



## ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Accuracy assessment of direct georeferencing of smartphone's images in videogrammetry method

M. Shafiei, A. Milan\*, A. Vafaeinejad

Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

## ABSTRACT

Received: 13 February 2025

Reviewed: 21 May 2025

Revised: 03 July 2025

Accepted: 20 August 2025

## KEYWORDS:

Smart Phone

Direct Georeferencing

Close Range Photogrammetry

Structure From Motion

\* Corresponding author

✉ [a\\_milan@sbu.ac.ir](mailto:a_milan@sbu.ac.ir)

☎ (+9821) 73932456

**Background and Objectives:** The integration of imaging technologies with geolocation sensors such as GPS, accelerometers, gyroscopes, and compasses enables precise determination of the camera's position and orientation during image capture. This capability plays a crucial role in simplifying the georeferencing process of 3D models, particularly in mobile mapping systems and short-range terrestrial applications. In this context, smartphones, equipped with these geolocation sensors, have gained significant prominence as imaging devices. This study examines the feasibility of direct georeferencing of 3D models generated through Structure-from-Motion (SFM) photogrammetry using camera position and orientation data simultaneously recorded by the sensors embedded in a smartphone.

**Methods:** The research data comprises ground control points collected using a Leica TS09 R1000 total station in reflector less mode, along with data obtained from an iPhone 13 Pro smartphone. In the proposed method, the relative orientation parameters estimated by the Structure-from-Motion algorithm were refined using orientation parameters directly measured by the smartphone's motion sensors. Image acquisition was conducted under static conditions; therefore, the estimated and measured angles at each station should remain constant and, in the absence of errors, should be identical. The final model was oriented using the average of the measured angles at each station. The measured distance was then used to establish the model scale, and the average coordinates obtained at each station were employed to transform the model into the UTM coordinate system. Additionally, an alternative model was generated using the precise positions of the imaging stations via indirect georeferencing. The RMSE of the check points was used as the accuracy assessment metric for the proposed method.

**Findings:** The studied stockpile was approximately 150 meters in length and 25 meters in height, oriented roughly from south to north. In this study, five 3D models were generated based on the collected data. The first model was constructed solely using images, positional data, and angles recorded by the smartphone's sensors. Subsequently, coded targets were incrementally added as control points, with one, two, and three control points being incorporated into the equations. The fifth model was generated using the same images but with the precise coordinates of twelve imaging stations measured by a total station. In the first model, the positioning error remained at the accuracy level of the iOS single-point positioning system (approximately 2 meters in planimetric accuracy and 11 meters in height). In the model with a single control point, aligning the model with the low-accuracy GPS coordinates from the smartphone resulted in an azimuth calculation error, leading to model rotation. Although the model was correctly transferred, the azimuth error caused a misalignment with the reference system, resulting in an error of approximately 0.40 meters. With the addition of two and three control points, accuracy improved, reaching 0.004 meters, which matched the accuracy achieved using precise camera center coordinates. In the fifth case, where the exact coordinates of the imaging stations were used, an accuracy of 0.0007 meters was obtained.

**Conclusion:** As observed, GPS accuracy remains the most challenging aspect of this system. Most smartphones do not provide raw GNSS data or high-quality raw positioning data; instead, they only offer the final processed position determined by the operating system. Given the hardware and environmental limitations, the following considerations are recommended for future studies:

- a) Development of a handheld mobile mapping system by integrating survey-grade GPS with a smartphone camera.
- b) Since the study area consists of earthwork features with irregular shapes, when applying this method to structured objects such as buildings, it is recommended to refine the relative exterior orientation parameters of images using constraints derived from prominent vertical and horizontal features in the scene and incorporating them into the bundle adjustment process.



NUMBER OF REFERENCES

43



NUMBER OF FIGURES

8



NUMBER OF TABLES

5

## مقاله پژوهشی

## ارزیابی دقت توجیه مستقیم تصاویر گوشی‌های هوشمند در روش ویدئوگرامتری

مهران شفيعی، اصغر میلان\*، علیرضا وفائی‌نژاد

گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

## چکیده

**پیشینه و اهداف:** ادغام فناوری‌های تصویربرداری با حسگرهای مکان‌نگاری نظیر GPS، شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و قطب‌نما، امکان تعیین دقیق وضعیت و موقعیت دوربین در هنگام تصویربرداری را فراهم کرده است. این قابلیت، به‌ویژه در سامانه‌های نقشه‌برداری سیار و کاربردهای برد کوتاه زمینی، نقش کلیدی در ساده‌سازی فرآیند ارجاع جغرافیایی مدل‌های سه‌بعدی ایفا می‌کند. در این میان، تلفن‌های هوشمند به‌عنوان دوربین‌هایی مجهز به این حسگرهای مکان‌نگار، جایگاهی ویژه پیدا کرده‌اند. در این مطالعه، قابلیت ارجاع جغرافیایی مستقیم مدل سه‌بعدی حاصل از روش فتوگرامتری ساختار ناشی از حرکت با استفاده از داده‌های موقعیت و وضعیت دوربین که به‌صورت همزمان توسط حسگرهای موجود در گوشی هوشمند اندازه‌گیری شده‌اند، بررسی شده است.

**روش‌ها:** داده‌های پژوهش شامل نقاط برداشت شده با استفاده از توتال‌استیشن Leica TS09 R1000 در حالت بدون منشور، همراه با داده‌های جمع‌آوری شده به‌وسیله تلفن هوشمند iPhone 13 Pro است. در روش پیشنهادی، پارامترهای جهت‌گیری نسبی که در الگوریتم ساختار ناشی از حرکت تخمین زده شده‌اند، با استفاده از پارامترهای جهت‌گیری که مستقیماً از طریق حسگرهای حرکتی تلفن هوشمند اندازه‌گیری شده‌اند، اصلاح گردید. عکسبرداری در شرایط ایستای انجام شد، بنابراین زوایای تخمینی و اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه باید دارای مقداری ثابت و در صورت عدم وجود خطاها با هم برابر باشند. برای جهت دهی مدل نهایی، از میانگین زوایای اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه استفاده شد. سپس، طول اندازه‌گیری شده با متر برای تعیین مقیاس مدل و میانگین مختصات به‌دست آمده در هر ایستگاه جهت انتقال مدل به سیستم مختصات UTM به‌کار رفت. همچنین یک مدل با استفاده از موقعیت دقیق ایستگاه‌های عکسبرداری به روش ارجاع جغرافیایی غیرمستقیم تولید و RMSE نقاط چک مبنای ارزیابی دقت روش پیشنهادی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** دپو مورد مطالعه حدود ۱۵۰ متر طول و ۲۵ متر ارتفاع داشت و جهت آن تقریباً جنوب به شمال بود. در این مطالعه پنج مدل سه‌بعدی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده تولید گردید. مدل اول صرفاً با استفاده از تصاویر، داده‌های موقعیتی، و زوایای ثبت شده توسط حسگرهای تلفن هوشمند ساخته شد و در ادامه به‌ترتیب ۱، ۲ و ۳ نشانگر کددار به‌عنوان نقطه کنترل به معادلات اضافه شد. مدل پنجم بر پایه همان تصاویر اما با مختصات دقیق دوازده ایستگاه عکسبرداری که با توتال‌استیشن اندازه‌گیری شده بودند تولید گردید. در مدل اول میزان خطا همچنان در حد دقت تعیین موقعیت تک نقطه‌ای سیستم iOS (حدود ۲ متر مسطحاتی و ۱۱ متر ارتفاعی) باقی ماند. در مدل با استفاده از یک نقطه کنترل، تطبیق مدل با مختصات کم‌دقت GPS گوشی هوشمند باعث ایجاد خطا در محاسبه ژیزمان و در نتیجه چرخش مدل گردید. اگرچه انتقال مدل به‌درستی انجام شد، اما به‌دلیل چرخش ناشی از خطای ژیزمان، مدل نسبت به سیستم مرجع زاویه دار شده و تطابق کامل حاصل نشد و خطای حدود ۰/۴۰ متر ایجاد کرد. در ادامه با افزایش تعداد نقاط کنترل

تاریخ دریافت: ۲۵ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ داوری: ۳۱ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ اصلاح: ۱۲ تیر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۲۹ مرداد ۱۴۰۴

## واژگان کلیدی:

تلفن هوشمند

ارجاع جغرافیایی مستقیم

فتوگرامتری برد کوتاه

ساختار ناشی از حرکت

\* نویسنده مسئول

a\_milan@sbu.ac.ir

۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۵۶ (۱)

به ۲ و ۳ دقت نیز افزایش و به ۰/۰۰۴ متر و برابر با حالت استفاده از مختصات دقیق مراکز دوربین رسید. همچنین در حالت پنجم یعنی استفاده از مختصات دقیق مراکز ایستگاه‌ها دقت ۰/۰۰۷ متر حاصل شد.

**نتیجه‌گیری:** همانطور که مشاهده شد، دقت GPS همچنان چالش برانگیزترین بخش این سیستم است. بیشتر تلفن‌های هوشمند، به جای ارائه داده‌های خام یا داده‌های خام با کیفیت GNSS، تنها موقعیت نهایی پردازش شده توسط سیستم عامل را در اختیار کاربر قرار می‌دهند. با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری و محیطی مطالعه پیشنهاد می‌شود، توسعه یک سیستم نقشه‌برداری متحرک دستی از طریق ادغام GPS نقشه‌برداری و دوربین تلفن هوشمند در مطالعات بعدی مورد توجه قرار گیرد همچنین با توجه به اینکه در مطالعه عملیات خاکی عوارض با اشکال منظم وجود ندارد اما هنگام استفاده از این روش در مواجهه با عوارض با اشکال هندسی منظم مانند ساختمان‌ها پیشنهاد می‌شود، اصلاح پارامترهای جهت‌گیری خارجی نسبی تصاویر با استفاده از محدودیت‌های ویژگی‌های موجود در صحنه (ویژگی‌های عمودی و افقی بارز) و تلفیق آن در باندل‌اجستمنت مورد مطالعه قرار گیرد.

## مقدمه

پیشرفت فناوری در دهه گذشته، شیوه گردآوری و نمایش داده‌ها را به‌طور چشم‌گیری متحول کرده و منجر به انقلابی در علم نقشه‌برداری شده است [۲،۱]. روش‌های نقشه‌برداری رقومی با بهره‌گیری از انواع تصاویر و مدل‌های ارتفاعی رقومی، بستری را برای تفسیر ویژگی‌های زمین در مقیاس بزرگ فراهم کرده‌اند. توسعه روش‌های فتوگرامتری امکان ساخت مدل‌های سه‌بعدی واقع‌گرایانه با وضوح بالا از توپوگرافی زمین را به‌سادگی ایجاد کرده و تصاویری بی‌سابقه از سطح زمین ارائه می‌دهد [۳]. در واقع، وضوح مدل در درجه اول توسط فاصله نمونه‌برداری زمینی تصاویر تعیین می‌شود، در حالی که دقت آن به روش ارجاع جغرافیایی وابسته است. با این حال، همخوانی این مدل‌ها از نظر هندسی و ارجاع جغرافیایی با زمین طبیعی برای متمر ثمر بودن در جوامع علمی و مهندسی ضروری است.

دستیابی به این مهم نیازمند اندازه‌گیری و یا برآورد دقیق پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین است. فتوگرامتری ساختار ناشی از حرکت مبتنی بر بینایی کامپیوتر به‌صورت خودکار و هم‌زمان پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین را از طریق خودکالیبراسیون و هندسه صحنه، با استفاده از فرآیند تطبیق تصویر و باندل‌اجستمنت در چارچوب مرجع مدل برآورد می‌نماید. الگوریتم SIFT با تغییر رویکرد تشخیص نقاط گرهی، امکان تطبیق تصاویر با مقیاس و دوران‌های مختلف را فراهم کرده و باعث انعطاف‌پذیری بیشتر در جمع‌آوری داده‌ها شده است [۴،۵]. باندل‌اجستمنت در فتوگرامتری ساختار ناشی از حرکت بر اساس معادلات شرط هم‌خطی و به‌صورت هم‌زمان با استفاده از همه تصاویر انجام و منجر به برآورد موقعیت سه‌بعدی نقاط تصویر، پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین در چارچوب مرجع مدل می‌شود. انتقال نقاط از چارچوب مرجع مدل به مرجع محلی یا جهانی از طریق یک تبدیل هندسی شامل دوران، مقیاس و انتقال با دو روش ارجاع غیر مستقیم (استفاده از نقاط کنترل زمینی، نقاطی که موقعیت آنها از طریق روش‌های ژئودتیک به‌دقت تعیین شده است و یا استفاده از یک سطح مرجع انجام می‌پذیرد [۶،۷]) و ارجاع مستقیم (استفاده از پارامترهای توجیه خارجی دوربین، شامل موقعیت و وضعیت دوربین در لحظه عکسبرداری [۸]) انجام می‌شود. در روش اول نوع، تراکم، توزیع

و دقت تعیین موقعیت نقاط کنترل زمینی به‌شدت بر کیفیت مدل نهایی اثرگذار است [۹-۱۱]. از این رو بسیاری از مطالعات پیشین به بهینه‌سازی شبکه نقاط کنترل از طریق تغییر تراکم و توزیع مکانی آنها و بهینه‌سازی مسیر و پیکربندی شبکه تصویربرداری پرداخته‌اند [۱۲،۱۳]. در عمل نشانه‌گذاری و تعیین موقعیت یک شبکه نقاط کنترل زمینی و شناسایی آنها بر روی تصاویر فرآیندی سخت، پرهزینه و زمان‌بر است [۱۴].

در روش دوم موقعیت دوربین در لحظه تصویربرداری معمولاً با استفاده از ابزارهای نقشه‌برداری ژئودتیک تعیین می‌شود در حالی که اطلاعات مربوط به وضعیت دوربین می‌تواند توسط یک واحد اندازه‌گیری اینرسی فراهم و یا از طریق نقاط گرهی در باندل‌اجستمنت تخمین زده شود. ترکیب این دو نوع حسگر ارجاع جغرافیایی مستقیم را از طریق اندازه‌گیری موقعیت و وضعیت دوربین در زمان اخذ تصویر امکان‌پذیر ساخته است [۱۵]. این روش در سال‌های اخیر به لطف در دسترس بودن گیرنده‌های GNSS با دقت بالا (چند فرکانسه با قیمت مناسب) و حسگرهای اندازه‌گیری اینرسی به کرات در فتوگرامتری با پهپاد آزمایش، توسعه و بهبود یافته است. اساساً، دقت این روش به مشخصات فنی حسگرهای به‌کار رفته در سیستم پهپاد مانند دوربین‌های رقومی، گیرنده‌های سامانه‌های ناوبری جهانی، اجزای واحد اندازه‌گیری اینرسی و نیز روش‌های اندازه‌گیری بستگی دارد [۱۶،۱۷]. روش‌های کینماتیک آنی، شبکه کینماتیک آنی، یا کینماتیک پس پردازش برای ارجاع جغرافیایی مستقیم داده‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، هر سه این روش‌ها به‌صورت نظری امکان دستیابی به دقت سانتی‌متر را فراهم می‌کنند و مطالعات متعددی در زمینه کاربرد این روش‌ها در حوزه فتوگرامتری پهپاد و برد کوتاه زمینی انجام شده است [۱۸-۲۰]. امروزه بسیاری از ابزارهای حرفه‌ای نقشه‌برداری و فتوگرامتری، مانند دوربین رقومی، گیرنده GPS/GNSS، حسگرهای اینرسی ژيروسکوپ‌ها، شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها در تلفن‌های هوشمند نیز گنجانده شده است. اما این حسگرها در مقایسه با ابزارهای تخصصی دارای محدودیت‌های فنی مشخصی هستند که دقت و پایداری اندازه‌گیری‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گیرنده‌های GPS/GNSS مورد استفاده در اکثر گوشی‌های هوشمند فعلی مانند آیفون، سامسونگ و HTC دقت

نائف الصوبائی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به بررسی بهبود دقت ارجاع جغرافیایی مستقیم مدل سه بعدی حاصل از فتوگرامتری تلفن هوشمند از طریق ادغام جهت گیری نسبی تصاویر، اندازه گیری های حسگر حرکتی و قیود صحنه در فرآیند باندل اجستمنت پرداختند [۲۴]. در این مطالعه از تلفن iPhone 6 و اندازه گیری های حسگر حرکتی مربوطه برای جمع آوری یک شبکه تصویری متشکل از هجده عکس و بیست و پنج نقطه کنترل با توزیع مناسب بر روی نمای یک ساختمان کوچک در یک منطقه شهری چالش برانگیز برای GPS از نظر وجود ساختمان های بلند و وجود اجسام فلزی استفاده شده است. زوایای توجیه خارجی با دقت ۳۰ ثانیه کمائی و مختصات ۲۵ نقطه مسطحاتی با دقت ۱ سانتی متر، جمع آوری شده به وسیله توتال استیشن، مبنای کنترل دقت این مطالعه بوده است. در روش پیشنهادی آنها زوایای توجیه خارجی اندازه گیری شده به وسیله حسگر تلفن هوشمند، بر اساس جهت گیری نسبی استخراجی از الگوریتم ساختار ناشی از حرکت اصلاح شده و برای حل مسئله مقیاس، از یک طول مشخص که با اندازه گیری های شتاب سنج و به کمک الگوریتم تشخیص گام به دست آمده استفاده شده است. همچنین از میانگین وزن دار مختصات مراکز تصاویر که توسط GPS تلفن هوشمند اندازه گیری شده بود، برای انتقال به سیستم مختصات جهانی استفاده شده است. در نهایت، زوایای توجیه خارجی اصلاح شده با قیود خطی صحنه ترکیب و در یک باندل اجستمنت پالایش شده اند که نتایج مدل سه بعدی نهایی نشان دهنده دقت مسطحاتی ۳ تا ۵ متر و ارتفاعی ۱۰ تا ۱۵ متر بوده است.

استفانو تاوانی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ قابلیت حسگرهای تلفن هوشمند، برای ساخت مدل سه بعدی با ارجاع مستقیم از طریق مطالعه روی صخره ای به طول ۴۰۰ متر را مورد بررسی قرار دادند [۲۵]. آنها در این تحقیق از تلفن هوشمند شیائومی مدل MiA1 مجهز به گیرنده GNSS تک فرکانس برای اندازه گیری موقعیت استفاده کرده اند و وضعیت دوربین در لحظه عکسبرداری نیز توسط حسگرهای تلفن اندازه گیری و ثبت شده است. آنها در مجموع ۳۵ عکس از فاصله ۳۵۰ متری با خطای موقعیت یابی ۳/۲ تا ۴/۵ متر (ارائه شده توسط گوشی هوشمند) اخذ کرده اند و برای صحت سنجی نتایج از مدل ارتفاعی رقومی تهیه شده به وسیله لیدار هوایی با فاصله نمونه برداری ۱/۵ متر و دقت ارتفاعی ۰/۶۰ متر استفاده کرده اند. همچنین با محاسبه اختلاف بین موقعیت اندازه گیری شده و تخمین زده شده، از طریق تکرار ساخت مدل، تصاویر دارای اعوجاج و خطای موقعیتی بالا را شناسایی و حذف کرده اند. در پایان آنها به خطای موقعیت حدود ۴ متر و حداکثر خطای مقیاس دهی ۲٪ و خطای زاویه ای ۱/۴ درجه حول محور عمودی دست یافته اند.

ماریون جاد و همکارانش سال ۲۰۲۰ قابلیت های دوربین رقومی و تلفن هوشمند را در مدل سازی سه بعدی با ارجاع جغرافیایی مستقیم از طریق مطالعه موردی روی صخره های ساحلی شهر پورسمیلین کشور فرانسه مورد بررسی قرار دادند [۲۶]. در این مطالعه از دوربین رقومی Nikon D800 Reflex، تلفن هوشمند Huawei Y5، گیرنده ژئودیتیک

موقعیت یابی محدودی دارند. علاوه بر این، حسگرهای میکرو الکترومکانیکی، به ویژه ژيروسکوپها، به دلیل نسبت سیگنال به نویز بالا، تغییرات موقعیتی را در بازه های زمانی کوتاه جمع آوری می کنند. همچنین، مغناطیس سنج ها به راحتی تحت تأثیر اجسام فلزی در نزدیکی خود قرار می گیرند. اگرچه این حسگرها توانایی به دست آوردن داده های ارجاع جغرافیایی مستقیم را فراهم می کنند، اما اندازه گیری های سطح پایین این حسگرها می تواند منجر به تعیین نادرست پارامترهای جهت گیری خارجی شود و در نتیجه دقت سیستم نقشه برداری را کاهش دهد.

در مطالعات پیشین، کارایی دوربین تلفن هوشمند و دقت هندسی مدل حاصل برای برآورد احجام عملیات خاکی در مقایسه با روش های نقشه برداری زمینی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج موفقیت آمیزی حاصل شده است [۲۱، ۲۲]. با توجه به نتایج تحقیقات گذشته در این پژوهش، امکان استفاده از تصاویر گوشی های هوشمند، همراه با حسگرهای GNSS، مغناطیس سنج و ژيروسکوپ داخلی آنها برای تولید مدل سه بعدی با ارجاع جغرافیایی مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه میان دوربین گوشی های هوشمند و دوربین های تک لنز رقومی بازتابی نشان می دهد که دوربین گوشی های هوشمند، با لنزهایی با قطر کوتاه تر و حسگرهایی با ابعاد کوچک تر طراحی شده اند که توانایی کمتری در جمع آوری نور داشته و دامنه ای ISO پایین تری ارائه می دهند. از نظر تئوری، این ویژگی ها می توانند موجب کاهش کیفیت تصویر شوند، همچنین مدل سازی اعوجاج لنز نیز به دلیل فاصله کانونی کوتاه، چالش برانگیزتر است. با این حال نسل جدید گوشی های هوشمند با بهره گیری از دوربین های چندگانه، اتصال آنها به حسگر یکپارچه و استفاده از فیلترهای پیشرفته پردازش تصویر توانسته اند بر بسیاری از این محدودیت ها غلبه کنند، تا جایی که کیفیت تصاویر ارائه شده توسط آنها قابل مقایسه با دوربین های رقومی فول فریم است [۲۳]. از سوی دیگر حسگرهای مکان نگاری گوشی های هوشمند نیز به سرعت در حال توسعه هستند. این گوشی ها علاوه بر GPS، مجهز به واحد اندازه گیری اینرسی مبتنی بر حسگرهای میکرو الکترومکانیکی (شتاب سنج ها، ژيروسکوپ ها، مغناطیس سنج ها، فشارسنج) هستند و با توجه به کاربردهای متعدد آنها در بسیاری از برنامه های ژئوماتیک برای تعیین مختصات سه بعدی، طول، زاویه، مساحت و سایر داده های مکانی استفاده می شوند. اگرچه دقت حسگرهای گوشی های هوشمند به سطح تجهیزات حرفه ای نمی رسد، اما همچنان می توان از آنها برای جمع آوری و تخمین داده ها استفاده کرد. به علاوه، این ابزار به طور گسترده در آموزش ژئوماتیک مورد استفاده قرار می گیرند. چهار حوزه اصلی که برنامه های موبایلی در آنها کاربرد دارند شامل سنجش از دور، GPS، سیستم های اطلاعات جغرافیایی و آموزش ژئوماتیک است. اخیراً محققان امکان استفاده از این حسگرها را به عنوان جایگزینی برای نقاط کنترل زمینی در جهت توجیه، ارجاع جغرافیایی و ارزیابی کیفیت مدل ها بررسی کرده اند. در ادامه، به نتایج و یافته های این مطالعات اشاره خواهد شد.

اختلاف بین ۰ تا ۵ میلی‌متر در بازسازی برای مدل ویدئویی و ۰ تا ۲ میلی‌متر برای مدل عکسی نسبت به مدل مرجع دست یافته‌اند. علی‌رغم تعداد کمتر عکس‌ها در مدل عکسی، این مدل دقت بهتری از نظر بازسازی داشته است. بیشترین خطای جهت‌گیری نسبت به مدل مرجع ۰/۳۴ درجه حول محور عمودی و چرخش ۰/۳۸- و ۱/۰۰ درجه به ترتیب حول محورهای X و Y بوده که نشان‌دهنده ناهماهنگی بین مدل‌های عکس و ویدئو است.

بسیار و همکاران سال ۲۰۲۳ در مطالعه‌ای برای بررسی میزان ریزش دیواره صخره ساحلی ناواجیو کشور یونان از روش ساختار ناشی از حرکت مبتنی بر تلفن هوشمند و قایق در حال حرکت، پهپاد فتوگرامتری DJI Phantom 4 Pro با روش تعیین موقعیت کینماتیک آنی و تصاویر ماهواره Pléiades استفاده و در پایان سه مدل تولید شده را از جنبه‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار دادند [۲۸]. طول محدوده ۱۱۲۰۰ متر خط ساحلی با ارتفاع ۴۰۰ متر بوده و عکسبرداری روی قایق از دو فاصله ۵۰ تا ۲۰۰ متر (مسیر رفت) و ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر (در مسیر برگشت) با استفاده از سه گوشی هوشمند Xiaomi A2, Samsung G930F, Wiko V680 با پوشش طولی ۸۰٪ انجام شده است. تمام تصاویر در نرم‌افزار Agisoft Metashape® به‌صورت یکپارچه در یک بخش (Chunk) پردازش شده‌اند و تنها از داده‌های مکانی تصاویر ثبت شده با گوشی Wiko استفاده شده است. آنها از مقایسه سه مدل نتیجه گرفتند که تراکم نقاط مدل تولید شده با گوشی هوشمند تقریباً برابر با تراکم مدل تولید شده با پهپاد و حدود ۲۰۰ برابر مدل حاصل از تصاویر ماهواره‌ای بوده است. اما به دلیل عدم استفاده از نقاط کنترل زمینی مدل گوشی هوشمند دارای اختلاف ۲ متر در جهت X و ۶ تا ۸ متر در جهت Z با مدل حاصل از پهپاد بوده است.

تپاتی لوزه و همکارانش سال ۲۰۲۳ با هدف امکان سنجی زمین مرجع کردن مستقیم مدل حاصل از فتوگرامتری زمینی برد کوتاه، مطالعه‌ای روی ساختمان مرکزی پارک و یک حمام تاریخی در شهر Ragusa ایتالیا انجام دادند [۲۹]. در این تحقیق از دوربین Sony α7R III با لنز ۲۴ میلی‌متری و ابزار جانبی 3D Image Vector نصب شده روی آن، و پهپاد DJI Matrice 300 مجهز به دوربین Zenmuse برای جمع‌آوری هم‌زمان داده‌ها جهت مقایسه دقت استفاده و از نرم‌افزار Agisoft پردازش داده‌ها بهره برده‌اند. برای جمع‌آوری داده‌های ساختمان پارک، از فاصله ۱۰ متری و با پوشش طولی ۸۰٪، ۶۵ عکس با ابعاد پیکسل ۱/۲ میلی‌متر گرفته شد، و برای حمام تاریخی، ۱۸۹ عکس با ابعاد پیکسل ۱/۱ میلی‌متر تهیه شده است. همچنین، به‌وسیله پهپاد و در طی سه پرواز در ارتفاع ۳۰ متری، ۵۵۶ عکس با ابعاد پیکسل زمینی ۴/۶۵ میلی‌متر از ساختمان پارک در پرواز اول و ۳۶۷ عکس با ابعاد پیکسل زمینی ۷/۳ میلی‌متر از حمام تاریخی در دو پرواز بعدی اخذ کرده‌اند. آن‌ها ارزیابی دقت روش زمینی را از طریق ۲۹ نقطه کنترل با موقعیت معلوم برای ساختمان پارک و ۱۳ نقطه کنترل برای حمام انجام داده‌اند و یکی از نقاط را به‌عنوان نقطه کنترل و مابقی به‌عنوان نقاط چک

Topcon®HiPer V و نرم‌افزار Agisoft استفاده و داده‌های جمع‌آوری شده به‌وسیله لیزر اسکن زمینی مبنای ارزیابی نتایج بوده است. آن‌ها یک قاب چوبی برای نگه‌داشتن دوربین و گیرنده GNSS طراحی کرده و آن را بر روی یک سه‌پایه نصب کرده‌اند. فاصله بین مرکز فاز گیرنده تا مرکز دوربین رقومی و دوربین تلفن هوشمند اندازه‌گیری، و از روش کینماتیک آنی با استقرار یک گیرنده روی ایستگاه مرجع و نرخ جمع‌آوری داده سی ثانیه برای تعیین همزمان موقعیت مراکز تصاویر استفاده کرده‌اند. جمع‌آوری داده‌ها طی دو مرحله، با استفاده از دوربین رقومی و تلفن هوشمند از فاصله ۵۰ متری صخره ساحلی در ۱۰ ایستگاه با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر انجام که در هر کدام ۹ عکس اخذ کرده‌اند. هنگام عکسبرداری با تلفن هوشمند، علاوه بر استفاده از گیرنده ژئودتیک، موقعیت مراکز تصاویر با استفاده از گیرنده GNSS داخلی تلفن هوشمند نیز برداشت شده است. دو پردازش برای بررسی نتایج دوربین گوشی هوشمند یکی با استفاده از فایل موقعیت مراکز دوربین که از طریق اندازه‌گیری کینماتیک آنی GNSS به‌دست آمده و دیگری با استفاده از موقعیت اندازه‌گیری شده توسط GNSS داخلی تلفن هوشمند انجام شده است. نتایج نشان دهنده میانگین خطای ۰/۳ سانتی متر و انحراف معیار ۴/۷ سانتی‌متر برای دوربین Nikon D800 Reflex و میانگین خطای ۰/۲ سانتی‌متر و انحراف استاندارد ۳/۸ سانتی‌متر برای دوربین گوشی هوشمند Huawei Y5 (بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی) بسیار رضایت بخش بوده است. با این حال ابر نقطه تولید شده با استفاده از گیرنده GNSS داخلی تلفن هوشمند دارای خطای ۲/۱۳ متر و انحراف استاندارد ۱/۲۲ متر در مقایسه با داده‌های لیزر اسکن زمینی بوده است.

آمریگو کورداتی و همکارانش سال ۲۰۲۱ به بررسی قابلیت‌های تلفن هوشمند در تولید مدل سه بعدی با ارجاع جغرافیایی مستقیم از طریق مطالعه رخنمون یک گسل فعال در آپنین ایتالیا پرداختند [۲۷]. در این مطالعه از تلفن هوشمند Xiaomi 9T pro و گیسمال دستی برای تثبیت تلفن هوشمند در راستای افقی استفاده شده است. هدف از این کار، افزایش کیفیت تصاویر از طریق محدود کردن لرزش و کاهش تاری ناشی از حرکت و همچنین تثبیت تلفن در امتداد محور طولی بوده است، به‌طوری که تمامی تصاویر در یک صفحه افقی جهت‌گیری شوند. مدل موجود که در سال ۲۰۱۶ با استفاده از ۶۴۰ تصویر اخذ شده به‌وسیله دوربین Canon EOS 450D تولید شده، مبنای مقایسه دقت بوده است. آن‌ها دو مدل یکی با ۲۰۰ عکس و دیگری با ۵۲۸ فریم استخراج شده از فایل ویدئویی ۲۵۷ ثانیه‌ای تولید کردند. در هر دو مورد تصویربرداری از فاصله ۳۰ سانتی‌متری انجام و مدل سه‌بعدی با وضوح بالا موجود از رخنمون مورد مطالعه مبنای مقایسه دقت نتایج بوده است. مسئله مقیاس از طریق اندازه‌گیری فاصله بین دو نقطه با متر نواری حل و مدل با زاویه اندازه‌گیری شده به‌وسیله قطب نما در سیستم مختصات محلی توجیه زاویه‌ای شده است. به لطف استفاده از گیسمال صحنه بازسازی شده منطبق بر صفحه افقی در قاب دنیای واقعی است. در پایان آن‌ها به

محیط، نوع گوشی، و تکنیک پس‌پردازش بوده است. اگرچه گوشی دوفرکانسه سامسونگ گلکسی S10+ عملکرد بهتری نسبت به گوشی تک فرکانسه نشان داد، ولی نتایج به‌وضوح نشان داده است که تلفن‌های همراه نمی‌توانند از نظر دقت و صحت تعیین موقعیت و همچنین نرخ جمع‌آوری داده‌ها با گیرنده‌های GNSS ژئودتیک رقابت کنند.

شان و همکاران سال ۲۰۲۳ در مقاله‌ای بالاترین کیفیت ممکن برای فتوگرامتری با گوشی هوشمند و پهپاد معمولی از نقطه نظر دقت تعیین موقعیت و تأثیر نقاط کنترل زمینی و برداشت همزمان مراکز تصویر با استفاده از GPS را بررسی کردند [۳۲]. ساختمان دانشگاه پرودو به ارتفاع ۱۱ متر و مساحت ۵۱۱۰ متر مربع موضوع مطالعه بوده است. مجموعاً ۴۶۶ تصویر در ۲ مرحله از فاصله ۱۸ متری ساختمان (فاصله مراکز تصویر از هم تقریباً ۳ متر) و سپس عکسبرداری در ارتفاع ۴ تا ۵ متری به کمک یک ابزار جانبی با استفاده از گوشی iPhone7 انجام شده است. مدل تهیه شده با استفاده از پهپاد فتوگرامتری DJI Matrice 600 و پهپاد معمولی Mavic2Pro مبنای مقایسه بوده‌اند. موقعیت و زوایای دوربین تلفن هوشمند و پهپادها در لحظه عکسبرداری توسط GNSS/IMU داخلی آنها ثبت شده است. در پایان آنها به دقت تعیین موقعیت ۱/۶۵۴ متر برای تصاویر گوشی‌های هوشمند با ارجاع جغرافیایی مستقیم دست یافتند، اما با معرفی داده‌های لیدار هوایی و نیز نقاط زمینی برداشت شده با توتال‌استیشن به‌عنوان نقاط کنترل زمینی، دقت تعیین موقعیت به ترتیب تا ۰/۴۳۳ و ۰/۱۴۵ متر بهبود یافته که برابر با دقت پهپاد معمولی بوده است. ولی آنها با استفاده از پهپاد فتوگرامتری و شرایط یکسان به دقت تعیین موقعیت ۰/۰۳۷ متر دست یافته‌اند.

فوتیس پاتونیس در سال ۲۰۲۴ قابلیت‌های دوربین تلفن‌های هوشمند را به‌عنوان ابزار جمع‌آوری داده برای اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی در فتوگرامتری برد کوتاه ارزیابی کرده است [۳۳]. در این پژوهش، ۱۰ تلفن هوشمند از برندهای مختلف، نرم‌افزار Surveyor-Photogrammetry نسخه ۶/۱ و روش باندل اجستمنت استفاده شده است. ارزیابی دقت در سه بخش انجام گرفته است: ابتدا بر تحلیل اعوجاج تصاویر تمرکز داشته، و سپس دقت محاسبه مختصات واقعی با استفاده از روش فتوگرامتری را ارزیابی کرده است، و در نهایت رابطه میان اعوجاج، دقت، و ویژگی‌های فنی دوربین‌ها را تحلیل کرده است. او نمای یک ساختمان را به‌عنوان موضوع مطالعه انتخاب و با هر تلفن سه عکس همگرا با میانگین فاصله عکسبرداری ۱۱ متر تهیه کرده است. اعوجاج تصاویر دیجیتال ناشی از لنزها را با استفاده از روش کالیبراسیون ژانگ و بر اساس عکاسی از صفحه شطرنجی محاسبه کرده است. مختصات ۲۱ نقطه روی نمای ساختمان با استفاده از توتال‌استیشن و با دقت ۲ میلی‌متر تعیین، و ۱۰ نقطه به‌عنوان نقاط کنترل و ۱۱ نقطه دیگر به‌عنوان نقاط چک استفاده شده است. RMSE بین مختصات نقاط چک برآورد شده با روش توتال‌استیشن در مقایسه با روش فتوگرامتری معیار ارزیابی دقت بوده است. روند برآورد مختصات دو بار برای هر گوشی انجام شده است: بار اول فاصله کانونی و مختصات نقطه اصلی را به‌عنوان پارامترهای مجهول

استفاده شده است. خطای جذر میانگین مربعات نقاط چک ۰/۰۷۴ متر برای ساختمان پارک و ۰/۰۸۰ متر برای حمام تعیین کرده‌اند که با افزایش تعداد نقاط کنترل به ۳ نقطه دقت نیز بهبود یافته و خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب ۰/۰۵۶ متر برای ساختمان پارک و ۰/۰۶۹ متر برای حمام برآورد شده است. همچنین در روش پهپاد تمام ۲۹ و ۱۳ نقطه به‌عنوان نقاط چک وارد محاسبات شده‌اند و تنها با استفاده از موقعیت و وضعیت تعیین شده توسط GPS/IMU پهپاد دقت ۰/۰۳۵ برای ساختمان پارک و ۰/۰۱۴ برای حمام تاریخی دست یافته‌اند.

تایلان اوکالان و همکارانش سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای به ارزیابی عملکرد روش‌های موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای و موقعیت‌یابی با رفع ابهام با استفاده از داده‌های GNSS کینماتیک به‌دست آمده از پهپاد و مقایسه آنها با روش کینماتیک پس‌پردازش بر اساس موقعیت‌یابی نسبی پرداختند [۳۰]. در این تحقیق از داده‌های پرواز فتوگرامتری با پهپاد بال ثابت C-Astral Bramor ppX UAV مجهز به گیرنده GNSS چند فرکانسه و در تحلیل‌ها، داده‌های کد (P1, P2, C1, C2) و مشاهدات فاز (L1, L2) استفاده شده است. داده‌های GNSS با نرخ ۰/۱ ثانیه (۱۰ هرتز) در طول پروازی از ارتفاع ۱۵۰ متری از سطح زمین و با حداکثر سرعت ۱۶ متر بر ثانیه جمع‌آوری شده است. همچنین در طول پرواز یک گیرنده GNSS NAVSF3040 تقریباً در مرکز منطقه مورد مطالعه به‌عنوان ایستگاه مرجع قرار داده شده بود. استفاده از ترکیب خطی عاری از یونوسفر فرکانس دوگانه برای مشاهدات GNSS، مدل‌سازی خطاهای مبتنی بر ماهواره و موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای سنتی را تعریف می‌کند. آنها خطای موقعیت‌یابی که نشان دهنده اختلاف نتایج روش‌های موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای و موقعیت‌یابی با رفع ابهام با روش مرجع یعنی کینماتیک پس‌پردازش می‌باشد را برای هر سه مولفه مختصاتی برآورد و میزان اختلاف روش موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای با کینماتیک پس‌پردازش برابر با  $\pm 5$  سانتی‌متر و اختلاف روش موقعیت‌یابی با رفع ابهام با کینماتیک پس‌پردازش  $\pm 10$  سانتی‌متر تعیین کرده‌اند.

مارک هالاج و میکال کاکاماریک سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای به بررسی دقت تعیین موقعیت گیرنده‌های GNSS تلفن هوشمند در مقایسه با گیرنده‌های ژئودتیک نقشه‌برداری پرداختند [۳۱]. در این پژوهش، از یک تلفن هوشمند Samsung Galaxy S10+ تک فرکانسه و Samsung Galaxy Note10+ دو فرکانسه و یک گیرنده GNSS ژئودتیک در محیط شهری (مسیر آزمایشی به طول ۱/۷۶ کیلومتر) با سرعت عابر پیاده استفاده شده است. هر سه دستگاه بر روی یک شاخص نقشه‌برداری نصب و داده‌ها طی چهار روز جمع‌آوری شده است: دو روز در اوایل تابستان ۲۰۲۱ و دو روز در پاییز ۲۰۲۱، بدون پوشش گیاهی در مسیر تعیین شده و در زمان‌های مختلف روز، تا اثر چینش متفاوت ماهواره‌ها نیز برآورد شود. تعیین موقعیت با دو روش تعیین موقعیت آنی و جمع‌آوری مشاهدات خام در قالب فرمت Rinex و پس‌پردازش با استفاده از روش‌های تفاضلی و تعیین موقعیت دقیق نقطه‌ای انجام شده است. نتایج نشان دهنده دقت یک تا چند ده متری موقعیت‌یابی بسته به

پیشنهادی، تلاش بر بهبود کیفیت تکنیک ارجاع جغرافیایی از طریق چندین رویکرد صورت گرفته است که عبارتند از :

○ کاهش تأثیر خطاهای GPS با میانگین‌گیری موقعیت مراکز تصویربرداری و حذف شتاب خطی اندازه‌گیری شده هنگام حرکت بین دو تصویر متوالی.

○ استفاده از روش عکسبرداری ایستا به منظور جلوگیری از کاهش بیشتر دقت موقعیت‌یابی، ابهام در نرخ به‌روزرسانی موقعیت، عدم همزمانی آن با زمان ثبت تصاویر و همچنین حذف نیاز به تعیین فاصله بین مرکز فاز آنتن گیرنده GNSS، مرکز نوری دوربین و حسگرهای حرکتی.

○ بررسی تأثیر دقت پایین گیرنده GNSS بر تعیین مقیاس مدل در روش ارجاع جغرافیایی مستقیم، به‌ویژه در محدوده‌های کوچک، و ارائه راهکاری مبتنی بر اندازه‌گیری چند طول مشخص برای تخمین مقیاس.

○ توسعه یک روش جدید برای تعیین دقیق‌ترین زاویه جهت‌گیری مطلق دوربین از بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط حسگرهای حرکتی تلفن هوشمند، با بهره‌گیری از زوایای جهت‌گیری نسبی تخمین‌زده شده در الگوریتم ساختار ناشی از حرکت، و اصلاح پارامترهای جهت‌گیری نسبی این الگوریتم بر اساس دقیق‌ترین مقدار اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای حرکتی تلفن.

### روش تحقیق

– منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

یکی از دیوهای شن واقع در محوطه تجهیز کارگاه شرکت مهندسی و ساختمان شمس عمران در شهر بوشهر به‌عنوان موضوع مطالعه انتخاب شد. نمایی از آن در شکل (۱) نمایش داده شده‌است. داده‌های این پژوهش شامل موقعیت نقاط برداشت شده با استفاده از توتال‌استیشن Leica TS09 R1000 در حالت بدون منشور، همراه با داده‌های جمع‌آوری شده به‌وسیله تلفن هوشمند iPhone 13 Pro است. برای ثبت داده‌ها، از نرم‌افزار Geocam AR، که توانایی ضبط همزمان تصاویر، داده‌های GPS و اطلاعات حسگرهای حرکتی را داراست، استفاده شده‌است. مشخصات فنی این دستگاه بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط سازنده، در جدول (۱) آورده شده‌است. همچنین برای آزمایش دقت GPS/GNSS تلفن هوشمند، از تعدادی نقاط کنترل یک شبکه ژئودزی که برای یکپارچگی ساخت و سازهای واقع در این محدوده طراحی شده بود، استفاده گردید. موقعیت این نقاط از قبل توسط یک تیم نقشه‌بردار حرفه‌ای هم به‌صورت نسبی و هم در سیستم مختصات UTM، با استفاده از گیرنده‌های GNSS، توتال‌استیشن و ترازیب الکترونیکی اندازه‌گیری شده‌است. تمام پردازش‌های فتوگرامتری با استفاده از نرم‌افزار Agisoft Metashape نسخه ۱/۲.۱۵۹۲/۰ انجام شد.

و بار دوم ضرایب اعوجاج را به این پارامترها اضافه کرده است. نتایج نشان داده‌اند که میانگین RMSE ۱۰ تلفن هوشمند در محورهای X و Y بدون اضافه کردن پارامترهای اعوجاج بین ۱/۳ تا ۱/۴ سانتی‌متر و در حالت اضافه کردن این پارامترها حدود ۰/۷ سانتی‌متر بوده است. در محور Z، میانگین RMSE بدون پارامترهای اعوجاج ۱/۶ سانتی‌متر و با آن‌ها ۱/۱ سانتی‌متر گزارش شده‌است. در نهایت، میانگین RMSE در مختصات دوبعدی، بدون اعمال پارامترهای اعوجاج ۲ سانتی‌متر و با اعمال آن‌ها ۱/۱ سانتی‌متر برآورد و بهبودی ۴۵ درصدی را نشان داده است.

در مطالعات [۳۴،۳۵] به کیفیت پایین گیرنده‌های GNSS در تلفن‌های هوشمند به‌عنوان یک محدودیت ذاتی که بر دقت موقعیت‌یابی اثر منفی می‌گذارد، اشاره شده‌است. نتونگلانگ و همکاران در مطالعه خود بر مکان‌یابی مرکز فاز آنتن GNSS گوشی هوشمند شیائومی Mi8 به‌منظور بهبود دقت موقعیت‌یابی تمرکز کردند، زیرا موقعیت آن برخلاف موقعیت گیرنده GNSS به‌طور دقیق مشخص نیست [۳۶]. آن‌ها دریافتند که مرکز فاز آنتن در قسمت بالای سمت چپ گوشی هوشمند قرار دارد (به‌ترتیب حدود ۲/۸ سانتی‌متر از سمت چپ و ۰/۹ سانتی‌متر از بالا). بوچکانی و همکاران نیز به بررسی همین موضوع پرداختند، اما سه گوشی هوشمند شیائومی Mi8 را مورد آزمایش قرار دادند [۳۷]. نتایج آن‌ها نشان داد حتی ممکن است در یک مدل خاص از گوشی هوشمند، مرکز فاز آنتن یکجا نباشد. متأسفانه، طراحی فشرده و کوچک‌سازی این دستگاه‌ها، پیکربندی گیرنده‌ها را با چالش‌هایی روبرو کرده است [۳۸]. با وجود بهبود قابلیت‌های GPS/GNSS در تلفن‌های هوشمند طی سال‌های اخیر، دقت این دستگاه‌ها همچنان تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله آرایش و تعداد ماهواره‌ها در زمان جمع‌آوری داده‌ها، شرایط محیطی، توانایی دریافت سیگنال‌های چندفرکانسه، کیفیت سخت‌افزار گیرنده (مانند تراشه و آنتن)، و نرم‌افزار پردازشگر قرار دارد [۳۹-۴۱]. ساختارهای پیچیده شهری یا مناطق جنگلی می‌توانند با ایجاد انسداد و انعکاس‌های چندگانه، دریافت سیگنال‌های GNSS را مختل کنند، این موضوع به‌طور دقیق توسط [۴۲] بررسی شده‌است. دقت GPS/GNSS ممکن است در هر بار جمع‌آوری داده‌ها متفاوت باشد، اما به‌طور کلی تلفن‌های هوشمند معمولاً در محدوده دقت مورد انتظار عمل می‌کنند [۴۳]. با توجه به تحقیقات صوت گرفته در این مطالعه، تلاش شده است تا با ارائه یک رویکرد جایگزین، هزینه‌های بالای سیستم‌های نقشه‌برداری سیار زمینی کاهش یابد. سیستم‌های نقشه‌برداری سیار موجود دارای ابعاد بزرگ و نیازمند دقت بالا در نصب و یکپارچه‌سازی حسگرهای مختلف هستند. از آنجا که این حسگرها در یک پلتفرم واحد ادغام نشده‌اند، کاربران ناگزیرند در هر بار استفاده، زوایا و فواصل بین مراکز حسگرها را اندازه‌گیری کنند. علاوه بر این، همگام‌سازی زمانی بین حسگرهای مختلف چالشی دیگر در این سیستم‌ها محسوب می‌شود. در روش



شکل ۱: ترانشه موضوع مطالعه

Fig. 1: The Trench Under Study

جدول ۱: مشخصات تلفن هوشمند مورد استفاده

Table 1: Parameter of the device used.

| نام دستگاه<br>Device | سیستم تعیین موقعیت<br>Positioning System | حسگر<br>Sensor  | وضوح تصویر<br>Image Resolution | پارامترهای لنز<br>Lens Parameters    | سال ساخت<br>Production Year |
|----------------------|------------------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| iPhone 13 Pro        | GPS+GLONASS+Galileo+QZSS+Beidou          | Dual pixel PDAF | 2/12 MP                        | 7/5mm f/5/1, 26mm (35 mm equivalent) | 2021                        |

استاندارد در ارزیابی دقت، امکان مقایسه موقعیت‌های ثبت شده را با مختصات واقعی نقاط فراهم می‌آورد و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$RMSE(\delta x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2}$$

$$RMSE(\delta y) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

$$RMSE_{Total} = \sqrt{(\delta x)^2 + (\delta y)^2}$$

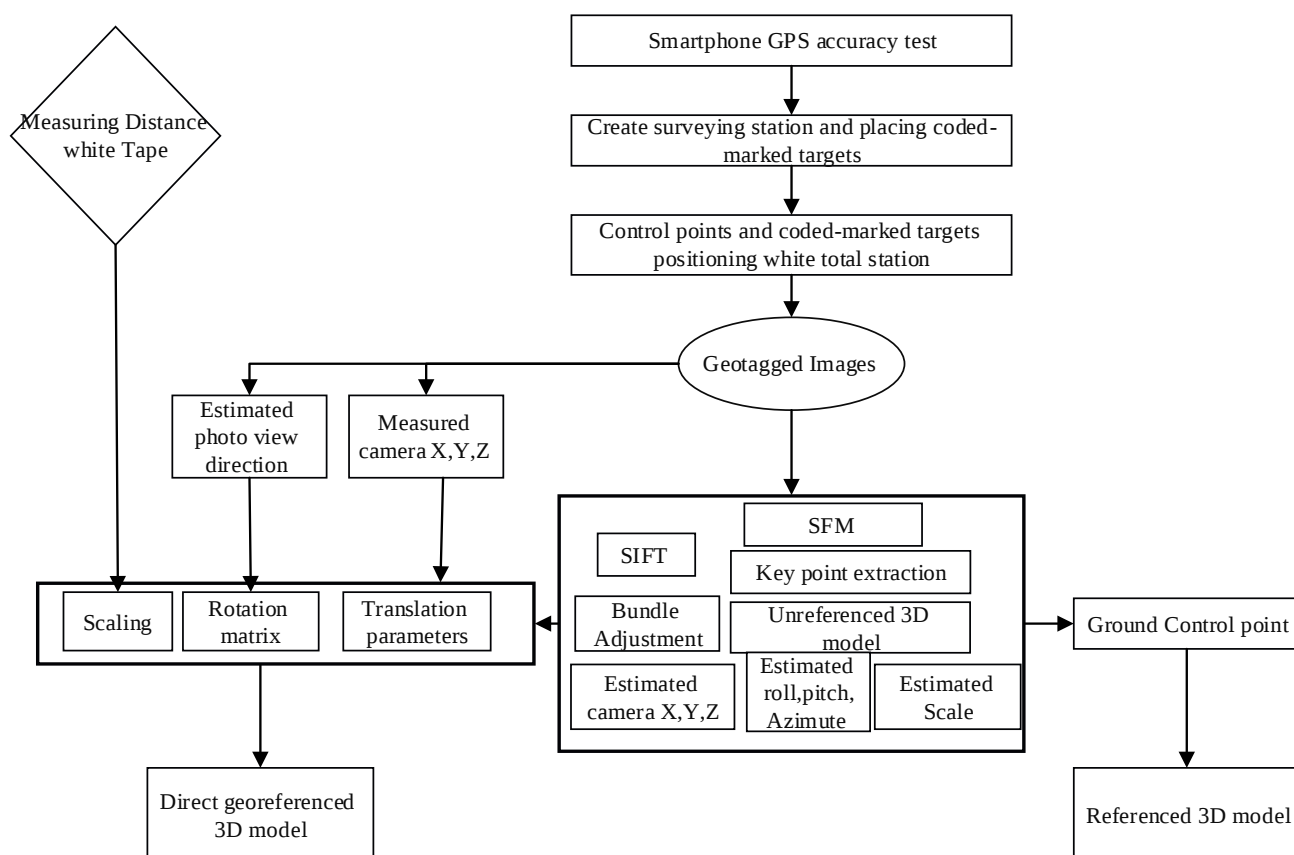
RMSE خطای جذر میانگین مربعات، N تعداد مشاهدات،  $x_i, y_i$  مقدار پیش‌بینی شده،  $\bar{x}_i, \bar{y}_i$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $\delta x$  خطای جذر میانگین مربعات در راستای محور x،  $\delta y$  خطای جذر میانگین مربعات در راستای محور y

در پروژه‌های فتوگرامتری، دستیابی به دقت‌های مورد نظر مستلزم طراحی دقیق شبکه و پیکربندی مناسب تصویربرداری است. در این راستا، مسائل مرتبط با انتخاب مقیاس تصویربرداری، تعداد ایستگاه‌های دوربین، هندسه نسبی آن‌ها، و همچنین قیود و محدودیت‌های طراحی باید به دقت مورد بررسی قرار گیرند. پس از تکمیل مرحله طراحی شبکه، تعداد ایستگاه‌های عکسبرداری و نقاط کنترل زمینی باید به‌طور دقیق مشخص شوند. در ادامه، سیستم مختصات مناسب تعریف و اندازه‌گیری‌های موقعیتی مرتبط انجام می‌شود تا نتایج از نظر دقت و کارایی بهینه شوند. برای کنترل صحت عملیات و برآورد خطای تعیین موقعیت این ایستگاه‌ها، پیمایش انجام شد. در پیمایش باید هر نقطه، از نقطه قبلی و بعدی قابل رویت باشد.

در این پژوهش امکان ارجاع جغرافیایی مستقیم مدل سه‌بعدی فتوگرامتری با استفاده از داده‌های موقعیت و وضعیت دوربین در لحظه تصویربرداری که توسط حسگرهای تلفن هوشمند اندازه‌گیری شده‌اند، بررسی گردید و علاوه بر ارائه جایگزینی عملی برای نقاط کنترل زمینی به منظور تسهیل در ارجاع جغرافیایی، امکان بهره‌گیری از داده‌های مذکور برای کمّی‌سازی خطاهای مدل سه‌بعدی نهایی نیز ارزیابی شد. مراحل اجرای روش پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است.

مطابق شکل ۲ در بخش اول این مطالعه، دقت و کارایی حسگرهای تلفن هوشمند مورد تحلیل قرار گرفت. تعیین دقت حسگرها، ارزیابی پایداری آن‌ها و امکان حذف خطاهای سیستماتیک به منظور ارزیابی قابلیت‌های گوشی هوشمند برای حذف اعوجاج تصویر ناشی از خطاهای سیستماتیک لنز و بهینه‌سازی وزن‌دهی در معادلات مشاهده طی باندل اجسمنت، بسیار حائز اهمیت است.

برای آزمایش دقت GPS/GNSS تلفن هوشمند، از تعدادی نقاط کنترل یک شبکه ژئودزی که برای یکپارچگی ساخت و سازه‌های واقع در محدوده‌ای یک هکتاری طراحی شده بود، استفاده گردید. موقعیت این نقاط توسط یک تیم نقشه‌بردار حرفه‌ای هم به صورت نسبی و هم در سیستم مختصات UTM، با استفاده از گیرنده‌های GNSS، توتال‌استیشن و ترازباب الکترونیکی اندازه‌گیری شده است. روش ژئودزی به کار رفته قادر بوده فاصله‌های افقی و اختلاف ارتفاع نقاط را با دقت میلی‌متر و زوایا را با دقت چند ثانیه اندازه‌گیری کند. دقت تعیین موقعیت این نقاط زیر ۵ میلی‌متر گزارش شده است. آزمایش طراحی شده بر اندازه‌گیری خطای مطلق موقعیت‌یابی حسگر GPS/GNSS تلفن هوشمند در مقایسه با مختصات دقیق نقاط کنترل شبکه ژئودزی به عنوان داده‌های مرجع متمرکز بود. برای ارزیابی دقت، از خطای جذر میانگین مربعات افقی به عنوان معیار اصلی استفاده شد. این معیار، به عنوان یک اندازه‌گیری



شکل ۲: روندنمای پیاده‌سازی تحقیق

Fig. 2: The process of paper

زمین، نیازی به اندازه‌گیری ارتفاع دوربین از سطح زمین وجود ندارد. در صورت ثبت چندین عکس از یک ایستگاه، وجود موقعیت‌های متفاوت  $X,Y,Z$  برای هر تصویر نامطلوب و غیرقابل مدیریت است. باید توجه داشت که هر خطای سیستماتیک موقعیت‌یابی GNSS مستقیماً به مدل منتقل می‌شود و تنها با افزودن نقاط کنترل زمینی امکان حذف آن فراهم می‌گردد. ظهور تراشه‌های GNSS با فرکانس دوگانه برای گوشی‌های هوشمند، پیشرفتی در جهت موقعیت‌یابی با دقت بالاتر است، که نیاز به انجام مشاهدات در زمان طولانی‌تر دارد اما به دلیل کیفیت پایین مشاهدات فاز حامل برای رفع ابهام فاز و تثبیت سیگنال‌ها تأثیر قابل توجهی بر دقت ندارد. در روش پیشنهادی، پارامترهای جهت‌گیری نسبی که در الگوریتم ساختار ناشی از حرکت تخمین زده شده‌اند، با استفاده از پارامترهای جهت‌گیری که مستقیماً از طریق حسگرهای حرکتی تلفن هوشمند اندازه‌گیری شده‌اند، اصلاح گردید. عکسبرداری در شرایط ایستا انجام خواهد شد، بنابراین زوایای تخمینی و اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه باید دارای مقداری ثابت و در صورت عدم وجود خطاها با هم برابر باشند. برای جهت دهی مدل نهایی، از میانگین زوایای اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه استفاده شد. سپس، طول اندازه‌گیری

برای دقت بیشتر اندازه‌گیری‌ها به روش کوپل انجام و خطاهای باقی‌مانده با استفاده از روابط ریاضی تعدیل و سرشکن گردید. تصویربرداری در حال حرکت و با سرعت باعث کاهش بیشتر دقت موقعیت‌یابی می‌شود. با توجه به چالش‌های فوق، و نیز عدم تعیین فاصله بین مرکز فاز آنتن گیرنده GNSS، مرکز نوری دوربین و حسگرهای حرکتی، همچنین نامشخص بودن نرخ به‌روزرسانی موقعیت و همزمانی آن با زمان ثبت تصاویر، تصویربرداری در شرایط ایستا انجام شد. با توجه به دقت مورد انتظار از حسگرهای گوشی هوشمند، فرض بر آن است که مرکز فاز آنتن GNSS، مرکز نوری دوربین و حسگرهای حرکتی هم‌راستا و منطبق بر یکدیگر هستند. این فرض نیاز به محاسبه بردار خروج از مرکزیت برای هر تصویر را برطرف می‌کند و در نتیجه نیازی به محاسبه آزیموت افقی بین مرکز فاز آنتن GNSS و مرکز نوری دوربین نیست که باعث ساده شدن فرآیند پیش‌پردازش داده‌ها می‌شود. با نصب تلفن هوشمند روی سه پایه و استقرار آن در هر ایستگاه، تصاویر با برچسب جغرافیایی (شامل موقعیت و وضعیت دوربین در لحظه عکسبرداری) به صورت فن شکل (چرخاندن دوربین حول محور عمودی) اخذ شدند. از آنجا که گیرنده GNSS برای تعیین موقعیت دوربین استفاده می‌شود و نه توپوگرافی

امکان محاسبه و کنترل خطای تجمعی اندازه‌گیری‌ها را فراهم می‌نماید. پس از تعدیل و سرشکن خطاها با روش کمترین مربعات، مسیر پیمایش تکمیل و مختصات هر ایستگاه با دقت ۲ میلی‌متر برای طول‌ها و ۳ ثانیه برای زوایا محاسبه شد. مختصات این ایستگاه‌ها سپس با استفاده از دو نقطه کنترل شبکه ژئودزی به سیستم مختصات UTM منتقل گردید و از آن‌ها برای تعیین موقعیت نشانگرهای کددار توزیع شده روی سطح دیوار استفاده شد. شانزده نشانگر کددار با توزیع مناسب بر روی دیواره دیو نصب شد. سپس زاویه افقی، عمودی و فاصله شیب‌دار به دقت اندازه‌گیری شدند تا مختصات دقیق نشانگرهای کددار به دست آید. به منظور افزایش دقت و شناسایی خطاهای احتمالی، هر نشانگر از طریق استقرار روی دو نقطه شبکه پیمایش اندازه‌گیری شد. دیو مورد مطالعه حدود ۱۵۰ متر طول و ۲۵ متر ارتفاع داشت و جهت آن تقریباً جنوب به شمال بود. دیواره غربی دیو، که به صورت تقریباً عمودی برش خورده و بر اثر گذر زمان دچار ریزش شده بود، به عنوان محل مطالعه انتخاب گردید. شرایط جوی در روز مطالعه صاف و آفتابی بود که نور یکنواخت و پراکنده‌ای ایجاد کرد. این شرایط برای تصویربرداری از دیواره دیو ایده‌آل بود و اثر سایه‌ها بر تصاویر و صحنه‌های بازسازی شده را به حداقل رساند. به دلیل کوتاه بودن زمان تصویربرداری، تأثیر تغییرات زاویه تابش خورشید بر کیفیت مدل بسیار محدود بود. عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار Geocam Ar برای سیستم عامل iOS گرفته شدند که جهت‌گیری عکس‌ها را با استفاده از حسگرهای مغناطیس‌سنج، شتاب‌سنج وژیروسکوپ تعیین می‌کند. نمایی از نحوه توزیع نشانگرها در شکل (۴) نمایش داده شده است.

تلفن هوشمند با استفاده از سه پایه به ترتیب روی نقاط مستقر شد. قبل از شروع تصویربرداری برای به حداقل رساندن خطای گیرنده GNSS، تقریباً چهار تا پنج دقیقه در هر ایستگاه منتظر ماندیم تا مطمئن شویم، گیرنده زمان کافی برای تثبیت موقعیت را دارد. موقعیت هر ایستگاه از طریق میانگین‌گیری اندازه‌گیری‌ها تعیین شد. پس از اخذ تصاویر با برچسب جغرافیای در هر ایستگاه، تلفن هوشمند و سه پایه بدون نیاز به جداسازی یا قطع ارتباط به ایستگاه بعدی منتقل شدند. تمامی تصاویر به صورت افقی گرفته شدند، این روش نه تنها ساده‌ترین راه برای نصب دوربین بر روی سه پایه را فراهم می‌کند، بلکه پوشش طولی بیشتری نیز ارائه می‌دهد و به بهبود هم‌پوشانی تصاویر کمک می‌نماید. برای پوشش کامل دیو، تجهیزات به هر دوازده ایستگاه منتقل و در هر ایستگاه، بین پنج تا ده عکس به روش تصویربرداری فن شکل (چرخاندن دوربین حول محور عمودی) گرفته شد. روش تصویربرداری فن شکل، امکان انجام سریع‌تر بررسی‌های میدانی را فراهم می‌آورد و در صورت وجود فاصله کافی از دیواره دیو برای تأمین هم‌پوشانی بهینه، نتایج بهتری نسبت به روش تصویربرداری خطی ارائه می‌دهد. از طرف دیگر حفظ فاصله کافی از دیو برای تضمین دریافت مناسب سیگنال GNSS اهمیت دارد. این نرم‌افزار تخمینی از دقت موقعیت‌یابی تلفن ارائه می‌دهد که در این مطالعه برای تمامی عکس‌ها، ۴/۶ متر بود.

شده با متر برای تعیین مقیاس مدل و میانگین مختصات به دست آمده در هر ایستگاه جهت انتقال مدل به سیستم مختصات UTM به کار رفت. علاوه بر این، یک مدل با استفاده از موقعیت دقیق ایستگاه‌های عکسبرداری به روش ارجاع جغرافیایی غیرمستقیم نیز تولید و RMSE نقاط چک مبنای ارزیابی دقت روش پیشنهادی قرار گرفت. تلفن هوشمند با استفاده از میله منشوری به ارتفاع ۱/۵۰ متر و سه پایه‌ای که پایداری، شاقولی و تراز دقیق دستگاه را تضمین می‌کرد، بر روی نقاط شبکه ژئودزی مستقر شد. تنها نقاطی از شبکه ژئودزی موجود انتخاب شدند که در محیط‌های باز و فاقد موانع قرار داشتند. این انتخاب با هدف بهینه‌سازی شرایط دید، افزایش قابلیت اطمینان داده‌های ثبت شده و کاهش اثرات نویزهای محیطی در طول فرآیند اندازه‌گیری انجام شد. به منظور جلوگیری از بازتاب سیگنال‌های منعکس شده از سطح زمین، یک صفحه فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر که ابعاد آن از هر طرف ۲ تا ۳ سانتی‌متر بزرگتر از گوشی هوشمند بود، زیر دستگاه قرار داده شد. با توجه به اینکه موقعیت دقیق مرکز فاز گیرنده گوشی مشخص نبود، مرکز قاب فیزیکی دستگاه به عنوان نقطه مرجع در نظر گرفته شد.

نرم‌افزار GNSS obs برای ثبت موقعیت نقاط استفاده شد. به منظور اطمینان از عملکرد مداوم گیرنده GNSS، گزینه "ضبط مسیر" فعال گردید و موقعیت نقاط به صورت جداگانه از طریق گزینه "افزودن نقطه جدید" ثبت شد. در جلسه جمع‌آوری داده‌ها، سه روش به کار گرفته شد: در روش اول، موقعیت نقاط به صورت آنی ثبت گردید و در روش دوم، موقعیت نقاط با استفاده از میانگین‌گیری ثبت شد. در روش میانگین‌گیری، گوشی هوشمند به مدت یک دقیقه بالای هر نقطه قرار داده شد و موقعیت از میانگین بیست بار اندازه‌گیری به دست آمد. همچنین، یک دوره مشاهده یک ساعته نیز اجرا گردید. به منظور جلوگیری از قطع عملکرد GNSS، گزینه "اجبار اندازه‌گیری‌های کامل GNSS در بخش گزینه "تنظیمات" فعال گردید. داده‌های ثبت شده با استفاده از نرم‌افزارهای ESRI ArcGIS Pro و ArcGIS Field Maps پردازش شدند. دقت موقعیت‌یابی به عنوان فاصله افقی و عمودی بین موقعیت اندازه‌گیری شده و موقعیت واقعی نقطه تعریف گردید. نقاط شبکه ژئودزی بر اساس شناسه نقطه که در هنگام ثبت وارد شده بود، با برداشت‌ها مطابقت داده شدند. برای ایجاد ویژگی‌های خطی بین نقاط متناظر از ابزار "XY to Line" استفاده شد و طول این خطوط نشان دهنده فاصله بین نقطه شبکه ژئودزی و موقعیت GNSS مشاهده شده در سیستم مختصات UTM بود. تصاویر نقاط شبکه ژئودزی و نحوه استقرار تلفن برای جمع‌آوری داده‌های GNSS در شکل (۳) نمایش داده شده است.

در مرحله بعد دوازده نقطه زمینی برای استقرار دوربین در فاصله ۱۵ تا ۲۰ متری از یکدیگر و از دیو ایجاد و مختصات آن‌ها از طریق پیمایش اندازه‌گیری شد. با استقرار توتال‌استیشن در هر ایستگاه، زاویه‌های افقی و عمودی بین ایستگاه‌های قبلی و بعدی برای حذف اثر خطاهای سیستماتیک به صورت کوپل و فاصله افقی اندازه‌گیری گردید. این روش



شکل ۳: تصاویر نقاط شبکه ژئودزی و نحوه استقرار تلفن هوشمند برای جمع‌آوری داده‌های GNSS  
Fig. 3: Images of Geodetic Network Points and the Setup of the Smartphone for GNSS Data Collection



شکل ۴: نحوه توزیع نشانگرهای کددار  
Fig. 4: Distribution Pattern of Coded Targets

۴،  $p$  و موقعیت‌های تخمینی مراکز تصویر در چارچوب مرجع مدل بود. در این مدل، مختصات و زوایای دوران  $\theta$ ،  $p$  دوربین، اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه، جایگزین مقادیر تخمینی شد و مقدار زاویه  $\xi$  برابر با صفر فرض شد. به دلیل ثابت بودن موقعیت دوربین در هر ایستگاه، مختصات تمامی عکس‌های یک ایستگاه، یکسان در نظر گرفته شدند و مختصات اندازه‌گیری شده جایگزین مختصات تخمینی شدند. سپس این فایل به عنوان مقادیر پارامترهای خارجی دوربین در نرم‌افزار بارگذاری شد تا امکان ارجاع جغرافیایی مدل فراهم شود. در این مدل مقیاس با استفاده از دو نقطه که فاصله‌ی بین آن‌ها به صورت دستی و با متر لیزری در محل اندازه‌گیری شده بود، محاسبه گردید.

ب) مدل تلفیقی: در این حالت سه مدل با استفاده از همان مجموعه تصاویر و مشابه روش برچسب جغرافیایی تولید شد. با این تفاوت که مختصات به ترتیب ۱، ۲ و ۳ نشانگر کددار به عنوان نقطه کنترل وارد محاسبات شدند.

ج) مدل پیمایش: مدل دوم از همان تصاویر ساخته شد، اما با استفاده از مختصات دقیق دوازده ایستگاه عکسبرداری که به روش پیمایش اندازه‌گیری شده بودند و به عنوان مدل پیمایش نام‌گذاری گردید. در اولین مرحله پیش‌پردازش، مختصات ایستگاه‌های عکسبرداری به فرمت

مفروضات مطالعه در خصوص جهت‌گیری عکس‌ها به شرح زیر است: محور کوتاه عکس  $\theta$  به سمت بالا، جهت دید  $\xi$  به سمت بیرون و محور طولی عکس  $p$  به دلیل استقرار تلفن روی سه پایه به صورت موازی با افق تعریف شده است. به دلیل موازی بودن تلفن با راستای افقی نیاز به دوران مدل حول محور  $\xi$  نیست. در مجموع هفتاد و هشت عکس در فرمت jpg، با ابعاد  $4032 \times 3024$  پیکسل و وضوح ۷۲ dpi برای پوشش کامل نمای دپو گرفته شد. مختصات  $X, Y, Z$  هر عکس و اطلاعات جهت‌گیری (زوایای  $roll, pitch, yaw$ ) به طور خودکار ثبت شد. با توجه به اینکه دوربین در هر ایستگاه مستقر می‌شد، بنابراین سرعت حرکت صفر و فاصله تا هدف ثابت بود، وضوح فضایی حاصل به  $7/2$  میلی‌متر رسید. در این مطالعه، پنج مدل زیر بر پایه داده‌های جمع‌آوری شده ساخته شد و برای ارزیابی دقت ارجاع جغرافیایی مدل‌ها، نشانگرهای کددار به عنوان نقاط چک مورد استفاده قرار گرفتند.

الف) مدل برچسب جغرافیایی: اولین مدل صرفاً بر اساس تصاویر، داده‌های موقعیتی و زوایای ثبت شده توسط حسگرهای تلفن هوشمند ساخته و با عنوان مدل برچسب جغرافیایی نام‌گذاری شد. پس از تولید مدل سه‌بعدی، پارامترهای خارجی دوربین به صورت یک فایل N-View Match (.nvm) استخراج گردید. این فایل حاوی بردارهای زاویه‌ای  $\theta$ ،

در مقایسه با نقاط شبکه ژئودزی، انجام شد. نتایج حاصل در شکل (۵) و جدول (۲) ارائه شده است که دقت موقعیتیابی را در محدوده متر و دسی متر نشان می‌دهد. دقت سه روش موقعیتیابی تقریباً نزدیک به یکدیگر بود و جذر میانگین مربعات خطا موقعیت افقی حسگر در حالت توقف یک ساعته برابر با ۱/۷۵ متر و در مولفه ارتفاعی برابر ۱۰/۶۹- متر تعیین گردید.

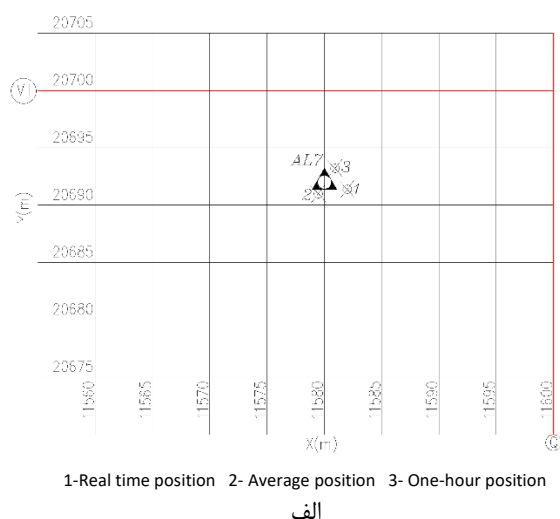
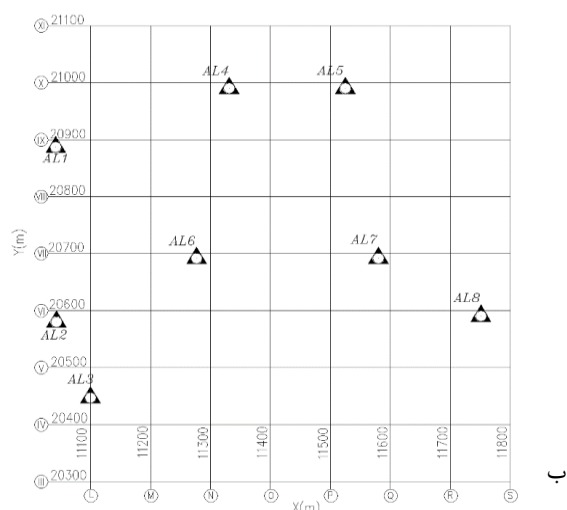
آیفون ۱۳ پرو، به‌طور مستقیم توانایی ضبط داده‌های فاز حامل (Carrier Phase) در فرمت RINEX را ندارد. این دستگاه عمدتاً برای موقعیتیابی عمومی و ناوبری طراحی شده است و برای کاربردهای دقیق ژئودزی یا پردازش داده‌های خام GNSS محدودیت‌هایی دارد. برای تعیین موقعیت دقیق تک نقطه‌ای علاوه بر توانایی جمع‌آوری داده‌های فاز حامل نیاز به اعمال تصحیحات دقیق مانند ساعت و مدار ماهواره، تصحیح خطای چند مسیری، و مدل سازی تأخیرات جوی است. نتایج جدول بالا نشان می‌دهد توقف طولانی مدت روی نقطه تنها با افزایش تصادفی دقت در بعضی نقاط همراه بوده است.

قابل قبول نرم‌افزار تبدیل شد. فایل تولید شده با فرمت .txt. دارای چهار ستون شامل نام هر عکس و مقادیر  $x$ ،  $y$  و  $z$  مرتبط با آن بود. از آنجا که دوربین تلفن هوشمند بر روی سه پایه ثابت قرار گرفته بود، ارتفاع دوربین تا سطح زمین به مختصات ارتفاعی نقطه در شبکه پیمایش اضافه و مختصات تمامی عکس‌ها از یک ایستگاه مشابه یکدیگر در نظر گرفته شدند.

برای هر سه حالت، فرآیند تشخیص و تطبیق نقاط کلیدی و محاسبه پارامترهای خارجی دوربین روی بالاترین تنظیم قرار گرفت تا نرم‌افزار با عکس‌های اندازه اصلی کار کند. همچنین محدودیت‌های نقاط کلیدی و نقاط اتصال روی مقادیر پیش‌فرض تنظیم شدند تا از تأثیر تغییر تنظیمات بر مقایسه بین مجموعه داده‌ها جلوگیری شود. پارامترهای توجه داخلی نیز با روش خودکالیبراسیون برآورد گردید.

## نتایج و بحث

آزمایش گیرنده GNSS با ارزیابی خطای مطلق و نسبی موقعیت حسگر،



شکل ۵: الف) نقشه نقاط شبکه ژئودزی، ب) نتایج اندازه‌گیری GNSS تلفن هوشمند در مقایسه با شبکه نقاط ژئودزی

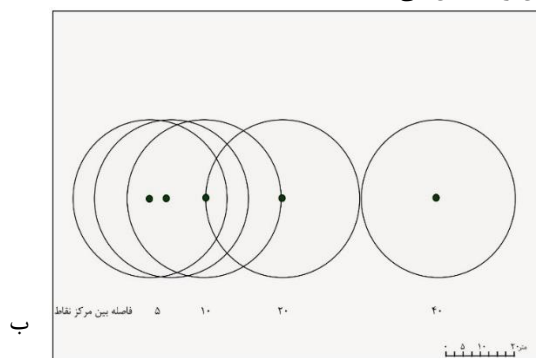
Fig. 4: a) Map of geodetic network points, b) Results of smartphone GNSS measurements compared to the geodetic network points

جدول ۲: اندازه‌گیری خطای مطلق و نسبی موقعیت حسگر تلفن هوشمند در مقایسه با نقاط شبکه ژئودزی

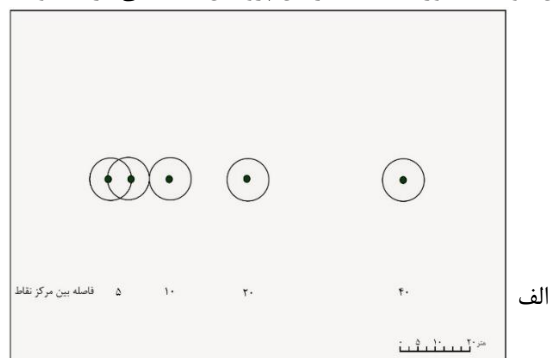
Table 2: Measurement of Absolute and Relative Position Errors of the Smartphone Sensor Compared to Geodetic Network Points

| نقاط شبکه ژئودزی<br>Geodetic Network<br>Points | RMSE (meter)                     |              |               |                                                            |              |               |                                         |             |               |
|------------------------------------------------|----------------------------------|--------------|---------------|------------------------------------------------------------|--------------|---------------|-----------------------------------------|-------------|---------------|
|                                                | موقعیت آنی<br>Real-Time Position |              |               | میانگین بیست اندازه‌گیری<br>Average of Twenty Measurements |              |               | مشاهده یک ساعته<br>One-Hour Observation |             |               |
|                                                | X                                | Y            | Z             | X                                                          | Y            | Z             | X                                       | Y           | Z             |
|                                                |                                  |              |               |                                                            |              |               |                                         |             |               |
| AL1                                            | 0.83                             | 3.25         | -10.50        | 1.68                                                       | 2.18         | -12.40        | -1.17                                   | -2.33       | -11.29        |
| AL2                                            | -1.64                            | 2.75         | -11.32        | 0.98                                                       | -1.84        | -10.50        | -                                       | -           | -             |
| AL3                                            | 2.10                             | 3.86         | -13.69        | 1.77                                                       | 4.05         | -12.91        | -                                       | -           | -             |
| AL4                                            | -1.08                            | -1.97        | -14.27        | 0.69                                                       | 1.36         | -15.06        | 0.50                                    | 0.90        | -11.16        |
| AL5                                            | 3.17                             | 6.05         | -15.84        | -2.54                                                      | -3.25        | -11.43        | -                                       | -           | -             |
| AL6                                            | -3.22                            | -3.41        | -13.97        | -3.82                                                      | -3.09        | -13.46        | -                                       | -           | -             |
| AL7                                            | 1.97                             | -0.62        | -12.05        | -0.54                                                      | -1.02        | -10.83        | 0.91                                    | 0.76        | -9.54         |
| <b>RMSE Total</b>                              | <b>2.17</b>                      | <b>3.495</b> | <b>-13.20</b> | <b>2.02</b>                                                | <b>2.606</b> | <b>-12.46</b> | <b>0.903</b>                            | <b>1.50</b> | <b>-10.69</b> |

تا ۶ متر در راستای افقی و ۱۰ تا ۱۵ متر در راستای عمودی نشان داد. برای مقیاس‌گذاری صحیح مدل، ضروری است که نسبت میان خطای موقعیت‌یابی GNSS و طول مسیر اکتساب مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. زمانی که خطای افقی تنها چند پیکسل در تصاویر پایه باشد ممکن است بی‌اهمیت به نظر برسد اما، هنگامی که خطاهای این اندازه برای ارجاع مدل در محدوده‌ای کوچک اعمال می‌شود، خطا کسری قابل توجهی از ابعاد مدل را به وجود می‌آورد. این مسئله تأثیر مستقیمی بر دقت مقیاس‌گذاری و صحت مدل ایجاد خواهد کرد. به همین دلیل در پژوهش حاضر مقیاس از طریق اندازه‌گیری چند طول مشخص با متر لیزری برآورد شد. شرایط مشابهی در بحث جهت‌گیری زاویه‌ای مدل نیز مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده‌است، موقعیت واقعی یک نقطه می‌تواند در هر کجای محدوده دایره خطا قرار داشته باشد که این امر باعث بروز خطا در برآورد آزمون امتداد شده و جهت‌گیری مدل را مختل خواهد کرد. با کاهش فاصله میان دو نقطه، درصد خطای جهت‌گیری نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در نهایت خطای موقعیت مدل در انتقال به سیستم مختصات جهانی معادل خطای موقعیت‌یابی GNSS تلفن هوشمند خواهد بود. این موضوع نشان دهنده اهمیت کاهش خطای GNSS و استفاده از روش‌های تکمیلی برای بهبود دقت است. جدول (۳) اختلاف مختصاتی ایستگاه‌های عکسبرداری (مراکز تصاویر) برداشت شده با GNSS تلفن هوشمند و روش توتال استیشن را نمایش می‌دهد.

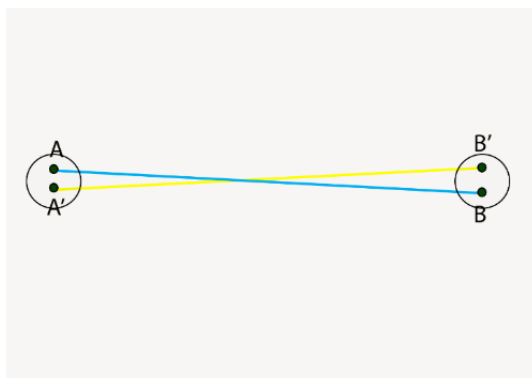


دقت به‌عنوان فاصله خطا تعریف شد، به این معنی که فاصله شامل هر دو بعد افقی و عمودی بین مکان واقعی نقطه و مکان اندازه‌گیری شده است. به‌طور کلی، این پژوهش به تلاشی برای دستیابی به اندازه‌گیری‌هایی نزدیک به مکان واقعی اشاره دارد. اگر یک نقطه اندازه‌گیری GNSS با فاصله خطا در نزدیکی نقطه دیگری قرار گیرد، این دو نقطه نمی‌توانند به‌طور دقیق از یکدیگر تفکیک شوند. بنابراین، تعیین موقعیت مراکز دوربین نیازمند اندازه‌گیری‌هایی است که حداقل فاصله بین مراکز تصویر، دو برابر حداکثر فاصله خطا GNSS باشد. به این ترتیب، حداکثر خطای اندازه‌گیری‌های GNSS در تلفن‌های هوشمند می‌تواند به‌عنوان یک محدودیت برای کاربرد عملی آن در فتوگرامتری محسوب شود. این محدودیت به‌ویژه در شرایطی که ایستگاه‌های عکسبرداری فاصله نزدیکی به یکدیگر دارند، مشکل‌ساز خواهد بود، زیرا این مکان‌ها معمولاً در فاصله‌ای کمتر از حداکثر خطای GNSS قرار می‌گیرند. شکل‌های (۵ الف و ب) نشان دهنده نقاط فرضی شناخته شده‌ای هستند که به ترتیب دارای خطای فاصله ۱۰ متر و ۵ متر می‌باشند؛ این امر نشان می‌دهد که برای اطمینان از نسبت‌دهی دقیق داده‌های اندازه‌گیری شده به نقطه صحیح، فاصله نقاط شناخته شده باید حداقل دو برابر خطای فاصله و به ترتیب ۲۰ متر و ۱۰ متر باشند. از سوی دیگر این سطح از خطا تأثیر قابل توجهی بر دقت تعیین مقیاس مدل، به‌ویژه در محدوده‌های کوچک مطالعاتی دارد. به‌طور خاص، GPS تلفن هوشمند مورد استفاده در این پژوهش خطاهایی در محدوده ۰/۶۰



شکل ۶: الف نشان دهنده خطا فاصله ۱۰ متر و ب نشان دهنده خطا فاصله ۵ متر

Fig. 6: (a) indicates an error for a distance of 10 meters, and (b) indicates an error for a distance of 5 meters.



شکل ۷: خطا جهت‌گیری زاویه‌ای

Fig. 7: Angular Orientation Error

جدول ۳: اختلاف مختصاتی ایستگاه‌های عکسبرداری، برداشت شده با توتال‌استیشن و GNSS تلفن هوشمند

Table 3: Coordinate Differences of Photography Stations Measured by Total Station and Smartphone GNSS

| Error (Unit mm)     |       |       |       |                     |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|
| ایستگاه عکسبرداری   | X     | Y     | Z     | ایستگاه عکسبرداری   | X     | Y     | Z     |
| Photography Station |       |       |       | Photography Station |       |       |       |
| 1                   | 3.62  | 4     | 10    | 7                   | 1.73  | -0.64 | 10.48 |
| 2                   | 2.81  | 2.17  | 9.38  | 8                   | 0.28  | 0.72  | 9.60  |
| 3                   | 0.84  | -1.32 | 10.42 | 9                   | 0.845 | 1.73  | 11.80 |
| 4                   | 2.15  | -1.68 | 11.63 | 10                  | -1.10 | -2.18 | 14.27 |
| 5                   | -1.52 | 2.47  | 13.56 | 11                  | 0.47  | 3.15  | 12.11 |
| 6                   | -3.87 | -3.16 | 10.36 | 12                  | 3.19  | 6     | 13.19 |

توسط سیستم iOS باقی ماند. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، ضعف سیستم تعیین موقعیت به بروز خطای بیشتر در تخمین ارتفاع منجر شده است. این محدودیت در برآورد ارتفاع می‌تواند به‌ویژه در پروژه‌هایی که به دقت مطلق ارتفاعی بالایی نیاز دارند، چالش برانگیز باشد و باید در تفسیر نتایج سه‌بعدی مدنظر قرار گیرد.

در مدل تلفیقی، استفاده از تنها یک نقطه‌ی کنترل باعث افزایش ۳ تا ۴ برابری دقت جهت‌گیری تصاویر شد و امکان ارجاع جغرافیایی مدل با دقت دسی‌متر را فراهم کرد. این رویکرد نه‌تنها بهبود قابل توجهی در نتایج ایجاد کرد، بلکه حجم کار اجرایی را نیز به حداقل رساند. در پروژه‌های مهندسی و ژئوماتیک که نیاز به انطباق مدل‌های سه‌بعدی با سیستم مختصات جهانی دارند، خطای جهت‌گیری می‌تواند منجر به انحراف قابل توجه در ارزیابی‌های بعدی یا در استخراج ویژگی‌ها از مدل‌های سه‌بعدی شود. همان‌طور که مشاهده شد، در فتوگرامتری تلفن هوشمند نیز استفاده از حداقل سه نقطه کنترل غیر همراستا توانست دقت هندسی را تا سطح میلی‌متر افزایش دهد.

نتیجه اجرای الگوریتم، همان‌طور که در شکل (۸) نمایش داده شده است، منجر به ایجاد مدلی با ساختار هندسی مناسب شد. با این حال، پارامترهای به‌دست آمده در چارچوب مرجع مدل هستند و نیاز به مقیاس‌بندی، چرخش و انتقال به سیستم مختصات UTM مطابق روش پیشنهادی دارند. پس از انتقال مدل به سیستم UTM مطابق با روش پیشنهادی اختلاف موقعیت نشانگرهای کددار تعیین موقعیت شده با توتال‌استیشن و برآورد شده در حالت برچسب جغرافیایی محاسبه و در جدول (۴) نمایش داده شده است.

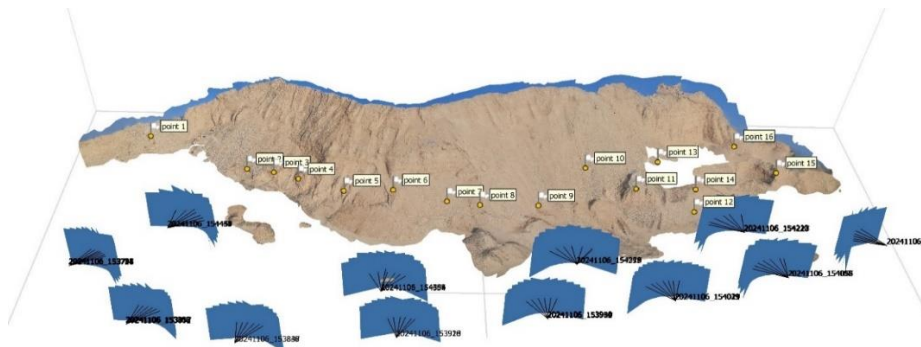
در ادامه بر اساس توضیحات ارائه شده، پنج مدل تولید و دقت تعیین موقعیت مطلق نشانگرها در هر مدل نسبت به داده‌های مرجع ارزیابی و نتایج آن در جدول (۵) آورده شده است.

در روش پیشنهادی، تلاش شد با استفاده از عکسبرداری در حالت ایستا، میانگین‌گیری موقعیت‌های GPS و ترکیب آن با داده‌های وضعیت دوربین و همچنین تعیین دقیق مقیاس، خطاهای سیستماتیک و تصادفی کاهش یابد و شبکه با دقت بیشتری به مرجع مختصات منتقل شود، اما میزان خطا همچنان در حد دقت تعیین موقعیت تک نقطه‌ای ارائه شده

جدول ۴: خطا تعیین موقعیت نشانگرها با روش برچسب جغرافیایی

Table 4: Positional Error of Markers Determined by the Geotagging Method

| شماره نشانگر. Target No. | X               | Y      | Z      | مجموع Total |
|--------------------------|-----------------|--------|--------|-------------|
|                          | Error (Unit mm) |        |        |             |
| 1                        | -0.710          | 0.590  | 9.533  | 9.587       |
| 2                        | -0.124          | 2.579  | 9.814  | 10.149      |
| 3                        | -1.907          | 0.585  | 9.207  | 9.420       |
| 4                        | 0.856           | -1.613 | 11.383 | 11.528      |
| 5                        | -2.571          | -1.267 | 9.466  | 9.890       |
| 6                        | 0.976           | -0.106 | 10.848 | 10.893      |
| 7                        | 2.421           | 0.628  | 11.460 | 11.730      |
| 8                        | -2.198          | 2.147  | 9.209  | 9.709       |
| 9                        | 1.169           | 1.440  | 10.243 | 10.410      |
| 10                       | 4.686           | -0.890 | 8.651  | 9.879       |
| 11                       | -3.131          | 0.732  | 8.890  | 9.453       |
| 12                       | -0.951          | -2.408 | 10.649 | 10.960      |
| 13                       | 1.399           | 1.104  | 10.206 | 10.515      |
| 14                       | -0.132          | 1.231  | 9.727  | 9.806       |
| 15                       | 2.730           | 2.270  | 11.252 | 11.799      |
| 16                       | -1.637          | -0.035 | 9.264  | 9.407       |
| مجموع Total              | 2.081           | 1.450  | 10.026 | 10.332      |



شکل ۸: مدل سه‌بعدی تولید شده و موقعیت ایستگاه‌های تصویربرداری  
Fig. 8: The produced 3D model and the positions of the imaging stations.

جدول ۵: دقت تعیین موقعیت نشانگرها در هر روش  
Table 5: Accuracy of target positioning in each method

| مدل<br>Model                       | تعداد نقاط کنترل<br>Number of control points | تعداد نقاط چک<br>(نشانگرهای کددار)<br>Number of check points (coded target) | میانگین RMSE نقاط کنترل<br>Average RMSE of control points |       |       | میانگین RMSE نقاط چک<br>Average RMSE of check points |       |        |
|------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------------------|-------|--------|
|                                    |                                              |                                                                             | Unit (meter)                                              |       |       | Unit (meter)                                         |       |        |
|                                    |                                              |                                                                             | X                                                         | Y     | Z     | X                                                    | Y     | Z      |
| برچسب جغرافیایی<br>Geotagged Image | 0                                            | 16                                                                          | 2.891                                                     | 4.828 | 1.893 | 2.081                                                | 1.450 | 10.026 |
|                                    | ۱ نشانگر کددار<br>1 coded target             | 15                                                                          | 0.002                                                     | 0.003 | 0.005 | 0.384                                                | 0.332 | 0.417  |
| مدل تلفیقی<br>Integrated Model     | ۲ نشانگر کددار<br>2 coded targets            | 14                                                                          | 0.004                                                     | 0.005 | 0.009 | 0.051                                                | 0.092 | 0.356  |
|                                    | ۳ نشانگر کددار<br>3 coded targets            | 13                                                                          | 0.002                                                     | 0.002 | 0.003 | 0.008                                                | 0.009 | 0.011  |
| مدل پیمایش<br>Traverse model       | 12                                           | 16                                                                          | 0.004                                                     | 0.003 | 0.004 | 0.004                                                | 0.006 | 0.005  |

## نتیجه‌گیری

۰/۵۰۷ متر و برای مؤلفه ارتفاعی به ۰/۴۱۷ متر کاهش یافت. همان‌طور که انتظار می‌رفت، اضافه کردن سه نقطه کنترل غیرهمراستا دقت هندسی مدل را تا سطح میلی‌متری افزایش یافت. همچنین در حالت استفاده از مختصات دقیق مراکز ایستگاه‌ها دقت به ۰/۰۰۰۷ متر رسید. استقلال از توزیع نقاط کنترل زمینی می‌تواند به‌طور مؤثری خطاهای ناشی از تغییرات هندسی در بازسازی مدل‌های سه‌بعدی را که به‌دلیل توزیع نامناسب این نقاط ایجاد می‌شوند، محدود کند. اما با وجود دقت پایین داده‌های موقعیتی تلفن هوشمند، استفاده از مختصات مراکز تصویر به‌عنوان نقاط کنترل زمینی برای حذف اعوجاج روش کارآمدی نبود. این محدودیت نشان می‌دهد که برای دستیابی به بازسازی دقیق‌تر، ترکیب داده‌های GNSS با سایر روش‌های کنترل زمینی یا استفاده از ابزارهای دقیق‌تر ضروری است.

یکی از جنبه‌های مهم دیگر که باید مورد توجه قرار گیرد، تعریف شبکه بهینه تصویربرداری است که باید با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و قیود موجود در مرحله جمع‌آوری داده‌ها طراحی شود. تصویربرداری در حین حرکت و با سرعت بالا می‌تواند دقت موقعیت‌یابی را کاهش دهد. از آنجا که فاصله بین مرکز فاز آنتن گیرنده GNSS، مرکز نوری دوربین و حسگرهای حرکتی تعیین نشده و نرخ به‌روزرسانی موقعیت و همزمانی آن با اخذ تصاویر مشخص نیست، برای کاهش این چالش‌ها، تصویربرداری در شرایط ایستا پیشنهاد می‌شود. نصب تلفن روی سه پایه

در این مطالعه، فرآیند تحقیق در دو بخش انجام شد. در بخش نخست، دقت تعیین موقعیت GNSS تلفن هوشمند از طریق اندازه‌گیری خطای مطلق و نسبی موقعیت حسگر، در مقایسه با نقاط یک شبکه ژئودزی، مورد بررسی قرار گرفت. دقت سه روش موقعیت‌یابی مورد استفاده تقریباً مشابه بود و جذر میانگین مربعات خطای موقعیت افقی حسگر در روش توقف یک ساعته برابر با ۱/۷۵ متر و در مؤلفه ارتفاعی برابر با ۱۰/۶۹- متر محاسبه شد. این سطح از خطا می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت تعیین مقیاس مدل، به‌ویژه در محدوده‌های مطالعاتی کوچک، داشته باشد. به‌طور خاص، GNSS تلفن هوشمند مورد استفاده در این پژوهش خطاهایی در محدوده ۰/۶ تا ۶ متر در راستای افقی و ۱۰ تا ۱۵ متر در راستای عمودی نشان داد. در بخش دوم، روش پیشنهادی روی یک دپو با توزیع مناسب نقاط کنترل پیاده‌سازی شد. در این راستا، پنج مدل مختلف تولید شد و دقت تعیین موقعیت مطلق نشانگرها در هر مدل، نسبت به داده‌های جمع‌آوری شده از طریق توتال‌استیشن، ارزیابی گردید. در حالتی که تنها از تصاویر دارای برچسب جغرافیایی استفاده شد، مقدار RMSE نقاط چک برای مؤلفه افقی برابر با ۲/۲۳۸ متر و برای مؤلفه ارتفاعی برابر با ۱۱/۸۸۳ متر به‌دست آمد. افزودن تنها یک نقطه کنترل باعث بهبود دقت جهت‌گیری تصاویر و افزایش سه تا چهار برابری دقت موقعیت‌یابی شد، به‌طوری که مقدار RMSE برای مؤلفه افقی به

[5] Lowe DG. Object recognition from local scale invariant features. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision; 1999; Kerkira, Greece. p. 1150–1157. Available from: <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>.

[6] Oniga VE, Breaban AI, Pfeifer N, Chirila C. Determining the suitable number of ground control points for UAS images georeferencing by varying number and spatial distribution. *Remote Sens.* 2020;12:876. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs12050876>.

[7] Fleming ZD, Pavlis TL. An orientation-based correction method for SfM-MVS point clouds: Implications for field geology. *J Struct Geol.* 2018;113:76–89. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.06.005>.

[8] Jaud M, Bertin S, Beauverger M, Augereau E, Delacourt C. RTK GNSS-assisted terrestrial SfM photogrammetry without GCP: Application to coastal morphodynamics monitoring. *Remote Sens.* 2020;12:1889. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs12111889>.

[9] Tahar KN. An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci.* 2013;40:93–98. Available from: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-93-2013>.

[10] Eltner A, Kaiser A, Castillo C, Rock G, Neugirg F, Abellán A. Image-based surface reconstruction in geomorphometry—Merits, limits and developments. *Earth Surf Dyn.* 2016;4:359–389. Available from: <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>.

[11] Jaud M, Grasso F, Le Dantec N, Verney R, Delacourt C, Ammann J, Deloffre J, Grandjean P. Potential of UAVs for monitoring mudflat morphodynamics (Application to the Seine Estuary, France). *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2016;5:50. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijgi5030050>.

[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;3:2. Available from: <https://doi.org/10.3390/drones3010002>.

[13] Manfreda S, Dvořák P, Mullerova J, Herban IS, Vuono P, Arranz JJ, Perks M. Assessing the accuracy of digital surface models derived from optical imagery acquired with unmanned aerial systems. *Drones.* 2019;3:15. Available from: <https://doi.org/10.3390/drones3030015>.

[14] Chudley TR, Christoffersen P, Doyle SH, Abellan A, Snooke N. High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control. *Cryosphere.* 2019;13:955–968. Available from: <https://doi.org/10.5194/tc-13-955-2019>.

[15] Czyża S, Szuniewicz K, Kowalczyk K, Dumalski A, Ogrodniczak M, Zieleniewicz Ł. Assessment of accuracy in unmanned aerial vehicle (UAV) pose estimation with the REAL-time kinematic (RTK) method on the example of DJI Matrice 300 RTK. *Sensors.* 2023;23(4):2092. Available from: <https://doi.org/10.3390/s23042092>.

امکان گرفتن چندین عکس از یک موقعیت با چرخاندن دوربین حول محور عمودی را فراهم می‌کند. شیوه تصویربرداری فن شکل باعث افزایش همپوشانی تصاویر می‌شود که برای استفاده در باندل اجستمنت مفید است.

مفید بودن تصاویر به‌دست‌آمده از گوشی‌های هوشمند موضوع اصلی این پژوهش نبود، زیرا این تصاویر به‌راحتی امکان تولید ابر نقطه و ایجاد مدل‌های سه‌بعدی از اشیاء را فراهم می‌کنند. در مقابل، تمرکز اصلی این مطالعه بر ارائه روشی به‌منظور بهبود دقت ارجاع جغرافیایی مستقیم بود. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از تصاویر دارای برچسب جغرافیایی ثبت شده توسط تلفن هوشمند، به‌تنهایی قادر به دستیابی به‌دقت زیر متر در ارجاع جغرافیایی مستقیم نیست.

## مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش این مقاله به شرح زیر است: نویسنده اول مسئولیت گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج و تهیه پیش‌نویس مقاله را بر عهده داشته است. نویسنده دوم به‌عنوان استاد راهنمای پژوهش، در طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام آن، بررسی و کنترل نتایج و همچنین اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله نقش داشته است. نویسنده سوم نیز در طراحی پژوهش مشارکت داشته و در مطالعه و بازبینی مقاله همکاری کرده است.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از تمامی عزیزانی که در این تحقیق همکاری داشته‌اند، کمال قدردانی و سپاس را دارند.

## تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است».

## منابع و مآخذ

- [1] Pavlis T, Mason K. The new world of 3D geologic mapping. *GSA Today.* 2017;27:4–10. Available from: <https://doi.org/10.1130/GSATG313A.1>.
- [2] Paukkonen N. Ten years of photogrammetry and LiDAR: Digital 3D documentation in Finnish archaeology between 2013–2022. *Fennoscandia Archaeologica.* 2024; XLI:56–69. Available from: <https://doi.org/10.61258/fa.142220>.
- [3] Konsolaki A, Karantellis E, Vassilakis E, Kotsi E, Lekkas E. Multitemporal monitoring for cliff failure potential using close-range remote sensing techniques at Navagio Beach, Greece. *Remote Sens.* 2024;16(23):4610. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs16234610>.
- [4] Lowe DG. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int J Comput Vis.* 2004;60:91–110. Available from: <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.

- [27] Corradetti A, Billi A, Tavani S. Virtual outcrops in a pocket: Smartphone as a fully equipped photogrammetric data acquisition tool. *GSA Today*. 2021;31. Available from: <https://doi.org/10.1130/GSATG506A.1>.
- [28] Bessin Z, Jaud M, Letortu P, Vassilakis E, Evelpidou N, Costa S, Delacourt C. Smartphone structure-from-motion photogrammetry from a boat for coastal cliff face monitoring compared with Pléiades tri-stereoscopic imagery and unmanned aerial system imagery. *Remote Sens*. 2023;15(15):3824. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs15153824>.
- [29] Teppati Losè L, Chiabrando F, Maschio P. Direct georeferencing approaches for close-range and UAV photogrammetry in the built heritage domain. *ISPRS Arch*. 2023;XLVIII-M-2:1557-1564. Available from: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1557-2023>.
- [30] Ocalan T, Turk T, Tunalioglu N, Gurturk M. Investigation of accuracy of PPP and PPP-AR methods for direct georeferencing in UAV photogrammetry. *Earth Sci Inform*. 2022;15:2231-2238. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00868-7>.
- [31] Halaj M, Kačmářik M. Performance assessment of kinematic GNSS positioning with smartphones based on post-processing of raw observations. *GeoScience Eng*. 2022;25:1-10. Available from: <https://doi.org/10.35180/gse-2022-0080>.
- [32] Shan J, Li Z, Lercel D, Tissue K, Hupy J, Carpenter J. Democratizing photogrammetry: an accuracy perspective. *Geospatial Inf Sci*. 2023;26(2):175-188. <https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2178336>
- [33] Patonis P. A comparative study on the use of smartphone cameras in photogrammetry applications. *Sensors*. 2024;24:7311. <https://doi.org/10.3390/s24227311>
- [34] Robustelli U, Baiocchi V, Pugliano G. Assessment of dual frequency GNSS observations from a Xiaomi Mi 8 Android smartphone and positioning performance analysis. *Electronics*. 2019;8(1):91. <https://doi.org/10.3390/electronics8010091>.
- [35] Yun J, Lim C, Park B. Inherent limitations of smartphone GNSS positioning and effective methods to increase the accuracy utilizing dual-frequency measurements. *Sensors*. 2022;22(24):9879. <https://doi.org/10.3390/s22249879>.
- [36] Netthonglang C, Thongtan T, Satirapod C. GNSS precise positioning determinations using smartphones. In: *Proceedings of the 2019 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS): November 11–14, 2019, Bangkok, Thailand*. IEEE; 2019. p. 401–4. <https://doi.org/10.1109/APCCAS2019/475188953132>.
- [37] BOCHKATI M, Sharma H, Lichtenberger CA, Pany T. Demonstration of fused RTK (fixed) + inertial positioning using android smartphone sensors only. In: *2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS): April 20–23, 2020, Portland, Oregon, USA*. IEEE; 2020. p. 1140–1154. Available from: <https://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9109865>
- [16] López RS, Murga RET, Silva-López JO, Rojas-Briceño NB, Fernández DG, Oliva-Cruz M, Taddia Y. Accuracy assessment of direct georeferencing for photogrammetric applications based on UAS-GNSS for high Andean urban environments. *Drones*. 2022;6(12):388. Available from: <https://doi.org/10.3390/drones6120388>.
- [17] Ekaso D, Nex F, Kerle N. Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing. *Geo-Spatial Inf Sci*. 2020;23(2):165–181. Available from: <https://doi.org/10.1080/10.2019/10095020.1710437>.
- [18] Morena S. Application of action camera video for fast and low-cost photogrammetric survey of cultural heritage. *ISPRS Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*. 2022;XLVIII-2/W1-2022:177–184. Available from: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-177-2022>.
- [19] Arévalo-Verjel AN, Lerma JL, Prieto JF, Carbonell-Rivera JP, Fernández J. Estimation of the block adjustment error in UAV photogrammetric flights in flat areas. *Remote Sens*. 2022;14(12):2877. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs14122877>.
- [20] Liu X, Lian X, Yang W, Wang F, Han Y, Zhang Y. Accuracy assessment of a UAV direct georeferencing method and impact of the configuration of ground control points. *Drones*. 2022;6(2):30. Available from: <https://doi.org/10.3390/drones6020030>.
- [21] Milan A, Shafiei M. Evaluation of the videogrammetry method for calculating the volume of earthworks in comparison with the conventional methods of land surveying. *Journal of Engineering Geology* 2023; 17 (2) :204-227 URL: <http://jeg.khu.ac.ir/article-1-3079-fa.html>.
- [22] Milan A, Shafiei M. Evaluation of the Stability of Internal Camera Parameters of Smartphones in Videogrammetry for Earthwork Volume Calculation.
- [23] DXO. Smartphones versus cameras: Closing the gap on image quality. 2020. Available from: <https://www.dxomark.com/smartphones-vs-cameras-closing-the-gap-on-image-quality/>.
- [24] Alsubaie NM, Youssef AA, El-Sheimy N. Improving the accuracy of direct geo-referencing of smartphone-based mobile mapping systems using relative orientation and scene geometric constraints. *Sensors*. 2017;17(10):2237. Available from: <https://doi.org/10.3390/s17102237>.
- [25] Tavani S, Granado P, Riccardi U, Seers T, Corradetti A. Terrestrial SfM-MVS photogrammetry from smartphone sensors. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107318>
- [26] Jaud M, Bertin S, Beauverger M, Augereau E, Delacourt C. RTK GNSS-assisted terrestrial SfM photogrammetry without GCP: Application to coastal morphodynamics monitoring. *Remote Sens*. 2020;12(11):1889. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs12111889>.

ماهواره‌ای راداری و ارزیابی قابلیت‌های تلفن هوشمند به عنوان ابزار جمع‌آوری اطلاعات در فتوگرامتری برد کوتاه است.

**Shafiei, M., M.Sc. Student in Photogrammetry, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran**

✉ meh.shafiei@Mail.sbu.ac.ir



**اصغر میلان** استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در رشته مهندسی نقشه‌برداری- فتوگرامتری می باشد. ایشان تا

کنون موفق به چاپ مقالات متعدد در مجلات و کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی معتبر شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، کاداستر و پردازش تصاویر می باشد.

**Milan, A. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran**

✉ a\_milan@sbu.ac.ir



**علیرضا وفائی‌نژاد** دانشیار مهندسی عمران گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، رشته مهندسی عمران گرایش نقشه‌برداری

است. ایشان تا کنون موفق به چاپ مقالات متعدد در مجلات و کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی معتبر شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: سیستم اطلاعات مکانی، سیستم‌های اطلاعات مکانی هوشمند، یادگیری ماشین و کاربردهای سیستم‌های اطلاعات مکانی در مدیریت منابع و محیط زیست است.

**Vafaeinejad, A. Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran**

✉ a\_vafaei@sbu.ac.ir

[38] Sharma, Himanshu, Bochkati, Mohamed, Lightenberger, Christian, Pany, Thomas, Darugna, Francesco, and Wubben, Jannes B. "Smartphone-Based GNSS 67 Positioning – Today and Tomorrow." Inside GNSS - Global Navigation Satellite Systems Engineering, Policy, and Design (blog), September 21, 2021. <https://insidengnss.com/smartphone-based-gnss-positioning-today-and-tomorrow/>.

[39] Chaturvedi, Aditya. "Advantages of Dual-Frequency GNSS in Smartphones." Geospatial World (blog), November 7, 2019. <https://www.geospatialworld.net/blogs/advantages-of-dual-frequencygnss-in-smartphones/>.

[40] Merry, Krista, and Pete Bettinger. "Smartphone GPS Accuracy Study in an Urban Environment." PLOS ONE 14, no. 7 (July 18, 2019): e0219890. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219890>.

[41] Nowak, Maciej M., Katarzyna Dziób, Łukasz Ludwisiak, and Julian Chmiel. "Mobile GIS Applications for Environmental Field Surveys: A State of the Art." Global Ecology and Conservation 23 (September 2020): e01089. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01089>.

[42] Groves P. (2011). Shadow Matching: A New GNSS Positioning Technique for Urban Canyons, 417–430. <https://doi.org/10.1017/S0373463311000087>.

[43] Tomaščík, Julián, Juliána Chudá, Daniel Tunák, František Chudý, and Miroslav Kardoš. "Advances in Smartphone Positioning in Forests: Dual-Frequency Receivers and Raw GNSS Data." Forestry: An International Journal of Forest Research 94, no. 2 (March 4, 2021): 292–310. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa032>.

## معرفی نویسندگان

### AUTHOR(S) BIOSKETCHES



**مهران شفیی** فارغ‌التحصیل رشته مهندسی نقشه‌برداری از دانشگاه یاسوج در سال ۱۳۹۳ است و در حال حاضر در مقطع کارشناسی ارشد فتوگرامتری در دانشگاه شهید بهشتی مشغول به تحصیل است. وی دارای سوابق پژوهشی در زمینه پایش و اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با استفاده از تصاویر

**Citation (Vancouver):** Milan A. [Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 201-218

doi <https://doi.org/10.22061/jrsg.2025.11753.1096>



### 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/>)