نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴

Vol.13, No.2, Summer 2025

۱ -۲۹

مقاله پژوهشی

انتخاب تصویر بهینه برای بهبود کیفیت هندسی تولید ارتوفتوموزاییک حقیقی از تصاویر پهپاد با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

مریم سجادیان[1*]، مسعود ورشوساز[2]، ابوالقاسم صادقی نیارکی[3]، جاناتان لی[4]

۱- دانشجوی دکتری فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی کامپیوتر، دانشگاه سجونگ، سئول، کره جنوبی

۴- استاد گروه جغرافیا و مدیریت محیط زیست، دانشگاه واترلو، واترلو، کانادا

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

چکیده

امروزه تولید ارتوفتوموزاییک حقیقی با کیفیت و با دقت بالا از تصاویر پهپاد به عنوان یک مسئله چالش برانگیز، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. یکی از عوامل تاثیرگذار در دقت و کیفیت این محصول، انتخاب تصویر مرجع بهینه می‌باشد. در پروژه‌های فتوگرامتری پهپاد، برای تشکیل هر پیکسل از ارتوفتوموزاییک، انتخاب‌های زیادی از میان تصاویر پوششدار وجود دارد. بنابراین استفاده از تصاویر مختلف با خصوصیات هندسی و رادیومتریکی متفاوت، می‌تواند تاثیر قابل توجهی در نتیجه ارتوفتوموزاییک داشته باشد. این مقاله به ارائه روشی جدید در تولید ارتوفتوموزاییک پرداخته است که با بکارگیری یک الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای تشکیل هر پیکسل از ارتوفتوموزاییک، بهترین تصویر مرجع را با لحاظ کردن معیارهای چندگانه شناسایی می‌کند. تعیین تصویر بهینه در دو گام وزندهی و تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام می‌گیرد. ابتدا در مرحله وزندهی با استفاده از نقاط گرهی سه‌بعدی، وزن معیارهای پنجگانه شامل فاصله از مرکز تصویربرداری، دقت پارامترهای توجیه خارجی، تعداد نقاط گرهی سه‌بعدی، تعداد نقاط کنترل زمینی و کیفیت تصویری تعیین می‌شود. سپس برای هر نقطه مدل رقومی سطح (*DSM*) در تصاویر نمایان مربوطه، معیارهای پنجگانه اندازه‌گیری و با استفاده از فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره تصاویر اولویت‌بندی می‌شوند. در ادامه، برای انتخاب تصویر بهینه، ارزیابی درونی به نحوی انجام می‌شود که خطای بازنگاشت نقاط گرهی سه‌بعدی همسایه، کاهش یابد. خروجی این فرآیند، یک تصویر مرجع بهینه برای هر نقطه *DSM* است که از آن برای پرکردن سلول ارتوفتوموزاییک متناظر استفاده می‌شود. روش پیشنهادی بر روی دو مجموعه داده پهپادمبنا اجرا و نتایج آن با روش‌های تک‌معیاره رایج مقایسه شده است. بر طبق نتایج بدست آمده، بر حسب *RMSE*، روش چندمعیاره در مناطق چک مجموعه داده اول توانسته است خطاهای ایجاد شده بر روی ارتوفتوموزاییک را تا ۱۵ سانتی‌متر، ۱۰ سانتی‌متر و ۸ سانتی‌متر نسبت به روش‌های تک معیاره زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری و فاصله از نادیر کاهش دهد. این مقادیر به ترتیب ۷ سانتیمتر، ۳ سانتی‌متر و ۳ سانتی‌متر در مجموعه داده دوم می‌باشند. با این حال، مدت زمان پردازشی روش پیشنهادی نسبت به سریع‌ترین روش تک‌معیاره (فاصله از مرکز تصویربرداری)، در مجموعه داده اول حدود ۲۸٪ و در مجموعه داده دوم ۱۵٪ بیشتر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها : ارتوفتوموزاییک، تصاویر پهپاد، مدل رقومی سطح، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تصویر بهینه.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

تلفن: ۰۲۱۸۸۸۷۷۰۷۱

Email: m.sajadian@email.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

۱- مقدمه

تولید ارتوفتوموزاییک[1]به عنوان یک محصول با ارزش فتوگرامتری، با بکارگیری مدل رقومی سطح (*DSM*[2]) و استفاده از فرایند ترمیم تصویر[3] انجام می‌گیرد [۱]. عوامل زیادی نظیر دقت سیستم پهپادی مورد استفاده، کیفیت و دقت تصاویر پهپادمبنا و دقت *DSM* در دقت و کیفیت ارتوفتوموزاییک تولیدی تاثیرگذار هستند [۲، ۳ و ۴]. تاکنون تحقیقات زیادی برای افزایش دقت در هر یک از عوامل ذکر شده انجام گرفته است [۵ و ۶]. با این حال یکی دیگر از عوامل مهم تاثیرگذار که کمتر به آن پرداخته شده است، تعیین تصویر مرجع مناسب برای تولید ارتوفتوموزاییک می‌باشد. همانطور که می‌دانیم، با توجه به پوشش زیادی که معمولا برای تصاویر پهپاد در نظر گرفته می‌شود، برای تشکیل هر پیکسل از ارتوفتوموزاییک انتخاب‌های زیادی از میان تصاویر همپوشان که پیکسل مربوطه در آن نمایان است وجود دارد [۷]. کیفیت و دقت تصاویر پهپاد به دلایل مختلفی از قبیل تاثیرپذیری بیشتر از شرایط هوایی و محیطی و منطقه‌ای، نوسانات سنجنده و ناپایداری سیستم تصویربرداری بسیار متغیرتر از تصاویر هوایی هستند [۸]. بنابراین ممکن است استفاده از تصاویر مختلف منجر به نتایج متفاوتی هنگام تولید ارتوفتوموزاییک با استفاده از تصاویر پهپاد گردد [۹].

در روش معمول برای تولید ارتوفتوموزاییک، ابتدا تک‌ارتوفتوها از تصاویر مختلف با استفاده از فرایند ترمیم، تولید و نواحی پنهان آنها پر می‌شوند [۱۰]. سپس تک‌ارتوفتوها بر اساس لبه‌های برش به یکدیگر دوخته و ارتوفتوموزاییک تولید می‌شود [۱۱، ۱۲ و ۱۳]. در فرایند تولید تک‌ارتوفتوها، موضوع تعیین تصویر بهینه برای پرکردن نواحی پنهان آنها مطرح می‌باشد [۱۴]. ترمیم تصویر با استفاده از *DSM* منجر به ایجاد اثری به نام نگاشت دوگانه[4] می‌شود [۵]. در این پدیده قسمت‌های مربوط به نواحی پنهان دوبار بر روی ارتوفتو نگاشت می‌شوند. پس از شناسایی نواحی پنهان[5] با روش‌هایی نظیر *Z*-بافر[6]، ارتفاع مبنا[7]، گرادیان ارتفاع مبنا[8]، گرادیان سطح مبنا[9] و زاویه مبنا[10] [۱۵، ۱۶ و ۱۷]، روش‌های جبران نواحی پنهان[11] به انتخاب تصویر بهینه برای پرکردن نواحی پنهان می‌پردازند [۱۸]. انتخاب تصویر بهینه بر اساس معیارهای تاثیرگذار در دقت و کیفیت ارتوفتوموزاییک انجام می‌گیرد.

بر اساس تحقیق جدید ورشوساز و همکاران (۲۰۲۴) موضوع تعیین تصویر بهینه را می‌توان برای تمامی نقاط ارتوفتوموزاییک و نه صرفا نواحی پنهان در نظر گرفت [۹]. در روش ارائه شده در تحقیق مذکور، ارتوفتوموزاییک به یکباره با انتخاب تصویر بهینه برای تمامی نقاط *DSM* در یک فرایند تک‌معیاره تولید می‌شود. نتایج این روش افزایش دقت ارتوفتوموزاییک و کاهش مدت زمان پردازشی را نسبت به روش معمول دوختن تصاویر نشان می‌دهد. در جهت توسعه این روش به منظور کاهش خطاهایی که در مجموعه داده‌های مختلف گزارش شد، در این مقاله روشی جدید برای تولید ارتوفتوموزاییک بر اساس استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره (*MCDM*[12]) ارائه شده است. بنابراین، اول، در مقایسه با روش معمول دوختن تصاویر برای تولید ارتوفتوموزاییک، روش پیشنهادی فرایند ترکیبی جدیدی برای تولید ارتوفتوموزاییک به صورت مستقیم در فضای زمینی ارائه می‌کند. دوم، روش پیشنهادی با توجه به معایب روش‌های پیشین

[1] *Orthophoto mosaic*
[2] *Digital Surface Model*
[3] *Image rectification*
[4] *Double mapping*
[5] *Occlusion detection*
[6] *Z-buffering*
[7] *Heigh-based*
[8] *Height-gradient-based*
[9] *Surface-gradient-based*
[10] *Angle-based*
[11] *Occlusion compensation*
[12] *Multi Criteria Decision Making*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

تک‌معیاره و چندمعیاره که در بخش (۲) تشریح شده‌اند، به گونه‌ای بنا نهاده شده است که سه مشکل عمده این روش‌ها را یعنی: ۱) نادیده گرفتن پارامترهای تاثیرگذار نظیر دقت پارامترهای توجیه خارجی و خطای بازنگاشت[1] ۲) عدم ارائه یک روش جامع در ترکیب تعداد نامحدودی از معیارهای تاثیرگذار و ۳) بی‌توجهی به مسئله وزن معیارها، را برطرف نماید. روش پیشنهادی به صورت نقطه‌مبنا، در دو گام وزندهی و تصمیم‌گیری چندمعیاره به تعیین تصویر مرجع بهینه به منظور افزایش دقت ارتوفتوموزاییک می‌پردازد. در ادامه مقاله، در بخش (۲) تحقیقات انجام گرفته در زمینه انتخاب تصویر بهینه بحث و بررسی شده‌اند. در بخش (۳) جزئیات روش پیشنهادی ارائه شده است. بخش (۴) به ارائه نتایج روش پیشنهادی و ارزیابی آن پرداخته است. همچنین نتایج روش پیشنهادی با سه روش تک‌معیاره مقایسه شده است. بخش (۵) نیز نتیجه‌گیری تحقیق اخیر را در برگرفته است.

۲- پیشینه تحقیق

موضوع انتخاب تصویر بهینه علاوه بر تولید ارتوفتوی حقیقی، در تحقیقات انجام شده در زمینه تولید مدل سه‌بعدی بافت‌دار[2] نیز وجود دارد [۱۹]. در زمینه تولید ارتوفتوی حقیقی هر چند که موضوع تعیین تصویر مرجع بهینه را می‌توان برای کل قسمت‌های ارتوفتوزاییک در نظر گرفت [۷]، اما اغلب این موضوع برای پرکردن نواحی پنهان ارتوفتوها بکار گرفته شده است [۵ و ۲۰]. در نقطه مطابق، در زمینه تولید مدل سه‌بعدی بافت‌دار فرایند تعیین تصویر بهینه در فضای سه‌بعدی برای انتساب رنگ به شبکه نامنظم مثلثی (*TIN*[3]) انجام می‌گیرد. تحقیقات انجام شده در زمینه انتخاب تصویر بهینه عمدتا مبتنی بر استفاده از یک یا چند معیار می‌باشد که با توجه به مقادیر معیارها، تصاویر مختلف اولویت‌بندی شده و از بین آنها تصویر بهینه انتخاب می‌شود [۱۸]. تاکنون معیارهایی نظیر فاصله از نادیر [۱۸]، فاصله از مرکز تصویربرداری[4] [۲۱]، زاویه دید [۲۲] و فاصله از نقطه پنهان [۲۳] در انتخاب تصویر بهینه بکار رفته‌اند. روش‌های بکار رفته را می‌توان به دو دسته تک‌معیاره و چندمعیاره طبقه‌بندی کرد. روش‌های تک‌معیاره که در آنها فقط با تکیه بر یک معیار مناسبترین تصویر انتخاب می‌شود و روش های چندمعیاره که چندین معیار در نظر گرفته شده و تصویر بهینه به کمک یک فرآیند بهینه‌سازی تعیین می‌شود. بر این اساس ابتدا در بخش (۲-۱) رایج‌ترین معیارهای بکار رفته در انتخاب تصویر بهینه معرفی و سپس در بخش (۲-۲) روش‌های معرفی شده در تحقیقات مختلف ارائه شده‌اند.

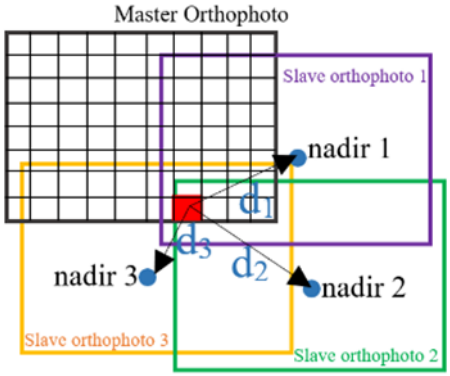
۲-۱- معیارها

- **فاصله از نادیر:** رایج‌ترین معیار در تولید ارتوفتوموزاییک می‌باشد [۱۸, ۲۳، ۲۴ و ۲۵]. منطق روش‌هایی که از این معیار استفاده می‌کنند آنست که اگر نقطه به نادیر نزدیک‌تر باشد جابجایی ارتفاعی آن کمتر و بنابراین احتمال اینکه به نقاط پنهان تصویر نیز نزدیک‌تر باشد کمتر است [۲۳]. مطابق شکل(۱)، پیکسل قرمز رنگ در ارتوفتوی مرجع[5] به عنوان یک پیکسل پنهان شناسایی شده است. برای پرکردن پیکسل پنهان در ارتوفتوی اصلی، از سه تصویر غیرمرجع[6] که پیکسل متناظر در آنها پنهان نیست، می‌توان استفاده کرد. در روش فاصله از نادیر، فاصله پیکسل متناظر تا نقطه نادیر تصویر مربوطه اندازه-گیری می‌شود. تصویری که کمترین فاصله از نادیر را دارد به عنوان تصویر بهینه برای پرکردن پیکسل پنهان استفاده می‌گردد. در اینجا تصویر غیرمرجع ۳

[1] *Reprojection error*
[2] *3D texture mapping*
[3] *Triangulated Irregular Network*
[4] *Projection center*
[5] *Master orthophoto*
[6] *Slave orthophoto*

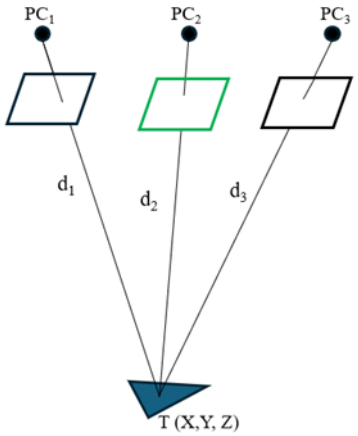
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

با کمترین فاصله (d_3) به عنوان تصویر بهینه تعیین می‌شود. استفاده از معیار فاصله از نادیر یک روش ساده و سریع است اما دقت آن وابسته به کیفیت و دقت تصویر می‌باشد [۱۸]. بنابراین چنانچه تصویر تعیین شده با این معیار دارای دقت توجیه خارجی کم دقتی باشد و یا از کیفیت مطلوبی برخوردار نباشد، ارتوفتوموزاییک کم دقتی تولید می‌کند. استفاده از معیار فاصله از نادیر غالبا در روش‌هایی مورد استفاده قرار گرفته است که هدف آنها کاهش تاثیر نقاط پنهان بر کیفیت ارتوفتوموزاییک می‌باشد [۲۳]. پیدا کردن نقطه نادیر عکسی به محاسبات اضافه نیاز دارد، به همین دلیل نقطه اصلی (*Principal point*) که فاصله کمی از نقطه نادیر در تصاویر دارد می‌تواند به عنوان تقریبی از نقطه نادیر در تعیین تصویر بهینه به کار رود [۲۶].



شکل ۱: انتخاب تصویر بهینه برای جبران نواحی پنهان ارتوفتو با استفاده از قید فاصله از نادیر

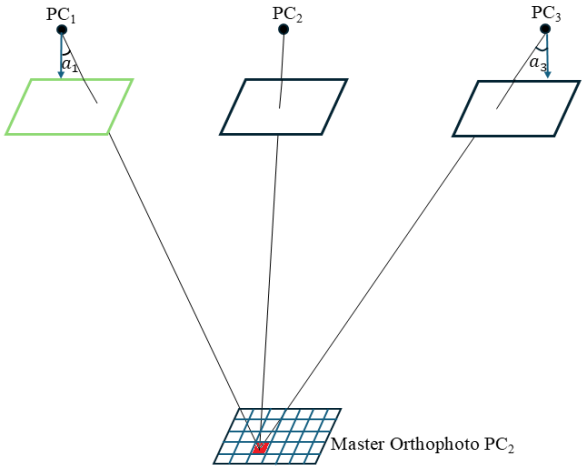
• **فاصله از مرکز تصویربرداری**: فاصله از مرکز تصویربرداری یک روش سریع و ساده برای انتخاب تصویر بهینه می‌باشد که معمولا در زمینه ایجاد بافت مدل سه‌بعدی از آن استفاده می‌شود [۲۱]. یک سلول *TIN* را مطابق با شکل (۲) با سه تصویر نمایان در نظر می‌گیریم. فاصله سه‌بعدی سلول مورد نظر با تصاویر نمایان یعنی d_1، d_2 و d_3 اندازه‌گیری می‌شود. تصویر دوم با کمترین فاصله (d_2) به عنوان تصویر بهینه تعیین می‌شود.



شکل ۲: انتخاب تصویر بهینه با معیار فاصله از مرکز تصویربرداری در مدل سه‌بعدی.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

• **زاویه دید:** در مقایسه با تولید ارتوفتو که فاصله از نادیر رایج‌ترین معیار انتخاب تصویر بهینه می‌باشد، زاویه دید رایج‌ترین معیار در تعیین تصویر بهینه برای ایجاد بافت مدل سه‌بعدی می‌باشد [۱۷، ۲۴ و ۲۷]. این معیار در پرکردن نواحی پنهان ارتوفتو نیز بکار برده می‌شود [۲۸]. مطابق شکل (۳) ارتوفتوی تولید شده از تصویر PC_2، دارای پیکسل پنهانی می‌باشد که رنگ قرمز نشان داده شده است. دو تصویر PC_1 و PC_3 به عنوان تصاویر نمایان برای جبران پیکسل پنهان می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. زاویه مابین خط شاغولی دوربین و محور نوری در دو تصویر نمایان اندازه‌گیری می‌شود. تصویر با کمترین مقدار زاویه دید که در اینجا تصویر PC_1 است، به عنوان تصویر بهینه تعیین می‌گردد. در روش زاویه دید امکان اینکه برای پیکسل‌های یا سلول‌های نزدیک یکدیگر تصاویر بهینه متعدد و مختلفی تعیین شود، زیاد می‌باشد. دلیل اصلی این امر آنست که هنگامی که تراکم ابر نقاط زیاد باشد، ممکن است سلول‌های *DSM/TIN* همسایه که با مساحت کم تولید شده‌اند، حتی برای نواحی هم صفحه و هموژن، توجهات مختلفی پیدا کنند [۲۴]. تحقیق اخیر با بکارگیری روش‌های تک‌معیاره زاویه دید و همچنین فاصله از نادیر بر روی تصاویر هوایی و همچنین پهپاد برای تولید ارتوفتو، با تاکید بر خطاهای به وجود آمده از روش زاویه دید، فاصله از نادیر را معیار قابل قبول‌تری معرفی کرده است.



شکل ۳: انتخاب تصویر بهینه با معیار زاویه دید برای تولید ارتوفتو.

• **فاصله از نقاط پنهان:** در این روش، برای جبران پیکسل پنهان ارتوفتوی مرجع، از تصویر همپوشانی استفاده می‌شود که پیکسل متناظر با نواحی (پیکسل‌های) پنهان فاصله بیشتری داشته باشد [۱۸ و ۲۳]. از آنجا که روش‌های تعیین ناحیه پنهان همواره تحت تاثیر عواملی نظیر کم دقتی *DSM*، با خطا روبرو هستند، این روش در کاهش اثرات نواحی پنهان شناسایی نشده بر روی ارتوفتو موثر می‌باشد.

• **کیفیت تصویری:** معیارهای ذکر شده اخیر تنها موقعیت و جایگاه هر نقطه را در فضای تصویری (فاصله از نادیر، فاصله از ناحیه پنهان) و در فضای مدلی/زمینی (زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری) جست‌وجو می‌کنند. در مقایسه با این معیارها، معیار کیفیت تصویری، تاثیر کیفیت هر تصویر را در تعیین تصویر بهینه دخیل می‌کند. این مسئله مخصوصا در مورد تصاویر بردکوتاه که کیفیت تصاویر به واسطه ویژگی‌های محیطی و شرایط نورپردازی ممکن است بسیار متغیر باشد، می‌تواند بسیار تاثیرگذار باشد. به طور مثال هوو و همکاران (۲۰۲۰) با دخیل کردن

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

کیفیت تصویری همراه با معیار زاویه دید در ایجاد بافت مدل سه‌بعدی تولید شده از تصاویر بردکوتاه همگرا توانسته است کیفیت محصول تولیدی را از لحاظ کیفیت و وضوح تصویری افزایش دهد [۲۲].

۲-۲- روش‌های تعیین تصویر بهینه

روش‌های انتخاب تصویر بهینه را می‌توان به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد: روش‌های تک‌معیاره و چندمعیاره. در روش‌های تک‌معیاره، تنها یک معیار—مانند فاصله از نادیر (در ارتوفتوموزاییک) یا زاویه دید (در ایجاد بافت مدل سه‌بعدی)—برای انتخاب تصویر بهینه استفاده می‌شوند [۱۸]. محبوبیت این روش‌ها به دلیل سادگی اجرا و نتایج نسبتاً قابل‌قبول آن‌هاست. با این حال، در برخی پروژه‌ها نتایج غیرمنتظره و کم‌دقت حاصل از این روش‌ها، پژوهشگران را به بهره‌گیری از رویکردهای پیچیده‌تر سوق داده است [۲۲]. در این راستا، روش‌های چندمعیاره با هدف بهبود دقت و کیفیت خروجی توسعه یافته‌اند [۲۰]. فاصله از نادیر، فاصله از نقطه اصلی، فاصله از مرکز تصویربرداری و زاویه دید از جمله معیارهای پایه هستند که با معیارهای کمکی نظیر فاصله از نقطه پنهان و کیفیت تصویری در بهینه‌یابی استفاده شده‌اند. به طور مثال، شیکیر و تورپ (۱۹۹۸) در روشی بر مبنای دوختن تصاویر، صرفا انتخاب تصویر بهینه را برای پرکردن نواحی پنهان تک ارتوفتوها معرفی کردند [۲۳]. آنها ترکیب سه قید نزدیکی به نادیر، زاویه دید و فاصله از ناحیه پنهان را معرفی کردند. به این صورت که تصویری که کمترین مقدار را دارد، برای پر کردن نواحی پنهان تک‌ارتوفتو استفاده می‌شود. نیلسن (۲۰۰۴) با ایده گرفتن از تحقیق قبل، از ترکیب معیارهای نزدیکی به نقطه نادیر و دوری از ناحیه پنهان به صورت ضرب دو پارامتر برای تولید ارتوفتوموزاییک استفاده کرده است [۱۸]. طبق نتایج بدست آمده از این تحقیق که در مجموعه داده تصاویرهوایی ارائه شده است، روش تک‌معیاره فاصله از نادیر، موجب ایجاد خطاهایی بر روی ارتوفتو شده است که روش ترکیبی توانسته است در کاهش خطاها موثر باشد. هانوش (۲۰۱۰) از دو پارامتر فاصله از مرکز تصویربرداری و زاویه دید برای ایجاد بافت مدل سه‌بعدی استفاده کرده است [۲۱]. معیار فاصله بیانگر فاصله مرکز مثلث *TIN* از مراکز تصویربرداری است. این دو معیار در ترکیب با یکدیگر بیانگر قدرت تفکیک در فضای شی هستند که هر تصویر که مقدار بیشتری را داشته است به عنوان تصویر بهینه انتخاب می‌شود. بارازتی و همکاران (۲۰۱۴) پارامتر رزولوشن تصویر در فضای شی و جهت دید دوربین را برای انتخاب تصویر بهینه برای تولید ارتوفتوی حقیقی بکار گرفته‌اند [۱۴]. هرچند چگونگی ترکیب این دو معیار و ارزیابی و مقایسه معیارها ارائه نشده است. هوو و همکاران (۲۰۱۶) ترکیب دو معیار نزدیکی به نادیر و زاویه دید را برای تعیین تصویر مرجع برای جبران صرفا نواحی پنهان تصاویر هوایی پیشنهاد داده‌اند [۲۰]. هوو و همکاران (۲۰۲۰) در یک تحقیق جدیدتر به ترکیب دو معیار زاویه دید و کیفیت تصویر برای ایجاد بافت مدل سه‌بعدی تصاویر بردکوتاه اخذ شده از اشیا تاریخی پرداخته‌اند [۲۲].

۲-۳- نقد و بررسی تحقیقات پیشین

ذکر این نکته ضروری است که در تحقیقات پیشین در زمینه تعیین تصویر مرجع بهینه چه در تولید ارتوفتوموزاییک و چه در تولید مدل سه‌بعدی بافت‌دار، ارزیابی جامعی بر روی نتایج معیارها و روش‌های مختلف انجام نگرفته است تا بررسی و مقایسه کامل روش‌ها و معیارها امکان پذیر باشد. اما به طور کلی بر اساس خروجی‌های بدست آمده، معیارها و روش‌های مختلف منجر به نتایج و دقت‌های مختلفی می‌شوند [۱۸]. به همین دلیل است که هر تحقیقی با تغیر معیارها و همچنین ترکیب معیارها سعی در جبران خطای ایجاد شده داشته است. اساسا چهار مسئله اساسی در نقد و بررسی تحقیقات گذشته وجود دارد که در ادامه لیست شده‌اند.

- **عدم توجه به مسئله بهینه یابی برای تمامی نقاط ارتوفتوموزاییک**: در روش معمول تولید

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

ارتوفتوموزاییک که بر اساس دوختن تک ارتوفتوها به یکدیگر می‌باشد، تعیین تصویر بهینه تنها برای پرکردن نواحی پنهان ارتوفتوها بکار گرفته شده است. در حالیکه تعیین تصویر بهینه را می‌توان برای تمامی نقاط ارتوفتوموزاییک در نظر گرفت. این موضوع در تصاویر پهپادمبنا که برای تشکیل هر پیکسل از ارتوفتوموزاییک انتخاب‌های زیادی از میان تصاویر با پوشش زیاد و خصویات هندسی و رادیومتریکی متفاوت در اختیار داریم قابل اهمیت‌تر است.

- **معیارهای تاثیرگذار نادیده شده**: به جز معیارهای معمول بکار رفته، معیارهای تاثیر گذار دیگری در تصاویر پهپادمبنا وجود دارند که اگر در فرایند تعیین تشخیص تصویر بهینه دخیل شوند به افزایش دقت ارتوفتوموزاییک کمک می‌کنند. از جمله این معیارها دقت تخمین پارامترهای توجیه خارجی و خطای بازنگاشت نقاط سه‌بعدی هستند. این معیارها در تصاویر پهپاد می‌توانند متفاوت باشند از این رو توجه به آن‌ها ضروری است.
- **عدم وجود یک روش جامع در ترکیب معیارها**: هر یک از تحقیقات به بکارگیری چند معیار محدود در انتخاب تصویر بهینه پرداخته‌اند و قابلیت ترکیب و اضافه کردن معیارهای مختلف را ندارد. تاکنون هیچ روشی ارائه نشده است که بتواند بدون محدودیت معیارهای مختلف دلخواه را وارد چرخه تابع هدف کند و فرایند بهینه‌گزینی را انجام دهد.
- **عدم توجه به مسئله اولویت‌بندی بین معیارها**: معیارهای مختلف می‌توانند از لحاظ اهمیت در تعیین تصویر بهینه متفاوت باشند. به عبارتی نقش برخی معیارها می‌تواند بیشتر و یا کمتر در نظر گرفته شود که تاکنون در تحقیقات به آن توجه نشده است.

در مقایسه با پژوهش‌های پیشین در زمینه تولید ارتوفتوی حقیقی، که انتخاب تصویر بهینه عمدتاً با هدف پر کردن نواحی پنهان در تک‌ارتوفتوها مطرح بوده است، مطالعات سجادیان و ورشوساز (۲۰۲۳) [۷] و ورشوساز و همکاران (۲۰۲۴) [۹]، روش‌هایی تک‌معیاره برای تولید یکپارچه ارتوفتوموزاییک ارائه کرده‌اند. این روش‌ها با انتخاب تصویر بهینه برای تمامی پیکسل‌ها، بر اساس معیارهایی چون فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری، فرآیند تولید ارتوفتوموزاییک را به‌صورت یک‌مرحله‌ای ممکن ساخته‌اند. نتایج حاصل از این روش‌ها، نسبت به روش‌های دوختن تک‌ارتوفتوها بر اساس لبه‌های برش، عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. با این حال، اجرای این رویکردهای تک‌معیاره بر مجموعه‌داده‌های اخذشده توسط پهپاد، به‌ویژه در شرایط پرواز خطی و مناطق دارای شیب زیاد، منجر به بروز خطاهایی در خروجی ارتوفتوموزاییک گردید. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارتقای روش‌های مذکور و در راستای کاهش خطاهای تولید ارتوفتوموزاییک، یک رویکرد چندمعیاره جامع را پیشنهاد می‌دهد. در این روش، برخلاف روش‌های پیشین با تعداد محدودی معیار، امکان ترکیب تعداد نامحدودی از معیارهای دلخواه فراهم شده است. همچنین، معیارهایی که پیش‌تر نادیده گرفته شده بودند اما می‌توانند نقش مؤثری در بهبود نتایج در داده‌های پهپادمبنا داشته باشند، شناسایی و در فرآیند انتخاب تصویر مرجع لحاظ شده‌اند. از جمله این معیارها می‌توان به دقت پارامترهای توجیه خارجی و خطای بازنگاشت نقاط اشاره کرد که برای نخستین‌بار در این زمینه به‌کار گرفته شده‌اند. افزون بر این، وزن‌دهی معیارها بر اساس اولویت‌گذاری مبتنی بر نقاط گرهی سه‌بعدی انجام گرفته است.

۳- روش پیشنهادی

تهیه ارتوفتوموزاییک در روش پیشنهادی مطابق آنچه در روندنمای شکل (۴) نشان داده شده است، در سه مرحله اصلی شامل ۱) پردازش‌های اولیه، ۲) تعیین تصویر بهینه و ۳) تولید یکباره موزاییک انجام می‌گیرد. برخلاف روش معمول تولید ارتوفتوموزاییک که بر مبنای دوختن تک‌ارتوفتوها بر اساس لبه‌های برش می‌باشد [۱۲، ۱۳ و ۲۹]، در روش پیشنهادی ارتوفتوموزاییک به یکباره و در یک گام تولید می‌شود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

فرآیند تولید ارتوفتوموزاییک نیازمند سه داده‌ی کلیدی است: تصاویر هوایی، *DSM* و پارامترهای تبدیل بین فضاهای تصویری و زمینی. این داده‌ها در مرحله‌ی پیش‌پردازش آماده‌سازی می‌شوند. مرحله دوم در دو گام وزندهی و تصمیم‌گیری چندمعیاره به تعیین تصویر بهینه می‌پردازد. هدف این مرحله، انتخاب مناسب‌ترین تصویر از میان تصاویر نمایان هر نقطه است، به‌گونه‌ای که دقت و کیفیت ارتوفتوموزاییک نهایی را به حداکثر برساند. وزن‌دهی معیارها با استفاده از نقاط گرهی سه‌بعدی و بر اساس میزان اهمیت هر معیار در تصمیم‌گیری انجام می‌شود. پس از تعیین وزن‌ها، با استفاده از روش *MCDM* و با در نظر گرفتن کاهش خطای بازنگاشت به‌عنوان شاخص ارزیابی درونی، تصویر مرجع بهینه برای هر نقطه‌ی *DSM* انتخاب می‌گردد. معیارهای مؤثر شامل فاصله از مرکز تصویر، دقت پارامترهای توجیه خارجی، تعداد نقاط گرهی، تعداد نقاط کنترل زمینی، و کیفیت تصویری هستند. در نهایت، ارتوفتوموزاییک با استفاده از تصاویر بهینه منتخب و در قالب یک فرآیند یکپارچه تولید می‌شود. برای این منظور ابتدا شبکه‌ای از سلول‌ها با ابعاد مساوی با *DSM* ساخته می‌شود. سپس فرایند انتقال مختصات سه‌بعدی به دوبعدی (زمینی به تصویری) برای نقاط *DSM* با تصویر بهینه انجام می‌گیرد. مقادیر رنگی *(R، G* و *B)* متعلق به مختصات تصویری محاسبه شده، برای پر کردن سلول‌های شبکه متناظر با نقطه *DSM* استفاده می‌شود. به این ترتیب ارتوفتوموزاییک به یکباره شکل می‌گیرد. در ادامه مراحل روش پیشنهادی تشریح شده است.

۳-۱- پردازش‌های اولیه

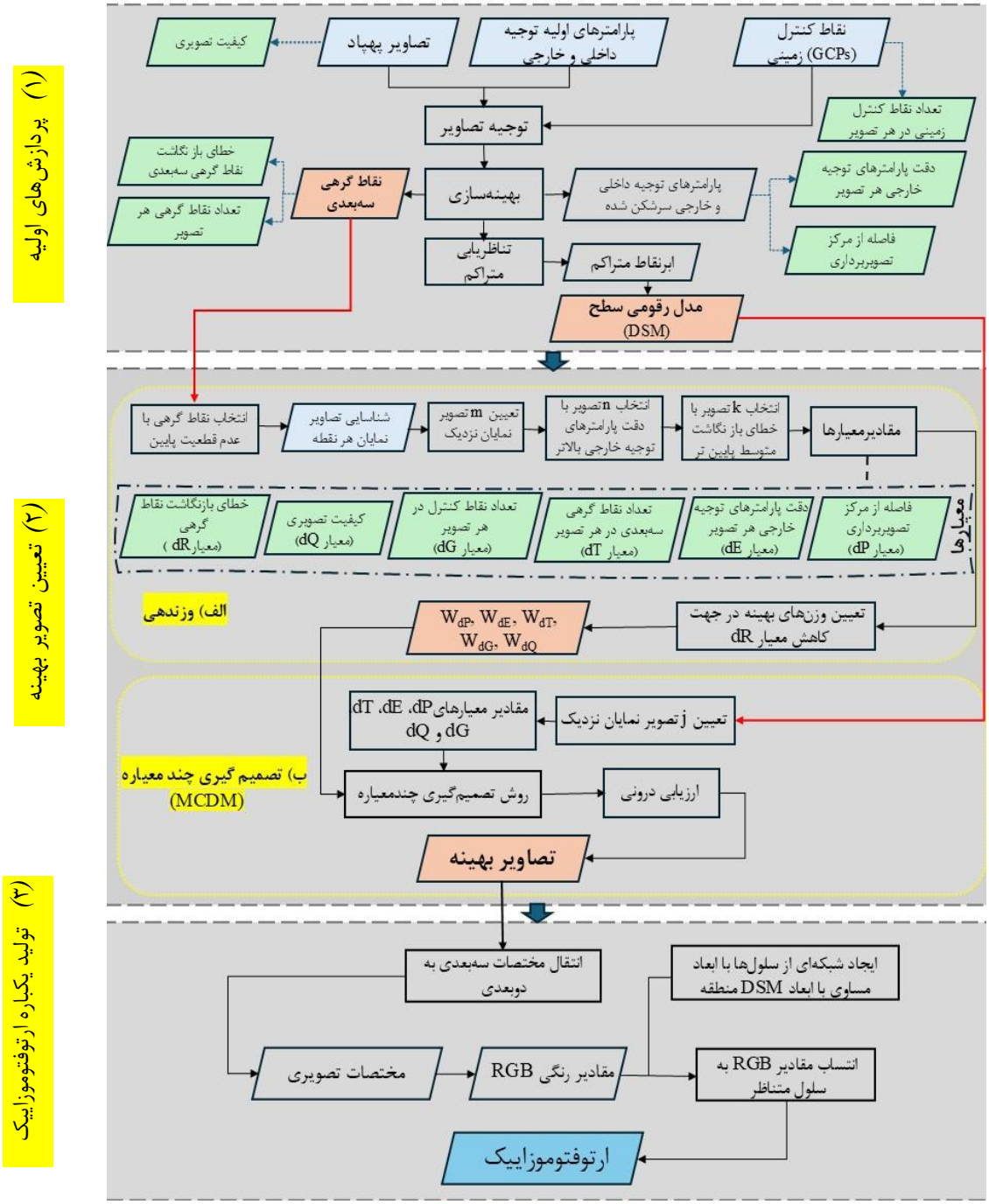
مرحله اول به آماده سازی داده‌های مورد نیاز برای تولید ارتوفتوموزاییک می‌پردازد. علاوه بر این مقادیر معیارهای تعیین تصویر بهینه که در مرحله دوم -تعیین تصویر بهینه- مورد استفاده قرار می‌گیرند، تعیین می‌شوند.

الف) تهیه داده‌های پایه: برای تولید ارتوفتو از تصاویر به *DSM* و پارامترهای سرشکن شده توجیه داخلی و خارجی آنها نیاز داریم. ابتدا نقاط کلیدی بر روی تصاویر استخراج می‌شوند. سپس تناظریابی تصویری برای تعیین نقاط گرهی انجام می‌گیرد. پس از آن، با استفاده از نقاط گرهی و با معلوم بودن مقادیر اولیه توجیهات داخلی و خارجی، فرایند توجیه تصویر انجام و برای بهینه کردن آن از نقاط کنترل زمینی استفاده می‌شود. نتیجه این فرایند تخمین مختصات سه‌بعدی نقاط گرهی (ابر نقاط غیر متراکم) و پارامترهای بهینه شده توجیه داخلی و خارجی تصاویر است. سپس تناظریابی تصویری متراکم انجام و با معلوم بودن پارامترهای سرشکن شده توجیهات تصاویر، مختصات سه بعدی نقاط متراکم محاسبه می‌گردد. ابرنقاط متراکم منطقه با ابعاد دلخواه درونیابی شده و *DSM* تولید می‌شود.

ب) تعیین مقادیر معیارهای چندگانه: برای تشکیل هر پیکسل در ارتوفتوموزاییک، تصویر بهینه باید پیوستگی موزاییک و حداقل خطای بازنگاشت را تضمین کند. روش‌های مبتنی بر فاصله از نادیر و مرکز تصویربرداری، با تکیه بر نزدیکی هندسی به نقطه نادیر، به حفظ یکنواختی هندسی کمک می‌کنند [۹]، اما صرفاً جایگاه بازنگاشت را مدنظر دارند و به کیفیت یا دقت تصویر توجهی ندارند. در روش پیشنهادی، افزون بر معیار هندسی پایه، معیارهای مکمل برای بهبود انتخاب تصویر بهینه لحاظ شده‌اند. معیار دقت پارامترهای توجیه خارجی -تصاویر با پارامترهای دقیق‌تر- دقت ارتوفتوی بالاتری را تضمین می‌کند. معیارهای تعداد نقاط گرهی سه‌بعدی و کنترل زمینی، در انتخاب تصاویر با استحکام مدلی بالاتر کمک می‌کنند. کیفیت کلی تصویر به‌عنوان معیار مکمل برای تضمین وضوح تصویری استفاده شده است. در ادامه چگونگی تعیین و محاسبه مقادیر معیارهای چندگانه بکار رفته در روش پیشنهادی به تفصیل شرح داده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]



شکل ۴: روندنمای کلی روش پیشنهادی.

- **فاصله از مرکز تصویر برداری:** فاصله بین هر نقطه زمینی و مرکز تصویربرداری است که مقدار آن از اختلاف موقعیت سلول i *DSM* ام $(X_i,\ Y_i,\ Z_i)$ و پارامتر موقعیت توجیه خارجی تصویر j ام (X_O^j, Y_O^j, Z_O^j) طبق رابطه (۱) بدست می‌آید. استفاده از معیار فاصله از مرکز تصویربرداری در کاهش خطای بازنگاشت و

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

کاهش نواحی پنهان موثر است.

رابطه(۱)

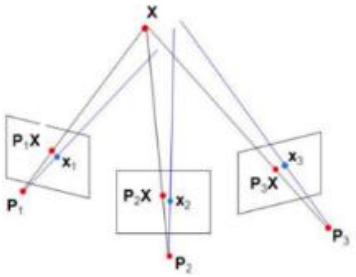
$$D_{ij} = \sqrt{(X_i - X_O^j)^2 + (Y_i - Y_O^j)^2 + (Z_i - Z_O^j)^2}$$

- **دقت پارامترهای ششگانه توجیه خارجی:** در پایان فرایند توجیه تصاویر، دقت پارامترهای توجیه خارجی هر تصویر شامل δ_{X_O}، δ_{Y_O}، δ_{Z_O}، δ_ω، δ_φ و δ_k که به ترتیب دقت پارامترهای موقعیت X ، Y و Z ، و دقت پارامترهای دوران ω، φ و k می‌باشند تخمین زده می‌شود. دقت نهایی توجیه خارجی تصویر j ام از طریق رابطه (۲) تعیین می‌شود. لحاظ کردن دقت پارامترهای توجیه خارجی در انتخاب تصویر بهینه، می‌تواند به افزایش دقت بازنگاشت نقطه در تصویر بینجامد.

رابطه(۲)
$$DE = \sqrt{\frac{\delta^2_{X_O^j} + \delta^2_{Y_O^j} + \delta^2_{Z_O^j} + \delta^2_{\omega^j} + \delta^2_{\varphi^j} + \delta^2_{k^j}}{6}}$$

- **تعداد نقاط گرهی هر تصویر:** محتوا یا بافت تصویری از جمله عوامل تاثیرگذار در تعداد نقاط گرهی سه‌بعدی استخراج شده از هر تصویر پس از فرایند توجیه می‌باشد. تصاویری که پوشش دهنده مناطق آبی و جنگلی هستند تعداد نقاط گرهی سه‌بعدی کمتری دارند. بنابراین، با در نظر گرفتن این معیار، تصاویر با بافت بهتر و استحکام مدل سه‌بعدی بالاتر در تعیین تصویر بهینه امتیاز بیشتری می‌گیرند.
- **تعداد نقاط کنترل زمینی نشانه‌گذاری شده در هر تصویر:** نقاط کنترل زمینی نقش مهمی در افزایش دقت فرایند توجیه مطلق تصویر دارند. تصویر با تعداد نقاط کنترل بیشتر از استحکام بیشتری در مدل سه‌بعدی برخوردار است. بنابراین با اعمال این معیار، تصاویری که استحکام و توجیه بالاتری دارند دارای اولویت بالاتر در تولید ارتوفتوموزاییک هستند.
- **کیفیت تصویری:** معیارهای مختلفی برای ارزیابی کیفیت تصویر نظیر واریانس میانگین، گرادیان میانگین، نسبت سیگنال به نویز و اطلاعات آنتروپی وجود دارند [۳۰]. شرایط نوری نامناسب در برخی تصاویر پهپاد به دلایلی نظیر وجود مه و تکه‌های ابر و همچنین زمان عکسبرداری، کیفیت تصویری را پایین می‌آورند. بنابراین با لحاظ کردن این معیار، کیفیت تصویری را به عنوان یک مزیت در انتخاب تصویر بهینه در نظر می‌گیریم.
- **خطای بازنگاشت:** اختلاف مجموع فواصل بین نقاط تناظریابی شده و موقعیت تصویری که از فرایند بازنگاشت بدست آمده است بیانگر خطای بازنگاشت یک نقطه است. نقاط x_i در m تصویر مطابق با شکل زیر به عنوان نقاط متناظر شناخته شده و موقعیت زمینی آنها (X) استخراج گردیده است. حال نقطه X در معادلات معکوس سرشکنی قرار داده می‌شود و موقعیت تصویری آنها P_iX تخمین زده می‌شود. میانگین مجموع فواصل بین نقاط تناظریابی شده و تخمین زده شده (D) مطابق با رابطه (۳) بیانگر خطای بازنگاشت یک نقطه می‌باشد [۳۱]:

رابطه(۳)
$$E(P.X) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} D\,(x_i\,.\,P_i\,X)$$



۳-۲- تعیین تصویر بهینه

بعد از تولید داده‌های مورد نیاز برای تولید ارتوفتوموزاییک، یک مرحله میانی برای تعیین تصویر بهینه بکار گرفته‌ایم. هدف این است که برای هر نقطه DSM از بین تصاویر نمایان مربوط به آن، بهترین تصویر برای تولید ارتوفتوموزاییک در جهت افزایش دقت و کیفیت آن تعیین شود. اینکار با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری چندمعیاره صورت گرفته است که برای اولین بار است در این کاربرد خاص استفاده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

در روش‌های $MADM$[1] که نوعی از روش‌های $MCDM$ هستند، با گزینه‌های از پیش تعریف شده‌ای روبرو هستیم که با مجموعه‌ای از معیارها توصیف شده‌اند. در اینجا وظیفه اصلی ارزیابی و رتبه‌بندی تعداد محدودی گزینه می‌باشد [۳۲]. فرض کنید برای تشکیل هر پیکسل از ارتوفتوموزاییک حقیقی، A انتخاب از بین تصاویری که پیکسل مربوطه در آن نمایان است داشته باشیم. ساده‌ترین روش برای تعیین بهترین تصویر با توجه به n معیار در نظر گرفته شده این است که یک تابع هدف به صورت مجموعه ای از n معیار مطرح در انتخاب بهترین تصویر در نظر گرفته شود و هر تصویر که مناسب‌ترین مقدار را کسب نماید به عنوان تصویر نهایی انتخاب گردد. اما اگر معیارهای موردنظر در انتخاب تصویر مناسب از لحاظ اهمیت همتراز نباشد گزینه بهتر استفاده از یک تابع هدف به صورت وزندار می‌باشد که W در آن نشان‌دهنده وزن هر معیار است که بیان کننده اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر است. بنابراین تعیین تصویر بهینه در روش پیشنهادی در دو فاز مرحله وزندهی و تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام گرفته است که در ادامه شرح داده شده است.

الف) مرحله وزندهی

تعیین وزن معیارها، یک فرایند مستقل از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد. به عبارت دیگر وزن معیارها را می‌توان به هر روش دلخواه قبل از اعمال روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، تعیین کرد. همان طور که ذکر شد، هدف از وزندهی در موضوع این پژوهش، تعیین اهمیت معیارها در فرایند تصمیم‌گیری است. نقاط گرهی سه‌بعدی استخراج شده از مرحله اول را در نظر می‌گیریم. درصد مشخصی از نقاط گرهی که عدم قطعیت[2] پایین‌تری دارند انتخاب می‌کنیم. از بین تصاویر نمایان مربوط به هر نقطه گرهی، m تصویر نزدیکتر را انتخاب می‌کنیم. حذف تصاویر با فاصله بیشتر به دلیل اهمیت معیار فاصله از مرکز تصویربرداری در فرایند بازنگاشت است. از بین این تصاویر n تصویر که دقت پارامترهای توجیه خارجی بالاتری دارند را انتخاب می‌کنیم. در نهایت از بین این تصاویر k تصویر که خطای بازنگاشت متوسط کمتری دارند را بر می‌گزینیم. مقادیر m ، n و k در این پژوهش به صورت تجربی انتخاب شده‌اند. برای خودکارسازی تعیین هر کدام، استفاده از معیارهای زیر پیشنهاد می‌گردد:

m: تصاویر نمایانی انتخاب می‌شوند که فاصله آنها از نقطه گرهی سه‌بعدی کمتر از میانه فاصله‌ها باشد.

n: تصاویری که دقت پارامترهای توجیه آن‌ها از میانگین دقت پارامترهای توجیه کمتر یا مساوی باشد، انتخاب می‌شوند.

k: تصاویری که خطای بازنگاشت آن‌ها کمتر از میانگین خطای بازنگاشت نقاط گرهی سه‌بعدی باشد، انتخاب می‌شوند.

بنابراین در نهایت تعداد مشخصی نقطه گرهی سه‌بعدی منتخب داریم که تعداد معینی از تصاویر نمایان آن‌ها با توجه به معیار نزدیکی به نقطه، دقت پارامترهای توجیه خارجی بهتر و حداقلی خطای بازنگاشت به عنوان تصاویر منتخب تعیین شده‌اند. مقادیر معیارهای ششگانه نقاط گرهی در تصاویر را از مرحله اول در اختیار داریم. تابع هدف $f(d)$ را به صورت رابطه (۴) تعریف می‌کنیم:

رابطه(۴)

$$f(d) = w_{dP}dP + w_{dE}dE + w_{dT}dT + w_{dG}dG + w_{dQ}dQ$$

که در رابطه (۴)، dP، dE، dT، dG و dQ به ترتیب مقادیر نرمال شده مربوط به معیارهای فاصله از مرکزتصویربرداری، دقت پارامترهای توجیه خارجی، تعداد نقاط گرهی سه‌بعدی در هر تصویر، تعداد نقاط کنترل زمینی در هرتصویر و کیفیت تصویری، و w_{dP}، w_{dE}، w_{dT}، w_{dG} و w_{dQ} به ترتیب وزن معیارهای مربوطه هستند. بنابراین اگر i نقطه گرهی منتخب و j تصویر منتخب داشته باشیم، $i\times j$ معادله تشکیل می‌شود (جدول (۱)).

[1] *Multi Atribute Decision Making*
[2] *Uncertainty*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

جدول ۱: ماتریس معادلات وزندهی (A) با استفاده از نقاط گرهی سه‌بعدی

	شاخص‌ها	فاصله از مرکز تصویربرداری	دقت پارامترهای توجیه خارجی هر تصویر	تعداد نقاط گرهی سه‌بعدی در هر تصویر	تعداد نقاط کنترل زمینی در هر تصویر	کیفیت تصویربرداری
گزینه‌ها	نقطه منتخب ۱ در تصویر منتخب ۱	A_{11}^1	A_{11}^2	A_{11}^3	A_{11}^4	A_{11}^5
	نقطه منتخب ۱ در تصویر منتخب ۲	A_{12}^1	A_{12}^2	A_{13}^3	A_{14}^4	A_{15}^5
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋱
	نقطه منتخب i در تصویر منتخب j	A_{ij}^1	A_{ij}^2	A_{ij}^3	A_{ij}^4	A_{ij}^5

معادله را به صورت رابطه (۵) تنظیم می‌کنیم:

$$A_{(ij\times5)}W_{di(5\times1)} = b_{(ij\times1)} \quad \text{رابطه(۵)}$$

که در رابطه (۵)، $A_{(ij\times5)} = [dP.dE.dT.dG.dQ]$ ماتریس معلوم معادله است که مطابق با جدول (۱) تشکیل می‌شود، $W_{di(5\times1)} = [w_{dP}.w_{dE}.w_{dT}.w_{dG}.w_{dQ}]$ ماتریس مجهول (وزن معیارها) و b مقادیر نرمال شده خطای بازنگاشت نقاط گرهی سه‌بعدی در تصاویر (ماتریس معلوم) هستند. از روش‌هایی نظیر تجزیه مقادیر منفرد (*SVD*[1]) (رابطه (۶) و رابطه (۷)) در جهت بدست آوردن پارامترهای مجهول می‌توان استفاده کرد. بنابراین ما از طریق یکسری داده‌های نمونه که مربوط به تصاویر با خطای بازنگاشت حداقل هستند تابع بهینه‌ای را پیدا می‌کنیم که ضرایب نرمال شده این تابع، وزن معیارها هستند.

$$[U, S, V] = SVD\,(A_{(ij\times5)}) \quad \text{رابطه(۶)}$$

$$W_{di(5\times1)} = V \times ((U \times b)./diag(S)) \quad \text{رابطه(۷)}$$

ب) تصمیم‌گیری چندمعیاره

شکل (۵) سلسله مراتب تصمیم‌گیری در موضوع این تحقیق در انتخاب تصویر بهینه را بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان می‌دهد. مطابق این شکل هدف انتخاب تصویر مرجع بهینه، معیارها شامل فاصله از مرکز تصویربرداری، دقت پارامترهای توجیه خارجی تصویر، تعداد نقاط گرهی در هر تصویر، تعداد نقاط کنترل سه‌بعدی در هر تصویر و کیفیت تصویری، و گزینه‌ها تصاویر نمایان مربوط به هر نقطه *DSM* می‌باشند.

یک نقطه *DSM* را در نظر می‌گیریم. از میان تصاویر نمایان مربوط به آن، j تصویر نزدیک انتخاب می‌شود. مقادیر معیارهای پنجگانه در این تصاویر را از مرحله اول در اختیار داریم. با مشخص بودن وزن معیارها، از روش مجموعه ساده وزنی یا *SAW*[2] برای انتخاب تصویر مرجع بهینه استفاده شده است. این روش به دلیل سهولتی که دارد محبوب‌ترین و رایج‌ترین روش *MADM* است. گام اول این روش تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری است که ستون‌های آن را معیارها (معیارهای پنجگانه مذکور) و سطرهای آن را گزینه‌ها (تصاویر نمایان مرجع) تشکیل می‌دهند. گام دوم نرمالسازی ماتریس تصمیم‌گیری است. به این دلیل که معیارها در بازه، مقیاس و واحدهای مختلفی قرار دارند لازم است آنها را نرمال یا بی‌مقیاس کنیم. در روش *SAW* برای نرمال کردن معیار مثبت، تک تک اعداد آن ستون را بر بزرگترین عدد تقسیم می‌کنیم. اگر معیار منفی باشد، کمینه آن ستون تقسیم بر تک تک اعداد می‌شود.

[1] *Singular Value Decomposition*

[2] *Simple Additive Weighting*

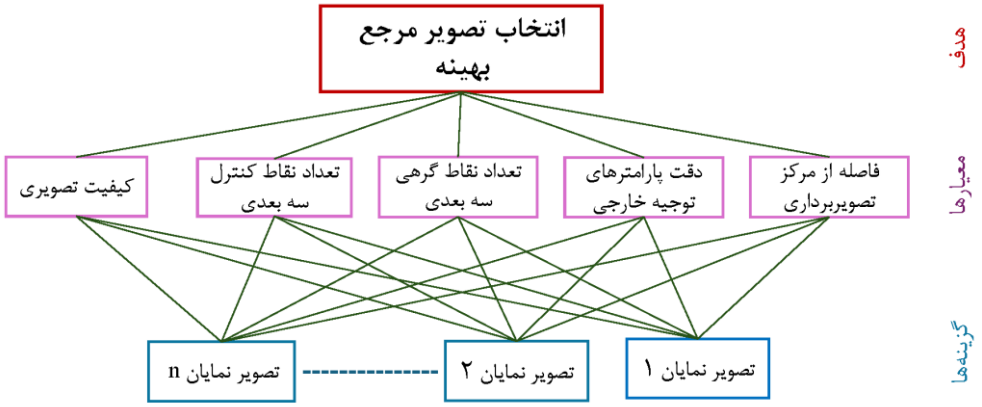
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

معیارهای فاصله از مرکز تصویربرداری و دقت پارامترهای توجیه خارجی تصویر معیارهای منفی، و معیارهای تعداد نقاط گرهی در هر تصویر، تعداد نقاط کنترل سه‌بعدی در هر تصویر و کیفیت تصویری معیارهای مثبت هستند. گام سوم تشکیل ماتریس موزون است که از مرحله وزندهی در اختیار داریم. گام چهارم انتخاب تصویر مرجع بهینه I^* از میان j تصویر مرجع نمایان (I_j) بر اساس رابطه (۸) می‌باشد:

$$W_{di} = [w_{dP}.w_{dE}.w_{dT}.w_{dG}.w_{dQ}] \qquad \text{رابطه(۸)}$$

$$I^* = \left\{ I_j \mid max_j \frac{\sum_{i=1}^{5} w_{di} X_{ji}}{\sum_{i=1}^{5} w_{di}} \right\}.$$



شکل ۵: سلسله مراتب تصمیم‌گیری در انتخاب تصویر مرجع بهینه با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره.

که در رابطه (۸)، X_{ji} اندازه نرمال شده معیار i ام در تصویر j ام می‌باشد.

به این صورت با استفاده از گام های ۱ تا ۴ برای هر نقطه DSM یک تصویر بهینه تعیین می‌شود. برای ارزیابی دقت تصویر بهینه تعیین شده در کاهش خطای بازنگاشت در تولید ارتوفتوموزاییک، ارزیابی درونی در نظر گرفته شده است. به این صورت که نقاط گرهی سه‌بعدی اطراف نقطه DSM در نظر گرفته می‌شوند. سپس این نقاط با پارامترهای تصویر بهینه بازنگاشت می‌شوند. اگر مقدار خطای بازنگاشت متوسط نقاط بیشتر از حدآستانه تعیین شده باشد، تصویر با اولویت بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این ارزیابی تکرار می‌شود تا تصویر بهینه نهایی تعیین شود. فرایند تصمیم‌گیری ذکر شده بر روی تمام نقاط DSM تکرار و در نهایت برای هر نقطه DSM یک تصویر بهینه تعیین می‌گردد.

۳-۳- تولید یکباره موزاییک

در این مقاله تولید ارتوفتوموزاییک به روش مستقیم در فضای زمینی مطابق با تحقیق ورشوساز و همکاران (۲۰۲۴) به کار گرفته و توسعه داده شده است [۹]. برای هر سلول DSM یک تصویر بهینه از مرحله قبل در اختیار داریم. هر نقطه DSM با پارامترهای توجیه داخلی و خارجی تصویر مرجع بهینه به فضای تصویری با استفاده از روابط (۱۲-۹) باز نگاشت می‌شود.

اگر $\vec{X} = (X.Y.Z)$ یک نقطه در فضای سه‌بعدی باشد، مختصات آن در سیستم مختصات دوربین $\overrightarrow{X'} = (X'.Y'.Z')$ با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$\overrightarrow{X'} = R^T(\vec{X} - \vec{T}) \qquad \text{رابطه(۹)}$$

در رابطه (۹)، $\vec{T} = (T_X.T_Y.T_Z)$ و $\vec{R} = (R_\omega.R_\varphi.R_\kappa)$ به ترتیب پارامترهای موقعیت و دوران توجیه خارجی تصویر در سیستم مختصات

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

جهانی هستند. با فرض رابطه (۱۰)، مختصات نقطه متناظر A در سیستم مختصات دوربین $(x_{hd}.y_{hd})$ با استفاده از رابطه (۱۱) تخمین زده می‌شود:

رابطه(۱۰)
$$\begin{pmatrix} x_h \\ y_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{X'}{Z'} \\ \frac{Y'}{Z'} \end{pmatrix}. \qquad r^2 = x_h^2 + y_h^2$$

رابطه(۱۱)
$$\begin{pmatrix} x_{hd} \\ y_{hd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1+K_1r^2+K_2r^4+K_3r^6)x_h+2P_1x_hy_h+P_2(r^2+2(x_h)^2) \\ (1+K_1r^2+K_2r^4+K_3r^6)y_h+2P_2x_hy_h+P_1(r^2+2(y_h)^2) \end{pmatrix}$$

در رابطه (۱۱)، k_1, K_2, K_3 ضرایب اعوجاج شعاعی و P_1, P_2 ضرایب اعوجاج مماسی هستند. مختصات تصویری نقطه سه‌بعدی نگاشت شده با استفاده از رابطه(۱۲) محاسبه می‌شود:

رابطه(۱۲)
$$\begin{pmatrix} x_{oi} \\ y_{oi} \end{pmatrix} = -f \begin{pmatrix} x_{hd} \\ y_{hd} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_x \\ cy \end{pmatrix}$$

که در رابطه (۱۲)، f فاصله کانونی در واحد پیکسل و (c_x, c_y) مختصات نقطه اصلی در واحد پیکسل هستند. مقادیر رنگی R، G و B پیکسل بدست آمده ذخیره می‌گردد. شبکه‌ای از سلول‌ها که در اینجا با ابعادی مساوی با ابعاد DSM در نظر گرفته شده است، ساخته می‌شود. مقادیر رنگی به دست آمده برای پرکردن سلول‌های متناظر DSM استفاده شده و در نهایت از کنار هم قرارگرفتن پیکسل‌های رنگی ارتوفتوموزاییک به یکباره شکل می‌گیرد.

۴- ارزیابی و نتایج

در این بخش، عملکرد روش پیشنهادی چندمعیاره در مجموعه داده‌های پهپاد مبنا مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل با سایر روش‌های معمول تک‌معیاره معمول مقایسه شده است.

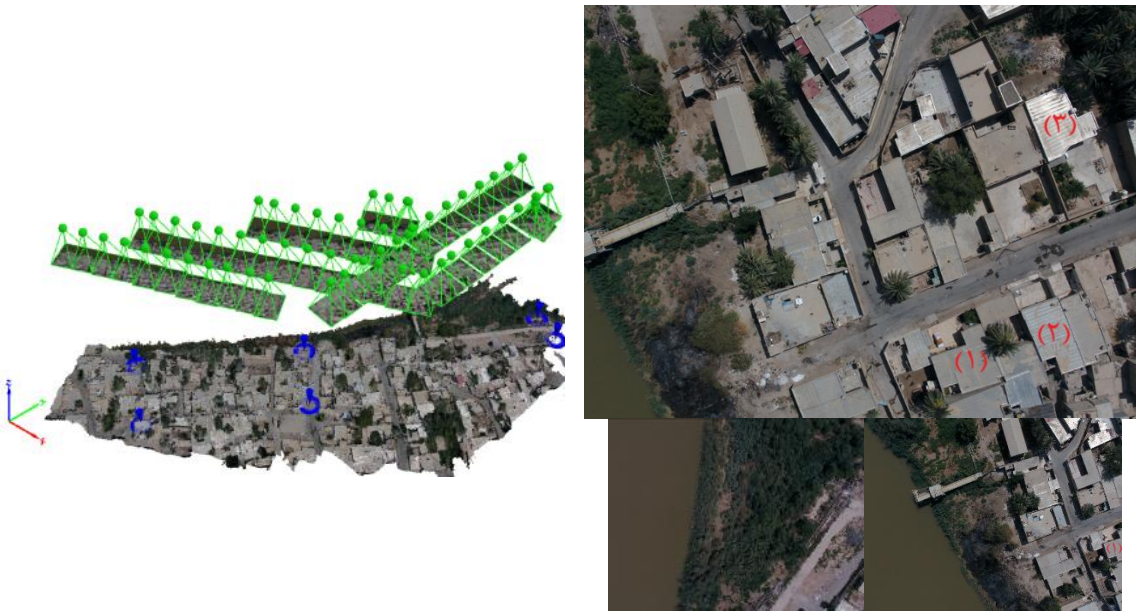
۴-۱- مجموعه داده‌های پهپادمبنا

دو مجموعه داده پهپادمبنا با ویژگی‌های متفاوت برای ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شده است. مجموعه داده اول، همانطور که در شکل (۶- الف) نشان داده شده است، شامل ۶۵ تصویر از شهر ساحلی گلگیر در جنوب ایران است که با طراحی پرواز خطی با دوربین *DJI FC6520* نصب شده بر روی پهپاد *Inspire2* اخذ شده‌اند. مجموعه داده دوم نشان داده شده در شکل (۶- ب) یک منطقه روستایی کوهستانی کاملا شیبدار می‌باشد. ۱۳۵ تصویر از این روستا با نام حلوان با دوربین *DJI FC6520* و سنجنده پهپادی *Inspire2* اخذ شده است. جدول (۲) حاوی اطلاعات بیشتری در مورد مجموعه داده‌های استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات مجموعه داده‌های مورد استفاده

	مجموعه داده اول	مجموعه داده دوم
مدل دوربین	*DJI FC۶۵۲۰*	*DJI FC۶۵۲۰*
مدل پهپاد و ابعاد سنسور به میلی‌متر	*Inspire* ۲, ۷٫۵×۱۳٫۱۱۲	*Inspire* ۲, ۷٫۵×۱۳٫۱۱۲
تعداد تصاویر و ابعاد تصویر به پیکسل	۶۵ و۳۹۵۶×۵۲۸۰	۱۳۵ و۳۹۵۶×۵۲۸۰
میزان پوشش طولی و عرضی	۹۵ و ۹۰	۹۵ و۹۰
ارتفاع پرواز	۱۰۹	۷۰
تعداد نقاط زمینی سه‌بعدی	۶	۱۵
فاصله نمونه برداری متوسط *(GSD)* به سانتی‌متر	۲٫۷۱	۲٫۲۷

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]



(الف)

(ب)

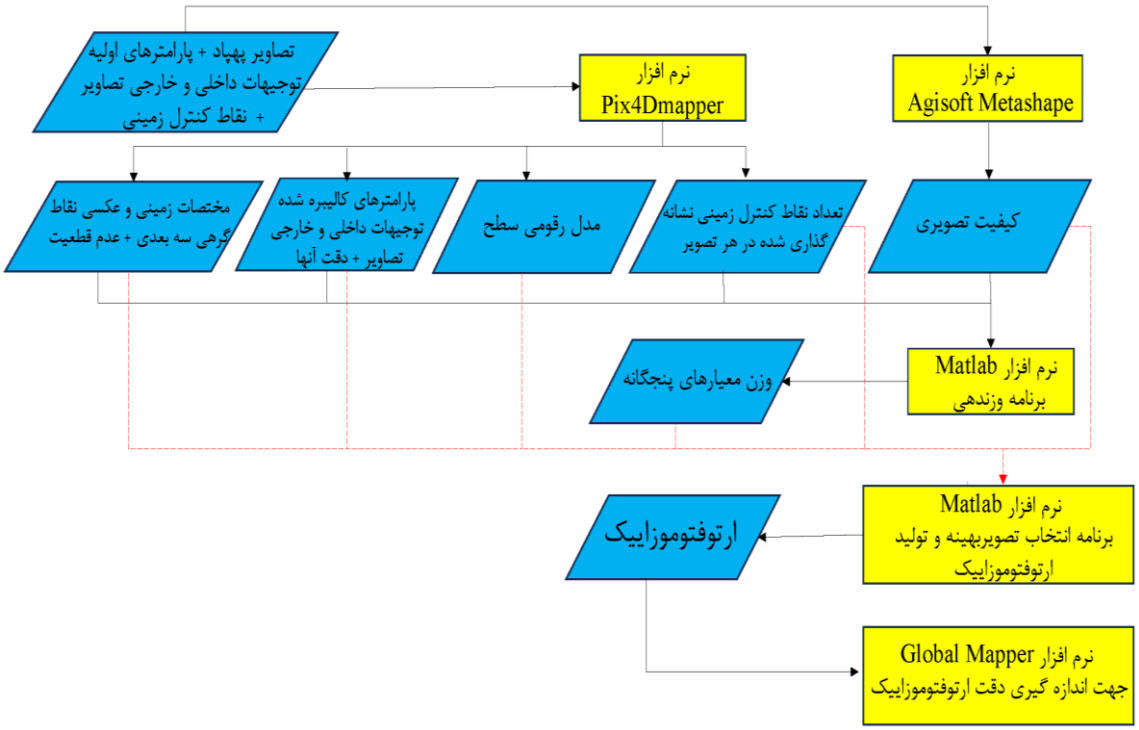
شکل ۶: (الف) مجموعه داده اول شامل تصاویر پهپاد و نقاط کنترل سه‌بعدی (دایره‌های آبی رنگ)، (ب) مجموعه داده دوم شامل تصاویر پهپاد و نقاط کنترل سه‌بعدی (دایره‌های آبی رنگ).

۴-۲- نتایج داده‌های پایه

شکل (۷) روندنمای اجرایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. در مرحله پردازش‌های اولیه، به منظور توجیه تصاویر و تولید *DSM*، از نرم افزار *Pix4Dmapper* نسخه ۴,۵,۶ استفاده شده است. همچنین معیار کیفیت تصویری از نرم افزار *Agisoft Metashape* نسخه ۲,۰,۴ استخراج شده است. علاوه بر این، پردازش‌ها در نرم افزار *MATLAB* نسخه *2020b* انجام گرفته است. سیستم کامپیوتری مورد استفاده لپ تاپ ۶۴ بیتی، ویندوز ۱۱، رم ۱۶ گیگا بایت و پردازنده *Radeon AMD Ryzen7 4800H Graphics 2.90 GHz* می‌باشد. جدول (۳) حاوی اطلاعات مربوط به داده‌های پایه و مقادیر معیارهای چندگانه در مورد دو مجموعه داده اول و دوم می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]



شکل ۷: روندنمای اجرایی روش پیشنهادی در تولید ارتوفتوموزاییک.

در هر دو مجموعه داده، در مرحله دوم یعنی تعیین تصویر بهینه، به صورت تجربی حدود نیمی از نقاط گرهی سه‌بعدی که عدم قطعیت کمتری دارند، برای وزندهی استفاده شده‌اند. تعداد تصاویر نمایان برای این نقاط گرهی سه‌بعدی در مجموعه داده اول، از تعداد ۲ تا ۲۷ و در مجموعه داده دوم از تعداد ۲ تا ۳۲ تصویر متغیر می‌باشد. از بین تصاویر نمایان مربوط به هر نقطه گرهی سه‌بعدی، m=۵ تصویر با فاصله کمتر انتخاب شده‌اند. از بین این تصاویر n=۳ تصویری که دقت پارامترهای توجیه خارجی آنها بالاتر است برگزیده شده‌اند. در نهایت از بین این تصاویر، k=۲ تصویر با خطای بازنگاشت کمتر انتخاب شده‌اند. مقادیر m، n و k در این پژوهش به صورت تجربی انتخاب شده‌اند. هر چند معیارهایی برای انتخاب خودکار آن در بخش (۳-۲) معرفی شدند. با مقادیر انتخابی ذکر شده، هر نقطه گرهی سه‌بعدی منتخب با دو تصویر نمایان منتخب در مرحله وزندهی شرکت می‌کند. با بکارگیری فرایند وزندهی مطابق با بخش ۳-۲ (الف)، وزن‌های نرمال شده بدست آمده در مجموعه داده اول W^1_{di} = [۰.۱ و۰.۰۱ و۰.۰۲ و۰.۲۱ و۰.۶۶] و در مجموعه داده دوم W^2_{di} = [۰.۰۶ و۰.۲۷ و۰.۱۱ و۰.۱۱ و۰.۴۵] می‌باشند. مدت زمان سپری شده برای مرحله وزن دهی ۹۳ ثانیه و ۹۸ ثانیه به ترتیب در مجموعه داده اول و مجموعه داده دوم می‌باشد.

بعد از تعیین وزن‌های بهینه، در مرحله سوم، برای هر نقطه DSM، j=۵ تصویر نمایان نزدیک تعیین می‌شوند که این مقدار به صورت تجربی انتخاب شده است. سپس رای هر نقطه DSM در بین ۵ تصویر نمایان منتخب، معیارهای پنجگانه اندازه‌گیری و تصویر بهینه مطابق با روش پیشنهادی ذکر شده در بخش (۳-۲ ب) انتخاب می‌گردد. حدآستانه ۰.۲ پیکسل به صورت تجربی بر مبنای میانگین خطای بازنگاشت کل، برای ارزیابی درونی بکار گرفته شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

جدول ۳: اطلاعات مربوط به داده‌های پایه و اندازه معیارها در دو مجموعه داده اول و دوم

	مجموعه داده اول	مجموعه داده دوم
تعداد کل نقاط گرهی سه‌بعدی	۳۶۷۷۲۷	۶۶۸۲۲۹
تعداد کل ابرنقاط متراکم	۱۲۹۸۱۱۰۱۵	۲۰۱۸۵۶۱۹
ابعاد *DSM* به پیکسل	۷۹۲۱×۶۱۵۹	۶۳۰۰×۶۲۴۲
تعداد تصاویر نمایان برای نقاط گرهی و نقاط *DSM*	۲۷-۲	۳۲-۲
عدم قطعیت (انحراف معیار) نقاط گرهی سه‌بعدی به پیکسل	۱۲-۰٫۰۱	۱۰-۰٫۰۱
فاصله از مرکز تصویربرداری به متر	۱۶۲-۱۰۳	۱۴۸-۲۱
دقت پارامترهای توجیه خارجی به متر	۰٫۰۷-۰٫۰۲	۰٫۶-۰٫۰۱
تعداد نقاط گرهی سه‌بعدی در هر تصویر	۴۷۸۷-۲۸۳۶	۵۱۴۰۰-۴۵۹
تعداد نقاط کنترل زمینی در هر تصویر	۲-۰	۹-۰
کیفیت تصویری	۰٫۹۹-۰٫۸۰	۰٫۸۶-۰٫۷۹
میانگین خطای بازنگاشت نقاط گرهی سه‌بعدی در هر تصویر به پیکسل	۱٫۳-۰٫۲	۱٫۷-۰٫۲
میانگین کل خطای بازنگاشت نقاط گرهی سه بعدی به پیکسل	۰٫۲	۰٫۲

۴-۳- ارزیابی و مقایسه ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده

در این تحقیق، ارتوفتوموزاییک‌های تولیدی با روش پیشنهادی با سه معیار رایج یعنی فاصله از نادیر، فاصله از مرکز تصویربرداری، و زاویه دید مقایسه شده‌اند. معیار فاصله از مرکز تصویربرداری، با استناد به مطالعه سجادیان و ورشوساز (۲۰۲۳) [۷]، زمان پردازش کمتری نسبت به فاصله از نادیر دارد. علاوه بر این، معیار زاویه دید نیز متداولترین معیار انتخاب تصویر بهینه در ایجاد بافت مدل سه‌بعدی می‌باشد. روش پیشنهادی بر پایه‌ی معیار فاصله از مرکز تصویربرداری طراحی شده و از چهار معیار کمکی شامل دقت پارامترهای توجی خارجی، تعداد نقاط گرهی سه‌بعدی، تعداد نقاط کنترل زمینی، و کیفیت تصویر بهره گرفته است. در ادامه، تأثیر ترکیب این معیارها بر کیفیت ارتوفتوهای تولیدی بررسی شده و نتایج با روش‌های تک‌معیاره مقایسه شده‌اند. این مقایسه‌ها از منظر زمان پردازش، ارزیابی بصری، میزان ناپیوستگی و خطاها روی ارتوفتوموزاییک و ایجاد پدیده نگاشت دوگانه ارائه شده‌اند.

۴-۳-۱- مدت زمان پردازشی

مدت زمان سپری شده در سه مرحله روش پیشنهادی شامل پردازش‌های اولیه، تعیین تصویر بهینه و تولید یکباره ارتوفتوموزاییک در جدول (۴) آمده است. مطابق با جدول (۴)، در مجموعه داده اول، پردازش‌های اولیه بیشترین زمان معادل ۲ ساعت و ۳۵ دقیقه را به خود اختصاص داده است. مدت زمان تعیین تصویر بهینه ۱۸ دقیقه و تولید یکباره موزاییک ۴ دقیقه می‌باشد. این زمان ها برای مجموعه داده دوم به ترتیب ۲ ساعت و ۵۵ دقیقه، ۱۵ دقیقه و ۳ دقیقه می‌باشند. در مجموعه داده اول علی رغم تعداد تصاویر کمتر، به دلیل تعداد پیکسل‌های بیشتر *DSM* مدت زمان پردازشی تعیین تصویر بهینه و تولید یکباره موزاییک بیشتر ازمجموعه داده دوم می‌باشد. تعداد پیکسل‌های *DSM* و تعداد تصاویر نمایان در مدت زمان پردازشی تاثیرگذار هستند.

همچنین مدت زمان پردازش سه روش تک‌معیاره (زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری، و فاصله از نادیر) در مرحله انتخاب تصویر بهینه و تولید ارتوفتوموزاییک، در جدول (۵) گزارش شده است. نتایج

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

نشان می‌دهد که روش زاویه دید، با توجه به نیاز به برازش سطح محلی DSM ، بیشترین زمان پردازشی را دارد. در مقایسه، روش پیشنهادی نسبت به روش زاویه دید، به‌ترتیب در مجموعه داده اول و دوم، زمان پردازش را ۳۰٪ و ۳۵٪ کاهش داده است. با این حال، زمان پردازش روش پیشنهادی نسبت به روش مبتنی بر فاصله از نادیر به‌ترتیب ۱۲٪ و ۷٪ بیشتر است. سریع‌ترین روش، فاصله از مرکز تصویربرداری است؛ در مقایسه با آن، روش پیشنهادی زمان پردازش را به میزان ۴ دقیقه (۲۸٪) و ۲ دقیقه (۱۵٪) افزایش داده است.

جدول ۴: مدت زمان تولید ارتوفتوموزاییک در مراحل سه‌گانه تولید اتوفتوموزاییک در روش پیشنهادی

	پردازش‌های اولیه	تعیین تصویر بهینه	تولید یکباره موزاییک
مجموعه داده اول	۲ ساعت و ۳۵ دقیقه	۱۸ دقیقه	۴ دقیقه
مجموعه داده دوم	۲ ساعت و ۵۵ دقیقه	۱۵ دقیقه	۳ دقیقه

جدول ۵: مدت زمان تعیین تصویر بهینه در سه روش تک‌معیاره بر مبنای زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری و فاصله از نادیر بر حسب دقیقه

روش	مجموعه داده اول	مجموعه داده دوم
	مدت زمان به دقیقه	مدت زمان به دقیقه
زاویه دید	۲۶	۲۳
فاصله از مرکز تصویربرداری	۱۴	۱۳
فاصله از نادیر	۱۶	۱۴

۴-۳-۲- ارزیابی و تفسیر بصری

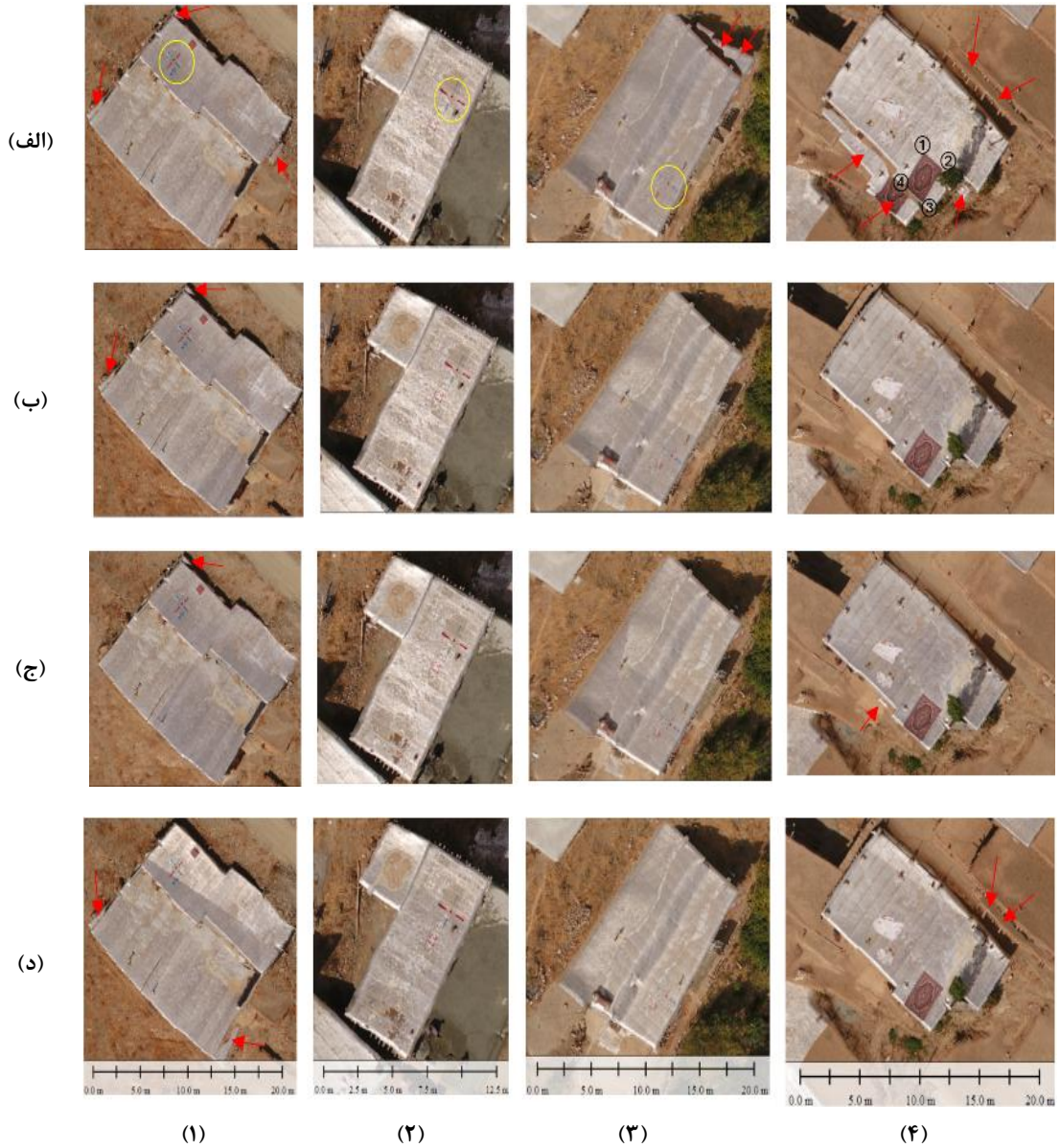
در شکل‌های (۸) و (۹)، ارتوفتوموزاییک‌های تولیدی بر اساس چهار معیار (زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری، فاصله از نادیر، و روش پیشنهادی) در نواحی مختلف مجموعه داده اول و دوم ارائه شده‌اند. در مجموعه داده اول (شکل ۸)، نواحی ۱، ۲ و ۳ مورد بررسی قرار گرفتند. روش زاویه دید در هر سه ناحیه خطاهایی قابل‌توجه دارد (شکل‌های ۸-الف-۱ تا ۳) که با فلش‌های قرمز مشخص شده‌اند. معیار زاویه دید در برخی از نقاط DSM منجر به انتخاب تصویری می‌شود که فاصله زیادی از نقطه نادیر دارد که این امر موجب کاهش دقت فرایند بازنگاشت می‌شود. معیار فاصله از مرکز در ناحیه ۱ (۸-ب-۱) نیز دارای خطاهایی مشابه است، اما در نواحی ۲ و ۳ (۸-ب-۲ و ۳) عملکرد بهتری دارد. در روش فاصله از نادیر، ارتوفتوی ناحیه ۱ دارای ناپیوستگی حدود ۱ پیکسل (①) و ناحیه ۳ دارای ناپیوستگی حدود ۲ پیکسل (① و ②) است (شکل‌های (۸-ج-۱ و ۳)). روش پیشنهادی در ناحیه ۱ (۸-د-۱) ارتوفتوی بدون ناپیوستگی و با لبه‌های دقیق تولید کرده است. در ناحیه ۲ (۸-د-۲) ناپیوستگی ۱ پیکسلی در قسمت ② دیده می‌شود. همچنین در ناحیه ۳ (۸-د-۳)، عملکرد این روش نسبت به سایر روش‌ها بهتر بوده و ناپیوستگی‌های روش‌های دیگر وجود ندارند. در مجموعه داده دوم (شکل (۹)، چهار ناحیه انتخاب شده‌اند، اما به‌دلیل پیچیدگی‌های واقعی لبه سقف ساختمان‌ها، ارزیابی بصری مستقیم مانند مجموعه داده اول ممکن نیست و ارزیابی کمی در بخش (۴-۳-۳) انجام شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

شکل۸: ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده در مجموعه داده اول در سه ناحیه (۱)، (۲) و (۳) با استفاده از چهار روش (الف) بر مبنای زاویه دید، (ب) بر مبنای فاصله از مرکز تصویربرداری، (ج) بر مبنای فاصله از نادیر و (د) روش پیشنهادی چندمعیاره مبنا.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]



شکل۹: ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده در مجموعه داده دوم در سه ناحیه (۱)، (۲)، (۳) و (۴) با استفاده از چهار روش (الف) بر مبنای زاویه دید، (ب) بر مبنای فاصله از مرکز تصویربرداری، (ج) بر مبنای فاصله از نادیر و (د) روش پیشنهادی چندمعیاره مبنا.

۴-۳-۳- ارزیابی کمی خطاها و ناپیوستگی‌ها

در این بخش، خطاها و ناپیوستگی‌های ایجاد شده بر روی ارتوفتوموزاییک، عمدتاً در لبه‌های برش، به صورت کمی مقایسه شده‌اند. دقت هندسی خاصی برای تولید ارتوفتوموزاییک در نظر گرفته نشده است، اما در مناطقی که تغییر تصاویر تأثیر بر دقت دارد، تلاش شده تا دقت نهایی بهبود یابد. در مجموعه داده اول، لبه سقف ساختمان‌ها از طریق تقاطع فضایی محاسبه و به عنوان مرجع با ارتوفتوموزاییک‌ها مقایسه شده است. برای این کار، مکان هر نقطه گوشه ساختمان به طور دستی مشخص و مختصات سه‌بعدی آن از طریق تقاطع فضایی محاسبه شده است. این فرایند در نرم‌افزار *PIX4Dmapper* نسخه ۴،۵،۶ انجام شده و لبه‌ها به صورت خطوط آبی رنگ نشان داده شده‌اند. سپس

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

مقایسه‌ها در نرم‌افزار *Global Mapper* نسخه ۲۴.۱ انجام شده است. در مجموعه داده دوم، به دلیل نامنظم بودن خطوط لبه سقف‌ها، نقاط کنترل برای مقایسه استفاده شده‌اند. در ناحیه ۴ (مراجعه به شکل(۹))، نقاط مرجع تولید شده مشابه مجموعه داده اول، با موقعیت نقاط کنترل بر روی ارتوفتوموزاییک‌های روش‌های مختلف مقایسه شده‌اند.

مطابق شکل(۱۰)، بر روی هر تصویر نواحی مشخصی با دایره‌های زردرنگ نشان داده شده‌اند که بیانگر ناپیوستگی‌ها و خطاها در لبه‌های برش هستند. این نواحی شماره‌گذاری شده و در بالای هر تصویر، با بزرگنمایی بالا همراه با خطوط مرجع جهت مقایسه نمایش داده شده‌اند.

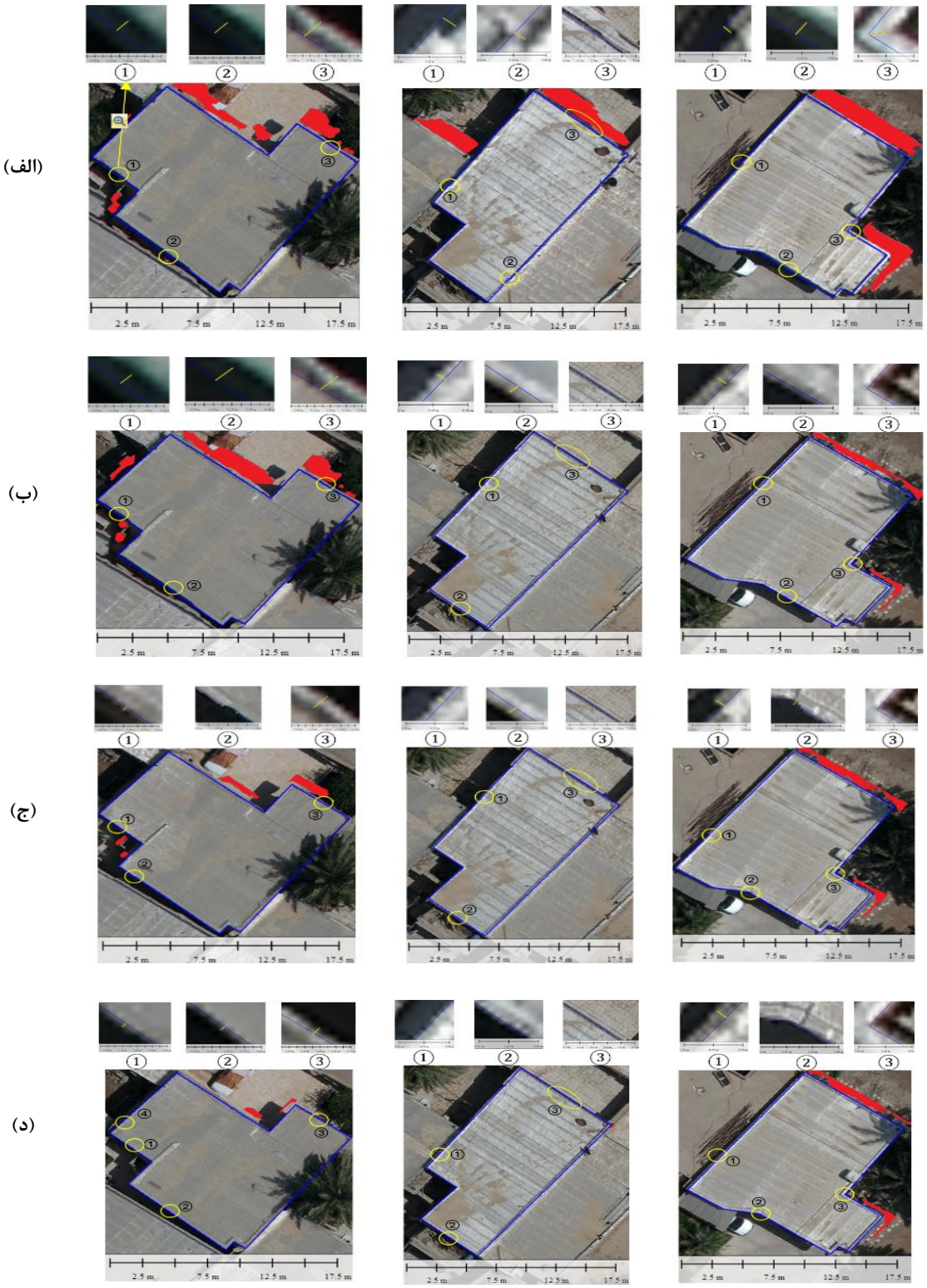
در ناحیه ۱: در شکل (۱۰-الف-۱)، مربوط به ارتوفتوموزاییک تولید شده با معیار زاویه دید، در قسمت‌های ① و ② ضلع ساختمان دچار انحنا شده است که به ترتیب خطاهایی معادل ۹ سانتی‌متر و ۱۱ سانتی‌متر ایجاد کرده‌اند. در ناحیه ③، پیکسل‌های لبه به میزان حدود ۱۴ سانتی‌متر به سمت خارج از خط مرجع جابجا شده‌اند. در شکل (۱۰-ب-۱)، تولید شده با معیار فاصله از مرکز تصویربرداری، اختلافات در نواحی ① و ② به ترتیب برابر با ۹ و ۱۲ سانتی‌متر و در ناحیه ③ حدود ۱۵ سانتی‌متر است. در شکل (۱۰-ج-۱)، با استفاده از معیار فاصله از نادیر، در ناحیه ① اختلاف ناچیزی با مرجع مشاهده می‌شود، اما در ناحیه ② ناپیوستگی با اختلاف حدود ۱۸ سانتی‌متر نسبت به مرجع دیده می‌شود. در شکل (۱۰-د-۱)، حاصل از روش پیشنهادی، در قسمت‌های ① و ② اختلاف پیکسل‌های لبه سقف با خطوط مرجع بسیار ناچیز است و در ناحیه ③ اختلاف در حد یک پیکسل در جهت خارج مشاهده می‌شود. در ناحیه ④ که مربوط به لبه برش ارتوفتوموزاییک است، ناپیوستگی تقریباً حذف شده است.

در **ناحیه ۲**: در شکل (۱۰-الف-۲)، روش زاویه دید در ضلع غربی ساختمان انحنایی قابل توجه دارد. در قسمت‌های ① و ② ناپیوستگی در لبه برش به مقدار ۱۳ سانتی‌متر وجود دارد. در قسمت ③ تکرار اشتباه پیکسل‌های مشکی و سفید به میزان ۳ تا ۴ پیکسل دیده می‌شود. در شکل (۱۰-ب-۲)، حاصل از روش فاصله از مرکز تصویربرداری، خطاهای نواحی ① و ② به ترتیب ۵ و ۶ سانتی‌متر هستند و تکرار پیکسل‌ها مشاهده نمی‌شود. در شکل (۱۰-ج-۲)، مربوط به معیار فاصله از نادیر، خطاها مشابه مورد قبل (حدود ۵ و ۶ سانتی‌متر) بوده و ضلع شمالی با اختلاف اندکی از خط مرجع تشکیل شده است. در شکل (۱۰-د-۲)، با استفاده از روش پیشنهادی، لبه‌های سقف ساختمان با دقت بسیار بالا با خطوط مرجع منطبق شده‌اند (قسمت‌های ① و ②) و هیچگونه تکرار پیکسلی در ناحیه ③ مشاهده نمی‌شود.

در **ناحیه ۳**: در شکل (۱۰-الف-۳)، مربوط به زاویه دید، در قسمت ① اختلاف پیکسل‌های سقف با مرجع حدود ۶ سانتی‌متر، در ضلع جنوبی خطایی حدود ۱۱ سانتی‌متر به سمت داخل، و در قسمت ③ خطایی به میزان ۱۶ سانتی‌متر در جهت خارج دیده می‌شود.در شکل (۱۰-ب-۳)، روش فاصله از مرکز، در ناحیه ① اختلاف ۵ سانتی‌متری با خط مرجع دارد، اما در قسمت‌های ② و ③ تطابق کامل با مرجع مشاهده می‌شود. در شکل (۱۰-ج-۳)، معیار فاصله از نادیر، در قسمت‌های ① و ② به ترتیب دارای خطاهایی معادل ۷ و ۸ سانتی‌متر است. اما در قسمت ③ گوشه ساختمان به خوبی بر روی خط مرجع قرار گرفته است.در شکل (۱۰-د-۳)، حاصل از روش پیشنهادی، در ضلع غربی همچنان خطایی حدود ۵ سانتی‌متر دیده می‌شود. در دیگر نواحی مانند قسمت‌های ② و ③ لبه‌های ساختمان با دقت بالا روی مرجع منطبق شده‌اند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

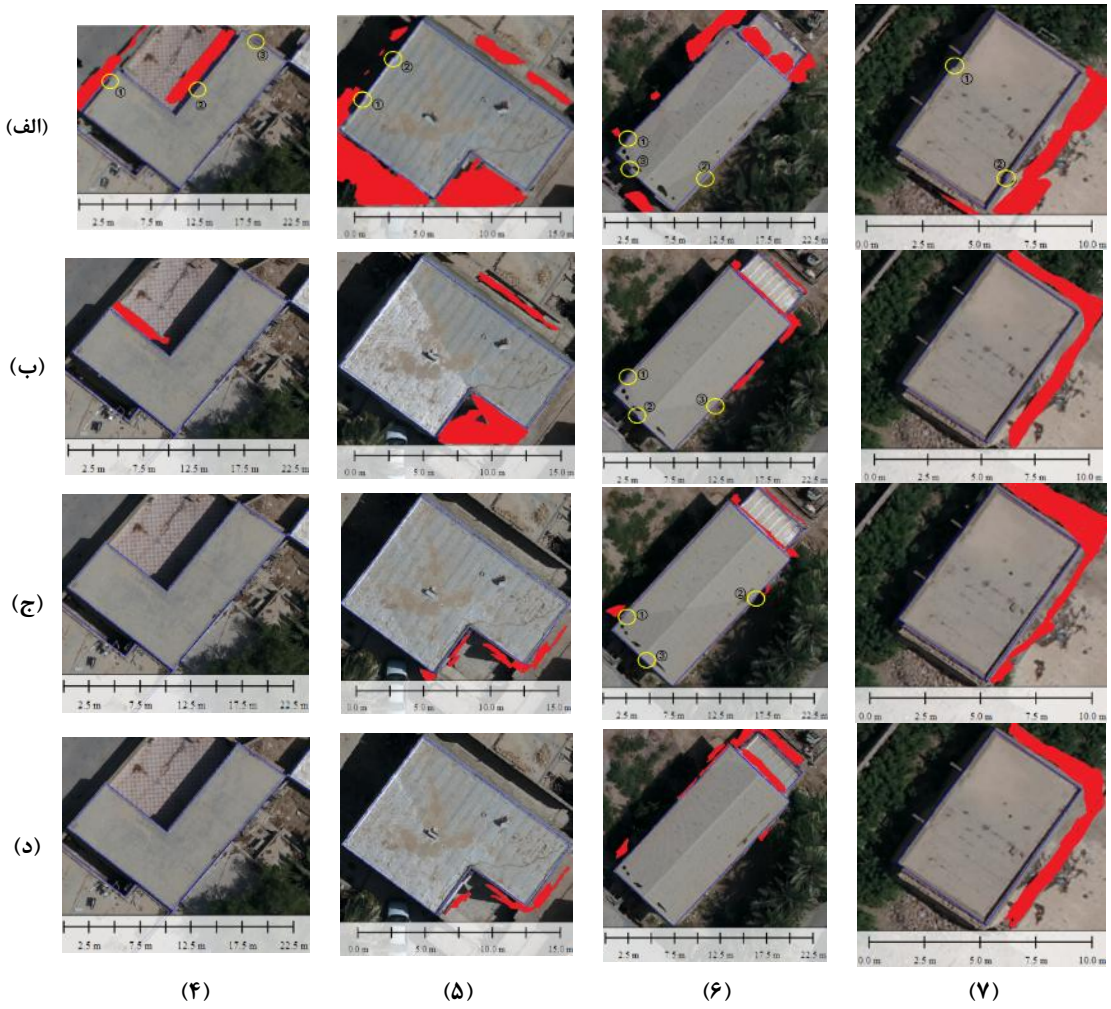


شکل۱۰: ارزیابی دقت ارتوفتوموزاییک بدست آمده با استفاده از از چهار روش (الف) بر مبنای زاویه دید، (ب) بر مبنای فاصله از مرکز تصویربرداری، (ج) بر مبنای فاصله از نادیر و (د) روش پیشنهادی چندمعیاره مبنا در سه ناحیه (۱)، (۲) و (۳).

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

علاوه بر سه ناحیه تشریح‌شده در شکل (۱۰)، چهار ناحیه دیگر در مجموعه داده اول مطابق با شکل (۱۱) برای ارزیابی دقیق‌تر در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۱: ارزیابی دقت ارتوفتوموزاییک بدست آمده با استفاده از چهار روش (الف) بر مبنای زاویه دید، (ب) بر مبنای فاصله از مرکز تصویربرداری، (ج) بر مبنای فاصله از نادیر و (د) روش پیشنهادی چندمعیاره مبنا در سه ناحیه (۴)، (۵)، (۶) و (۷).

در ناحیه ۴: (شکل ۱۱- الف-۴)، ارتوفتوموزاییک تولید شده با معیار زاویه دید در سه ضلع ساختمان خطاهایی به اندازه ۱۸، ۱۵ و ۱۲ سانتی‌متر ایجاد کرده است. اما در ناحیه ۴ (شکل‌های ۱۱- ب-۴، ۱۱- ج-۴ و ۱۱- د-۴) که با سه روش دیگر بررسی شده است، اختلافات نسبت به خط مرجع ناچیز بوده است.

در ناحیه ۵: همانطور که در شکل (۱۱- الف-۵) دیده می‌شود، روش زاویه دید موجب خطاهایی به اندازه ۱۰ سانتی‌متر در قسمت‌های ① و ② شده است. در این ناحیه، ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده با روش‌های دیگر (شکل‌های ۱۱- ب-۵، ۱۱- ج-۵ و ۱۱- د-۵) به خوبی با خطوط مرجع منطبق شده‌اند.

در ناحیه ۶: (شکل ۱۱- الف-۶) ، روش زاویه دید در قسمت‌های ①، ② و ③ خطاهایی به اندازه ۶، ۵ و ۱۸ سانتی‌متر ایجاد کرده است. در همین ناحیه، روش فاصله از مرکز تصویربرداری (شکل ۱۱- ب-۶) و روش

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

فاصله از نادیر (شکل ۱۱- ج-۶) خطاهایی به اندازه ۳ و ۱۰ سانتی‌متر ایجاد کرده‌اند. در این ناحیه، ارتوفتوموزاییک تولید شده با روش پیشنهادی (شکل ۱۱- د-۶) به خوبی با خطوط مرجع منطبق شده است.

در ناحیه ۷: همانطور که در شکل (۱۱- الف-۷) مشاهده می‌شود، روش زاویه دید باعث ایجاد ناپیوستگی‌هایی در لبه‌های برش به اندازه ۱۳ و ۳ سانتی‌متر شده است. در همین ناحیه، ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده با سه روش دیگر (شکل‌های ۱۱- ب-۷، ۱۱- ج-۷ و ۱۱- د-۷) اختلافات ناچیزی با خطوط مرجع دارند.

در قسمت‌های قبل خطاها و ناپیوستگی‌ها با جزئیات بر روی نواحی مختلف ارتوفتوموزاییک نشان داده و تفسیر شدند. به منظور ارائه جمع‌بندی خطاهای ایجاد شده از معیار *RMSE* استفاده کرده‌ایم. در مورد هر هفت ناحیه از مجموعه داده اول، *RMSE* در مناطق چک تشریح شده در شکل‌های(۱۰) و (۱۱)، محاسبه شده و در جدول (۶) آورده شده است. مطابق جدول (۶)، بر اساس *RMSE* متوسط، به ترتیب روش پیشنهادی، روش نادیر، روش مرکز تصویربرداری و زاویه دید کمترین خطا را نتیجه داده‌اند. در مجموعه داده اول، دقت روش پیشنهادی به ترتیب نسبت به روش‌های زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری و فاصله از نادیر، ۱۱ سانتی‌متر، ۳ سانتی‌متر و ۲ سانتی‌متر بالاتر می‌باشد. مطابق با نتایج ناحیه ۱ در جدول (۶) بر اساس *RMSE* متوسط، روش پیشنهادی توانسته است خطای ایجاد شده به مقدار ۱۲ و ۱۰ سانتی‌متر در روش‌های فاصله از مرکز تصویربرداری و زاویه دید را به ۲ سانتی‌متر کاهش دهد. در ناحیه ۶ نیز، روش پیشنهادی توانسته است خطای ۶ سانتی‌متری در روش فاصله از مرکز تصویربرداری را برطرف نماید. این نشان می دهد هرچند *RMSE* متوسط روش پیشنهادی نسبت به روش‌های فاصله از مرکزتصویربرداری و نادیر تفاوت بالایی ندارد، اما در جاهایی مانند مثال‌های اخیر، که خطای قابل توجه‌ای بوجود آمده است، روش پیشنهادی قادر است دقت ارتوفتوموزاییک را به مقدار زیادی افزایش دهد. همچنین حداکثر بهبود خطا نسبت به روش زاویه دید نیز ۱۵ سانتی‌متر در ناحیه ۴ می‌باشد.

جدول ۶: ارزیابی دقت هندسی ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده از مجموعه داده اول در نواحی چک. (همه اندازه‌ها به متر می‌باشند)

روش	زاویه دید	فاصله از مرکز تصویربرداری	فاصله از نادیر	روش پیشنهادی
ناحیه	*RMSE*	*RMSE*	*RMSE*	*RMSE*
1	۰٫۱۲	**۰٫۱۲**	**۰٫۱۰**	**۰٫۰۲**
2	۰٫۱۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۰
3	۰٫۱۲	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۳
4	**۰٫۱۵**	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
5	۰٫۱۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
6	۰٫۱۱	**۰٫۰۶**	**۰٫۰۳**	۰٫۰۰
7	۰٫۰۹	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
متوسط	۰٫۱۲	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۱

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

جدول ۷: ارزیابی دقت هندسی ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده از مجموعه داده دوم در نواحی چک.(همه اندازه‌ها به متر می‌باشند)

روش	زاویه دید	فاصله از مرکز تصویربرداری	فاصله از نادیر	روش پیشنهادی
ناحیه	*Error*	*Error*	*Error*	*Error*
1	**۰٫۱۰**	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۳
2	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳
3	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۳
*4*①	۰٫۰۹	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۰٫۰۴
*4*②	۰٫۰۸	**۰٫۰۸**	**۰٫۰۸**	۰٫۰۵
4③	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۵
*4*④	۰٫۱۰	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۷
متوسط	۰٫۰۸	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۴

در مجموعه داده دوم، همانطور که ذکر شد به دلیل نامنظم بودن لبه‌های سقف ساختمان‌ها، از نقاط کنترل برای ارزیابی استفاده شده است (شکل(۹)). در ناحیه ۱ نقطه کنترل خطایی برابر با حدود ۱۰، ۵٫۳، ۴٫۲ و ۳٫۲ سانتی‌متر به ترتیب در ارتوفتوموزاییک‌های روش زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری، فاصله از نادیر و روش پیشنهادی دارد. در ناحیه ۲ نقطه کنترل خطایی برابر با حدود ۳٫۱، ۲٫۷، ۲٫۵ و ۲٫۷ سانتی متر به ترتیب در ارتوفتوموزاییک‌های ذکر شده دارد. خطای نقطه کنترل واقع در ناحیه ۳ برابر با حدود ۴٫۲، ۵٫۴، ۵٫۱ و ۲٫۷ سانتی‌متر به ترتیب در ارتوفتوموزاییک‌های ذکر شده می‌باشد. در ناحیه ۴ مختصات نقاط ①، ②، ③ و ④ مشابه روش ذکر شده در مجموعه داده اول محاسبه شده و به عنوان مرجع با مختصات آنها بر روی ارتوفتوموزاییک‌ها مقایسه شده‌اند. خطاهای ایجاد شده در نقطه ① برابر با ۹٫۲، ۳٫۵، ۶٫۳ و ۲٫۸، در نقطه ② برابر با ۸٫۲، ۷٫۶، ۸٫۵ و ۵٫۴، در نقطه ③ ۹، ۶٫۷، ۸٫۵ و ۵٫۴ و در نقطه ④ برابر ۱۰٫۶، ۶٫۳، ۶٫۵ و ۶٫۶ به ترتیب در ارتوفتوموزاییک‌های روش زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری، فاصله از نادیر و روش پیشنهادی می‌باشند. بر طبق نتایج، روش پیشنهادی در تمامی نقاط به جز در نقطه کنترل ناحیه ۲ و نقطه ④ منجر به خطای کمتری بر روی ارتوفتوموزاییک‌های تولیدی شده است. *RMSE* در مناطق چک تشریح شده در مجموعه داده دوم محاسبه و در جدول (۷) ارائه شده است. در مجموعه داده دوم بر حسب *RMSE* متوسط، به ترتیب روش پیشنهادی، روش مرکز تصویربرداری، روش نادیر و و زاویه دید کمترین خطا را نتیجه داده‌اند. دقت روش پیشنهادی به ترتیب نسبت به روش‌های زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری و فاصله از نادیر، ۴ سانتی‌متر، ۱ سانتی‌متر و ۲ سانتی متر بالاتر می‌باشد. همچنین، حداکثر کاهش خطاها به مقدار ۳ سانتی‌متر در قسمت *4* ② نسبت به روش‌های فاصله از مرکزتصویربرداری و روش نادیر می باشد. علاوه بر این، حداکثر بهبود خطا نسبت به روش زاویه دید نیز ۷ سانتی‌متر در ناحیه ۱ می‌باشد.

۴-۳-۴- نگاشت دوگانه

علاوه بر ارزیابی کمی انجام گرفته در بالا، پدیده نگاشت دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در پدیده نگاشت دوگانه قسمت‌های مربوط به ناحیه پنهان به صورت تکراری (دو یا چندبار) بر روی ارتوفتو نگاشت می‌شوند [۱۸]. دوایر زرد رنگ در شکل (۸) نمونه‌هایی از پدیده نگاشت دوگانه در مجموعه داده اول هستند که در شکل (۱۰) مکان آنها با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. آنچنان که در شکل‌های (۱۰- ب- ۱، ۲ و ۳) و (۱۰- ج- ۱، ۲ و ۳) قابل مشاهده است، پدیده نگاشت دوگانه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

در ارتوفتوموزاییک‌های تولیدی با معیار فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری کمتر از روش زاویه دید در نواحی مشابه است. زاویه دید آنچنان که در شکل های (۹- الف- ۱، ۲ و ۳) دیده می‌شود، منجر به پدیده نگاشت دوگانه بیشتری بر روی ارتوفتوموزاییک شده است. زمانی که تصویر بهینه از راستای نرمال بر *DSM* فاصله می‌گیرد، پدیده نگاشته دوگانه بیشتر می‌شود [۳۳]. بنابراین مواقعی که زاویه دید منجر به تعیین تصویر بهینه‌ای می‌شود که فاصله زیادی با سلول *DSM* دارد، پدیده نگاشت دوگانه بیشتر می‌شود. روش پیشنهادی نیز، به این دلیل که قید نزدیک‌ترین تصاویر را در نظر می‌گیرد و از طرفی معیار فاصله از مرکز تصویربرداری در روش تصمیم‌گیری شرکت می‌کند، آنچنانکه در شکل‌های (۱۰- د) ۱، ۲ و۳ دیده می‌شود، به کاهش پدیده نگاشت دوگانه کمک می‌کند. در مجموعه داده دوم، مکان نواحی نگاشت دوگانه با فلش‌های قرمزرنگ بر روی شکل (۹) نشان داده شده است. در مجموعه داده دوم، در ناحیه اول تقریبا اثرنگاشت دوگانه در تمامی ارتوفتوموزاییک‌ها ناچیز و یکسان است (شکل‌های (۹- الف- ۱)، (۹- ب- ۱)، (۹- ج-۱) و (۹- د- ۱)). در ناحیه دوم آنچنان که در شکل‌های (۹- الف-۲)، (۹- ب-۲)، (۹- ج-۲) و (۹- د-۲) قابل مشاهده است، اثرنگاشت دوگانه در هیچ کدام از ارتوفتوموزاییک‌ها دیده نمی‌شود. در ناحیه سوم اثرنگاشت دوگانه تنها در روش زاویه دید ایجاد شده است (شکل (۹- الف- ۳)). در ناحیه ۴ در شکل (۹- الف-۴) اثر نگاشت دوگانه در روش زاویه دید بسیار بیشتر از روش‌های دیگر است. همچنین در این ناحیه در روش پیشنهادی در شکل (۹- د-۴) اثرنگاشت دوگانه در همسایگی ساختمان ایجاد شده است.

۴-۴- بحث و بررسی کلی نتایج

نتایج تحقیق نشان داد، روش زاویه دید به دلیل نادیده گرفتن فاصله تصویر از *DSM*، به‌ویژه در نواحی لبه دارای نویز، خطای بیشتری نسبت به سایر روش‌های تک‌معیاره دارد. در برخی نواحی، روش فاصله از نادیر و در برخی دیگر فاصله از مرکز تصویربرداری دقت بالاتری داشتند. به‌طور کلی، روش پیشنهادی ارتوفتوموزاییک‌های دقیق‌تری تولید کرده است.

در مجموعه داده اول، مقادیر *RMSE* برای روش‌های زاویه دید، فاصله از مرکز تصویربرداری، فاصله از نادیر و روش پیشنهادی به ترتیب ۱۲، ۴، ۳ و ۱ سانتی‌متر بودند. همچنین، بیشینه خطای ۱۵ سانتی‌متری روش زاویه دید در روش پیشنهادی حذف شده و مقادیر حداکثر خطا در دو روش تک‌معیاره دیگر نیز به ترتیب ۱۰ و ۸ سانتی‌متر کاهش یافت.

در مجموعه داده دوم، دقت روش‌های مذکور به ترتیب ۸، ۵، ۶ و ۴ سانتی‌متر بود. در نواحی چک این مجموعه، روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها به ترتیب تا ۷، ۳ و ۳ سانتی‌متر افزایش دقت داشته است. نتایج نشان می‌دهد استفاده صرف از معیارهایی نظیر فاصله از نادیر یا مرکز تصویربرداری که تنها موقعیت *DSM*را ملاک قرار می‌دهند، همواره به بیشترین دقت ممکن منجر نمی‌شود. در مقابل، روش پیشنهادی با بهره‌گیری از معیارهای مؤثر دیگر و انتخاب تصویر از میان تصاویر نزدیک، دقت ارتوفتوموزاییک را افزایش داده است.

از نظر اثر نگاشت دوگانه، سه روش فاصله از نادیر، فاصله از مرکز تصویربرداری و روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش زاویه دید داشتند. از نظر زمان پردازش، روش زاویه دید کندترین و روش فاصله از مرکز تصویربرداری سریع‌ترین می‌باشد. روش پیشنهادی نسبت به زاویه دید در مجموعه داده اول و دوم به ترتیب ۳۰٪ و ۳۵٪ سریع‌تر بود؛ اما در مقایسه با روش سریع‌تر تک‌معیاره (فاصله از مرکز تصویربرداری) به ترتیب ۲۸٪ و ۱۵٪ کندتر عمل کرد. این افزایش زمان در روش فاصله از نادیر نیز ۱۲٪ و ۷٪ گزارش شد.

۵- نتیجه‌گیری

یکی از عوامل کلیدی در افزایش دقت و کیفیت ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده از تصاویر پهپاد مبنا،

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

انتخاب تصویر مرجع بهینه از میان تصاویر متعدد با ویژگی‌های هندسی و رادیومتریکی متنوع است. در این پژوهش، روشی مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره معرفی شد که به جای تمرکز صرف بر نواحی پنهان، تصویر بهینه را برای هر پیکسل ارتوفتوموزاییک تعیین می‌کند. این فرایند در دو مرحله‌ی وزندهی و تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام می‌گیرد. در مرحله اول، وزن‌دهی معیارهای پنج‌گانه با استفاده از نقاط گرهی سه‌بعدی و روش *SVD* به‌منظور کاهش خطای بازنگاشت صورت گرفت. این معیارها شامل فاصله از مرکز تصویربرداری، دقت پارامترهای توجیه خارجی، تعداد نقاط گرهی، تعداد*GCP* ها و کیفیت تصویر می‌باشند. در مرحله دوم، تصاویر بهینه با درنظر گرفتن قید کاهش خطای بازنگاشت، از میان نزدیک‌ترین تصاویر به هر نقطه *DSM* انتخاب شدند. روش پیشنهادی بر روی دو مجموعه داده با ویژگی‌های متفاوت اعمال و با سه روش تک‌معیاره رایج (زاویه دید، فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری) مقایسه شد. نتایج نشان داد که این روش در هر دو مجموعه، ارتوفتوموزاییک‌هایی با دقت بالاتر تولید کرده و خطاهای بیشینه در آن به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته‌اند. همچنین در مقایسه با روش زاویه دید، نگاشت دوگانه کمتری مشاهده شد. هرچند زمان پردازش در روش پیشنهادی نسبت به روش‌های تک‌معیاره افزایش یافته است. روش پیشنهادی قابلیت توسعه با معیارهای تاثیرگذار دیگر را به سهولت امکان‌پذیر می‌کند. همچنین از دیگر مزایای روش پیشنهادی تعیین وزن معیارهاست که تاثیر اهمیت معیارها بر تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند. در آینده، بررسی روش‌های مختلف وزندهی، معیارهای جایگزین نظیر بیضی خطا، و گسترش این رویکرد به داده‌هایی با شرایط پروازی یا محیطی متفاوت، از جمله مسیرهای پژوهشی قابل توجه خواهند بود. علاوه بر این ارزیابی اثرگذاری تک تک معیارهای کمکی بر روی معیارهای پایه در پژوهش‌های پیش رو می‌تواند به تصمیم‌گیری در انتخاب بهترین معیارها کمک کند.

مراجع

[1] Y. Sheng, "Minimising algorithm - induced artefacts in true ortho - image generation: a direct method implemented in the vector domain," The Photogrammetric Record, vol. 22, no. 118, pp. 151-163, 2007.

[2] M. Shoab, V. K. Singh, and M. Ravibabu, "High-Precise True Digital Orthoimage Generation and Accuracy Assessment based on UAV Images," Journal of the Indian Society of Remote Sensing, pp. 1-10, 2021.

[3] E. Widyaningrum, R. Lindenbergh, B. Gorte, and K. Zhou, "Extraction of building roof edges from LiDAR data to optimize the digital surface model for true orthophoto generation," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 42, pp. 1199-1205, 2018.

[4] D. Wierzbicki, M. Kedzierski, and A. Fryskowska, "Assesment of the influence of UAV image quality on the orthophoto production," The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, vol. 40, pp. 1-8, 2015.

[5] H. Gharibi and A. Habib, "True orthophoto generation from aerial frame images and LiDAR data: An update," Remote Sensing, vol. 10, no. 4, p. 581, 2018.

[6] M. Ebrahimikia and A. Hosseininaveh, "True orthophoto generation based on unmanned aerial vehicle images using reconstructed edge points," The Photogrammetric Record, vol. 37, no. 178, pp. 161-184, 2022.

[7] M. Sajadian and M. Varshosaz, "True orthophoto mosaic generation: a simple and fast method," Journal of Geomatics Science and Technology, vol. 12, 3, pp. 75-94, 2023.

[8] A. R. Nasrullah, "Systematic analysis of

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

unmanned aerial vehicle (UAV) derived product quality," University of Twente, 2016.

[9] M. Varshosaz, M. Sajadian, S. Pirasteh, and A. Moghimi, "Automated Two-Step Seamline Detection for Generating Large-Scale Orthophoto Mosaics from Drone Images," Remote Sensing, vol. 16, no. 5, p. 903, 2024.

[10] G. Zhou, W. Chen, J. A. Kelmelis, and D. Zhang, "A comprehensive study on urban true orthorectification," IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, vol. 43, no. 9, pp. 2138-214, 2005, 7.

[11] J. Chen, Z. Li, C. Peng, Y. Wang, and W. Gong, "UAV Image Stitching Based on Optimal Seam and Half-Projective Warp," Remote Sensing, vol. 14, no. 5, p. 1068, 2022.

[12] M. Song, Z. Ji, S. Huang, and J. Fu, "Mosaicking UAV orthoimages using bounded Voronoi diagrams and watersheds," International Journal of Remote Sensing, vol. 39, no. 15-16, pp. 4960-4979, 2018.

[13] G. Chen, S. Chen, X. Li, P. Zhou, and Z. Zhou, "Optimal seamline detection for orthoimage mosaicking based on DSM and improved JPS algorithm," Remote Sensing, vol. 10, no. 6, p. 821, 2018.

[14] L. Barazzetti, R. Brumana, D. Oreni, M. Previtali, and F. Roncoroni, "True-orthophoto generation from UAV images: Implementation of a combined photogrammetric and computer vision approach," ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 2, pp. 57-63, 2014.

[15] A. F. Habib, K.-I. Bang, C. Kim, and S. Shin, "True Ortho-photo Generation from High Resolution Satellite Imagery," Innovations in 3D Geo Information Systems, pp. 641-656, 2006.

[16] F. Amhar, J. Jansa, and C. Ries, "The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with a conventional DTM," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, pp. 16-22, 1998 .

[17] H. C. de Oliveira, M. Galo, and A. P. Dal Poz, "Height-gradient-based method for occlusion detection in true orthophoto generation," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 12, no. 11, pp. 2222-2226, 2015.

[18] M. Ø. Nielsen, "True orthophoto generation," Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark, 2004.

[19] J. R. Spann and K. S. Kaufman, "Photogrammetry using 3D graphics and projective textures," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 33, no. B5/2; PART 5, pp. 748-755, 2000.

[20] Y. Hu, D. Stanley, and Y. Xin, "True ortho generation of urban area using high resolution aerial photos," ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, vol. 3, no. 4, 2016.

[21] T. Hanusch, "Texture mapping and true orthophoto generation of 3D objects," ETH Zurich, 2010.

[22] S. Hu, Z. Li, S. Wang, M. Ai, and Q. Hu, "A texture selection approach for cultural artifact 3D reconstruction considering both geometry and radiation quality," Remote Sensing, vol. 12, no. 16, p. 2521, 2020.

[23] W. Schickier and A. Thorpe, "Operational procedure for automatic true orthophoto generation," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, pp. 527-532, 1998.

[24] H. C. de Oliveira, A. P. Dal Poz, M. Galo, and A. F. Habib, "Surface gradient approach for occlusion detection based on triangulated irregular network for true orthophoto generation," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 11,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

no. 2, pp. 443-457, 2018.

[25] Q. Fangming and L. Wei, "Research on the Occlusion Processing Method for True Orthophoto," in 2013 Seventh International Conference on Image and Graphics, 2013: IEEE, pp. 328-331.

[26] C. Dostal and K. Yamafune, "Photogrammetric texture mapping: A method for increasing the Fidelity of 3D models of cultural heritage materials," Journal of Archaeological Science: Reports, vol. 18, pp. 430-436, 2018.

[27] Z. Lari and A. Habib, "A new approach for segmentation-based texturing of laser scanning data," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 40, pp. 115-121, 2015.

[28] M. Ettarid, A. A. M'h, and R. Aloui, "Digital true orthophotos generation," 2005.

[29] M. Wang, S. Yuan, J. Pan, L. Fang, Q. Zhou, and G. Yang, "Seamline determination for high resolution orthoimage mosaicking using watershed segmentation," Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 82, no. 2, pp. 121-133, 2016.

[30] S. Patil and S. Sheelvant, "Survey on image quality assessment techniques," Int. J. Sci. Res, vol. 4, no. 7, pp. 1756-1759, 2015.

[31] R. Hartley and A. Zisserman, "Estimation-2D projective transformations," Multiple View Geometry, 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, pp. 87-90, 2003.

[32] I. Vinogradova, V. Podvezko, and E. K. Zavadskas, "The recalculation of the weights of criteria in MCDM methods using the bayes approach," Symmetry, vol. 10, no. 6, p. 205, 2018.

[33] M. Haggag, M. Zahran, and M. Salah, "Towards automated generation of true orthoimages for urban areas," American Journal of Geographic Information System, vol. 7, no. 2, pp. 67-74, 2018.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.2, Summer 2025

Research Paper

Selecting the optimal image with Multi-Criteria Decision Making methods to enhance the geometric quality of true orthophotomosaic from UAV imagery

Maryam Sajadian [1*], Masoud Varshosaz [2], Abolghasem Sadeghi Niaraki [3], Janathan Li [4]

1- Ph.D student of photogrammetry, Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Geomatics Engineering Faculty, , K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3- Associate Professor, Department of Computer Science and Engineering, Sejong University, Seoul, South Korea
4- Professor, Department of Geography and Environmental Management, University of Waterloo, Waterloo, Canada

Abstract

Today, the generation of true orthophoto mosaic with high quality and accuracy from UAV images which is a challenging problem has attracted the attention of many researchers. The selection of the best reference image is a crucial aspect that influences the accuracy and quality of this product. In UAV-based photogrammetry projects, there are several options among the overlapping images to construct each pixel of the orthophoto mosaic. Thus, the orthophoto mosaic result can be greatly affected by using various UAV images with various geometric and radiometric properties. This paper presents a new method that uses a Multi-Criteria Decision-Making method to identify the best reference image for each pixel of the orthophoto mosaic by considering multiple criteria. The optimal reference image is determined in two steps: weighing and Multi-Criteria Decision Making. In the weighting stage, the 3D tie points are used to determine the weight of five different criteria including the distance from the projection center, the accuracy of the external orientation parameters, the number of the 3D tie points, the number of the ground control points, and the image quality. Then, the images are ranked using a Multi-Mriteria Decision Making process once the closest images displaying the DSM point are found. The internal evaluation is then carried out to choose the best image by minimizing the reprojection error of the nearby 3D tie points. The final result of this process is an optimized reference image for each DSM point, which is used to fill the corresponding orthophoto mosaic cell. Two UAV-based datasets were used to analyze the proposed method, and the results are compared to those of the popular single-criteria approaches. The results show that, based on the results obtained, in terms of RMSE, the proposed MCDM method, reduces the errors generated on the orthophoto mosaic up to 15 cm, 10 cm and 8 cm compared to the single-criteria that employs the viewing angle, the distance from the projection center and the distance from Nadir. In the second dataset these amounts are 7 cm, 3 cm and 3 cm, respectively. Nevertheless, in the first dataset the processing time of the proposed method is about 28% longer than the fastest single-criteria method of distance from the imaging center and 15% longer in the second dataset.

Key words: *Orthophoto mosaic, UAV images, Digital Surface Model, Multi-Criteria Decision Making, Optimal image.*

Correspondence Address *: No. 1346, ValiAsr Street, Mirdamad cross, Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel *: +982188877071*
Email*: m.sajadian@email.kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-09-16]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.1]