

Research Article

The ability of close-range photogrammetry system to produce point clouds from conifer tree stems

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

1- Ph.D. Student of Forestry, Faculty of Natural Resources, Lorestan Lorestan University University of Lorestan, 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: 23.08.2024

Revised: 19.11.2024

Accepted: 23.11.2024

Abstract

Background and objectives: Laser scanners and digital cameras have enabled the creation of 3D models in forest environments by generating point clouds. While laser scanning technologies are often the preferred method for rendering the forest understory in three dimensions, a major limitation is their dependence on access to Global Navigation Satellite Systems (GNSS), which can complicate data acquisition in certain environments. An alternative to this limitation is the use of photogrammetry techniques. The objective of this study was to evaluate the feasibility of using high-precision terrestrial close-range photogrammetry as an alternative to traditional methods for measuring forest trees.

Methodology: Field measurements were conducted on 10 randomly selected coniferous trees located on the campus of K.N. Toosi University of Technology in Tehran, Iran, during the summer of 2022. Due to the lack of smoothness on the tree stems, image processing can lack sufficient detail. Therefore, coded and hand-made refractor targets were installed to scale the images to real-world dimensions. Control lengths were designed for orientation, and check lengths were implemented to assess accuracy. Target distances were measured using calipers and installed at various heights around the stem. Photographs were captured using a Fujifilm FinePix Real 3D W1 camera from 45 stations in stop-and-go mode, rotating 360 degrees around each tree. Stereo pair images were taken using manual focus, without a tripod. The best images were selected for each project, and matching of control and check length points was performed. One-third of the control lengths were designated as check lengths to avoid influencing the calibration. To evaluate accuracy, the following metrics were used: Root Mean Square Error (RMSE), percentage RMSE (%RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and percentage MAE (%MAE).

Results: The accuracy of both control and check points achieved sub-millimeter precision. Total control point error was below 1 mm (0.6 mm), with RMSE = 16.79% and MAE = 10.3%. For individual trees, image reprojection errors were also analyzed in RMS pixel units. Tree number 10 showed the lowest RMS error (0.376 pixels), while tree number 5 had the highest

(0.695 pixels). However, this metric alone is insufficient for full accuracy assessment, as outliers were likely retained to avoid bias in error estimation.

Conclusion: Achieving sub-millimeter accuracy is rare in forest science photogrammetry but common in industrial applications. The findings demonstrate that close-range terrestrial photogrammetry, when combined with proper network design and optimal image-capturing distance, can yield high-quality models at relatively low cost. This method shows strong potential to compete with more expensive technologies for generating dense and precise point clouds of individual trees.

Keywords: Calibration, check length, control length, forest management, photogrammetric network.

توانایی سیستم تصویرسنجی برد کوتاه در تولید ابر نقاط از تنه درختان سوزنی برگ

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

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

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

۳- دانشیار، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

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

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۲

چکیده

سابقه و هدف: اسکنرهای لیزری و دوربین‌های دیجیتال با فراهم‌سازی ابر نقاط، مدل‌سازی سه‌بعدی را در جنگل امکان‌پذیر کرده‌اند. به‌منظور سه‌بعدی‌سازی در اشکوب زیرین جنگل، فناوری‌های اسکن لیزری از بهترین روش‌ها محسوب می‌شود، اما در بعضی موارد، عدم دسترسی به سیستم‌های جهانی ناوبری ماهواره‌ای به‌عنوان بزرگ‌ترین محدودیت آن، فرایند اسکن را دشوار می‌کند. راه‌حلی جایگزین برای رفع این مشکل، استفاده از تکنیک‌هایی مانند تصویرسنجی (Photogrammetry) است. هدف از پژوهش پیش‌رو، امکان‌سنجی کاربرد تصویرسنجی برد کوتاه زمینی با دقت زیاد به‌عنوان جایگزین روش‌های سنتی در اندازه‌گیری درختان جنگلی بود. مواد و روش‌ها: اندازه‌گیری‌های میدانی با انتخاب تصادفی ۱۰ اصله از درختان سوزنی‌برگ در فضای سبز دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در تهران طی تابستان ۱۴۰۱ انجام گرفت. ناصافی پوست تنه، اطلاعات کافی را در زمان پردازش تصاویر نمی‌دهد، بنابراین با نصب تارگت‌ها (کددار و دست‌ساز رفرتور) به‌منظور قرارگیری اندازه‌ها در مقیاس واقعی، طول کنترل طراحی شد. طول چک نیز برای جهت‌گیری مناسب مدل و ارزیابی دقت پیاده‌سازی شد. فاصله‌ی بین تارگت‌ها توسط کولیس اندازه‌گیری شد. درنهایت، آن‌ها در ارتفاعات مختلف، دور تا دور تنه درخت نصب شدند. عکس‌برداری توسط دوربین فوجی فیلم مدل FinePix Real 3D W1 از ایستگاه در حالت ایست-رو و با گردش ۳۶۰ درجه به دور درخت به‌صورت زوج تصویر با حالت فوکوس دستی و بدون استفاده از سه‌پایه انجام شد. در هر پروژه، بهترین عکس‌ها برای این منظور انتخاب شدند و تناظریابی نقاط طول کنترل و طول چک انجام شد. نسبت یک‌سوم از این طول‌های کنترل به‌عنوان طول چک در نظر گرفته شد تا بدین نحو در محاسبات دخالت داده نشوند. به‌منظور مقایسه داده‌های برآوردی و داده‌های واقعی، آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و درصد آن‌ها به‌کار برده شد.

نتایج: دقت نقاط کنترل و نقاط چک در این پژوهش به کمتر از یک میلی‌متر رسید. در مجموع، نقاط کنترل با خطایی کمتر از یک میلی‌متر (۰/۶ میلی‌متر) و با $RMSE=17.3\%$ و $RMSE=16.79\%$ و $MAE=10.3\%$ به‌دست آمد. برای قضاوت در حالت تک‌درخت می‌توان از خطای تصویر مجدد که در واحد RMS است، استفاده کرد. کمینه (۰/۳۷۶ پیکسل) و بیشینه (۰/۶۹۵ پیکسل) RMS به‌ترتیب در درخت‌های شماره ۱۰ و ۵ مشاهده شد. البته قضاوت فقط با استفاده از این مؤلفه کافی نیست. زیرا نقاط پرت در RMS به‌احتمال زیاد به‌دلیل جلوگیری از اریبی ناشی از تشخیص نقاط خارجی حذف نشده‌اند.

نتیجه‌گیری کلی: در مباحثی مانند تصویرسنجی صنعتی، دقت زیاد رایج است، اما استخراج مدلی با دقت کمتر از یک میلی‌متر در تصویرسنجی علوم جنگل، کمتر گزارش شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که تصویرسنجی برد کوتاه زمینی به‌شرط طراحی شبکه اصولی و رعایت فاصله مناسب از درختان هنگام عکس‌برداری، مدلی باکیفیت و کم‌هزینه را ارائه می‌دهد. این روش در سطح تک‌درخت، پتانسیل زیادی برای رقابت با دستگاه‌های هزینه‌بر تولید ابرهای نقطه‌ای مترکم و دقیق در جنگل دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه فتوگرامتری، طول چک، طول کنترل، واسنجی، مدیریت جنگل.

مقدمه

جنگل‌ها به صورت ذاتی بوم‌سازگانی چندبعدی هستند که بخشی از بی‌نظمی‌های آن در فضای سه‌بعدی رخ می‌دهند. به عبارت دیگر، بی‌نظمی در شکل تاج درختان، تجدید حیات، رشد و رقابت، همگی در یک فضای سه‌بعدی شکل می‌گیرند. این تعاملات را نمی‌توان در قطعه‌نمونه‌های دوبعدی نشان داد (Steier et al., 2024). ابر نقاط سه‌بعدی در علوم محیطی از جمله جنگل‌داری با روش‌های متفاوتی مانند اسکنرهای لیزری و روش‌های تصویرسنجی (اعم از هوایی و زمینی)، اطلاعات ارزشمندی فراهم می‌کند (Tomaštik et al., 2017). در پژوهش‌های جنگل، رایج‌ترین روش تهیه ابر نقاط سه‌بعدی، استفاده از اسکنر لیزر زمینی (Terrestrial Laser Scanner: TLS) یا لیدار هوایی است (Fallah et al., 2024). طی دو دهه گذشته، اسکنرهای لیزری و دوربین‌های دیجیتال با ایجاد ابر نقاط، امکان ساخت مدل‌های سه‌بعدی را در جنگل‌ها فراهم کرده‌اند (Weiser et al., 2022). بدون شک، فناوری اسکنر لیزر زمینی 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 پژوهش‌های بوم‌شناسی و پویایی جنگل فراهم کند (van Leeuwen & Nieuwenhuis, 2010; Trochta et al., 2017; Naghibi Rad et al., 2024). در پژوهش‌های علوم جنگل، اسکنر لیزر زمینی می‌تواند ابر نقاط سه‌بعدی را با دقت بسیار زیادی ثبت کند. با این حال در مناطق گسترده جنگلی به اسکن‌های متعددی از ایستگاه‌های ثابت نیاز است. همین موضوع، انعطاف‌پذیری این ابزار را کاهش می‌دهد. از طرفی، در بسیاری از مناطق جنگلی به دلیل عدم دسترسی به سیستم جهانی ناوبری ماهواره‌ای (Global Navigation Satellite System) مرتبط با TLS، این اسکن‌ها باید به صورت دستی ثبت شوند تا ابر نقاط سه‌بعدی جامع و قابل‌اعتمادی ایجاد شود (Bazhrang et al., 2024). یک راه‌حل جایگزین برای این مشکل، استفاده از تکنیک‌هایی مانند تصویرسنجی (Photogrammetry) است

(Fol et al., 2022; Murtiyoso et al., 2022).

روش تصویرسنجی یا فتوگرامتری، یکی از پرکاربردترین، ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین فناوری‌های غیرمخرب است که از تکنیک‌هایی برای تفسیر، اندازه‌گیری و مدل‌سازی اشیاء براساس تصاویر به‌دست‌آمده از آن‌ها تشکیل شده است (Rahimi Jafari et al., 2021). این روش مقرون‌به‌صرفه، جایگزین مناسب برای تولید ابر نقاط مترکم و سه‌بعدی‌سازی مبتنی بر دوربین است (Mokroš et al., 2018; Sadeghian et al., 2022a). تصویرسنجی با پیشرفت در الگوریتم‌های تناظریابی تصویر، دوربین‌ها و سخت‌افزار کامپیوتری، هزینه و زمان حضور در محل را کاهش می‌دهد و قابلیت مقایسه با اسکنرهای لیزری را دارا است (Forsman et al., 2016; Mokroš et al., 2018).

تصویرسنجی برد کوتاه (Close-range Photogrammetry) یکی از زیرمجموعه‌های تصویرسنجی است. در این روش، فاصله‌ی جسم از دوربین، کمتر از ۳۰۰ متر است و تصاویر را می‌توان در حالت‌های زمینی یا هوایی با روش‌هایی متفاوت اخذ کرد (Luhmann, 2010; Sadeghian et al., 2022b). تصویرسنجی برد کوتاه، اطلاعات مکانی دقیقی را برای استفاده در کاربردهای مختلف تولید می‌کنند. این روش‌ها در عین انعطاف‌پذیری زیاد، توانایی تولید اطلاعات مکانی با دقت قابل‌قبولی در حد میلی‌متری یا کمتر را دارند (Sajjadi, 2018). تصویرسنجی برد کوتاه، ابر نقاط را از یک سری تصاویر دارای هم‌پوشانی تولید می‌کند (Mokroš et al., 2018). این تصاویر می‌توانند زوج‌عکس‌ها را شامل شوند. زوج‌عکس‌ها باعث افزایش دقت و کیفیت مدل‌های سه‌بعدی می‌شوند و امکان تحلیل‌های دقیق‌تر را فراهم می‌کنند. در روش ایست-رو (Stop and go)، تصاویر در یک موقعیت ثابت اخذ می‌شوند. سپس، برای ادامه روند عکس‌برداری، دوربین به موقعیت بعدی منتقل و تصویر دیگر اخذ می‌شود (Panagiotidis et al., 2016; Mokroš et al., 2018). دومین رویکرد، روش سیار است. در این روش، کاربر، دوربین را نگه می‌دارد و با شات اتوماتیک، تصاویر در حین

پتانسیل تلفیق داده‌های پهپاد تصویرسنجی و LiDAR آیفون به‌منظور بهبود دقت مدل‌های ارتفاع تاج در جنگل‌های اندونزی نشان داد که این ادغام با نفوذ به شکاف درون تاج درختان می‌تواند قسمت میانی توده و حتی کف جنگل را ثبت کند و اطلاعات قابل‌اعتمادتری را برای تخمین ارتفاع درختان ارائه دهد (Umarhadi et al., 2023). مقایسه قابلیت تصویرسنجی زمینی با استفاده از گوشی آیفون X با داده‌های زمینی اندازه‌گیری‌شده شامل قطر برابر سینه و ارتفاع شش گونه درختی در دانشگاه شهرکرد نشان داد که توانایی دوربین تلفن همراه مذکور به‌منظور برآورد دقیق مؤلفه‌های کمی تک‌درختان، مناسب است (Akbari & Riahi Bakhtiari, 2023).

تصویرسنجی بردکوتاه از زمینه‌های نو در بحث سه‌بعدی‌سازی و مدل‌سازی در پژوهش‌های علوم جنگل است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های اندکی در این زمینه در داخل کشور به‌صورت آزمون و خطا و به‌شیوه تجربی انجام شده‌اند. هدف از پژوهش پیش‌رو، امکان‌سنجی تکنیک تصویرسنجی به‌عنوان جایگزین روش‌های سنتی در اندازه‌گیری جنگل است تا با استخراج مدلی (ابر نقطه متراکم) دقیق، کم‌هزینه و متناسب با اصول تصویرسنجی بردکوتاه زمینی بتوان در گام بعدی به اندازه‌گیری مؤلفه‌های ساختاری در درختان پرداخت. مهم‌ترین چالش در به‌کارگیری شیوه بردکوتاه زمینی، حل مسئله طراحی شبکه است (Hemmati et al., 2017). در این پژوهش سعی شده است که همه اصول تصویرسنجی بردکوتاه مورد توجه قرار گیرد. به همین سبب، تمرکز پژوهش پیش‌رو، مدل‌سازی با دقت کمتر از یک میلی‌متر بود که به این امر در پژوهش‌های مربوط به جنگل چندان توجه نشده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

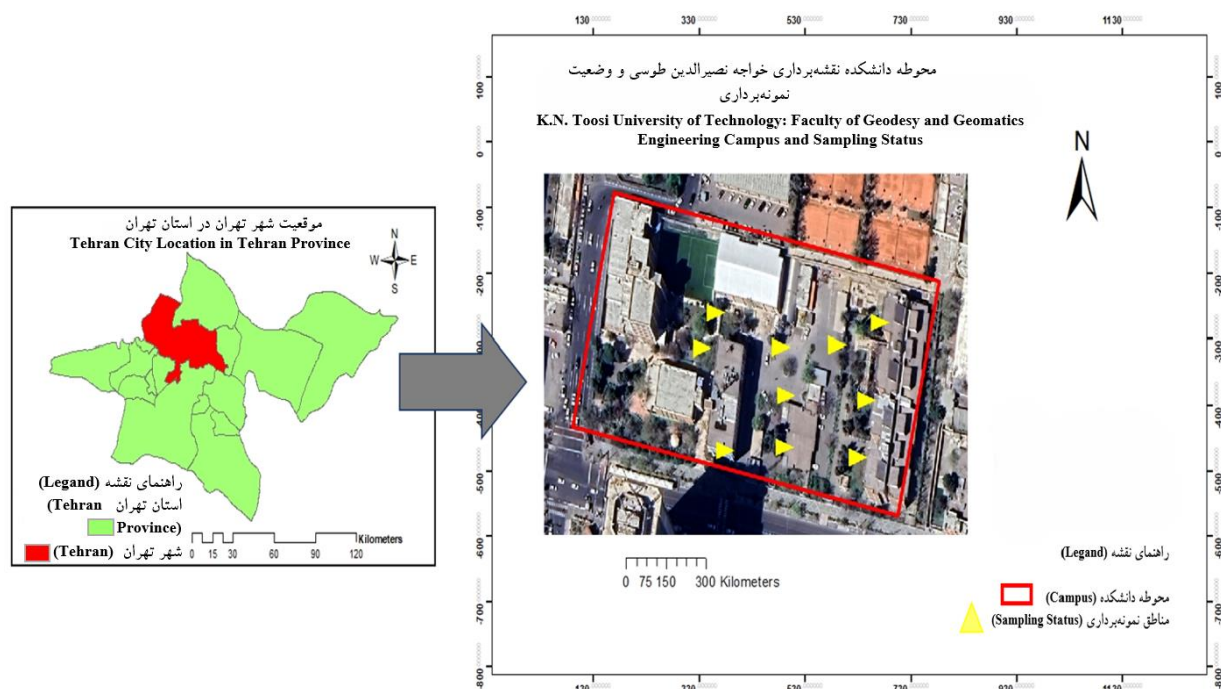
اندازه‌گیری‌های میدانی با انتخاب تصادفی ۱۰ اصله (Mulverhill et al., 2019) از درختان سوزنی‌برگ اغلب متشکل از سرو نقره‌ای (*Hesperocyparis arizonica*)

حرکت گرفته می‌شوند (Mikita et al., 2016; Mokroš et al., 2018).

در برخی از پژوهش‌ها از تصویرسنجی بردکوتاه زمینی برای برآورد مؤلفه‌های درختان و جنگل استفاده شده است. مقایسه زیست‌توده درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) (Lindl. در جنگل‌های چهارمحال و بختیاری با استفاده از دو روش قطع و تصویرسنجی زمینی نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین زیست‌توده برآوردشده از روش تصویرسنجی زمینی با شیوه قطع که دقیق‌ترین روش برآورد زیست‌توده است، وجود ندارد (Azizi et al., 2018). در مدل‌سازی تک‌درخت با عکس‌برداری از ۳۵ اصله در توده‌ای ناهمسال واقع در دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس و با الگوریتم SfM-MVS، صحت کلی مدل مذکور ۸۸/۵۷ درصد و RMSE برای قطر برابر سینه ۵/۶۶ درصد گزارش شد (Bayati et al., 2021). کاربرد تصویرسنجی بردکوتاه توسط گوشی همراه و با اجرای الگوریتم SfM-MVS به‌منظور برآورد قطر در ارتفاع میانه تنه، ارتفاع، ارتفاع تاج، قطر متوسط تاج، حجم تنه، حجم تاج و حجم کل از ۲۰ اصله نهال از گونه‌های مختلف نشان داد که دقت استفاده از روش مذکور برای اندازه‌گیری مشخصه‌های نام برده زیاد است (Sadeghian et al., 2022a). گفتنی است که به‌دلیل دشواری در دسترسی به قسمت‌های بالای تاج، استفاده از این روش برای برآورد حجم تاج درختان توصیه نمی‌شود. به‌کارگیری روش تصویرسنجی زمینی در برآورد مشخصه‌های قطر در ارتفاع میانه نهال، قطر در ارتفاع برابر سینه، متوسط قطر تاج و حجم ساقه نهال و درختان با مدل‌های تولیدشده از روش SfM-MVS نشان داد که RMSE در هر سه سطح نهال، تک‌درخت و قطعه‌نمونه کمتر از دو درصد است (Sadeghian et al., 2022b). در برآورد قطر برابر سینه درختان با استفاده از تصویرسنجی بردکوتاه و به‌کارگیری چند دوربین متصل به هم در ۲۵ قطعه‌نمونه نشان داد که بهترین عملکرد در سه قطعه‌نمونه با نرخ تشخیص ۷۶ درصد و قطر ۴۰ درصد از تنه‌ها با RMSE ۲/۸ تا ۹/۵ سانتی‌متر به‌دست آمد (Forsman et al., 2016). بررسی

درختان بین ۲۰ تا ۳۰ ساله بودند. این مجموعه آموزشی در موقعیت جغرافیایی $35^{\circ} 45'$ عرض شمالی و $51^{\circ} 24'$ طول شرقی با ارتفاع متوسط ۱۴۶۰ متر از سطح دریا در شهر تهران قرار دارد (شکل ۱).

کاج تهران (*Pinus brutia* var. *eldarica* (Medw.) Silba) (Bartel) (*Cupressus arizonica* Greene) (Greene) در فضای سبز دانشکده نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی طی تابستان ۱۴۰۱ انجام گرفت.



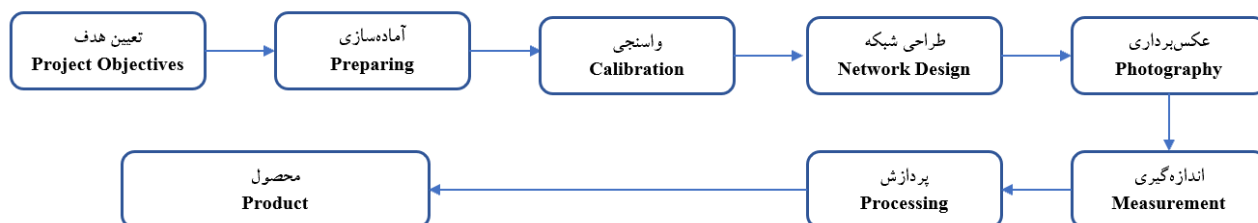
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شهر تهران و دانشکده مهندسی نقشه برداری در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Figure 1. The location of the studied area and Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering in K.N Toosi University of Technology, Tehran, Iran

آورده شده است. توضیحات مربوط به هر مرحله در ادامه آورده شده است.

روش پژوهش

شیوه اجرای یک پروژه تصویرسنجی در شکل ۲ آمده است.



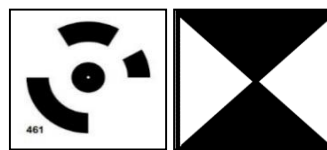
شکل ۲- فلوچارت مراحل کلی اجرای یک پروژه تصویرسنجی

Figure 2. Flowchart of the general steps of implementing a photogrammetry project

۱- تعیین هدف از اندازه‌گیری و خروجی‌های مورد نظر هدف از پژوهش پیش‌رو، رسیدن به ابر نقاط مترام درختان با دقت زیاد بود که به‌صورت اتوماتیک در محیط نرم‌افزار Metashape انجام شد.

۲- آماده‌سازی، تارگت‌گذاری و ایجاد سیستم کنترل انتقال سیستم مختصات به سیستم مختصات مرجع را عمل ایجاد سیستم کنترل گویند. در این پژوهش با توجه به اینکه از تصویرسنجی برد کوتاه استفاده شده است، با قرارگیری تارگت‌ها در صحنه عمل، سیستم مختصات تعیین شد. هدف از تارگت‌گذاری در سیستم‌های برد کوتاه، تعیین نقاط گره‌ای، نقاط کنترل یا ایجاد بافت است. تارگت‌های تصویرسنجی در واقع نقاط نشانه‌ای هستند که بر روی عارضه نصب می‌شوند. مرکز این تارگت‌ها به‌عنوان نقطه‌ای منحصربه‌فرد در تصاویر هم‌گرای اخذ شده از عارضه در قالب مشاهده‌های عکسی استخراج می‌شوند (Esmaili & Ebadi, 2018). در این پژوهش از تارگت‌های کددار و دست‌ساز استفاده شده است (شکل ۳). این تارگت‌ها با الگوی اضافی که شماره شناسایی یک نقطه منحصربه‌فرد را رمزگشایی می‌کنند، می‌توانند برای شناسایی خودکار استفاده شوند. کدها به‌صورت خطوط، حلقه‌ها و یا نواحی در اطراف مراکز تارگت‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۳-ب) (Luhmann et

al., 2014; Karimi et al., 2019). استفاده از تارگت‌های کددار، فرایند توجیه خارجی تصاویر را خودکار می‌کند (Esmaili & Ebadi, 2018). در این حالت، فرض می‌شود که همه مختصات نقاط شیئی، مؤلفه‌های توجیه داخلی و اضافی دوربین و مؤلفه‌های توجیه خارجی تصاویر مجهول است و فقط تعدادی کافی تصویر هم‌گرا از شیء موجود است. در صورتی که در هر تصویر حداقل چهار تارگت کددار با پراکندگی مناسب ظاهر شود، می‌توان مقادیر اولیه مؤلفه‌های مجهول را به‌طور تقریبی محاسبه کرد و پس از سرشکنی دسته پرتو، مقادیر نهایی آن‌ها را برآورد کرد (Fraser, 2006; Saadatseresht & Zarrinpanjeh, 2009). از آنجایی که بافت ضعیف در تنه درختان، اطلاعات کافی را در زمان پردازش تصاویر نمی‌دهد، کمک گرفتن از نشانگرها از بدیهیات این پژوهش است. از طرفی به‌سبب ناصافی پوست و انحنای تنه درختان، امکان نصب تارگت‌های دست‌ساز رفرتور (شکل ۳-الف) و کددار (شکل ۳-ب) به راحتی میسر نشد، بنابراین به‌منظور قرارگیری اندازه‌ها در مقیاس واقعی و نیز برای جهت‌گیری مناسب مدل و ارزیابی دقت به‌ترتیب طول کنترل و طول چک طراحی شد. سپس، فاصله بین تارگت‌ها توسط کولیس اندازه‌گیری شد. در نهایت، آن‌ها در ارتفاع‌های مختلف دور تا دور تنه درخت نصب شدند (شکل‌های ۴ و ۵).



(الف) (ب)
(a) (b)

شکل ۳- الف) تارگت دست‌ساز رفرتور، ب) تارگت کددار

Figure 3. a) Refractor hand-made target, b) Coded target



شکل ۴- طول تارگت و طول چک‌های نصب‌شده دور تا دور تنه درخت
Figure 4. The target and checks lengths installed all around the tree stem



شکل ۵- وضعیت پراکنش طول تارگت و طول چک‌های نصب‌شده از نمای جلو در محوطه عکس‌برداری
Figure 5. Distribution of target and check length in front view of photogrammetry area

همراه با مؤلفه‌های توجیه خارجی و مختصات زمینی نقاط
گره‌ای با معیار کمترین مربعات وزن‌دار باقی‌مانده‌های
مشاهده‌ها برآورد شد. این مدل در واقع مؤلفه‌های فیزیکی

۳- واسنجی (Calibration)
در این پژوهش، واسنجی دوربین از یک چندجمله‌ای
مدل Brawn در سرشکنی به‌روش Bundle adjustment

مستله طراحی شبکه است (Hemmati et al., 2017). اصل اساسی در طراحی شبکه تصویرسنجی، نزدیکی زاویه بین محورهای نوری دوربین‌ها به زاویه تیل (Tilt angle) است تا نتایج بهتری حاصل شود، بنابراین تحذب ایستگاه‌های تصویربرداری و زاویه مناسب آن‌ها نسبت به عارضه باید تا حد ممکن تأمین شود (Esmaeili & Ebadi, 2018). مواردی مانند استحکام هندسی شبکه، تعداد ایستگاه‌های دوربین، زاویه دید دوربین، عمق میدان، قدرت تفکیک، تعداد تصاویر، تکرار آن‌ها و تحلیل خطاها از جمله مواردی بودند که در پژوهش پیش‌رو مدنظر قرار گرفتند.

۵- عکس‌برداری، نوردهی و تنظیمات دوربین

در این پژوهش، عکس‌برداری توسط دوربین فوجی فیلم مدل FinePix Real 3D W1 انجام شد. مشخصات کلی و تنظیمات این دوربین در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. عکس‌برداری در شرایط نور کافی به نحوی که کمترین سایه اتفاق افتد، از ساعت ۱۱ تا ۱۲:۳۰ ظهر در شرایط روزهای به‌طور کامل آفتابی (با اجتناب از روزهای ابری و شرایط وزش باد) انجام شد. تصاویر در حالت ایست-رو درحالتی که فاصله‌های بین ایستگاه‌های عکس‌برداری نامنظم بود و با گردش ۳۶۰ درجه به دور درخت به صورت زوج تصویر در حالت فوکوس دستی بدون استفاده از سه پایه و با هم پوشانی حداقل ۸۰ درصد تصاویر اخذ شدند. فاصله تقریبی دوربین از درختان حداقل یک متر بود. برای برخی از درختان با ارتفاعی بیشتر یا به دلیل وجود مانع، دوربین در فاصله دو متری از درختان قرار گرفت. با توجه به اینکه در تصویرسنجی برد کوتاه، فاصله‌ی عارضه تا دوربین کم است، از تنظیمات خودکار دوربین استفاده نمی‌شود. بلکه دوربین به صورت دستی تنظیم می‌شود. تنظیمات ISO و f/stop، دو مورد از مهم‌ترین تنظیمات نور هستند. ISO معیاری برای تعیین حساسیت حسگر دوربین به نور است و f/stop با تنظیم اندازه دیافراگم، میزان نوری که به حسگر می‌رسد را تنظیم می‌کند. پیش از عکس‌برداری، دوربین متناسب با شرایط پروژه تنظیم شد (شکل ۶).

ثابتی را برای مدل‌سازی هندسه دوربین در نظر می‌گیرد (Sharifi & Saadatseresht, 2022). در این پژوهش از نرم‌افزار Agisoft استفاده شد که مؤلفه‌های ترفیع موقعیت هر دوربین به صورت اتوماتیک محاسبه می‌شود. اگر کاربر بخواهد در یک پروژه، این مؤلفه‌ها را وارد کند، امکان واردسازی x, y و z مرکز دوربین وجود دارد، اما نمی‌توان مؤلفه‌های وضعیت را به سادگی در هر ایستگاه وارد کرد، بنابراین در این نرم‌افزار از الگوریتم Self-calibration و سرشکنی باندل برای تعیین توأم مؤلفه‌های ترفیع و تقاطع (مختصات زمینی) استفاده شد (Emami & Rostami, 2022).

مقادیر اولیه در تصویرسنجی برد کوتاه از طریق معادله‌های تبدیل خطی مستقیم (Direct Linear Transform) تعیین می‌شود. این معادله‌ها، ۱۱ مؤلفه دارند. آن‌ها شامل سه مؤلفه توجیه داخلی، شش مؤلفه توجیه خارجی و دو مؤلفه افاین (Affine) هستند. مؤلفه‌های توجیه داخلی با روش ترانسفورماسیون هم‌فاصله و هم‌زاویه (Conformal) و روش کمترین مربعات محاسبه شدند. عکس‌های مورد استفاده Block invariant در نظر گرفته شدند. زیرا این کار از Over parameterization معادله‌ها جلوگیری می‌کند و افزایش دقت و اطمینان به محاسبه‌های واسنجی را به دنبال دارد (Amiri Parian & Azizi, 2005). از طرفی، معادله ریاضی DLT به همراه مؤلفه‌های اضافی به منظور واسنجی و توجیه خارجی به کار گرفته شدند (Amiri Parian & Azizi, 2005).

۴- طراحی شبکه و جانمایی دوربین

منظور از طراحی شبکه به طور عمومی، طراحی موقعیت‌هایی است که دوربین در آن‌ها قرار می‌گیرد و تصاویر اخذ می‌شوند. البته در بحث طراحی شبکه مواردی مانند جانمایی دوربین نیز مطرح می‌شود. هدف از جانمایی دوربین، رسیدن به دقت‌های خواست کاربر است که در بحث جانمایی پوشش کامل عارضه مطرح می‌شود. مهم‌ترین چالش در به کارگیری شیوه‌های تصویرسنجی برد کوتاه،

جدول ۱- مشخصات دوربین مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Specifications of the camera used in the research

General specifications of the camera	Weight: 260 grams - Dimensions: (26 x 68 x 124) mm
Sensor and image	CCD sensor with dimensions: (4.55 x mm 17.6) - Sensor effective accuracy: 10 megapixels - Maximum resolution: 2376 x 3648 - Processor: RP (Real photo) 3D
Photography	Shutter speed from 1.1000 seconds to 1.4 seconds
Screen	2.8 inches with 230,000- dots does not have a touch screen
Input and output	Other specifications: storage on SD/ SDHC card, internal - NP-95 rechargeable lithium ion battery and charger

جدول ۲- تنظیمات دوربین مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Camera settings used in the research

Camera settings	iso	f/stop	Shutter	Focal length
	100	f/8 & f/5	1/250	3/6



شکل ۶- فلوچارت مراحل تنظیمات دوربین و نوردهی

Figure 6. Flowchart of camera settings and exposure

خودکار در مدل‌سازی سطحی اشیاء و قابلیت اندازه‌گیری آن‌ها به ابزارهایی برای تعیین خواص غیرهندسی (توصیفی) اشاره دارد که گرافیک و پردازش کامپیوتری از آن جمله هستند. گرافیک کامپیوتر می‌تواند تصاویر را از توصیف‌های مدل و بصری‌سازی کامپیوتری با فرایند معکوس محاسبه کند (مدل‌سازی شیء از تصاویر) (Sajjadi, 2018). در این پژوهش، پردازش تصاویر توسط نرم‌افزار Metashape انجام گرفت. پس از ورود تصاویر به نرم‌افزار مذکور و کنترل بصری آن‌ها، تراز کردن تصاویر و تناظریابی انجام شد.

تناظریابی نقاط کنترل و چک

هدف از تناظریابی، یافتن مؤلفه‌های ایجاد ارتباط هندسی و طیفی بین دو تصویر مختلف است (Amiri, 2005). هنگامی که یک نقطه یا یک خط در چندین تصویر شناسایی می‌شود، باید اطمینان داشت که آن به‌طور دقیق همان نقطه یا خط است. این فرایند به‌نام ارجاع نقاط متناظر، تصاویر هم‌پوشان را مشخص می‌کند.

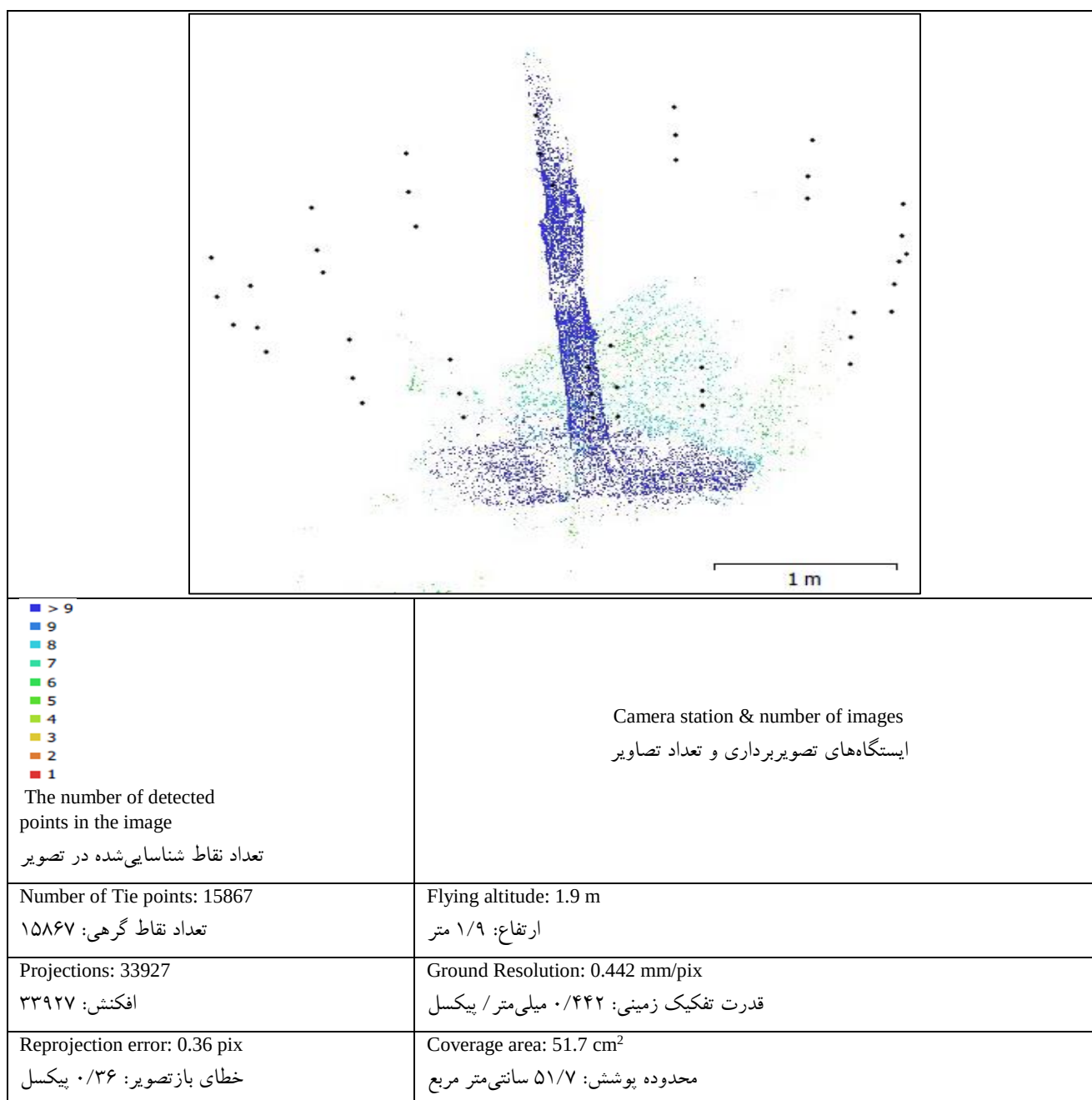
تعیین ایستگاه‌های عکس‌برداری

موقعیت و توجیه دوربین باید به گونه‌ای تعیین شود که هر نقطه حداقل توسط سه عکس پوشش داده شود. افزایش ایستگاه‌های تصویربرداری به‌منظور ایجاد افزونگی در داده‌ها، افزایش درجه آزادی، پوشش مناسب عارضه در همه جهات و در نتیجه، افزایش صحت در تعیین مختصات نقاط روی عارضه، توجیه‌پذیر است. درجه آزادی به تعداد مؤلفه‌هایی اشاره دارد که می‌توانند به‌صورت مستقل تغییر کنند. این مفهوم در تعیین دقت و کیفیت نتایج، اثرگذار است (Esmaeili & Ebadi, 2018).

براساس طراحی شبکه ایستگاه‌های عکس‌برداری، تصویرسنگی برد کوتاه از ۴۵ ایستگاه هم‌گرا انجام شد (شکل ۷). در تصویرسنگی برد کوتاه برای افزایش دقت بعد سوم به‌طور معمول تصاویر به‌صورت هم‌گرا اخذ می‌شوند (Kianejad et al., 2009).

۶- پردازش

پردازش با واسنجی دوربین شروع می‌شود. فرایندهای



شکل ۷- وضعیت قرارگیری دوربین و هم‌پوشانی تصاویر از گزارش نرم‌افزار Metashape

Fig 7. The position of the camera and the overlapping of the images from the Metashape report

انجام می‌شود. مقدار زمان پردازش به تعداد عکس‌ها و تعداد نقاط مشخص شده بستگی دارد (Sajjadi, 2018). در هر پروژه، بهترین عکس‌ها برای این منظور انتخاب شدند و در نرم‌افزار به تناظریابی نقاط طول کنترل و طول چک پرداخته شد. عدم شکل هندسی مشخص، پوست ناصاف و انحنا در

پس از مشخص کردن و علامت‌گذاری حداقل سه زوج نقطه (نقاط نظیر در تصاویر هم‌پوشان) به وسیله مکان‌نما (Cursor) و به صورت دستی، سه نقطه، شش معادله را تولید می‌کند. در نتیجه، اطلاعات کافی برای حل وضعیت دوربین کسب می‌شود و شناسایی نقاط دیگر به صورت خودکار

گرهی، ایجاد ابر نقاط متراکم و مدل سازی سه بعدی در نرم افزار Metashape اجرا شد.

بررسی دقت مدل تولیدشده و تجزیه و تحلیل آماری دقت مدل از طریق مقایسه مختصات زمینی طول چک و طول کنترل با مختصات محاسبه شده توسط تصویرسنگی به دست آمد. در اینجا وزن ها که جزئی از مشاهده ها بودند، وارد شدند تا سرشکنی انجام شود. علاوه بر اینکه المان های توجیه داخلی و خارجی به دست آمد، نقاط کنترل نیز جابه جا شدند.

به منظور مقایسه داده های پرآوردی و داده های واقعی، آماره های مجذور میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error: RMSE)، درصد مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE%)، میانگین خطای مطلق (MAE) و درصد میانگین خطای مطلق (MAE%) به کار برده شد که از طریق رابطه های (۱) تا (۴) محاسبه شدند.

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

رابطه (۱)

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

رابطه (۲)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

رابطه (۳)

$$MAE\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right| \times 100$$

رابطه (۴)

به کار گرفته شده، تعداد تارگت های طول تارگت، تعداد طول کنترل ها، هم پوشانی بین تصاویر و نیز آماره خطای ریشه (Root Mean Square: RMS) به تفکیک هر کدام از ۱۰ درخت تصویربرداری شده آورده شده است. RMS دقت داخلی محاسبات را به خوبی نشان می دهد. گفتنی است که همه

تنه ی درختان سبب شد تا از تعریف تارگت به صورت نقاط کنترل جلوگیری شود و طول کنترل تعریف شود. گفتنی است که نقاط کنترل با هدف متریک کردن خروجی ها و بهبود نتایج تهیه می شوند. یکی از روش های اندازه گیری مختصات نقاط کنترل، تعیین مقیاس توسط معرفی طول کنترل است. هر چند این روش، خطاهای غیرسیستماتیک را حل نمی کند، اما مشکل مقیاس را رفع می کند. در هر پروژه برد کوتاه علاوه بر نقاط کنترل از نقاط چک استفاده شد. در نهایت، از منوی Scalebars دو تارگت انتخاب و فاصله بین آن ها را مشخص شد. نسبت یک سوم از این طول های کنترل به عنوان طول چک در نظر گرفته شد تا بدین صورت در محاسبات دخالت داده نشوند (Emami & Rostami, 2022).

تولید ابر نقطه متراکم

به طور کلی، گردش کار برای تولید ابر نقاط متراکم شامل برآورد مؤلفه های توجیه، هم ترازای تصاویر، تولید نقاط

که در آن ها، $\hat{y}_i$ ، مقدار اندازه گیری شده، y_i ، مقدار برآورده شده و n تعداد درختان هستند.

نتایج

در جدول ۳، تعداد عکس، تعداد تارگت های

مؤلفه‌های دوربین در طول پژوهش، ثابت نگه داشته شدند. در جدول ۵، نتایج مربوط به آماره‌های RMSE، اطلاعات مربوط به تعداد طول چک و تعداد طول کنترل در نظر گرفته شده به تفکیک هر کدام از درختان تصویربرداری شده و نیز تجمیع خطا در جدول ۴ آمده است.

جدول ۳- اطلاعات اولیه از وضعیت عکس‌برداری درختان

Table 3. Basic information about the status of tree photography

Tree number	Number of photos	Focal length	Number of targets	Number of length targets	Effective overlap	RMS (Pix)
1	45	6.3	16	8	2.31	0.586
2	45	6.3	16	8	2.2	0.453
3	45	6.3	14	7	2.13	0.377
4	45	6.3	14	7	2.17	0.667
5	45	6.3	12	6	2.2	0.695
6	45	6.3	16	8	2.36	0.565
7	45	6.3	16	8	2.18	0.458
8	45	6.3	16	8	2.15	0.545
9	45	6.3	16	8	2.17	0.441
10	45	6.3	14	7	2.25	0.376

جدول ۴- خطای طول چک و طول کنترل در درختان اندازه‌گیری شده

Table 4. Error of check length and control length in measured trees

Tree number	Number of check lengths	Total check length error (mm)	Total control length error (mm)	Number of control lengths
1	3	1.28	0.509	5
2	3	0.466	0.412	5
3	2	0.82	0.28	5
4	2	0.803	0.743	5
5	2	0.759	0.663	6
6	3	0.77	0.257	8
7	3	0.131	1.446	8
8	3	0.756	1.24	8
9	3	0.422	0.406	8
10	2	0.129	0.167	6
Mean		0.63	0.61	

جدول ۵- آماره‌های مربوط به ارزیابی طول چک

Table 5. statistics related to check length evaluation

Statistical index (cm)	RMSE (cm)	RMSE%	MAE (cm)	MAE%
Check length	17.3	16.79 %	1.0	10.3

بحث

(Forsman et al., 2016). حتی شناسایی درختان و گیاهان در مناطق شهری نیز به دلیل بافت شلوغ و وجود ساختمان‌های بلند، محدودیت‌های خاص خود را دارد (Esfahani & Mohammadzade, 2016). با وجود این، تصویرسنجی زمینی به دلایلی مانند سادگی، هزینه کم و سرعت اجرای آن در برآورد مؤلفه‌های جنگلی به یکی از

اندازه‌گیری درختان با استفاده از تصویرسنجی، یک روش در حال توسعه است (Forsman et al., 2016). تصویربرداری در محیط جنگل به دلیل تراکم درختان، پایه‌های بلند در جنگل‌های طبیعی، مانع شدن شاخه‌ها و نیز پوشش درختچه‌ای و علفی، بسیار چالش‌برانگیز است

دقیق‌ترین روش‌های برداشت مؤلفه‌های درختان در جنگل تبدیل شده است (Piermattei et al., 2019).

در پژوهش پیش‌رو سعی شد تا با ارائه روش تصویرسنجی برد کوتاه شامل یک دوربین تصویربرداری رومبی (فوجی‌فیلم)، ترکیبی از تارگت‌های دست‌ساز بازتاباننده (رفرکتور) و کددار، بیشترین دقت حاصله از تصویرسنجی برد کوتاه در مدل تولیدی از ابر نقطه تنه درختان به دست آید. دقت نقاط کنترل و دقت نقاط چک در این روش به کمتر از یک میلی‌متر ($0/6$ میلی‌متر) رسید (جدول ۴). در پژوهشی مشابه، Mokroš و همکاران (۲۰۱۸)، تارگت‌های کددار را به منظور مقیاس‌بندی و جهت‌گیری ابر نقاط از تنه درختان استفاده کردند. این پژوهشگران با استفاده از از نه برگه پرینت‌شده تارگت‌های کددار (دو تارگت در هر برگه پرینت‌شده) گزارش کردند که برای مقیاس‌بندی فقط یک تارگت کافی است. آن‌ها در برآورد قطر برابر سینه درختان با استفاده از تکنیک تصویرسنجی، دقت کمتر از یک میلی‌متر و RMSE را $16/67$ درصد گزارش کردند که مشابه با نتایج پژوهش پیش‌رو است (جدول ۵). رسیدن به دقت کمتر از یک میلی‌متر در تصویرسنجی علوم جنگل، کمتر گزارش شده است. این در حالی است که در مباحثی مانند تصویرسنجی صنعتی، چنین دقتی رایج است. Sadeghian و همکاران (۲۰۲۲b) نیز در برآورد حجم تنه تک‌درختان، RMSE را در بهترین حالت $17/69$ درصد گزارش کردند.

برای قضاوت در حالت تک‌درخت می‌توان از خطای تصویر مجدد که در واحد RMS است، استفاده کرد. براساس نتایج جدول ۳، کمترین مقدار RMS ($0/376$ پیکسل) در درخت شماره ۱۰ و بیشترین مقدار آن ($0/695$ پیکسل) در درخت شماره ۵ مشاهده شد. گفتنی است که قضاوت فقط با این مؤلفه کافی نیست. زیرا نقاط پرت در RMS به احتمال زیاد به دلیل جلوگیری از اربابی ناشی از تشخیص نقاط خارجی حذف نشده‌اند (Jennings & Black, 2012).

کیفیت تصاویر و زمان عکس‌برداری در تصویرسنجی درختان، بسیار مهم است. زیرا عکس‌ها باید در یک زمان

خاص از روز (ظهر با آفتاب بالا) و در مدت زمانی تقریبی حدود ۳۰ دقیقه گرفته شوند. تغییر جهت تابش خورشید یا حتی وجود ابر در آسمان بر کیفیت تصاویر اثر می‌گذارد (Bayat, 2022). چالش‌های مرتبط با تصویرسنجی درختان و جنگل‌ها تحت تأثیر عواملی مانند ناهمواری پوست تنه درختان و بازتابش ضعیف بافت چوب قرار دارد. بافت تکراری، ضعیف و نویزی در فرایند تناظریابی در برخی از قسمت‌های تصویر، مشکلاتی را به وجود می‌آورد (Ghannadi et al., 2015). زیرا هرچه بافت در تصاویر متفاوت‌تر باشد، تعداد نقاط متناظر بیشتری توسط الگوریتم‌های تناظریابی یافت می‌شوند (Emami & Rostami, 2022). در این راستا، Bayat (۲۰۲۲) بیان کرد که بازتاب بیش‌ازحد نور در تصویرسنجی درختان می‌تواند توانایی تحلیل شکل یا بافت سطح را مختل کند. این امر به این معنی است که تشخیص نقاط کلیدی ممکن نخواهد بود و نواحی سایه‌دار مدل، مانع از توسعه صحیح در هر دو نوع مدل ابر نقطه متراکم و شبکه می‌شود.

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش پیش‌رو، تصویرسنجی برد کوتاه برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های کمی درختان در شرایط نوری مناسب از نظر هزینه، سهولت در اندازه‌گیری و تهیه مدل‌های سه‌بعدی از وضعیت درختان در حالت تک‌درخت، قابل‌توصیه است. در پژوهش‌های آینده می‌توان از دوربین‌های صنعتی به جای دوربین‌های معمولی استفاده کرد که به افزایش دقت واسنجی و دقت نهایی مدل منجر می‌شود. عوامل متعددی مانند شرایط نوری هنگام عکس‌برداری، کیفیت تصاویر، میزان هم‌پوشانی آن‌ها، زاویه عکس‌برداری و مؤلفه‌های قابل‌تغییر در دوربین باید آزمون شوند. برای تعداد درخت زیاد، روش‌های تصویرسنجی پهباد، دکل بستن (Setting up targetes) و یا رینگ (Ring targetting) قابل‌توصیه است. دکل بستن شامل نصب دکل‌ها یا نقاط مرجع در مکان‌های مشخص است تا به عنوان نقاط کنترل در عکاسی و پردازش داده‌ها استفاده شود. رینگ نیز به شکل خاصی از طراحی نقاط اشاره دارد که به صورت دایره‌ای یا حلقه‌ای قرار می‌گیرند تا امکان تشخیص و

چالش‌ها در پژوهش‌های آینده مدنظر قرار گیرد.

سیاسگزاری

این پژوهش برگرفته از طرح شماره «۴۰۱۵۲۲۸» تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (بنیاد ملی علم ایران) است.

پردازش بهتر داده فراهم شود. درنهایت، به‌منظور ارتقای شبکه تصویرسنجی بهینه و برای برآورد مؤلفه‌های کمی و هندسی و نیز سه‌بعدی‌سازی درختان پیشنهاد می‌شود که الگوریتم مدنظر توسعه یابد. وجود موانع طبیعی مانند درختچه‌ها و بوته‌ها، باد و تغییرات نوری، بخشی از چالش‌های این پژوهش بودند. امید است که حل این

References

- Akbari, M. and Riahi Bakhtiari, H.R., 2023. The use of terrestrial photogrammetry in order to estimate the quantitative characteristics of single trees in urban areas. Proceedings of Third National Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Zagros. Shahrekord, Iran, 6-7 Mar. 2023: 8p (In Persian).
- Amiri Parian, J. and Azizi, A., 2005. Designing and implementing a close-range digital photography system for automatic reconstruction of human face surface. Journal of the College of Engineering, 38(6): 861-871 (In Persian).
- Azizi, Z., Hosseini, A. and Iranmenesh, Y., 2018. Estimating biomass of single oak trees using terrestrial photogrammetry. Journal of Environmental Science and Technology, 19(4): 81-93 (In Persian with English summary).
- Bayat, M., 2022. Designing the optimal ground imaging network for 3D modeling in order to extract geometric variables from urban trees. M.Sc. thesis, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, 85pp (In Persian with English summary).
- Bayati, H., Najafi, A., Vahidi, J. and Jalali, S.Gh., 2021. 3D reconstruction of uneven-aged forest in single tree scale using digital camera and SFM-MVS technique. Scandinavian Journal of Forest Research, 36(2-3): 210-220.
- Bazhrang, Z., Naghdi, R., Ghajar, I. and Fallahi, S., 2024. Accuracy and precision evaluation of global positioning system methods for forest roads surveying (Case study: Javaherdeh forest, Ramsar). Iranian Journal of Forest, 16(1): 121-135 (In Persian with English summary).
- Emami, H. and Rostami, S.Gh., 2022. Analysis and comparison of the exactness of specialist drone-based software products in urban and exurban region. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data, 31: 63-87 (In Persian with English summary).
- Esfahani, M. and Mohammadzade, A., 2016. Fusion of pixel-based and object-based analysis in order to buildings and trees detection in urban area from LiDAR and optic data. Journal of Geomatics and Technology, 6(2): 27-42 (In Persian with English summary).
- Esmaeili, F. and Ebadi, H., 2018. Determination of car body deformation due to collision using close-range photogrammetry. Journal of Geospatial Information Technology, 6(1): 117-129 (In Persian with English summary).
- 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. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-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.
- Fraser, C.S., 2006. Evolution of network orientation procedure. Proceedings of ISPRS Commission 5th Symposium on Image Engineering and Vision Metrology. Dresden, Germany, 25-27 Sep. 2006: 114-120.
- Ghannadi, M.D., Saadatseresht, M. and Eftekhary, A., 2015. Improving the TerraSAR-X image matching using textural image features. Journal of Radar: 2(4): 9-20 (In Persian with English summary).
- Grussenmeyer, P., Kuhlmann, H. and Rottensteiner, F., 2022. Advances in 3D laser scanning and digital photogrammetry for forest applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 186: 1-15.
- Hemmati, Z., Ebadi, H., Hosseini Naveh Ahmadabadian, A. and Esmaeili, F., 2017. Presented a new algorithm for network design and path planning it captures drone

- modeling purposes archaeological sites. *Journal of Geomatics and Technology*, 7(2): 167-180 (In Persian with English summary).
- Jennings, A. and Black, J., 2012. Texture-based photogrammetry accuracy on curved surfaces. *AIAA Journal*, 50(5): 1060-1071.
 - Karimi, M., Sadeghi Niaraki, A. and Hosseini Naveh, A., 2019. Comparison of different targets used in augmented reality applications in Ubiquitous GIS. *Journal of Geospatial Information Technology*, 7(2): 43-62 (In Persian with English summary).
 - Kianejad, A., Ebadi, H., Varshosaz, M. and Mojarradi, B., 2009. Design and development of a new hybrid area and feature-based image matching method for relative orientation in close range photogrammetry. *Journal of the College of Engineering*, 43(4): 455-466 (In Persian with English summary).
 - Luhmann, T., 2010. Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6): 558-569.
 - Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. and Boehm, J., 2014. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Walter de Gruyter, Berlin, Germany, 684p.
 - Marzulli, M.I., Raunonen, P., Greco, R., Persia, M. and Tartarino, P., 2020. Estimating tree stem diameters and volume from smartphone photogrammetric point clouds. *Forestry*, 93(3): 411-429.
 - Mikita, T., Janata, P. and Surový, P., 2016. Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial close-range photogrammetry. *Forests*, 7(8): 165.
 - Mokroš, M., Výboštok, J., Tomašík, J., Grznárová, A., Valent, P., Slavík, M. and Merganič, J., 2018. High precision individual tree diameter and perimeter estimation from close-range photogrammetry. *Forests*, 9(11): 696.
 - Mulverhill, C., Coops, N.C., Tompalski, P., Bater, C.W. and Dick, A.R., 2019. The utility of terrestrial photogrammetry for assessment of tree volume and taper in boreal mixedwood forests. *Annals of Forest Science*, 76: 83.
 - Murtiyoso, M., 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/W1-2022: 185-190.
 - 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).
 - Panagiotidis, D., Surový, P. and Kuželka, K., 2016. Accuracy of Structure from Motion models in comparison with terrestrial laser scanner for the analysis of DBH and height influence on error behaviour. *Journal of Forest Science*, 62(8): 357-365.
 - Piermattei, L., Karel, W., Wang, D., Wieser, M., Mokroš, M., Surový, P., ... and Hollaus, M., 2019. Terrestrial structure from motion photogrammetry for deriving forest inventory data. *Remote Sensing*, 11(8): 950.
 - Rahimi Jafari, F., Habibi, F. and Moazen, S., 2021. Introducing the non-destructive method of photogrammetry in the study and survey of historical monuments. *Journal of Research on Archaeometry*, 7(2): 135-158 (In Persian with English summary).
 - Saadatseresht, M. and Zarrinpanjeh, N., 2009. Design and automatic recognition of the coded targets in vision metrology systems. *Journal of the College of Engineering*, 43(4): 391-404 (In Persian).
 - Sadeghian, H., Naghavi, H., Maleknia, R. and Soosani, J., 2022a. Estimating the quantitative characteristics of seedlings using terrestrial close-range photogrammetry. *Journal of Forest Research and Development*, 7(4): 639-651 (In Persian with English summary).
 - Sadeghian, H., Naghavi, H., Maleknia, R., Soosani, J. and Pfeifer, N., 2022b. Estimating the attributes of urban trees using terrestrial photogrammetry. *Environment Monitoring Assessment*, 194: 625.
 - Sajjadi, S.Y., 2018. The proposed algorithm for modelling of ancient monuments and cultural heritage by using of hyperspectral images data and digital terrestrial photogrammetry. *Journal of Geospatial Information Technology*, 5(4): 1-21 (In Persian with English summary).
 - Sharifi, A. and Saadatseresht, M., 2022. Modeling of photographic residues from aerial triangulation of UAV photogrammetric network and its evaluation. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data*, 31: 23-38 (In Persian with English summary).
 - Steier, J., Goebel, M. and Iwaszczuk, D., 2024. Is your training data really ground truth? A quality assessment of manual annotation for individual tree crown delineation. *Remote Sensing*, 16(15): 2786.
 - Tomašík, J., Saloň, Š., Tunák, D., Chudý, F. and Kardoš, M., 2017. Tango in forests – An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141: 109-117.
 - Trochta, J., Krůček, M., Vršlka, T. and Král, K., 2017. 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PLoS ONE*, 12(5): e0176871.
 - Umarhadi, D.A., Senawi, Wardhana, W., Soraya, E., Jihad, A.N. and Ardiansyah, F., 2023. Can iPhone/iPad LiDAR data improve canopy height model derived from UAV?

- BIO Web of Conferences 80: 03003.
- 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.
- Weiser, H., Schäfer, J., Winiwarter, L., Krašovec, N., Fassnacht, F. and Höfle, B., 2022. Individual tree point clouds and tree measurements from multi-platform laser scanning in German forests. Earth system science data, 14, 2989-3012.