ارزیابی روش ویدئوگرامتری برای محاسبه حجم عملیات خاکی در مقایسه با روش‌های مرسوم نقشه‌برداری زمینی

مهران شفیعی[۱]، اصغر میلان*[۲]

۱. دانشجو کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران
۲. استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی تهران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

چکیده

محاسبه حجم عملیات خاکی در معادن از موضوعات چالش برانگیز، پر هزینه و زمان‌بر این حوزه به شمار می‌رود. در پروژه‌های معدنی برای برنامه‌ریزی فروش محصولات تولید شده و محاسبه هزینه-عملکرد پیمانکاران، محاسبه احجام خاک‌برداری برای برآورد حجم استخراجی ضروری است. محاسبه احجام خاکی با چالش‌های زیادی مانند انتخاب بهترین ابزار و روش اندازه‌گیری، تطبیق نقشه‌های تولید شده در اپوک‌های مختلف، اعمال ضرایب تورم و تبدیل حجم به وزن همراه است. امروزه ابزارهایی چون اسکنرهای لیزری، توتال‌استیشن‌ها و دوربین‌های متریک برای محاسبه احجام خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما استفاده از آن‌ها هزینه‌بر بوده و نیاز به اپراتور با تجربه دارد. بنابراین لازم است روش‌های محاسبه احجام در زمان کمتر با دقت قابل قبول بررسی شود. در این تحقیق استفاده از گوشی‌های هوشمند برای برآورد بهینه حجم عملیات خاکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. داده‌های تصویری به‌دست‌آمده از گوشی هوشمند با روش ساختار ناشی از حرکت (SFM) پردازش شد و خروجی آن برای تولید مدل رقومی ارتفاعی به منظور تخمین حجم عملیات خاکی استفاده شد. اختلاف حجم خاک محاسبه شده نسبت به روش‌های آزمایشگاهی و توتال استیشن برای دپو خاک و گودبرداری مورد مطالعه به ترتیب ۳/۸۶٪ و ۱/۸۴٪ است که نشان می‌دهد روش مورد استفاده در این تحقیق از دقت لازم برای محاسبه احجام خاکی برخوردار است، و با توجه به مزیت‌های زیادی که نسبت به روش‌های مرسوم از نظر هزینه و زمان دارد، می‌تواند جایگزین آن‌ها شود.

کلمات کلیدی: فتوگرامتری برد کوتاه، تلفن هوشمند، ویدئوگرامتری، ساختار ناشی از حرکت، حجم عملیات خاکی.

مقدمه

انتخاب روش بهینه انجام مشاهدات برای محاسبه حجم عملیات خاکی از نظر دقت، زمان و هزینه چالشی است که پاسخ مناسب به آن بسته به شرایط منطقه از نظر توپوگرافی، پوشش گیاهی، بافت مسکونی، وسعت، نحوه دسترسی و غیره متفاوت خواهد بود. بنابراین هیچکدام از روش‌ها برتری مطلق بر دیگری نداشته و بسته به شرایط پروژه باید سعی در انتخاب بهینه‌ترین روش نمود. از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر دقت احجام نهایی محاسبه شده، دقت نسبی

* نویسنده مسئول: a_milan@sbu.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.2.1019281

تعیین موقعیت نقاط برداشتی (X,Y,Z)، تراکم و توزیع نقاط می‌باشد. در تمامی روش‌های کلاسیک نقشه‌برداری مانند برداشت با توتال‌استیشن و GNSS[1]، دقت مؤلفه ارتفاعی کمتر از مؤلفه مسطحاتی است و روش‌های نسبتاً جدید نقشه‌برداری نظیر فتوگرامتری با پهپاد نیز از این قاعده مستثنا نیستند. هرچه دقت مشاهدات انجام شده بیشتر باشد قابلیت اطمینان و صحت پردازش‌های بعدی نیز بیشتر می‌گردد. مورد بعد، تراکم و نحوه توزیع نقاط برداشتی است که به‌طور مستقیم بر انطباق سطح ۳ بعدی نهایی با واقعیت، اثرگذار است (Raevaa et al., 2016). هرچه نقاط از تراکم بیشتر و توزیع مناسب‌تری برخوردار باشند به‌خصوص در مناطق دارای توپوگرافی شدید، مدل ۳ بعدی ایجاد شده به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. در این میان، روش کلاسیک برداشت نقاط با توتال‌استیشن در بحث تراکم نقاط با محدودیت‌هایی روبرو است (Langhammer et al., 2018) و با افزایش نقاط برداشتی، هزینه و زمان اجرای پروژه از یک سو افزایش یافته و از سوی دیگر سطح برازش داده شده اولیه نرم‌افزار Civil 3D برای حجم بالای نقاط با توپوگرافی پیچیده در اکثر مواقع صحیح نبوده و نیاز به اصلاح دارد. اصلاح سطح برازش شده به‌صورت دستی انجام می‌شود که امری زمان بر و گاهی اوقات پیچیده خواهد بود. با این حال، دقت روش کلاسیک به خوبی ثابت شده و سالهاست که مبنای برآورد احجام عملیات خاکی در پروژه‌های عمرانی است. البته با گسترش روش‌های فتوگرامتری برد کوتاه، امکان استفاده از تصاویر و داده‌های فتوگرامتری برد کوتاه به منظور محاسبه احجام خاکی در تحقیقات مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

فتوگرامتری هوایی رقومی، برد کوتاه و ویدئوگرامتری ابزاری کاربردی برای مدل‌سازی ۳ بعدی سطح زمین (Remondino and El-Hakim, 2006, Matthews, 2008, Fraser and Cronk, 2009) و یا اندازه‌گیری دقیق اجسام از عکس‌ها، فریم‌های ویدئو و یا تصاویر رقومی گرفته شده با دوربین از فاصله نزدیک است. تصاویر متعدد و یا ویدئوهایی با رعایت یکسری اصول از منظرهای مختلف گرفته شده و برای تولید مدل ۳ بعدی دقیق از سطح زمین و اشیاء استفاده می‌شود (Cooper and Robson, 1996). یک ویدئو یا فیلم در اصل نمایش پشت سر هم تصاویری است که با سرعت خاصی از یک صحنه گرفته شده است. بنابراین تولید مدل ۳ بعدی با استفاده از همه فریم‌های یک دنباله ویدئویی، به دلیل نرخ بالای فریم بر ثانیه ضبط فیلم و توان پردازشی مورد نیاز عملاً غیر ممکن است به همین دلیل باید فریم‌های دارای بهترین ساختار برای بازسازی به‌عنوان نماینده کل فریم‌ها در دنباله ویدئویی انتخاب شوند. از دلایل اقبال و میل به این روش‌ها در سال‌های اخیر، دقت بالای مدل‌های ساخته شده، سرعت بالای اکتساب داده‌ها در مقایسه با روش‌های کلاسیک و امکان استفاده از دوربین‌های تجاری ارزان قیمت می‌باشد (Carbonell, 1989). البته انتخاب ابزار اکتساب داده به عوامل و ملاحظات مختلفی از جمله هدف از ساخت مدل ۳ بعدی، سطح جزئیات مورد نیاز، تجربه اپراتور، دسترسی به سوژه و بودجه اختصاص داده شده وابسته است (Mohammadi et al., 2021).

از سوی دیگر توسعه الگوریتم‌های متنوع استخراج عوارض مبتنی بر زوج تصویر استریو و بکارگیری آن‌ها در نرم-افزارهای تولید مدل ۳ بعدی، باعث افزایش کیفیت و سهولت کار با این داده‌ها شده است (Chandle, 1999, Lane et al., 2000). امروزه انواع الگوریتم‌ها برای مدل‌سازی ۳ بعدی از اشیاء استفاده می‌شود که یکی از رایج‌ترین آن‌ها SFM[2] است. این روش در دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت، اساس آن بر بینایی کامپیوتر استوار بوده (Harris and

[1] Global Navigation Satellite System
[2] Structure From Motion

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

(Stephens, 1988 و موجب توسعه الگوریتم‌های تشخیص و تطبیق خودکار ویژگی‌های شیء و نیز پیدایش طیف وسیعی از نرم‌افزارهای تولید ابر نقاط نظیر Agisoft وPix4d Mapper شده است.

روش ساختار ناشی از حرکت (SFM) یک روش برای تخمین ساختارهای ۳ بعدی از تصاویر و یا فریم‌های متوالی ۲ بعدی است که ممکن است در حال حرکت اخذ شده باشند به عبارت دیگر فرآیند بازیابی موقعیت هر دوربین که به صحنه نگاه می‌کند و هندسه پراکنده صحنه است، برای این منظور تنها به آرشیو تصاویر به‌دست آمده در مرحله جمع-آوری داده نیاز است و خروجی این الگوریتم ابر نقطه پراکنده و پارامترهای توجیه دوربین می‌باشد (عباس زاده،۱۳۹۷). در واقع مشکل کلیدی که SFM به آن می‌پردازد محاسبه موقعیت ۳ بعدی نقاط مشترک در چند تصویر است که از زوایا و فواصل مختلف گرفته شده و دارای مقیاس‌های متفاوت هستند. برخلاف روش‌های فتوگرامتری سنتی که لازم به معرفی موقعیت ۳ بعدی دوربین‌ها در لحظه عکس‌برداری و یا معرفی نقاط کنترل زمینی برای تسهیل مثلث‌بندی و بازسازی صحنه می‌باشد، در روش SFM موقعیت دوربین و هندسه صحنه به‌صورت خودکار و همزمان با استفاده از سرشکنی دسته اشعه و بر اساس تطبیق ویژگی اجسام درون تصویر تعیین می‌گردد، در واقع همین موضوع تفاوت اصلی میان فتوگرامتری استرئو[1] و SFM می‌باشد(James and Robson, 2012) همچنین با این روش می‌توان از چند دوربین مختلف برای یک پروژه استفاده و به مدل ۳ بعدی دست یافت اما برای افزایش دقت متریک ترجیح بر استفاده از یک دوربین ثابت و یا در حالت بکارگیری چند دوربین به‌طور همزمان بهتر است تمامی آن‌ها از یک نوع و با مشخصات یکسان باشند. این روش امکان جمع‌آوری اطلاعات بسیار پیچیده و کامل را در مدت زمان کوتاهی فراهم می‌کند که یک مزیت بزرگ برای اهداف نقشه‌برداری و مستندسازی است (Fonstad et al., 2013). بعلاوه، این روش می‌تواند در مطالعات موردی مختلف و برای به‌دست آوردن اطلاعات در مقیاس‌های گوناگون مورد استفاده قرار گیرد.

SFM یک روش واحد نیست بلکه یک روند کاری است که از الگوریتم‌های متعدد توسعه یافته از قبیل بینایی کامپیوتر، فتوگرامتری سنتی و روش‌های مرسوم‌تر استفاده می‌کند. روند کاری SFM را می‌توان به‌طور خلاصه این‌گونه بیان کرد:

- استخراج نقاط کلیدی در هر تصویر و یافتن نقاط نظیر آن‌ها در تصاویر دارای همپوشانی.
- استخراج هندسه شبکه تصویر با استفاده از سرشکنی دسته اشعه بازسازی و پارامترهای توجیه داخلی (فاصله کانونی، نقطه اصلی و پارامترهای اعوجاج) و همچنین پارامترهای توجیه خارجی (۳ انتقال و ۳ دوران).
- محاسبه مختصات ۳ بعدی شئ در یک سیستم مختصات دلخواه از روی موقعیت ۲ بعدی نقاط متناظر تصویر و تولید یک ابر نقطه غیرمتراکم (Eltner and Sofia, 2020).

با توجه به حرکت و تغییر پیوسته زاویه دید دوربین در حین فیلم‌برداری تصاویر استخراجی از مقیاس‌های متفاوتی برخوردار هستند. مشکل اساسی کار با تصاویر چند مقیاسه عدم توانایی در حل مشکل استخراج عوارض یکسان در مقیاس‌های مختلف است. در نتیجه تعداد بسیار زیادی از عوارض نقطه‌ای استخراج شده، مربوط به ساختاری یکسان بوده که موقعیت مکانی آن‌ها به میزان بسیار اندکی با یکدیگر متفاوت است. این مسئله باعث ایجاد ابهام در تناظریابی و افزایش پیچیدگی محاسباتی می‌شود. راه حل آن انجام تناظریابی در سطوح مختلف مقیاس به‌طور جداگانه و یا اضافه کردن یک مرحله پس‌پردازش برای بهبود دقت تناظریابی می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از

[1] Stereoscopic

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

الگوریتم‌های تناظریابی عارضه مبنا در روش SFM مانند الگوریتم SIFT[1] نتایج مفیدی به همراه دارد (Govender, 2009).

الگوریتمSIFT یک روش برای آشکارسازی و استخراج عوارض مستقل از مقیاس تصویر است و می‌تواند برای تناظریابی نقاط و اشیاء در تصاویر دارای پوشش مشترک مورد استفاده قرار گیرد. این الگوریتم اساساً برای حل مسئله اختلاف مقیاس میان تصاویر طراحی شده، مستقل از اختلافات چرخشی و روشنایی میان آن‌ها بوده و در برابر تغییر شکل ناشی از تغییر منظر اخذ تصویر و نویز پایدار است (Lowe, 2004) و غالباً برای کاربردهایی نظیر تشخیص شیء، تناظریابی تصاویر، ردیابی و ساختن مناظر ۳ بعدی، بازسازی شیء در بانک‌های اطلاعاتی چند رسانه‌ای (مولتی مدیا) و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سوی دیگر تعداد نقاط کلیدی قابل استخراج یک تصویر به بافت و وضوح آن نیز وابسته است، به‌طوری که تصاویر پیچیده با وضوح بالا و بافت غیریکنواخت بهترین نتیجه را خواهند داد و تراکم ابر نقطه نهایی را افزایش می‌دهند. تغییرات در پیچیدگی، نور و مواد از منظرهای متفاوت همگی بر بافت تصویر تأثیرگذارند. بنابراین بیان عددی صحیح در مورد حداقل تعداد تصاویر لازم برای بازسازی صحنه غیر ممکن است اما صحنه مورد بازسازی باید حداقل در ۲ تصویر قابل مشاهده باشد. با این حال هرچه تعداد تصاویر برای تناظریابی بیشتر باشد تعداد نهایی نقاط کلیدی بیشتر شده و در نتیجه افزونگی سیستم را بهینه می‌کند. هنگام تهیه تصاویر باید توجه ویژه‌ای برای به حداکثر رساندن همپوشانی و به‌دست آوردن پوشش یکنواخت از ویژگی یا منظره مورد نظر صورت گیرد. پس از شناسایی نقاط کلیدی از سرشکنی دسته اشعه برای تخمین موقعیت و وضعیت دوربین در لحظه تصویربرداری و استخراج یک ابر نقطه با چگالی کم استفاده می‌شود. پس از پیدا کردن نقاط کلیدی بر اساس مقایسه یک پیکسل با پیکسل‌های مجاور در گام بعدی با استفاده از یک مدل دقیق، نقاط کلیدی با دقت بیشتری مشخص خواهند شد و نقاط کلیدی نامحتمل از لیست نقاط کلیدی فیلتر خواهند شد. تابع مورد استفاده یک تابع 3Dquadratic در فضای مقیاس با استفاده از بسط سری تیلور خواهد بود. در الگوریتم SFM هر چند داده‌های ابر نقاط را در غیاب پارامترهای پیش کالیبراسیون می‌توان به‌دست آورد اما اندازه‌گیری‌ها بدون کالیبراسیون دوربین با دقت پائینی انجام می‌شود (Shao et al., 2023). شرط هم خطی این امکان را فراهم می‌کند که کالیبراسیون دوربین را همزمان با اندازه‌گیری شئ و با استفاده از سرشکنی دسته اشعه انجام داد، این مدل کالیبراسیون دوربین را خود واسنجی[2] می‌نامند (Zhang et al., 2023). تعداد کافی از تصاویر با زوایای همگرا برای رسیدن به سطح بالایی از دقت در خود واسنجی مورد نیاز است. امروزه تمام نرم‌افزارهایی که از الگوریتم SFM استفاده می‌کنند می‌توانند خود واسنجی را همزمان با تخمین مختصات نقاط موجود در تصاویر دارای همپوشانی انجام دهند (Altuntaş, 2021). نهایتاً در مورد فضای مدل، یادآور می‌شود که از لحاظ مقیاس، مقیاس فضای مدل رابط بین مقیاس تصویر و مقیاس نقشه است که ممکن است برابر با همان مقیاس تصویر و یا بزرگ‌تر باشد. تبدیل از سیستم مختصات مدل به سیستم مختصات شیء (زمین مرجع سازی) از طریق شناسایی دستی یا خودکار نقاط کنترل زمینی (GCP[3]) و یا بر اساس استفاده از شاخص مقیاس در هنگام تصویربرداری و معرفی طول واقعی آن به نرم‌افزار انجام می‌گردد. اکنون با مشخص بودن پارامترهای عمق و مقیاس مختصات ۳ بعدی نقاط و مدل ارتفاعی در سیستم مختصات شیء حاصل می‌شود.

---

[1] Scale Invariant Feature Transform
[2] Self-Calibration
[3] Ground Control Point

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

ضریب اطمینان حجم نهایی محاسبه شده ارتباط مستقیم با دقت برداشت تمام اجزاء شیء دارد. عوامل مختلفی همچون ویژگی‌های هندسی، طیفی و رزولوشن دوربین مورد استفاده، فاصله دوربین تا عارضه، تعداد و موقعیت ایستگاه‌های فیلم‌برداری، تعداد فریم تصاویر استخراج شده در هر ایستگاه، زاویه دید دوربین نسبت به عارضه و تارگت-های مورد استفاده و دقت نقاط کنترل بر روی دقت نهایی نتایج حاصل از ویدئوگرامتری تأثیرگذار است. (Yakar et al., 2013). هنگام محاسبه حجم اطمینان حاصل کردن از دقت تمام عناصر برداشت شده برای نیل به نتایج صحیح امری ضروری است.

با توجه به موارد ذکر شده و نحوه کار این روش می‌توان از موارد زیر به‌عنوان اصلی‌ترین چالش‌های روش ویدئوگرامتری نام برد (Yilmaz and Yakar, 2008):

- کاهش کیفیت تصویر به دلایلی چون (نور، مشکلات فوکوس، تاری، وضوح تصویر).
- کالیبراسیون دوربین (اپتیک ناپایدار به دلیل استفاده از دوربین غیر متریک و عدم کالیبراسیون).
- اخذ تصاویر غیر بهینه (بدون میدان دید وسیع یا تصاویر بدون همپوشانی کافی).
- سرعت حرکت در حین فیلم‌برداری (Hollick et al., 2013, Hanif and Seghouane, 2012).

استفاده از روش‌های فتوگرامتری برد کوتاه برای محاسبه حجم عملیات خاکی و همچنین سایر مطالعات مربوط به خاک توسط محققین مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است که در این بخش به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. قره‌قاجلو و اونال در سال ۲۰۱۸ برای ارزیابی خواص هندسی نمونه‌های خاک از روش فتوگرامتری ساختار ناشی از حرکت SFMو مقایسه نتایج آن با روش معمول پوشش موم[1] استفاده کردند. در روش پوشش موم ابتدا نمونه خاک با استفاده از پارافین برای بستن سوراخ‌ها و جلوگیری از نفوذ آب به خاک به‌طور کامل موم کشی شده و پس از خشک شدن، نمونه موم شده را در سیلندر مدرج پر از آب مقطر با چگالی یکپارچه غوطه‌ور می‌کنند و حجم آن با اندازه‌گیری اختلاف بین دو سطح آب قبل و بعد از قرار دادن خاک با پوشش موم در سیلندر مدرج محاسبه می‌گردد (روش ارشمیدوسی). آن‌ها در تحقیق خود حجم نمونه خاک مورد مطالعه را با استفاده از ۱۰۸ تصویر اخذ شده به‌وسیله دوربین Canon PowerShotS100 تهیه و با مقدار برآورد شده در روش پوشش موم مقایسه کردند. در پایان دانسیته خاک ۲/۴۲۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در روش فتوگرامتری و ۲/۴۱۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در روش پوشش موم برآورد و نشان‌دهنده اختلاف ۰/۰۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب دو روش در برآورد حجم بوده است (Gharehaghajlou1 and Önal, 2018). وروزینسکی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با هدف امکان سنجی استفاده از ویدئوگرامتری با تلفن همراه آزمایشی طراحی کردند. آن‌ها ابتدا مدل رقومی خاک‌ریزی، در مقیاس آزمایشگاهی و با حجم معلوم را از طریق دو اندازه‌گیری مستقل انجام شده با یک دستگاه تلفن همراه iPhone5 و دوربین رقومی CanonG9 تولید کردند. در تمام روند تحقیق داده‌های ورودی از فریم‌های ویدئویی تهیه شده است. برای تحلیل و مقایسه تراکم ابر نقاط، مدل‌های تولید شده با هر ۲ دستگاه را در نرم‌افزار Cloud Compare بارگذاری کردند و تفاوت معنی‌داری بین مدل‌های تولید شده با ۲ دستگاه مختلف مشاهده نکردند و نیز اختلاف حجم مدل‌ها با حجم واقعی ۰/۷٪ و ۲٪ بوده است. پس از تائید موفقیت‌آمیز آزمایشگاهی اندازه‌گیری‌های میدانی روی تپه‌ای خاکی به همین ترتیب انجام شده، و مدل تولید شده با دوربین CanonG9 به‌عنوان مبنای مقایسه قرار گرفته است. آن‌ها هنگام

[1] wax coating

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

ساخت مدل از داده‌های به‌دست آمده با گوشی هوشمند، مشاهده کردند یک سری فریم تقریباً معادل ۱۴٪ 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 به‌دست آمده با دوربین رقومی ۷٪ تفاوت داشته است. آن‌ها به منظور بهبود همگنی، فرکانس استخراج فریم در محلی که قاب‌ها قبلاً وجود نداشتند را افزایش داده و یک مدل با توزیع یکنواخت تراکم ابر نقطه‌ای به‌دست آوردند و در نهایت به تفاوت ۱/۵٪ بین حجم خاک محاسبه شده از طریق فیلم ضبط شده توسط دوربین رقومی و تلفن همراه دست یافتند (Wróżyński et al., 2017). موزیککو و همکاران در سال ۲۰۲۳ اقدام به تولید مدل رقومی یک مقبره از طریق روش ویدئوگرامتری با تلفن هوشمند HuaweiP30 نمودند. آن‌ها برای ارزیابی مدل خود از مدل تولید شده به‌وسیله فتوگرامتری برد کوتاه با دوربین رقومی NikonD3300 و نیز مدل حاصل از لیزر اسکن زمینی CAM2 FARO Focus 3D120 استفاده کرده‌اند. مقایسه متریکی مقاطع عرضی ترسیم شده نشان داده است که حتی اگر مقادیر آماری محاسبه شده (RMSE و متوسط فاصله) بین فتوگرامتری و ویدئوگرامتری در مقایسه با ابر نقطه اسکن لیزری مشابه باشد، بازهم ابر نقطه فتوگرامتری چسبندگی بیشتری با اسکنر لیزری خواهد داشت. در پایان آن‌ها به بررسی کیفیت بافت مدل‌ها پرداختند و نتایج نشان‌دهنده این بوده که ارتوفتوی تولید شده از روش فتوگرامتری کیفیت بافتی غنی‌تری نسبت به روش لیزراسکن و ویدئوگرامتری دارد(Musicco et al., 2023) .

بالاگوئر-پویگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از مدل‌های رقومی تهیه شده از طریق فتوگرامتری برد کوتاه، به بررسی تغییرات سطح زمین ناشی از فرسایش آبی پرداختند. در این تحقیق برخی از مراحل فرسایش آبی در آزمایشگاه و با استفاده از شبیه‌سازهای بارندگی و جعبه‌های خاک با مساحت ۱ متر مربع انجام گرفته بود. طبق گزارش آن‌ها تحت این شرایط فرآیندهای فرسایشی می‌توانند به تغییرات سطحی بسیار کوچک منجر شوند. در نتیجه برای آشکارسازی، اندازه‌گیری و همچنین برآورد حجم تغییرات بین هر جفت قسمت بارندگی مدل‌های رقومی با دقت بالا مورد نیاز است. آن‌ها به موازات کار فتوگرامتری رسوبات حاصل از هر جفت شبیه‌سازی باران را جمع‌آوری و مبنای ارزیابی دقت و کیفیت مدل رقومی تولید شده به روش فتوگرامتری قرار دادند. در نهایت آنالیزهای صورت گرفته نشان-دهندهٔ همبستگی بالا بین نتایج حاصل از هر دو روش بوده است(Balaguer-Puig et al., 2017) .

عباس زاده سال ۱۳۹۷ در پایان‌نامه خود اقدام به محاسبه حجم عملیات خاکی پرتال ورودی تونل سد و نیروگاه درالوک، واقع در کردستان عراق با ۲ روش فتوگرامتری برد کوتاه (بدون استفاده از پهپاد) و نقشه‌برداری زمینی (با استفاده از توتال‌استیشن) نموده است. وی در این تحقیق از دوربین‌های عکاسی Sony-A700 و Nikon-D5300 برای جمع‌آوری اطلاعات فتوگرامتری برد کوتاه به منظور تولید مدل رقومی منطقه مورد مطالعه استفاده کرده، عملیات نقشه‌برداری زمینی نیز به‌صورت همزمان و با هدف ایجاد مبنایی برای سنجش میزان صحت و دقت روش فتوگرامتری برد کوتاه و همچنین تعیین مختصات نقاط کنترل انجام گرفته است. کلیه مشاهدات در ۳ بازه زمانی متفاوت انجام شده است. در انتها فتوگرامتری برد کوتاه بیش از ۲ برابر سریع‌تر و حدود ۴۰٪ ارزان‌تر از روش نقشه‌برداری زمینی بوده است. او با مقایسه احجام نهایی محاسبه شده از طریق هر دو روش با یکدیگر به اختلاف تا ۳٪ میان آن‌ها دست یافت (عباس زاده،۱۳۹۷). توچی و همکاران در سال ۲۰۱۹ از فتوگرامتری برد کوتاه (با استفاده از پهپاد) برای نظارت محاسبه حجم انبار زباله جدا شده در زنجیره بازیافت استفاده نمودند. آن‌ها برای ارزیابی مدل خود از یک مدل تولید شده با استفاده از لیزر اسکن زمینی استفاده نمودند. ابر نقطه تولید شده به‌وسیله

روش فتوگرامتری بر اساس ۲ سری پرواز پهپاد با تنظیم دوربین به‌صورت قائم و مایل انجام گرفته بود. نقاط کنترل مورد نیاز روش فتوگرامتری برای پردازش داده‌ها از داده‌های لیزر اسکن زمینی استخراج گردید البته آن‌ها از ابر نقطه تولید شده به‌وسیله لیزر اسکن زمینی نیز برای تست دقت ابر نقطه تولید شده به‌وسیله روش فتوگرامتری استفاده نمودند. با مقایسه مدل رقومی تولید شده به‌وسیله فتوگرامتری با مدل رقومی تولید شده به وسیله لیزر اسکن زمینی، توچی و همکارانش به میانگین خطاهای چند سانتی‌متری بین ۲ سری محصول دست یافتند. که این مقدار خطا در مدل رقومی تقریباً ۱٪ خطا در حجم‌های محاسبه شده را نشان داد (Tucci et al., 2019).

شان و همکاران سال ۲۰۲۳ در مقاله‌ایی 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. ساختمان دانشگاه پِرودو[1] 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 دریافتند که دقت تعیین موقعیت به‌وسیله تصاویر گوشی‌های هوشمند با زمین مرجع کردن مستقیم[2] ۱۶۵/۴سانتی‌متر است، اما با معرفی داده‌های لیدار هوایی و نیز نقاط زمینی برداشت شده با توتال‌استیشن به‌عنوان نقاط کنترل زمینی، دقت تعیین موقعیت به ترتیب تا ۴۳/۳ و ۱۴/۵ سانتی‌متر بهبود یافته که برابر با دقت پهپاد معمولی بوده است. ولی آن‌ها با استفاده از پهپاد فتوگرامتری و شرایط یکسان به دقت تعیین موقعیت ۳/۷ سانتی‌متر دست یافته‌اند.

کورادتی و همکاران در سال ۲۰۲۱ مطالعه‌ای با هدف جایگزینی دوربین رقومی، گیرنده‌های دستی GNSS و قطب نما با گوشی هوشمند انجام دادند. آن‌ها مدل ۳ بعدی زمین‌شناسی یک گسل فعال در منطقه آپنین[3] ایتالیا را از طریق روش فتوگرامتری و ویدئوگرامتری با تلفن هوشمند Xiaomi 9T pro تولید و ابتدا ۲ مدل را با یکدیگر مقایسه و سپس با مدل زمین‌شناسی موجود از منطقه مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند اکتساب توالی ویدئو می‌تواند مدل منسجم‌تری ارائه دهد، با این فرض که منطقه نقشه‌برداری شده نسبتاً پیوسته است. از سوی دیگر، همپوشانی بیش از حد توالی‌های ویدیوئی، انطباق تصاویر را پیچیده می‌کند. همچنین استفاده از فریم‌های ویدیوئی به معنای عدم کنترل سرعت شاتر، دیافراگم، ISO و غیره است و فریم‌های ویدیوئی پشت سر هم تغییر منظر کوچکی نسبت به هم دارند. اما تصاویر ثابت گرفته‌شده به‌طور انتخابی، معمولاً نتیجه بهتر و زمان پردازش کوتاه‌تری را تضمین می‌کنند. آن‌ها در این مطالعه به دقت زیر میلی‌متر برای هر ۲ روش فتوگرامتری و ویدئوگرامتری که انطباق بالایی با مدل موجود داشته است دست یافتند (Corradetti et al., 2021).

فنگ و همکاران سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای عملکرد یک سیستم اندازه‌گیری متشکل از ۹ گوشی هوشمند (از ۳ مدل گوشی Samsung G3589W, Google Pixel2, Huawei Mate40 که از هر مدل ۳ گوشی در ۳ ردیف بکار رفته

[1] Purdue
[2] Direct Georeferenced
[3] Apennine

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

بود) را به‌صورت همزمان برای آزمایش‌های زمین لغزش مورد ارزیابی قرار دادند. در این آزمایش از ۲ مدل سطح شیب‌دار استفاده گردیده است که دارای ابعاد ۵۰×۱۱۰ سانتی‌متر و با اندازه ذرات متفاوت یکی شن با ابعاد ۲۸ میلی‌متر و دیگری ماسه بوده است. آن‌ها داده‌های لیزر اسکن ۳ بعدی را معیار سنجش دقت و صحت سیستم اندازه-گیری فتوگرامتری قرار داده‌اند. با توجه به تعداد تلفن‌های هوشمند و شرایط همپوشانی سطح مدل شیب‌دار برای بررسی تأثیر چیدمان تلفن، ۳ حالت مختلف را در نظر گرفتند. در حالت اول، تصویربرداری از کل سطح شیب‌دار، هر گوشی هوشمند حاوی یک تصویر کامل از سطح مدل شیب‌دار بوده است. در حالت دوم، تصاویر اخذ شده توسط گوشی‌ها از یک‌سوم سطح مدل شیب‌دار می‌باشد یعنی قسمت مشترک بین گوشی‌ها یک‌سوم سطح مدل شیب‌دار بوده است و در حالت سوم، تصاویر اخذ شده توسط گوشی‌ها از دوسوم قسمت سطح مدل شیب‌دار می‌باشد یعنی قسمت مشترک بین گوشی‌ها دارای همپوشانی دوسوم سطح مدل شیب‌دار بوده‌اند. در نهایت آن‌ها دریافتند سیستم اندازه-گیری متشکل از چند گوشی هوشمند عملکرد خوبی در ارزیابی صحت داشته و RMSE خطا ۲/۷ میلی‌متر بوده اما در ارزیابی نقاط از طریق سیستم تلفن هوشمند یکسان و عکس‌برداری از کل منطقه، دقت بالاتر رفته و RMSE خطا ۰/۶۴ میلی‌متر بوده است (Fang et al., 2022).

بسین و همکاران سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای برای بررسی میزان ریزش دیواره صخرهٔ ساحلی ناواجیو[1] یونان از روش SFM مبتنی بر گوشی هوشمند و قایق در حال حرکت، پهپاد فتوگرامتری DJI Phantom 4 Pro RTK و تصاویر ماهواره Pléiades استفاده و در پایان ۳ مدل تولید شده را از جنبه‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. طول محدوده ۱۱۲۰۰ متر خط ساحلی با ارتفاع ۴۰۰ متر بوده عکس‌برداری روی قایق از دو فاصله ۵۰ تا ۲۰۰ متر (مسیر رفت) و ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر (در مسیر برگشت) با استفاده از ۳ گوشی هوشمند Xiaomi A2, Samsung G930F, Wiko V680 با پوشش طولی ۸۰٪ انجام شده است. آن‌ها از مقایسه ۳ 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 (Bessin et al, 2023).

منان و اسمدی سال ۲۰۱۲ در تحقیقی با هدف بررسی دقت محاسبه احجام با روش فتوگرامتری برد کوتاه و استفاده از دوربین‌های رقومی معمول به‌عنوان ابزار جمع‌آوری اطلاعات ۲ مرحله آزمایش را طراحی و پیاده‌سازی نمودند. آن‌ها ابتدا در آزمایشگاه ابعاد یک مکعب بتنی را با استفاده از خط‌کش ۱۴۵×۱۴۵×۱۴۵ میلی‌متر تعیین کردند و بعد از چسباندن ۱۰۰ نقطه به شکل دایره سفید با شعاع ۱ میلی‌متر بر روی مکعب بتنی و تعیین مختصات محلی (X,Y,Z) چهار نقطه به‌عنوان نقطه کنترل به‌صورت دستی و با خط‌کش، اقدام به عکس‌برداری از شئ در ۳ فاصله متفاوت با دوربین Olympus T10 و تولید مدل رقومی آن در نرم‌افزار Australis نمودند. حجم محاسبه شده از طریق ضرب ابعاد اندازه‌گیری شده با خط‌کش را به‌عنوان مقدار واقعی در نظر گرفته و حجم مکعب را یکبار از طریق استخراج مختصات ۱۰۰ نقطه از داده‌های فتوگرامتری و بار دیگر از طریق تولید ابر نقطه فتوگرامتری محاسبه نمودند و به ترتیب به دقت‌های ۹۵٪ و ۹۹٪ برای روش فتوگرامتری دست یافتند. پس از کسب نتایج مطلوب در آزمایشگاه به سراغ

---

[1] Navagio

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

یک شئ طبیعی (یک تپه با ابعاد ۳H ×۱۳W× ۲۴L متر) و تعیین حجم آن با استفاده از ۲ روش فتوگرامتری برد کوتاه و نقشه‌برداری زمینی رفتند. حجم برآورد شده از روش نقشه‌برداری زمینی را به‌عنوان مقدار مرجع در نظر گرفتند. مختصات ۳۲ نقطه کنترل قرار گرفته به‌صورت پراکنده بر روی تپه از طریق نقشه‌برداری زمینی تعیین کردند. مقایسه مقادیر احجام حاصل از فتوگرامتری برد کوتاه و نقشه‌برداری زمینی با یکدیگر اختلاف ۶٪ را نشان داده است (Samad et al., 2012).

کان-کاهیونو در سال ۲۰۰۹ برای تهیه مدل رقومی زمین در مناطق غیر قابل دسترس با ویژگی‌های توپوگرافی متفاوت و دارای شیب‌های ناپایدار از یک دوربین تجاری به‌عنوان ابزار جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و بر اساس روش فتوگرامتری برد کوتاه استفاده نمود. در تحقیق صورت گرفته از روش فتوگرامتری برد کوتاه مدل رقومی زمین تولید و تجزیه و تحلیل میزان اختلاف حجم محاسبه شده با روش‌های کلاسیک مبنای ارزیابی دقت و کیفیت مدل رقومی تولید شده به روش فتوگرامتری بوده است. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته نتایج زیر به‌دست آمده است.

۱- این روش می‌تواند برای مدل‌سازی ۳ بعدی در مناطق با شیب بالقوه ناپایدار استفاده شود و با خروجی آن می‌توان حجم کل خاک‌برداری را با خطای کمتر از ۱٪ محاسبه نمود. ۲- شرایط توپوگرافی بر دقت DEM تولید شده تأثیری نداشته است. ۳- افزایش تراکم نقاط به‌طور مستقیم کیفیت DEM را افزایش می‌دهد. ۴- کیفیت تصاویر اخذ شده با فاصله کانونی ارتباط مستقیم داشته و بشدت بر دقت DEM تولید شده اثرگذار است (Kun-Cahyono, 2009).

یلماز سال ۲۰۱۰ در تحقیق خود برای ارزیابی صحت فتوگرامتری برد کوتاه در محاسبه حجم از یک جسم مخروط شکل با شعاع و ارتفاع ۹ سانتی‌متر استفاده کرد. حجم مخروط را از میانگین ۵ بار اندازه‌گیری با استفاده از آب (غرق کردن جسم در آب با چگالی یکپارچه و تعیین حجم آن با اندازه‌گیری اختلاف بین ۲ سطح آب قبل و بعد از قرار دادن شئ) تعیین و به‌عنوان مقدار واقعی در نظر گرفت. پس از تعیین پارامترهای کالیبراسیون دوربین و ایجاد ۱۳ نقطه کنترل با توزیع مناسب و در ارتفاع‌های مختلف در اطراف جسم و تعیین مختصات آن‌ها با توتال‌استیشن اقدام به عکس‌برداری از سوژه با دوربین رقومی ۸ مگا پیکسل SonyF828 نمود و به‌دقت ۹۸/۷۲٪ در محاسبه حجم شئ با شکل نامنظم به‌وسیله فتوگرامتری برد کوتاه دست یافت. وی برای ارزیابی قابلیت اطمینان روش فتوگرامتری از یک مکعب با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر نیز استفاده کرد و به‌دقت ۹۹.۹۹٪ برای محاسبه حجم آن با فتوگرامتری برد کوتاه دست یافت. در انتها او با محاسبه حجم یک تپه دقت این روش را در برآورد حجم اشیاء بزرگ بررسی کرد. وی ابتدا حجم تپه را از طریق نقشه‌برداری زمینی محاسبه و به‌عنوان مبنا قرار داد، سپس اقدام به جایگذاری ۲۴ تارگت و تعیین مختصات آن‌ها به‌وسیله توتال‌استیشن و عکس‌برداری از تپه نمود. مقایسه نتایج هر ۲ روش نشان‌دهنده دقت ۸۹/۳۸٪ روش فتوگرامتری در مقابل نقشه‌برداری به وسیله توتال استیشن می‌باشد (Yilmaz, 2010).

در مورد الگوریتم‌های محاسبه حجم Civil 3D و دقت هر کدام از آن‌ها می‌توان به تحقیق صورت گرفته توسط پویان و همکاران در سال ۱۳۹۴ اشاره کرد. آن‌ها در این تحقیق به بررسی دقت روش‌های مختلف محاسبه حجم در نرم‌افزار Civil 3D پرداخته‌اند. این نرم‌افزار از ۳ الگوریتم مساحت متوسط انتهایی، منشوری و ترکیبی برای محاسبه حجم استفاده می‌کند. در روش اول از طریق میانگین‌گیری مساحت مقطع اول و آخر و ضرب آن در فاصله میان آن‌ها حجم محاسبه می‌شود. روش منشوری نیز مشابه روش اول با این تفاوت که با اضاف کردن یک مقطع میانی بین دو مقطع پشت هم حجم محاسبه می‌شود اما در روش ترکیبی با انجام مثلث‌بندی بین نقاط دو سطح اولیه و ثانویه سطح

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

جدیدی ایجاد می‌نماید که ارتفاع سطح ترکیبی جدید بر گرفته از ارتفاع دو سطح اولیه و ثانویه است. نتایج کار آن‌ها نشان‌دهنده دقت بالاتر روش ترکیبی نسبت به سایر روش‌ها بود(پویان و همکاران، ۱۳۹۴).

به نظر می‌رسد با توجه به سیر تکاملی ویدئوگرامتری، و همچنین پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه الگوریتم‌ها و روش‌های پردازش داده‌ها و توسعه بسیار خیره کننده در گوشی‌های هوشمند، زمان آن فرا رسیده است که امکان استفاده از این ابزارها برای تولید محصولات مورد نیاز بررسی و ارزیابی شود. از طرف دیگر محاسبه حجم عملیات خاکی در پروژه‌های مختلف مانند بهره‌برداری از معادن از موضوعات چالش برانگیز، پر هزینه و زمان‌بر این حوزه به شمار می‌رود. بنابراین در این تحقیق به بررسی و ارزیابی دقت محاسبه حجم عملیات خاکی با استفاده از گوشی‌های هوشمند در مقایسه با روش‌های کلاسیک موجود پرداخته شده است. در این روش برخلاف سایر روش‌ها نیازی به استفاده از تجهیزات گران قیمت ژئودزی و فتوگرامتری وجود ندارد و ابزار مورد استفاده، یک گوشی موبایل در مرحله جمع‌آوری داده است که امروزه در دسترس همه قرار داشته و به‌راحتی می‌توان آن را در محیط‌هایی با دسترسی محدود حمل و استفاده کرد. در این روش دیگر نیازی به طراحی محل و تعداد ایستگاه‌های عکس‌برداری، تعداد عکس‌های مورد نیاز در هر ایستگاه، پوشش طولی و عرضی عکس‌ها نیست و تنها محاسبه فاصلهٔ بهینه دوربین تا شئ (مقیاس مورد نیاز) کافی است. همچنین می‌توان با افزایش فرکانس استخراج فریم تصاویر از ویدئو، داده‌های اضافی برای مناطق با پوشش کم تولید و جایگزین عکس‌های با کیفیت پائین نمود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق در محدوده تجهیز کارگاه شرکت مهندسی و ساختمان شمس عمران در شهر بوشهر با همکاری شرکت ایجاد گردید. در این محدوده به‌وسیله یک دستگاه بیل مکانیکی اقدام به گودبرداری مکعبی شکل با ابعاد تقریبی ۲×۳/۷۰×۴/۶۰ متر نموده و مقداری از خاک آن در فاصله چند متر از محل خاک‌برداری دپو گردید. تصاویر مربوط به خاک دپو شده و گودبرداری مورد تحقیق در شکل (۱) نمایش داده شده است.

شکل ۱. دپو خاک (سمت راست) و گودبرداری (سمت چپ)

Fig. 1. soil mass (right picture) and excavation (left picture)

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

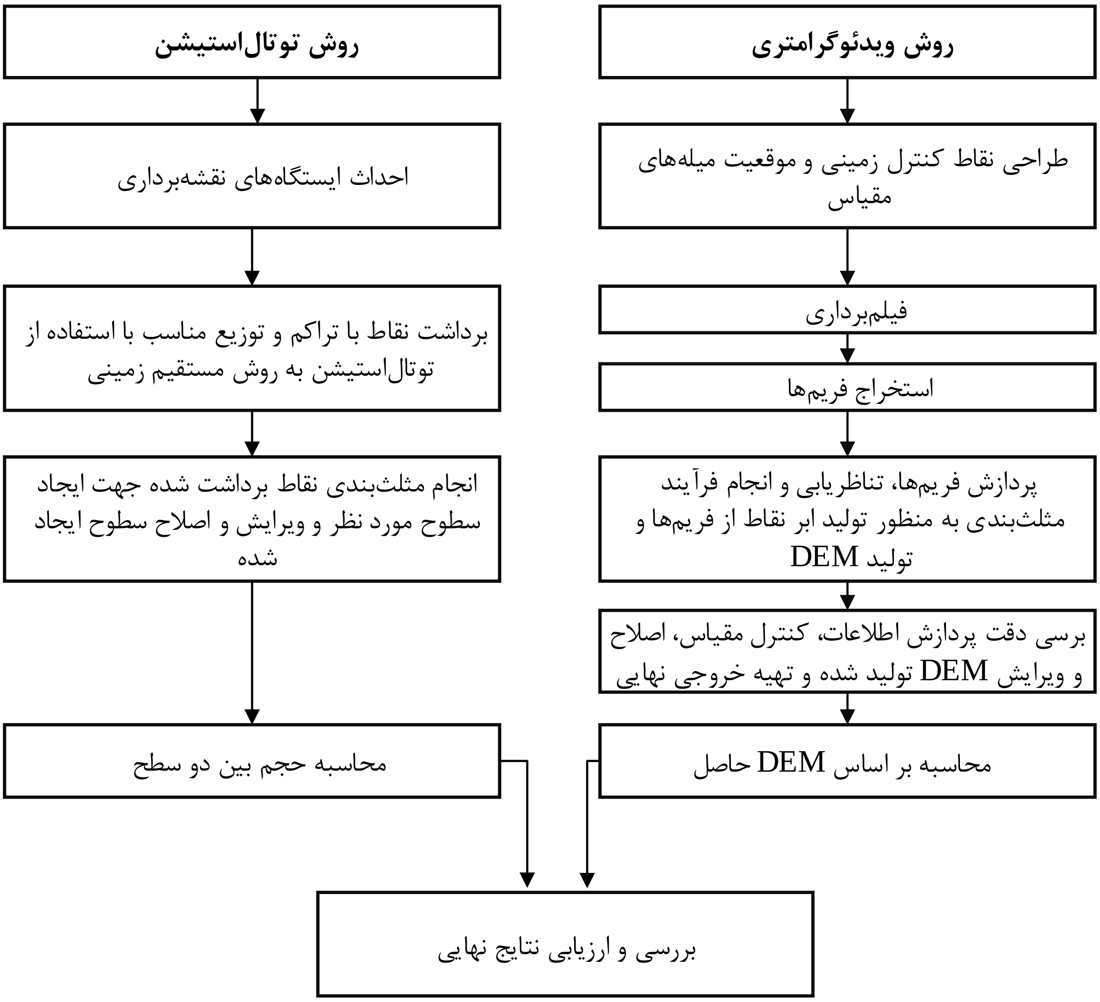
داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در تحقیق شامل نقاط برداشت شده به‌وسیله توتال‌استیشن Leica TS09 R1000 در حالت بدون رفلکتور و فیلم‌های ضبط شده با استفاده از تلفن هوشمند مدل Samsung Galaxy A51 و iPhone 13 Pro از دپو و گودبرداری موضوع مطالعه می‌باشد. برای پردازش داده‌ها از نرم‌افزارهای Adobe premi و Agisoft به ترتیب برای استخراج فریم‌ها از ویدئو و تولید مدل ۳ بعدی از تصاویر و نرم‌افزار AutoCAD Cvil3D برای محاسبه احجام به‌وسیله کامپیوتری با مشخصات زیر استفاده گردید.

Intel(R) Core (TM) i3-8100 CPU @ 3.60GHz
Installed RAM 8.00 GB

روش تحقیق

فرآیند صورت گرفته در این تحقیق در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل با هدف ارزیابی نتایج عملیات نقشه-برداری زمینی با استفاده از توتال‌استیشن و ویدئوگرامتری با هدف ارزیابی نتایج به‌صورت همزمان انجام شد که در ادامه مراحل آن توضیح داده خواهد شد.



شکل ۲. فرآیند محاسبه حجم عملیات خاکی به روش ویدئوگرامتری و نقشه‌برداری با توتال‌استیشن

Fig.2. The process of calculating the volume of earthworks by videogrammetry through the Total station surveying method

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

همان‌گونه که اشاره گردید در این تحقیق از روش‌های کلاسیک زمینی نیز برای محاسبه حجم عملیات خاکی استفاده گردیده است تا بتوان نتایج را با یکسری داده مقایسه نمود. در روش زمینی برای جمع‌آوری داده از توتال‌استیشن استفاده شده است که برای اندازه‌گیری فاصله از موج لیزر استفاده می‌کند. اساس اندازه‌گیری دستگاه بر پایه اندازه-گیری زمان بین ارسال و دریافت پالس لیزر به جسم استوار است. از آنجا که پالس لیزر در این دستگاه به‌صورت گسسته ارسال شده است، تراکم نقاط برای محاسبه احجام بسیار کمتر و غیر قابل مقایسه با تراکم نقاط حاصل از روش‌های فتوگرامتری می‌باشد. این روش در زمان محاسبه احجام در سطوح نامنظم با چالش‌های جدی روبرو است زیرا دقت نمایش سطح زمین و محاسبه حجم به طور مستقیم به تعداد نقاط دارای مختصات (X,Y,Z) وابسته است. هرچه اطلاعات بیشتر و نقاط متراکم‌تری در دسترس باشد نتیجه بازسازی به سطح اصلی از نظر توپوگرافی نزدیک‌تر خواهد بود. به‌طور معمول هنگام برداشت سطح با استفاده از توتال‌استیشن به منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه، سعی در برداشت نقاط بهینه نظیر شکستگی‌ها، خط الراس‌ها، خط القعرها و نیز نقاطی که در فواصل کوتاه دارای تغییرات ارتفاعی زیاد هستند می‌باشد. البته حسگرهای نوری فعال نظیر لیزر اسکنر، امکان به‌دست آوردن مستقیم موقعیت نقاط شناسایی شده با تراکم زیاد و دقت مناسب را فراهم کرده و گاهی اوقات اطلاعات رنگ را نیز به همراه دارند. مزیت اصلی این نوع ابزارها دریافت مستقیم و سریع مقادیر زیادی از داده‌های مربوط به یک هندسه پیچیده است. اما هزینه تهیه دستگاه لیزر اسکنر بسیار بیشتر از توتال‌استیشن بوده و در کشور ما در بحث محاسبه احجام بسیار کم مورد استفاده گرفته، به همین دلیل در این مقاله به بررسی آن پرداخته نشد.

در مرحله جمع‌آوری اطلاعات به‌وسیله توتال‌استیشن در ابتدا ۳ ایستگاه نقشه‌برداری زمینی با مختصات محلی در اطراف محدوده در نظر گرفته شده برای دپو خاک و گودبرداری ایجاد گردید. سپس با استقرار دوربین نقشه‌برداری در موقعیت مناسب و توجیه آن به‌صورت Free Station شروع به برداشت توپوگرافی در حالت بدون رفلکتور برای تهیه سطح اولیه نموده، پس از انجام گودبرداری و دپو خاک مجدداً دوربین در ۲ ایستگاه یکی سمت شمال و دیگری جنوب دپو و گودبرداری مستقر و برداشت نقاط انجام شد، با توجه به ماهیت تحقیقی پروژه سعی در برداشت نقاط به‌صورت متراکم و بیش از حد معمول گردید تا نتیجه حاصله از قابلیت اطمینان و صحت بالاتری برخوردار باشد. زمان صرف شده برای انجام کامل عملیات نقشه‌برداری زمینی (برداشت نقاط اولیه و ثانویه) دپو و گودبرداری تقریباً یکسان و برای هرکدام ۶۰ دقیقه به طول انجامید. پس از اجرای عملیات نقشه‌برداری، نقاط برداشت شده به‌طور جداگانه و در قالب ۲ گروه نقاط اولیه و ثانویه برای دپو و گودبرداری در نرم‌افزار فراخوانی شده و سطحی به هرگروه نقطه برازش داده شد. در اکثر اوقات سطح برازش داده شده به طور کامل صحیح نبوده و باید اصلاح شود. پس از اصلاح سطح و حصول اطمینان از درستی و انطباق آن با واقعیت، حجم عملیات خاکی بین دو سطح محاسبه گردید.

برای اینکه بتوان دقت روش نقشه‌برداری زمینی و ویدئوگرامتری را با یکدیگر مقایسه نمود ابتدا باید اثر سایر عوامل تأثیرگذار نظیر الگوریتم استفاده شده در نرم‌افزارهای متفاوت برای محاسبه حجم را از بین برد، چراکه با داشتن داده-های ورودی یکسان و استفاده از تنها یک نرم‌افزار اما بهره بردن از روش‌های گوناگون محاسبه حجم می‌تواند به نتایج متفاوتی منجر شود. در این مقاله با توجه به دقت بالاتر الگوریتم ترکیبی نسبت به سایر روش‌ها از این روش برای محاسبه احجام استفاده گردید. در الگوریتم ترکیبی با ترسیم پلیگون بین دو خط نمونه‌برداری متوالی و عرض معرفی

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

شده (آفست) و با بهره‌گیری از داده‌های واقعی سطوح (عدم استفاده از روابط درون‌یابی) به محاسبه احجام پرداخته می‌شود. برای جمع‌آوری داده به روش ویدئوگرامتری باید به این نکته توجه نمود که در این پژوهش هدف حذف کامل عملیات نقشه‌برداری زمینی بود به همین خاطر با توجه به اینکه هدف از تولید مدل رقومی زمینی مربوط به خاک‌ریزها و گودبرداری‌ها، محاسبه حجم می‌باشد، بنابراین نیاز به زمین مرجع کردن کامل نبوده و تنها محاسبه مقیاس صحیح کافی است در نتیجه از میله مقیاس با ابعاد معلوم برای حل مسئله مقیاس استفاده شده است البته به‌جای میله مقیاس از تارگت‌ها نیز می‌توان استفاده کرد با این تفاوت که به‌جای مختصات هر تارگت، فاصله بین تارگت‌ها باید اندازه‌گیری شود. میله‌های مقیاس باید دارای طول کاملاً مشخص و دقیق باشند و قبل از شروع تصویربرداری در زمینه جسم قرار داده شوند. این طول‌های معلوم باید با پراکندگی و تعداد مناسب و با توجه به ابعاد شئ و ابعاد میله‌های مقیاس مورد استفاده قرار گیرند تا تمام نقاط روی شئ دارای دقت همگن از لحاظ مقیاس باشند. در مرحله فیلم‌برداری می‌توان از قابلیت‌های دوربین تلفن همراه استفاده کرد. با توجه به سرعت خارق‌العاده تکنولوژی، دوربین گوشی‌های تلفن همراه دستخوش تغییرات گسترده شده است و قادر به ثبت تصاویر با کیفیت، وضوح و رزولوشن بالا می‌باشند. در گذشته نهایت کنترل کاربر بر روی دوربین تلفن همراه در تغییر ایزو دوربین و یا روشن و خاموش کردن حالت HDR خلاصه می‌گردید اما امروزه کاربران قادر به کنترل اکثر قابلیت‌های دوربین تلفن همراه خود هستند، که می‌تواند به ثبات نسبی پارامترهای دوربین حین فیلم‌برداری کمک کند. اولین نکته در کاربرد ویدئوگرامتری، تنظیم استخراج فریم است. توالی‌هایی که خیلی از هم فاصله دارند خطر کاهش همپوشانی را دارند و توالی‌هایی که خیلی نزدیک به هم هستند زمان پردازش را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، مانع اصلی برای بازسازی ۳ بعدی با دقت بالا با استفاده از فیلم‌ها، کیفیت فریم‌های استخراجی است که می‌توانند تار شوند (Matuzeviˇcius and Serackis, 2022). در حال حاضر نرم‌افزارهای تجاری بسیاری با قابلیت ذخیره فریم‌هایی از ویدئو بدون افت کیفیت آن‌ها عرضه شده، به این صورت ابتدا ویدئو در نرم‌افزار بارگذاری و سپس امکان استخراج یک فریم از ویدئو و یا تعداد زیادی از فریم‌ها در محدوده زمانی انتخاب شده وجود خواهد داشت. سپس با انتقال تصاویر به نرم‌افزارهای فتوگرامتری و انجام تناظریابی خودکار نقاط کلیدی استخراج می‌شوند. بعد از این مرحله، در گام آخر و با هدف تعیین مختصات نقاط و نیز کم کردن خطای Reprojection بین عکس‌ها از سرشکنی دسته اشعه استفاده می‌گردد. برای بازسازی هندسی عوارض، روش‌های فتوگرامتری اکثراً مبتنی بر اندازه‌گیری نقاط گسسته از عوارض مورد نظر هستند، یعنی با استفاده از نقاط متراکم با توزیع مناسب، عوارض به‌صورت ۳ بعدی نمایش داده می‌شود. اکنون برای محاسبه حجم عملیات خاکی تنها نیاز به سطحی یکپارچه و منطبق بر نقاط تشکیل دهنده عارضه می‌باشد، تولید سطح یا Mesh از روی نقاط با استفاده از الگوریتم‌های مثلث‌بندی انجام و در پایان برای کنترل صحت نتایج، با حجم به‌دست آمده از روش توتال‌استیشن مورد مقایسه قرار گرفت.

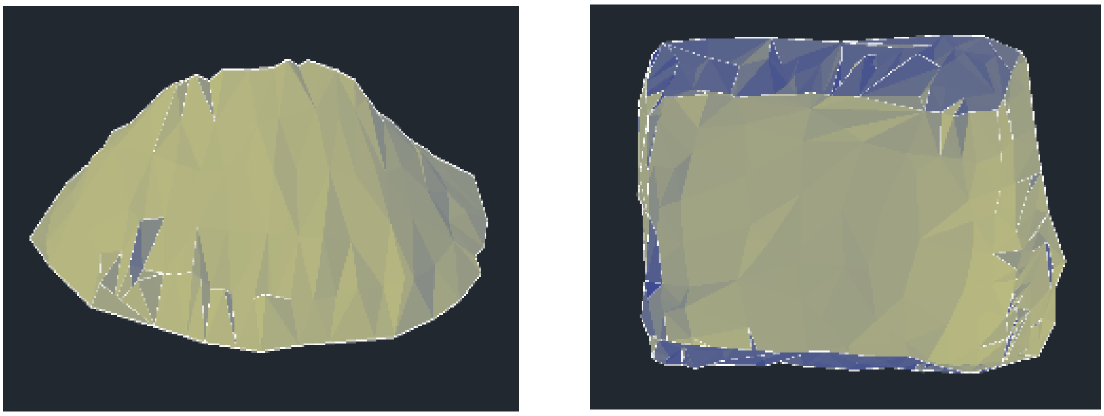
نتایج و بحث

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی همان‌گونه که اشاره گردید ابتدا به‌وسیله یک دستگاه بیل مکانیکی اقدام به گودبرداری مکعبی با ابعاد تقریبی ۲×۳/۷۰×۴/۶۰ متر نمودیم. مقداری خاک حاصل از گودبرداری برای ایجاد دپو بار یک دستگاه کامیون کمپرسی شد و پس از وزن‌کشی دقیق با باسکول و نمونه‌برداری آزمایشگاهی جهت تعین وزن مخصوص، روی زمین صافی که سطح آن قبلاً به‌وسیله توتال‌استیشن برداشت شده بود تخلیه شد. وزن مخصوص برابر

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

۱۶۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب تعیین و از تقسیم وزن بار کامیون بر این عدد مقدار ۳/۳۵ متر مکعب به‌عنوان خروجی روش مکانیک خاک در نظر گرفته شد.

در روش نقشه‌برداری زمینی نقاط برداشت شده با توتال‌استیشن، با فرمت TXT. تخلیه و در قالب دو گروه نقاط اولیه و ثانویه برای دپوخاک و گودبرداری وارد نرم‌افزار Civil 3D شدند و بر مبنای روش مثلث‌بندی TIN سطحی به هرگروه از آن‌ها به‌صورت خودکار برازش داده شد. برای اصلاح سطح از ابزارهای Swap edge, Break line, Add/Delete line استفاده شد. در ادامه و بعد از حصول اطمینان از انطباق خروجی با واقعیت، با استفاده از روش ترکیبی حجم عملیات خاکی بین دو سطح محاسبه گردید. کل پروسه از تخلیه توتال‌استیشن تا به‌دست آمدن حجم نهایی برای دپو خاک ۲۰ دقیقه و برای گودبرداری به دلیل تراکم نقاط خوانده شده و نیز ناهمواری زیاد دیواره گودبرداری نرم‌افزار نتوانست سطح اولیه مناسبی را به نقاط برازش دهد. با توجه به ماهیت آزمایشی کار سعی بر آن شد با انجام ویرایش به‌صورت دستی ناهمواری‌ها (نظیر تورفتگی و بیرون‌زدگی‌ها، خاک‌های جزئی حاصل از ریزش دیواره گودبرداری) مدل شوند و همین امر باعث زمان‌بر شدن آن تا ۳۶ دقیقه شد که قطعاً در صورت چشم‌پوشی از چنین موارد جزئی کل روند برآورد حجم در زمان کمتری انجام خواهد شد. تصاویر حاصل از سطوح ثانویه ایجاد شده در شکل (۳) نشان داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۳. تصاویر سطوح ۳ بعدی تولید شده : (الف) گودبرداری ، (ب) دپو خاک

Fig.3. Images of 3D surfaces: (a) excavation, (b) soil mass

برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز در روش ویدئوگرامتری ابتدا ۲ میله مقیاس با طول مشخص در ۲ طرف دپو و نیز یکی داخل گودبرداری و دیگری لبه بالای گودبرداری قرار داده شد. همچنین برای هر ۲ حالت دپو و گودبرداری ۲ نقطه کنترل به‌طور جداگانه تعریف و مختصات آن توسط توتال‌استیشن در سیستم مختصات محلی قرائت گردید. سپس ساعت ۱۲ ظهر که خورشید بالای سر ناظر است (برای جلوگیری از ایجاد سایه‌های بلند و افت کیفیت روشنایی تصاویر) کاربر با تلفن هوشمند خود از فاصله ۳ الی ۴ متری طوری که سوژه تقریباً در مرکز تصویر باشد آهسته قدم زده و بدون توقف فیلم‌برداری یک دور کامل به دور سوژه چرخید و سپس با بالا بردن دستان خود و تغییر زاویه دوربین طوری که زاویه حدود ۴۵ درجه با سطح زمین بسازد مجدداً همین روند تکرار و ویدئوهایی ۱۲۷ و ۸۶ ثانیه‌ای به ترتیب از گودبرداری و دپو ضبط شد. این عملیات توسط ۲ کاربر، با استفاده از ۲ تلفن هوشمند متفاوت و به‌طور مستقل از یکدیگر بر روی دپو به منظور بررسی تأثیر تجربه کاربر در نتایج و مدل ۳ بعدی تولید شده انجام گرفت. برای پردازش داده‌های حاصل از روش ویدئوگرامتری، فیلم ضبط شده در نرم‌افزار Adobe premiere pro بارگذاری و

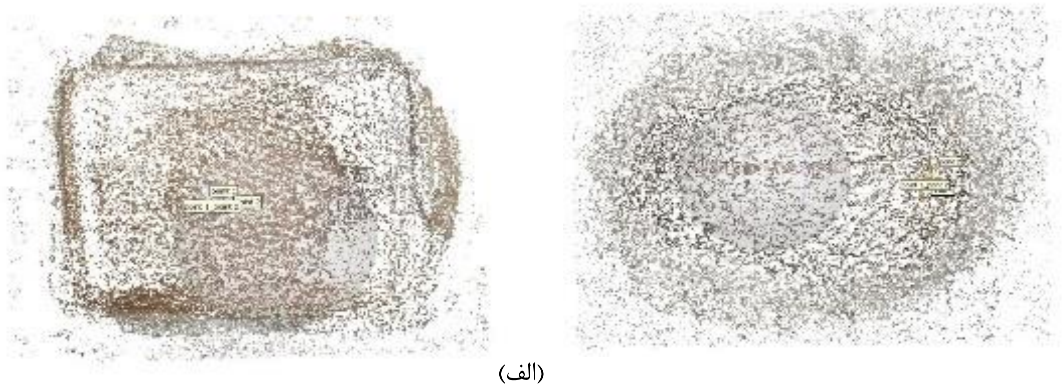
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

استخراج فریم‌ها از فیلم با فرکانس ۰/۵ ثانیه، با پسوند jpg و با وضوح ۱۰۸۰×۱۹۲۰ پیکسل آغاز شد که از میان آن‌ها تعداد ۱۲۸و ۵۰ عکس دارای کیفیت و همپوشانی مناسب به ترتیب برای تولید مدل ۳ بعدی از گودبرداری و دپو توسط کاربر انتخاب شد. بیشترین تعداد عکس قابل استخراج با توجه به نرخ ۳۰ فریم در ثانیه فیلم‌برداری برای گودبرداری ۳۸۱۰ و برای دپوی خاک ۲۵۸۰ عکس بود که خود بیانگر قابلیت این روش در جایگزینی تصاویر مات و بی‌کیفیت و ارتقاء کیفیت مدل بدون نیاز به برداشت میدانی مجدد می‌باشد. تعداد و وضوح فریم‌های مورد استفاده برای ساخت مدل، تأثیر مستقیم بر تعداد نقاط تشکیل دهنده ابر نقطه متراکم، کیفیت مدل ۳ بعدی نهایی و مدت زمان پردازش دارد.

در ادامه بعد از پردازش‌های لازم ابر نقطه غیرمتراکم و متراکم تولید گردید. از دو نقطه کنترل زمینی برای هم مقیاس کردن ابر نقطه متراکم با مقیاس واقعی استفاده و از دو میله مقیاس صرفاً برای کنترل مقیاس مدل استفاده گردید. طول واقعی دو میله مقیاس به‌وسیله کولیس رقومی اندازه‌گیری و مقادیر ۵۱۷ و ۴۰۱ میلی‌متر قرائت و در مدل تولید شده ۵۲۰ و ۴۰۵ میلی‌متر به‌دست آمد که به ترتیب نشان‌دهنده دقت در حدود ۳ و ۴ میلی‌متر برای مدل تولید شده از دپو خاک می‌باشد. همین روند برای گودبرداری نیز تکرار شد و میله داخل گودبرداری با ۶ میلی‌متر خطا و میله لبه بالای گودبرداری با ۲ میلی‌متر خطا اندازه‌گیری شد. با توجه به یکسان بودن شرایط چند احتمال برای دلیل افزایش خطا میله داخل گود وجود دارد: ۱- تفاوت در تعداد عکس‌هایی که میله مقیاس‌ها در آن دیده می‌شوند ۲- به دلیل پائین بودن کیفیت دوربین تلفن همراه افزایش فاصله تا جسم سبب این کاهش دقت شده است ۳- ناهمگن بودن دقت در سرتاسر مدل. نتایج حاصل از ابر نقطه متراکم و غیرمتراکم در شکل (۴) نمایش داده شده است.

با توجه به عدم امکان فراخوانی ابر نقطه درCivil 3D ابتدا یک Mesh به نقاط تولید شده برازش داده شد. این مرحله با استفاده از درون‌یابی یک سطح که بیشترین انطباق را با نقاط دارد انجام گردید و سپس اقدام به تولید DEM کرده و از آن خروجی با فرمت XML. برای فراخوانی درCivil 3D گرفته شد و در ادامه با استفاده از روش ترکیبی حجم دپو خاک و گودبرداری به‌طور جداگانه محاسبه گردید. کل فرآیند از وارد کردن عکس تا به‌دست آوردن احجام با توجه به انتخاب کیفیت حداکثر در کلیه مراحل تولید مدل ۳ بعدی برای گودبرداری ۴۶۵ دقیقه و برای دپو خاک ۳۰۰ دقیقه به طول انجامید.

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]



(الف)

(ب)

شکل ۴. (الف) تصاویر ابر نقطه غیرمتراکم دپو و گودبرداری، (ب) تصاویر ابر نقطه متراکم دپو و گودبرداری

Fig. 4. (a) non-dense point cloud of soil mass and excavation, (b) dense point cloud of soil mass and excavation

در انتها حجم دپو خاک به‌دست آمده با توتال‌استیشن به‌عنوان مقدار واقعی و مبنای مقایسه در نظر گرفته شد. نتایج احجام حاصل از هر ۳ روش در جدول (۱) و (۲) و همچنین زمان صرف شده برای برداشت و محاسبه احجام به تفکیک و برای مقایسه بصری در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۱. نتایج حاصل از ویدئوگرامتری، نقشه‌برداری با توتال‌استیشن و احجام محاسبه شده در آزمایشگاه مکانیک خاک (گودبرداری)

Table 1. The results of videogrammetry, the Total Station surveying, and calculated volumes in the soil mechanics laboratory (excavation)

نوع عارضه	نقشه‌برداری با توتال‌استیشن	ویدئوگرامتری	تفاضل نتایج دو روش	درصد تفاوت نتایج با یکدیگر
	مترمکعب			
گودبرداری	32.66	32.05	0.60	1.86%

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

جدول ۲. نتایج حاصل از ویدئوگرامتری، نقشه‌برداری با توتال‌استیشن و احجام محاسبه شده در آزمایشگاه مکانیک خاک (دپو خاک)

Table 2. The results of videogrammetry, the Total Station surveying and volumes calculated in the soil mechanics laboratory (Soil mass)

نوع عارضه	نقشه‌برداری با توتال‌استیشن	ویدئوگرامتری		آزمایشگاه مکانیک خاک	اختلاف آزمایشگاه مکانیک خاک و ویدئوگرامتری	درصد تفاوت نتایج توتال استیشن و ویدئوگرامتری
		اپراتور اول	اپراتور دوم			
	مترمکعب					
دپو خاک	3.10	3.21	3.23	3.35	0.14, 0.12	3.54%, 4.19%
اختلاف با واقعیت	0	0.11	0.13	0.25	ــــ	ــــ

جدول ۳. زمان صرف شده برای برداشت و محاسبه احجام

Table 3. The time spent to collect and calculate volumes

نوع عارضه	نقشه‌برداری زمینی		ویدئوگرامتری			
	برداشت نقاط اولیه و ثانویه	پردازش و محاسبه حجم	تعداد عکس	زمان تصویربرداری	پردازش و محاسبه حجم	کیفیت انتخابی پردازش تصاویر
	دقیقه		عدد	دقیقه		
دپو خاک	60	30	50	1.43	300	Highest
گودبرداری	60	145	128	1.11	465	Highest

نتیجه‌گیری

فتوگرامتری هوایی رقومی و برد کوتاه به ابزاری کاربردی برای مدل‌سازی ۳ بعدی سطح زمین (توپوگرافی) تبدیل شده است. فیلم‌های ضبط شده با دوربین‌های معمولی و تلفن‌های هوشمند قابلیت ساخت DEM و DSM را دارند. در این پژوهش که بر روی ۲ عارضه متفاوت یک دپو خاک و یک گودبرداری انجام گردید، به منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادی حجم دپو محاسبه شده با توتال‌استیشن به‌عنوان مقدار واقعی در نظر گرفته شد و نتایج به‌دست آمده از روش ویدئوگرامتری و مکانیک خاک بر اساس آن مورد ارزیابی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته نشان‌دهنده این واقعیت است که مدل‌های به‌دست با آمده با گوشی‌های مختلف و توسط کاربران مستقل برای دپو خاک مشابه بوده و حجم خاک‌ریزی برای مدل توسط ۲ کاربر به ترتیب ۳/۲۱ و ۳/۲۳ مترمکعب به‌دست آمد. تفاوت اندک میان حجم به‌دست آمده و تعداد نقاط سازنده مدل‌ها عمدتاً از تعداد و وضوح فریم‌های استفاده شده ناشی شده که در مدت زمان مورد نیاز پردازش برای تهیه مدل ۳ بعدی نیز اثرگذار است. حجم آن با استفاده از توتال‌استیشن ۳/۱۰ مترمکعب و در آزمایشگاه مکانیک خاک ۳/۳۵ مترمکعب محاسبه شد. اختلاف روش ویدئوگرامتری در مقایسه با توتال‌استیشن به‌طور متوسط ۳/۸۶٪ و در مقایسه با برآورد آزمایشگاه ۳/۸۷-٪ بود. حجم گودبرداری از طریق روش ویدئوگرامتری ۳۲/۰۵ مترمکعب و از طریق توتال‌استیشن ۳۲/۶۶ مترمکعب محاسبه شد که بیانگر اختلاف ۱/۸۴٪ در مقایسه با یکدیگر هستند. در بحث عملیات میدانی میزان زمان لازم برداشت از ۶۰ دقیقه با توتال‌استیشن به حدود ۱۰

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

دقیقه با روش ویدئوگرامتری کاهش یافت اما در خصوص پردازش‌های بعدی و تولید مدل، ویدئوگرامتری زمان بسیار بیشتری حدود ۳/۱۱ برابر صرف نمود به عبارت دیگر زمان پردازش از حدود ۱۵۰ دقیقه به حدود ۴۵۰ دقیقه افزایش یافت. البته تعداد زیاد تصاویر بارگذاری شده علت اصلی این اختلاف زمانی فاحش است لذا برای به‌دست آوردن نتیجه صحیح باید یکبار پردازش با تعداد بهینه‌ای از تصاویر انجام گیرد و سپس زمان مورد نیاز پردازش ثبت و مقایسه گردد. روش ویدئوگرامتری این قابلیت را دارد که با افزایش فرکانس استخراج فریم، تصاویر اضافی تولید و یا جایگزین عکس-های با کیفیت پائین کند و مدل‌هایی با دقت قابل قبول به‌دست آورد. در این روش عدم نیاز به استفاده از تجهیزات ژئودتیکی، سبب کاهش چشمگیر هزینه‌ها شده و زمان لازم برای اندازه‌گیری‌های میدانی را به چند دقیقه کاهش می-دهد اما در بحث پردازش‌های بعدی نیاز به صرف زمان بیشتری برای تولید مدل ۳ بعدی دارد.

در این تحقیق ۲ نقطه کنترل برای مقیاس دهی به مدل و ۲ میله مقیاس برای کنترل مقیاس و همگنی آن در سرتاسر مدل تعریف و استفاده شد. با توجه به اختلاف ۳ تا ۲ میلی‌متر میان طول واقعی و طول اندازه‌گیری شده میله مقیاس، می‌توان گفت مدل از مقیاس همگن برخوردار بوده است اما انجام آزمایش‌هایی با استفاده از شبکه‌ای از نقاط پراکنده در سرتاسر مدل با موقعیت معلوم برای کنترل مقیاس در جهت عمودی و افقی لازم است. تجهیزات لازم در روش ویدئوگرامتری یک گوشی هوشمند و یک رایانه مناسب به همراه نرم‌افزارهای مناسب برای انجام محاسبات و پردازش تصاویر می‌باشد که در مقایسه با تجهیزات مورد نیاز روش‌های زمینی (مانند توتال‌استیشن) هزینه بسیار کمتری را نیاز دارد.

قدردانی

در پایان نویسندگان مقاله از جناب آقای مهندس امیری سرپرست محترم شرکت مهندسی و ساختمان شمس عمران و جناب آقای مهندس حیدری مسئول آزمایشگاه مکانیک خاک نیروگاه اتمی بوشهر بابت همکاری بی دریغشان کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

پویان، ف، مؤمن زاده،س.س.، دهقان‌موروزه، ع.،۱۳۹۴. مقایسه روش‌های مختلف محاسبه حجم عملیات خاک‌برداری در مدلCivil 3D. کنفرانس سالانه تحقیقات در مهندسی عمران معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار، دانشگاه تهران، تهران، ایران

عباس زاده، س.،۱۳۹۷. ارزیابی توانایی فتوگرامتری برد کوتاه در مقایسه با نقشه‌برداری زمینی به منظور محاسبه حجم عملیات خاکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران، ۱۰۱ص.

Altuntaş, C., 2021. Camera self-calibration by using SFM based dense matching for close-range images. Eurasian Journal of Science Engineering and Technology, 2(2), pp. 069-082.

Balaguer-Puig, M., Marqués-Mateu, A., Lerma, J.L., Ibáñez-Asensio, S., 2017. Estimation of small-scale soil erosion in laboratory experiments with Structure from Motion photogrammetry. Geomorphology, 295, pp. 285-296.

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.

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

Carbonell, M., 1989. Architectural photogrammetry. In: Karara HM, editor. Non-topographic photogrammetry. Falls Church, Virginia: ASPRS, p. 321–47.

Chandle, J.H., 1999. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. Earth Surface Processes and Landforms, 24, pp. 51-63.

Cooper, M.A.R., Robson, S., 1996. Theory of Close-Range Photogrammetry. Close Range Photogrammetry and Machine Vision, pp. 9-51.

Corradetti, A., Seers, T.D., Billi, A., Tavani, S., 2021. Virtual Outcrops in a Pocket: The Smartphone as a Fully Equipped Photogrammetric Data Acquisition Tool. The Geological society of America, 31, pp. 4–9.

Eltner, A., Sofia, G., 2020. Structure from motion photogrammetric technique. Developments in Earth Surface Processes, 23, pp. 1-24.

Fang, K., Dong, A., Tang, H., An, P., Zhang, B., Miao, M., Ding, B., Hu, X., 2022. Comprehensive assessment of the performance of a multi smartphone measurement system for landslide model test. Landslides, 20, pp. 845–864.

Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., Carbonneau P. E., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. Earth surface processes and Landforms, 38, pp. 421-430.

Fraser, C.S, Cronk, S., 2009. A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry .ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, pp. 328-333.

Gharehaghajlou1, A., Önal, O., 2018. A parametric study on the bulk density determination of soil specimens using close-range photogrammetry. 13th International Congress on Advances in Civil Engineering, İzmir, Turkey.

Govender, N., 2009. Evaluation of feature detection algorithms for structure from motion. Council for Scientific and Industrial Research, South Africa, https://www.researchgate.net/publication/40877914.

Harris, C., Stephens, M., 1988. A combined corner and edge detector. Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference, Manchester, pp. 147-151.

Hanif M., Seghouane A., 2012. Blurred Image Deconvolution Using Gaussian Scale Mixtures Model in Wavelet Domain. International conference on digital image computing techniques and applications (DICTA).

Hollick, J., Moncrieff, S., Belton, D., Woods, A.J., Hutchison, A., Helmholz, P., 2013. Creation of 3d models from large unstructured image and video datasets. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 40, pp. 133–137.

James, M.R., Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. Journal of Geophysical Research, 117, pp. 1-17.

Kun-Cahyono, B., 2009. Digital elevation modeling of inaccessible slope by using date signature main supervisor date co-supervisor close-range photogrammetric data. master's thesis, Civil Engineering Department Univ. Technology Petronas Bandar Seri Iskandar, 167p.

Lane, S.N., James, T.D., Crowell, M.D., 2000. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. The Photogrammetric Record, 16, pp. 793-821.

Langhammer, J., Janský, B., Kocum, J., Minařík, R., 2018. 3-D reconstruction of an abandoned montane reservoir using UAV photogrammetry, aerial LiDAR and field survey. Applied Geography, 98, pp. 9-21.

Lowe, D. G., 2004. Distinctive image features from scale invariant key points. International journal of computer vision, 60, pp. 91-110.

Matuzeviˇcius, D., Serackis, A., 2022. Three-Dimensional Human Head Reconstruction Using Smartphone-Based Close-Range Video Photogrammetry. Appl. Sci., 12(1), pp. 1-26.

Matthews, N. A., 2008. Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation. Technical Note 428. U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado. 42p.

Mohammadi, M., Rashidi, M., Mousavi, V., Karami, A., Yu, Y., Samali, B., 2021. Case study on accuracy comparison of digital twins developed for a heritage bridge via UAV photogrammetry and terrestrial laser scanning. in: Proceedings of the 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII 10.

Musicco, A., Rossi, N., Verdoscia, C., 2023. Accuracy evaluation of smartphone-based videogrammetry for cultural heritage documentation process. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48(2023), pp. 1119- 1126.

Raevaa, P.L., Filipovaa, S.L., Filipova, D. G., 2016. Volume computation of a stockpile a study case comparing GPS and UAV measurements in in an open pit quarry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41-B1, 23 ISPRS Congress, Prague, Czech Republic.

Remondino, F., El-Hakim, S., 2006. Image-based 3-D modelling: a review. The Photogrammetric Record 21(115), pp. 269–291.

Samad, A.M., Asri, N.A., Anuar Ahmad, A., 2012. The use of digital image for volume determination using digital close range photogrammetric method. Proceedings - 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, pp. 321-324.

Shan, J., Li, Z., Lercel, D., Tissue, K., Hupy, J., Carpenter, J., 2023. Democratizing photogrammetry: an accuracy perspective. Geo-spatial Information Science. 26(2), pp. 175-188.

Shao, X., Wei, K., He, X., 2023. Calibration of stereo-digital image correlation for large field of view measurement based on photogrammetry. Optics and Lasers in Engineering, 169, p.107732.

Tucci, G., Gebbia, A., Conti, A., Fiorini, L., Lubello, C., 2019. Monitoring and Computation of the Volumes of Stockpiles of Bulk Material by Means of UAV Photogrammetric Surveying. Remote Sens. 11(12), p. 1471.

Wróżyński, R., Pyszny, K., Sojka, M., Przybyła, C., Błażejewska, S.M., 2017. Ground volume assessment using 'Structure from Motion' photogrammetry with a smartphone and a compact camera. Open Geosci, 9, pp. 281–294.

Yakar, M., Yilmaz, H.M., Mutluoglu, O., 2013. Performance of photogrammetric and terrestrial laser scanning methods in volume computing of excavation and filling areas. Earth Sciences, 39, pp. 387–394.

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

Yilmaz, H.M., 2010. Close range photogrammetry in volume computing. Experimental Techniques, 34, pp. 48-54.

Yilmaz, H.M., Yakar, M., 2008. Computing of volume of excavation areas by digital close-range photogrammetry. Arabian Journal for Science and Engineering, 33(1), pp. 63-79.

Zhang, Z., Kang, J., Feng, L., Sun, Z., Wu, B., 2023. Practical zoom camera calibration method for close-range photogrammetry. Optics Letters, 48(2), pp. 243-246.

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

Evaluation of the videogrammetry method for calculating the volume of earthworks in comparison with the conventional methods of land surveying

Mehran Shafiei1[1], Asghar Milan [*2]

1. Master's student of photogrammetry, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering Shahid Beheshti University

2. Assistant professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering Shahid Beheshti University

Received: 01 Jun 2023 Accepted: 28 Aug 2023

Abstract

Calculating the volume of earthworks in mines is one of the challenging, costly, and time-consuming issues in the field. In mining projects, it is necessary to calculate the volume of excavation to estimate the volume of extraction in order to plan the sale of the produced products and to calculate the cost performance of the contractors. The calculation of excavation volumes presents many challenges, such as the selection of the best measurement tool and technique, the need to adjust maps produced in different time periods, the existence of inflation coefficients and the volume to weight conversion factor. Today, tools such as laser scanners, total stations and metric cameras are used to calculate earthwork volumes. However, they are expensive to use and require an experienced operator. Therefore, there is a need to investigate methods to calculate volumes in less time with acceptable accuracy. This research evaluated the use of smartphones for optimal volume estimation of earthworks. In this research, the image data obtained from the smartphone was processed with a technique based on structure from motion (SFM) and the results were used to create a digital terrain model to estimate the volume of earthworks. The calculated volume differences for the earthworks volume compared to ground methods for a soil mass and the studied excavation are 3.86% and 1.84% respectively, which shows that the method used in this research has the necessary accuracy to calculate earthworks volumes and considering the many advantages it has over traditional methods in terms of cost and time, it can replace them.

Keywords: Close Range Photogrammetry, Smartphone, Videogrammetry, Structure from Motion, Earthwork Volume.

Introduction

Choosing the best observation method for calculatingthe volume of earthworks in terms of accuracy, time and cost is a challenge the appropriate answer to which will depend on the conditions of the region in terms of access, topography, vegetation, residential context and extent of the region. Therefore, none of the techniques has absolute superiority over the other, and depending on the project conditions, one should try to choose the most optimal method. Among the most important factors affecting the accuracy of the calculated final volumes are the relative accuracy of determining the position of the sampling points (X, Y, Z), the density and distribution of the points. The higher the accuracy of the observations, the higher the reliability

*Corresponding author: a_milan@sbu.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.2.1019281

and accuracy of the subsequent processing. Nest is the density and distribution of the sampling points, which directly affects the conformity of the final three-dimensional surface with reality (Raevaa et al., 2016). The denser and more suitable the points are, especially in areas with extreme topography, the closer the 3D model will be to reality. In the upcoming research, the accuracy of calculating the volume of earthworks using smartphones will be investigated and evaluated in comparison with existing traditional methods. Unlike other methods, this method does not require the use of expensive geodesy and photogrammetry equipment, and the device used is a mobile phone in the data collection phase.

Materials and Methods

In the upcoming research, the volume of earthworks has been calculated using two videogrammetric methods and conventional ground operations. In the ground-based method, a total station is used to collect the required data. For videogrammetric data collection, a scale bar with known dimensions was used to solve the scale problem and the camera capabilities of mobile phones were used for filming. After filming, suitable images were extracted. After this step, the images were processed and the desired surfaces were reconstructed. This was done using digital photogrammetry tools. This involves extracting accurate and reliable location information from landscapes, features and objects using pairs of digital images and automatic matching. Next, the volume of data was calculated based on the DEM model. Finally, to validate the results, it was checked and evaluated with the volume obtained from the direct ground method.

Results and Discussion

In order toevaluate the results, the specific weight of the deposited soil resulting from the laboratory excavation was determined to be 1650 kg per cubic meter. Based on this specific weight, the actual volume of the soil mass was calculated to be 3.35 m^3. In the land surveying method, the surface was adjusted to the depot and the pit, and the combined method was used to calculate the volume of the earthworkbetween the two levels. In the videogrammetry method, two operators filmed the pit and the stockpile with a smartphone camera, and the frames were extracted from the video at a frequency of 0.5 seconds. Two control points (distance between points) were used to solve the scale problem of the dense point cloud, and two-scale bars were used to control the scale of the model. The actual length of the two scale bars was measured using a digital caliper and the values of 0.517 and 0.401 cm were read. In the produced model, 0.520 and 0.405 cm were obtained, which indicates an accuracy of about 3-4 mm for the model produced from the soil mass. The same process was repeated for the pit and the rod inside the pit was measured with an error of 6 mm and the rod at the top edge of the pit was measured with an error of 2 mm. Considering the same conditions, there are several possibilities for the reason of the increase of the error of the bar inside the pit: 1- Difference in the number of photos in which the scale bars are visible 2- Low quality of the camera 3- Lack of homogeneous accuracy throughout the model. The volume of the pit was calculated to be 32.66 square metres by total station and 32.056 square metres by videogrammetry, a difference of 0.604 square metres. For the soil deposit, the volume obtained from total station is 3.10 square metres, which is 0.19 square metres less than the soil volume obtained from the laboratory. Similarly, the volume of soil obtained from videogrammetry is 3.21 square meters for the first operator and 3.23 square meters for the second operator, which is less than the volume of soil from the laboratory for the first operator and the second operator by 0.14 and 0.12 square meters respectively.

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]

Conclusions

In this study, carried out on a soil mass and a pit, in order to evaluate the accuracy of the proposed method, the volume of the soil mass calculated in the soil mechanics laboratory was considered as the real value and the results obtained by the videogrammetry method and by land surveying based on it were evaluated. The analyses carried out show that the models of soil mass obtained with different cameras and by independent users are almost similar and that the small difference between the volume obtained and the number of points of the models is mainly due to the number and resolution of the images used. The difference between the videogrammetric method and the laboratory estimation and land survey for the soil mass and the pit indicates that the results of the methods are close to each other. In this research, two control points were defined and used to scale the model, and two numerical scale bars were used to control the scale and its homogeneity throughout the model. Considering the difference of 2-3 mm between the actual length and the measured length of the scale bar, it can be said that the model has a homogeneous scale. However, it is necessary to carry out experiments using a network of points scattered throughout the model with a known position to control the scale in vertical and horizontal modes.

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019281]