کار مراحل اجرای پژوهش

Figure 6. The workflow of research implementation steps

نتایج

بردکوتاه و LiDAR تلفن همراه را نشان می‌دهند. تصویرسنجی بردکوتاه شامل ده مرحله پردازشی است تا ابر نقاط متراکم پس از گذشت زمانی به نسبت طولانی اخذ شود، درحالی‌که LiDAR تلفن همراه شامل فقط دو مرحله اسکن درخت و پردازش مستقیم برای اخذ ابر نقاط متراکم است. زمان کل پروژه در جدول ۲ به طرز قابل توجهی بیشتر از زمان کل در جدول ۳ است.

گردش کار و مراحل پردازش تصویرسنجی بردکوتاه به صورت میانگین برای ۱۶ اصله درخت در جدول ۲ آمده است. برای دستیابی به ابر نقطه متراکم با تکنیک تصویرسنجی بردکوتاه لازم است که ده مرحله طی شود. مدت پردازش با توجه به نوع سیستم مورد استفاده متفاوت خواهد بود.

جدول‌های ۲ و ۳، زمان‌بندی دو رویکرد تصویرسنجی

جدول ۲- میانگین زمان بندی فرایند عکس برداری تنه درختان و مراحل پردازشی تصویرسنجی زمینی در بستر نرم افزار (Agisoft) Metashape

Table 2. The average timing of tree stem photography and terrestrial photogrammetry processing steps in the Metashape (Agisoft) software platform

Terrestrial photogrammetry work and processing steps	Average time (hours, minutes and seconds)
Photography	00:11:33
Photos selection	00:04:44
Alignment	00:06:28
Markers	02:32:25
Filtering	00:04:00
First Optimization	00:00:19
Reference setting	00:01:27
Check-points	00:00:49
Second Optimization	00:00:19
Dense point clouds	01:08:49
Total time	04:10:42

جدول ۳- میانگین زمان بندی فرایند اسکن تنه درختان توسط LiDAR تلفن همراه در بستر اپلیکیشن Scaniverse

Table 3. The average timing of tree stem scanning process by mobile phone LiDAR in Scaniverse application platform

Average time (hours, minutes, seconds and hundredths of seconds)		
Scan the tree	Dense point cloud processing time	Total time
00:05:38.42	00:06:39.11	00:12:17.5

بررسی آماره های جدول های ۴ و ۵ نشان می دهد که سیستم تصویرسنجی برد کوتاه در برآورد ارتفاع درختان، بهتر از LiDAR تلفن همراه عمل می کند، در حالی که برای مشخصه قطر در ارتفاع برابر سینه، LiDAR تلفن همراه، عملکرد مناسبی ارائه داد.

جدول ۴- معیارهای اعتبارسنجی در برآورد ارتفاع تنه درختان توسط تصویرسنجی برد کوتاه و LiDAR تلفن همراه

Table 4. Validation criteria related to tree stem height by close-range photogrammetry and mobile phone LiDAR

Method	RMSE (m)	RMSE%	MAE (m)	MAE%
Close-range photogrammetry	0.183	6.63	0.14	4.66
Mobile phone LiDAR	0.299	10.8	0.24	7.95

جدول ۵- معیارهای اعتبارسنجی در برآورد قطر برابر سینه درختان توسط تصویرسنجی برد کوتاه و LiDAR تلفن همراه

Table 5. Validation criteria for estimating the diameter of trees by close-range photogrammetry and mobile phone LiDAR

Method	RMSE (cm)	RMSE%	MAE (cm)	MAE%
Close-range photogrammetry	1.11	2.53	0.8	1.85
Mobile phone LiDAR	0.82	1.86	0.6	1.58

در جدول ۶، ویژگی های کلیدی دو روش تصویرسنجی برد کوتاه و LiDAR گوشی هوشمند آیفون در زمینه جمع آوری و پردازش داده های سه بعدی آمده است. بخشی از اطلاعات این جدول مانند شرایط نوری به صورت تجربی کسب شده است.

جدول ۶- مقایسه تصویرسنجی برد کوتاه و لیدار گوشی آیفون

Table 6. Comparison of Close-Range Photogrammetry and iPhone LiDAR

Feature	Close-Range photogrammetry	iPhone LiDAR
Data collection speed	Time-consuming; requires capturing a set of images from various angles	Fast; collects data quickly using the LiDAR sensor
Processing time	Time-consuming; requires processing images and generating 3D models (hours to days)	Fast; near-instant processing within the app
Accuracy	High accuracy (up to about 0.1 mm)	Moderate accuracy; generally less than photogrammetry
Equipment requirements	Requires specialized cameras and software	Requires a smartphone with a LiDAR sensor
Lighting conditions	Requires suitable lighting conditions	Performs well in various lighting conditions
Applications	Precise projects like reverse engineering, surveying, and documenting historical sites	Augmented reality, rapid surveying, and environmental analysis

بحث

محدودیت‌های آزمایش در فناوری آشکارسازی و پیمایش نور LiDAR در علومی مانند جنگل‌داری سبب شده است تا جستجو برای حسگرهای ارزان‌قیمت سه‌بعدی همچون حسگرهای دستی یا پوشیدنی (کمتر از ۲۰۰۰ دلار معادل با یک میلیارد و دویست میلیون ریال) بیشتر شود. هم‌اکنون، این حسگرها در ابزار به نسبت ارزان‌قیمتی مانند آیفون و آیفون پرو سری ۲۰۲۰ از شرکت سازنده اپل وجود دارند (McGlade *et al.*, 2022).

تعیین مقرون به صرفه بودن تصویرسنجی برد کوتاه یا LiDAR آیفون به عوامل مختلفی مانند مقیاس پروژه، پیچیدگی محیط و الزامات خاص کار بستگی دارد. در مجموع، می‌توان گفت که هر دو تکنیک، معایب و مزایای خاص خود را دارند. اثربخشی و کاربردهای دو تکنیک مذکور در جنگل بسته به عواملی مانند توپوگرافی زمین، وجود موانع و سطح جزئیات می‌تواند متفاوت باشد.

در پژوهش پیش‌رو سعی شد تا با مقایسه تصویرسنجی برد کوتاه و LiDAR گوشی همراه در برآورد مشخصه‌های ساختاری درختان به این پرسش پاسخ داده شود که کدام یک از این دو تکنیک می‌تواند در شرایط اندازه‌گیری و آماربرداری در جنگل از نظر زمانی، به صرفه باشد. براساس نتایج موجود در جدول‌های ۲ و ۳ و با در نظر گرفتن متوسط زمان صرف شده برای عکس‌برداری و نیز اسکن تنه درختان می‌توان گفت که از نظر زمانی، اسکن LiDAR گوشی همراه با فراهم‌سازی اطلاعات ابعاد هندسی اجسام بدون واسطه و

مستقیم سبب صرفه‌جویی در زمان می‌شود. مدت صرف شده در این تکنیک برای ابر نقطه سه‌بعدی به طور متوسط ۱۲ دقیقه و ۱۷ ثانیه بود که حدود پنج دقیقه و ۳۹ ثانیه به اسکن تنه درختان اختصاص داده شد (جدول ۳). Gollob و همکاران (۲۰۲۱)، زمان اکتساب داده را با LiDAR آیفون حدود هفت دقیقه و ۵۱ ثانیه در هر قطعه نمونه گزارش کردند که ۲/۵ برابر زمانی کوتاه‌تر از روش‌های سنتی و متداول آماربرداری جنگل هستند. با به‌کارگیری اپلیکیشن Forest scanner، زمان کار مورد نیاز برای اندازه‌گیری قطر برابر سینه و تعیین موقعیت مکانی درختان در یک قطعه نمونه یک هکتاری با ۶۲۷ درخت در مقایسه با روش سنتی حدود ۲۵/۷ درصد کاهش یافت (Tatsumi *et al.*, 2023). زمان صرف شده در پژوهش مذکور برای اندازه‌گیری با LiDAR آیفون یک ساعت و ۳۹ دقیقه، با LiDAR آیفون یک ساعت و ۳۸ دقیقه و با استفاده از نوار قترسنج سه ساعت و ۱۳ دقیقه گزارش شد.

طبق نتایج جدول‌های ۴ و ۵، تصویرسنجی برد کوتاه در برآورد ارتفاع تنه با $RMSE=0/183$ متر و $63/6\%$ RMSE به مراتب بهتر از LiDAR آیفون عمل کرد، درحالی‌که LiDAR آیفون، برآورد دقیق‌تری از قطر برابر سینه، نسبت به تصویرسنجی برد کوتاه داشت. دلیل دقت بیشتر در برآورد ارتفاع توسط تصویرسنجی برد کوتاه به احتمال زیاد تجمع بیشتر نقاط کنترل در یک سمت از تنه درخت بوده باشد. زیرا تراکم زیاد نقاط سبب ایجاد بافت و سه‌بعدی غنی‌تری در جهت ارتفاعی می‌شود، اما اساس تشخیص LiDAR فاصله است. به همین سبب، این تکنیک متأثر از نقاط کنترل دور تا

تنه در جنگل‌های دانه‌زاد و تک‌پایه بلوط زاگرس به دلیل دارا بودن شرایطی مانند تاج پوشش تنک، رسیدن نور کافی به تنه درختان، ارتفاع کم پایه‌ها و انشعاب‌های تاج درختان راحت‌تر است (Karimzadeh Jafari et al., 2023). از این رو، بلوط‌های تک‌پایه و دانه‌زاد زاگرس، نمونه مناسبی برای آزمودن فناوری LiDAR آیفون در پوشش گیاهی جنگل هستند. مقایسه منصفانه دو رویکرد به‌کارگرفته‌شده در پژوهش پیش‌رو تاحدی دشوار است. از زمان ظهور فناوری LiDAR آیفون، پژوهش‌های متعددی با تمرکز بر تعیین کیفیت و دقت به‌دست‌آمده از محصولات این فناوری انجام گرفته است که از روش‌ها، معیارها و تعاریف عملیاتی متفاوتی استفاده کرده‌اند. به همین دلیل در عمل، امکان مقایسه یافته‌های آن‌ها با نتایج پژوهش پیش‌رو اندک است. از طرفی، پاسخ به این سؤال که کدام یک از این فناوری‌ها می‌تواند کارایی اندازه‌گیری در جنگل را افزایش دهد، مستلزم ارزیابی هم‌زمان درختان در دو حالت تک‌درختی و توده‌ای است تا امکان ارائه قضاوتی دقیق و معتبر فراهم شود. در جدول ۶ با مقایسه تصویرسنجی بردکوتاه و لیدار گوشی آیفون، ویژگی‌های کلیدی این دو فناوری بررسی و جمع‌بندی شد. تصویرسنجی، دقت زیادی (تا ۰/۱ میلی‌متر) ارائه می‌دهد، اما جمع‌آوری و پردازش داده‌ها زمان‌بر است و نیاز به تجهیزات تخصصی دارد. در مقابل، لیدار گوشی آیفون سریع‌تر عمل می‌کند و می‌تواند داده‌ها را به‌صورت آنی جمع‌آوری و پردازش کند، اما دقت آن به‌طور معمول کمتر است. همچنین، لیدار عملکرد خوبی در شرایط نوری مختلف دارد و فقط به یک گوشی هوشمند با حسگر LiDAR نیاز دارد. انتخاب بین این دو روش به نیازهای خاص پروژه، دقت مورد نظر و زمان موجود بستگی دارد. به‌طور کلی پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده با بررسی وضعیت درختان در شرایط توده و نیز اثرات سایه‌اندازی در طول دوره رویش و در طول دوره خزان، اعتبار کاربرد این فناوری در مناطق رویشی مختلف و همین‌طور با تنوع گونه‌ای سنجیده شوند.

دور تنه درخت نیست، بنابراین LiDAR در برآورد قطر برابرسینه بهتر عمل کرده است. دلیل دیگر RMSE کمتر در برآورد قطر برابر سینه توسط LiDAR آیفون می‌تواند صافی پوست تنه و نیز تقارن بیشتر در جهت طولی تنه باشد. زیرا گونه مورد بررسی، بلوط ایرانی است که دارای رتیدوم است و پوست‌اندازی اندکی دارد. همین‌طور محدودیتی که شیارهای رتیدوم ایجاد می‌کند، انعکاس طیفی تنه را حین فرایند اسکن کاهش می‌دهد (Karimzadeh Jafari et al., 2023). هم‌راستا با این نتایج، در پژوهش پیشین (Karimzadeh Jafari et al., 2023) نیز دقت LiDAR آیفون در جهت طولی با $RMSE = 1/33\%$ کمتر از جهت عرضی برآورد شد.

در تناقض با نتایج پژوهش پیش‌رو، مقایسه داده‌های LiDAR در برآورد ارتفاع درختان و داده‌های حاصل از تصویرسنجی نشان داد که LiDAR ارتفاع درختان را بیشتر از اندازه‌گیری‌های میدانی و کمتر از تصویرسنجی برآورد می‌کند (Ganz et al., 2019). مهم‌ترین دلیل این اختلاف را می‌توان ادغام حسگر LiDAR با سیستم‌های GNSS (Global Navigation Satellite Systems) و IMU (Inertial measurement unit) دانست که نسبت به سیستم‌های LiDAR بر روی هواپیماهای بدون سرنشین به‌طور قطع دقت بیشتری دارد. زیرا سیستم‌های GNSS به‌طور معمول از فناوری پیشرفته‌تری مانند RTK (Real Time Kinematic) که شامل گیرنده‌های چندفرکانسی هستند، بهره می‌برند، درحالی‌که حسگر LiDAR گوشی آیفون، این فناوری را ندارد.

با مروری بر پژوهش‌های پیشین که با فناوری‌های مشابه پیش از LiDAR آیفون و آید انجام گرفتند می‌توان نتیجه گرفت که برآورد قطر در ارتفاع برابر سینه در شرایط توده با شرایط تک‌درخت، متفاوت خواهد بود. Hyypä و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از فناوری‌های نسل پیش از LiDAR آیفون، مقدار RMSE برای برآورد قطر برابر سینه در حالت تک‌درخت را ۰/۷۳ سانتی‌متر گزارش کردند که به نتایج پژوهش پیش‌رو (جدول ۵) نزدیک است.

در یک جمع‌بندی می‌توان گفت که اندازه‌گیری ارتفاع

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) (بنیاد ملی علم ایران)

برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۱۵۲۲۸» انجام شده است.

References

- An, P., Fang, K., Zhang, Y., Jiang, Y. and Yang, Y., 2022. Assessment of the trueness and precision of smartphone photogrammetry for rock joint roughness measurement. *Measurement*, 188: 110598.
- Çakir, G.Y., Post, C.J., Mikhailova, E.A. and Schlautman, M.A., 2021. 3D LiDAR scanning of urban forest structure using a consumer tablet. *Urban Science*, 5: 88.
- Chase, P.P.C., Clarke, K.H., Hawkes, A.J., Jabari, Sh. and Jakus, J.S., 2022. Apple iPhone 13 Pro LiDAR accuracy assessment for engineering applications. *Proceedings of Transforming Construction with Reality Capture Technologies: The Digital Reality of Tomorrow*. Fredericton, New Brunswick, Canada, 23-25 Aug. 2022: 10p.
- Corradetti, A., Seers, T.D., Billi, A. and Tavani, S., 2021. Virtual outcrops in a pocket: the smartphone as a fully equipped photogrammetric data acquisition tool. *GSA Today*, 31: 4-9.
- Fallah, M., Matkan, A.A. and Aghighi, H., 2024. Estimation of height and diameter at breast height of forest trees with multi-scale individual tree detection method and machine learning algorithms using airborne LiDAR data. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 32(2): 112-131 (In Persian with English summary).
- Fol, C.R., Murtiyoso, A. and Griess, V.C., 2022. Evaluation of Azure Kinect derived point clouds to determine the presence of microhabitats on single trees based on the Swiss standard parameters. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43(B2-2022): 989-994.
- Forsman, M., Borlin, N. and Holmgren, J., 2016. Estimation of tree stem attributes using terrestrial photogrammetry with a camera rig. *Forests*, 7(3): 61.
- Ganz, S., Käber, Y. and Adler, P., 2019. Measuring tree height with remote sensing—a comparison of photogrammetric and LiDAR data with different field measurements. *Forests*, 10: 694.
- Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A. and Nothdurft, A., 2021. Measurement of forest inventory parameters with Apple iPad Pro and integrated LiDAR technology. *Remote Sensing*, 13: 3129.
- Holcomb, A., Tong, L. and Keshav, S., 2023. Robust single-image tree diameter estimation with mobile phones. *Remote Sensing*, 15: 772.
- Hyypä, J., Virtanen, J.P., Jaakkola, A., Yu, X., Hyypä, H. and Liang, X., 2017. Feasibility of Google Tango and Kinect for crowdsourcing forestry information. *Forests*, 9(1): 6.
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J. and Rosette, J., 2019. Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. *Current Forestry Reports*, 5: 155-168.
- Jaud, M., Kervot, M., Delacourt, C. and Bertin, S., 2019. Potential of smartphone SfM photogrammetry to measure coastal morphodynamics. *Remote Sensing*, 11: 2242.
- Jiang, R., Jáuregui, D.V. and White, K.R., 2008. Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review. *Measurement*, 41(8): 823-834.
- Karimzadeh Jafari, E. and Soosani, J., 2021. The efficiency of augmented reality technology in smartphones for estimating the height of trees (case study: green space conifers of Lorestan Faculty Agriculture and Natural Resources). *Forest and Wood Products*, 207(2): 197-207 (In Persian with English summary).
- Karimzadeh Jafari, E., Soosani, J., Varshosaz, M. and Naghavi, H., 2023. Investigating the accuracy of iPhone LiDAR in preparing point clouds of tree trunks (Case study: Middle Zagros - oak forests of Lorestan province). *Journal of Geomatics Science and Technology*, 12(3): 63-73 (In Persian with English summary).
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. and Flood, M., 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27: 88-106.
- Luetzenburg, G., Kroon, A. and Bjørk, A.A., 2021. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an application in geosciences. *Scientific Reports*, 11: 22221.
- McGlade, J., Wallace, L., Reinke, K. and Jones, S., 2022. The potential of low-cost 3D imaging technologies for forestry applications: Setting a research agenda for low-cost remote sensing inventory tasks. *Forests*, 13: 204.

- Micheletti, N., Chandler, J.H. and Lane, S.N., 2015. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40: 473-X486.
- Murtiyoso, A., Hristova, H., Rehush, N. and Griess, V.C., 2022. Low-cost mapping of forest under-storey vegetation using spherical photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W1: 185-190.
- Naeimaei, R. and Ghanbari Parmehr, E., 2023. Assessing the influence of image network and image texture on the quality of 3D point cloud production in close-range photogrammetry. *Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research*, 1(2): 189-204 (In Persian with English summary).
- Naghibi Rad, S.A., Darvishsefat, A.A., Fatehi, P., Namiranian, M., Saadatseresht, M. and Boroumand, M., 2024. Evaluation of Octree-Based Segmentation (OBS) method to separate ground point based on the handheld laser scanner data. *Iranian Journal of Forest*, 16(1): 137- 155 (In Persian with English summary).
- Pavlis, T.L., Langford, R., Hurtado, J. and Serpa, L., 2010. Computer-based data acquisition and visualization systems in field geology: Results from 12 years of experimentation and future potential. *Geosphere*, 6: 275-294.
- Poorazimy, M., Shataee Jouibary, Sh., Mohammadi, J. and Aghababaei, H., 2023. Feasibility of single-polarized TanDEM-X data for Hyrcanian forest height estimation (Case study: Shast-Kalateh forest). *Iranian Journal of Forest*, 15(3): 329-343 (In Persian with English summary).
- Sadeghian, H., Naghavi, H., Maleknia, R. and Sosani, J., 2022. Estimating the quantitative characteristics of seedlings using terrestrial close-range photogrammetry. *Journal of Forest Research and Development*, 7(4): 639-561 (In Persian with English summary).
- Schuon, S., Theobalt, C., Davis, J. and Thrun, S., 2008. High-quality scanning using time-of-flight depth superresolution. *Proceedings of the 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Anchorage, Alaska, USA, 23-28 Jun. 2008: 7p.
- Tatsumi, S., Yamaguchi, K. and Furuya, N., 2023. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*, 14: 1603-1609.
- Tavani, S., Billi, A., Corradetti, A., Mercuri, M., Bosman, A., Cuffaro, M., Seers, T. and Carminati, E., 2022. Smartphone assisted fieldwork: Towards the digital transition of geoscience fieldwork using LiDAR-equipped iPhones. *Earth-Science Reviews*, 227: 103969.
- Trochta, J., Krůček, M., Vrška, T. and Král, K., 2017. 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PLoS ONE*, 12(5): e0176871.
- van Leeuwen, M. and Nieuwenhuis, M., 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 129(4): 749-770.
- Vogt, M., Rips, A. and Emmelmann, C., 2021. Comparison of iPad Pro®'s LiDAR and TrueDepth capabilities with an industrial 3D scanning solution. *Technologies*, 9: 25.
- Xu, Z., Shen, X. and Cao, L., 2023. Extraction of forest structural parameters by the comparison of structure from motion (SfM) and backpack laser scanning (BLS) point clouds. *Remote Sensing*, 15: 2144.
- Zamani, P., Mohajeri, S.H. and Samadi, A., 2019. Application of structure from motion (SfM) method to determine the bed surface particles sizes in gravel bed rivers. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50: 215-230 (In Persian with English summary).