J. RS. GEOINF. RES. 3(1): 119-138, Winter & Spring 2025

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research
(JRSGR)
Homepage: jrsgr.sru.ac.ir

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Evaluation of Parameters Affecting Aerotriangulation Accuracy in Corridor Mapping

M. *Ahmadi Asoor*, *A. Afary, *E. Ghanbari Parmehr***

Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Received: 15 January 2025
Reviewed: 18 February 2025
Revised: 05 May 2025
Accepted: 22 May 2025

KEYWORDS:
UAV photogrammetry
Corridor mapping
Ground control point
Camera calibration
Triangulation

* Corresponding author
afary@nit.ac.ir
(+98912) 2894189

ABSTRACT

Background and Objectives: Using UAV photogrammetry for corridor mapping in areas with significant differences between their longitudinal and lateral dimensions reduces the geometric strength of the imaging network and introduces numerous challenges. These challenges in UAV photogrammetry lead to increased project time and costs, as well as higher errors in triangulation calculations. Several parameters—such as the distribution and number of ground control points, camera calibration methods, the number of flight strips, and the use of precise camera positions obtained from the Global Navigation Satellite System (GNSS)—affect triangulation accuracy. This study examines the impact of these parameters on triangulation accuracy in corridor areas.

Methods: The evaluation of parameters affecting triangulation accuracy was conducted on two corridor areas with lengths of two and a half and five kilometers. In this research, three parameters—distribution and number of ground control points, camera calibration methods, and photogrammetry software—were examined on a single flight strip, and multiple flight strips were used solely to evaluate the impact of the number of flight strips on triangulation accuracy. The results were assessed based on the root mean square errors of planimetric and altimetric errors at the check points. In this study, the photogrammetry software Pix4D and Agisoft Metashape were used for triangulation calculations.

Findings: The evaluation results regarding the impact of the distribution and number of control points showed that using eight control points—distributed as follows: two points at the beginning, two points at the end, two in the middle of the corridor (all opposite each other across the width), and two additional points in between—can improve triangulation accuracy compared to other configurations. Additionally, using the self-calibration method for the camera in triangulation calculations yields more accurate results than using pre-calibrated cameras. Moreover, employing more than one flight strip increases the accuracy of triangulation results.

Conclusion: By appropriately designing ground control points throughout the entire corridor and applying the self-calibration method for camera calibration—without relying on precise image center coordinates—it is possible to achieve an accuracy of less than one meter for producing engineering maps at scales of 1:500, 1:1000, and 1:2000, with contour intervals of 0.5 meters, 1 meter, and 2 meters, respectively.

NUMBER OF REFERENCES	NUMBER OF FIGURES	NUMBER OF TABLES
34	15	12

مقاله پژوهشی

ارزیابی پارامترهای موثر بر دقت مثلث‌بندی هوایی در نقشه برداری از مناطق راهگذر

مبینا احمدی آسور، علیرضاآفری*، عبادت قنبری پرمهر

گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: استفاده از فتوگرامتری پهپاد در نقشه‌برداری راهگذر از مناطقی که تفاوت زیاد بین بعد طولی و عرضی آن وجود دارد موجب پایین آمدن استحکام هندسی شبکه تصویربرداری و چالش‌های متعددی می‌شود. بروز این چالش‌ها در فتوگرامتری پهپاد، موجب افزایش زمان و هزینه‌ی انجام پروژه و همچنین، افزایش خطا در محاسبات مثلث‌بندی خواهد شد. پارامترهای متعددی مانند نحوه توزیع و تعداد نقاط کنترل زمینی، نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین، تعداد نوارهای پروازی و استفاده از موقعیت‌های دقیق دوربین بدست آمده از سامانه تعیین موقعیت جهانی ماهواره‌ای (GNSS)، بر دقت مثلث‌بندی تأثیر گذارند. در این تحقیق، تأثیر این پارامترها بر دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر مورد بررسی قرار گرفته است.

روش‌ها: ارزیابی پارامترهای موثر بر دقت مثلث‌بندی در این تحقیق بر روی دو محدوده‌ی راهگذر با طول‌های دو و نیم و پنج کیلومتر انجام شده است. در این تحقیق سه پارامتر توزیع و تعداد نقاط کنترل زمینی، نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین و نرم‌افزار فتوگرامتری بر روی یک نوار پروازی بررسی شده و تنها برای بررسی تاثیرگذاری تعداد نوار پروازی بر دقت مثلث‌بندی از چندین نوار پروازی استفاده شده است. ارزیابی نتایج به دست آمده بر اساس جذر میانگین مربعات خطاهای مسطحاتی و ارتفاعی در نقاط چک انجام گرفت. در این تحقیق، از نرم‌افزار فتوگرامتری Pix4D و Agisoft Metashape برای محاسبات مثلث‌بندی بهره گرفته شده است.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی‌ها در بررسی تأثیرگذاری توزیع و تعداد نقاط کنترل نشان داد که در صورت استفاده از هشت نقطه کنترل با توزیع دو نقطه در ابتدا، دو نقطه در انتها، دو نقطه در میانه راهگذر و همگی به صورت روبروی هم در عرض راهگذر و نیز دو نقطه دیگر در بین آنها، می‌تواند دقت نتایج در محاسبات مثلث‌بندی نسبت به دیگر حالت‌ها را بهبود دهد. همچنین، استفاده از روش سلف-کالیبراسیون دوربین در محاسبات مثلث‌بندی منجر به نتایج دقیقتری نسبت به حالت محاسبات مثلث‌بندی با استفاده دوربین از پیش کالیبره شده می‌گردد. علاوه بر این، استفاده از بیش از یک نوار پروازی نیز منجر به افزایش دقت در نتایج مثلث‌بندی خواهد شد.

نتیجه‌گیری: با طراحی مناسب نقاط کنترل زمینی در کل منطقه راهگذر و با استفاده از روش سلف-کالیبراسیون دوربین در محاسبات مثلث‌بندی پروژه‌های فتوگرامتری پهپاد از مناطق راهگذر و بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز تصویر، می‌توان به دقت زیر نیم متر جهت تهیه نقشه‌های مهندسی ۱:۵۰۰، ۱:۱۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰ به ترتیب با منحنی میزان‌های نیم متری، یک متری و دو متری دست یافت.

تاریخ دریافت: ۲۶ دی ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۳۰ بهمن ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۰۱ خرداد ۱۴۰۴

واژگان کلیدی:
فتوگرامتری پهپاد
نقشه‌برداری راهگذر
نقطه کنترل زمینی
کالیبراسیون دوربین
مثلث‌بندی

* نویسنده مسئول
afary@nit.ac.ir
۰۹۱۲-۲۸۹۴۱۸۹

مقدّمه

در دهه‌ی اخیر با پیشرفت صنعت تولید پهپاد (پرنده‌ی هدایت پذیر از دور)، استفاده از این سامانه‌ها به عنوان سکوی تصویر برداری رشد پیداکرده. از این رو با رشد این صنعت، پهپادها به عنوان راهکاری کارآمد و کاربردی از لحاظ دقت، زمان و هزینه مطرح شده است [۱]. نقشه‌برداری با استفاده از پهپاد برخلاف فتوگرامتری با استفاده از هواپیمای با سرنشین و نیز نقشه‌برداری زمینی، محدودیتی برای استفاده در مناطق صعب‌العبور مانند مناطقی با شیب زیاد، دره و مناطق مین‌گذاری شده، ندارد و می‌تواند با صرف هزینه‌ی کم در مدت زمان کمتری نسبت به بقیه روش‌ها، محصولاتی با دقت و کیفیت بالا تولید کند. [۲]. در فتوگرامتری پهپاد، با جمع‌آوری اطلاعات تصویری که پهپاد از سطح زمین اخذ می‌کند و با پردازش این اطلاعات در نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری، می‌توان انواع محصولات داده‌های مکانی مانند: مدل سه بعدی ارتفاعی و رقومی، ابر نقاط، پروفیل طولی، نقشه و ارتوفتو را تولید کرد [۳, ۴]. سطح دقت مورد نیاز برای خروجی تولیدات پهپاد بر حسب هر پروژه مشخص می‌شود. با تنظیم و تعیین برخی پارامترها قبل از پرواز، در حین پرواز و در حین پردازش می‌توان به نتایجی با کیفیت و با دقت زیر ۰/۱۰ متر برای تهیه نقشه‌های ۱:۵۰۰رسید. این پارامترها شامل، پارامترهای طراحی پرواز با توجه به توپوگرافی منطقه مانند میزان پوشش طولی و عرضی و تعداد نوار پرواز، ارتفاع پرواز از سطح زمین، زاویه دید و فاصله‌ی کانونی دوربین و تعداد و توزیع نقاط کنترل و نیز شرایط محیطی مانند سرعت باد و شرایط آب و هوایی، اطمینان داشتن از صحت و سلامت پهپاد می‌باشد [۲, ۵]. اگر شرایط ذکر شده مناسب باشند اپراتور در پردازش داده‌های تصویری اخذ شده از منطقه مورد نظر می‌تواند به دقت ارتفاعی و مسطحاتی بالایی برسد [۵, ۶].

نقشه‌برداری راهگذر در کاربردهایی نظیر برداشت جاده‌ها و راه‌ها، خطوط ریلی، آبریزها (رودخانه، خط ساحلی)، کانال‌ها و خطوط انتقال (برق، گاز، آب، نفت) مورد استفاده قرار می‌گیرد. نقشه‌برداری با پهپاد این مزیت را به همراه دارد که اپراتور با سرعت بالاتر و زمان کمتر به تصاویر منطقه دسترسی خواهد داشت [۲, ۴]. یکی از انواع نقشه‌هایی که به صورت هوایی تهیه می‌شوند، نقشه‌های راهگذر می‌باشند که با استفاده از پهپاد انجام می‌گیرد. نقشه‌برداری راهگذر با پهپاد فرآیندی است که در آن پهپاد، اطلاعات جغرافیایی از یک مسیر یا راهگذر را تصویربرداری می‌کند [۷]. وجود تفاوت زیاد در بعد طولی مناطق راهگذر نسبت به بعد عرضی آنها، موجب تفاوت در طراحی پارامترهای پرواز مانند توزیع و تعداد نقاط کنترل، تعداد نوار پرواز، میزان همپوشانی تصاویر می‌شود. در نقشه‌برداری با پهپاد به صورت راهگذر به دلیل طولانی بودن نوار پرواز و طراحی پرواز در منطقه با عرضی اندک، خطای ناشی از تجمع خطای کالیبراسیون دوربین، در انتهای پرواز ایجاد می‌شود. برای کاهش این خطا دو راه حل توزیع متراکم نقاط کنترل و افزایش دقت پارامترهای توجیه خارجی دوربین پیشنهاد شده است [۲]. یکی دیگر از چالش‌هایی که نقشه‌برداران در عملیات پهپاد با آن مواجه می‌شوند، قطع ارتباط بین پهپاد و سامانه موقعیت‌یابی ماهواره‌ای است. بروز این مشکل، باعث می‌شود که مختصات مراکز تصویر یا ژئوتگ (Geotag) پهپاد که به عنوان مشاهدات اضافی مورد استفاده قرار گیرند، ثبت نشوند. این مشکل در مناطق راهگذر واقع در دره‌ها بیشتر رخ می‌دهد. از دیگر چالش‌ها در تصویربرداری از مناطق راهگذر می‌توان به عدم امکان تصویربرداری با پوشش عرضی مناسب به دلایلی مانند عرض کم محدوده پرواز در نواحی باریک مانند دره‌ها اشاره کرد که منجر به کاهش تعداد نوار پروازی و پوشش عرضی می‌شود. در صورت بروز این مسائل و چالش‌ها، عملیات فتوگرامتری پهپاد، زمان‌بر بوده و هزینه‌ی مضاعفی را ایجاد می‌کند.

مرور پژوهش‌های پیشین

عوامل متعددی بر دقت مثلث‌بندی تأثیرگذار هستند که از جمله این عوامل می‌توان به تعداد و توزیع نقاط کنترل زمینی، دوربین مورد استفاده در عملیات تصویربرداری، نحوه‌ی کالیبراسیون و پارامترهای کالیبراسیون، ادغام تصاویر مایل و قائم، تعداد نوار پروازی و میزان هم‌پوشانی طولی و عرضی تصاویر، ارتفاع و سرعت پرواز پهپاد، و نیز نرم‌افزار فتوگرامتری مورد استفاده اشاره کرد. نقاط کنترل زمینی، نقاطی با مختصات زمینی معلوم و دقیق هستند که جهت زمین مرجع کردن تصاویر و سایر محصولات فتوگرامتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعداد و نحوه توزیع نقاط کنترل زمینی در محاسبات مثلث‌بندی تأثیر بسیار زیادی دارد. اندازه‌گیری نقاط کنترل زمینی مرحله‌ای پرهزینه و زمان‌بر در عملیات فتوگرامتری پهپاد می‌باشد. بنابراین، محققان در تلاش‌اند تا روش‌هایی را توسعه دهند تا بتوان بدون استفاده از این نقاط و یا با حداقل تعداد نقاط کنترل زمینی، به دقت و صحت قابل اطمینان در نقشه تهیه شده از تصاویر پهپاد رسید [۸, ۹].

اسکارلاتوس (Skarlatos) و همکاران، تعداد و توزیع نقاط کنترل را در پنج حالت بررسی کردند. نتیجه بررسی آنها، دو برابر بودن خطای ارتفاعی نسبت به خطای مسطحاتی به دلیل هندسه‌ی طولی پروژه بود. همچنین، دقت ارتفاعی و مسطحاتی در حالتی که تمام نقاط کنترل و چک در فاصله‌ای یکسان نسبت به یکدیگر قرار گرفته بودند بهتر از توزیع‌های دیگر بوده است [۱۰]. در مطالعه‌ای هاروین (Harvin) و همکاران [۱۱] توزیع تعداد چهل و هفت نقطه کنترل و چک را بررسی کردند. نتایج مطالعه، افزایش دقت مثلث‌بندی نقاط کنترل و چک با توزیع مناسب در محیط پروژه با تعداد نقطه کنترل بیشتر نشان داد. جاود (Jaud) و همکاران در مطالعه‌ای [۱۲] تأثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل بر روی منطقه راهگذر را بررسی کردند. آنها نشان دادند که دقت مثلث‌بندی، زمانی که توزیع نقاط کنترل در طول راهگذر به صورت یکنواخت باشد و از تصاویر مایل و قائم برای پردازش استفاده شود، نسبت به دیگر حالت‌های پردازش افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای توسط گونزالس (Gonzalez) و همکاران [۲]، چهار پرواز به طول ۵۲۵ متر در دو نوار پروازی (یک رفت و یک برگشت) به همراه اندازه‌گیری چهل و هفت نقطه کنترل در طول راهگذر انجام شد. آن‌ها دریافتند که در همه حالات مورد آزمایش، با افزایش تعداد نقطه کنترل و چک، دقت مثلث‌بندی افزایش می‌یابد و بهترین نتیجه زمانی حاصل شد که نقاط کنترل به صورت زیگزاگی با فواصل یکسان از یکدیگر قرار گرفته باشند. در مطالعه‌ای سامارتانو (Samartano) و همکاران [۱۳] تعداد و توزیع نقاط کنترل را در دو حالت مورد ارزیابی قرار دادند. در حالت اول سی و پنج نقطه کنترل و ده نقطه چک و در حالت دوم، سه نقطه کنترل و چهل و دو نقطه چک استفاده شد. نتیجه پردازش آنها، افزایش دقت و کیفیت بصری محصولات تولید شده با نقاط کنترل بیشتر را نشان داد. در مطالعه‌ای سانتوز (Santos) و همکاران [۱۴] تأثیر تعداد و توزیع نقاط کنترل در دقت مثلث‌بندی را ارزیابی کردند. آن‌ها در یک عملیات فتوگرامتری نقاط کنترل را در حالت‌های مختلف توزیع کردند و در هر حالت توزیع، تعداد نقاط کنترل را تغییر دادند. بعد از پردازش تصاویر، نتیجه پردازش را این گونه بیان کردند که کارآمدترین حالت برای افزایش دقت مثلث‌بندی زمانی است که نقاط در یک فاصله تقریباً همگن نسبت به یکدیگر پخش شده باشند. آن‌ها همچنین، بیان کردند که با افزایش تعداد نقطه کنترل دقت مثلث‌بندی افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای حیدری و همکاران [۱۵] تعداد و نحوه توزیع نقاط کنترل در سراسر محدوده پروژه و شیوه تصویربرداری بهینه در تولید خروجی داده‌های پهپاد (ابر نقطه، مدل سه بعدی، نقشه) را طی شش پرواز ارزیابی کردند. در این مطالعه از هجده نقطه کنترل و هفت نقطه چک استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه دقت مسطحاتی بالاتری را نسبت به دقت ارتفاعی نشان داد و علی رغم اینکه وجود مشاهدات مختصات مرکز تصویر با استفاده از سامانه تعیین موقعیت جهانی باعث

بهبود دقت محصولات فتوگرامتری و افزایش سرعت و کاهش هزینه عملیات پروژه شده اما همچنان خطاهای سیستماتیک و غیر سیستماتیکی وجود دارند که برای کاهش این خطاها وجود حداقل یک نقطه کنترل در سطح پروژه الزامی است.

در مطالعه‌ی [۱۱] هاروین و همکاران محاسبات فتوگرامتری را با دو حالت کالیبراسیون دوربین به صورت سلف-کالیبراسیون و استفاده از دوربین کالیبره شده انجام دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مثلث‌بندی با استفاده از روش خود واسنجی دقت بهتری نسبت به حالت استفاده از دوربین کالیبره شده خواهد داشت. در مطالعه‌ای [۱۶] عرفان زاده و سعادت‌سرشت تأثیر روش‌های کالیبراسیون بر روی کیفیت مدل سه بعدی را بررسی کردند. نتیجه‌ی این مطالعه، دقت بالای روش سلف-کالیبراسیون را نسبت به روش استفاده از دوربین کالیبره شده در دقت نهایی مدل سه‌بعدی نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای [۱۷] شهبازی و همکاران تأثیر پارامترهای قرائت عکسی، توپوگرافی نقاط کنترل و قابلیت دید و کیفیت رادیومتریکی تصاویر بر روی کیفیت هندسی مدل سه بعدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها نشان دادند که دقت کالیبراسیون در صورت قرائت تارگت‌ها در تصاویر به صورت اتوماتیک نسبت به حالتی که به صورت دستی توسط اپراتور استخراج شوند، بالاتری خواهد بود. در مطالعه‌ای [۱۸] ورشوساز و عباس‌پور تأثیرگذاری توزیع نقاط کنترل در دقت پارامترهای کالیبراسیون را بررسی کردند. آنها بیان کردند که تمرکز نقاط در نواحی مرکزی تصاویر اخذ شده برای انجام عملیات با دوربین کالیبره شده، دقت تعیین پارامترهای خارجی و داخلی دوربین را بالا می‌برد اما صحت این پارامترها مورد تائید نمی‌باشند. در مقابل، در صورت وجود پراکندگی یکنواخت نقاط در سطح تصویر، با وجود دقت نه چندان بالا در تعیین پارامترهای کالیبراسیون، صحت آنها کاملاً قابل قبول و قابل اعتماد می‌باشد.

از دیگر پارامترهایی که بر دقت مدل سه بعدی و پارامترهای مثلث‌بندی تأثیر می‌گذارد، نرم‌افزار مورد استفاده برای پردازش تصاویر می‌باشد. در دهه اخیر نرم‌افزارهای مختلف فتوگرامتری تولید و توسعه داده شده‌اند که از معروف‌ترین آنها می‌توان به UasMaster [۱۹]، Agisoft Metashape [۲۰]، PhotoModeler [۲۱]، ContextCapture [۲۲]، و 3DSurvey [۲۳] اشاره کرد. در مطالعه‌ای[۲۴] بروکاس (Brucas) و همکاران دو نرم‌افزار تخصصی فتوگرامتری Pix4D [۲۵] و PhotoMod [۲۶] مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه مهم‌ترین تفاوت این دو نرم‌افزار نسبت به هم وجود قابلیت خود کالیبراسیون در نرم‌افزار Pix4D اعلام شده است. در Pix4D توجیه تصاویر نسبت به هم به صورت کاملاً اتوماتیک انجام می‌شود اما در PhotoMod برخی از فرآیندها باید به صورت دستی یا نیمه اتوماتیک انجام شود. در مطالعه‌ای [۲۷] علیدوست و عارفی چهار نرم‌افزار 3DSurvey، Agisoft Metashape، Pix4D و SURE [۲۸] را بررسی کردند. نتایج حاصل در این مطالعه، صرف زمان پردازشی کم و دقت مثلث‌بندی بالا در نرم‌افزار Pix4D نسبت به دیگر نرم‌افزارها را نشان داد. همچنین، تعداد نقاط تولید شده در ابر نقاط نرم‌افزار Pix4D بیشتر از دیگر نرم‌افزارها بوده است. برخلاف Pix4D، نرم‌افزار 3DSurvey با مدت زمان پردازشی دو برابر بیشتر و دقتی تقریباً مشابه با Pix4D، تعداد نقاط متراکم کمی تولید کرد. در نهایت از لحاظ دقت و مدت زمان پردازشی نرم‌افزار Pix4D از بقیه نرم‌افزارها بهتر عمل کرده و از لحاظ تعداد نقطه تولید شده در ابر نقطه متراکم، 3DSurvey کمترین تعداد نقطه در ابر نقطه متراکم را تولید کرده است. در مطالعه‌ای [۲۹] باربا‌سوکیز (Barbasiewicz) و همکاران، ۱۲۶ تصویر را در دو نرم‌افزار Agisoft Metashape و Pix4D پردازش کردند. نتیجه پردازش آنها نشان داد که در هر دو نرم‌افزار مقدار خطا تقریباً یکسان بوده و ابر نقطه تولید شده در هر دو نرم‌افزار در حالتی که دقت پردازش بالا و متوسط باشد، فرق چندانی نداشته و تفاوت تنها در زمان محاسبه آنها می‌باشد. اما ابر نقطه‌ای که با دقت کم در نرم‌افزار Agisoft Metashape پردازش شد، دارای کیفیت بصری بهتری نسبت به ابر نقطه پردازش شده در دیگر نرم‌افزارها بوده است.

تاثیرگذاری پارامترهای توزیع و تعداد نقاط کنترل زمینی، کالیبراسیون دوربین و نرم‌افزار فتوگرامتری بر دقت مثلث‌بندی به صورت جداگانه در نقشه‌برداری با پهپاد از مناطق راهگذر در تحقیق‌های مختلف و در حالت معلوم بودن مختصات دقیق مراکز دوربین مورد مطالعه قرار گرفته است. اما هنوز ابهاماتی در تاثیرگذاری این پارامترها بر دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر وجود دارد که به طور کامل بررسی نشده‌اند. در این مقاله تاثیرگذاری پارامترهای توزیع و تعداد نقاط کنترل، کالیبراسیون دوربین و نرم‌افزار فتوگرامتری در دقت مثلث‌بندی در شرایط چالشی تک نوار پروازی و استفاده از تصاویر بدون پارامترهای توجیه خارجی دقیق و نیز تاثیرگذاری تعداد نوارهای پروازی بر دقت مثلث‌بندی بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز دوربین در لحظه اخذ تصاویر به طور کامل بررسی خواهند شد.

مواد و روش پژوهش

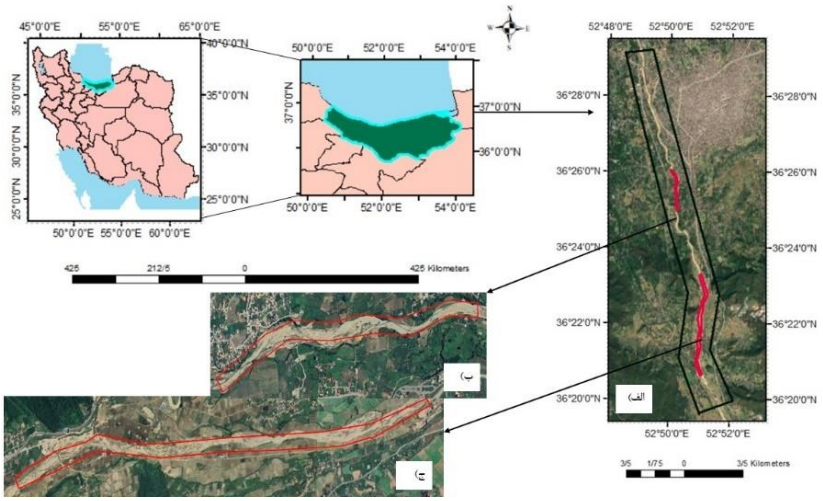
- محدوده‌ی مورد مطالعه و داده‌ها

محدوده‌ی راهگذر مورد مطالعه در این تحقیق شامل دو محدوده از رودخانه تالار در استان مازندران است. محدوده‌ی اول واقع در مختصات جغرافیایی N: 66444 m و E: 4033691 m و در زون N39 به طول پنج کیلومتر و عرض حدود ۳۵۰ متر می‌باشد. محدوده‌ی دوم نیز در مختصات جغرافیایی N: 665766 m و E: 4029258 m و در زون N39 به طول دو و نیم کیلومتر و عرض حدود ۳۵۰ متر قرار دارد. هر دو منطقه‌ی مطالعاتی علاوه بر رودخانه، دارای بافت گیاهی و تپه ماهور و بافت شهری نیز می‌باشند (شکل ۱). داده‌های تصویری این دو منطقه که در این مقاله از آنها استفاده شده است بخشی از داده‌های تصویری یک پروژه بزرگتر می‌باشند که در اینجا از آن به عنوان پروژه مرجع یاد خواهد شد. تصاویر این پروژه با استفاده از پهپاد Phantom 4 Pro شکل (۲) برداشت شده‌اند که دوربین آن از نوع FC6310 با قدرت تفکیک ۲۰ مگا پیکسل بوده و سنسور آن از نوع CMOS با فاصله کانونی ۸/۸

میلیمتر می‌باشد. تعداد تصاویر در محدوده‌ی دو و نیم کیلومتری، ۴۵۸ تصویر و در محدوده پنج کیلومتری، ۱۱۵۱ تصویر می‌باشد.

- *پروژه‌ی مرجع*

پروژه‌ی مرجع دارای تصاویری با ژئوتگ دقیق بوده که در چهار نوار پروازی و با استفاده از پهپاد Phantom 4 Pro تصویربرداری شده است. مختصات مراکز این تصاویر از طریق عملیات سامانه تعیین موقعیت جهانی GNSS (Global navigation satellite System) و به صورت محاسبات کینماتیک پس پردازش PPK (Post Process Kinematics) محاسبه شده‌اند که دقت آنها در حدود ۲ سانتیمتر می‌باشد. تصویربرداری از این پروژه به صورت راهگذر و در طول ۲۰ کیلومتر و عرض حدود ۳۵۰ متر انجام شده است. تعداد تصاویر این پروژه ۳۹۰۰ تصویر بوده که با پوشش طولی حدود ۸۰ درصد و پوشش عرضی حدود ۶۰ درصد اخذ شده‌اند. ارتفاع متوسط پرواز از سطح منطقه در حین پرواز در حدود ۱۵۰ متر بوده است. در این پروژه از ۶ نقطه کنترل زمینی که دقت آنها در حدود ۲ سانتیمتر بوده، استفاده شده است. پردازش پروژه‌ی مرجع با سطح پردازش تصاویر متوسط در نرم‌افزار Agisoft Metashape استفاده شد. منظور از سطح پردازش تصویر، انجام محاسبات فتوگرامتری با نصف اندازه واقعی تصاویر می‌باشد. جدول (۱) مشخصات کلی پروژه مرجع و جدول (۲) نیز پارامترهای کالیبراسیون دوربین را که از طریق روش سلف-کالیبراسیون در حین محاسبات مثلث‌بندی بدست آمده‌اند را نشان می‌دهد. محدوده‌ی پروژه‌ی مرجع در شکل (۱-الف) نشان داده شده است.



شکل ۱: منطقه‌ی مورد مطالعه (رودخانه تالار). الف) پروژه‌ی مرجع. ب) محدوده‌ی اول. ج) محدوده‌ی دوم.

Fig. 1: Study Area (Talar River). a) Reference Project. b) First Area. c) Second Area.



شکل ۲: پهپاد Phantom 4 Pro

Fig. 2: Phantom 4 pro UAV

جدول ۱: مشخصات پروژه‌ی مرجع

Table 1: Reference Project Specifications

تعداد تصاویر (Number of images)	۳۹۰۰ تصویر (3900 images)
طول محدوده (Length of the area)	۲۰ کیلومتر (20 km)
پوشش تصاویر (Image coverage)	۸۰ درصد طولی و ۶۰ درصد عرضی (80% lengthwise and 60% widthwise)
نرم‌افزار مورد استفاده برای پردازش (Software used for processing)	Metashape
سطح پردازش تصاویر (Level of image processing)	متوسط (Meduim)
نوع کالیبراسیون (Type of calibration)	خود-واسنجی (Self-calibration)
ارتفاع متوسط پرواز (Average flight altitude)	۱۵۰ متر (150 meters)
تعداد نقاط کنترل زمینی (Number of ground control points)	۶ نقطه (6 points)
دقت نقاط کنترل زمینی (Accuracy of ground control points)	۲ سانتیمتر (2 centimeters)

جدول ۲: مقادیر پارامترهای کالیبراسیون دوربین در پروژه‌ی مرجع
Table 2: Calibration Parameters Values for the Reference Project

فاصله کانونی (میلی‌متر) Focal length (mm)	f: 3636.71936
مختصات نقاط اصلی(میلی‌متر) Coordinates of main points (millimeters)	cx: 37.977 cy: 40.3151
پارامترهای اعوجاج شعاعی Radial distortion parameters	k1:- 0.00551217 k2: 0.0039673 k3:- 0.00490452
پارامترهای اعوجاج مماسی Tangential distortion parameters	p1: 0.00384787 p2: 0.00633808

- *مشخصات داده‌های محدوده اول*

محدوده‌ی اول، راهگذر به طول دو و نیم کیلومتر و عرض ۳۵۰ متر می‌باشد که با ۴۵۸ تصویر پوشش داده شده است. این محدوده دارای چهار نوار پرواز با پوشش طولی ۸۰ درصد و عرضی ۶۰ درصد بین تصاویر می‌باشد. محدوده‌ی اول در اغلب بررسی‌ها به صورت چالشی و در یک نوار پروازی و با ۱۰۳ تصویر مورد پردازش قرار گرفته است و تنها در بررسی تاثیرگذاری تعداد نوارهای پرواز بر دقت مثلث‌بندی، از تمام تصاویر پوشش دهنده هر چهار نوار پروازی استفاده می‌شود. محدوده‌ی اول دارای ده نقطه کنترل و چک است که با توجه به محدودیت اخذ نقاط به صورت زمینی، این نقاط به صورت نقشه مبنا و در محیط پروژه مرجع به صورت دستی انتخاب و ایجاد شدند. در روش اخذ نقاط به صورت نقشه مبنا، نقاط کنترل در پروژه‌ی مرجع، انتخاب شده و مختصات سه بعدی آنها با استفاده از محاسبات تقاطع چند شعاعی محاسبه گردیدند. محدوده‌ی اول در شکل (۱-ب) نشان داده شده است.

- *مشخصات داده‌های محدوده دوم*

محدوده‌ی دوم، راهگذر به طول پنج کیلومتر و عرض ۳۵۰ متر می‌باشد که با ۱۱۵۱ تصویر پوشش داده شده است. این محدوده دارای چهار نوار پرواز با پوشش طولی ۸۰ درصد و عرضی ۶۰ درصد بین تصاویر می‌باشد. محدوده‌ی دوم در اغلب بررسی‌ها به صورت چالشی و در یک نوار پروازی و با ۲۷۹ تصویر مورد پردازش قرار گرفته است و تنها در بررسی تاثیرگذاری تعداد نوارهای پرواز بر دقت مثلث‌بندی، از تمام تصاویر پوشش دهنده هر چهار نوار پروازی استفاده می‌شود. محدوده‌ی دوم دارای ده نقطه کنترل و چک است که با توجه به محدودیت اخذ نقاط به صورت زمینی، این نقاط به صورت نقشه مبنا و در محیط پروژه مرجع انتخاب و ایجاد شدند. محدوده‌ی دوم در شکل (۱-ج) نشان داده شده است.

- *روش پژوهش*

همانطور که در مقدمه و بخش مروری بر کارهای انجام شده ذکر شد پارامترهای متعددی بر دقت مثلث‌بندی فتوگرامتری به خصوص در مناطق راهگذر تاثیرگذار هستند که در این پژوهش برخی از آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند. پارامترهایی که برای این منظور انتخاب شده‌اند عبارتند از: نحوه توزیع و تعداد نقاط کنترل، نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین، نرم‌افزار فتوگرامتری مورد استفاده برای انجام محاسبات و پردازش‌های فتوگرامتری و تعداد نوار پروازی. اغلب این بررسی‌ها بر روی یک حالت چالشی انجام شده است که داده‌های تصویری شامل تنها یک نوار پروازی (فقط رفت) بوده و در پردازش آنها از مختصات دقیق مراکز تصویر استفاده نشده است. برای این منظور سناریوهای متعددی طراحی شده است که در ادامه مشخصات هر کدام از آنها بیان می‌شود.

- *بررسی تاثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل بر دقت مثلث‌بندی*

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در دقت مثلث‌بندی، تعداد، نحوه‌ی توزیع و دقت نقاط کنترل موجود در پروژه فتوگرامتری است [۳۰]. به همین منظور، دوازده سناریوی مختلف در هر دو محدوده‌ی راهگذر دو و نیم و پنج کیلومتری به صورت تک نوار طراحی و ایجاد شدند. محاسبات مثلث‌بندی فتوگرامتری در سناریوهای طراحی شده با هدف بررسی تاثیرگذاری این پارامتر بر دقت مثلث‌بندی به دو حالت انجام می‌گردد:

- *حالت اول:* بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز تصویر. در این حالت با هدف بررسی میزان دقت‌های به دست آمده در مثلث‌بندی که در آن تنها از نقاط کنترل زمینی استفاده شده است اطلاعات دقیق مراکز تصویر از متا دیتای تصاویر پاک شده و تصاویر بدون هیچ گونه اطلاعات توجیه خارجی در پروژه وارد شده و محاسبات مثلث‌بندی تنها با استفاده از نقاط کنترل زمینی انجام می‌شود.
- *حالت دوم:* با استفاده از مختصات دقیق مراکز تصویر. در این حالت با هدف بررسی میزان بهبود و تاثیرگذاری مختصات دقیق مراکز دوربین در محاسبات مثلث‌بندی، این اطلاعات نیز در محاسبات مورد استفاده قرار گرفتند.

- *سناریوهای مختلف طراحی شده*

به منظور ارزیابی تاثیرگذاری پارامترهای مختلف بر روی دقت مثلث‌بندی، در هر دو محدوده‌ی راهگذر، دوازده سناریوی مختلف با تعداد و توزیع نقاط کنترل متفاوت طراحی شد. جدول (۳) تعداد نقاط کنترل و چک در سناریوهای طراحی شده را نشان می‌دهد. فاصله بین نقاط کنترل و چک مورد استفاده در این سناریو ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر بوده است.

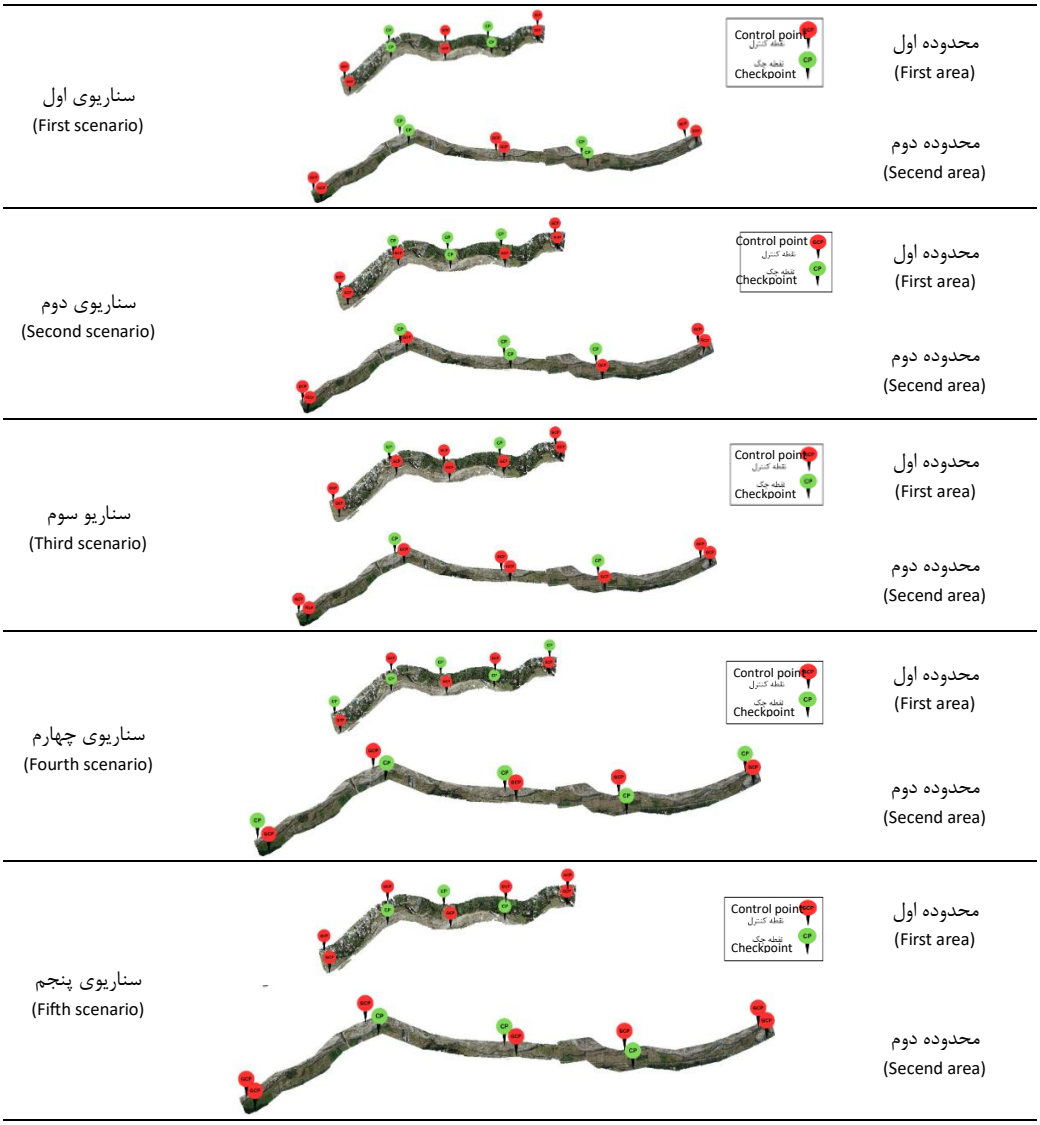
شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب نحوه توزیع نقاط کنترل و چک در محدوده‌ی اول و دوم را نشان می‌دهند. در سناریوهای اول تا هشتم، ده نقطه به صورت کنترل یا چک استفاده شده است (نقاط کنترل با رنگ قرمز و نقاط چک با رنگ سبز نشان داده شده‌اند):

- *سناریو اول:* برای سناریوی اول، دو نقطه کنترل در ابتدا، دو نقطه کنترل در مرکز و دو نقطه کنترل در انتهای راهگذر با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی چهار نقطه چک در بین نقاط کنترل نیز در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۳: تعداد نقاط کنترل و چک استفاده شده در هر سناریو

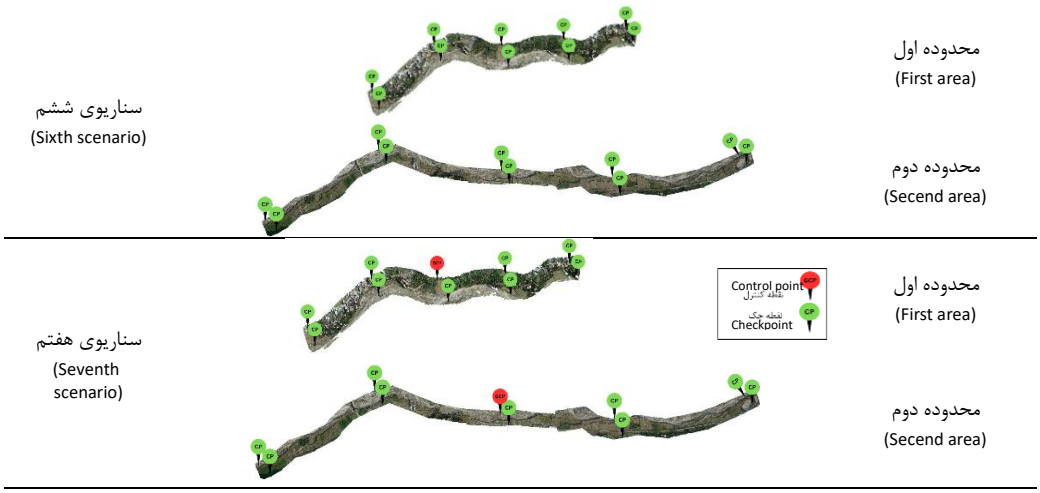
Table 3: The number of control and check points used in each scenario

سناریوها (Scenarios)	هر دو محدوده‌ی راهگذر (Both corridor areas)		سناریوها (Scenarios)	محدوده‌ی پنج کیلومتری (Both corridor areas)	
	ده نقطه (Ten points)			هجده نقطه (Eighteen points)	
	تعداد نقاط کنترل (Number of control points)	تعداد نقاط چک (Number of check points)		تعداد نقاط کنترل (Number of control points)	تعداد نقاط چک (Number of check points)
سناریوی اول (First scenario)	6	4	سناریوی هشتم (Scenario Eight)	10	8
سناریوی دوم (Second scenario)	6	4	سناریوی نهم (Scenario Ninth)	10	8
سناریوی سوم (Third scenario)	8	2	سناریوی دهم (Scenario Ten)	12	6
سناریوی چهارم (Fourth scenario)	5	5	سناریوی یازدهم (Eleventh scenario)	9	9
سناریوی پنجم (Scenario Five)	7	3	سناریوی دوازدهم (Scenario 12)	11	7
سناریوی ششم (Scenario Six)	0	10	–	–	–
سناریوی هفتم (Seventh scenario)	1	9	–	–	–



شکل ۳: نحوه‌ی توزیع نقاط کنترل و چک در سناریوهای اول تا پنجم با استفاده از ده نقطه

Fig. 3: Distribution of Control and Check Points in Scenarios One to Five Using Ten Points



شکل ۴: نحوه‌ی توزیع نقاط کنترل و چک در سناریو های شش و هفت با استفاده از ده نقطه

Fig. 4: Distribution of Control and Check Points in Scenarios six & seven Using Ten Points

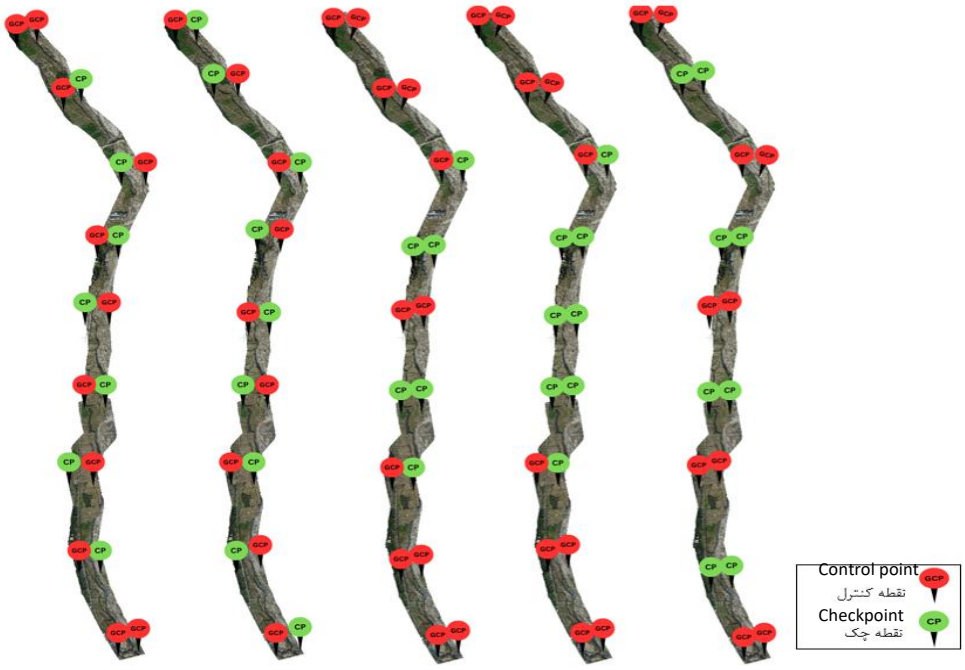
- *سناریوی دوم:* برای سناریوی دوم، دو نقطه کنترل در ابتدا و انتهای راهگذر و دو نقطه کنترل در طول محدوده با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی چهار نقطه چک در بین نقاط کنترل نیز در نظر گرفته می‌شوند.
- *سناریوی سوم:* در سناریوی سوم، دو نقطه کنترل در ابتدا، دو نقطه کنترل در مرکز، دو نقطه کنترل در انتهای راهگذر و دو نقطه کنترل در طول محدوده با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی دو نقطه چک در بین نقاط کنترل نیز در نظر گرفته می‌شوند.
- *سناریوی چهارم:* برای سناریوی پنجم، نقاط کنترل به صورت زیگزاگی در هر دو محدوده‌ی راهگذر طراحی شدند. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی پنج نقطه چک در بین نقاط کنترل در نظر گرفته می‌شوند.
- *سناریوی پنجم:* در این سناریو دو نقطه کنترل در ابتدا، دو نقطه کنترل در انتها راهگذر و بین دو محدوده، نقاط به صورت زیگزاگی با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مثلث‌بندی سه نقطه چک در بین نقاط کنترل در نظر گرفته می‌شوند.
- *سناریوی ششم:* در سناریوی هفتم تمامی نقاط به صورت چک با فاصله ۶۰۰ متر و ۱۲۰۰ متر از هم به ترتیب در محدوده راهگذر اول و دوم طراحی شد. در این سناریو، تصاویر در هر دو محدوده‌ی راهگذر با استفاده از مختصات مراکز تصویر پردازش می‌شوند.
- *سناریوی هفتم:* برای سناریوی هشتم تنها یک نقطه کنترل در مرکز محدوده طراحی شد. همچنین، تصاویر در هر دو محدوده‌ی راهگذر با استفاده از مختصات مراکز تصویر پردازش می‌شوند.

در سناریوهای هشتم تا دوازدهم با هدف بررسی تاثیرگذاری کاهش فاصله بین نقاط کنترل بر دقت مثلث‌بندی، تعداد نقاط چک و کنترل از ده نقطه به هجده نقطه‌ی افزایش و فاصله بین آنها نیز از ۱۲۰۰ متر به ۶۰۰ متر کاهش داده شد (شکل۵).

- *سناریوی هشتم:* در این سناریو، ده نقطه‌ی کنترل به صورت یک در میان در راستای عرضی در طول راهگذر طراحی شد و باقی نقاط به صورت چک در بین نقاط کنترل قرار می‌گیرند.
- *سناریوی نهم:* در این سناریو، پنج نقطه‌ی کنترل در ابتدای راهگذر و پنج نقطه‌ی کنترل در انتهای راهگذر طراحی شد و باقی نقاط به صورت چک در بین دو محدوده قرار می‌گیرند.
- *سناریوی دهم:* در این سناریو، پنج نقطه‌ی کنترل در ابتدای راهگذر و پنج نقطه‌ی کنترل در انتهای راهگذر و دو نقطه در مرکز راهگذر طراحی شد و باقی نقاط به صورت چک در بین نقاط کنترل قرار می‌گیرند.
- *سناریوی یازدهم:* برای این سناریو، ده نقطه‌ی کنترل به صورت زیگزاگی در طول راهگذر طراحی شد و باقی نقاط به صورت چک در بین نقاط کنترل قرار می‌گیرند.
- *سناریوی دوازدهم:* در این سناریو، دو نقطه‌ی کنترل در ابتدای راهگذر، دو نقطه‌ی کنترل در انتهای راهگذر و باقی نقاط کنترل به صورت زیگزاگی در طول راهگذر طراحی شد. باقی نقاط هم به عنوان نقاط چک در بین نقاط کنترل قرار می‌گیرند.

- *بررسی تاثیرگذاری نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین بر دقت مثلث‌بندی*

کالیبراسیون دوربین یکی از مهم‌ترین مراحل در پروژه‌های فتوگرامتری است که بر دقت مثلث‌بندی تاثیرگذار است. استفاده از کالیبراسیون مناسب موجب بهبود پارامترهای توجیه داخلی و کاهش خطای سیستماتیک داده‌های مورد استفاده برای مثلث‌بندی می‌شود. با کاهش خطای سیستماتیک، دقت مثلث‌بندی افزایش و نیاز به نقاط کنترل زمینی کاهش می‌یابد [۳۱, ۳۲]



شکل ۵: نحوه‌ی توزیع نقاط کنترل در سناریوهای هشت تا دوازده با استفاده از هجده نقطه

Fig. 5: Distribution of control points in scenarios eight to twelve using eighteen points

محاسبات مثلث‌بندی فتوگرامتری می‌تواند در سه حالت انجام شود:

الف) استفاده از دوربین کالیبره شده

ب) استفاده از پارامترهای کالیبراسیون دوربین به صورت محاسبات کالیبراسیون در حین کار (On the job calibration)

ج) استفاده از روش سلف کایبراسیون

در این پروژه با توجه به استفاده از داده های تصویری از قبل اخذ شده پروژه مرجع، تنها امکان بررسی تاثیر دو حالت الف و ج از سه مورد بالا وجود دارد که در حالت الف از پارامترهای کالیبراسیون دوربین متعلق به پروژه مرجع به عنوان پارامترهای کالیبراسیون از پیش تعیین شده دوربین استفاده می‌شود. همچنین در روش کالیبراسیون در حین کار نیاز به تعداد زیادی نقاط کنترل زمینی به منظور کالیبره کردن است که در این مقاله به علت استفاده از داده‌های از قبل تهیه شده امکان پذیر نمی‌باشد [۳۳].

این ارزیابی با هدف بررسی تأثیرگذاری نوع کالیبراسیون بر دقت مثلث‌بندی انجام می‌شود. در حالت استفاده از دوربین کالیبره شده، مقادیر پارامترهای کالیبراسیون دوربین از پروژه مرجع شامل پارامترهای فاصله کانونی، مختصات نقطه اصلی، سه پارامتر اعوجاج شعاعی و دو پارامتر اعوجاج مماسی به عنوان مقادیر ثابت در محاسبات مثلث‌بندی فتوگرامتری، مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این بررسی بر روی دو محدوده‌ی راهگذر در حالت چالشی تک نوار پروازی انجام می‌شود. همچنین، این بررسی در حالت بدون مختصات دقیق مراکز تصویر انجام می‌شود.

- *بررسی تاثیرگذاری نرم‌افزار فتوگرامتری در دقت مثلث‌بندی*

نرم‌افزارهای فتوگرامتری مختلفی برای انجام محاسبات فتوگرامتری وجود دارند که هر کدام با تنظیمات و شیوه خاصی، محاسبات فتوگرامتری را انجام می‌دهند که می‌تواند یکی از عوامل تأثیرگذار بر دقت مثلث‌بندی باشد. به منظور ارزیابی تاثیرگذاری نرم‌افزار فتوگرامتری بر دقت مثلث‌بندی، دو نرم‌افزار Agisoft Metashape و Pix4D انتخاب شدند که تاثیر آنها در دقت نتایج مثلث‌بندی مورد بررسی قرار خواهند گرفت. این بررسی بر روی دو محدوده‌ی راهگذر در حالت چالشی تک نوار پرواز و بدون مختصات دقیق مراکز تصاویر انجام می‌شود.

- *بررسی تاثیرگذاری تعداد نوار پرواز بر دقت مثلث‌بندی*

منظور از نوار پروازی، یک مسیر رفت یا برگشت پهپاد در طول منطقه‌ی پرواز است. وجود تعداد نوارهای پروازی موجب استحکام شبکه فتوگرامتری می‌شود. از طرفی با کاهش تعداد نوار پروازی در عملیات پهپاد فتوگرامتری، هزینه و زمان عملیات کاهش می‌یابد. در این تحقیق برای بررسی تاثیر تعداد نوارهای پروازی در حالت فتوگرامتری راهگذر، تعداد نوارهای پروازی به تدریج از یک به چهار نوار پروازی افزایش می‌یابد. این بررسی بر روی هر دو محدوده‌ی راهگذر و بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز تصویر انجام می‌گیرد.

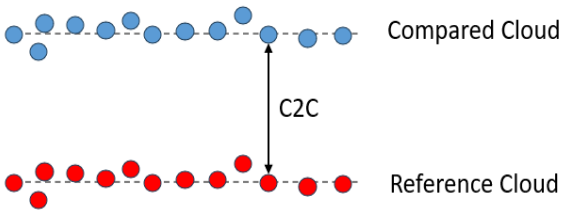
- *معیارهای ارزیابی مورد استفاده*

در این مقاله برای ارزیابی دقت مسطحاتی و ارتفاعی پروژه‌های فتوگرامتری از دو معیار جذر میانگین مربعات خطاها (Root mean

RMSE (square deviation error) در نقاط چک و معیار C2C (Cloud to Cloud) استفاده می‌شود. نقاط چک، نقاط مسطحاتی و ارتفاعی هستند که دارای مختصات زمینی معلوم و دقیق می‌باشند. این نقاط تنها به عنوان نقاط گرهی در محاسبات مثلث‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند و از مختصاتهای زمینی آنها در محاسبات مثلث‌بندی استفاده‌ای نمی‌شود. با توجه به معلوم بودن مختصات زمینی و دقیق این نقاط و با توجه به محاسبه مجدد مختصات زمینی برای این نقاط از محاسبات مثلث‌بندی، می‌توان از تفاوتهای بین این دو سری مختصات در نقاط چک بر حسب رابطه (۱) به عنوان معیاری برای ارزیابی دقت محاسبات مثلث‌بندی استفاده کرد. محاسبه‌ی مقدار RMSE برای هر سه مولفه‌ی X، Y و Z نقاط چک طبق رابطه (۱) انجام می‌شود که در آن p_i مقدار یکی از سه مولفه‌ی X، Y و Z در نقاط چک و $\bar{p}$ مقدار میانگین آنها می‌باشند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n}(p_i - \bar{p})} \qquad (۱)$$

دومین معیار ارزیابی مورد استفاده در این مقاله، معیار C2C می‌باشد. معیار C2C، اختلاف ارتفاع بین نقاط متناظر در دو ابر نقطه را نسبت به هم بیان می‌کند. در شکل (۶) یک نمای شماتیک از این مفهوم نشان داده شده است که در آن نقاط آبی رنگ، نقاط مرتبط به ابر نقطه‌ی اول و نقاط قرمز رنگ، نقاط متناظر با آنها در ابر نقطه‌ی دوم می‌باشند که از لحاظ فاصله‌ای با هم مقایسه می‌شوند. در این مقاله محاسبات مربوط به معیار C2C در نرم‌افزار Cloud Compare انجام شده است. نرم‌افزار Cloud Compare عموماً برای نمایش و پردازش ابر نقطه سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۴]. با استفاده از معیار C2C می‌توان به میزان اعوجاجی که بین دو ابر نقطه از نظر ارتفاعی وجود دارد، پی برد.



شکل۶: فاصله‌ی بین نقاط متناظر در دو ابر نقطه بر اساس معیار C2C
Fig. 6: Point distances in two point clouds with C2C quality

بحث و بررسی نتایج

- ارزیابی تاثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل در دقت مثلث‌بندی

با هدف بررسی تاثیر تعداد و توزیع‌های مختلف نقاط کنترل در دقت مثلث‌بندی و تعیین تعداد و توزیع مناسب جهت دستیابی به بهترین دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر، پروژه‌های مربوط به سناریوهای متعدد طراحی شده در هر دو منطقه راهگذر (بخش ۳-۳-۱) در محیط نرم افزار Agisoft Metashape ایجاد و مورد پردازش قرار گرفتند. این پردازش‌ها در دو حالت استفاده از مختصات‌های دقیق مراکز تصاویر (اطلاعات ژئوتگ) و نیز بدون این اطلاعات انجام شده است که در هر دو حالت کالیبراسون دوربین به صورت محاسبات سلف-کالیبراسیون انجام گرفته است. برای ایجاد هماهنگی بین نتایج به دست آمده از پردازش‌های این پروژه‌ها با داده‌های متناظر آنها در پروژه مرجع، تنظیمات سطح پردازش مورد استفاده در این پروژه‌ها مطابق با تنظیمات پروژه مرجع (جدول ۱) در سطح متوسط انجام شد.

نتایج حاصل از پردازش سناریوهای یک تا هفت در محدوده‌ی راهگذر اول در جدول (۴) و نتایج حاصل از پردازش این سناریوهای در محدوده‌ی راهگذر دوم در جدول (۵) آورده شده است. بررسی این نتایج در جدول (۴) نشان می‌دهد که در حالت استفاده از تصاویر بدون اطلاعات ژئوتگ دقیق، سناریوی سوم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۲۹ متر و ۰/۱ متر در بین سناریوهای بررسی شده، دارای کمترین خطا و بهترین دقت می‌باشد. در این سناریو از هشت نقطه‌ی کنترل در محاسبات مثلث‌بندی استفاده شده است که به صورت یکنواخت بر روی راهگذر توزیع شده بودند. برای ارزیابی صحت نتایج نیز، از دو نقطه کنترل به عنوان نقطه چک در بین این نقاط و در طول راهگذر استفاده گردید (شکل ۳-سناریوی سوم، منطقه‌ی اول). همچنین، بیشترین خطا در سناریوی اول با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب با ۰/۵۵ و ۰/۱۴ متر رخ داده است. در این سناریو، نقاط کنترل در ابتدا، مرکز و انتهای محدوده‌ی راهگذر به صورت غیر یکنواخت توزیع شده بودند (شکل ۳-سناریوی اول). همچنین، بررسی نتایج جدول (۴) و در حالت استفاده از تصاویر با اطلاعات ژئوتگ دقیق، نشان می‌دهد که سناریوی سوم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۰۴ متر و ۰/۰۵ متر در بین سناریوهای بررسی شده، دارای کمترین خطا و بهترین دقت می‌باشد. همچنین، بیشترین خطا مربوط به سناریوی پنجم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۰۸ متر می‌باشد. در این سناریو، نقاط کنترل در ابتدا، مرکز و انتهای محدوده‌ی راهگذر به صورت به صورت غیر یکنواخت استفاده شده بودند (شکل ۳-سناریوی پنجم). با توجه به این که محاسبات فتوگرامتری در سناریوی ششم تنها با استفاده از اطلاعات ژئوتگ دقیق مراکز تصویر و بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی و سناریوی هفتم نیز تنها با استفاده از اطلاعات ژئوتگ دقیق مراکز تصویر و استفاده از فقط یک نقطه کنترل زمینی انجام شده‌اند (بنا به اطلاعات آورده شده در جدول (۳) لذا، در این دو سناریو امکان انجام محاسبات فتوگرامتری تنها در حالت استفاده از تصاویر با ژئوتگ دقیق فراهم بوده و در جدول (۴) اطلاعات پردازشی مربوط به این دو سناریو در حالت استفاده از تصاویر بدون اطلاعات ژئوتگ وجود نخواهد داشت (شکل ۴). این وضعیت برای دو سطر جدول (۵) مربوط به نتایج حاصل از پردازش این سناریوهای در محدوده‌ی راهگذر دوم نیز برقرار است.

جدول ۴: مقادیر خطا در نقاط چک در محدوده‌ی اول با تصاویر دارای ژئوتگ دقیق و بدون ژئوتگ دقیق (بر حسب متر)

Table 4: Error values in check points in the first range with images with accurate geotag and without accurate geotag (in meters)

سناریوها (Scenarios)	خطای کل (Total error)		خطای مسطحاتی (Planimetric error)		خطای ارتفاعی (Elevation error)	
	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)
سناریوی اول (First scenario)	0.57	0.08	0.14	0.06	0.55	0.05
سناریوی دوم (Second scenario)	0.45	0.09	0.10	0.07	0.44	0.06
سناریوی سوم (Third scenario)	0.30	0.07	0.10	0.05	0.29	0.04
سناریوی چهارم (Fourth scenario)	0.44	0.08	0.08	0.06	0.45	0.05
سناریوی پنجم (Scenario Five)	0.48	0.11	0.03	0.08	0.45	0.07
سناریوی ششم (Scenario Six)	-	0.13	-	0.08	-	0.10
سناریوی هفتم (Seventh scenario)	-	0.11	-	0.06	-	0.09

جدول ۵: مقادیر خطا در نقاط چک در محدوده‌ی دوم با تصاویر دارای ژئوتگ دقیق و بدون ژئوتگ دقیق (بر حسب متر)

Table 5: Error values at check points in the second range with images with accurate geotag and without accurate geotag (in meters)

سناریوها (Scenarios)	خطای کل (Total error)		خطای مسطحاتی (Planimetric error)		خطای ارتفاعی (Elevation error)	
	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)	تصاویر بدون ژئوتگ (Images without geotag)	تصاویر با ژئوتگ (Images with geotag)
سناریوی اول (First scenario)	2.37	0.6	0.92	0.03	2.18	0.05
سناریوی دوم (Second scenario)	2.29	0.07	0.36	0.05	2.26	0.05
سناریوی سوم (Third scenario)	0.93	0.02	0.18	0.01	0.91	0.02
سناریوی چهارم (Fourth scenario)	1.08	0.05	0.26	0.02	1.05	0.04
سناریوی پنجم (Scenario Five)	1.25	0.06	0.23	0.03	1.23	0.05
سناریوی ششم (Scenario Six)	-	0.09	-	0.06	-	0.07
سناریوی هفتم (Seventh scenario)	-	0.08	-	0.05	-	0.06

نتایج حاصل از پردازش سناریوهای یک تا هفت در محدوده‌ی راهگذر دوم نیز در جدول (۵) آورده شده است. بررسی این نتایج در جدول (۵) نشان می‌دهد که در حالت استفاده از تصاویر بدون اطلاعات ژئوتگ دقیق، سناریوی سوم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۹۱ متر و ۰/۱۸ متر در بین سناریوهای بررسی شده، دارای کمترین خطا و بهترین دقت می‌باشد. در این سناریو از هشت نقطه‌ی کنترل در محاسبات مثلث‌بندی استفاده شده است که به صورت یکنواخت بر روی راهگذر توزیع شده‌اند. برای ارزیابی صحت نتایج نیز، از دو نقطه کنترل به عنوان نقطه چک در بین این نقاط و در طول راهگذر استفاده گردید (شکل ۳-سناریوی سوم، منطقه‌ی اول). همچنین، بیشترین خطا در سناریوی اول با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب با ۲/۳۷ متر و ۰/۹۲ متر رخ داده است. در این سناریو، نقاط کنترل در ابتدا، مرکز و انتهای محدوده‌ی راهگذر به صورت غیر یکنواخت توزیع شده بودند (شکل ۳-سناریوی اول). همچنین، بررسی نتایج جدول (۵) در محدوده-ی دوم و در حالت استفاده از تصاویر با اطلاعات ژئوتگ دقیق، نشان می‌دهد که سناریوی سوم با خطای ارتفاعی و مسطحاتی به ترتیب ۰/۰۲ متر و ۰/۰۱ متر در بین سناریوهای بررسی شده، دارای کمترین خطا و بهترین دقت می‌باشد. در این سناریو از هشت نقطه‌ی کنترل که به صورت یکنواخت بر روی راهگذر توزیع شده بودند در محاسبات مثلث‌بندی استفاده شده است. برای ارزیابی صحت نتایج نیز، از دو نقطه کنترل به عنوان نقطه چک در بین این نقاط و در طول راهگذر استفاده شده است (شکل ۳-سناریوی اول).

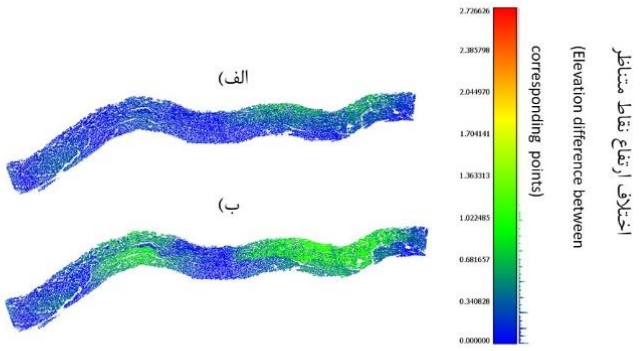
نتایج حاصل از پردازش سناریوهای هشتم تا دوازدهم در محدوده‌ی راهگذر دوم با استفاده از تصاویر بدون ژئوتگ دقیق نیز در جدول (۶) آورده شده است. این سناریوها همانطور که در بخش (۳-۳-۱-۱) ذکر شد با هدف بررسی تاثیرگذاری افزایش تعداد نقاط کنترل زمینی و کاهش فاصله بین آنها در دقت نتایج مثلث‌بندی طراحی شده‌اند. فاصله‌ی نقاط کنترل و چک در این سناریوها از ۱۲۰۰متر به ۶۰۰ متر کاهش و تعداد نقاط کنترل و چک از ده نقطه به هجده نقطه افزایش پیدا کرده است. مقایسه‌ی نتایج دقت مثلث‌بندی برای این محدوده در جداول (۵) و (۶) نشان می‌دهد که با کاهش فاصله‌ی و افزایش تعداد نقاط کنترل، خطای ارتفاعی و مسطحاتی در هر سناریو کاهش می‌یابد. با توجه به اطلاعات جدول (۶) کمترین خطای ارتفاعی و مسطحاتی متعلق به سناریوی دهم با دوازده نقطه‌ی کنترل و شش نقطه‌ی چک که به صورت یکنواخت در سطح راهگذر پخش شدند، می‌باشد (شکل۵-سناریوی دهم). این نتایج نشان می‌دهند که برای افزایش دقت مثلث‌بندی بهتر است که در ابتدا و انتهای پروژه از چهار نقطه کنترل نزدیک به هم و در طرفین راهگذر و در روبروی هم استفاده شود.

جدول ۶: مقادیر خطا در نقاط چک به دست آمده از توزیع هجده نقطه بر محدوده‌ی دوم با تصاویر بدون ژئوتگ دقیق (بر حسب متر)
Table 6: Error values at check points obtained from the distribution of eighteen points over the second area with images without precise geotagging (in meters)

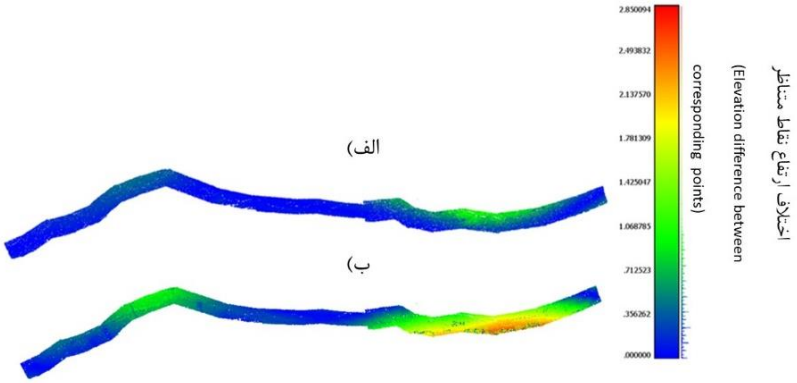
سناریوها (Scenarios)	خطای کل (Total error)	خطای مسطحاتی (Planimetric error)	خطای Z Z error	خطای Y Y error	خطای X X error
سناریوی هشتم (Scenario Eight)	1.73	0.73	0.95	0.62	0.38
سناریوی نهم (Scenario Ninth)	1.25	1.23	1.23	1.24	0.16
سناریوی دهم (Scenario Ten)	0.47	0.29	0.36	0.27	0.09
سناریوی یازدهم (Eleventh scenario)	0.77	0.18	0.75	0.15	0.09
سناریوی دوازدهم (Scenario 12)	0.50	0.28	0.41	0.22	0.16

- ارزیابی تاثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل در دقت مثلث‌بندی با استفاده از معیار C2C

نتایج ارائه شده در بخش (۴-۱) نشان داد که سناریوی سوم دارای خطای ارتفاعی و مسطحاتی کمتری نسبت به دیگر سناریوها می‌باشد. به همین منظور در بخش (۴-۲)، سناریوی سوم با بهترین دقت مثلث‌بندی و سناریوی اول با کمترین دقت مثلث‌بندی، با معیار C2C ارزیابی شدند. در این بخش، نقاط متناظر دو ابر نقطه‌ی سناریوی سوم و سناریوی اول در محدوده‌ی اول و دوم نسبت به ابر نقطه‌ی متناظر آنها در پروژه‌ی مرجع با معیار C2C مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل‌های (۷) و (۸) میزان معیار C2C محاسبه شده برای ابرنقاط سناریوهای اول و سوم به ترتیب در محدوده اول و دوم را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، رنگ آبی بیانگر فاصله‌ی حداقلی و رنگ قرمز بیانگر فاصله‌ی حداکثری بین نقاط ابر نقطه‌ی مرجع و ابرنقطه سناریوی مورد نظر می‌باشد. نتایج به دست آمده از معیار C2C در شکل‌های (۷) و (۸) با نتایج به دست آمده از جداول (۴) و (۵)، از لحاظ مقدار دقت مثلث‌بندی سناریوی سوم و اول مطابقت دارند.



شکل ۷: ابر نقطه‌ی تولید شده با معیار C2C از سناریوی سوم و اول در محدوده‌ی اول. الف) سناریوی سوم ب) سناریوی اول
Fig. 7: The point cloud generated by the C2C criterion from the third and first scenarios in the first range. a) third scenario. b) first scenario



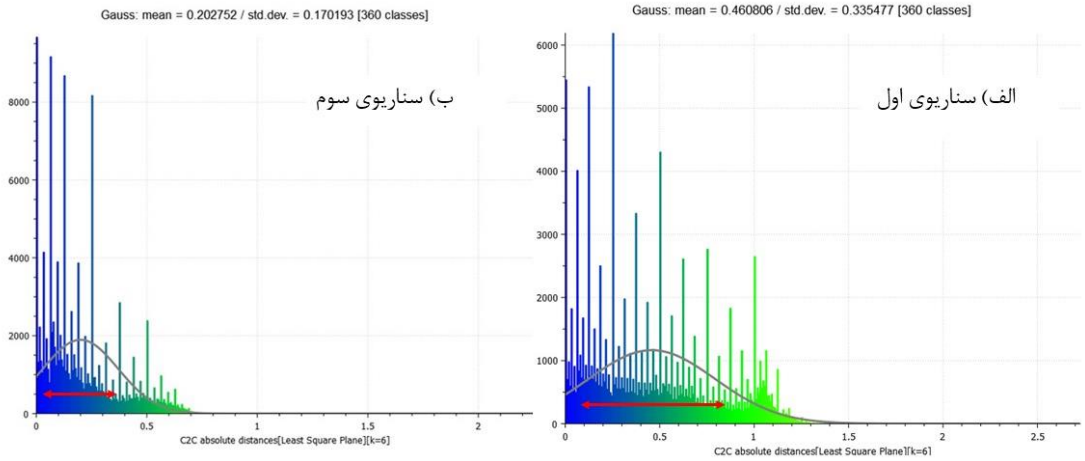
شکل۸: ابر نقطه‌ی تولید شده با معیار C2C از سناریوی سوم و اول در محدوده‌ی دوم. الف) سناریوی سوم ب) سناریوی اول
Fig. 8: The point cloud generated by the C2C criterion from the third and first scenarios in the Secend range. a) third scenario. b) first scenario

نمودار گوسی برازش شده به فراوانی‌های مقادیر C2C در ابر نقاط سناریوهای اول و سوم در هر دو محدوده‌ی راهگذر در شکل‌های (۹) و (۱۰) و میانگین و انحراف معیار مقادیر C2C ابرنقاط این سناریوها در جدول (۷) آورده شده است. با توجه به شکل (۹) و جدول (۷) میانگین مقادیر C2C برای ابر نقاط سناریوی اول و سوم در محدوده‌ی اول به ترتیب ۰/۴۶ متر و ۰/۲۰ متر می‌باشد. همچنین، با توجه به شکل (۹) و جدول (۷) میانگین مقادیر C2C برای ابر نقاط سناریوی اول و سوم در محدوده‌ی دوم به ترتیب ۱/۱۸ متر و ۰/۴۵ متر می‌باشد. در شکل‌های (۹-الف) و (۱۰-الف) نمودار گوسی پهن‌تر بوده و دارای انحراف معیار بزرگتری است که نشان‌دهنده‌ی پراکندگی زیاد مقادیر C2C نسبت به هم و در نتیجه، دقت کم ارتفاعی در سناریوی اول می‌باشد و در شکل‌های (۹-ب) و (۱۰-ب) نمودار گوسی باریکتر بوده و دارای انحراف معیار کوچکتری است که نشان‌دهنده‌ی پراکندگی کم مقادیر C2C نسبت به هم و در نتیجه، دقت بالای ارتفاعی در سناریوی سوم می‌باشد.

جدول ۷: میانگین و انحراف معیار مقادیر C2C برای ابرنقاط در سناریوی سوم و اول (بر حسب متر)

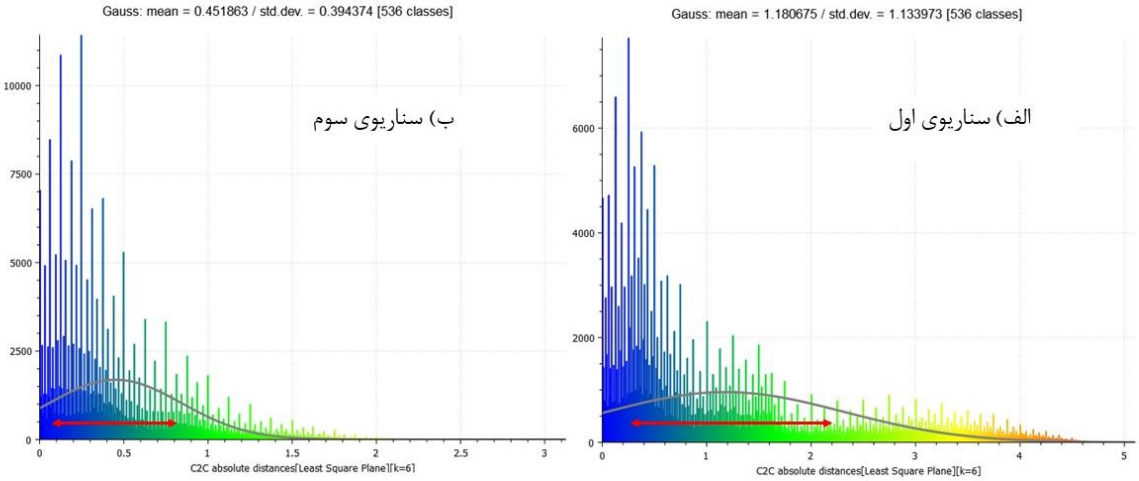
Table 7: Average values and standard deviation in the third and first scenarios (in meters)

سناریوها (Scenarios)	محدوده‌ی دوم (Second area)		محدوده‌ی اول (First area)	
	انحراف معیار (Standard deviation)	میانگین (Mean)	انحراف معیار (Standard deviation)	میانگین (Mean)
سناریوی اول (First scenario)	1.13	1.18	0.33	0.46
سناریوی سوم (Third scenario)	0.39	0.45	0.17	0.20



شکل ۹: نمودار گوسی برازش شده به فراوانی‌های مقادیر C2C در ابر نقاط سناریوی اول و سوم در محدوده‌ی اول

Fig. 9: Gaussian fitted plot to the frequencies of C2C values in the point clouds of the first and third scenarios in the first range.



شکل ۱۰: نمودار گوسی برازش شده به فراوانی‌های مقادیر C2C در ابرنقاط سناریوی اول و سوم در محدوده‌ی دوم

Fig. 10: Gaussian fitted plot to the frequencies of C2C values in the point clouds of the first and third scenarios in the secend range.

- ارزیابی تاثیر نحوه‌ی کالیبراسیون بر دقت مثلث‌بندی

در این قسمت نتایج حاصل از ارزیابی تاثیر نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین بر دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر با حالت چالشی آورده شده است. این ارزیابی‌ها تنها بر اساس سناریوهای اول تا پنجم در هر دو محدوده‌ی راهگذر انجام شده است. همانطور که در بخش (۳-۳-۲) ذکر شده است در این ارزیابی، برای تعریف دوربین کالیبره شده، از پارامترهای کالیبراسیون دوربین، مربوط به پروژه‌ی مرجع استفاده شد (جدول ۲). نتایج این ارزیابی‌ها در دو حالت سلف-کالیبراسیون و استفاده از دوربین کالیبره شده برای هر دو محدوده در جدول (۸) ارائه شده است. همانطور که از نتایج این جدول مشاهده می‌شود مقدار خطای کل در حالت سلف-کالیبراسیون نسبت به حالت استفاده از دوربین کالیبره شده در هر دو محدوده‌ی راهگذر افزایش یافته است که علت آن نیز انطباق پارامترهای کالیبراسیون دوربین بر اساس مشخصات هندسی پروژه مرجع می‌باشد و با قرار دادن پارامترهای کالیبراسیون پروژه‌ی مرجع در محاسبات مثلث‌بندی مربوط به سناریوهای فوق، نتایج این محاسبات تحت تأثیر هندسه و کلیت پروژه مرجع قرار می‌گیرند. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از حالت سلف-کالیبراسیون در محاسبات مثلث‌بندی می‌تواند انطباق بهتری با مشخصات هندسی پروژه فتوگرامتری داشته باشد و منجر به نتایج دقیق‌تری گردد.

- بررسی تاثیرگذاری نرم‌افزار فتوگرامتری بر دقت مثلث بندی

در این بخش میزان تاثیرگذاری دو نرم‌افزار فتوگرامتری Agisoft Metashape و Pix4D بر دقت مثلث‌بندی در مناطق راهگذر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این ارزیابی از سناریوی سوم که دارای دقت مثلث‌بندی بالاتری نسبت به دیگر سناریوها می‌باشد (بخش ۴-۱)، جهت بررسی تاثیرگذاری نرم‌افزار فتوگرامتری در دقت مثلث‌بندی استفاده شده است. این ارزیابی به صورت کمی و بصری بر روی هر دو محدوده‌ی اول و دوم انجام گرفته است. جدول (۹) نتایج کمی این ارزیابی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول، مقدار خطای ارتفاعی و مسطحاتی در نقاط چک در هر دو محدوده‌ی اول و دوم با استفاده از این نرم‌افزارها تقریباً با هم برابر بوده و دقت بدست آمده از آنها تفاوت معناداری نسبت به یکدیگر را نشان نمی‌دهد.

مقادیر کالیبراسیون به دست آمده از محاسبات مثلث‌بندی در دو محدوده‌ی راهگذر از نرم‌افزارهای Pix4D و Agisoft MetaShape در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.

جدول ۸: مقادیر خطای کل محاسبه شده در نقاط چک در محدوده‌ی اول و دوم

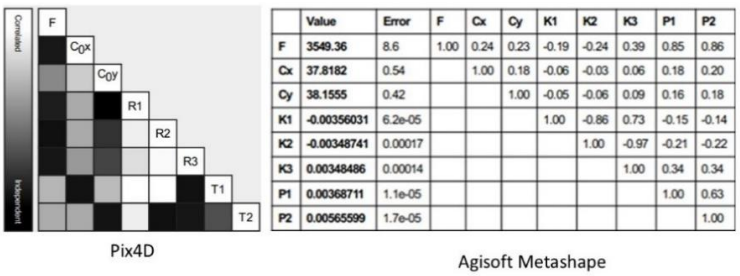
Table 8: Total error values calculated at check points in the first and second range

سناریوها (Scenarios)	محدوده‌ی اول (First area)		محدوده‌ی دوم (Secend area)	
	خطای کل در حالت استفاده از دوربین کالیبره شده (Total error using a calibrated camera)	خطای کل در حالت خود-واسنجی (Total error in self-calibration)	خطای کل در حالت استفاده از دوربین کالیبره شده (Total error using a calibrated camera)	خطای کل در حالت خود-واسنجی (Total error in self-calibration)
سناریوی اول (First scenario)	0.57	0.57	3.4	2.37
سناریوی دوم (Second scenario)	0.51	0.45	2.9	2.29
سناریوی سوم (Third scenario)	0.36	0.30	0.95	0.93
سناریوی چهارم (Fourth scenario)	0.55	0.45	1.3	1.08
سناریوی پنجم (Scenario Five)	0.46	0.46	1.4	1.25

جدول ۹: مقادیر خطای ارتفاعی و مسطحاتی در نقاط چک به دست آمده از محاسبات مثلث‌بندی در هر دو نرم افزار Pix4D و Agisoft MetaShape

Table 9: The values of height and planar errors in check points obtained from triangulation calculations in both Pix4D and Agisoft Metashape software

نرم‌افزارها (Softwares)	محدوده‌ی اول / (First range)			محدوده‌ی دوم / (Secend range)		
	خطا X X error	خطا Y Y error	خطا Z Z error	خطا X X error	خطا Y Y error	خطا Z Z error
Pix4D	0.05	0.01	0.30	0.20	0.12	0.90
Metashape	0.07	0.07	0.29	0.08	0.16	0.91



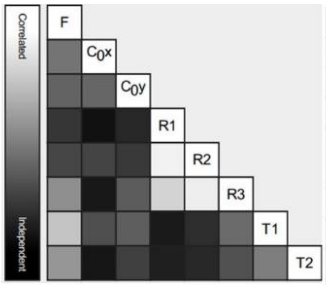
Pix4D

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3549.36	8.6	1.00	0.24	0.23	-0.19	-0.24	0.39	0.85	0.86
Cx	37.8182	0.54		1.00	0.18	-0.06	-0.03	0.06	0.18	0.20
Cy	38.1555	0.42			1.00	-0.05	-0.06	0.09	0.16	0.18
K1	-0.00356031	6.2e-05				1.00	-0.86	0.73	-0.15	-0.14
K2	-0.00348741	0.00017					1.00	-0.97	-0.21	-0.22
K3	0.00348486	0.00014						1.00	0.34	0.34
P1	0.00368711	1.1e-05							1.00	0.63
P2	0.00565599	1.7e-05								1.00

Agisoft Metashape

شکل ۱۱: مقادیر پارامترهای کالیبراسیون به دست آمده از محاسبات مثلث‌بندی در هر دو نرم افزار Pix4D و MetaShape در محدوده‌ی اول

Fig. 11: Calibration parameter values obtained from triangulation calculations in both Pix4D and MetaShape software in the first area.



	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3524.03	2.5	1.00	0.46	-0.34	-0.23	0.19	-0.47	0.63	0.73
Cx	45.5949	0.44		1.00	-0.00	-0.05	0.01	-0.12	0.15	0.32
Cy	104.528	0.49			1.00	0.13	-0.15	0.27	-0.24	-0.27
K1	-0.00461755	3e-05				1.00	-0.95	0.86	-0.14	-0.12
K2	0.00469739	7.5e-05					1.00	-0.94	0.12	0.11
K3	-0.00683771	6.4e-05						1.00	-0.29	-0.32
P1	0.00380903	3.7e-06							1.00	0.49
P2	0.00582252	6.1e-06								1.00

Pix4D Agisoft Metashape

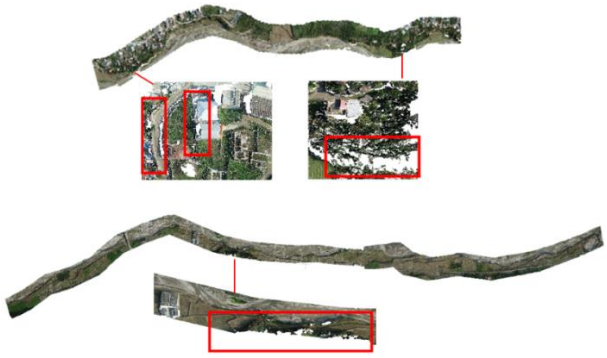
شکل۱۲: مقادیر پارامترهای کالیبراسیون به دست آمده از محاسبات مثلث‌بندی در هر دو نرم افزار Pix4D و MetaShape در محدوده‌ی دوم

Fig. 12: Calibration parameter values obtained from triangulation calculations in both Pix4D and MetaShape software in the secend area.

ابر نقاط با تراکم بالای تولید شده در نرم‌افزارهای Pix4D و Agisoft Metashape به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، ابر نقطه با تراکم بالا تولید شده در نرم‌افزار Pix4D به خوبی نتوانسته گوشه‌های ساختمان، کناره‌های جاده و قسمت‌هایی از پوشش گیاهی را باز تولید کند. اما همانطور که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است در ابر نقطه‌ی تولید شده در نرم‌افزار Agisoft Metashape گوشه‌های ساختمان و کناره‌های جاده‌ها واضح‌تر از ابر نقطه‌ی تولید شده در نرم‌افزار Pix4D می‌باشند ولی در قسمت‌هایی که پوشش گیاهی وجود داشت، این نرم‌افزار نیز به‌خوبی عمل نکرده است. از جمله ضعف‌های که در هر دو نرم‌افزار فتوگرامتری قابل مشاهده است می‌توان به ضعف در بازسازی کامل لبه‌های ساختمانها اشاره کرد. با توجه به ارزیابی‌های بصری انجام شده نرم‌افزار Pix4D توانایی کمتری در بازسازی سه‌بعدی تصاویر پهپاد نسبت به نرم‌افزار Agisoft Metashape دارد.

- ارزیابی تاثیرگذاری تعداد نوار پروازی بر دقت مثلث‌بندی

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر دقت مثلث‌بندی، تعداد نوارهای پروازی می‌باشد که در این بخش تاثیرگذاری تعداد نوارهای پروازی بر دقت مثلث‌بندی در سناریوهای اول تا پنجم در هر دو محدوده‌ی راهگذر بدون استفاده از مختصات دقیق مراکز تصویر مورد بررسی قرار گرفته است. این ارزیابی در یک الی چهار نوار پروازی انجام شده است. نتایج این ارزیابی در هر دو محدوده‌ی راهگذر اول و دوم به ترتیب در جداول (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است. همانطور که از نتایج این جداول مشاهده می‌شود با افزایش تعداد نوارهای پروازی از یک به چهار نوار، دقت مثلث‌بندی در تمامی سناریوهای پردازش شده بهبود یافته است.



شکل۱۳: ابر نقطه‌ی تولید شده در Pix4D

Fig. 13: Point cloud generated in Pix4D



شکل ۱۴: ابر نقطه‌ی تولید شده درAgisoft Metashape

Fig. 14: Point cloud generated in Agisoft Metashape

جدول ۱۰: مقادیر خطا در نقاط چک در سناریوهای اول تا پنجم در محدوده‌ی اول برای تعداد نوارهای مختلف پروازی (بر حسب متر)
Table 10: Error values at check points in scenarios one to five in the first range for different flight strip numbers (in meters)

سناریوها (Scenarios)	چهار نوار پرواز (Four flight strips)			سه نوار پرواز (Three flight strips)			دو نوار پرواز (Two flight strips)			یک نوار پرواز (one flight strips)		
	خطا Z Z error	خطا Y Y error	خطا X X error	خطا Z Z error	خطا Y Y error	خطا X X error	خطا Z Z error	خطا Y Y error	خطا X X error	خطا Z Z error	خطا Y Y error	خطا X X error
سناریوی اول (First scenario)	0.21	0.05	0.17	0.22	0.14	0.08	0.22	0.05	0.13	0.55	0.06	0.12
سناریوی دوم (Second scenario)	0.17	0.10	0.15	0.20	0.14	0.13	0.24	0.08	0.15	0.44	0.04	0.09
سناریوی سوم (Third scenario)	0.13	0.05	0.03	0.14	0.12	0.11	0.19	0.01	0.04	0.29	0.07	0.07
سناریوی چهارم (Fourth scenario)	0.16	0.11	0.09	0.17	0.14	0.14	0.20	0.06	0.05	0.45	0.04	0.07
سناریوی پنجم (Scenario Five)	0.20	0.02	0.07	0.24	0.09	0.11	0.25	0.06	0.09	0.45	0.04	0.07

جدول ۱۱: مقادیر خطا در نقاط چک در سناریوهای اول تا پنجم در محدوده‌ی دوم برای تعداد نوارهای مختلف پروازی (بر حسب متر)
Table 11: Error values at check points in scenarios one to five in the secend range for different flight strip numbers (in meters)

سناریوها (Scenarios)	چهار نوار پرواز (Four flight strips)			سه نوار پرواز (Three flight strips)			دو نوار پرواز (Two flight strips)			یک نوار پرواز (one flight strips)		
	خطا Z Z error	خطا Y Y error	خطا X X error	خطا Z Z error	خطا Y Y error	خطا X X error	خطا Z Z error	خطا Y Y error	خطا X X error	خطا Z Z error	خطا Y Y error	خطا X X error
سناریوی اول (First scenario)	0.42	0.19	0.18	0.70	0.32	0.42	1.15	0.25	0.56	2.18	0.56	0.73
سناریوی دوم (Second scenario)	0.35	0.17	0.16	0.48	0.26	0.34	2	0.78	0.54	2.26	0.34	0.14
سناریوی سوم (Third scenario)	0.12	0.05	0.18	0.43	0.31	0.20	0.60	0.29	0.27	0.91	0.16	0.08
سناریوی چهارم (Fourth scenario)	0.48	0.8	0.15	0.80	0.22	0.21	1.3	0.21	0.30	1.05	0.21	0.16
سناریوی پنجم (Scenario Five)	0.44	0.19	0.21	0.78	0.25	0.24	1.18	0.13	0.23	1.23	0.18	0.13

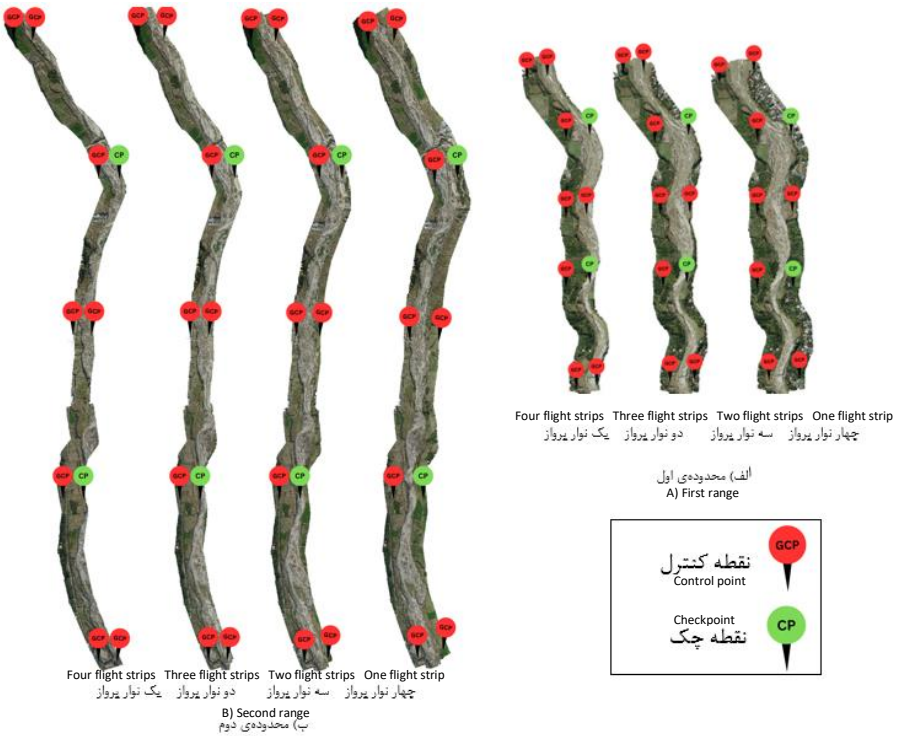
با توجه به جداول (۱۰) و (۱۱)، در بررسی تاثیر تعداد نوار پروازی نیز سناریوی سوم در همه حالت‌های استفاده از بیش از یک نوار پروازی، دارای خطای ارتفاعی و مسطحاتی کمتری نسبت به سایر سناریوهای دیگر بوده است. با توجه به نتایج این جداول، دقت مثلث‌بندی سناریوی سوم با چهار نوار پروازی در محدوده‌ی اول و دوم، به ترتیب افزایش دو برابری و سه برابری نسبت به حالت استفاده از یک نوار پروازی داشته است. علت این امر به دلیل افزایش پوشش تصاویر در چهار نوار پرواز نسبت به حالت‌های دیگر و استحکام هندسی بیشتر شبکه تصویربرداری می‌باشد. در شکل (۱۵)، سناریوی سوم در یک الی چهار نوار پروازی و در هر دو محدوده‌ی اول و دوم نشان داده شده است.

بحث

مقایسه‌ی نتایج این مقاله با پژوهش‌های بین‌المللی تایید کننده نتایج این مقاله هستند. طبق تحقیقات انجام شده [۲, ۱۰, ۱۲, ۱۴]، انتخاب مناسب تعداد و توزیع نقاط کنترل زمینی تأثیر قابل توجهی بر دقت محاسبات مثلث‌بندی دارند. یافته‌های این مقاله نیز این نتایج را تأیید می‌کند، به‌گونه‌ای که توزیع نقاط کنترل در طول راهگذر به روش بهینه، موجب بهبود در دقت محاسبات مثلث‌بندی می شود. در تحقیق [۱۱] نشان داده است که روش سلف-کالیبراسیون در محاسبات مثلث‌بندی نتایج بهتری نسبت به استفاده از دوربین از پیش کالیبره شده دارد. این نتایج همسو با نتایج بدست آمده در این مقاله می‌باشد که استفاده از روش سلف-کالیبراسیون در پردازش تصاویر موجب افزایش دقت مثلث‌بندی گردید و در مقابل استفاده از پارامترهای کالیبراسیون دوربین از پروژه مرجع، منجر به افزایش خطای مثلث‌بندی شده است. نتایج بدست‌آمده از این تحقیق همچون تحقیقات [۲۴, ۲۹] نیز نشان داد که مقدار خطای مثلث‌بندی در هر دو نرم‌افزار تقریبا مشابه‌اند اما کیفیت بازسازی و تولید ابر نقاط تولید شده از نرم‌افزار متفاوت می‌باشد.

این مقاله علاوه بر تایید یافته‌های پیشین، چندین نتایج نوآورانه را نیز ارائه داد. در بیشتر مطالعات پیشین تاثیرگذاری پارامترهای موثر بر دقت محاسبات مثلث‌بندی با استفاده از تصاویر دارای مختصات دقیق مورد

بررسی قرار گرفته بود اما در این مقاله، علاوه بر تاثیرگذاری پارامترها مختلف به همراه مختصات دقیق و معلوم مراکز تصاویر، تاثیر گذاری این پارامترها در هنگام فقدان مختصات دقیق مراکز تصاویر نیز ارائه شد. همچنین، تاثیرگذاری توزیع و تعداد نقاط کنترل با رویکردی جامع در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. تحقیق‌های پیشین نشان داده‌اند که افزایش تعداد نقاط کنترل تأثیر مثبتی بر دقت مثلث‌بندی دارد، اما این مقاله محدودیت‌های این افزایش را بررسی کرده و نشان داد که صرفا افزایش نقاط موجب بهبود دقت نمی‌شود بلکه، توزیع مناسب نقاط کنترل موجب بهبود دقت مثلث‌بندی می‌شود. همچنین، این مقاله بررسی دقیقی از تاثیرگذاری افزایش تعداد نوار پرواز بر دقت محاسبات مثلث‌بندی در مسیرهای راهگذر ارائه کرد که در مطالعات پیشین بررسی کمتری در این موضوع شده است.



شکل ۱۵: ابر نقاط تولید شده در طی یک تا چهار نوار پرواز در محدوده‌ی اول و دوم از سناریوی سوم

Fig. 15: Point clouds generated during one to four flight lanes in the first and second range of the third scenario

جدول ۱۲: مشخصات تعداد و نحوه توزیع نقاط کنترل برای تهیه‌ی نقشه در مقیاس‌های مختلف

Table 12: Specifications for the number and distribution of control points for mapping at different scales

مقیاس (Scale)	منحنی میزان (Contour Interval)	خطا ارتفاعی (متر) (Elevation Error)	توزیع نقاط (Point Distribution)	فاصله نقاط (متر) (Point Spacing)	کالیبراسیون (Calibration)
1:500	نیم متری Half a meter	0.15	توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه (مانند سناریوی سوم) Distributing ground control points evenly and on both sides of the project (like the third scenario)	600	سلف-کالیبراسیون Self-calibration
1:1000	نیم متری Half a meter	0.30	توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه (مانند سناریوی سوم) Distributing ground control points evenly and on both sides of the project (like the third scenario)	600	سلف-کالیبراسیون Self-calibration
1:2000	یک متری One meter	0.40	توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه (مانند سناریوی سوم) Distributing ground control points evenly and on both sides of the project (like the third scenario)	600	سلف-کالیبراسیون Self-calibration
1:2000	دو متری Two meters	1	توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه (مانند سناریوی سوم) Distributing ground control points evenly and on both sides of the project (like the third scenario)	1200	سلف-کالیبراسیون Self-calibration

نتیجه‌گیری

در این تحقیق پارامترهای تعداد و توزیع نقاط کنترل، نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین، نرم‌افزارهای فتوگرامتری و تعداد نوارهای پرواز که بر دقت مثلث‌بندی فتوگرامتری در مناطق کریدیوری تاثیرگذار می‌باشند مورد بررسی قرار گرفت. اکثر این بررسی‌ها در حالت‌های چالشی که پروژه فتوگرامتری تنها شامل یک نوار پروازی بوده و مختصات دقیق مراکز تصاویر نیز موجود نمی باشند انجام گرفته است. نتایج به دست آمده در این مقاله بیان‌کننده‌ی توانایی رسیدن به دقت مثلث‌بندی بالا در محیط و شرایط چالش برانگیز در این مناطق می‌باشد. نتایج ارزیابی‌ها در بررسی تاثیرگذاری تعداد و توزیع نقاط کنترل زمین نشان داد که توزیع نقاط کنترل زمینی به صورت یکنواخت و در طرفین پروژه به صورت چهار نقطه در ابتدا و چهار نقطه در انتهای پروژه به همراه دو نقطه کنترل زمینی در میانه پروژه (شبیه سناریوی سوم) می‌تواند دقت مثلث‌بندی فتوگرامتری در مناطق راهگذر را بهبود بخشد. همچنین، افزایش تعداد نقاط کنترل و کاهش فاصله آنها نیز می‌تواند در افزایش دقت ارتفاعی و مسطحاتی تاثیرگذار باشد. همچنین، نتایج این ارزیابی‌ها نشان داد که استفاده از حالت سلف-کالیبراسیون در محاسبات مثلث‌بندی برای کالیبراسیون دوربین می‌تواند منجر به افزایش دقت مثلث‌بندی گردد. این ارزیابی‌ها نشان داد که در صورت امکان، استفاده از چند نوار پروازی در تصویربرداری و مثلث‌بندی فتوگرامتری می‌تواند منجر به نتایج دقیق‌تری نسبت به حالت استفاده از تک نوار پروازی در نواحی راهگذر گردد. به طورکلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با استفاده از پارامترهای مناسب در طراحی نقاط کنترل زمینی و در تنظیمات محاسبات مثلث‌بندی در مناطق راهگذر می‌توان به دقت مناسب برای مثلث‌بندی رسید.

در انتها و به عنوان یک پیشنهاد، بر اساس مقادیر دقت‌های به دست آمده از بررسی سناریوهای مختلف در این مقاله، تنظیمات مربوط به نحوه توزیع نقاط کنترل مطابق با جدول (۱۲) در تهیه‌ی نقشه در مقیاس‌های ۱:۵۰۰، ۱:۱۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰ و با منحنی میزان‌های نیم متری، یک متری و دو متری پیشنهاد می‌گردد.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

مقاله‌ی ارسالی، استخراج شده از پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد می‌باشد.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Tziavou, O., S. Pytharouli, and J. Souter, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results. Engineering Geology, 2018. 232: p. 12-21.

[2] Ferrer-González E, Agüera-Vega F, Carvajal-Ramírez F, Martínez-Carricondo P. UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. Remote sensing. 2020;12(15):2447. DOI: 10.3390/rs12152447

[3] Howard J, Murashov V, Branche CM. Unmanned aerial vehicles in construction and worker safety. American journal of industrial medicine. 2018;61(1):3-10. DOI: 10.1002/ajim.22782

[4] Bethel JS, Van Gelder BH, Cetin AF, Sampath A. Corridor mapping using aerial technique. 2006. DOI: 10.5703/1288284313396

[5] Cledat E, Jospin LV, Cucci DA, Skaloud J. Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped micro-drones operating in complex natural environment. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020;167:24-38. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.015

[6] UAV AS Corridor Mapping Made Easy with DJI Drones. 2023.

[7] Norouzi A. 2020 [Available from: https://phoenix-air.ir/the-role-of-uavs-in-inspecting-power-transmission-lines/

[8] Abbaspour m, Azar m, Khoshlahjeh, Varshosaz m. Impact of the number and position of ground control points in the accuracy obtained for the UAV photogrammetry based prepared. 2018. DOI:10.13140/RG.2.2.18739.68644

[9] Martínez-Carricondo P, Agüera-Vega F, Carvajal-Ramírez F, Mesas-Carrascosa F-J, García-Ferrer A, Pérez-Porras F-J. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. International journal of applied earth observation and geoinformation. 2018;72:1-10. DOI:10.1016/j.jag.2018.05.015

[10] Skarlatos D, Procopiou E, Stavrou G, Gregoriou M. Accuracy assessment of minimum control points for UAV photography and georeferencing: SPIE; 2013. DOI:10.1117/12.2028988

[11] Harwin S, Lucieer A, Osborn J. The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. Remote Sensing. 2015;7(9):11933-53. DOI: 10.3390/rs70911933

[12] Jaud M, Passot S, Allemand P, Le Dantec N, Grandjean P, Delacourt C. Suggestions to limit geometric distortions in the reconstruction of linear coastal landforms by SfM photogrammetry with PhotoScan® and MicMac® for UAV surveys with restricted GCPs pattern. Drones. 2018;3(1):2. DOI:10.3390/drones3010002

[13] Sammartano G, Chiabrando F, Spanò A. Oblique images and direct photogrammetry with a fixed wing platform: first test and results in Hierapolis of Phrygia (TK). The International Archives

DOI:10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017

[28] SURE. [Available from: https://www.nframes.com/about-us/

[29] Barbasiewicz A, Widerski T, Daliga K, editors. The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. E3S Web of Conferences; 2018: EDP Sciences.
DOI:10.1051/e3sconf/20182600012

[30] Ajeet Kumar Gond, A.O., Shishir Gaur, Nilendu Das *Accuracy Assessment and Optimization of the Photogrammetric Process Variables for 3D Mapping Using Unmanned Aerial Vehicle (Drones).* 2025.

[31] Sadeghian s, Milan A, Ahmadi H, Karimi R. Aerial triangulation based on digital images, GPS/IMU and optimized self-calibration parameters by genetic algorithm. Scientific - Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR). 2020;29.
DOI: 10.22131/sepehr.2020.47881

[32] Huang H, Ye Z, Zhang C, Yue Y, Cui C, Hammad A. Adaptive Cloud-to-Cloud (AC2C) Comparison Method for Photogrammetric Point Cloud Error Estimation Considering Theoretical Error Space. Remote Sensing. 2022;14(17):4289.
DOI: 10.3390/rs14174289

[33] Mitishita, E., et al. *Study of stability analysis of the interior orientation parameters from the small-format digital camera using on-the-job calibration*. in *Canadian Geomatics Conference*. 2010.

[34] Huang, H., et al., *Adaptive Cloud-to-Cloud (AC2C) Comparison Method for Photogrammetric Point Cloud Error Estimation Considering Theoretical Error Space.* Remote Sensing, 2022. 14(17): p. 4289.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مبینا احمدی آسور دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری (گرایش فتوگرامتری) از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل می‌باشد. ایشان تاکنون موفق به چاپ یک مقاله در کنفرانس‌های معتبر بین المللی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: مهندسی نقشه‌برداری، فتوگرامتری، پردازش تصاویر هوایی، مدلسازی مبتنی بر ابرنقاط و تصاویر.

AhmadiAsoor, M. Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

m.ahmadiasoor@gmail.com

علیرضا آفری ایشان فارغ التحصیل کارشناسی نقشه برداری از دانشگاه تبریز و کارشناسی ارشد گرایش ژئودزی و دکتری گرایش فتوگرامتری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد.

of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2020;43:75-82.
DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-75-2020

[14] Santos Santana L, Araújo E Silva Ferraz G, Bedin Marin D, Dienevam Souza Barbosa B, Mendes Dos Santos L, Ferreira Ponciano Ferraz P, et al. Influence of flight altitude and control points in the georeferencing of images obtained by unmanned aerial vehicle. European Journal of Remote Sensing. 2021;54(1):59-71. DOI: 10.1080/22797254.2020.1845104

[15] Heidarimozaffar M, Zerafatyjamal R, Torabzadeh Khorasani H. Accuracy and Precision of Producing Topographic Maps in Linear Projects by UAV Photogrammetric Method. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR). 2023;31(124):21-38. DOI: 10.22131/sepehr.2023.555436.2879

[16] Erfanzadeh A, Saadatseresht M. Behavior analysis and the effect of UAV photogrammetric network design parameters on the quality of 3D reconstruction by Monte Carlo imulation Method. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR). 2021;30(119):27-45.
DOI: 10.22131/sepehr.2021.247874

[17] Shahbazi M, Sohn G, Théau J, Menard P. Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. Sensors. 2015; 15(11): 27493-524. DOI: 10.3390/s151127493

[18] Abbaspour m, Varshosaz m. Studying the effect of dispersion of image target points in the resulted accuracy and precision for interior and exterior orientation parameters in camera calibration process. n National Conference on New Geomatics Technologies and Applications. 2018.

[19] UASMaster TI. [Available from: https://geospatial.trimble.com/en

[20] Metashape. Agisoft Metashape [Available from: https://www.agisoft.com

[21] PhotoModeler. [Available from: https://www.photomodeler.com

[22] CONTEXTCAPTURE. [Available from: https://www.bentley.com/brand/contextcapture/

[23] 3DSurvey. [Available from: https://3dsurvey.si/software/industries/

[24] Sužiedelytė Visockienė J, Bručas D, Ragauskas U. Comparison of UAV images processing softwares. Journal of Measurements in Engineering. 2014;2(2):111-21.

[25] Pix4DMapper. [Available from: https://www.pix4D.com.

[26] PHOTOMOD. [Available from: https://en.racurs.ru

[27] Alidoost F, Arefi H. Comparison of UAS-based photogrammetry software for 3D point cloud generation: a survey over a historical site. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017;4:55-61.



ایشـــان تاکنون موفق به چاپ مقالـه‌های متعدد در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین المللی شـــده‌اند. همچنین ایشـــان در حوزه فتوگرامتری هوایی، بینـایی رایـانـه‌ای و سـنجش از دور مشـغول به فعالیت و تحقیق می‌باشد.

Afary, A. Assistant Professor at Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
afary@nit.ac.ir

عبادت قنبری پرمهر دارای مدرک دکتری تخصـــصـــی مهندســـی نقشه‌برداری (گرایش فتوگرامتری) از دانشگاه ملبورن استرالیا می‌باشد. پس از اخذ دکتری، ایشـــان به مدت دو ســـال به عنوان پژوهشـــگر



پسادکترا در دانشگاه RMIT استرالیا و از سال ۱۳۹۵ تاکنون به عنوان اســـتادیار در گروه مهندســـی نقشـــه‌برداری دانشـــگاه صـــنعتی نوشـیروانی بابل مشـغول به فعالیت می‌باشـند. ایشان تاکنون موفق به چاپ بیش از ۳۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌هـای معتبر بین‌المللی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، پردازش تصـــاویر، کاربرد یادگیری ماشـــین و هوش مصـــنوعی در کشاورزی و سنجش از دور.

pamehr, E..G. Assistant Professor at Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
parmehr@nit.ac.ir

Citation (Vancouver): Ahmadi Asoor M, Afary A, Ghanbari Parmehr E. [Evaluation of Parameters Affecting Aerotriangulation Accuracy in Corridor Mapping]. *J. RS. GEOINF. RES. 2025; 3(1): 119-138*
https://doi.org/10.22061/jrsgr.2025.11645.1089

COPYRIGHTS
© 2025 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)