

بررسی درجه پایداری پارامترهای داخلی دوربین گوشی‌های هوشمند در روش ویدئوگرامتری برای محاسبه حجم عملیات خاکی

مهران شفیعی^۱، اصغر میلان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه

شهید بهشتی تهران

meh.shafiei@Mail.sbu.ac.ir

^۲ استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران

a_milan@sbu.ac.ir

(دریافت: تیر ۱۴۰۳، تصویب: دی ۱۴۰۳)

چکیده

هدف از برآورد حجم عملیات خاکی در مطالعات مهندسی مانند پروژه‌های راه‌سازی و راه‌آهن، معدن‌کاری، پروژه‌های صنعتی و ساختمانی رسیدن به دقت‌های مورد نظر، هزینه و زمان بهینه انجام کار می‌باشد. امروزه با توسعه تکنولوژی، ارتقاء قدرت محاسباتی کامپیوترها و ارائه نرم‌افزارها با کاربری آسان و در دسترس، گرایش به جایگزینی ابزار ارزان قیمت مانند تلفن‌های هوشمند، با تجهیزات گران قیمت و تخصصی برای مدل‌سازی سه بعدی افزایش یافته است. لذا ضرورت دارد تا این ابزارها بر اساس معیارهای علمی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند. به همین علت در این مطالعه قابلیت‌های دوربین تلفن هوشمند به عنوان ابزار جمع‌آوری داده مورد بررسی گرفته است. برای بررسی ثبات پارامترهای توجیه داخلی ابتدا دوربین ده گوشی هوشمند، سه مرتبه در یک بازه زمانی چهارده روزه با استفاده از روش صفحه شطرنجی و خطوط شاقولی کالیبره شدند. نتایج نشان دهنده تغییرات پیوسته در مقادیر پارامترهای داخلی آنها بود. برای بررسی اینکه ناپایداری ناشی از ضعف روش کالیبراسیون، هندسه تصویربرداری و یا ساختار دوربین تلفن هوشمند است پایدارترین آن انتخاب و مجدداً دو مرتبه پشت‌سر هم کالیبره و در ادامه نتایج آن مورد استفاده قرار گرفت. اجرای فرآیند تعریف شده بر روی دو نمونه بتنی با شکل منظم و یک نمونه شنی با شکل نامنظم در مقیاس کوچک که حجم آنها به‌طور دقیق از قبل با روش‌های آزمایشگاهی تعیین شده بود، انجام گرفت. حجم نمونه‌ها با روش ویدئوگرامتری و انجام پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون برآورد شد. اثر دقت دو روش پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون در برآورد احجام در مقیاس آزمایشگاهی بسیار اندک بود و نتایج دارای اختلاف حداقل ۱/۲۸٪ و حداکثر ۲/۹۸٪ با حجم واقعی نمونه‌ها بودند. در بررسی پایانی، مطالعه بر روی یک دیو ماسه در مقیاس کارگاهی با ابعاد تقریبی ۱۶×۱۱×۳/۵۰ متر انجام شد. تعداد بیست نقطه زمینی در اطراف عارضه با استفاده از نشانگرهای کددار تعریف و مختصات مرکز آنها به‌وسیله توتال‌استیشن برداشت گردید. حجم دیو ماسه نیز به‌وسیله توتال‌استیشن برای انجام مقایسه نسبی برآورد شد. حداکثر خطای ریشه میانگین مربعات نقاط چک، برابر ۱۸/۱۲ و ۴/۷۰ میلی‌متر و طول شاخص به ترتیب با خطای ۸ و ۳ میلی‌متر در حالت‌های پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون اندازه‌گیری شد. در هر دو حالت، مدل‌هایی با توزیع یکنواخت و تراکم بالای نقاط به دست آمد که به ترتیب دارای اختلاف ۵/۸٪ و ۱٪ در حالت‌های پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون نسبت به حجم برآورد شده با روش توتال‌استیشن بودند.

واژگان کلیدی: خودکالیبراسیون، تلفن هوشمند، ساختار ناشی از حرکت، پیش‌کالیبراسیون، مدل سه بعدی

۱- مقدمه

عملیات خاکی فرآیند خاکبرداری و خاکریزی بخشی از سطح زمین، به‌منظور آماده‌سازی محل برای اجرای پروژه‌های مختلف عمرانی و معدنی است. هدف از عملیات خاکی به سازه در حال اجرا بستگی دارد و به‌عنوان یکی از مراحل مهم و پر هزینه در پروژه‌های راه‌سازی و راه‌آهن، معدنکاری، صنعتی و ساختمانی در نظر گرفته می‌شود، بنابراین داشتن برآوردی دقیق از حجم عملیات خاکی به دلیل بار مالی آن برکسی پوشیده نیست [۱،۲]. پایه و اساس محاسبات حجم، جمع‌آوری نقاط با توزیع و تراکم مناسب از منطقه مورد مطالعه است و بسته به نوع، وسعت و دقت مورد نیاز پروژه روش‌های گوناگونی مانند برداشت کلاسیک با توتال‌استیشن، DGPS، لیزر اسکن زمینی، تصویربرداری با پهپاد و یا دوربین عکاسی بصورت زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند.

پیشرفت تکنولوژی در دهه‌های اخیر با ایجاد تحول اساسی در فناوری‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری علم نقشه‌برداری، مطالعات مهندسی را آسان‌تر و سریع‌تر کرده است به‌طوری که روش‌های اندازه‌گیری ژئودتیک مورد استفاده برای جمع‌آوری داده‌های توپوگرافی به تدریج با اندازه‌گیری‌های فتوگرامتری و لیزری خودکار جایگزین شده‌اند و در حال حاضر اسکن لیزری زمینی^۱ و هوابرد^۲ و فتوگرامتری هوایی و برد کوتاه در مقیاس بزرگ و کوچک برای جمع‌آوری این نوع داده‌ها استفاده می‌شوند. در بسیاری از موارد مانند مناطق صعب‌العبور با دسترسی دشوار و خطرناک و یا سطوح پیچیده از نظر توپوگرافی و معادن، بهتر است جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از تکنیک‌های فتوگرامتری و سنجش از دور انجام شود. در این میان لیزر اسکنرهای زمینی قابلیت برداشت نقاط با دقت و تراکم بالا را دارند اما استفاده از این ابزار در محدوده‌های دارای توپوگرافی شدید و یا مناطق کوچک به دلیل نیاز به جابه‌جایی و استقرار مکرر و هزینه بالای تأمین دستگاه مقرون به صرفه نمی‌باشد. داده‌های لیدار هوایی نیز مستلزم سرمایه‌گذاری مالی و نیروی متخصص است، این روش محدودیت‌های فیزیکی برداشت نقاط با دقت بالا در محدوده‌های بسیار بزرگ را مرتفع نموده، اما با توجه به ماهیت آن قابلیت استفاده در مقیاس‌های

کوچک و کارگاهی را ندارد [۳]. از دیگر روش‌های برآورد احجام خاکی، فتوگرامتری است که در آن اطلاعات سه بعدی عارضه از تصاویر دو بعدی استخراج می‌شود این تکنیک در مقایسه با روش‌های کلاسیک زمینی بسیار کارآمد بوده و ضمن کاهش زمان مورد نیاز برای جمع‌آوری داده‌ها امکان انجام اندازه‌گیری‌های دقیق را بدون نیاز به تماس مستقیم با عارضه فراهم می‌نماید [۴]. در این میان دو محرک اصلی باعث تحول و میل به فتوگرامتری برد کوتاه زمینی شده‌است: اول، توسعه و پیشرفت چشمگیر و در دسترس بودن سخت افزارهایی نظیر دوربین‌های دیجیتال، سکوها، کامپیوترها که امکان جمع‌آوری اطلاعات را برای محققان با بودجه بسیار کم فراهم کرده است. در سال ۲۰۰۵ تعداد بسیار کمی از تلفن‌های هوشمند دارای دوربین داخلی بودند اما پس از گذشت پنج سال مردم دیگر نمی‌توانستند تلفن‌های خود را بدون آنها تصور کنند. پیشرفت مداوم قابلیت‌های تلفن هوشمند منجر به تولید نسل جدیدی از این دستگاه‌ها شده‌است که مجهز به دوربین دیجیتال، گیرنده GNSS، قطب‌نما، شتاب‌سنج، اتصال به اینترنت و ... هستند به همین دلیل اصطلاحاً تلفن هوشمند^۳ نامیده می‌شوند. دوربین دوگانه سال ۲۰۱۶ با آیفون ۷ پلاس اپل وارد دنیای گوشی‌های هوشمند شد. در کنار گزینه نمایش عمق با وضوح بالاتر با استفاده از دو یا چند دوربین، لنزهایی با فاصله کانونی دو برابر در مقایسه با لنزهای استاندارد با زاویه دید باز منتشر شدند. در سال‌های اخیر دوربین‌های با فاصله کانونی بزرگتر و با زاویه منظر خیلی باز وارد بازار شده‌اند و می‌توانند به‌طور پیوسته و با درون‌یابی، تصاویر عارضه را در حالت زوم قرار دهند. طراحی اپتومکانیکی و فناوری ساخت لنزهای گوشی هوشمند با لنزهای عکاسی کلاسیک بسیار متفاوت است. استفاده از لنزهای پلاستیکی غیر کروی کوچک سازی شده را به سختی می‌توان با لنزهای اپتیک کلاسیک مقایسه کرد. ساختار سیستم نوری تا حد زیادی توسط کوچک سازی مورد نیاز تعیین می‌شود. دوربین تلفن هوشمند باید در یک محفظه مسطح با ضخامت حدود ۸-۹ میلی‌متر قرار گیرد. با کم کردن ضخامت محفظه و حسگر تصویر، طول کلی لنز نباید بیشتر از ۵-۶ میلی‌متر باشد. پیکسل‌های کوچک نسبت به پیکسل‌های بزرگتر حساسیت کمتری به نور دارند در نتیجه، دوربین گوشی‌های هوشمند،

نسبت سیگنال به نویز کمتری دارند. علاوه بر این، مقدار ظرفیت کامل پیکسل‌های بسیار کوچک اندک است که محدوده دینامیکی را کاهش می‌دهد. در عین حال دیافراگم لنز باید نسبتاً بزرگ باشد حدود $f/2$ یا بزرگتر، به‌طوری که وضوح سیستم با اندازه پیکسل‌های تصویر حدود ۱ میکرومتر محدود نشود. در مقایسه با دوربین‌های Digital Single Line Reflex (DSLR) این معایب بسیار قابل توجه هستند [۵]. در نهایت نسل جدید تلفن‌های همراه با فائق آمدن بر مشکلات فوق و با استفاده از دوربین‌های چندگانه، اتصال آنها با حسگر یکپارچه و فیلترهای پیشرفته پردازش تصاویر تضمین می‌کنند که کیفیت تصویر ارائه شده توسط دوربین گوشی هوشمند با دوربین‌های دیجیتال فول فریم مطابقت داشته باشد [۶].

دوم، تحقیقات قابل توجه در زمینه بینایی کامپیوتر^۱ که منجر به پیدایش الگوریتم‌های کاربردی پردازش تصاویر نظیر ساختار ناشی از حرکت^۲ شده‌است. این الگوریتم عملکرد و کارایی نرم‌افزارهای ساخت مدل سه بعدی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده است [۷، ۸، ۹]. امروزه گونه‌های مختلف نرم‌افزارهای پردازش تصاویر بصورت متن باز نظیر [۱۰] OpenCv [۱۱] OpenDroneMap، [۱۲] Meshroom و تجاری مانند [۱۳] Agi Soft، [۱۴] Photo Modeler و تحت وب مانند Microsoft Photosynth Autodesk 123D Catch Beta در دسترس هستند و امکان تولید مدل سه بعدی برای افراد با دانش محدود در فتوگرامتری را فراهم می‌کنند. با این حال در یک مطالعه فتوگرامتری، عدم درک صحیح از خطاها و منابع آنها نتایج را برای بسیاری از کاربردها غیرقابل استفاده خواهد کرد [۱۵].

فتوگرامتری با روش ساختار ناشی از حرکت تحت همان اصول اولیه فتوگرامتری استرئوسکوپی عمل می‌کند، یعنی ساختار سه بعدی را می‌توان به‌وسیله یک‌سری تصاویر رقومی دارای پوشش مشترک تشکیل داد. با این حال، دارای چند تفاوت اساسی با فتوگرامتری معمولی است. در این روش هندسه صحنه، موقعیت‌های دوربین و جهت‌گیری، به‌طور خودکار و بدون نیاز به شبکه‌ایی از نقاط کنترل زمینی که موقعیت آنها از قبل تعیین شده، حل می‌شود [۷، ۸]. موقعیت و وضعیت دوربین و هندسه صحنه به‌طور همزمان از طریق شناسایی خودکار ویژگی‌های یکسان در چندین تصویر

بازسازی می‌گردد. این ویژگی‌ها از تصویری به تصویر دیگر ردیابی شده و تخمین‌های اولیه موقعیت‌های دوربین و مختصات اشیاء را امکان‌پذیر می‌سازند و سپس با استفاده از روابط کمترین مربعات غیرخطی، به طور مکرر اصلاح می‌شوند [۱۶]. این روش برای ردیابی نقاط در تصاویر متوالی اخذ شده از موقعیت‌های مختلف و با درجه همپوشانی بالا مناسب است [۱۷].

در این روش عکس‌ها نه تنها با دوربین متریک اخذ نمی‌شوند، بلکه می‌توانند با دوربین‌های مختلف، از موقعیت‌های تصادفی و بدون طراحی اولیه اخذ شده باشند و حتی ویژگی‌های اساسی مانند قید فاصله کانونی دوربین ناشناخته باشند. امروزه با وجود استفاده از سرشکنی دسته اشعه^۳ در یک فرآیند تکراری، الگوریتم‌های پیشرفته استخراج خودکار نقاط گرهی و کلیدی و همچنین توسعه روش‌های خودکالیبراسیون^۴، روش SFM به ابزاری قدرتمند برای تولید مدل سه بعدی متریک تبدیل شده‌است. بنابراین می‌توان گفت SFM یک روند کاری است که از الگوریتم‌های متعدد توسعه یافته از قبیل بینایی کامپیوتر، فتوگرامتری سنتی و تکنیک‌های مرسوم‌تر استفاده می‌کند.

تکامل فتوگرامتری SFM در علوم زمین متفاوت است. مطالعات اولیه SFM بر اطلاعات توصیفی قابل استخراج از مدل‌نهایی تأکید داشت، درحالی که در کاربردهای مدرن بر دقت بازسازی تأکید دارد. وضوح عکس‌ها همراه با طیف وسیعی از بافت‌های صحنه طبیعی، در وهله اول کیفیت داده‌های ابر نقطه خروجی را تعیین می‌کند. به همین ترتیب، ثبات و دقت در برآورد پارامترهای توجیه داخلی، کاهش فاصله بین دوربین و ویژگی مورد نظر و در نتیجه افزایش وضوح فضایی عکس می‌تواند دقت متریک، تراکم فضایی و وضوح ابر نقطه نهایی را افزایش دهد. باید توجه داشت بدون انجام کالیبراسیون و برآورد دقیق خطاهای سیستماتیک، اندازه‌گیری دقیق بر روی مدل‌های سه بعدی حاصل امکان‌پذیر نخواهد بود [۱۸].

از میان روش‌های کالیبراسیون دو رویکرد رایج در فتوگرامتری برد کوتاه، روش پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون است. رویکرد اول کاملاً از مرحله عکسبرداری مجزا می‌باشد. ابتدا پارامترهای توجیه داخلی در آزمایشگاه تعیین و سپس در مراحل بعدی مورد استفاده قرار

^۳ Bundle Adjustment

^۴ Self-Calibration

^۱ Computer Vision

^۲ Structure From Motion-Multi View Stereo (SFM-MVS)

می‌گیرند. کالیبراسیون با مشاهده یک جسم کالیبراسیون (دو یا سه صفحه متعامد) انجام می‌شود که هندسه آن در فضای سه بعدی به‌طور دقیق معلوم است. با توجه به هزینه بالا، این روش معمولاً برای دوربین‌های هوایی متریکی به‌کار برده می‌شود چراکه این دوربین‌ها از پایداری کافی برخوردارند و می‌توان پارامترهای به‌دست آمده را در چندین پروژه بدون تغییر در نظر گرفت. نوع رایج‌تر پیش‌کالیبراسیون، کالیبراسیون با استفاده از صفحات دو بعدی است که در آن از یک الگوی مسطح دو بعدی در چند جهت مختلف عکسبرداری می‌شود. عکسبرداری می‌تواند بصورت صفحه ثابت و دوربین متحرک و یا برعکس انجام شود، اطلاعات مربوط به حرکت صفحه و یا دوربین مورد نیاز نمی‌باشد. با این حال در این روش لازم است تا الگوی کالیبراسیون از جهات مختلف (حداقل سه جهت) تصویربرداری شده و سپس کالیبراسیون به‌وسیله آنها انجام شود [۱۹،۲۰]. با توجه به خودکار بودن فرآیند کالیبراسیون، هیچ دلیلی وجود ندارد که افزودنی مشاهداتی قابل‌توجهی در فرآیند گنجانده نشود از این رو معمولاً از دوازده تصویر یا بیشتر استفاده می‌شود [۲۱].

در روش دوم پارامترهای توجیه داخلی همزمان با مجهولات دیگر در محاسبات سرشکنی برآورد می‌شوند. خودکالیبراسیون بدون نیاز به نقاط کنترل و تنها از طریق استحکام و اتصال هندسی تصاویر دارای پوشش مشترک انجام می‌شود. فرمول ریاضی مورد استفاده در این روش، همان روابط شرط هم خطی است که پارامترهای اعوجاجات نیز به آن افزوده شده و در معادله (۱) نمایش داده شده‌است. به این معادلات می‌توان پارامترهای اضافی^۱ نیز افزود که ضرایب آنها قابل محاسبه در باندل اجسمنت می‌باشد. برای انجام خودکالیبراسیون موفق وجود موارد زیر ضروری است:

- ۱- یک شیء بایستی حداقل در سه تصویر اخذ شده توسط یک دوربین منفرد وجود داشته باشد. ۲- هندسه داخلی دوربین و نقطه‌ای که روی شیء اندازه‌گیری می‌شود باید در حین فرآیند مشاهده پایدار و ثابت باقی بماند. ۳- شبکه فتوگرامتری باید دارای همگرایی بالا و استحکام کافی باشد.
- ۴- جمع‌آوری تصاویر تحت زوایای متنوع دوربین. ۵- نقاط از توزیع و تراکم مناسبی برخوردار باشند [۲۲].

$$\begin{pmatrix} x-x_p+\Delta x \\ y-y_p+\Delta y \\ -c \end{pmatrix} = \lambda R \begin{pmatrix} x-x^c \\ y-y^c \\ z-z^c \end{pmatrix} \quad (1)$$

X^c, Y^c, Z^c موقعیت مرکز پرسپکتیو دوربین در فضای شیء، X, Y, Z مختصات نقطه در فضای شیء، x, y مختصات تصویری نقطه، R ماتریس دوران، x_p, y_p مختصات مرکز تصویر، c فاصله کانونی، λ مقیاس و $\Delta x, \Delta y$ تصحیحات اعوجاج تصویر که نحوه محاسبه آن در معادله (۲) نمایش داده شده‌است [۲۳].

$$\begin{aligned} x_p + \Delta x &= -\frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x}r^2 K_1 + \bar{x}r^4 K_2 + \bar{x}r^6 K_3 \\ &+ (2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + 2P_2\bar{x}\bar{y} + b_1\bar{x} + b_2\bar{y} \\ y_p + \Delta y &= -\frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y}r^2 K_1 + \bar{y}r^4 K_2 \\ &+ \bar{y}r^6 K_3 + 2P_1\bar{x}\bar{y} + (2\bar{y}^2 + r^2)P_2 \\ r^2 &= \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

r فاصله شعاعی تا مرکز تصویر، Δc میزان تصحیح فاصله کانونی، K_i ضرائب اعوجاج شعاعی، P_i ضرائب اعوجاج مماسی، b_1, b_2 ضرائب تصحیح عدم تعامد محورها و یکسان نبون مقیاس در دو جهت x_p, y_p ، x, y مختصات مرکز تصویر

۲- پیشینه تحقیق

امروزه بیش از نیمی از جمعیت جهان دارای تلفن همراهی هستند که بدون آن تقریباً هیچ‌جایی نمی‌روند [۲۴]. با توسعه بکارگیری تلفن‌های همراه، ارتقاء قدرت محاسباتی کامپیوترها و ارائه نرم‌افزارها با کاربری آسان و در دسترس گرایش به جایگزینی آنها با تجهیزات گران قیمت و تخصصی (دوربین‌های DSLR، اسکنرهای لیزری و ...) برای مدل‌سازی سه بعدی افزایش یافته است. تا حد زیادی رایج‌ترین حوزه‌ای که در آن از تلفن‌های هوشمند استفاده می‌شوند، مستندسازی اشیاء میراث فرهنگی است. برپایی نمایشگاه و موزه‌های مجازی با استفاده از مدل دیجیتال آثار هنری و باستانی [۲۵،۲۶]، ثبت اکتشافات در مناطق دور افتاده [۲۷]، رقومی کردن اسناد، کتیبه و کاشی‌کاری‌های تاریخی [۲۸،۲۹]، مدل‌سازی بناهای تاریخی گمشده [۳۰] و مرمت آنها [۳۱] از جمله این کاربردها هستند. در کاربردهای صنعتی و ساختمانی می‌توان به مطالعه با موضوع ساخت و نگهداری لوله‌ها، کابل‌ها و سایر تأسیسات مخفی زیرزمینی [۳۲] و تحقیق با هدف پایش تغییر شکل خطوط انتقال گاز

[۳۳] و همچنین مطالعه در مورد نظارت بر پیشرفت مراحل آرماتوربندی ساختمان [۳۴] اشاره کرد. استفاده از پهباد فتوگرامتری [۳۵،۳۶] و دوربین‌های دیجیتال [۳۷] در محاسبات احجام معدنی و غیر معدنی مانند دیوی ورودی و خروجی یک کارخانه صنعتی به عنوان یک روش نوین پذیرفته شده و تقریباً جایگزین روش‌های کلاسیک نقشه‌برداری زمینی شده‌است. هر چند در این روش نیز همانند روش زمینی، رعایت اصول نقشه‌برداری و برخورداری از دانش فتوگرامتری، مهارت استفاده از ابزار و تسلط بر پردازش دقیق و در نهایت کنترل خروجی و صحت‌سنجی و اندازه‌گیری حدود خطای ایجاد شده در محاسبات ضروری است با این حال محاسبه احجام با استفاد از تلفن هوشمند همچنان موضوعی جدید بوده و مطالعات اندکی در مقیاس آزمایشگاهی در این زمینه توسط محققین انجام شده‌است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

علی کرمی و همکارانش سال ۲۰۱۵ در پژوهشی با هدف ارائه روشی نوین در برآورد احجام عملیات خاکی به مطالعه بر روی یک پشته خاک و گودال به ارتفاع و عمق تقریبی دو متر پرداختند [۳۸]. آنها مدل رقومی پشته خاک و گودال را از طریق اندازه‌گیری‌های انجام شده با یک دستگاه تلفن هوشمند HTC one m7 و توتال‌استیشن تولید کردند. داده‌های ورودی فتوگرامتری متشکل از سی عکس گودال و بیست عکس پشته خاک، اخذ شده تحت زوایای مختلف بوده و برای حل مسئله مقیاس از میله آهنی با طول معلوم استفاده شده‌است. در این تحقیق حجم واقعی پشته خاک 0.25 ± 6 مترمکعب ذکر و به عنوان مبنا برای مقایسه دقت روش نقشه‌برداری زمینی و فتوگرامتری قرار گرفته اما در مورد نحوه برآورد این عدد توضیحی داده نشده است و در مورد عارضه گودال حجم برآورد شده با هر دو روش مستقیماً با یکدیگر مقایسه شده‌اند. آنها در نهایت با استفاده از روش پیشنهادی خود (موبایل‌گرافی و تهیه خروجی از نرم افزار Agisoft و محاسبه حجم در نرم افزار CVIL 3D) احجام $6/40$ و $148/89$ مترمکعب را به ترتیب برای پشته خاک و گودال به دست آورده‌اند در حالی که از طریق نقشه‌برداری زمینی مقادیر $7/20$ و $151/10$ متر مکعب را برآورد کرده‌اند. رافائل وروزنسکی^۱ و همکارانش سال ۲۰۱۷ با هدف امکان سنجی استفاده از ویدئوگرامتری با تلفن هوشمند آزمایشی

طراحی کردند [۳۹]. آنها ابتدا مدل رقومی خاکریزی، در مقیاس آزمایشگاهی و با حجم معلوم را از طریق دو اندازه‌گیری مستقل انجام شده به وسیله تلفن هوشمند iPhone 5 و دوربین دیجیتال Canon G9 تولید کردند. در تمام روند تحقیق داده‌های ورودی از فریم‌های ویدئویی تهیه شده‌است. برای تحلیل و مقایسه تراکم ابر نقاط، مدل‌های تولید شده با هر دو دستگاه را در نرم افزار Cloud Compare بارگذاری و تفاوت معنی داری بین مدل‌های تولید شده با دو دستگاه مختلف مشاهده نکرده‌اند همچنین اختلاف حجم مدل‌ها با حجم واقعی 0.7% و 2% بوده است. پس از تأیید موفقیت آمیز آزمایشگاهی اندازه‌گیری‌های میدانی روی تپه‌ای خاکی به همین ترتیب انجام، و مدل تولید شده با دوربین Canon G9 به عنوان مبنای مقایسه قرار گرفته است. آنها هنگام ساخت مدل از داده‌های به دست آمده با گوشی هوشمند، مشاهده کردند یک سری فریم تقریباً معادل 14% از کل فریم‌ها رد شده‌اند، فریم‌های از دست رفته باعث تراکم کمتر ابر نقطه در آن محل شده و در نتیجه حجم مدل با حجم به دست آمده با دوربین دیجیتال 7% تفاوت داشته است. آنها به منظور افزایش تراکم نقاط، نرخ استخراج فریم در محلی که فریم‌ها رد شده بودند را افزایش داده و یک مدل با توزیع یکنواخت تراکم ابر نقطه‌ای به دست آوردند و در نهایت به تفاوت $1/5\%$ بین حجم خاک محاسبه شده از فیلم ضبط شده توسط دوربین دیجیتال و تلفن هوشمند دست یافتند.

هوثام ال دین فاووزی^۲ سال ۲۰۱۹ با طراحی چند آزمایش به بررسی دقت هندسی موبایل‌گرافی در نرم افزار Photo modeler پرداخت [۴۰]. ابزار مورد استفاده در این تحقیق تلفن هوشمند Microsoft Lumia 640 XL، و توتال‌استیشن Sokkia SET330RK بوده است. او ابتدا کاغذ A4 سفید را روی دیوار با زمینه سیاه چسبانده و پس از عکسبرداری از فاصله مشخص نسبت به تعیین اندازه سنسور دوربین بصورت دستی و مقایسه آن با خروجی نرم افزار Photo modeler اقدام نمود. در آزمایش دوم شش تارگت کددار با فاصله مشخص بر روی دیوار نصب و چهار شاخص مدرج در جهات مختلف با هدف تعیین دقت اندازه‌گیری طول قرار داده و عکسبرداری انجام شده‌است. هدف از آزمایش سوم تعیین حجم مقداری ماسه بوده که حجم دقیق آن از قبل و با استفاده از ظرف مدرج تعیین شده بود. وی تعدادی تارگت کددار در کنار ماسه ریخته شده روی سطح افقی، قرار داده و سپس اقدام به

عکسبرداری از عارضه با هدف تعیین دقت برآورد حجم کرده است. او در آزمایش چهارم به منظور برآورد دقت نرم افزار در تعیین مختصات سه بعدی نقاط، تعدادی تارگت در موقعیت های متفاوت قرار داده و پس از برداشت مختصات سه بعدی آنها از طریق توتال استیشن فرآیند عکسبرداری را آغاز کرد. او در پایان نتایج حاصل را بدین شرح گزارش کرده است: در آزمایش اول ابعاد حسگر دوربین توسط نرم افزار با دقت $2/86\%$ تخمین زده شد. در آزمایش دوم پس از تولید مدل سه بعدی طول های مشخص با خطای $1/77\%$ قرائت شدند. در آزمایش سوم حجم واقعی نمونه خاک 435 سانتی متر مکعب بوده که با استفاده از موبایل گرافی $455/726$ سانتی متر مکعب تخمین زده شده و نشان دهنده خطای حدود $4/7\%$ بوده است. در آزمایش چهارم از طریق مقایسه مختصات های قرائت شده به وسیله توتال استیشن و موبایل گرافی میزان خطا در هر سه جهت را برابر $rx=0/01315351$ و $ry=0/000938336$ و $rz=0/000825856$ متر محاسبه کرده است.

وحیب صیف^۱ و ادل الشیبانی^۲ سال ۲۰۲۲ در مطالعه ای قابلیت تلفن هوشمند را به عنوان ابزار جمع آوری داده های فتوگرامتری برد کوتاه در مقایسه با دوربین رقومی ارزیابی کرده اند [۴۱]. در این آزمایش از یک دستگاه تلفن هوشمند Huawei Mate 10 lite، دوربین Nikon-D 3300 و نرم افزار Agisoft برای ساخت مدل سه بعدی دو نمونه بتنی با اشکال منظم (تیر و استوانه) و مقداری شن با شکل نامنظم (تمام نمونه ها در مقیاس آزمایشگاهی) استفاده شده است. مدل های سه بعدی حاصله بر اساس معیارهای مختلفی نظیر چگالی ابر نقاط غیرمتراکم و متراکم، نویز ابر نقاط، بافت، و در نهایت دقت برآورد اندازه گیری های هندسی (مساحت و حجم) مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج نشان دهنده این بوده است که داده های گوشی هوشمند اعوجاج لنز بالاتر، RMSE بالاتر در بازسازی سه بعدی نقاط، سطح نویز بالاتر در ابر نقطه غیرمتراکم، چگالی پائین تر ابر نقاط متراکم و همچنین کیفیت بافت پائین تر در مقایسه با دوربین رقومی داشته است. در نهایت آنها دریافتند هر دو دستگاه برآورد هندسی دقیقی را ممکن ساخته و خطای تخمین حجم را $0/37\%$ تا $2/33\%$ برای دوربین رقومی و $0/67\%$ تا $3/19\%$ برای تلفن هوشمند برآورد کرده اند.

الویس ها هنگ سیونگ^۳ و همکارانش سال ۲۰۲۲ در مطالعه ای با هدف بررسی قابلیت دوربین تلفن هوشمند در برآورد احجام به تهیه مدل سه بعدی دو دیو خاک در مقیاس واقعی از طریق روش موبایل گرافی و لیزر اسکن زمینی پرداخته اند [۴۲]. در این آزمایش از تلفن هوشمند Honor View 20 به عنوان ابزار جمع آوری داده فتوگرامتری، نرم افزار Agisoft و لیزر اسکن زمینی Leica RTC360 استفاده و مدل تولید شده به وسیله لیزر اسکن زمینی مبنا مقایسه نتایج بوده است. ابر نقاط، اندازه اشیاء موجود در مدل و حجم برآورد شده از هر دو روش با یکدیگر مقایسه شده اند. آنها برای کنترل نتایج از اشیاء با ابعاد مشخص موجود در هر دو مدل و RMSE خطا استفاده کرده اند. تقریباً تمام ابعاد اندازه گیری شده از ابر نقطه مبتنی بر گوشی هوشمند $3/30\%$ بیشتر از ابر نقطه تولید شده با روش لیزر اسکن زمینی بوده و همچنین نتیجه RMSE به دست آمده در این تحقیق $0/310$ متر بوده است. این نتایج با خروجی برآورد احجام مطابقت داشته است. آنها از اختلاف $31/76\%$ بین حجم محاسبه شده از طریق موبایل گرافی و لیزر اسکن زمینی نتیجه گرفته اند که استفاده از تلفن هوشمند برای وارد شدن به صنعت واقعی در بحث برآورد احجام مناسب نمی باشد.

سال ۲۰۲۳، وحیب صیف و ادل شیبانی در مطالعه ای به بررسی عملکرد و هزینه ها در یک پروژه خاکبرداری با استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه زمینی پرداختند [۴۳]. در این تحقیق، از دوربین Nikon D3300 در مرحله جمع آوری داده و نشانگرهای^۴ کددار برای حل مسئله مقیاس استفاده شده است. تصاویر مورد استفاده از سطح اولیه دیو و بلافاصله پس از چهار مرحله بارگیری اخذ شده اند. این تصاویر به مجموعه ای شامل پنج ابر نقطه متراکم پردازش، و هر یک به عنوان گزارشی از پیشرفت پروژه در نظر گرفته شده که میزان کار باقی مانده را نشان می دهد و از تفاوت حجمی بین هر دو گزارش متوالی، مقدار خاک حمل شده را محاسبه کرده اند. از آنجا که تصاویر هر مجموعه بلافاصله پس از هر بارگیری گرفته شده بودند، زمان ثبت اولین تصویر در هر مجموعه داده برای تخمین زمان چرخه بارگیری، با استفاده از داده های Exif تصاویر استخراج شده است. نتایج نشان داده حجم مواد باقی مانده معادل $109/28$ متر مکعب است. بهره وری خدمه به عنوان میانگین نرخ تولید در چهار گزارش

^۳ Elvis Ha Heng Siong

^۴ Target

^۱ Wahib Saif

^۲ Adel Alshibani

متوالی محاسبه و مقدار آن برابر $20/18$ متر مکعب در ساعت بوده، بر این اساس، زمان تخمینی لازم برای حمل مواد باقی مانده $5/42$ ساعت برآورد شده است. آنها در نهایت هزینه پروژه را با در نظر گرفتن نرخ هزینه هر ساعت کارکرد ماشین آلات مورد نیاز برآورد کرده اند.

بessin^۱ و همکاران سال ۲۰۲۳، مطالعه ای را به منظور بررسی میزان ریزش دیواره صخره ساحلی ناواجیو^۲ در یونان با بهره گیری از روش های مختلف فتوگرامتری شامل ساختار ناشی از حرکت به وسیله گوشی های هوشمند و قایق در حال حرکت، پهپاد فتوگرامتری، و تصاویر ماهواره ای انجام دادند [۴۴]. در این مطالعه، از تصاویر با برچسب جغرافیایی^۳ ثبت شده توسط سه گوشی هوشمند Wiko V680، Samsung G930F، و Xiaomi A2، تصاویر پهپاد DJI Phantom 4 Pro RTK مجهز به سنسور CMOS با رزولوشن ۲۰ مگاپیکسل، و همچنین سه تصویر ماهواره ای Pléiades با فاصله نمونه برداری زمینی^۴ معادل $0/70$ متر در حالت پانکروماتیک استفاده شده است. پردازش های مربوط به بازسازی و تولید مدل های سه بعدی در نرم افزار Agisoft انجام شده و مقایسه ابرنقاط تولید شده نیز در نرم افزار CloudCompare صورت گرفته است. محدوده مطالعه شامل 11200 متر خط ساحلی با ارتفاع 400 متر بوده و تصویربرداری روی قایق در دو مسیر با فواصل متفاوت (مسیر رفت در فاصله 50 تا 200 متر و مسیر برگشت در فاصله 400 تا 500 متر از دیواره صخره، با پوشش طولی 80 درصد) انجام شده است. با توجه به تفاوت در دقت ارجاع جغرافیایی^۵ هر سه روش، آنها ابتدا مدل های تولید شده را هم مرجع کرده و سپس مقایسه نسبی بین آنها را انجام دادند. نتایج نشان داد تراکم ابرنقاط مدل تولید شده با استفاده از گوشی های هوشمند تقریباً معادل تراکم مدل تولید شده توسط پهپاد بوده و حدود 200 برابر تراکم مدل حاصل از تصاویر ماهواره ای است. با این حال، به دلیل عدم استفاده از نقاط کنترل زمینی، مدل گوشی هوشمند دارای اختلاف 2 متر در راستای محور X و 6 تا 8 متر در راستای محور Z در مقایسه با مدل تولید شده توسط پهپاد بوده است.

فوتیس پاتونیس در سال ۲۰۲۴ قابلیت های دوربین تلفن های هوشمند را به عنوان ابزار جمع آوری داده برای

اندازه گیری های سه بعدی در فتوگرامتری برد کوتاه ارزیابی کرده است [۴۵]. در این پژوهش، ۱۰ تلفن هوشمند از برندهای مختلف، نرم افزار Surveyor-Photogrammetry نسخه $6/1$ و روش باندل اجستمنت استفاده شده است و ارزیابی 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 ویژگی های فنی دوربین ها را تحلیل کرده است. او نمای یک ساختمان را به عنوان موضوع انتخاب کرده و با هر تلفن سه عکس همگرا با میانگین فاصله عکسبرداری 11 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 21 نقطه روی نمای ساختمان با استفاده از توتال استیشن و با دقت 2 میلی متر تعیین، و 10 نقطه به عنوان نقاط کنترل و 11 نقطه دیگر به عنوان نقاط چک استفاده شده است. RMSE بین مختصات نقاط چک برآورد شده با روش توتال استیشن 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 به عنوان پارامترهای مجهول و بار دوم ضرایب اعوجاج را به این پارامترها اضافه کرده است. نتایج نشان داده اند که میانگین RMSE در محورهای X و Y بدون اضافه کردن پارامترهای اعوجاج بین $1/3$ تا $1/4$ سانتی متر و در حالت اضافه کردن این پارامترها حدود $0/7$ سانتی متر بوده است. در محور Z، میانگین RMSE بدون پارامترهای اعوجاج $1/6$ سانتی متر و با آنها $1/1$ سانتی متر گزارش شده است. در نهایت، میانگین RMSE در مختصات دوبعدی، بدون اعمال پارامترهای اعوجاج 2 سانتی متر و با اعمال آنها $1/1$ سانتی متر برآورد و بهبودی 45 درصدی را نشان داده است. اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه محاسبه احجام عملیات خاکی به وسیله تلفن هوشمند در مقیاس آزمایشگاهی صورت گرفته و همچنین لازم به ذکر است با وجود استفاده فراوان از دوربین گوشی های هوشمند برای مدل سازی سه بعدی در حوزه های مختلف، در اندک مواردی پیش کالیبراسیون دوربین انجام شده و رایج ترین راه حل در

۴ Ground Sampling Distance

۵ Georeference

۱ Bessin

۲ Navagio

۳ Geo-Tagging

اکثر تحقیقات، خودکالیبراسیون بوده است. لذا هدف از انجام این تحقیق در ابتدا بررسی درجه پایداری پارامترهای داخلی دوربین گوشی های هوشمند می باشد و در ادامه با طراحی یکسری آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی و کارگاهی دقت هندسی مدل های سه بعدی تولید شده به وسیله تلفن هوشمند، بررسی شد تا با شناسایی نقاط ضعف و قوت آنها به پاسخی قاطع برای امکان و یا عدم امکان استفاده از تلفن هوشمند در پروژه های بزرگ دست یابیم.

۳- مواد و روش ها

۳-۱- داده های مورد استفاده

داده های این تحقیق شامل نقاط برداشت شده با توتال استیشن Leica TS09 R1000 در حالت بدون منشور و تلفن هوشمند Samsung Galaxy A51 به عنوان ابزار اصلی تحقیق است. مشخصات فنی آن بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط سازنده در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات تلفن Samsung Galaxy A51	
لنز عریض (اصلی)	- 48 MP
	- دیافراگم: f/0/2
	- فاصله کانونی: 26 mm
	- اندازه پیکسل: 8/0 micron
لنز فوق عریض	- 12 MP
	- دیافراگم: f/2/2
	- فاصله کانونی: 13 mm
	- اندازه پیکسل: 12/1 micron
لنز ماکرو یا نمای نزدیک	- 5 MP
	- دیافراگم: f/4/2
	- فاصله کانونی: 40 mm
	- اندازه پیکسل: 12/1 micron
لنز تشخیص عمق	- 5 MP
	- دیافراگم: f/2/2
	- اندازه پیکسل: 12/1 micron
	- (CMOS) 1/0/5" اندازه حسگر
ضبط ویدئو	1920x1080 (Full HD) (120 fps)

علاوه بر این، از ۹ تلفن هوشمند دیگر از برندهای مختلف نیز در مرحله جمع آوری داده ها استفاده شده است. برای انجام کالیبراسیون، یک صفحه شطرنجی با الگوی ۲۹ مربع سیاه و سفید در هر سطر و ۲۱ مربع در هر ستون، که ابعاد هر مربع

۱/۴×۱/۴ سانتی متر است، بر روی کاغذ A4 چاپ شد. همچنین، از ۷ ریسمان بنایی به رنگ قرمز، هر یک به طول ۲ متر، استفاده گردید. به منظور اطمینان از قرارگیری عمودی (شاقولی) این ریسمان ها، وزنه هایی به انتهای آنها متصل و فاصله دقیق میان هر دو ریسمان برابر با ۲۰ سانتی متر تنظیم گردید.

۳-۲- روش تحقیق

در این تحقیق قابلیت های دوربین تلفن هوشمند به عنوان ابزار جمع آوری تصاویر ورودی فتوگرامتری به روش SFM در محاسبه احجام عملیات خاکی از طریق کار بر روی یک مکعب بتنی با ابعاد ارتفاع ۱۴۹/۲۱×عرض ۱۵۰/۱۵×طول ۱۴۹/۴۸ میلی متر، استوانه بتنی با ابعاد ارتفاع ۱۵۲/۳۵×قطر ۱۵۱/۳۸ و نمونه شن با حجم ۰/۰۵۵۱۶ متر مکعب و یک دیو ماسه با ابعاد ارتفاع ۳/۵۰×عرض ۱۱×طول ۱۶ متر مورد بررسی قرار گرفت. از هر شیء دو مدل یکی با داده های پیش کالیبراسیون و دیگری با خودکالیبراسیون تولید شد. ابعاد و حجم واقعی نمونه ها و RMSE نقاط چک و کنترل مبنای ارزیابی دقت روش پیشنهادی قرار گرفت. با توجه به شکل (۱) در ابتداء نقاط کنترل زمینی برای مقیاس دهی و کنترل دقت هندسی مدل سه بعدی ایجاد شد. برای این منظور از هر دو نوع نشانگر^۱ ساده و کددار به وسیله چاپگر لیزری با وضوح ۶۰۰×۶۰۰ dpi چاپ و در اطراف نمونه ها نصب شدند. خطای فاصله دو نشانگر ساده با فاصله ۱۰ سانتی متر کمتر از ۰/۱ میلی متر بود که نشان می دهد دقت طول های مقیاس با استفاده از چاپگر لیزری می تواند به ۱:۱۰۰۰ برسد. برای اطمینان از اینکه همه نشانگرهای کددار می توانند به طور خودکار توسط نرم افزار شناسایی شوند، قطر نقطه دایره سیاه Db در نشانگرهای کددار باید به اندازه خاصی محدود شود. بر اساس برخی بررسی های اولیه، قطر نقطه دایره سیاه Db در تصویر کمتر از ۳۰ پیکسل در نظر گرفته شد. با توجه به اصول اولیه تصویربرداری، اندازه نشانگر کددار در سنسور تصویر CMOS متناسب با اندازه واقعی آن و بر اساس رابطه (۳) می باشد [۴۶].

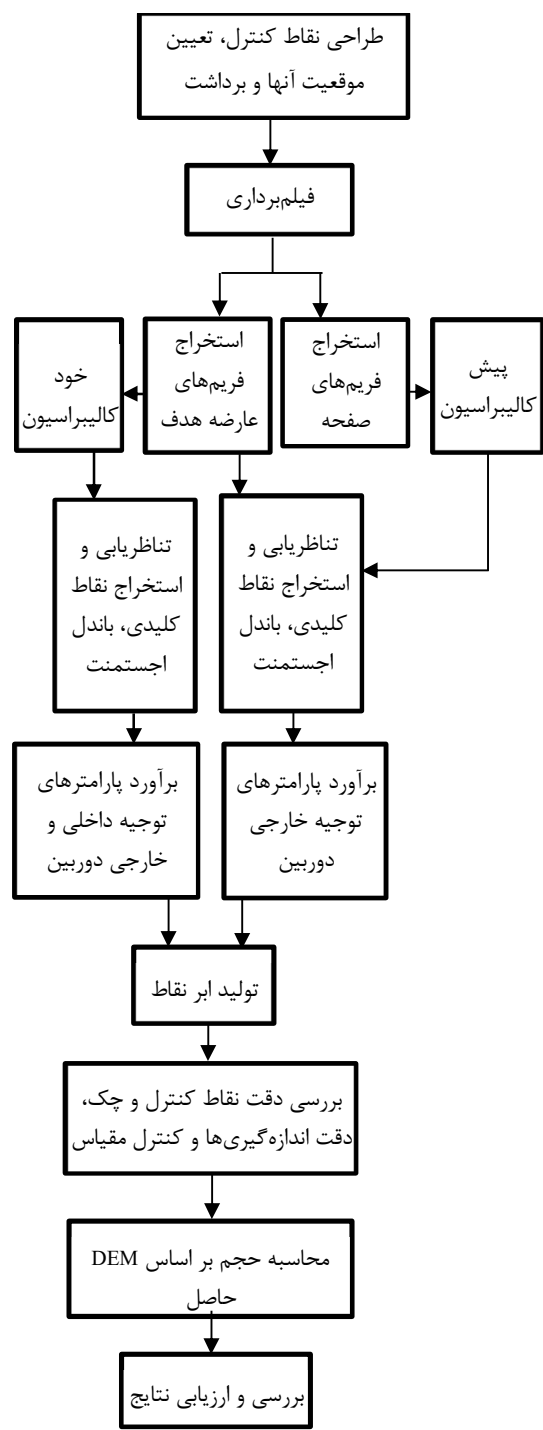
$$\frac{D_b}{L} = \frac{d_c}{f} \quad (3)$$

که در آن Db قطر دایره مرکزی نشانگر کددار، dc اندازه واقعی هدف تصویر شده در سنسور CMOS برابر با اندازه

پیکسل ضرب در تعداد پیکسل ها، f فاصله کانونی دوربین و L فاصله دوربین تا شیء است.

تعیین موقعیت نقاط کنترل با توتال استیشن نیازمند احداث ایستگاه های نقشه برداری با دقت بالا در اطراف عارضه است. برای کنترل صحت عملیات و برآورد خطای تعیین موقعیت این ایستگاه ها، یک شبکه پیمایش ایجاد شد. در پیمایش باید هر نقطه، از نقطه قبلی و بعدی قابل رویت باشد. برای دقت بیشتر، اندازه گیری ها به روش کوپل انجام و خطاهای باقی مانده با استفاده از روابط ریاضی تعدیل و سرشکن گردید. در پایان دقت زاویه ای ۲ ثانیه و دقت قرائت طول ها ۱ میلی متر تعیین شد. از این طریق نشانگرها به طور دقیق تعیین موقعیت و برداشت توپوگرافی با تراکم بالا از سطح انجام شد. بدیهی است هرچه نقاط متراکم تری در دسترس باشد نتیجه بازسازی به سطح اصلی از نظر توپوگرافی نزدیکتر خواهد بود. به همین دلیل تلاش شد تا نقاط بهینه ای نظیر شکستگی ها، خط الرأس ها، خط القعرها و همچنین نقاطی که تغییرات ارتفاعی قابل توجهی در فواصل کوتاه دارند، برداشت شوند. با توجه به ماهیت تحقیقی پروژه، برداشت نقاط با تراکم بالا به تعداد ۹۵۶ نقطه از دیوی ماسه انجام شد. تصویر شبکه پیمایش، نقاط توپوگرافی برداشت شده با توتال استیشن و موقعیت نشانگرهای کددار در شکل ۲ نمایش داده شده است. در مقیاس آزمایشگاهی نیز نشانگرهای ساده روی میز نصب و موقعیت آنها به وسیله توتا-ل استیشن در سیستم مختصات محلی برداشت، و در ادامه به عنوان نقاط کنترل و چک وارد محاسبات شدند.

پس از طراحی و تعیین موقعیت نقاط کنترل فیلم برداری نمونه های آزمایشگاهی از فاصله تقریباً ۲ متری و ۱۲ متری از دیو ماسه در دو ارتفاع متفاوت و تحت زوایای ۹۰ و ۴۵ درجه با سطح زمین به طور همزمان از صفحه شطرنجی و هر عارضه انجام شد. همچنین ویدئوهایی به طور مجزا در یک بازه زمانی چهارده روزه به وسیله چند برند مختلف تلفن هوشمند از یک صفحه شطرنجی برای تعیین میزان ثبات پارامترهای داخلی آنها ضبط شد. یک ویدئو یا فیلم در اصل نمایش پشت سر هم تصاویر است. تولید مدل سه بعدی با استفاده از همه فریم های یک دنباله ویدئویی، به دلیل نرخ بالای فریم بر ثانیه ضبط فیلم و توان پردازشی مورد نیاز زمان بر است به همین دلیل باید فریم های دارای بهترین ساختار برای بازسازی به عنوان نماینده کل فریم ها در دنباله ویدئویی انتخاب شوند.



شکل ۱- روند تحقیق

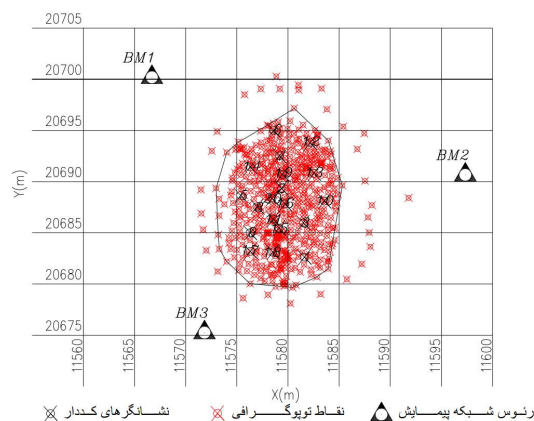
در حال حاضر نرم افزارهای تجاری بسیاری با قابلیت استخراج یک و یا چندین فریم در محدوده زمانی انتخاب شده از ویدئو وجود دارد. فریم های حائز شرایط می تواند از طریق روش های استخراج فریم کلیدی و یا بصورت دستی توسط کاربر انتخاب و برای انجام پیش کالیبراسیون و تولید مدل سه بعدی مورد استفاده قرار گیرند.

فرآیند پیش‌کالیبراسیون بر اساس روش پرکاربرد ژانگ^۱ انجام شد. ژانگ روشی را معرفی کرد که از الگوهای مسطح متعدد برای کالیبره کردن پارامترهای داخلی و خارجی دوربین بر اساس روش دو مرحله‌ای تسای استفاده می‌کند [۴۷،۴۸] و در آن کافیت از الگوی مسطح در چند جهت تصویربرداری شود. این الگو را می‌توان به‌وسیله چاپگر روی کاغذ چاپ و به یک سطح مسطح (به‌عنوان مثال جلد کتاب) چسباند و یا مستقیماً از صفحه نمایشگر تصویربرداری کرد. دوربین یا الگوی مسطح را می‌توان آزادانه جابجا کرد و نیازی به اندازه‌گیری مقدار و جهت جابجایی نیست [۴۹].

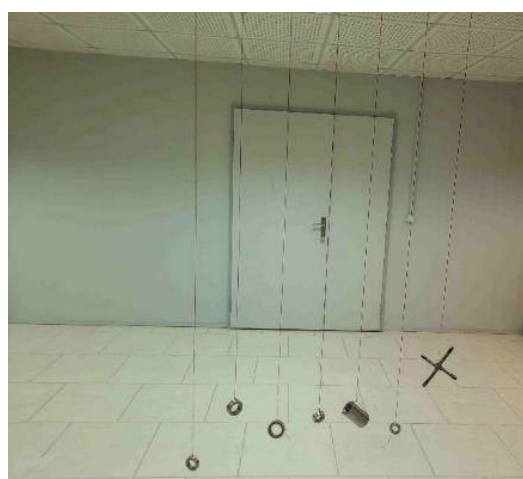
با هدف کنترل مضاعف و مقایسه نتایج از روش کالیبراسیون خطوط شاقولی نیز استفاده شد. ایده اصلی این روش بر این اصل استوار است که در شرایط ایده آل انتظار می‌رود، تصویر حاصل از خطوط مستقیم در عکس مربوطه به‌طور مستقیم ظاهر شود. اما در عمل به‌دلیل وجود اعوجاج شعاعی و مماسی، تصویر یک خط روی عکس یک خط مستقیم نیست [۵۰]. در این روش ابتدا از خطوط مستقیم شاقولی که تا حد امکان نازک در نظر گرفته می‌شوند، عکسبرداری شده، سپس با قرار دادن مختصات عکسی نقاط واقع بر این خطوط در معادله خط مربوطه معادلات تشکیل می‌شوند. تصویر خطوط شاقولی در شکل ۳ نمایش داده شده‌است. تعداد مجهولات در این روش برابر با $2m+7$ است که m معرف تعداد خطوط و عدد ۷ بیناگر ۷ پارامتر توجیه داخلی است. تعداد معادلات مشاهدات نیز برابر با $2n$ خواهد بود که n عبارت است از تعداد نقاط انتخاب شده بر روی خطوط مستقیم و به این ترتیب با درجه آزادی بالا، می‌توان مجهولات مورد نظر را محاسبه نمود. در طرف مقابل خودکالیبراسیون از استحکام هندسی عکس‌های دارای پوشش برای تعیین پارامترهای توجیه داخلی و سایر مجهولات استفاده می‌کند. فرمول ریاضی مورد استفاده در خودکالیبراسیون، همان روابط شرط هم خطی است که پارامترهای اعوجاج نیز به آن افزوده شده‌است.

در ادامه برای تعیین مختصات نقاط و نیز کم کردن خطای Reprojection بین عکس‌ها از سرشکنی دسته اشعه استفاده و ابر نقاط تولید می‌شود. سپس از طریق الگوریتم‌های مثلث‌بندی، سطحی یکپارچه به ابر نقاط برازش داده شده و حجم بین سطوح محاسبه می‌شود. در انتها برای

کنترل دقت هندسی روش پیشنهادی، RMSE نقاط چک و کنترل در دو حالت پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون و نیز مقادیر احجام برآورد شده با روش آزمایشگاهی، ویدئوگرامتری و توتال‌استیشن با یکدیگر مقایسه می‌شوند.



شکل ۲- تصویر شبکه پیمایش، نقاط توپوگرافی برداشت شده با توتال‌استیشن و موقعیت نشانگرهای کددار



شکل ۳- تصویر خطوط شاقولی

۴- پیاده‌سازی و ارائه نتایج

برای پردازش داده‌های تحقیق از نرم‌افزارهای Agisoft و Adobe premiere pro به ترتیب برای استخراج فریم‌ها از ویدئو و تولید مدل سه بعدی از تصاویر و از نرم‌افزار AutoCAD Cvil3D در برآورد احجام و از کامپیوتری با مشخصات زیر استفاده گردید.

Intel(R) Core(TM) i5-11400F @ 60/2GHz 59/2
GHz, Installed RAM 00/16 GB

ده نشانگر ساده بصورت دایره‌های سیاه رنگ با قطر ۴ سانتی‌متر با نقطه‌ای سفید در مرکز به قطر ۲ میلی‌متر طراحی و چاپ شدند. این نشانگرها برای استفاده به‌عنوان نقاط چک و کنترل، با توزیع یکنواخت روی میز نصب شدند. با توجه به ابعاد نمونه‌ها و فاصله کم بین نقاط کنترل، تمامی نقاط از یک ایستگاه به‌راحتی قابل قرائت بودند. پس از تنظیم و توجیه توتال‌استیشن در سیستم مختصات محلی، قرائت نقاط کنترل نیز از طریق استقرار در همان ایستگاه انجام گرفت. با هدف ارزیابی اثر شکل اشیاء و روش کالیبراسیون

دوربین بر دقت مدل نهایی موقعیت نشانگرها تا پایان تحقیق ثابت بود و تنها اشیاء مورد مطالعه جایگزین یکدیگر شدند. حجم دو نمونه بتنی با میانگین‌گیری از پانزده بار اندازه‌گیری هر وجه با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر تعیین گردید. حجم نمونه شن نیز از طریق ظرف حجمی از پیش کالیبره شده تعیین و به‌عنوان مقدار واقعی و معیار مقایسه در نظر گرفته شد. تصاویر نمونه‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و محل قرارگیری نشانگرهای ساده در شکل ۴ نمایش داده شده‌است.



ب



الف



ت



پ

شکل ۴- (الف) نمونه مکعب بتنی، (ب) نمونه استوانه بتنی، (پ) نمونه شن، (ت) دیو ماسه

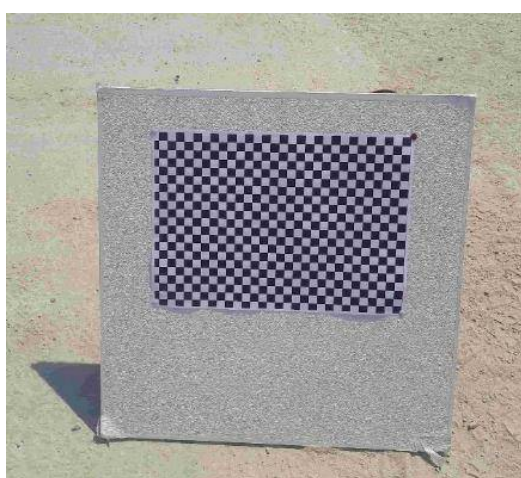
همچنین یک دیو ماسه با ابعاد تقریبی ارتفاع ۳/۵۰×عرض ۱۱×طول ۱۶ متر در محوطه یک کارگاه تولید

بتن آماده ایجاد شد. شبکه نقشه‌برداری در سیستم مختصات محلی بصورت سه رأس یک مثلث متساوی‌الضلاع در اطراف

دپو ماسه تشکیل و با استقرار توتال استیشن روی رئوس، طول و زوایای بین آنها بصورت کوپل قرائت و پس از سرشکنی دقت زاویه ۳ ثانیه و دقت قرائت طول‌ها ۲ میلی‌متر تعیین شد. بیست نشانگر کددار روی کاغذ A4 چاپ و بر روی ورق-های گچی مسطح (کناف) چسبانده شدند. این نشانگرها با توزیع مناسب بر روی سطح دپوی ماسه قرار گرفتند. شبکه نقشه‌برداری ایجاد شده برای تعیین موقعیت دقیق مراکز نشانگرها و همچنین برداشت توپوگرافی دپو ماسه مورد استفاده قرار گرفت. تصویر دپو ماسه، نشانگرهای کددار و نحوه توزیع آنها در شکل ۴ نمایش داده شده است.

حجم خاک نیز از طریق نقشه‌برداری با توتال استیشن تعیین و مبنای مقایسه دقت قرار گرفت. تصویربرداری در دو بخش کاملاً مجزا انجام شد. ابتدا به‌وسیله ده برند مختلف تلفن هوشمند، سه مرتبه در یک بازه زمانی چهارده روزه از صفحه شطرنجی نمایش داده شده روی نمایشگر کامپیوتر با هدف بررسی ثبات پارامترهای توجیه داخلی عکسبرداری شد. نحوه تصویربرداری باید به گونه‌ای باشد که تمام سطح مربوط به تصویر توسط صفحه شطرنجی پوشش داده شود. قرار گرفتن صفحه شطرنجی در یک گوشه یا مرکز تصویر موجب می‌شود، تا برخی از پارامترهای کالیبراسیون مانند اعوجاج شعاعی و مماسی با دقت نامناسب و به دور از واقعیت محاسبه گردد. برای جلوگیری از همبستگی بین پارامترهای توجیه داخلی، توجیه خارجی و مختصات فضای شی، دوربین گوشی هوشمند را در حین ثبت تصاویر، ۹۰ درجه به چپ و راست حول محور نوری در چند موقعیت چرخانده و تصاویر تحت زوایای رول^۱ و پیچ^۲ متفاوت اخذ شدند. با هدف کنترل دقت الگوریتم کالیبراسیون نرم‌افزار و همچنین ایجاد درک بصری از تأثیر ناپایداری پارامترهای داخلی دوربین بر هندسه مدل نهایی از روش کالیبراسیون خطوط شاقولی نیز استفاده شد. آزمایش با استفاده از هفت ریسمان قرمز رنگ با وزنه در یک سالن کنفرانس انجام شد. برای جلوگیری از ورود نورهای مزاحم و ساکن ماندن ریسمان‌ها در طول تصویربرداری، پنجره‌ها مسدود و سیستم تهویه هوا خاموش شد. روشنایی محیط به‌وسیله لامپ‌های سالن و دو پروژکتور سیار تأمین و میزان روشنایی در زمان عکسبرداری مطابق دستورالعمل اندازه‌گیری روشنایی در محیط کار Lux ۱۰۰۰ نور تأمین شد [۵۱]. همچنین صفحه

شطرنجی روی کاغذ سایز A3 چاپ و به یک صفحه صاف گچی چسب شد. تصویر صفحه شطرنجی در شکل ۵ نمایش داده شده است. به‌منظور برآورد پارامترهای کالیبراسیون دوربین ابتدا از صفحه شطرنجی و بلافاصله بدون خروج از منو دوربین از نمونه‌های آزمایشگاهی فیلم‌برداری شد. این روند برای هر سه نمونه تکرار و ویدئوهایی با نهایت زمان ۲ دقیقه ۱۵ ثانیه تحت زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه در دو ارتفاع متفاوت ضبط شد. سعی بر این بود موقعیت دوربین، فاصله تا شی، فوکوس دوربین، زاویه و دید افقی در فیلم‌برداری هر سه نمونه یکسان باشد تا تصاویر تقریباً مشابهی از آنها ثبت شود.



شکل ۵- تصویر صفحه شطرنجی

فیلم‌های ضبط شده در نرم افزار Adobe premiere pro بارگذاری و استخراج فریم‌ها از فیلم با نرخ ۰/۵ ثانیه، با پسوند jpg و با وضوح ۱۹۲۰×۱۰۸۰ پیکسل انجام شد. با توجه به اینکه تصویربرداری با نرخ ۱۲۰ فریم بر ثانیه انجام شد، برای کاهش تعداد فریم‌های استخراج‌شده، نرخ استخراج فریم از ویدئو روی ۰/۵ ثانیه تنظیم شد. به‌عنوان مثال بیشترین تعداد فریم قابل استخراج از ویدئو مکعب و استوانه به ترتیب ۳۵۲۸ و ۳۳۰۰ فریم بود که خود بیانگر قابلیت جایگزینی تصاویر مات و بی کیفیت و ارتقاء کیفیت مدل بدون نیاز به برداشت میدانی مجدد می‌باشد. لازم به ذکر است تعداد و وضوح فریم‌ها تأثیر مستقیم بر تعداد نقاط تشکیل دهنده ابر نقطه متراکم، کیفیت مدل سه بعدی نهایی و زمان پردازش نرم‌افزار دارد. ابتدا پیش-کالیبراسیون در سه مرتبه با استفاده از عکس‌های ده تلفن هوشمند، هر بار با شرکت سیزده عکس اخذ شده در بازه

زمانی چهارده روزه انجام شد. مقادير کاليراسيون در قالب یک فایل XML قابل فراخوانی در نرم افزارهای توليد مدل سه بعدی ذخيره شدند. لازم به ذکر است نرم افزار هيچ

نشانه‌ای از کيفيت کاليراسيون بجز خطای استاندارد ارائه نمی‌دهد. نتايج کاليراسيون دوربين در جدول (۱) نمايش داده شده‌است.

جدول ۱- نتايج کاليراسيون دوربين. فاصله اصلی (f)، مختصات مرکز تصوير (c_x, c_y)، پارامتر اعوجاج شعاعی عدسی (K_1, K_2, K_3)، پارامتر

اعوجاج مماسی (P_1, P_2) و (b_1, b_2) پارامتر افينيته

تلفن همراه	f	c_x	c_y	k_1	k_2	k_3	P_1	P_2	b_1	b_2
واحد (میلی‌متر)										
Samsung Galaxy A51	۴/۷۰۱	-۰/۰۲۵	۰/۰۴۲۰	-۰/۰۰۲۷۷۰	۰/۰۰۰۲۸	-۰/۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱۹	-۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۷
	۴/۶۹۷	-۰/۰۲۰	۰/۰۵۲۳	-۰/۰۰۲۵۱۸	۰/۰۰۰۲۳	-۰/۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۷۱۶	-۰/۰۰۰۰۵۰
	۴/۶۹۶	-۰/۰۲۸	۰/۰۴۲۵	-۰/۰۰۲۱۷۳	۰/۰۰۰۱۸	-۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۰۳۱	-۰/۰۰۰۰۲۰
Xiaomi Poco X3	۵/۶۰۹	۰/۰۱۳	-۰/۰۶۱	۰/۰۰۴۴	-۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱۳	-۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱۶	-۰/۰۰۰۰۶۸
	۵/۵۹۸	۰/۰۱۰	-۰/۰۶۲۱	۰/۰۰۵۲	-۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۰۸
	۵/۵۸۷	۰/۰۱۱	-۰/۰۶۱۸	۰/۰۰۴۲	-۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۰
Xiaomi Poco M3	۴/۴۸۷	-۰/۰۰۴	۰/۰۱۱۱	-۰/۰۰۰۹۹	۰/۰۰۱۴۳	-۰/۰۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۳۶	-۰/۰۰۰۰۱۸	-۰/۰۰۰۰۶۲
	۴/۴۷۳	-۰/۰۰۲	۰/۰۱۳۹	-۰/۰۰۱۰۰	۰/۰۰۱۴۴	-۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۳	-۰/۰۰۰۰۳۸	-۰/۰۰۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۰۵۴
	۴/۴۸۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷۴	-۰/۰۰۱۰۰۸	۰/۰۰۱۴۶	-۰/۰۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۰۴	-۰/۰۰۰۰۲۰	-۰/۰۰۰۰۷۶	-۰/۰۰۰۰۵۹
Xiaomi Note 9 Pro	۵/۶۴۹	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۹۴	-۰/۰۰۱۱۵۴	۰/۰۰۰۰۸	-۰/۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۷	-۰/۰۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰۰۰
	۵/۶۱۰	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۸۹	-۰/۰۰۱۵۴۳	۰/۰۰۰۱۳	-۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۷۳	۰/۰۰۰۰۰۰
	۵/۶۲۲	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۱۲۶	-۰/۰۰۱۴۲۴	۰/۰۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۳۰	-۰/۰۰۰۰۰۴
Xiaomi redmi 10 power	۴/۲۶۶	۰/۰۹۵	۰/۰۵۶۵	۰/۰۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰۵	-۰/۰۰۰۰۵۳	۰/۰۰۰۰۲۵
	۴/۲۷۴	۰/۰۰۰	۰/۰۶۱۸	۰/۰۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰۳	-۰/۰۰۰۰۱۰۴	۰/۰۰۰۰۴۲
	۴/۲۴۸	-۰/۰۶۳	۰/۰۸۳۶	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۲۰۶	-۰/۰۰۰۰۸۴
Xiaomi Note 8 Pro	۵/۴۳۲	۰/۱۳۵	-۰/۰۰۷۹	-۰/۰۰۰۰۹۵	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۳	-۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱۲۴۵	۰/۰۰۰۰۷۷
	۵/۴۴۱	۰/۰۷۵	-۰/۰۰۲۷۸	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۳۳۳	-۰/۰۰۰۰۲۹
	۵/۵۲۱	۰/۱۲۳	-۰/۰۰۱۰۷	-۰/۰۰۰۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۵۴۹	۰/۰۰۰۰۴۶۱
Samsung Galaxy S22 Ultra	۲۸/۹۰۳	۰/۰۳۵	۰/۰۴۱۱	-۰/۰۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰۸	-۰/۰۰۰۰۱۶۶۹	۰/۰۰۰۰۱۵
	۲۸/۸۳۶	۰/۰۲۲	۰/۰۲۰۷	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۰۵۹۵	-۰/۰۰۰۰۱۲
	۲۸/۹۶۴	-۰/۰۷۵	۰/۰۹۴۲	۰/۰۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰۳	-۰/۰۰۰۰۱۲۷۳	-۰/۰۰۰۰۰۵
Huawei Y9s	۴/۸۹۸	۰/۰۴۳	۰/۱۰۵۳	-۰/۰۰۵۳۶۹	۰/۰۰۰۰۴۶	-۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳	-۰/۰۰۰۰۲۵۱	۰/۰۰۰۰۴۳۱۱	-۰/۰۰۰۰۱۵۲۷
	۵/۱۸۴	-۰/۰۱۵	۰/۰۳۴۲	-۰/۰۰۵۶۷۵	۰/۰۰۰۰۵۱	-۰/۰۰۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۰۸	-۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۱۲۱۶	۰/۰۰۰۰۲۲۳
	۵/۰۲۵	۰/۰۹۹	۰/۱۸۷۱	-۰/۰۰۵۴۲۰	۰/۰۰۰۰۴۵	-۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱۹	-۰/۰۰۰۰۰۷۰	۰/۰۰۰۰۳۳۰	-۰/۰۰۰۰۴۷۸۹
Samsung Galaxy A34	۴/۵۰۱	-۰/۰۳۲	۰/۰۴۱۰	-۰/۰۰۳۳۶۰	۰/۰۰۰۰۳۲	-۰/۰۰۰۰۰۸	-۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۶	-۰/۰۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۴۰۲
	۴/۴۲۳	-۰/۰۱۹	۰/۰۳۲۱	-۰/۰۰۴۰۱۵	۰/۰۰۰۰۲۴	-۰/۰۰۰۰۰۰	-۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲۰	۰/۰۰۰۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۰۳۲۱
	۴/۶۹۱	-۰/۰۴۰	۰/۰۵۰۷	-۰/۰۰۳۸۹۴	۰/۰۰۰۰۱۷	-۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۲۳	-۰/۰۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۵۷۸
Huawei nova 8i	۵/۴۰۲	۰/۰۲۷	۰/۱۱۸۰	-۰/۰۰۴۲۸۹	۰/۰۰۰۰۵۷	-۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۱۷۲	۰/۰۰۰۰۱۲۸	-۰/۰۰۰۰۳۴۵
	۵/۵۴۹	-۰/۰۱۶	۰/۱۱۳۴	-۰/۰۰۵۴۶۱	۰/۰۰۰۰۶۵	-۰/۰۰۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۰۰۵	-۰/۰۰۰۰۱۱۹	۰/۰۰۰۰۲۴۷	۰/۰۰۰۰۲۵۲
	۵/۰۱۲	۰/۰۰۸	۰/۱۰۰۹	-۰/۰۰۳۸۷۲	۰/۰۰۰۰۴۶	-۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۴	-۰/۰۰۰۰۲۱۵	۰/۰۰۰۰۱۹۳	-۰/۰۰۰۰۲۱۵

تجزیه و تحليل نتايج کاليراسيون نشان دهنده سطوح مختلف پايداری در پارامترهای داخلی دوربين تلفن‌های هوشمند بود. با استناد به جدول بالا بيشترين ميزان تغييرات مربوط به پارامترهای f, x_0, y_0 است، برای برخی دوربين‌ها

این مقدار اندک و در حد چند پیکسل بود اما ساير آنها دارای اختلاف قابل توجهی در این مقادير بودند. لازم به ذکر است تخمين صحيح فاصله کانونی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مولفه‌ها در کاليراسيون دوربين شناخته می‌شود زیرا

خطاهای کوچک منجر به خطاهای بسیار اغراق آمیز در هنگام محاسبه مختصات نقاط از طریق مثلث بندی می شود [۵۲]. پارامترهای اعوجاج از ثبات نسبی قابل قبولی برخوردار بودند و تغییرات کمی را طی دوره های مختلف کالیبراسیون نشان دادند اما در تمام دوربین ها میزان اعوجاج شعاعی بالا و اعوجاج مماسی اندک گزارش شده است. درست است که موقعیت نقطه اصلی در برآورد میزان اعوجاج اثر می گذارد، اما با وجود اعوجاج شعاعی بالا این اثر کم است. حال این سوال مطرح می شود که آیا نتایج فوق به دلیل ناپایداری پارامترهای داخلی دوربین تلفن هاست و یا ناشی از ضعف روش کالیبراسیون و هندسه تصویربرداری است. برای پاسخ به این سوال تلفن Samsung Galaxy A51 که نتایج به نسبت خوبی ارائه داده بود را انتخاب و کالیبراسیون مجدداً در دو مرحله بلافاصله پشت سرهم انجام شد. ابتدا از صفحه شطرنجی نمایش داده شده روی صفحه کامپیوتر عکسبرداری و پس از خروج و ورود دوباره به منو دوربین، عکسبرداری مجدد انجام شد. برای حذف سایر اثرها سعی بر این بود فاصله، موقعیت و زاویه دوربین در هر دو مرحله عکسبرداری تا حد امکان یکسان باشد. به همین دلیل با استفاده سه پایه دوربین و چند ابزار جانبی موقعیت ایستگاه-های عکسبرداری و زاویه مانیتور علامت گذاری و ثابت شدند تا تصاویر دقیقاً از منظرهای یکسانی اخذ شوند. با انجام این کار تعداد تصاویر، درصد همپوشانی و موقعیت دوربین در هر دو مرحله برابر است و ارزیابی دقت و کیفیت کاملاً بر اساس مشخصات دوربین می باشد. در پایان نتایج نشان دهنده تغییرات پیوسته در مقادیر پارامترهای داخلی پس از هر بار ورود و خروج از منو دوربین بود.



شکل ۶- تصویر مدل سه بعدی نهایی آزمایش

با توجه به ثابت قرار دادن عوامل اثر گذار در محاسبات ریاضی روش کالیبراسیون نظیر تعداد و درصد همپوشانی تصاویر، فاصله دوربین تا صفحه شطرنجی و زاویه عکسبرداری می توان نتیجه گرفت تغییر در مقادیر پارامترهای داخلی ناشی از سیستم دوربین تلفن هوشمند است. نتایج حاصل در جدول (۲) نمایش داده شده است.

همچنین با استفاده از همین تلفن تعداد ۷۰ عکس از ریسمان ها در زوایا و فواصل مختلف اخذ شد و در نرم افزار بارگذاری و کیفیت Highest انتخاب شد. اما متأسفانه پس از صرف زمان بسیار طولانی حدود ۲۱ ساعت برای پردازش، به دلیل رزولوشن پائین تصاویر نرم افزار نتوانست مدل صحیحی از ریسمان ها ایجاد نماید. این روند با تغییر در تعداد و زوایای عکس های بارگذاری شده چندین مرتبه تکرار شد که نتایجی مشابه قبل به دست آمد و آزمایش با شکست مواجه شد. تصویر مدل سه بعدی نهایی این آزمایش در شکل ۶ نمایش داده شده است.

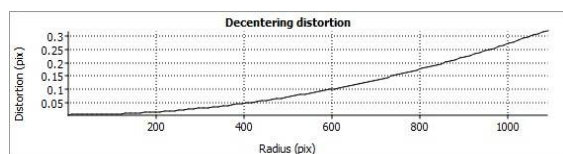
در ادامه روند کالیبراسیون فریم های استخراجی از ویدئو هر سه شیء در مقیاس آزمایشگاهی (شامل فریم های تصویر کننده صفحه شطرنجی و اشیاء) اخذ شده با تلفن Samsung Galaxy A51 استفاده شد. مجموعه داده ها شامل ۴۵ و ۲۵ فریم با زاویه همگرا و با پوشش طولی ۹۰ درصد به ترتیب برای مکعب و استوانه و ۶۰ فریم برای نمونه شن بود که توسط کاربر و بصورت دستی از میان مجموع فریم ها انتخاب شد. در ساخت مدل ها از تعداد فریم های متفاوتی استفاده شد تا تأثیر آن بر دقت برآورد پارامترهای خود کالیبراسیون بررسی گردد. همچنین تعداد سیزده فریم از صفحه شطرنجی ابتدای ویدئوی هر شیء، استخراج و برای تخمین داده های پیش کالیبراسیون دوربین مورد استفاده قرار گرفت. پس از بارگذاری عکس ها، نرم افزار کیفیت کلی تصویر را بر اساس سطح وضوح آن نسبت به سایر تصاویر در همان مجموعه داده تخمین زده، مقداری به آن نسبت می دهد و توصیه به حذف تصاویر با کیفیت کمتر از ۵/۰ دارد. البته در این مطالعه تمامی تصاویر ثبت شده دارای مقادیر کیفیت بالای ۷۵/۰ بودند. نمودار و پروفیل اعوجاج پارامترهای داخلی دوربین در دو حالت پیش کالیبراسیون و خود کالیبراسیون در شکل ۷ نمایش داده شده است. تفاوت ها در دو مدل نشان دهنده تصحیح اعوجاج بیشتر در حالت پیش کالیبراسیون است که در نمودار بصورت اعوجاج کمتر در گوشه های تصویر نمود پیدا کرده است.

در شکل ۷ نشان داده شد که با افزایش تعداد تصاویر، مقادیر برآورد شده برای پارامترهای داخلی دوربین نیز دستخوش تغییر شده و نتایج نزدیکتری به حالت پیش-

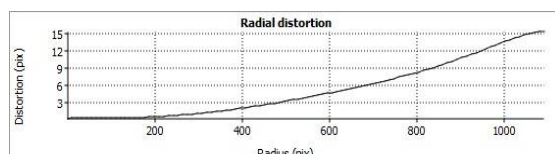
کالیبراسیون ارائه می‌دهد. خودکالیبراسیون و ایجاد ابر نقطه با تعداد متفاوتی از تصاویر انجام شد.

جدول ۲- نتایج دو مرحله کالیبراسیون دوربین با فاصله زمانی چند ثانیه

		f	c_x	c_y	k_1	k_2	k_3	P_1	P_2	b_1	b_2
واحد (میلی‌متر)											
Samsung Galaxy A51	۱	۴/۷۰۰	-۰/۰۲۴۳	۰/۰۴۱۸	-۰/۰۰۲۶۱	۰/۰۰۰۲۶	-۰/۰۰۰۰۰۸	-۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۲۰	-۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۰۴
	۲	۴/۷۰۴	-۰/۰۲۲۹	۰/۰۴۰۸	-۰/۰۰۲۴۳	۰/۰۰۰۲۵	-۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۲۱	-۰/۰۰۰۰۱۸	-۰/۰۰۰۰۰۲

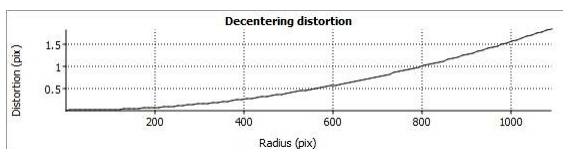


(ب)

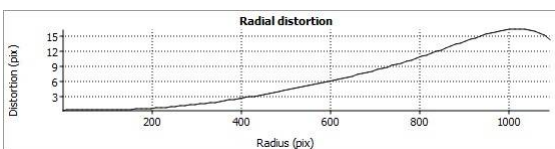


(الف)

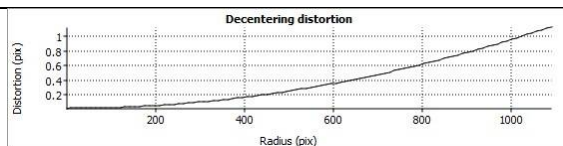
(۷.۱)



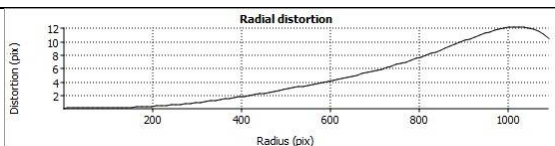
(ت)



(پ)

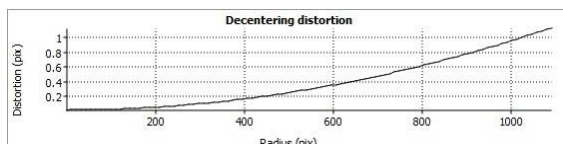


(ب)

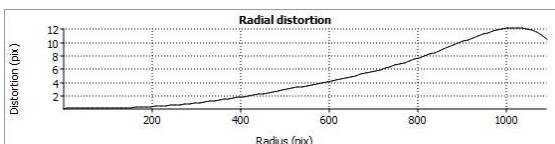


(الف)

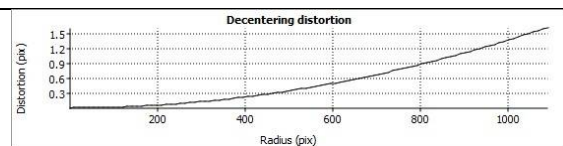
(۷.۲)



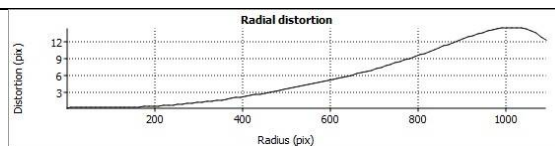
(ت)



(پ)

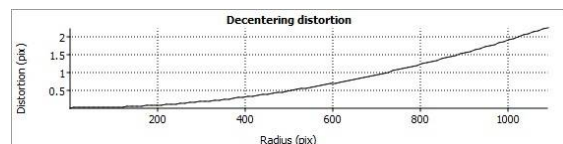


(ب)

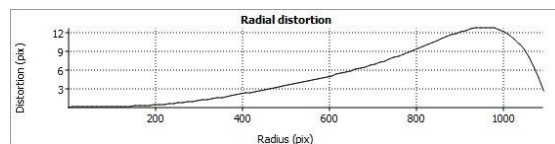


(الف)

(۷.۳)



(ت)



(پ)

شکل ۷- (۷.۱) الف و ب نمودار اعوجاج شعاعی و مماسی برای نمونه مکعب بتنی در حالت خودکالیبراسیون با استفاده از ۲۵ عکس، شکل (۷.۱) پ و ت نمودار اعوجاج شعاعی و مماسی برای نمونه مکعب بتنی در حالت پیش‌کالیبراسیون از طریق ۱۳ تصویر اخذ شده از صفحه شطرنجی، شکل (۷.۲) الف و ب نمودار اعوجاج شعاعی و مماسی برای نمونه استوانه بتنی در حالت خودکالیبراسیون با استفاده از ۴۵ عکس، شکل (۷.۲) پ و ت نمودار اعوجاج شعاعی و مماسی برای نمونه استوانه بتنی در حالت پیش‌کالیبراسیون از طریق ۱۳ تصویر اخذ شده از صفحه شطرنجی، شکل (۷.۳) الف و ب نمودار اعوجاج شعاعی و مماسی برای نمونه شن در حالت خودکالیبراسیون با استفاده از ۶۰ عکس، شکل (۷.۳) پ و ت نمودار اعوجاج شعاعی و مماسی برای نمونه شن در حالت پیش‌کالیبراسیون از طریق ۱۳ تصویر اخذ شده از صفحه شطرنجی

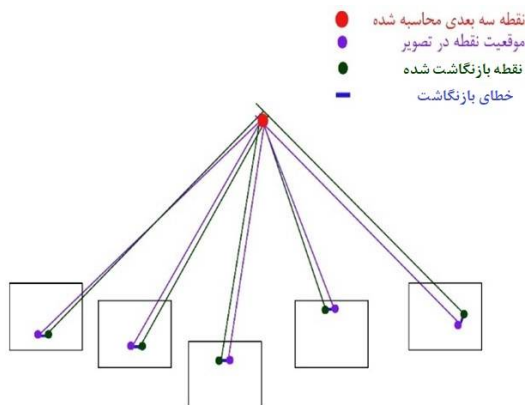
همانطور که از نمودار شکل (۷.۱-الف) پیداست با افزایش تعداد تصاویر در حالت خودکالیبراسیون نمودار اعوجاج شعاعی سیر نزولی پیدا کرده و در نمودار شکل (۷.۳-الف) که تصاویر مورد استفاده به شصت عدد افزایش پیدا کرده است نمودار سیر نزولی بالاتری گرفته و به حالت پیش کالیبراسیون نزدیکتر شده است که نشان دهنده تأثیر تعداد تصاویر بر دقت خودکالیبراسیون می باشد اما در نهایت هر سه نمودار در حالت پیش کالیبراسیون وضعیت بهتری را از خود نشان می دهند.

سه پارامتر اصلی f, c_x, c_y که در مراحل قبل بیشترین تغییر را داشتند به وسیله هر دو روش (پیش کالیبراسیون و خودکالیبراسیون) محاسبه شدند و نتایج آن در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۳- نتایج کالیبراسیون با هر دو روش پیش کالیبراسیون و خودکالیبراسیون. نتایج روش خودکالیبراسیون بصورت پر رنگ نمایش داده شده است.

عارضه	حالت کالیبراسیون	واحد (میلی متر)		
		f	c_x	c_y
مکعب بتنی	Self (25 pic)	۴/۷۰۹۷	-۰/۰۲۴۳	۰/۰۴۶۴
	Pre (13 pic)	۴/۶۹۹۶	-۰/۰۲۸۱	۰/۰۳۷۹
استوانه بتنی	Self (45 pic)	۴/۷۰۲۴	-۰/۰۲۷۴	۰/۰۲۶۲
	Pre (13 pic)	۴/۷۸۴۹	۰/۰۲۲۱	۰/۰۴۸۰
شن	Self (60 pic)	۴/۷۰۳۲	-۰/۰۴۲۲	۰/۰۳۱۹
	Pre (13 pic)	۴/۷۰۹۶	-۰/۰۲۹۸	۰/۰۲۸۵

در فرآیند مثلث بندی برای محاسبه مختصات سه بعدی نقاط استخراج شده، از مختصات دو بعدی نقاط متناظر تصویری استفاده می شود. بدیهی است هر چقدر درجه آزادی بیشتر باشد یعنی تعداد عکس های پوشش دار بیشتر باشد، دقت نهایی نقاط مثلث بندی بهتر خواهد شد. بعد از محاسبه مختصات نهایی نقطه می توان روی تمام تصاویر که نقطه مورد نظر در آنها قرار دارد مجدداً مختصات عکسی نقطه را با نگاشت معکوس محاسبه نمود بنابراین در تمام تصاویر دو سری مختصات عکسی وجود دارد موقعیت اولیه نقطه دو بعدی و موقعیت محاسبه شده روی همان تصویر که طبیعتاً باهم مطابقت ندارند. فاصله اقلیدسی بین دو موقعیت (یعنی اولیه و محاسبه شده) در صفحه تصویر نشان دهنده خطای تصویر مجدد نقطه، در آن عکس می باشد.



شکل ۸- نمایش چگونگی خطای تصویر مجدد (بازنگاشت) برای یک نقطه

جدول ۴- تعداد نقاط گرهی، تعداد تصاویر هر نقطه مشترک و خطای بازنگاشت. نتایج روش خودکالیبراسیون بصورت پر رنگ نمایش داده شده است.

عارضه	حالت کالیبراسیون	قدرت تفکیک زمینی (میلی - متر)	تعداد نقاط گرهی	میانگین تعداد تصاویر هر نقطه مشترک	خطای بازنگاشت (Pix)
مکعب بتنی	Self (25pic)	۰/۵۶۸	۱۶,۰۲۹	۲/۲۵۲	۰/۷۷۲
	Pre (25pic)	۰/۵۶۳	۱۷,۹۳۱		۰/۷۲۷
استوانه بتنی	Self (45pic)	۰/۵۸۶	۲۸,۷۸۵	۲/۵۶۹	۰/۹۴۲
	Pre (45pic)	۰/۵۸۳	۲۹,۰۰۲		۳/۰۲
شن	Self (60pic)	۰/۶۰۷	۴۴,۹۳۴	۳/۴۰۹	۰/۵۹۶
	Pre (60pic)	۰/۶۱۸	۴۵,۱۸۹		۰/۶۰۵

شکل ۸ نشان دهنده این خطا برای یک نقطه است. هر چند وجود نقاط عکسی بیشتر باعث افزایش دقت نهایی خواهد شد ولی باید در نظر داشت که اگر خطای نقطه مرتبط با یک تصویر داده شده نسبت به سایر تصاویر ارائه شده بیشتر باشد،

منجر به خطای موقعیتی بالاتر خواهد شد. بنابراین، تعداد نقاط گرهی و تعداد تصاویر مرتبط با آنها به تنهایی برای قضاوت در مورد قابلیت اطمینان مختصات سه بعدی محاسبه شده کافی نیست. جدول شماره (۴) مقادیر میانگین تعداد تصاویری که

هر نقطه مشترک در آنها وجود را نمایش می‌دهد. در واقع جدول فوق مشخص می‌کند به طور متوسط از چند تصویر برای محاسبه و بازسازی موقعیت سه بعدی یک نقطه در سرشکنی دسته اشعه استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه استوانه بتنی در حالت پیش‌کالیبراسیون دارای خطای بازنگاشت^۱ سه برابر حالت خودکالیبراسیون می‌باشد در حالی که از تصاویر یکسانی در ساخت هر دو مدل استفاده شده است. بنابراین، افزایش خطا نشأت گرفته از صحت پائین پارامترهای پیش‌کالیبراسیون می‌باشد.

با تشخیص نقاط گرهی توسط الگوریتم SIFT و تطبیق کامل تصاویر ابر نقطه پراکنده به‌دست می‌آید. بعد از ابر نقطه پراکنده ابر نقطه متراکم ساخته می‌شود. اندازه ابر متراکم ارتباط مستقیم با کیفیت و تعداد عکس‌های بکار گرفته شده دارد و ابر نقطه متراکم‌تر نمای بهتری را از جزئیات اشیاء ارائه می‌دهد که منجر به کیفیت مش بالاتر با هندسه دقیق و در نتیجه اندازه‌گیری‌های هندسی دقیق می‌شود. تصاویر ابر نقطه متراکم و غیر متراکم هر سه شیء در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۹- الف ابر نقطه غیر متراکم و متراکم مکعب، ب ابر نقطه غیر متراکم و متراکم استوانه، پ ابر نقطه غیر متراکم و متراکم شن

مختصات ده نقطه زمینی در اطراف هر یک از نمونه‌ها در دسترس بود که چهار نقطه به‌عنوان نقطه کنترل برای هم مقیاس کردن ابر نقطه متراکم و مدل سه بعدی نهایی با مقیاس واقعی و شش نقطه به‌عنوان نقاط چک و برای ارزیابی دقت مورد استفاده قرار گرفتند. در هر سه مدل و هر دو حالت پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون نقاط شماره ۱، ۴، ۶، ۸ به‌عنوان نقاط کنترل و شش نقطه دیگر به‌عنوان نقاط چک وارد معادلات شدند. میزان RMSE و خطای آنها در جدول (۵) نمایش داده شده است. دلیل زیاد بودن تعداد نقاط چک در مقایسه با تعداد نقاط کنترل به جهت ارزیابی کامل‌تر مدل در مناطق مختلف بوده و در

نتیجه پوشش بهتری از دقت مدل فراهم می‌شود. اگرچه در حالت پیش‌کالیبراسیون نمودار و پروفیل اعوجاج وضعیت بهتری را نشان می‌دهند اما به دلیل تغییرات پیوسته فاصله کانونی و موقعیت مرکز پرسپکتیو دوربین می‌توان گفت پارامترهای به‌دست آمده از صحت کافی برخوردار نیستند. به عبارت دیگر پارامترهای محاسبه شده برای آن لحظه خاص دوربین معتبر هستند و اگر بین مرحله عکسبرداری و پیش‌کالیبراسیون فاصله زمانی باشد و یا مدت زمان عکسبرداری از عارضه به درازا بیانجامد استفاده از پیش‌کالیبراسیون اثر معکوس خواهد داشت و باعث کاهش دقت مدل نهایی می‌گردد. در هنگام فیلم-

^۱Reprojection

برداری دپو ماسه، سه مرتبه صفحه شطرنجی نیز
تصویربرداری شد، از هر مرتبه سیزده فریم تحت زوایای

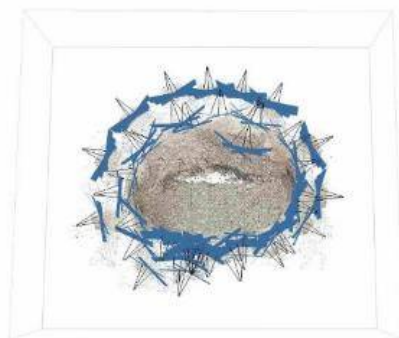
رول و پیچ متفاوت استخراج و پارامترهای داخلی دوربین
یکجا با شرکت همه آنها (3×13) محاسبه شد.

جدول ۵- RMSE نقاط چک و کنترل. نتایج روش خود واسنجی بصورت پر رنگ نمایش داده شده است.

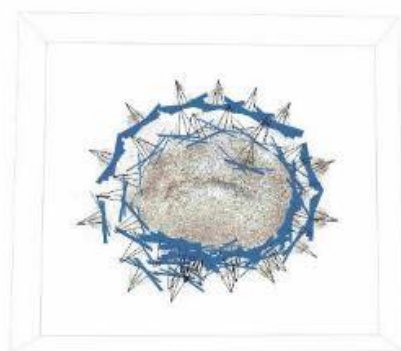
Total	XY error	Z error	Y error	X error	نقاط	تصاویر	حالت	عارضه
RMSE نقاط کنترل واحد (میلی متر)								
۰/۵۸۷۱۸۴	۰/۵۷۳۴۲۷	۰/۱۲۶۳۵۶	۰/۴۴۴۴۵۷	۰/۳۶۲۳۲۲	۴	۲۵	Self	مکعب
۰/۶۲۱۵۷۳	۰/۶۰۰۷۶۵	۰/۱۵۹۴۸۳	۰/۴۶۱۲۰۹	۰/۳۸۴۹۷۴	۴	۲۵	Pre	بتنی
۰/۶۵۶۳۹۷	۰/۶۲۲۶۷۸	۰/۲۰۷۶۷۵	۰/۴۶۶۵۱۸	۰/۴۱۲۴۱۸	۴	۴۵	Self	استوانه
۱/۰۵۰۲۹	۰/۷۶۹۰۷۴	۰/۷۱۵۲۸۹	۰/۷۲۱۴۸	۰/۲۶۶۳۴۶	۴	۴۵	Pre	بتنی
۰/۰۷۴۵۱۰۴	۰/۰۷۴۰۳۰۸	۰/۰۰۸۴۴۰۳۶	۰/۰۵۷۳۶۹۷	۰/۰۴۶۷۸۹۷	۴	۶۰	Self	شن
۰/۷۷۸۷۳۱	۰/۷۶۹۵۳	۰/۱۱۹۳۵۳	۰/۵۹۰۴۴	۰/۴۹۳۵۱۶	۴	۶۰	Pre	شن
RMSE نقاط چک واحد (میلی متر)								
۰/۴۶۲۱۵۵	۰/۳۹۵۹۱۷	۰/۲۳۸۴۰۵	۰/۳۳۷۳۴	۰/۲۰۷۲۴۹	۶	۲۵	Self	مکعب
۰/۴۳۵۳۴۲	۰/۳۴۴۱۱۴۸	۰/۲۶۶۶۱۷	۰/۲۴۷۶۷۲	۰/۲۳۸۹۴۹	۶	۲۵	Pre	بتنی
۰/۵۹۲۱۳۲	۰/۵۰۰۷	۰/۳۱۶۱۰۱	۰/۴۱۶۷۹۴	۰/۲۷۷۴۵۹	۶	۴۵	Self	استوانه
۰/۷۸۲۳۵۴	۰/۶۵۳۸۱۵	۰/۴۲۹۶۵۴	۰/۵۸۲۷۰۸	۰/۹۶۵۲۲	۶	۴۵	Pre	بتنی
۱/۴۲۴۰۲	۱/۴۲۳۷۷	۰/۰۲۶۴۸۸۷	۰/۰۳۱۹۷۸۳	۱/۴۲۳۴۱	۶	۶۰	Self	شن
۰/۷۰۱۴۵۸	۰/۶۳۴۹۵۱	۰/۲۹۸۱۲۷	۰/۳۲۶۹۱۷	۰/۵۴۴۳۲۴	۶	۶۰	Pre	شن

زاویه همگرایی و نسبت باز به ارتفاع بر دقت اندازه گیری-
های فتوگرامتری اثرگذار است. نسبت باز به ارتفاع مناسب و
درجات همگرایی بزرگتر باعث افزایش دقت به خصوص هنگام
استفاده از خودکالیبراسیون می گردد. با هدف بررسی تأثیر
شکل شبکه تصویربرداری بر دقت خودکالیبراسیون
پارامترهای داخلی دوربین، چهار مرتبه بصورت حلقه بسته و
حلقه باز، منحنی و خطی برآورد شدند تا دقت فرایند
خودکالیبراسیون در مواردی که امکان حرکت به دور عارضه
وجود ندارد نیز بررسی شود. مقدار برآورد شده از طریق
پیش کالیبراسیون و RMSE نقاط کنترل و چک، مبنای
مقایسه دقت برآورد پارامترها قرار گرفته است. در این مطالعه،
سطح پردازش عکس ها در حالت بالاترین (Highest) انتخاب
شد و برای بهینه سازی عملکرد، تعداد نقاط متناظر برای هر
تصویر مقدار پیش فرض ۴۰۰۰ انتخاب شد. در شکل ۱۰
تصویر مدل ساخته شده از طریق پیش کالیبراسیون با استفاده
از سه مرتبه تصویربرداری از صفحه شطرنجی و تصاویر مدل-
های ساخته شده از طریق خودکالیبراسیون با شبیه سازی
محدودیت دسترسی تا جایی که فقط یک سمت از دپو ماسه
قابل دسترسی و فیلمبرداری باشد بصورت حلقه بسته، حلقه

باز، منحنی و خط صاف نمایش داده شده است. همچنین،
مقادیر پارامترهای داخلی دوربین در هر پنج حالت، محاسبه
و برای مقایسه بصری در جدول (۶) نمایش داده شده است.
می توان گفت فاصله کانونی به تنهایی اثر گذارترین پارامتر بر
دقت مدل نهایی است و پارامترهای برآورد شده در حالت
لوپ بسته دارای نزدیک ترین مقادیر به پیش کالیبراسیون
است. همچنین نتایج جدول ۶ نشان می دهد
خودکالیبراسیون این قابلیت را دارد که در هر چهار حالت
لوپ بسته، باز، منحنی و خطی فاصله کانونی را با دقت بالا و
بسیار نزدیک به هم برآورد نماید. البته نباید فراموش کرد که
داشتن هندسه تصویر همگرا تضمین کننده دقت در حالت
خودکالیبراسیون است و هرچه هندسه تصویر از حالت همگرا
دور شود دقت خود واسنجی نیز کاهش می یابد. بنابراین در
پروژه ها با شبکه فتوگرامتری خطی استفاده از تصاویر همگرا
و اخذ شده تحت زوایای دوران متفاوت بسیار حائز اهمیت
است. برای ارزیابی دقت هندسی مدل نهایی، در حالت پیش-
کالیبراسیون و خودکالیبراسیون با حلقه بسته، چهار نشانگر
به عنوان نقطه کنترل و شانزده نشانگر باقی مانده به عنوان نقاط
چک وارد محاسبات شدند.



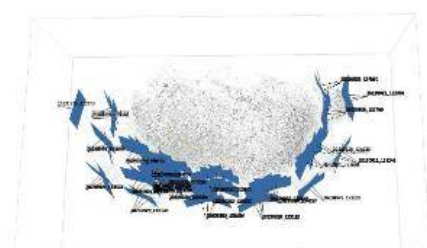
الف



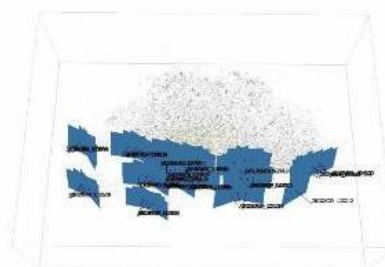
ب



پ



ت



ث

شکل ۱۰- الف) تصویر مدل ساخته شده از طریق پیش‌کالیبراسیون با استفاده از سه مرتبه تصویربرداری از صفحه شطرنجی، (ب) مدل ساخته شده از طریق خودکالیبراسیون در حالت لوپ بسته، (پ) مدل ساخته شده از طریق خودکالیبراسیون در حالت لوپ باز، (ت) مدل ساخته شده از طریق خودکالیبراسیون در حالت لوپ منحنی، (ث) مدل ساخته شده از طریق خودکالیبراسیون در حالت خط صاف.

جدول ۶- مقادیر پارامترهای داخلی دوربین محاسبه شده به روش پیش‌کالیبراسیون و چهار حالت خودکالیبراسیون بصورت لوپ بسته، باز، منحنی و خطی										
حالت کالیبراسیون	f	c _x	c _y	k ₁	k ₂	k ₃	P ₁	P ₂	b ₁	b ₂
واحد (میلی‌متر)										
Pre calibration	۴/۷۸۱۰	-۰/۰۱۳۶	۰/۰۲۶۴	-۰/۰۰۰۱۹۴	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۰۲۲	-۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۱۵۵	-۰/۰۰۰۰۹
Self (حلقه بسته)	۴/۶۵۱۸	-۰/۰۰۶۶	۰/۰۲۵۱	-۰/۰۰۳۵۴۲	۰/۰۰۰۳۴	-۰/۰۰۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۰
Self (حلقه باز)	۴/۶۴۹۰	-۰/۰۰۸۴	۰/۰۲۳۲	-۰/۰۰۳۵۳۴	۰/۰۰۰۳۴	-۰/۰۰۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
Self (حلقه منحنی)	۴/۶۴۷۲	-۰/۰۱۱۵	۰/۰۲۱۵	-۰/۰۰۳۵۵۰	۰/۰۰۰۳۳	-۰/۰۰۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
Self (خط صاف)	۴/۶۴۴۱	-۰/۰۱۱۴	۰/۰۳۵۷	-۰/۰۰۳۵۱۲	۰/۰۰۰۳۳	-۰/۰۰۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰

جدول ۷- RMSE نقاط چک و کنترل در هر دو حالت پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون. نتایج خودکالیبراسیون بصورت پررنگ نمایش داده شده‌است.

Total	XY error	Z error	Y error	X error	نقاط	تصاویر	کالیبراسیون	عارضه
RMSE نقاط کنترل واحد (میلی‌متر)								
۳/۷۷۴۸	۳/۵۶۱۶	۱/۲۵۰۶	۲/۹۷۴۷	۱/۹۵۸۷	۴	۱۲۹	Self	دپو ماسه
۹/۱۱۳۳	۶/۷۹۸۵	۶/۰۶۸۹	۵/۲۰۶۸	۴/۳۷۱۴			Pre	
RMSE نقاط چک واحد (میلی‌متر)								
۴/۷۰۳۴	۴/۴۸۰۳	۱/۴۳۱۴	۲/۹۵۴۷	۳/۳۶۷۹	۱۶	۱۲۹	Self	دپو ماسه
۱۸/۱۲۰۹	۱۶/۲۰۵۵	۸/۱۰۸۵	۱۰/۶۳۸۲	۱۲/۲۲۴۸			Pre	

دپو ماسه جایگذاری شد و طول دقیق آن با استفاده از یک متر کالیبره شده با دقت ۰/۵ میلی‌متر قرائت و مقدار ۱۲۲۰ میلی‌متر ثبت و به‌عنوان طول واقعی در نظر گرفته شد. این کار با هدف کنترل مضاعف و نیز برآورد دقت اندازه‌گیری طول روی مدل سه بعدی انجام شد. تصویر شاخص در شکل ۱۱ و خطای اندازه‌گیری آن در جدول (۸) نمایش داده شده‌است.

با توجه به عدم امکان فراخوانی ابر نقطه در Civil 3D ابتدا لازم است تا یک Mesh به نقاط تولید شده برازش داده شود. این مرحله با استفاده از درونیایی یک سطح که بیشترین انطباق را با نقاط دارد انجام می‌گیرد و سپس DEM تولید و با فرمت XML برای فراخوانی در Civil 3D خروجی گرفته شد. حجم هر سه نمونه و دپو ماسه محاسبه و با مقادیر واقعی و مقدار برآورد شده به روش توتال‌استیشن مقایسه شد. نتایج برآورد احجام در جدول (۹ و ۱۰) نمایش داده شده‌است.

با مشاهده برآوردها می‌توان دریافت، دوربین تلفن هوشمند نتایج قابل قبولی در مقایسه با مقدار واقعی احجام اندازه‌گیری شده ارائه می‌دهد. فشرده شدن ماسه هنگام تعیین حجم آن به‌وسیله ظرف حجمی را نیز می‌توان یکی از دلایل کاهش دقت در این نمونه دانست. اثر دقت دو روش پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون در برآورد احجام در مقیاس آزمایشگاهی بسیار اندک بود و نتایج هر دو روش بسیار به هم نزدیک بودند. اما در مقیاس کارگاهی روش پیش‌کالیبراسیون نتیجه‌ای حدود شش برابر متفاوت از حالت خودکالیبراسیون ارائه داد. به‌نظر می‌رسد خودکالیبراسیون به‌دلیل دقت بالاتر، خودکار بودن و سهولت انجام روش بهینه‌تری در استفاده از تلفن هوشمند به‌عنوان ابزار جمع‌آوری

جدول ۸- خطای اندازه‌گیری شاخص روی مدل سه بعدی. نتایج روش خودکالیبراسیون بصورت پررنگ نمایش داده شده‌است.

میزان خطا	طول واقعی	طول اندازه‌گیری شده	وضعیت کالیبراسیون	عارضه
واحد (میلی‌متر)				
۳	۱۲۲۰	۱۲۲۳	Self	میل
۸		۱۲۲۸	Pre	مقیاس

مختصات شانزده نقطه چک در ابر نقطه سه بعدی اندازه‌گیری شدند و RMSE نقاط چک هر دو حالت در جدول (۷) نمایش داده شده‌است. نتایج نشان دهنده نهایت خطای ۴/۷ میلی‌متر در حالت خودکالیبراسیون و ۱۸/۱ میلی‌متر در حالت پیش‌کالیبراسیون بودند و با توجه به استفاده از تصاویر، نقاط کنترل و چک یکسان در هر دو روش، مشاهده شد که خودکالیبراسیون دقت بالاتری را در موبایل - گرافی ممکن می‌سازد.



شکل ۱۱- تصویر شاخص مورد استفاده

یک شاخص ترازیابی نیز قبل از فیلم‌برداری بصورت اوریب طوری که از هر سه محور X, Y, Z تأثیر پذیرد روی

اطلاعات می‌باشد. در ادامه باید گفت این روش علاوه بر برآورد نمودن دقت مورد نیاز پروژه‌های عمرانی دارای مزایایی

همچون تراکم بالای نقاط، سرعت بالا، و هزینه کمتر در مقایسه با روش نقشه‌برداری زمینی است.

جدول ۹ - برآورد احجام و مقایسه با مقدار واقعی. نتایج روش خودکالیبراسیون بصورت پررنگ نمایش داده شده‌است.

جدول برآورد احجام (سانتی متر مکعب)				
درصد اختلاف	حجم واقعی	حجم برآورد شده	حالت کالیبراسیون	عارضه
۱/۲۸ %	۳,۳۶۸/۲۲۷	۳,۳۲۵/۱۱۳	Self (25 pic)	مکعب بتنی
۱/۵۶ %		۳,۳۱۵/۶۸۲	Pre (25 pic)	
۱/۳۴ %	۳,۵۰۹/۴۶۷	۳,۴۶۲/۴۴۰	Self (45 pic)	استوانه بتنی
۱/۵۲ %		۳,۴۵۶/۱۲۳	Pre (45 pic)	
۲/۹۸ %	۵,۵۱۶/۰۰۰	۵,۳۵۱/۶۲۳	Self (60 pic)	شن
۲ %		۵,۴۰۵/۶۸۴	Pre (60 pic)	

جدول ۱۰ - مقادیر احجام و مساحت برآورد شده به‌وسیله روش موبایل‌گرافی (در حالت پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون حلقه بسته) و نقشه‌برداری زمینی. نتایج روش خودکالیبراسیون بصورت پررنگ نمایش داده شده‌است.

خطا (%)	نقشه‌برداری زمینی	ویدئوگرامتری	خطا	نقشه‌برداری زمینی	ویدئوگرامتری	عارضه
حجم (متر مکعب)			مساحت سطح سه بعدی (متر مربع)			
۱/۰۰٪	۱۵۰/۳۵	۱۴۹/۲۲۶	۰/۰۶۴٪	۵۰۳/۸۳	۵۰۰/۶۰۱	self
۵/۸۱٪		۱۵۹/۱۰	۲/۰۹٪		۵۱۴/۴۱	pre

۵- نتیجه‌گیری

همانطور که در قسمت مروری بر تحقیقات گذشته اشاره شد علی‌رغم مطالعات زیاد انجام شده با استفاده از تلفن‌های هوشمند تعداد بسیار کمی از آنها شامل فرآیند کالیبراسیون بودند، همچنین در ادامه باید گفت محاسبه احجام با استفاده از آنها همچنان موضوعی جدید بوده و مطالعات اندکی در مقیاس آزمایشگاهی و کارگاهی در این زمینه توسط محققین انجام شده‌است. انتظار می‌رود این پژوهش ارزیابی کاملی از کیفیت و دقت هندسی نتایج فتوگرامتری با گوشی‌های هوشمند در مقایسه با روش‌های مرسوم ارائه داده باشد. این کار بخشی از تحقیقات در حال انجام در مورد استخراج اطلاعات مکانی دقیق و قابل اطمینان از مناظر، عوارض و اشیاء، با استفاده از تصاویر تلفن هوشمند است، که با هدف تطبیق موبایل‌گرافی به‌عنوان روشی برای برآورد احجام عملیات خاکی در پروژه‌های بزرگ عمرانی انجام گردید.

فواصل زمانی بین هر مرحله کالیبراسیون از یک دقیقه تا حداکثر یک هفته برنامه‌ریزی و کل فرآیند در مدت زمان دو

هفته با استفاده از برندهای مختلف تلفن هوشمند انجام شد. نتایج کالیبراسیون نشان دهنده وجود تغییرات پیوسته در فاصله اصلی، موقعیت نقطه اصلی X_0, Y_0 و مقادیر قابل توجه اعوجاج بود که عمدتاً نشأت گرفته از جنس عدسی و کوچک سازی‌های صورت گرفته روی این دسته از دوربین‌هاست. همچنین رابطه معنا داری بین قیمت تلفن هوشمند، برند و پایداری پارامترهای داخلی وجود نداشت، در این میان بعضی از آنها دارای ثبات و پایداری بهتر (تغییراتی مداوم و پیوسته در حد چند پیکسل) بودند اما اکثر تلفن‌ها دارای تغییرات شدیدتری عمدتاً برای فاصله اصلی دوربین بودند.

نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش تعداد تصاویر میزان دقت خودکالیبراسیون تا حدی بهبود یافته و از یک حد آستانه‌ای به بعد، دقت تغییر چندانی نمی‌کند. در واقع افزایش تعداد تصاویر همیشه باعث بهبود دقت کالیبراسیون نخواهد شد و بایستی تعداد بهینه تصاویر در پردازش‌ها مورد استفاده قرار گیرند. همچنین نتایج خودکالیبراسیون که در چهار حالت حلقه بسته، حلقه باز، منحنی و خطی انجام و در بالا ارائه شد نشان دهنده میزان تأثیر شبکه تصویربرداری

بر نتایج خودکالیبراسیون است. خودکالیبراسیون با دقت بالاتری با استفاده از تصاویر حلقه بسته انجام شد اما باید در نظر داشت، تصویربرداری بصورت حلقه بسته در بسیاری از موارد امکان پذیر نمی‌باشد.

این مطالعه در دو مقیاس آزمایشگاهی و کارگاهی انجام شد. به منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادی، RMSE نقاط چک و حجم برآورد شده با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی به عنوان مبنای کنترل دقت مورد استفاده قرار گرفت. در مقیاس کارگاهی، علاوه بر محاسبه RMSE نقاط چک، حجم برآورد شده نیز بصورت نسبی با نتایج روش توتال‌استیشن مقایسه شد. در مقیاس آزمایشگاهی، اثر دقت دو حالت پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون بسیار اندک بود. بیشترین میزان RMSE نقاط چک برابر با ۱/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در برآورد احجام نیز نتایج به‌دست‌آمده دارای اختلاف حداقل ۱/۲۸٪ و حداکثر ۲/۹۸٪ با حجم واقعی نمونه‌ها بودند. در مقیاس کارگاهی، حداکثر RMSE نقاط چک که مختصات آن‌ها با استفاده از توتال‌استیشن برداشت شده بود، برابر ۱۸/۱۲ و ۴/۷۰ میلی‌متر به ترتیب در حالت‌های پیش‌کالیبراسیون و خودکالیبراسیون اندازه‌گیری شد. همچنین طول شاخص نقشه‌برداری که بصورت اُریب و با هدف صحت‌سنجی اندازه‌گیری‌ها روی دیو ماسه قرار داده شده بود، به ترتیب با خطای ۸ و ۳ میلی‌متر در حالت‌های

مراجع

- [۱] Fawzy, H. E. (2015). "The accuracy of determining the volumes using close range photogrammetry." IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 12(2), 10-15.
- [۲] Wang, X., Al-Shabbani, Z., Sturgill, R., Kirk, A., & Dadi, G. B. (2017). "Estimating earthwork volumes through use of unmanned aerial systems." Transportation Research Record, 2630(1), 1-8.
- [۳] Hugenholtz, C. H., Walker, J., Brown, O., & Myshak, S. (2015). "Earthwork volumetrics with an unmanned aerial vehicle and softcopy photogrammetry." Journal of Surveying Engineering, 141(1), 06014003.
- [۴] Asri, N. A., & Ahmad, A. (2012). "The use of digital image for volume determination using digital close range photogrammetric method." In 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (pp. 321-324). IEEE.
- [۵] Vladan Blahni, Schindelbeck. (2021). "Smartphone imaging technology and its applications." From the journal Advanced Optical Technologies . <https://doi.org/1515/10/aot-2021-0023>
- [۶] DXO, Smartphones versus Cameras: Closing the Gap on Image Quality. (2020). Available at: <https://www.dxomark.com/smartphones-vs-cameras-closing-the-gap-on-image-quality/>.
- [۷] Smith MW, Carrivick JL and Quincey DJ. (2016). "Structure from motion photogrammetry in physical geography." Progress in Physical Geography 40(2): 247-275
- [۸] Ouédraogo MM, Degré A, Debouche C and Lisein J. (2014). "The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds." Geomorphology 214: 339-355.

- [۹] Fonstad MA, Dietrich JT, Courville BC, Jensen JL and Carbonneau PE. (2013). "Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement." *Earth Surface Processes and Landforms* 38(4): 421-430.
- [۱۰] OpenCV. Open-Source Computer Vision Library. (2015). Available online: <https://opencv.org> (accessed on 14 December 2022).
- [۱۱] Open Drone Map [Computer Software]. (2017). Available online: <https://opendronemap.org> (accessed on 14 December 2022).
- [۱۲] Meshroom is a free, open-source 3D Reconstruction Software based on the AliceVision Photogrammetric Computer Vision framework. (2018). Available online <https://github.com/alicevision/Meshroom> (accessed on 14 December 2022).
- [۱۳] Agisoft Cloud is an online platform for site inspection, annotation and documentation integrated with cloud processing service for the Metashape Professional users. <https://www.agisoft.com/> 2023 Agisoft
- [۱۴] Applications of Photogrammetry and PhotoModeler. <https://www.photomodeler.com/2023>.
- [۱۵] Matuzevičius, D.; Serackis, A. (2021). "Three-Dimensional Human Head Reconstruction Using Smartphone-Based Close-Range Video Photogrammetry." *Appl. Sci.* 2021, 12, 229.
- [۱۶] M.J. Westoby, J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, J.M. Reynolds. (2012). "Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications."
- [۱۷] N. Micheletti, J. H. Chandlerb, S. N. Lanea. (2014). "Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible Structure-from-Motion photogrammetry using a smartphone." *Earth Surface processes and landform*
- [۱۸] Li X. (1999). "Photogrammetric Investigation into Low-Resolution Digital Camera Systems." Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick
- [۱۹] Triggs B. (1998). "Autocalibration from planar scenes." *European Conference on Computer Vision ECCV98*: 89-105.
- [۲۰] Zhang Z. (2000). "A flexible new technique for camera calibration." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22(11): 1330-1334.
- [۲۱] Fraser CS. (2013). "Automatic camera calibration in close range photogrammetry." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 79(4): 381-388
- [۲۲] Clarke T.A, Fryer J.G. (1998). "The development of camera calibration methods and models." *The Photogrammetric Record*, 16 (91) (1998), 51-66
- [۲۳] Rongfu Tang. (2013). "Mathematical Methods for Camera Self-Calibration in Photogrammetry and Computer Vision." Faculty of Aerospace Engineering and Geodesy of the Universität Stuttgart
- [۲۴] DXO, Disruptive Technologies: Mobile Imaging taking Smartphone Cameras to Next Level, 2018a. Available at: <https://www.dxomark.com/disruptive-technologies-mobile-imaging-taking-smartphone-cameras-next-level/>
- [۲۵] Apollonio, F.; Fantini, F., Garagnani, S., Gaiani, M. (2021). "A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets." *Remote Sens.* 13, 486.
- [۲۶] Gaiani, M., Apollonio, F.I., Fantini, F. (2019). "Evaluating Smartphones Color Fidelity and Metric Accuracy for the 3d Documentation of Small Artifacts." *ISPRS—Int. Arch. Photogramm. Remote. Sens. Spat. Inf. Sci.* XLII-2/W11, 539-547.
- [۲۷] Brandolini, F., Cremaschi, M., Zerboni, A., Degli Esposti, M., Mariani, G.S., Lischi, S. (2020). "SFM-photogrammetry for fast recording of archaeological features in remote areas."
- [۲۸] Brandolini F. et al. (2019). "Estimating the potential of archaeo-historical data in the definition of geomorphosites and geo-educational itineraries in the Central Po Plain (N Italy)." *Geoheritage*, 11, 1371-1396.
- [۲۹] Ali Asadpour. (2021). "Documenting historic tileworks using smartphone-based photogrammetry." *Mersin Photogrammetry Journal* -3(1); 15-20

- [۳۰] Beltrami C. et al. (2019). "3D digital and physical reconstruction of a collapsed dome using SFM techniques from historical images." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42-2/W11, 217-224.
- [۳۱] G. Vacca, A. Dessi. (2022). "Geomatic supporting knowledge of cultural heritage aimed at recovery and restoration. The International Archives of the Photogrammetry." *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*
- [۳۲] L. H. Hansen, T. M. Pedersen, E. Kjems, S. Wyke. (2021). "Smartphone-based reality capture for subsurface utilities: experiences from water utility companies in Denmark." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*
- [۳۳] K. N. Fauzan, D. Suwardhi, A. Murtiyoso, I. Gumilar, T. P. Sidiq. (2021). "Close-range photogrammetry method for SF6 Gas Insulated Line (GIK) deformation monitoring." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*,
- [۳۴] Abdul Hannan Qureshi, Wesam Salah Alaloul, Arnadi Murtiyoso, Syed Saad, Bilal Manzoor. (2022). "Comparison of photogrammetry tools considering rebar progress recognition." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- [۳۵] Kirim Lee, Won Hee Lee. (2022). "Earthwork Volume Calculation, 3D Model Generation, and Comparative Evaluation Using Vertical and High-Oblique Images Acquired by Unmanned Aerial Vehicles." *Aerospace*
- [۳۶] Young Hyun Kim, Seung Su Shin, Hyun Kyu Lee, Eun Soo Park. (2022). "Field Applicability of Earthwork Volume Calculations Using Unmanned Aerial Vehicle." *Sustainability* ,14, 9331
- [۳۷] Abbas zadeh, Saeid. (2018). "Evaluation of Close-range photogrammetry capability in comparison with land mapping in order to calculate the volume of earthworks." *Technical Faculties, Mapping Engineering Department Tehran university*.
- [۳۸] Karami, A., sousouni, B., Hosseinaveh, A. (2015). "A novel contactless approach for calculating volumes of objects." *The 1st National Conference on Geospatial Information Technology*
- [۳۹] Rafał Wróżyński, Krzysztof Pyszny, Mariusz Sojka, Czesław Przybyła, and Sadžide Murat-Błażejewska. (2017). "Ground volume assessment using 'Structure from Motion' photogrammetry with a smartphone and a compact camera." *Open Geosci.*; DOI 1515/10/geo-2017-0023
- [۴۰] Hossam El-Din Fawzy. (2018). "Study the accuracy of digital close range photogrammetry technique software as a measuring tool." *Alexandria Engineering Journal* 58, 171–179.
- [۴۱] Wahib Saif and Adel Alshibani. (2022). "Smartphone-Based Photogrammetry Assessment in Comparison with a Compact Camera for Construction Management Applications." *Appl. Sci.* 12, 1053. <https://doi.org/3390/10/app12031053>
- [۴۲] Elvis Ha Heng Siong, Mohd Farid Mohd Ariff, Ahmad Firdaus Razali. (2022). "The application of smartphone based structure from motion (sfm) photogrammetry in ground volume measurement." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLVIII-4/W6
- [۴۳] Wahib Saif, Adel Alshibani.2023. A Close-Range Photogrammetric Model for Tracking and Performance Based Forecasting Earthmoving Operat.<https://www.researchgate.net/publication/371446255>
- [۴۴] Bessin, Z., Jaud, M., Letortu, P., Vassilakis, E., Evelpidou, N., Costa, S., Delacourt, C., 2023. 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 Sensing*, 15(15): 3824.
- [۴۵] Patonis, P. (2024). A Comparative Study on the Use of Smartphone Cameras in Photogrammetry Applications. *Sensors* 2024, 24, 7311. <https://doi.org/10.3390/s24227311>.
- [۴۶] Wolf, P. R., DeWitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of photogrammetry with applications in GIS* (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- [۴۷] Z. Zhang. (2004). "Camera calibration with one-dimensional objects." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no. 7, pp. 892-899.

- [۴۸] Tsai, R. Y. (1987). *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*. IEEE Journal of Robotics and Automation, 3(4), 323-344.
- [۴۹] Ferruh Yilmazturk, Ali Ersin Gurbak. (2019). "Geometric Evaluation of Mobile-Phone Camera Images for 3D Informatio." Hindawi International Journal of Optics Volume, Article ID 8561380, 10 pages
- [۵۰] Fryer J.G, Brown D.C. (1986). "Lens distortion for close-range photogrammetry." Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 51-58.
- [۵۱] Rostam. Gol mohammadei. (2016). "Guide to measuring and evaluating lighting in the work environment." Student publications. Hamedan
- [۵۲] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley, and A. W. Fitzgibbon. (1999). "Bundle adjustment—a modern synthesis, in International workshop on vision algorithms." pp. 298-372: Springer