J. RS. GEOINF. RES. 4(2): 293-304, Summer & Autumn 2026

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

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Evaluation of close-range photogrammetry software for 3D modeling of a large ship hull

M. Sadeghitoosi, E. Ghanbari Parmehr*, A. Afary

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

Received: 30 April 2026
Reviewed: 07 June 2026
Revised: 16 August 2026
Accepted: 25 October 2026

KEYWORDS:
Close-range Photogrammetry
3D Modeling
Ship hull
Metashape
Pix4DMapper
ContextCapture

* Corresponding author
parmehr@nit.ac.ir
(+9811) 35501580

ABSTRACT

Background and Objectives: Large maritime structures increasingly require dense, geometrically reliable 3D documentation for dimensional control, maintenance planning, reverse engineering, and digital-twin workflows. Close-range photogrammetry is attractive for such tasks because it can generate dense 3D products from ordinary cameras with lower equipment cost and greater operational flexibility than many conventional dense-capture techniques. Nevertheless, the practical performance of photogrammetric processing software is not necessarily identical, especially when the object is very large and contains reflective metal, low-texture painted surfaces, sharp structural edges, and curved hull geometry. The objective of this study was to compare three widely used commercial photogrammetric software packages—Metashape, Pix4DMapper, and ContextCapture—under one industrial-scale case study and to determine how their outputs differ in geometric accuracy, local surface agreement, reconstruction completeness, processing time, self-calibration behavior, and practical usability.

Methods: Images were acquired with a non-metric iPhone smartphone camera using automatic focus and exposure. After five low-quality images were excluded from an initial set of 455 photographs, 450 images were retained for processing, including 288 approximately parallel images and 162 convergent images. Fifty-two reference targets were distributed over the visible side of the vessel and measured by industrial surveying with a Leica TS09PLUS total station. Thirty targets were used as control points and 22 targets were reserved as independent check points. The same image set and reference coordinates were processed in Metashape, Pix4DMapper, and ContextCapture. Evaluation included the root mean square error of control and check points in the three coordinate components and in three dimensions, visual and numerical assessment of point-cloud completeness, cloud-to-cloud distance analysis in three representative zones with edged, planar, and curved geometry, processing time for alignment and dense reconstruction, interpretation of self-calibration outputs, and an observational usability assessment.

Findings: The independent check-point results showed the largest separation among the software packages. The 3D RMSE was about 5 mm for Metashape, 40 mm for ContextCapture, and 45 mm for Pix4DMapper. The component-wise errors of ContextCapture and Pix4DMapper were concentrated mainly in the horizontal components, while the vertical component was much smaller. In the local cloud comparison, ContextCapture showed consistently smaller distances from the Metashape reference cloud than Pix4DMapper. For the edged, planar, and curved zones, the root mean square cloud-to-cloud distances were 22, 24, and 20 mm for ContextCapture and 33, 41, and 37 mm for Pix4DMapper, respectively. The planar zone produced the largest separation between the two compared point clouds. Visual inspection also indicated a denser and more complete reconstruction by ContextCapture in several geometrically difficult regions, whereas Pix4DMapper exhibited missing or less complete point-cloud coverage in some areas. Under the reported test configuration, total processing times were 45 min for Metashape, 67 min for ContextCapture, and 86 min for Pix4DMapper. The software packages also differed in workflow complexity and the level of user control over processing parameters.

Conclusion: The results demonstrate that software choice can materially affect the geometric and operational outcome of close-range photogrammetric modeling of a large ship hull even when the input imagery and reference information are held constant. In this data set, Metashape produced the lowest independent check-point error and the shortest recorded processing time, while ContextCapture produced the closest local agreement with the Metashape reference point cloud and favorable surface completeness. Pix4DMapper offered a comparatively simple workflow but produced larger independent check-point errors and larger local cloud distances in the evaluated zones.

NUMBER OF REFERENCES	NUMBER OF FIGURES	NUMBER OF TABLES
35	6	4

مقاله پژوهشی

ارزیابی نرم‌افزارهای فتوگرامتری بردکوتاه در مدل‌سازی سه‌بعدی بدنه یک شناور بزرگ

مصطفی صادقی طوسی، عبادت قنبری پرمهر*، علیرضا آفری

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

چکیده

پیشینه و اهداف: توسعه مستندسازی سه‌بعدی، کنترل ابعادی دیجیتال و رویکردهای مبتنی بر دوقلوی دیجیتال در صنایع دریایی، نیاز به روش‌هایی را افزایش داده است که بتوانند هندسه سازه‌های بزرگ را با پوشش سطحی مناسب، دقت قابل اتکا و هزینه اجرایی منطقی ثبت کنند. فتوگرامتری بردکوتاه یکی از روش‌های مناسب برای این هدف است؛ زیرا امکان تولید ابرنقطه و مدل سه‌بعدی متراکم را با استفاده از دوربین‌های غیرمتریک فراهم می‌کند بااین‌حال، کیفیت خروجی تنها تابع تصاویر ورودی و طراحی شبکه نیست و موتور پردازش نرم‌افزار، نحوه تناظریابی، سرشکنی دسته‌اشعه، خودکالیبراسیون و بازسازی متراکم نیز می‌تواند بر نتیجه نهایی اثر بگذارد. این موضوع در بدنه شناورهای بزرگ اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا سطوح فلزی بازتابنده، رنگ‌های یکنواخت و کم‌بافت، لبه‌های سازه‌ای، پنجره‌ها، تجهیزات جانبی و انحنای پیوسته بدنه به‌صورت هم‌زمان حضور دارند. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی مقایسه‌ای سه نرم‌افزار Metashape، Pix4DMapper و ContextCapture در مدل‌سازی سه‌بعدی بدنه یک شناور و بررسی تفاوت آن‌ها از نظر دقت هندسی مستقل، انطباق موضعی ابرنقاط، کامل‌بودن بازسازی، زمان پردازش، رفتار خودکالیبراسیون و کاربردپذیری بود.

روش‌ها: تصویربرداری با دوربین غیرمتریک گوشی هوشمند iPhone و با فوکوس و نوردهی خودکار انجام شد. از مجموعه اولیه ۴۵۵ تصویر، پنج تصویر به دلیل کیفیت نامناسب کنار گذاشته شد و ۴۵۰ تصویر برای پردازش نهایی باقی ماند که شامل ۲۸۸ تصویر تقریباً موازی و ۱۶۲ تصویر همگرا بود. برای کنترل هندسی مدل، ۵۲ تارگت روی بخش قابل مشاهده بدنه توزیع و مختصات آن‌ها با روش نقشه‌برداری صنعتی و توتال‌استیشن Leica TS۰۹PLUS اندازه‌گیری شد. از این تعداد، ۳۰ نقطه در نقش نقاط کنترل وارد فرایند توجیه و ۲۲ نقطه به‌عنوان نقاط چک مستقل برای ارزیابی دقت خارجی مدل استفاده شد. مجموعه تصاویر و مختصات مرجع در هر سه نرم‌افزار پردازش شد. معیارهای ارزیابی شامل جذر میانگین مربعات خطا در مؤلفه‌های مختصاتی و خطای سه‌بعدی نقاط کنترل و چک، ارزیابی تراکم و کامل‌بودن ابرنقطه، تحلیل فاصله ابرنقطه با ابرنقطه در سه ناحیه نماینده هندسه لبه‌دار، صاف و منحنی، زمان مراحل توجیه و بازسازی متراکم، بررسی گزارش‌های خودکالیبراسیون و ارزیابی مشاهده‌ای پیچیدگی گردش کار و سطح کنترل کاربر بود.

یافته‌ها: نتایج نقاط چک مستقل تفاوت مشخصی میان سه نرم‌افزار نشان داد. جذر میانگین مربعات خطای سه‌بعدی نقاط چک برای Metashape حدود ۵ میلی‌متر، برای ContextCapture حدود ۴۰ میلی‌متر و برای Pix4DMapper حدود ۴۵ میلی‌متر بود. در دو نرم‌افزار ContextCapture و Pix4DMapper سهم اصلی خطا در مؤلفه‌های افقی مشاهده شد و خطای مؤلفه قائم کوچک‌تر بود. در تحلیل موضعی ابرنقاط، جذر میانگین مربعات فاصله برای ContextCapture در زون‌های لبه‌دار، صاف و منحنی به‌ترتیب ۲۲، ۲۴ و ۲۰ میلی‌متر و برای Pix4DMapper به‌ترتیب ۳۳، ۴۱ و ۳۷ میلی‌متر به دست آمد. بیشترین فاصله بین عملکرد دو نرم‌افزار در ناحیه صاف و کم‌بافت مشاهده شد. بررسی بصری نیز نشان داد ContextCapture در تعدادی از نواحی پیچیده، ابرنقطه متراکم‌تر و کامل‌تری تولید کرده است، درحالی‌که در خروجی Pix4DMapper برخی نواحی دارای پوشش ناقص‌تر بودند. زمان کل پردازش در این پژوهش برای Metashape و ContextCapture وPix4DMapper به‌ترتیب ۴۵، ۶۷ و ۸۶ دقیقه ثبت شد. از نظر کاربردپذیری، Pix4DMapper گردش کار ساده‌تری داشت؛ Metashape سطح مناسبی از کنترل پارامترهای پردازش را همراه با گردش کار نسبتاً مستقیم فراهم کرد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که حتی با ثابت بودن مجموعه تصاویر و نقاط مرجع، انتخاب نرم‌افزار می‌تواند بر دقت نقطه‌ای، پیوستگی سطح، انطباق موضعی و زمان پردازش مدل سه‌بعدی یک شناور بزرگ اثر قابل توجهی داشته باشد. در مجموعه داده این پژوهش، Metashape کمترین خطای نقاط چک و کوتاه‌ترین زمان ثبت‌شده را ارائه کرد، در حالی که ContextCapture در مقایسه موضعی با ابرنقطه مرجع، فاصله کمتری نشان داد و از نظر کامل‌بودن سطح عملکرد مطلوبی داشت. Pix4DMapper از نظر سادگی گردش کار مزیت عملی داشت، اما خطای نقاط چک و فاصله موضعی ابرنقاط آن در شرایط آزمون بیشتر بود.

تاریخ دریافت: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ داوری: ۱۷ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ اصلاح: ۲۵ مرداد ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۰۳ آبان ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:
فتوگرامتری بردکوتاه
مدل‌سازی سه‌بعدی
بدنه شناور
Metashape
Pix4DMapper
ContextCapture

* نویسنده مسئول
parmehr@nit.ac.ir
۰۱۱-۳۵۵۰۱۵۸۰

مقدّمه

فتوگرامتری بردکوتاه دیجیتال با استفاده از تصاویر همپوشان و روابط هندسی چندتصویری، امکان بازسازی سه‌بعدی را با دوربین‌های متریک و غیرمتریک فراهم می‌کند [۱،۲،۳]. توسعه خودکالیبراسیون و بهینه‌سازی هم‌زمان پارامترهای دوربین سبب شده است استفاده از دوربین‌های مصرفی نیز در بسیاری از کاربردهای مهندسی امکان‌پذیر شود [۴]. در خط لوله‌های جدید، ساختار از حرکت برای تخمین اولیه هندسه و وضعیت دوربین‌ها به‌کار می‌رود [۵،۶] و سرشکنی دسته‌اشعه پارامترهای توجیه، مختصات نقاط و پارامترهای داخلی را به‌صورت هم‌زمان بهینه می‌کند [۷،۸]. کیفیت این حل به هندسه شبکه، تعداد و توزیع مشاهدات و قابلیت شناسایی عوارض مشترک وابسته است.

در مرحله تناظریابی، توصیفگرهای مقاوم نسبت به مقیاس، دوران و تغییرات روشنایی نقش بنیادی دارند. الگوریتم‌های SIFT، SURF و ORB نمونه‌های شناخته‌شده این گروه هستند [۹-۱۱]. پس از توجیه تصاویر، روش‌های بازسازی چنددیدی برای تولید ابرنقطه متراکم استفاده می‌شوند [۱۲،۱۳] و الگوریتم‌هایی مانند تطبیق نیمه‌سراسری یکی از مبانی رایج محاسبه نقشه عمق به شمار می‌روند [۱۴]. در نتیجه، تفاوت در پیاده‌سازی هر یک از این مراحل می‌تواند باعث شود نرم‌افزارهای مختلف، حتی از مجموعه تصاویر یکسان، خروجی‌های متفاوتی تولید کنند.

یکی از مسائل حساس در کار با دوربین‌های غیرمتریک، پایداری خودکالیبراسیون است. خودکالیبراسیون زمانی قابل اعتمادتر است که شبکه تصویربرداری از تنوع مناسب زاویه دید و افزونگی کافی برخوردار باشد [۱۵]. مدل‌های کلاسیک اعوجاج دوربین نیز نشان می‌دهند که فاصله کانونی، نقطه اصلی و ضرایب اعوجاج می‌توانند با پارامترهای توجیه خارجی هم‌بستگی داشته باشند [۱۶]. مطالعات کالیبراسیون دوربین‌های مصرفی و سامانه‌های تصویربرداری جدید نیز بر نقش طراحی شبکه و تغییرپذیری پارامترهای داخلی تأکید کرده‌اند [۱۷]. این مسئله برای گوشی‌های هوشمند، که فوکوس و نوردهی اغلب به‌صورت خودکار تغییر می‌کند، اهمیت بیشتری دارد.

ارزیابی‌های مقایسه‌ای نرم‌افزارهای فتوگرامتری نشان داده‌اند که یک نرم‌افزار واحد در همه سناریوها لزوماً عملکرد یکسانی ندارد. مرور پردازش خودکار مجموعه‌داده‌های بزرگ، تفاوت راهبردهای نرم‌افزاری و حساسیت آن‌ها به شرایط ورودی را نشان داده است [۱۸]. در مطالعات مرتبط با تولید مدل سطح و مدل سه‌بعدی نیز اختلاف میان بسته‌های پردازشی گزارش شده است [۱۹،۲۰]. در حوزه دریایی، فتوگرامتری برای مستندسازی میراث دریایی و بازسازی سه‌بعدی شناورها و سایت‌های زیرآبی به‌کار رفته است [۲۱،۲۲]. با این حال، سطوح کم‌بافت، بازتابنده و دارای هندسه پیچیده همچنان برای تناظریابی متراکم چالش‌برانگیز هستند [۲۳]. علاوه براین، مدل‌سازی فتوگرامتری بدنه شناورهای فلزی بزرگ در شرایط خشکی یا مجاورت اسکله با چالش‌هایی متفاوت از محیط‌های متداول فتوگرامتری مواجه است. بازتاب آینه‌ای نور از سطوح فلزی و پوشش‌های رنگی، به دلیل وابستگی به زاویه دید و شرایط روشنایی، می‌تواند پایداری ویژگی‌های تصویری را کاهش داده و موجب ایجاد تناظرهای نادرست میان تصاویر شود. همچنین یکنواختی رنگ و کمبود بافت سطحی در بخش‌های وسیع بدنه، تعداد نقاط کلیدی قابل اعتماد را محدود کرده و احتمال ناپیوستگی و کاهش تراکم ابرنقاط را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، ابعاد بزرگ شناور، انحنای پیوسته بدنه، وجود موانع محیطی و محدودیت استقرار دوربین در محیط‌های صنعتی می‌توانند دستیابی به هندسه تصویربرداری مناسب را دشوار سازند. بر این اساس، ارزیابی مقایسه‌ای نرم‌افزارهای فتوگرامتری در چنین شرایطی، به‌ویژه از نظر دقت هندسی، کامل‌بودن بازسازی و پایداری تناظریابی، اهمیت ویژه‌ای دارد.

مطالعات مقایسه‌ای در میراث فرهنگی و سایر محیط‌های پیچیده نیز نشان داده‌اند که دقت هندسی، کامل‌بودن ابرنقطه و پایداری بازسازی به نرم‌افزار و تنظیمات وابسته است [۲۴-۲۷]. در پژوهش‌های جدیدتر، مقایسه بسته‌های مختلف برای مدل‌سازی جنگل و سایت‌های تاریخی نیز تفاوت محسوس خروجی‌ها را تأیید کرده است [۲۸،۲۹]. در کاربردهای زیرآبی، تفاوت عملکرد نرم‌افزارها تحت شرایط تصویربرداری دشوار به‌طور مستقیم گزارش شده است [۳۰]. همچنین پژوهش‌های مبتنی بر گوشی هوشمند نشان داده‌اند که این دوربین‌ها می‌توانند برای مستندسازی کم‌هزینه مناسب باشند، اما کنترل هندسه شبکه و کالیبراسیون همچنان ضروری است [۳۱].

با وجود این پیشینه، بخش زیادی از مقایسه‌ها روی اشیای کوچک‌تر، تصاویر هوایی یا محیط‌های نسبتاً کنترل‌شده انجام شده‌اند. بدنه یک شناور ۱۲۶ متری، علاوه بر مقیاس بزرگ، ترکیبی از سطوح صاف، منحنی، لبه‌دار، کم‌بافت و فلزی را در یک پروژه واحد ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، اتکا به یک شاخص کلی مانند خطای نقاط کنترل نمی‌تواند تفاوت‌های موضعی بازسازی را آشکار کند؛ زیرا نقاط کنترل در فرآیند تعدیل مشارکت دارند و الزاماً معرف دقت خارجی مدل نیستند. بنابراین استفاده از نقاط چک مستقل و تحلیل موضعی سطح برای مقایسه جامع‌تر ضروری است.

این پژوهش به مقایسه کمی و کیفی سه نرم افزار Metashape، Pix4DMapper و ContextCapture در مدل‌سازی سه‌بعدی بدنه یک شناور اقامتی پرداخته و ارزیابی نتایج براساس دقت مستقل نقاط چک، انطباق موضعی ابرنقاط در سه نوع هندسه، کامل‌بودن بازسازی، زمان پردازش و ویژگی‌های مرتبط با خودکالیبراسیون و کاربردپذیری انجام می‌گیرد. نوآوری اصلی مطالعه، آزمون هم‌زمان این معیارها روی یک سازه دریایی بزرگ و با تصاویر یک دوربین غیرمتریک در شرایط عملیاتی است.

روش تحقیق

مطالعه موردی و داده‌های تصویری

مطالعه موردی، یک شناور اقامتی با طول ۱۲۶٫۰۸ متر، عرض ۱۱٫۲۰ متر و تناژ ناخالص ۳۵۰۸ تن است (شکل ۱). بدنه قابل مشاهده شناور شامل سطوح منحنی پیوسته، صفحات نسبتاً صاف، لبه‌های روسازه، پنجره‌ها و تجهیزات متعدد است. این تنوع هندسی در کنار رنگ یکنواخت برخی نواحی و بازتاب سطح فلزی، مجموعه داده را به نمونه‌ای مناسب برای بررسی رفتار نرم‌افزارهای فتوگرامتری در مقیاس صنعتی تبدیل کرد.

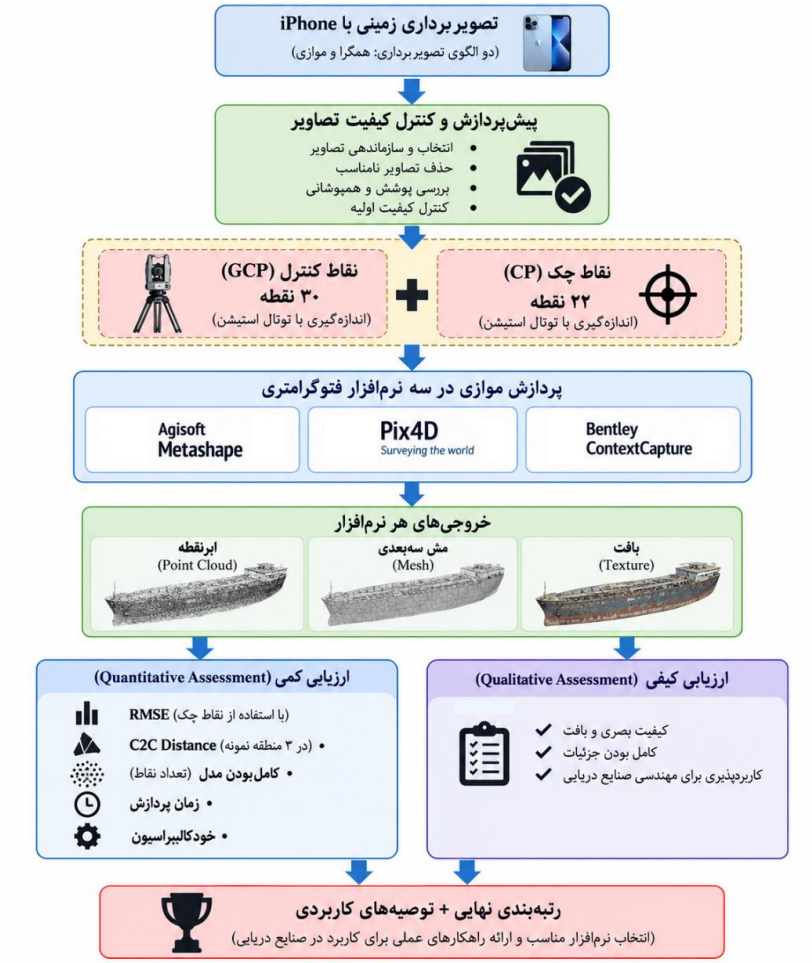
مراحل روش تحقیق

مراحل انجام تحقیق به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: شناور اقامتی به‌عنوان مطالعه موردی

Fig. 1: Accommodation vessel used as the case study



شکل ۲: فلوچارت مراحل اصلی پژوهش

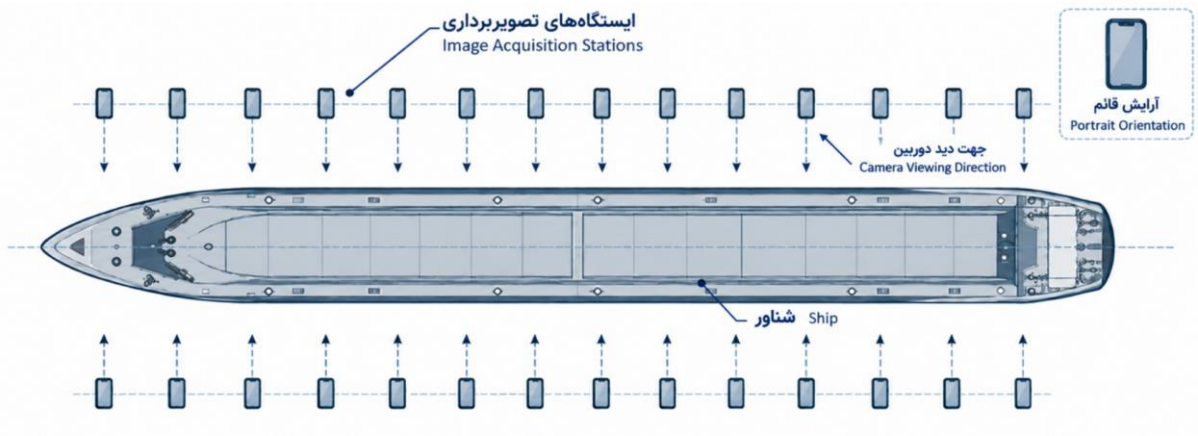
Fig. 2: Flowchart of the main research stages

تصویربرداری

تصویربرداری با دوربین داخلی گوشی هوشمند iPhone 13 pro و با فوکوس و نوردهی خودکار انجام شد. وضوح تصاویر مورد استفاده ۴۰۳۲×۲۲۶۸ پیکسل بود. تصاویر به دوصورت قائم بر بدنه شناور (محور نوری موازی دوربین‌ها) با حالت تصویربرداری قائم دوربین و مایل (محور نوری همگرا دوربین‌ها) با حالت تصویربرداری افقی انجام شد. تصاویر همگرا با زاویه تقریبی ۲۵ تا ۳۵ درجه برای تقویت هندسه تقاطع پرتوها و پایداری سرشکنی دسته‌اشعه استفاده شدند. از ۴۵۵ تصویر اولیه، پنج تصویر به دلیل کیفیت نامناسب حذف شد و ۴۵۰ تصویر شامل ۲۸۸ تصویر قائم و ۱۶۲ تصویر همگرا در پردازش نهایی باقی ماند. تصاویر همگرا با زاویه تقریبی ۲۵ تا ۳۵ درجه برای تقویت هندسه تقاطع پرتوها و پایداری سرشکنی دسته‌اشعه استفاده شدند. همپوشانی طولی تصاویر موازی حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد در نظر گرفته شد. شکل ۳ و ۴ شبکه‌های تصویربرداری از بدنه شناور را نشان می‌دهند.

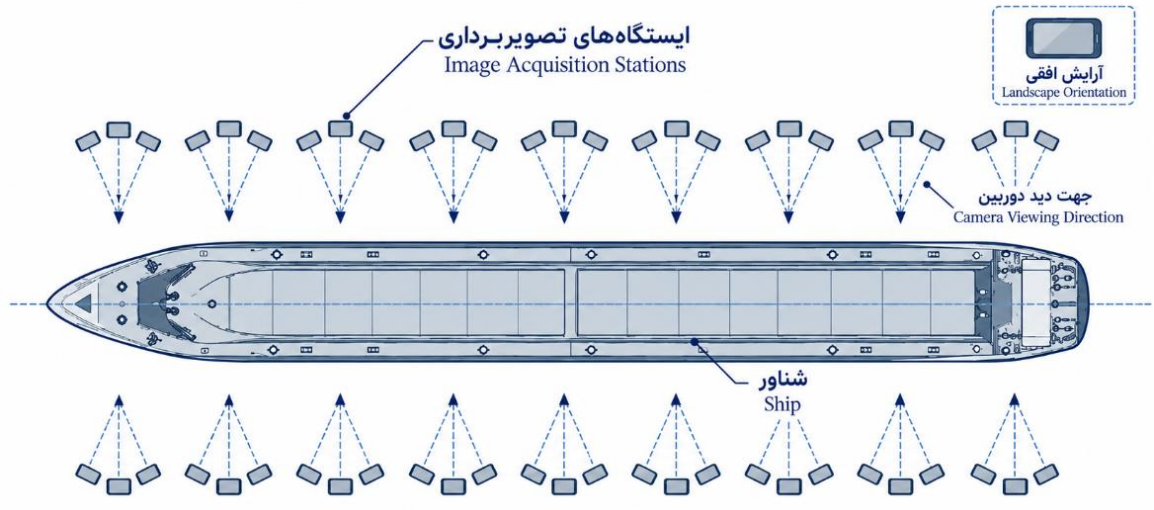
نقاط کنترل و چک

در مجموع ۵۲ تارگت روی بخش قابل مشاهده بدنه نصب شده و مختصات سه‌بعدی مرکز تارگت‌ها با توتال‌استیشن Leica TS09 Plus و در قالب یک شبکه نقشه‌برداری صنعتی اندازه‌گیری شد. از این نقاط، ۳۰ نقطه به‌عنوان نقاط کنترل و ۲۲ نقطه به‌عنوان نقاط چک مستقل برای ارزیابی دقت خارجی انتخاب شد. نقاط در امتداد طول شناور و در دو تراز ارتفاعی توزیع شدند تا دقت در طول و ارتفاع بدنه حفظ شود. استفاده از نقاط چک مستقل با اصول ارزیابی دقت فتوگرامتری سازگار است [۳۲،۳۳]. تارگت‌ها در تصاویر به‌صورت نیمه‌خودکار علامت‌گذاری شده و از نقاط کنترل و چک یکسان برای همه پردازش‌ها استفاده شد. توزیع نقاط کنترل بر روی بدنه شناور در شکل ۵ نشان داده شده است.



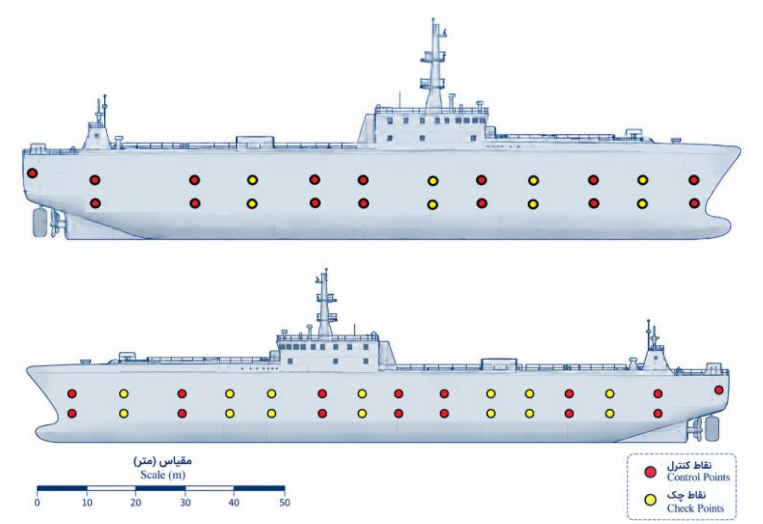
شکل ۳: شبکه تصویر برداری موازی

Fig. 3: Parallel imaging network



شکل ۴: شبکه تصویر برداری همگرا

Fig. 4: Convergent imaging network



شکل ۵: توزیع نقاط کنترل و چک
Fig. 5: Distribution of control and check points

پردازش فتوگرامتری

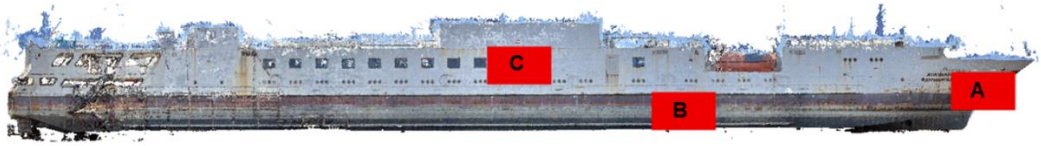
سه نرم‌افزار مورد آزمون شامل Metashape نسخه ۱٫۸٫۴، Pix4DMapper نسخه ۴٫۵٫۶ و ContextCapture نسخه ۱۳۱۷٫۰٫۰٫۲۳ مورد استفاده قرار گرفت. گردش کار اصلی در هر سه نرم‌افزار شامل ورود تصاویر و فراداده، استخراج و تطبیق عوارض، توجیه نسبی، سرشکنی دسته‌اشعه، ورود نقاط کنترل، بهینه‌سازی مدل دوربین، تولید ابرنقطه متراکم و صدور خروجی است. از آنجا که پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و تعاریف سطح کیفیت در نرم‌افزارها یکسان نیست، تنظیمات تا حد امکان در سطح کیفی مشابه انتخاب شد.

نرم افزار Metashape از مدل تطبیقی دوربین و کنترل گسترده پارامترهای کالیبراسیون پشتیبانی می‌کند. Pix4DMapper گردش کار مبتنی بر پیش‌تنظیمات و گزارش کنترل کیفیت ساختاریافته‌تری دارد. ContextCapture با معماری مناسب پروژه‌های بزرگ و قابلیت یکپارچگی با محیط Bentley طراحی شده است. اختلاف در معماری پردازش، مدل دوربین و قواعد حذف نقاط پرت یکی از دلایلی است که مقایسه باید بر شاخص‌های خروجی مستقل متمرکز باشد، نه صرفاً بر پارامترهای داخلی گزارش‌شده توسط هر نرم‌افزار.

معیارهای ارزیابی

دقت هندسی با مقایسه مختصات بازسازی‌شده نقاط کنترل و نقاط چک با مختصات مرجع محاسبه شده و برای هر نرم‌افزار، جذر میانگین مربعات خطا در راستاهای X، Y و Z و سپس خطای سه‌بعدی محاسبه شد. از آنجا که نقاط کنترل مستقیماً در تعدیل استفاده می‌شوند، قضاوت اصلی درباره دقت خارجی بر ۲۲ نقطه چک مستقل استوار شد. طراحی شبکه و نقش نقاط کنترل در پایداری فتوگرامتری در منابع کلاسیک و مطالعات تجربی به‌طور گسترده بررسی شده است [۳۲-۳۴].

برای ارزیابی موضعی سطح، سه ناحیه از بدنه با هندسه متفاوت انتخاب شد: زون A شامل سطح لبه‌دار در بخش دماغه، زون B شامل سطح نسبتاً صاف دیواره و پنجره‌ها و زون C شامل سطح منحنی بدنه. برای ارزیابی میزان انطباق هندسی مدل‌های سه‌بعدی، از روش Cloud-to-Cloud Distanceدر نرم‌افزار CloudCompare نسخه ۲٫۱۳٫۲ استفاده شد. در این روش، ابرنقطه حاصل از Metashape به‌عنوان مرجع مقایسه نسبی و ابرنقاط حاصل از ContextCapture و Pix4DMapper به‌عنوان داده‌های مورد ارزیابی در نظر گرفته شدند. الگوریتم استاندارد C2C بر اساس محاسبه فاصله اقلیدسی هر نقطه از ابرنقطه مورد ارزیابی تا نزدیک‌ترین نقطه در ابرنقطه مرجع عمل می‌کند. بنابراین این فاصله‌ها ماهیتی یک‌طرفه و بدون علامت دارند و بیانگر میزان توافق نسبی مدل‌ها هستند. شاخص RMS فاصله ابرنقاط از ریشه میانگین مربعات فاصله نقاط معتبر محاسبه می‌شود. این شاخص، برخلاف RMSE نقاط چک مستقل، بیانگر دقت مطلق مدل نیست؛ زیرا ابرنقطه مرجع نیز ممکن است دارای خطاهای هندسی باشد. این روش، اختلاف هندسی میان مدل‌ها را نشان می‌دهد؛ با این حال، چون مرجع یک خروجی فتوگرامتری است، شاخص مذکور به‌عنوان دقت مطلق سطح تفسیر نمی‌شود. شکل ۶ موقعیت زون‌ها بر روی بدنه شناور را نشان می‌دهد.



شکل ۶: موقعیت زون‌ها بر روی بدنه شناور به ترتیب زون A (راست)، زون B (وسط) و زون C (چپ)
Fig. 6: Location of the zones on the vessel hull: Zone A (Right), Zone B (center), and Zone C (Left)

کارایی محاسباتی با ثبت زمان مرحله توجیه و تولید ابرنقطه متراکم و مجموع آن‌ها برای سخت‌افزار پردازشی شامل پردازنده Intel Core i۹-۱۱۹۰۰K، حافظه ۶۴ گیگابایت و کارت گرافیک NVIDIA RTX ۳۰۹۰ انجام گردید. همچنین، گزارش‌های خودکالیبراسیون هر نرم‌افزار از نظر تغییرات پارامترهای داخلی و هم‌بستگی آن‌ها بررسی شد که با توجه به تفاوت مدل ریاضی و قرارداد مختصات تصویر، ضرایب خام کالیبراسیون بین نرم‌افزارها مستقیماً رتبه‌بندی نشدند.

نتایج و بحث

نتایج پردازش اولیه و کیفیت توجیه نسبی

پردازش اولیه عکس‌ها در سه نرم افزار در جدول ۱ خلاصه شده است. با توجه به وجود اطلاعات مراکز عکسی که از موقعیت دوربین به دست آمده پردازش‌ها در دو حالت کلی با حضور و عدم حضور مراکز عکسی انجام شد. نتایج حاصل از پردازش تصاویر در جدول زیر آمده است.

با توجه به جدول ۱ نرم افزار ContextCapture در همه حالت‌ها موفق به تولید مدل سه بعدی شده است اما نرم افزار Metashape در حالت استفاده از تصاویر موازی و مایل موفق به تولید مدل سه بعدی شده است. نرم افزار Pix4DMapper فقط در صورت داشتن مختصات اولیه مراکز عکسی موفق به تولید مدل سه بعدی شده است.

دقت نقطه‌ای نقاط کنترل و چک

خلاصه دقت نقاط کنترل و چک در جدول ۲ ارائه شده است. Metashape در نقاط کنترل جذر میانگین مربعات خطای سه‌بعدی حدود ۳ میلی‌متر و در نقاط چک حدود ۵ میلی‌متر است. در مقابل، خطای سه‌بعدی نقاط چک ContextCapture برابر ۴۰ میلی‌متر و Pix4DMapper برابر ۴۵ میلی‌متر است. بنابراین اختلاف میان نرم‌افزارها در نقاط مستقل به‌مراتب آشکارتر از یک مقایسه صرفِ کیفیت بصری مدل است.

در Pix4DMapper و ContextCapture، مؤلفه‌های X و Y سهم اصلی خطای سه‌بعدی را تشکیل دادند، درحالی‌که خطای Z حدود ۴ میلی‌متر بود. این ناهمسانی نشان می‌دهد کیفیت هندسی مدل در راستاهای مختلف یکسان نبوده است. در Metashape خطاهای سه مؤلفه کوچک‌تر و متوازن‌تر بودند. از آنجا که نقاط چک در سرشکنی به‌عنوان قید استفاده نشده‌اند، این نتایج مبنای اصلی ارزیابی دقت خارجی قرار گرفتند. تفاوت مشاهده‌شده با این اصل سازگار است که راهبردهای متفاوت تطبیق، حذف نقاط پرت، وزن‌دهی مشاهدات و مدل‌سازی پارامترهای دوربین می‌توانند به جواب‌های متفاوتی از یک مجموعه داده برسند [۱۸،۱۹،۲۴،۲۷-۳۰].

نتایج ارزیابی نقاط چک مستقل نشان می‌دهد که خطای سه‌بعدی در نرم‌افزار Metashape حدود ۵ میلی‌متر بوده، درحالی‌که این مقدار برای ContextCapture و Pix4DMapper به‌ترتیب حدود ۴۰ و ۴۵ میلی‌متر به دست آمده است. این اختلاف قابل‌توجه نشان می‌دهد که با وجود یکسان بودن مجموعه تصاویر و مختصات مرجع، راهبردهای پردازشی مختلف می‌توانند به نتایج هندسی متفاوتی منجر شوند. یکی از عوامل احتمالی این اختلاف، تفاوت در استخراج و تطبیق نقاط هم‌نام و نحوه حذف مشاهدات نامعتبر است. در بدنه شناورهای فلزی بزرگ، وجود سطوح یکنواخت و کم‌بافت در کنار بازتاب آینه‌ای نور می‌تواند پایداری عوارض تصویری را کاهش دهد. این شرایط احتمال ایجاد تناظرهای نامطمئن و توزیع نامتوازن نقاط هم‌نام را افزایش داده و بر کیفیت توجیه تصاویر و بازسازی سه‌بعدی اثر می‌گذارد. با توجه به تفاوت راهبردهای پردازشی نرم‌افزارها، حساسیت آن‌ها به چنین شرایطی ممکن است یکسان نباشد. از سوی دیگر، تفاوت در مدل‌های ریاضی خودکالیبراسیون، وزن‌دهی نقاط کنترل و نحوه اعمال اطلاعات اولیه موقعیت دوربین‌ها می‌تواند بر نتیجه سرشکنی دسته‌اشعه مؤثر باشد.

جدول ۱: نتیجه پردازش تصاویر در مرحله Alignment

Table1: Image processing results at alignment stage

Imaging network / شبکه عکسبرداری	Without camera center positions / بدون موقعیت مراکز عکسی			With camera center positions / با موقعیت مراکز عکسی		
	parallel / موازی	Convergent / همگرا	Parallel and convergent / موازی و همگرا	parallel / موازی	Convergent / همگرا	Parallel and convergent / موازی و همگرا
Metashape	✗	✓	✓	✗	✓	✓
ContextCapture	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pix4DMapper	✗	✗	✗	✗	✓	✓

جدول ۲: مقایسه دقت نقاط کنترل و چک در سه نرم‌افزار

Table 2: Control- and check-point accuracy for the three software packages

Software / نرم‌افزار	Point type / نوع نقطه	RMSE X (mm)	RMSE Y (mm)	RMSE Z (mm)	RMSE 3D (mm)
Metashape	Control / کنترل	2	1	1	3
Metashape	Check / چک	3	3	2	5
ContextCapture	Control / کنترل	26	35	4	44
ContextCapture	Check / چک	24	31	4	40
Pix4DMapper	Control / کنترل	25	24	2	35
Pix4DMapper	Check / چک	29	34	4	45

این موضوع با توجه به استفاده از دوربین غیرمتریک گوشی هوشمند و فوکوس خودکار اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. همچنین، تفاوت تنظیمات و تعاریف سطوح کیفیت در نرم‌افزارها ممکن است موجب شود شرایط بهینه‌سازی هندسی کاملاً معادل نباشند.

در مجموع، برتری Metashape از نظر دقت نقاط چک در این مجموعه داده را نمی‌توان به یک الگوریتم منفرد نسبت داد، بلکه این نتیجه احتمالاً حاصل برهم‌کنش راهبردهای پردازشی، هندسه شبکه، مدل خودکالیبراسیون و نحوه اعمال مشاهدات مرجع است. تفکیک سهم هر عامل نیازمند آزمایش‌های کنترل‌شده تکمیلی و بررسی جزئیات فرایند تعدیل در هر نرم‌افزار خواهد بود.

انطباق موضعی ابرنقاط و اثر هندسه سطح

جدول ۳ نتایج تحلیل فاصله ابرنقاط را در سه زون نشان می‌دهد. در زون A با هندسه لبه‌دار، جذر میانگین مربعات فاصله برای ContextCapture برابر ۲۲ میلی‌متر و برای Pix4DMapper برابر ۳۳ میلی‌متر بود. در زون B با سطح صاف، این مقادیر به‌ترتیب ۲۴ و ۴۱ میلی‌متر و در زون C با سطح منحنی ۲۰ و ۳۷ میلی‌متر به دست آمد. بنابراین در هر سه زون، ContextCapture از نظر فاصله نسبت به ابرنقطه مرجع Metashape انطباق نزدیک‌تری نشان داد.

بیشترین اختلاف بین دو نرم‌افزار در زون صاف مشاهده شد. این رفتار از نظر فتوگرامتری قابل انتظار است، زیرا سطح کم‌بافت نقاط کلیدی و قیود متراکم کمتری برای حل عمق فراهم می‌کند و احتمال ایجاد شکاف یا ناپایداری موضعی افزایش می‌یابد [۲۳]. در بررسی بصری نیز ContextCapture در بعضی نواحی ابرنقطه متراکم‌تر و کامل‌تری تولید کرد، در حالی که خروجی Pix4DMapper در برخی بخش‌ها دارای پوشش ناقص‌تر بود. مطالعات مقایسه‌ای پیشین نیز حساسیت بازسازی متراکم به بافت، هندسه و موتور پردازش را گزارش کرده‌اند [۳۰-۲۴،۲۷].

لازم به تأکید است که در تحلیل فاصله ابرنقطه با ابرنقطه (C2C) خروجی نرم‌افزار Metashape به‌عنوان مرجع مقایسه نسبی انتخاب شده است. ازآنجاکه این ابرنقطه نیز با روش فتوگرامتری تولید شده و ممکن است دارای خطاهای هندسی باشد، مقادیر C2C صرفاً بیانگر میزان انطباق نسبی خروجی‌های ContextCapture و Pix4DMapper با مدل مرجع متجانس هستند و نباید به‌عنوان شاخص دقت مطلق سطوح تفسیر شوند. بنابراین، کمتر بودن مقادیر C2C در ContextCapture صرفاً نشان‌دهنده توافق هندسی بیشتر آن با ابرنقطه Metashape در نواحی بررسی‌شده است و لزوماً به معنای دقت مطلق بالاتر آن نیست. ارزیابی دقت مطلق سطوح مستلزم استفاده از داده‌های مرجع مستقل با دقت مشخص، مانند ابرنقطه حاصل از اسکنر لیزری زمینی، همراه با کنترل خطای ثبت و هم‌مرجع‌سازی داده‌ها است. ازاین‌رو، نتایج C2C در پژوهش حاضر به‌عنوان شاخص مکمل ارزیابی هندسی در کنار دقت نقاط چک مستقل مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

زمان پردازش و کارایی محاسباتی

زمان‌های ثبت‌شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که Metashape در شرایط آزمون با ۴۵ دقیقه کمترین زمان کل را داشت. زمان کل ContextCapture برابر ۶۷ دقیقه و Pix4DMapper برابر ۸۶ دقیقه بود. در هر سه نرم‌افزار، مرحله بازسازی متراکم بیشترین سهم زمان را به خود اختصاص داد که با بار محاسباتی بالای تخمین عمق و بازسازی چنددیدی سازگار است [۱۲-۱۴].

لازم به ذکر است که این نتایج باید به‌صورت تجربی و وابسته به محیط آزمون تفسیر شوند. گزینه‌هایی مانند «کیفیت متوسط» در نرم‌افزارهای مختلف الزاماً یک رزولوشن مؤثر یا پیچیدگی محاسباتی یکسان ایجاد نمی‌کنند و استفاده از پردازنده گرافیکی نیز در هر موتور پردازشی متفاوت است. ازاین‌رو، زمان‌های جدول ۴ برای مقایسه همین مجموعه داده مفیدند، اما نباید به‌عنوان مشخصه ثابت نرم‌افزارها در نظر گرفته شوند.

جدول ۳: فاصله ابرنقطه با ابرنقطه در سه زون هندسی

Table 3: Cloud-to-cloud distances in the three geometric zones

زون / Zone	نرم‌افزار / Software	Mean (m)	STD (m)	RMSE (m)
A: لبه‌دار / Edged	Pix4DMapper	0.027	0.019	0.033
A: لبه‌دار / Edged	ContextCapture	0.018	0.012	0.022
B: صاف / Planar	Pix4DMapper	0.034	0.023	0.041
B: صاف / Planar	ContextCapture	0.019	0.015	0.024
C: منحنی / Curved	Pix4DMapper	0.031	0.021	0.037
C: منحنی / Curved	ContextCapture	0.016	0.012	0.020

جدول ۴: زمان پردازش مراحل اصلی در شرایط آزمون

Table 4: Processing time of the main stages under the test configuration

مرحله / Stage	Metashape	Pix4DMapper	ContextCapture
توجیه / Alignment	10	28	22
ابرنقطه متراکم / Dense cloud	35	58	45
کل / Total	45	86	67

خودکالیبراسیون و تفسیر پارامترهای دوربین

گزارش‌های خودکالیبراسیون سه نرم‌افزار از نظر ساختار یکسان نبودند. در برخی گزارش‌ها مختصات نقطه اصلی نسبت به مرکز تصویر و در برخی نسبت به دستگاه پیکسلی تصویر بیان می‌شد. همچنین ضرایب اعوجاج با نمادگذاری و نرمال‌سازی متفاوت گزارش شده بودند. به همین دلیل مقایسه مستقیم مقدار عددی فاصله کانونی، نقطه اصلی یا ضرایب اعوجاج بین نرم‌افزارها از نظر علمی معتبر نیست، مگر آنکه همه پارامترها به یک مدل و دستگاه مختصات مشترک تبدیل شوند. در ارزیابی حاضر، خودکالیبراسیون به‌عنوان شاخص مکمل در کنار خطای نقاط چک تفسیر شد. اهمیت این رویکرد در کار با گوشی هوشمند بیشتر است، زیرا فوکوس خودکار و پردازش داخلی تصویر می‌تواند پارامترهای مؤثر دوربین را تغییر دهد [۱۷،۳۱]. وجود شبکه همگرا و تعدد مشاهدات به کاهش هم‌بستگی پارامترها کمک می‌کند [۱۵،۱۶]؛ با این حال، شاخص نهایی موفقیت کالیبراسیون باید در خروجی‌های مستقل هندسی مانند نقاط چک منعکس شود.

کاربردپذیری و قابلیت کنترل پردازش

ارزیابی مشاهده‌ای گردش کار نشان داد Pix4DMapper با پنج مرحله اصلی و حدود ۲۸ دقیقه تعامل فعال کاربر، ساده‌ترین روند را در پروژه نمونه داشت. Metashape با شش مرحله و حدود ۳۵ دقیقه تعامل، تعادلی میان سادگی و دسترسی به پارامترهای پیشرفته فراهم کرد. ContextCapture با هشت مرحله و حدود ۴۷ دقیقه تعامل، گردش کار پیچیده‌تری داشت اما امکانات بیشتری برای پروژه‌های بزرگ و یکپارچگی با محصولات Bentley ارائه می‌کرد.

از نظر کنترل پارامترهای تولید ابرنقاط متراکم و خودکالیبراسیون، Metashape و ContextCapture گزینه‌های بیشتری در اختیار کاربر قرار می‌دادند، در حالی که Pix4DMapper بیشتر بر گردش کار مبتنی بر پیش‌تنظیمات تکیه داشت. این تفاوت عملی مهم است؛ زیرا در پروژه‌های صنعتی، سهولت کاربری، قابلیت تکرار پردازش و امکان کنترل پارامترها باید در کنار دقت هندسی و زمان محاسباتی دیده شوند. نتایج این پژوهش نیز نشان داد هیچ نرم‌افزاری در همه معیارها به‌طور هم‌زمان برتری یکسانی ندارد.

یکی از محدودیت‌های روش‌شناختی پژوهش حاضر، استفاده از دوربین غیرمتریک گوشی هوشمند با قابلیت فوکوس و نوردهی خودکار است. تغییر موقعیت فوکوس در طول تصویربرداری می‌تواند موجب تغییر فاصله کانونی مؤثر و برخی پارامترهای توجیه داخلی دوربین شده و بر پایداری مدل خودکالیبراسیون تأثیر بگذارد. همچنین تغییر نوردهی خودکار، به‌ویژه در مواجهه با سطوح فلزی بازتابنده بدنه شناور، ممکن است با تغییر روشنایی و کنتراست تصاویر، قابلیت استخراج و تطبیق نقاط هم‌نام را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش، استفاده از شبکه تصویربرداری همگرا در کنار تصاویر تقریباً موازی و به‌کارگیری نقاط کنترل و چک مستقل، امکان تقویت هندسه شبکه و ارزیابی دقت خارجی بازسازی را فراهم کرد. بااین‌حال، این اقدامات لزوماً تغییرات احتمالی پارامترهای داخلی دوربین را حذف نمی‌کنند. ازاین‌رو، نتایج حاصل باید در چارچوب شرایط تصویربرداری و تنظیمات دوربین مورد استفاده تفسیر شوند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، تصویربرداری با فوکوس، نوردهی و بزرگنمایی ثابت انجام شده و پایداری پارامترهای خودکالیبراسیون نیز به‌صورت مستقل ارزیابی شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد سه نرم‌افزار Metashape، Pix4DMapper و ContextCapture در مدل‌سازی سه‌بعدی بدنه یک شناور بزرگ با استفاده از مجموعه تصاویر و نقاط مرجع یکسان ارزیابی شد. نتایج نشان داد که Metashape با خطای سه‌بعدی حدود ۵ میلی‌متر در نقاط چک مستقل، دقت بالاتری نسبت به ContextCapture و Pix4DMapper با خطاهای به‌ترتیب ۴۰ و ۴۵ میلی‌متر ارائه کرده است. در تحلیل انطباق نسبی ابرنقاط(C2C) ، مقادیر RMSE در سه ناحیه مورد بررسی برای ContextCaptureبین ۲۰ تا ۲۴ میلی‌متر و برای Pix4DMapper بین ۳۳ تا ۴۱ میلی‌متر بود که نشان‌دهنده تطابق بیشتر ContextCapture با ابرنقطه مرجع Metashape است. همچنین زمان کل پردازش برای Metashape، ContextCapture و Pix4DMapper به‌ترتیب ۴۵، ۶۷ و ۸۶ دقیقه ثبت شد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که انتخاب نرم‌افزار فتوگرامتری برای مدل‌سازی سازه‌های دریایی بزرگ باید بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای دقت هندسی، کامل‌بودن بازسازی و کارایی پردازش انجام شود. با این‌حال، استفاده از دوربین غیرمتریک گوشی هوشمند با فوکوس و نوردهی خودکار از محدودیت‌های پژوهش حاضر است؛ زیرا تغییر احتمالی پارامترهای داخلی دوربین و شرایط رادیومتریکی تصاویر می‌تواند بر پایداری خودکالیبراسیون و کیفیت بازسازی تأثیر بگذارد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از تنظیمات ثابت دوربین و داده‌های مرجع مستقل، مانند اسکنر لیزری سه‌بعدی، برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد نرم‌افزارها استفاده شود.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش این مقاله به شرح زیر است: نویسنده اول مسئولیت اصلی جمع آوری و آماده سازی داده‌ها و تهیه پیشنویس مقاله را بر عهده داشته است. نویسنده دوم در اجرای فرآیندهای پیاده سازی، پشتیبانی فنی و در سامان دهی ساختار پژوهش و نگارش همکاری کرده است. نویسنده سوم نقش مؤثری در بازبینی علمی، اصلاح محتوایی و ویرایش نهایی مقاله داشته است.

تشکر و قدرانی

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد فتوگرامتری آقای مصطفی صادقی طوسی بوده و از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل که از انجام تحقیق حمایت نموده قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Grieves M, Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen FJ, Flumerfelt S, Alves A, editors. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

[2] Luhmann T, Robson S, Kyle S, Boehm J. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. Berlin, Boston: De Gruyter; 2020. https://doi.org/10.1515/9783110607253

[3] Remondino F, Fraser C. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2006;36(5):266–272. DOI (منبعETH Zurich): https://doi.org/10.3929/ethz-b-000158067

[4] Fraser CS. Automatic Camera Calibration in Close Range Photogrammetry. Photogramm Eng Remote Sens. 2013;79(4):381–388. https://doi.org/10.14358/PERS.79.4.381

[5] Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology. 2012; 179:300–314. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021

[6] Eltner A, Sofia G. Structure from motion photogrammetric technique. In: Tarolli P, Mudd SM, editors. Developments in Earth Surface Processes. Vol. 23. Elsevier; 2020. p. 1–24. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1

[7] Triggs B, McLauchlan PF, Hartley RI, Fitzgibbon AW. Bundle adjustment—a modern synthesis. In: International Workshop on Vision Algorithms. Springer; 1999. p. 298–372. https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21

[8] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2004. https://doi.org/10.1017/CBO9780511811685

[9] Lowe DG. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. Int J Comput Vis. 2004;60(2):91–110. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94

[10] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, Van Gool L. Speeded-up robust features (SURF). Comput Vis Image Underst. 2008;110(3):346–359. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014

[11] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, Bradski G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In: IEEE International Conference on Computer Vision; 2011. https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544

[12] Seitz SM, Curless B, Diebel J, Scharstein D, Szeliski R. A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; 2006. https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.19

[13] Furukawa Y, Ponce J. Combining Multi-view Stereo and Bundle Adjustment for Accurate Camera Calibration. In: Ronfard R, Taubin G, editors. Image and Geometry Processing for 3-D Cinematography. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. p. 151–169. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12392-4_7

[14] Hirschmuller H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. 2008;30(2):328–341. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1166

[15] Fraser CS. Digital camera self-calibration. ISPRS J Photogramm Remote Sens. 1997;52(4):149–159. https://doi.org/10.1016/S0924-2716(97)00005-1

[16] Brown DC. Close-range camera calibration. Photogramm Eng. 1971;37(8):855–866.

[17] Cramer M, Przybilla HJ, Zurhorst A. UAV cameras: overview and geometric calibration benchmark. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2017; XLII-2/W6:85–92. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-85-2017

[18] Remondino F, Nocerino E, Toschi I, Menna F. A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2017; XLII-2/W5:591–599. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017

[19] Sona G, Pinto L, Pagliari D, Passoni D, Gini R. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. Earth Sci Inform. 2014;7(2):97–107. https://doi.org/10.1007/s12145-013-0142-2

[20] Vacca G, Furfaro G, Dessì A. The use of UAV images for the building 3D model generation. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2018; XLII-4/W8:217–223. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W8-217-2018

[21] Menna F, Nocerino E, Scamardella A. Reverse engineering and 3D modelling for digital documentation of maritime heritage. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2011; XXXVIII-5/W16:245–252. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-245-2011

[22] Costa E. The progress of survey techniques in underwater sites: The case study of Cape Stoba shipwreck. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2019; XLII-2/W10:69–75. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-69-2019

[23] Remondino F, Spera MG, Nocerino E, Menna F, Nex F. State of the art in high density image matching. Photogramm Rec. 2014;29(146):144–166. https://doi.org/10.1111/phor.12063

[24] Koutsoudis A, Vidmar B, Ioannakis G, Arnaoutoglou F, Pavlidis G, Chamzas C. Multi-image 3D reconstruction data evaluation. J Cult Herit. 2014;15(1):73–79. https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.12.003

[25] Nex F, Remondino F. UAV for 3D mapping applications: A review. Appl Geomat. 2014;6(1):1–15. https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x

[26] Sanz-Ablanedo E, Chandler JH, Rodríguez-Pérez JR, Ordóñez C. Accuracy of unmanned aerial vehicle and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. Remote Sens. 2018;10(10):1606. https://doi.org/10.3390/rs10101606

[27] Kingsland K. Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage. Digit Appl Archaeol Cult Herit. 2020;18:e00157. https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00157

[28] Jarahizadeh S, Salehi B. A comparative analysis of UAV photogrammetric software performance for forest 3D modeling: A case study using AgiSoft PhotoScan, PIX4DMapper, and DJI Terra. Sensors. 2024;24(1):286. https://doi.org/10.3390/s24010286

[29] Alidoost F, Arefi H. Comparison of UAS-based photogrammetry software for 3D point cloud generation: A survey over a historical site. ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2017; IV-4/W4:55–61. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017

[30] Vlachos M, Berger L, Mathelier R, Agrafiotis P, Skarlatos D. Software comparison for underwater archaeological photogrammetric applications. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2019;XLII-2/W15:1195–1201. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1195-2019

[31] Murtiyoso A, Grussenmeyer P. Experiments using smartphone-based videogrammetry for low-cost cultural heritage documentation. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2021; XLVI-M-1-2021:487–491. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-487-2021

[32] Mikhail EM, Bethel JS, McGlone JC. Introduction to Modern Photogrammetry. New York: Wiley; 2001. لینک ناشر: https://www.wiley-vch.de/en/areas-interest/engineering/introduction-to-modern-photogrammetry-978-0-471-30924-6

[33] Kraus K. Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. Berlin: De Gruyter; 2007. https://doi.org/10.1515/9783110892871

[34] Agarwal S, Snavely N, Seitz SM, Szeliski R. Bundle Adjustment in the Large. In: European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. p. 29–42. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15552-9_3

[35] Bernardini F, Mittleman J, Rushmeier H, Silva C, Taubin G. The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. IEEE Trans Vis Comput Graph. 1999;5(4):349–359. https://doi.org/10.1109/2945.817351

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مصطفی صادقی طوسی دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری (گرایش فتوگرامتری) دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل می‌باشد. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: مهندسی نقشه‌برداری، نقشه برداری صنعتی، فتوگرامتری، پردازش تصاویر و پردازش ابرنقاط.

Sadeghitoosi, M. Department of Geomatics Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
m.sadeghitoosi@gmail.com



عبادت قنبری پرمهر دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل دارای مدرک دکتری تخصصی فتوگرامتری و سنجش از دور از دانشگاه ملبورن استرالیا در سال ۱۳۹۴ و پسادکترا در دانشگاه RMIT استرالیا است. ایشان تا کنون موفق به چاپ بیش از ۵۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، پردازش تصاویر، کاربرد یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در کشاورزی و سنجش از دور.

Parmehr, E. G. Associate Professor at Department of Geomatics Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
parmehri@nit.ac.ir



علیرضا آفری فارغ‌التحصیل کارشناسی نقشه‌برداری از دانشگاه تبریز و کارشناسی ارشد گرایش ژئودزی و دکتری گرایش فتوگرامتری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقاله‌های متعدد در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی شده‌اند. همچنین ایشان در حوزه فتوگرامتری هوایی، بینایی رایانه‌ای و سنجش از دور مشغول به فعالیت و تحقیق می‌باشد.

afary@nit.ac.ir

Afary, A. Assistant Professor at Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Citation (Vancouver): Sadeghitoosi M, Ghanbari Parmehr E, Afary A. [Evaluation of close-range photogrammetry software for 3D modeling of a large ship hull]. *J. RS. GEOINF. RES. 2026; 4(2): 293-304*

https://doi.org/10.22061/jrsgr.2026.113675.1145

COPYRIGHTS

© 2026 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/)