

ارائه یک روش ساده و سریع برای تولید خودکار ارتوفتوموزاییک حقیقی از تصاویر پهپادمبنا

مریم سجادیان^{۱*}، مسعود ورشوساز^۲

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

m.sajadian@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

varshosazm@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت: تیرماه ۱۴۰۱، تاریخ تصویب: بهمن‌ماه ۱۴۰۱)

چکیده

امروزه استفاده از تصاویر پهپادمبنا برای تولید ارتوفتوموزاییک‌های بزرگ مقیاس از مناطق نسبتاً وسیع گسترش یافته‌است. تولید ارتوفتوموزاییک در دو مرحله ترمیم تصویر و دوختن تصاویر انجام می‌گیرد. به این صورت که ابتدا در فرایند ترمیم با استفاده از DSM مربوط به هر تصویر، ارتوفتو آن تولید می‌شود. سپس در مرحله دوم با استفاده از روش‌های مختلف دوختن تصاویر، تک ارتوفتوهای تولید شده گام به گام به یکدیگر متصل می‌شوند تا یک ارتوفتوموزاییک بزرگ از کل منطقه ایجاد شود. روش‌های دوختن تصاویر متکی به تعیین لبه‌های برش بهینه هستند که فرایندی پیچیده و چالش برانگیز محسوب می‌گردد. علاوه بر این، ترمیم تصاویر و دوختن آن‌ها در پروژه‌های پهپادمبنا با تعداد تصاویر زیاد که معمولاً پوشش‌های طولی و عرضی بالا نیز دارند، بسیار زمانبر است. در این مقاله روشی ساده برای تولید ارتوفتوموزاییک بزرگ مقیاس از تصاویر پهپادمبنا بدون نیاز به تولید تک‌ارتوفتوها و تعیین لبه‌های برش ارائه شده‌است. در این روش به جای اتصال تک ارتوفتوها در فضای تصویر، یک DSM یکپارچه در فضای عارضه تعریف می‌شود. سپس برای هر نقطه از DSM مربوطه، با تکیه بر یکی از معیارهای فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری، یک تصویر بهینه از میان تمامی تصاویر انتخاب می‌گردد. در نهایت نقاط DSM با تصاویر بهینه تعیین شده بازنگاشت شده و موزاییک نهایی به یکباره تولید می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد روش پیشنهادی در تولید ارتوفتوموزاییک بزرگ مقیاس به خوبی عمل کرده‌است به طوری که موزاییک یکپارچه‌ای با اختلافات کم بر روی لبه‌های برش تولید شده‌است. علاوه بر این، روش پیشنهادی با روش رایج تولید ارتوفتوموزاییک که بر مبنای تولید تک ارتوفتوها و دوختن آن‌ها می‌باشد مقایسه شده‌است. ارزیابی‌ها بیانگر این هستند که روش پیشنهادی بر مبنای فاصله از مرکز تصویربرداری سرعت تولید ارتوفتوموزاییک را ۳۹٪ و ۴۵٪ به ترتیب در مجموعه داده اول و دوم افزایش داده‌است. همچنین، دقت هندسی محاسبه شده با استفاده از نقاط چک در ارتوفتوموزاییک‌های تولیدی به روش پیشنهادی به طور متوسط حدود ۲ سانتی‌متر کاهش یافته‌است که نشان‌دهنده نتایج دقیق‌تر می‌باشد.

واژگان کلیدی: تصاویر پهپاد، ترمیم تفاضلی، ارتوفتوموزاییک، مدل رقومی سطح (DSM).

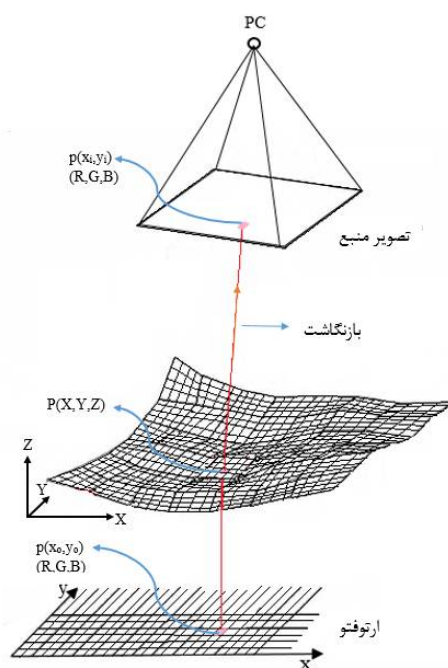
* نویسنده رابط

۱- مقدمه

تهیه ارتوفتو^۱ به کمک تصاویر پهپاد از جمله موارد مهمی است که در سال‌های اخیر توجه محققین را به خود جلب نموده است [۱، ۲، ۳، ۴]. هدف از تولید ارتوفتو حذف تیلت و جابجایی ارتفاعی از تصاویر پرسپکتیو اخذ شده است [۵]. ارتوفتو یک مقیاس ثابت دارد و می‌تواند به عنوان یک نقشه مسطحاتی مورد استفاده قرار گیرد [۶]. تولید ارتوفتو با استفاده از فرایند ترمیم^۲ انجام می‌گیرد که به دو روش نگاشت مستقیم^۳ و نگاشت غیرمستقیم^۴ طبقه‌بندی می‌شود [۷]. در روش مستقیم با استفاده از پارامترهای توجیه داخلی و توجیه خارجی دوربین، پیکسل‌های تصویر بر روی زمین نگاشت می‌شوند. در اینجا مجموعه‌ای از نقاط غیرمنظم در فضای زمین بوجود می‌آید که باید درونیایی شوند تا قابل ارائه به صورت یک تصویر رقومی باشند. اما در روش غیرمستقیم که به آن ترمیم تفاضلی^۵ نیز گفته می‌شود [۸]، ابتدا DSM^۶ یا DTM^۷ تولید می‌شود. سپس مطابق با شکل ۱ هر نقطه از DSM مانند P با مختصات (X,Y,Z) به تصویر منبع بازنگاشت^۸ و مختصات تصویری آن (X_i,Y_i) محاسبه می‌گردد. مقادیر رنگی R,G,B این پیکسل برای پرکردن پیکسل ارتوفتو متناظر آن p(x₀,y₀) استفاده می‌شود.

تک ارتوفتوهای تولید شده از تصاویر مختلف می‌توانند با استفاده از روش‌های دوختن تصاویر^۹ به یکدیگر متصل و یک تصویر بزرگ از ناحیه‌ی مد نظر را تشکیل دهند که ارتوفتوموزائیک^{۱۰} نامیده می‌شود [۹]. برای اتصال تک ارتوفتوها به یکدیگر، ابتدا آنها با استفاده از روش‌های تناظریایی تصویر به یکدیگر انطباق^{۱۱} داده می‌شوند [۱۰] و نواحی پوششدار آنها استخراج می‌گردند. سپس محل اتصال تصاویر که لبه‌های برش^{۱۲} نامیده می‌شوند، در نواحی

پوشش‌دار تعیین و بر اساس آن‌ها موزائیک نهایی شکل می‌گیرد [۱۱].



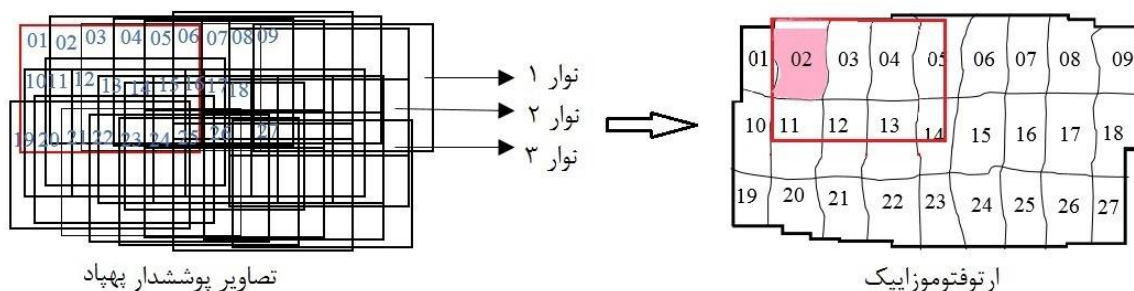
شکل ۱- تهیه ارتوفتو به روش ترمیم تفاضلی

تاکنون روش‌های زیادی در هر دو زمینه انطباق تصویر [۱۹-۱۲] و تعیین لبه‌های برش بهینه [۲۰-۴۰] معرفی شده‌اند. فرایند انطباق تصویر که بر اساس تناظریایی تصویری انجام می‌شود یک فرایند چالش‌برانگیز مخصوصاً در مناطق بدون عارضه و دارای الگوهای تکراری به حساب می‌آید [۱۲]. هرگونه خطا در تناظریایی باعث ایجاد ناهماهنگی در اتصال تصاویر می‌شود [۱۴]. از سوی دیگر، تعیین خودکار لبه‌های برش به طوریکه کمترین اختلاف در محل اتصال تصاویر وجود داشته باشد همواره با مشکل روبرو بوده و معمولاً یک مداخله دستی به صورت سعی و خطا نیاز است [۳۲].

در پروژه‌های پهپادمبنا با تعداد تصاویر زیاد که معمولاً پوشش‌های طولی و عرضی بالا نیز دارند روبرو هستیم. از این رو فرایند رایج ذکرشده برای تولید ارتوفتوموزائیک می‌تواند پیچیده‌تر و زمان‌بر باشد. زیرا تمامی تصاویر باید به صورت جداگانه ترمیم شوند، سپس به یکدیگر انطباق داده شده و در نهایت لبه‌های برش تعیین و تصاویر به یکدیگر دوخته شوند [۱۰، ۱۱]. علاوه بر این ممکن است تنها قسمتی از هر تک ارتوفتو در موزائیک نهایی استفاده شود

- ۱ Orthophoto
- ۲ Rectification
- ۳ Forward projection
- ۴ Backward projection
- ۵ Differential rectification
- ۶ Digital Surface Model
- ۷ Digital Terrain Model
- ۸ Reproject
- ۹ Image stitching
- ۱۰ Orthophoto mosaic
- ۱۱ Image registration
- ۱۲ Seamlines

قسمت کوچکی از تصویر ۲ در تولید موزاییک نهایی نقش داشته است که با رنگ صورتی نشان داده شده‌است.



شکل ۲- تولید موزاییک تصویری با استفاده از تصاویر پهنادمبنا با پوشش‌های طولی و عرضی بالا

DSM در آن ظاهر (تصویربرداری) شده‌است. سپس فرایند ترمیم تفاضلی با استفاده از تصاویر بهینه تعیین شده انجام می‌گیرد و ارتوفتوموزاییک به صورت یکجا تولید می‌شود. نوآوری اصلی این تحقیق به صورت زیر است:

- ارائه الگوریتمی نوین جهت تولید ارتوفتوموزاییک از تصاویر پهناد که در آن به جای تولید تکاررتوفتوها و موزاییک کردن آنها (که مستلزم تعیین بهینه موقعیت لبه‌های برش می باشد)، کل ارتوفتوموزاییک به صورت یکپارچه و بدون نیاز به تعیین لبه‌های برش تولید می‌شود که به کاهش زمان و محاسبات اضافی کمک می‌کند.

در ادامه، تحقیقات مرتبط در بخش دوم ذکر شده‌اند. بخش سوم به توصیف جزئیات روش پیشنهادی پرداخته است. در بخش چهارم نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی تصاویر پهنادمبنا ارائه شده‌است. همچنین نتایج مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند و با روش رایج تولید ارتوفتوموزاییک بر اساس تولید تک ارتوفتوها و دوختن آنها مقایسه شده‌اند. در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم بیان شده‌است.

۲- مروری بر تحقیقات

معمولا گام‌های تولید ارتوفتوموزاییک به صورت مستقل انجام می‌گیرد [۱۱]. ابتدا در گام اول هر تصویر به صورت جداگانه با استفاده از DSM، ترمیم و ارتوفتو آن تولید می‌شود [۶]. گام دوم انطباق تصویر است که به فرایند انتقال مجموعه تصاویر به یک سیستم مختصات واحد می‌پردازد

که نشان دهنده‌ی محاسبات اضافی است. این موضوع در شکل ۲ نشان داده شده‌است. در این شکل لبه‌های برش در سه نوار پروازی با ۹ تصویر در هر نوار ایجاد شده‌است.

همچنین همپوشانی بالا سبب پیچیده شدن تعیین لبه‌های برش بهینه برای دوختن تصاویر می‌شود. در این مقاله روشی ساده و سریع برای ترکیب تصاویر به منظور تولید ارتوفتوموزاییک حقیقی معرفی شده‌است. این روش بر اساس روش‌های بهینه‌یابی^۱ برای پرکردن ناحیه پنهان^۲ ارتوفتو توسعه داده شده‌است [۹]. در این روش‌های بهینه‌یابی پس از تولید تک ارتوفتو، نواحی پنهان با استفاده از تصاویر پوشش‌دار مجاور پر می‌شوند [۴۱]. به این دلیل که انتخاب‌های زیادی از میان تصاویر پوشش‌دار برای پرکردن نواحی پنهان وجود دارد، بهینه‌یابی برای تعیین تصویر بهینه انجام می‌گیرد [۴۲]. پس از آنکه نواحی پنهان تک ارتوفتوها پر شدند، برای تولید موزاییک، تک ارتوفتوها بر اساس لبه‌های برش تعیین شده به یکدیگر دوخته می‌شوند.

در روش پیشنهادی از مبانی این روش‌ها استفاده شده‌است به طوریکه فرایند بهینه‌یابی نه تنها برای پرکردن پیکسل‌های پنهان تک ارتوفتوها، بلکه برای پرکردن تمامی پیکسل‌های ارتوفتوموزاییک انجام می‌گیرد. این روش بر خلاف تعیین تصویر بهینه برای پرکردن ناحیه پنهان که در فضای تصویری انجام می‌گیرد، در فضای عارضه بر روی DSM تعریف می‌شود. ابتدا برای هر نقطه از DSM، تصویر بهینه از میان تمامی تصاویر نمایان، بر اساس یکی از معیارهای فاصله از نادیر [۴۰، ۹] و فاصله از مرکز تصویربرداری تعیین می‌شود [۴۳-۴۶]. در اینجا تصاویر نمایان به آن دسته از تصاویری گفته می‌شوند که نقطه

^۱ Optimization

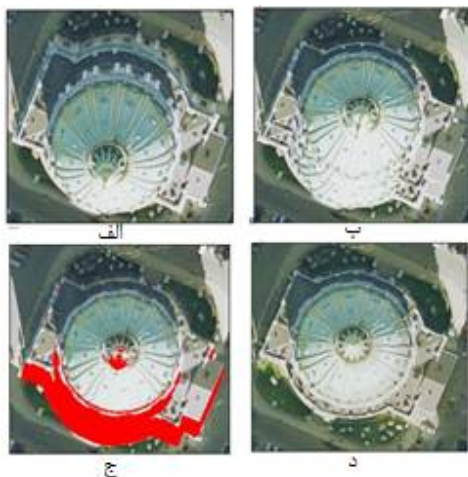
^۲ Occluded area

[۱۹]. لازم به ذکر است که اگرچه تک‌ارتوفتوها ژئورفرنس شده هستند اما از آنجا که معمولاً دارای خطاهای رندوم هستند، باز هم در الگوریتم‌های رایج مجدداً بعد از ترمیم تصاویر، فرایند انطباق تصویر بر اساس تناظریابی تصویری انجام می‌گیرد [۱۰]. گام سوم دوختن ارتوفتوها به یکدیگر و تولید موزاییک است [۱۲]. اگر چه پس از فرایند انطباق تصویر، دوختن تصاویر به یکدیگر بر اساس ناحیه پوششدار امکانپذیر است اما برای ایجاد یک موزاییک یکپارچه با اختلافات کم در محل اتصال تصاویر، روش‌های تعیین لبه‌های برش بهینه ارائه شده‌اند [۴۷]. بر این اساس تحقیقات انجام شده در زمینه تولید ارتوفتوموزاییک حقیقی را می‌توان در سه دسته ۱- تولید ارتوفتوی حقیقی، ۲- دوختن تصاویر و ۳- تعیین لبه‌های برش بهینه تقسیم‌بندی کرد. تحقیقات مربوط به تولید ارتوفتوی حقیقی اغلب به فرایند تشخیص نواحی پنهان و جبران نواحی پنهان پرداخته‌اند [۶، ۹، ۴۱، ۴۲، ۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴]. روش‌های دوختن تصاویر به بررسی الگوریتم‌های انطباق تصویر و مقایسه آنها در فرایند دوختن تصاویر معطوف گشته‌اند [۱۹-۱۲]. روش‌های تعیین لبه‌های برش بهینه به تعیین محل بهینه اتصال تصاویر/ تک ارتوفتوها تمرکز کرده‌اند [۲۰-۲۰]. در ادامه تحقیقات مربوط در سه گروه نامبرده ذکر شده‌اند. همچنین در انتها انگیزه ارائه روش پیشنهادی بر اساس نتیجه‌گیری از تحقیقات بیان شده‌است.

۲-۱- تولید ارتوفتوی حقیقی

در ابتدا در تولید ارتوفتو به روش‌های سنتی از DTM استفاده می‌شد. عوارضی نظیر ساختمان و دیگر عوارض ارتفاعی در DTM وجود ندارد که موجب می‌شد آنها در موقعیت صحیح خود در ارتوفتوی نهایی قرار نگیرند یا به عبارتی به طور صحیح ترمیم نشوند [۹] (شکل ۳- الف). استفاده از DSM برای ترمیم تصویر منجر به ایجاد اثری به نام نگاشت دوگانه تصویری [۶] - که همچنین "Ghost image" [۹] نیز نامیده می‌شود- بر روی ارتوفتو می‌گردد [۵۵] (شکل ۳- ب). در این پدیده قسمت‌های مربوط به ناحیه پنهان دو بار بر روی ارتوفتو نگاشت می‌شوند. برای

حذف اثر نگاشت دوگانه، نواحی پنهان می‌بایستی ابتدا به صورت خودکار شناسایی شده (شکل ۳- ج) و سپس با اطلاعات تصاویر پوششدار مجاور که نواحی پنهان در آنها نمایان بوده است جبران شوند (شکل ۳- د).



شکل ۳- (الف) ارتوفتوی معمولی تولید شده با DTM دارای اثر کشیدگی و عدم ترمیم صحیح (ب) ارتوفتوی حقیقی تولید شده با DSM قبل از تصحیح اثر نگاشت دوگانه (ج) شناسایی نواحی پنهان که به صورت قرمز رنگ نشان داده شده‌است (د) ارتوفتوموزاییک حقیقی که نواحی پنهان با تصاویر پوششدار مجاور پر شده‌اند [۹].

روش‌های زیادی نظیر Z-buffering [۵۳]، Height-based [۸]، Height-gradient-based [۵۶]، Angle-based [۴۹] و gradient-based [۴۱] برای شناسایی نواحی پنهان معرفی شده‌اند. از طرفی دیگر روش‌های جبران ناحیه پنهان به موضوع انتخاب تصویر بهینه برای پرکردن نواحی پنهان پرداخته‌اند [۵۱-۵۴]. مسئله مورد بررسی در اینجا این است که از میان تصاویر پوششدار زیادی که برای پرکردن نواحی پنهان یک تک-ارتوفتو وجود دارد کدامیک بهینه می‌باشد. تحقیقات انجام شده در زمینه انتخاب تصویر بهینه عمدتاً مبتنی بر استفاده از یک یا چند معیار می‌باشند که با توجه به مقادیر آنها تصاویر مختلف اولویت‌بندی شده و از بین آنها تصویر بهینه انتخاب می‌شود. تاکنون معیارهایی نظیر نزدیک‌ترین تصویر مجاور [۶]، فاصله از نقطه نادیر [۹، ۴۱، ۵۲]، فاصله از نقطه اصلی [۵۷]، فاصله از مرکز تصویربرداری [۴۷-۴۶]، زاویه دید [۴۱، ۵۲، ۵۸] و فاصله از نقطه پنهان [۹، ۵۲] در این زمینه معرفی شده‌اند. علاوه بر مسئله وجود نواحی پنهان در هنگام تولید

۲-۳- تعیین لبه‌های برش بهینه

همیشه در محل اتصال تک ارتوفتوها اختلافات هندسی وجود دارد. این اختلافات هنگامی که محل اتصال تصاویر بر روی ساختمان‌ها و درختان قرار گیرد بیشتر است. از این رو تحقیقات مربوط به پیدا کردن لبه‌های برش بهینه به ارائه راهکارهایی پرداخته‌اند تا لبه‌های برش را طوری بهینه کنند تا از روی ساختمان‌ها و درختان عبور نکنند [۲۰-۴۰]. روش‌های تعیین لبه‌های برش بهینه به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: روش‌های تصویرمبنا و روش‌های زمین‌مبنا [۶۰]. روش‌های تصویرمبنا، از اطلاعات تصویری برای هدایت کردن لبه‌های برش به طوریکه از عوارض ارتفاعی (نظیر ساختمان‌ها و درختان) عبور نکنند، استفاده می‌کنند. در حالیکه روش‌های زمین‌مبنا که در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند از اطلاعات زمینی نظیر DSM و DTM برای هدایت لبه‌های برش در جهت عدم عبور از عوارض ارتفاعی استفاده می‌کنند [۴۷، ۶۱، ۶۲]. در هر دو دسته تعیین لبه‌های برش می‌تواند به صورت تصویر-به-تصویر^۷ و چند-تصویری^۸ باشد [۱۱]. روش‌های تصویر-به-تصویر لبه‌های برش را یکی پس از دیگری در تصاویر مجاور تعیین می‌کنند [۲۲-۲۵ و ۲۹-۳۳]. اما در روش-های چند تصویری شبکه لبه‌های برش در تمامی تصاویر به صورت یکجا تعیین می‌شود [۳۵، ۳۷، ۳۸، ۴۰]. این روش-ها سرعت بالاتری دارند [۱۱]. علاوه بر اختلافات هندسی در لبه‌های برش، اختلافات رادیومتریکی در ارتوفتوموزاییک به دلیل شرایط نوری و تصویربرداری متفاوت هنگام اخذ تصاویر مختلف بوجود می‌آید [۶۰]، که برای کم کردن اثرات آن از روش‌هایی نظیر Color matching و Feathering استفاده می‌شود [۹].

تولید ارتوفتوموزاییک در یک فرایند پیچیده و زمانبر انجام می‌گیرد. مراحل تولید ارتوفتوهای تکی، تناظریایی تصویری و در نهایت بهبود لبه‌های برش، زمانبر و همواره با چالش‌های زیادی روبرو می‌باشد. از طرفی مراحل تولید ارتوفتوموزاییک مرحله به مرحله و به صورت مستقل از یکدیگر انجام می‌شوند. راهبرد

ارتوفتوی حقیقی، مشکلات دیگری نظیر تضاریس لبه‌های ساختمان^۱ و وجود اشیا متحرک (نظیر ماشین‌ها و عابرین پیاده) مطرح می‌شوند که برخی تحقیقات نیز در این زمینه‌ها برای افزایش کیفیت محصول نهایی ارائه شده‌اند [۵، ۶، ۲۵، ۵۹].

۲-۲- دوختن تصاویر

تحقیقات ارائه شده با عنوان دوختن تصاویر به ارائه و بررسی روش‌های انطباق تصویر در تولید موزاییک تصویری پرداخته‌اند [۱۹]. تناظریایی بر پایه روش‌های استخراج عارضه نظیر^۲ ORB،^۳ SIFT،^۴ SURF،^۵ KAZE، AKAZE و^۶ BRISK انجام می‌گیرد [۱۵]. هر روشی که برای تناظریایی بکار می‌رود نقاط تناظریایی مختلفی تولید می‌کند که همگی دارای نقاط تناظریایی شده اشتباه هستند. این خطاها موجب توجیه نادرست تصاویر می‌شوند که بر فرایند دوختن تصاویر تاثیرگذار است [۱]. از این رو تحقیقات زیادی به بررسی و تاثیر روش‌های تناظریایی تصویری در زمینه دوختن تصاویر به یکدیگر پرداخته‌اند. تحقیق [۱۲] سعی کرده‌است که خطاهای ناشی از الگوهای تکراری و نواحی بدون عارضه را در انطباق تصویر مرتفع کند. تحقیق [۱۸] از اطلاعات ناحیه پوششدار برای دوختن تعداد تصاویر زیاد با سرعت بیشتر استفاده کرده‌است. مرجع [۱۳] از اطلاعات زمینی برای بهبود دقت انطباق تصویر در فرایند دوختن تصاویر پهنپاد استفاده کرده‌است. تحقیق [۱۴] از روش شبکه عصبی عمیق برای تخمین ماتریس هموگرافی استفاده کرده‌است تا فرایند دوختن تصاویر با پارالاکس کمتر انجام شود. مرجع [۱۵] به مقایسه دو روش SIFT و SURF در دوختن تصاویر پهنپادمبنا پرداخته‌است. تحقیق [۱۶] با استفاده از روش ORB به حذف خطاهای تناظریایی روش ORB به منظور دوختن تصاویر پهنپاد اقدام کرده‌است.

^۱ Sawtooth effects

^۲ Oriented FAST and Rotated BRIEF

^۳ Scale-Invariant Feature Transform

^۴ Speeded Up Robust Features

^۵ Binary Robust Invariant Scalable Keypoints

^۶ RANSAC

^۷ Frame-to-frame

^۸ Multi-frame

زمین به دوربین). با فرض اینکه (x_h, y_h) نقطه همگن^۱ باشد و r فاصله شعاعی از مرکز دوربین باشد:

$$r^2 = x_h^2 + y_h^2 \quad \text{و} \quad \begin{pmatrix} x'_h \\ y'_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_h}{r} \\ \frac{y_h}{r} \end{pmatrix} \quad (2)$$

مختصات نقطه همگن اعوجاج یافته در سیستم مختصات دوربین (x_{hd}, y_{hd}) به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\begin{pmatrix} x_{hd} \\ y_{hd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) x_h + 2P_1 x_h y_h + P_2 (r^2 + 2(x_h)^2) \\ (1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) y_h + 2P_2 x_h y_h + P_1 (r^2 + 2(y_h)^2) \end{pmatrix} \quad (3)$$

که K_1, K_2, K_3 ضرایب اعوجاج شعاعی و P_1, P_2 ضرایب اعوجاج مماسی هستند. مختصات تصویری نقطه سه‌بعدی نگاشت شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} x_{oi} \\ y_{oi} \end{pmatrix} = -f \begin{pmatrix} x_{hd} \\ y_{hd} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} \quad (4)$$

که f فاصله کانونی در واحد پیکسل و (c_x, c_y) مختصات نقطه اصلی در واحد پیکسل هستند.

سپس در مرحله دوم مختصات‌های تصویری بدست آمده از لحاظ مقدار عددی بررسی می‌شوند. به این صورت که اگر مختصات تصویری در محدوده‌ی هندسی ابعاد تصویر قرار بگیرد، به عنوان تصویر نمایان نقطه DSM شناخته می‌شود. این یک روش ساده برای شناسایی تصاویر نمایان است که برای تمامی نقاط DSM تکرار می‌شود.

۳-۲- بهینه‌یابی

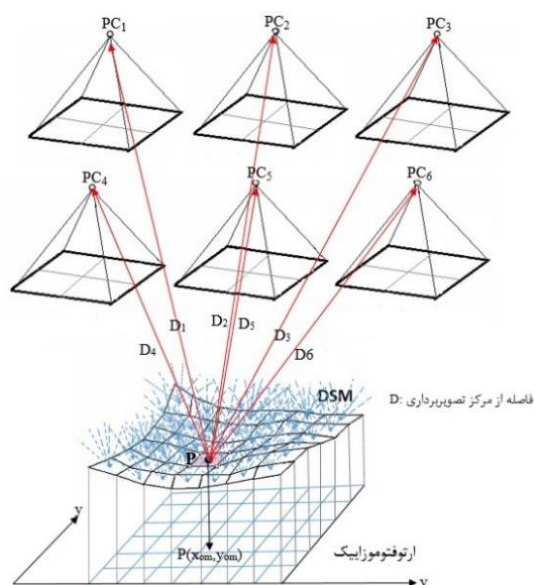
در اینجا بهینه‌یابی برای تعیین بهترین تصاویر برای پرکردن پیکسل‌های ارتوفتوموزاییک انجام می‌شود. این روش بر اساس روش‌های بهینه‌یابی برای پرکردن پیکسل‌های پنهان ارتوفتو توسعه داده شده‌است. همانطور

که در بخش ۲-۱ شرح داده شد، پس از تولید تک ارتوفتوها، نواحی پنهان آن‌ها با استفاده از تصاویر پوششدار که نواحی در آن‌ها نمایان بوده‌است، پر می‌شوند. از آنجا که انتخاب‌های زیادی از میان تصاویر نمایان وجود دارد، روش‌های بهینه‌یابی، به دنبال تعیین تصویر بهینه برای جبران نواحی پنهان هستند [۵۲-۵۵]. این روش‌ها در فضای تصویر و پس از فرایند ترمیم تصاویر انجام می‌شود. به صورتیکه پس از شناسایی نواحی پنهان بر روی ارتوفتو، پیکسل‌های پنهان در تصاویر دیگر شناسایی و با پیکسل متناظر تصویر بهینه پر می‌شوند. در روش پیشنهادی، این فرایند بهینه‌یابی در فضای زمینی و برای پرکردن تمامی پیکسل‌های ارتوفتوموزاییک توسعه داده شده‌است. به جای تولید تک‌ارتوفتوها و سپس جست‌وجو برای تعیین تصویر بهینه در فضای تصویر، فرایند بهینه‌یابی به صورت مستقیم بر روی نقاط DSM انجام می‌گیرد. فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری به عنوان معیارهای بهینه‌یابی در نظر گرفته شده‌اند که در بخش‌های زیر توضیحات مربوطه ذکر شده‌اند.

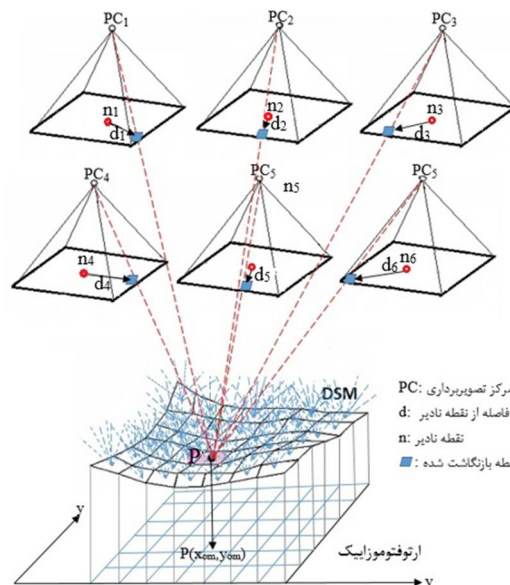
۳-۲-۱- فاصله از نادیر

این معیار با در نظر گرفتن موقعیت تصویری نقاط در جست‌وجوی تصویری است که پیکسل مورد نظر به نقطه نادیر نزدیک‌تر باشد [۹، ۴۱، ۵۲]. دلیل این امر این است که جابجایی ارتفاعی در نقطه نادیر حداقل و نگاشت انجام شده به حالت قائم نزدیک‌تر است. در این روش فاصله نقطه نگاشت شده تا نقطه نادیر در تمامی تصاویر نمایان اندازه‌گیری می‌شود. مطابق شکل ۵، شش تصویر به عنوان تصاویر نمایان نقطه P شناخته شده‌اند. مستطیل‌های آبی رنگ را مختصات تصویری نقطه P در شش تصویر فرض می‌کنیم که از فرایند نگاشت معکوس بدست آمده‌اند. در هر تصویر فاصله نقطه نادیر تا نقطه نگاشت شده اندازه‌گیری می‌شود که با d_1 تا d_6 نشان داده شده‌است. تصویر دوم با فاصله d_2 که کمترین مقدار را دارد به عنوان تصویر بهینه نقطه P تعیین می‌شود.

^۱ Homogeneous point



شکل ۶- بهینه‌یابی بر مبنای معیار فاصله از مرکز تصویربرداری



شکل ۵- بهینه‌یابی بر مبنای معیار فاصله از نقطه نادیر

۴- نتایج و ارزیابی

روش پیشنهادی با استفاده از نرم افزار متلب نسخه R2020b پیاده سازی شده‌است. علاوه بر این نرم افزار Pix4D mapper برای تولید DSM استفاده شده‌است. مشخصات سیستم مورد استفاده در زیر ذکر شده‌است:

- Desktop with a 64-bit Windows 10 operating system.
- CPU: Intel(R) Core (TM) i9-9900K CPU at 3.60 GHz.
- RAM: 32 GB.

۴-۱- داده‌های مورد استفاده

دو مجموعه داده شامل تصاویر پهپادمینا برای ارزیابی روش پیشنهادی در نظر گرفته شده‌است. مجموعه داده اول مربوط به یک ناحیه کم‌عارضه و تپه ماهور می‌باشد. ۳۸ تصویر از این منطقه اخذ شده‌است، همچنین ۲۸ نقطه کنترل و چک سه‌بعدی تارگت‌گذاری و تعیین موقعیت شده‌اند (شکل ۷). مجموعه داده دوم نشان داده شده در شکل ۸ یک منطقه تقریباً مسطح حاوی عوارض مصنوعی نظیر ساختمان، راه و پوشش گیاهی است. ۱۱۳ تصویر از منطقه اخذ شده‌است. همچنین ۳۰ نقطه کنترل سه‌بعدی در منطقه در نظر گرفته شده‌است. جدول ۱ حاوی اطلاعات تصویربرداری از دو مجموعه داده می‌باشد.

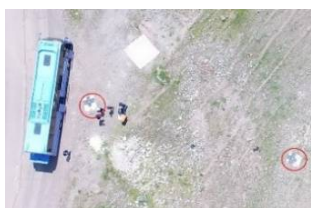
۳-۲-۲- فاصله از مرکز تصویربرداری

برای محاسبه دقیق نقطه نادیر به حداقل سه نقطه سه‌بعدی با توزیع مناسب بر روی تصویر نیاز است. به همین دلیل معیار فاصله از مرکز تصویربرداری به عنوان جایگزین ساده‌تری بکار رفته است. این روش فاصله هر نقطه از DSM را از مراکز تصویربرداری محاسبه می‌کند. تصویر متعلق به کمترین فاصله به عنوان تصویر بهینه انتخاب می‌شود [۴۳-۴۶]. مطابق شکل ۶، نقطه P بر روی DSM، در شش تصویر نمایان بوده است. فاصله این نقطه تا مراکز تصویربرداری تصاویر نمایان اندازه‌گیری می‌شود (D_1-D_6). تصویری که کمترین مقدار را داشته باشد به عنوان تصویر بهینه تعیین می‌شود.

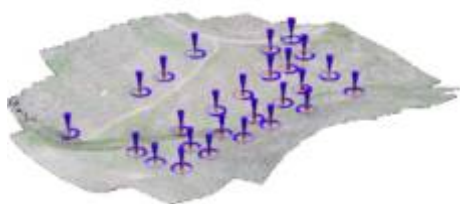
پس از تعیین تصویر بهینه با یکی از دو روش فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری ذکر شده در بخش‌های ۳-۲-۱ و ۳-۲-۲، در نهایت مقادیر رنگی (R,G,B) متعلق به نقطه نگاشت شده در تصویر بهینه، برای پرکردن پیکسل ارتوفتوموزائیک متناظر با نقطه DSM مربوطه $P(x_{om}, y_{om})$ استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که ابعاد سلول DSM با ابعاد پیکسل ارتوفتو یکسان در نظر گرفته شده‌است. این فرایند برای تمامی نقاط DSM تکرار می‌شود و ارتوفتوموزائیک بزرگ مقیاس از کل منطقه به صورت مستقیم و بدون نیاز به تولید تک ارتوفتوها و تعیین لبه‌های برش تولید می‌شود.

جدول ۱- مشخصات داده‌های مورد استفاده

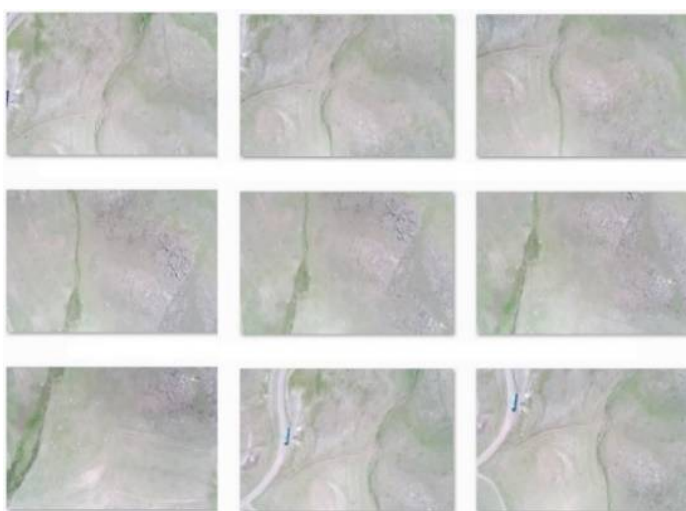
مجموعه داده اول	مجموعه داده دوم	
مساحت	0.1 km ²	0.073 km ²
مدل دوربین	DJI FC6310	DJI FC6310
مدل پهپاد و ابعاد سنسور	Phantom 4 Pro, 12.833×8.556 mm	Phantom 4 Pro, 12.833×8.556 mm
تعداد تصاویر و ابعاد تصویر به پیکسل	۱۱۳, ۳۶۴۸×۵۴۷۲	۳۸, ۳۶۴۸×۵۴۷
میزان پوشش طولی	۹۰٪	۸۵٪
میزان پوشش عرضی	۹۰٪	۸۵٪
ارتفاع پرواز	۱۰۰ m	۱۲۰ m
تعداد نقاط کنترل	۳۰	۲۸



(ب)

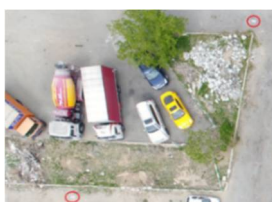


(ج)



(الف)

شکل ۷- مجموعه داده اول: (الف) تعدادی از تصاویر پهپاد، (ب) نقاط کنترل، (ج) ابرنقاط متراکم



(ب)



(ج)



(الف)

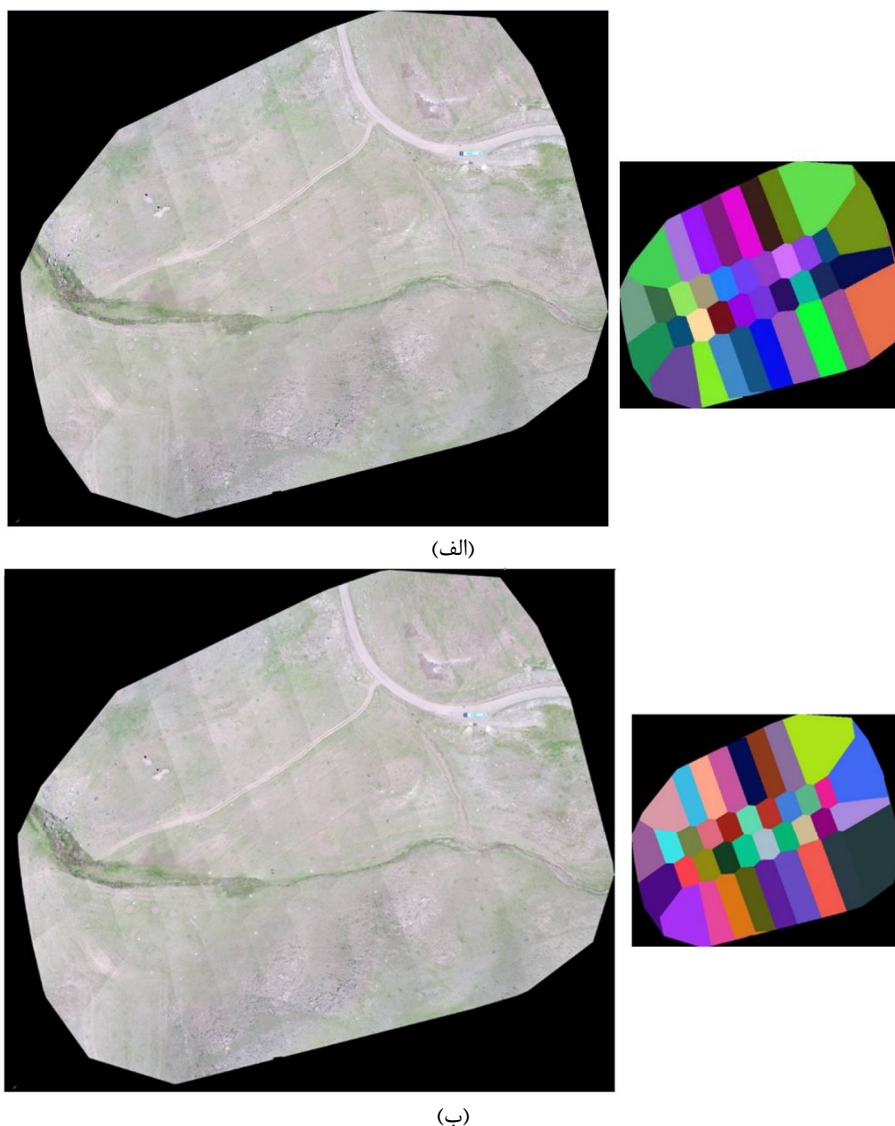
شکل ۸- مجموعه داده دوم: (الف) تعدادی از تصاویر پهپاد، (ب) نقاط کنترل، (ج) ابرنقاط متراکم

۴-۲- نتایج روش پیشنهادی

در شکل ۹ ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده از مجموعه‌داده اول با استفاده از معیارهای فاصله از نادیر (الف) و فاصله از مرکز تصویربرداری (ب) نشان داده شده‌است. قسمت راست اشکال، الگوی رنگی ارتوفتوموزاییک می‌باشد. این الگو نشان می‌دهد که برای تولید هر قسمت از موزاییک از چه تصویری استفاده شده‌است. برای تولید الگوی رنگی، ابتدا به هر تصویر یک رنگ مشخص نسبت داده می‌شود. سپس، هر سلول DSM به رنگ متعلق با تصویر بهینه تعیین شده برای آن در صفحه تصویر نشان داده می‌شود. سلول‌های هم رنگ کنار هم نشان می‌دهند که تصویر بهینه تعیین‌شده

برای این سلول‌ها یکسان بوده‌است. در مجموعه‌داده اول با استفاده از هر دو معیار، از مجموع ۳۸ تصویر همه در تولید موزاییک نقش داشته‌اند. اگرچه الگوها شبیه هم به نظر می‌رسند اما با یکدیگر متفاوت هستند. هر دو روش، موزاییک‌های یکپارچه‌ای با اختلافات هندسی کم بر روی لبه‌های برش تولید کرده‌اند.

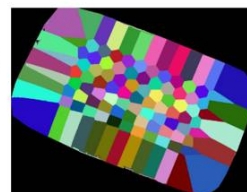
شکل ۱۰ نتایج ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده از مجموعه‌داده دوم را با استفاده از معیارهای فاصله از نادیر (الف) و فاصله از مرکز تصویربرداری (ب) نشان می‌دهد. در هر دو معیار از مجموع ۱۱۳ تصویر، ۱۰۹ تصویر در تولید موزاییک بکار رفته‌اند. مقایسه نتایج و بررسی‌های بیشتر به صورت کمی و کیفی در بخش ۴-۴ ذکر شده‌است.



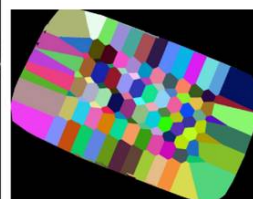
شکل ۹- نتایج روش پیشنهادی در مجموعه‌داده اول: (الف) ارتوفتوموزاییک تولیدشده با معیار فاصله از نادیر (چپ) و الگوی رنگی آن (راست)، (ب) ارتوفتوموزاییک تولیدشده با معیار فاصله از مرکز تصویربرداری (چپ) و الگوی رنگی آن (راست)



(الف)



(ب)

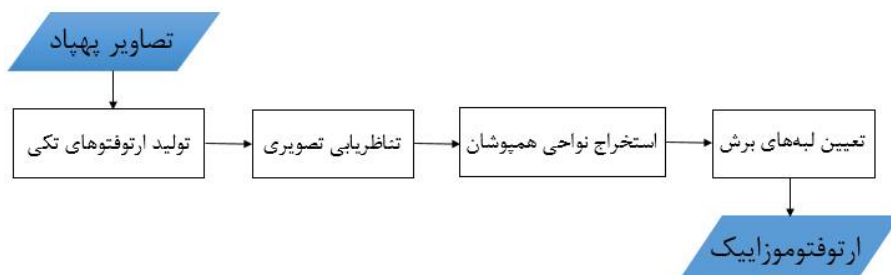


شکل ۱۰- نتایج روش پیشنهادی در مجموعه داده دوم: (الف) ارتوفتوموزاییک تولیدشده با معیار فاصله از نادیر (چپ) و الگوی رنگی آن (راست)، (ب) ارتوفتوموزاییک تولیدشده با معیار فاصله از مرکز تصویربرداری (چپ) و الگوی رنگی آن (راست)

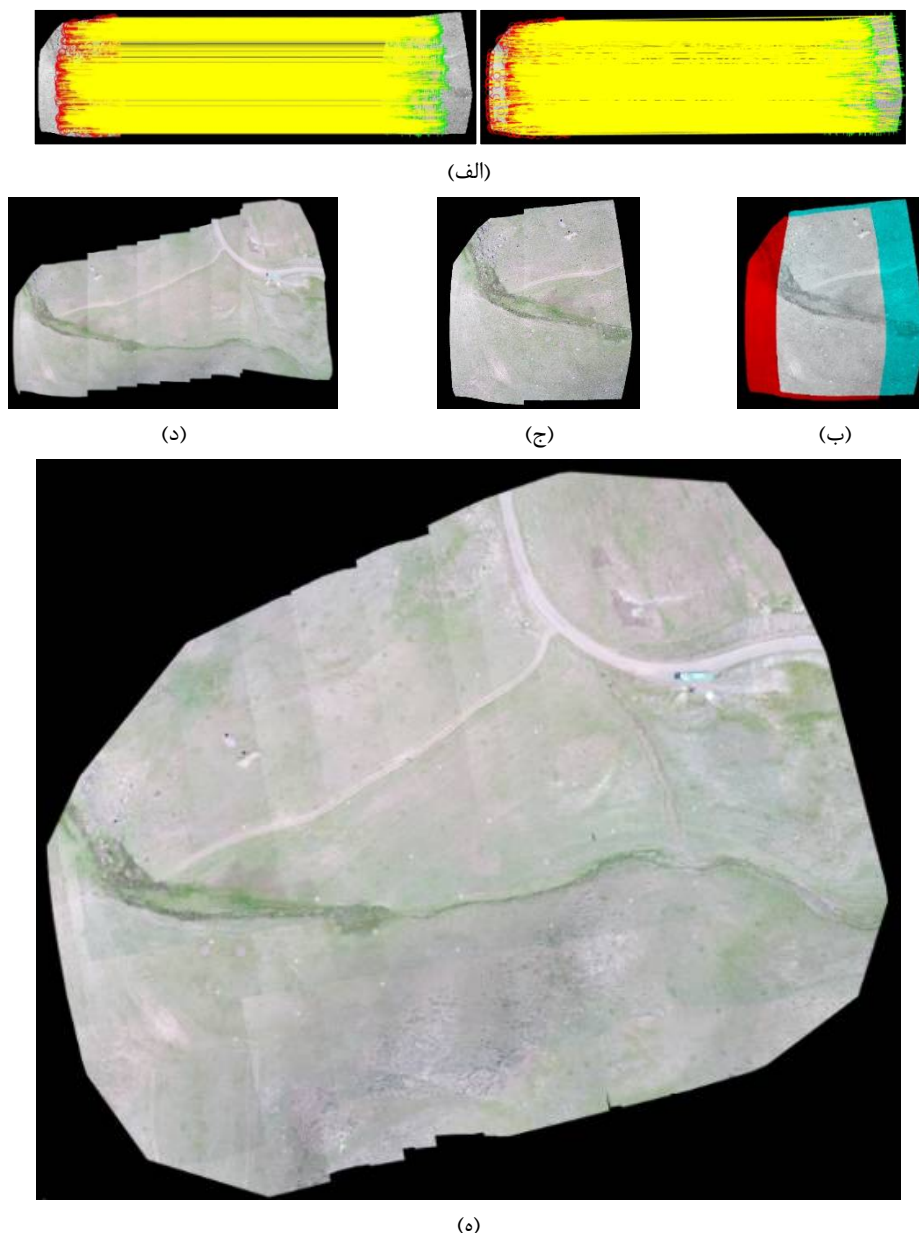
۳-۴- نتایج روش بر مبنای دوختن تصاویر

علاوه بر روش پیشنهادی، روش رایج تولید ارتوفتوموزاییک بر اساس روش بر مبنای دوختن تصاویر مطابق با مراحل ذکر شده در فلوچارت شکل ۱۱ با نرم افزار متلب پیاده‌سازی شده‌است. ابتدا با استفاده از ترمیم تفاضلی، تک ارتوفتوها تولید شده‌اند. سپس تناظریابی تصویر بر اساس عوارض نقطه‌ای

بدست آمده از روش SURF انجام گرفته‌است [۲۶]. همچنین، برای حذف نقاط تناظریابی اشتباه از روش رنسک استفاده شده‌است. بعد از تناظریابی تصویری و استخراج نواحی پوشش‌دار، لبه‌های برش طوری تعیین شده‌اند که تقریباً از وسط ناحیه پوشش‌دار عبور کنند. شکل ۱۲ (الف-ه) نتایج مراحل تولید ارتوفتوموزاییک در مجموعه داده اول را نشان می‌دهد. همچنین ارتوفتوموزاییک تولید شده در مجموعه داده دوم در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است.



شکل ۱۱- مراحل روش رایج تولید ارتوفتوموزاییک بر اساس روش دوختن تصاویر



شکل ۱۲- مراحل تولید ارتوفتوموزاییک در مجموعه داده اول بر اساس روش مبتنی بر دوختن تصاویر: (الف) تناظریابی تصویری بین دو تک ارتوفتو قبل از شناسایی نقاط اشتباه (راست) و بعد از اعمال روش رنسک برای شناسایی نقاط اشتباه (چپ)، (ب) استخراج نواحی پوشش دار، (ج) دو ارتوفتوی دوخته شده به یکدیگر، (د) نتیجه موزاییک سازی در یک نوار پروازی، (ه) ارتوفتوموزاییک بزرگ مقیاس از کل منطقه

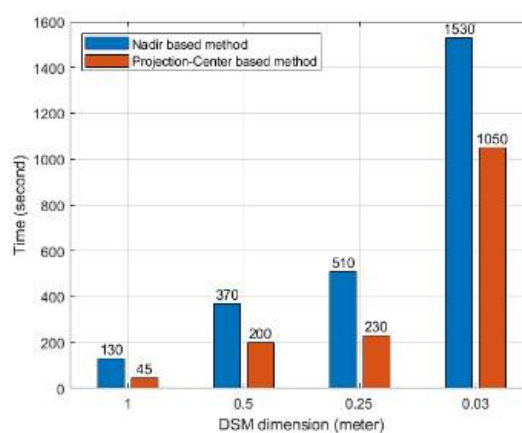
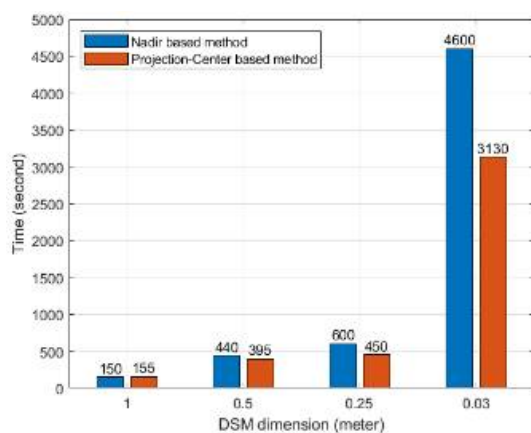


شکل ۱۳- ارتوفتوموزاییک تولیدشده از مجموعه داده دوم با استفاده از روش دوختن تصاویر

۴-۴- ارزیابی نتایج

مدت زمان کلی تولید ارتوفتوموزاییک با استفاده از دو روش پیشنهادی و همچنین روش بر مبنای دوختن تصاویر اندازه‌گیری و در جدول ۲ ذکر شده است. هر دو روش فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری زمان محاسباتی کمتری نسبت به روش مقایسه‌ای بر مبنای دوختن تصاویر داشته‌اند. در مقایسه با روش دوختن تصاویر، روش فاصله از نادیر به طور متوسط ۱۵٪ و روش فاصله از مرکز تصویربرداری به طور متوسط ۴۲٪ مدت زمان تولید

ارتوفتوموزاییک را کاهش داده است. این زمان‌ها برای DSM با قدرت تفکیک ۳ سانتی‌متری محاسبه شده است. نمودار ارائه شده در شکل ۱۴ رابطه قدرت تفکیک DSM با مدت زمان اجرای الگوریتم را نشان می‌دهد. به‌طوری که با کاهش قدرت تفکیک DSM زمان محاسباتی به شدت کاهش می‌یابد، اما از دقت ارتوفتو کاسته می‌شود. بنابراین، تنها در صورتی که یک موزاییک اولیه با دقت متوسط مورد نیاز است، کاهش قدرت تفکیک DSM پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۴- ارتباط قدرت تفکیک DSM با مدت زمان اجرای الگوریتم در مجموعه داده اول (راست) و مجموعه داده دوم (چپ)

برای ارزیابی و مقایسه بصری نتایج بدست آمده، نواحی از ارتوفتوموزاییک های تولید شده در مجموعه داده اول و دوم در شکل ۱۵ با بزرگنمایی بالا نشان داده شده است. دایره های قرمز رنگ در شکل ۱۵-الف اثر نگاشت دوگانه را بر روی ارتوفتوموزاییک نشان می دهند. در روش پیشنهادی با هر دو معیار فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری اثر نگاشت دوگانه کمتر می باشد.

جدول ۲- زمان کلی تولید ارتوفتوموزاییک با استفاده از روش پیشنهادی با معیارهای فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری و روش رایج بر اساس دوختن تصاویر

روش	مجموعه داده اول	مجموعه داده دوم
	زمان (ثانیه)	زمان (ثانیه)
دوختن تصاویر	۱۹۰۰	۵۱۴۰
پیشنهادی	فاصله از نادیر	۱۵۳۰
	فاصله از مرکز تصویربرداری	۱۰۵۰
		۳۱۳۰

روش پیشنهادی (هر دو معیار) با بهینه یابی پیکسل هایی را برای تولید موزاییک انتخاب می کند که زاویه تصویربرداری به حالت قائم نزدیک تر باشد. نواحی پنهان در حالت زاویه دید کوچکتر کمتر است و بنابراین اثر نگاشته دوگانه نیز کاهش می یابد. نمونه های دیگری از اثر نگاشته دوگانه در اطراف ساختمان در شکل ۱۵-ب و شکل ۱۵-پ نشان داده شده است. این اثر در روش بر اساس دوختن تصاویر بسیار چشمگیر است. به طوریکه شکل ساختمان در هر دو ناحیه را به طور کلی تغییر داده است. همچنین شکل ۱۵-ت اثر نگاشت دوگانه در اطراف اتوبوس را نشان می دهد که در روش پیشنهادی ایجاد نشده است اما در روش دوختن تصاویر ظاهر شده است (دایره قرمز رنگ). از آنجایی که روش های شناسایی ناحیه پنهان همواره با خطا روبرو هستند و قادر نیستند همه پیکسل های پنهان را شناسایی کنند [۶]، استفاده از روش پیشنهادی مزیت دارد.

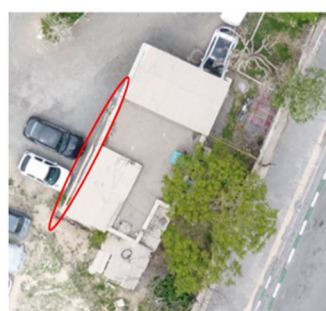
شکل های ۱۵-ث، ۱۵-ج و ۱۵-چ برای نشان دادن اختلافات هندسی روی لبه های برش ارائه شده اند. در شکل ۱۵-ث لبه ی برش از وسط خیابان عبور کرده است. هر دو معیار فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری توانسته اند پیوستگی عوارض را بر روی موزاییک تولید شده

حفظ کنند بطوریکه اختلافات هندسی روی لبه های برش بسیار ناچیز است. در روش مبتنی بر دوختن تصاویر اختلاف کمی بر روی لبه برش دیده می شود (دایره های قرمز رنگ). شکل ۱۵-ج نیز نمونه دیگری را مربوط به مجموعه داده اول نشان می دهد که پیوستگی جاده در لبه های برش در هر سه روش حفظ شده است. بر خلاف این دو ناحیه مسطحاتی (شکل ۱۵-ث و ۱۵-ج)، اختلافات هندسی در لبه های برش در مورد عارضه ارتفاعی ساختمان نشان داده شده در شکل ۱۵-د در روش مبتنی بر دوختن تصاویر مشهود است. اما در روش پیشنهادی با وجود اینکه لبه های برش از روی ساختمان عبور کرده اند، اما پیوستگی عوارض به خوبی حفظ شده است. شکل ۱۵-ب نیز نمونه دیگری از عبور لبه برش از وسط ساختمان در روش فاصله از مرکز تصویربرداری را نشان می دهد که همچنان پیوستگی روی لبه برش حفظ شده است.

برای ارزیابی کمی نتایج، تعدادی نقاط چک بر روی ارتوفتوموزاییک در نظر گرفته شده است. RMSE بین مختصات مشاهداتی نقاط چک (X_o, Y_o) و مختصات آن ها بر روی ارتوفتوموزاییک (X_c, Y_c) با استفاده از معادله ۵ محاسبه و در جدول ۳ و ۴ آورده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^c - X_i^o)^2 + (Y_i^c - Y_i^o)^2}{n}} \quad (5)$$

که n تعداد نقاط چک است. جدول های ۳ و ۴ نشان می دهند ارتوفتوموزاییک های بدست آمده از روش پیشنهادی در هر دو مجموعه داده با هر دو معیار دقت بالاتری نسبت به روش بر اساس دوختن تصاویر دارند. در مجموعه داده اول، بر حسب RMSE محاسبه شده، دقت روش فاصله از نادیر ۲.۴۶ سانتی متر و روش فاصله از مرکز تصویربرداری ۲.۵۵ سانتی متر بالاتر از روش مبتنی بر دوختن تصاویر می باشد. همچنین، هر دو معیار دقت های تقریباً یکسانی را نتیجه داده اند. در مجموعه داده دوم، RMSE محاسبه شده از روش فاصله از نادیر ۲.۳۴ سانتی متر و روش فاصله از مرکز تصویربرداری ۱.۴۵ سانتی متر کمتر از روش مبتنی بر دوختن تصاویر است. ضمن اینکه RSMSE روش فاصله از نادیر ۰.۸۹ سانتی متر از روش فاصله از مرکز تصویربرداری کمتر است.



(الف) ناحیه ۱



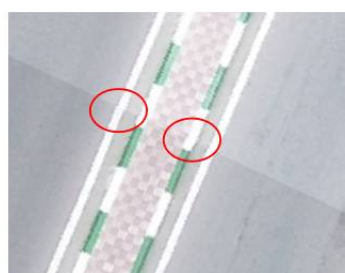
(ب) ناحیه ۲



(پ) ناحیه ۳



(ت) ناحیه ۴



(ث) ناحیه ۵

شکل ۱۵- مقایسه ارتوفتوهای تولیدشده با روش پیشنهادی بر مبنای معیارهای فاصله از نادیر (ستون راست) و فاصله از مرکز تصویربرداری (ستون وسط) و روش رایج بر مبنای دوختن تصاویر (ستون چپ) درهفت ناحیه الف-چ



(چ) ناحیه ۶



(چ) ناحیه ۷

ادامه شکل ۱۵- مقایسه ارتوفتوهای تولیدشده با روش پیشنهادی بر مبنای معیارهای فاصله از نادیر (ستون راست) و فاصله از مرکز تصویربرداری (ستون وسط) و روش رایج بر مبنای دوختن تصاویر (ستون چپ) درهفت ناحیه الف-چ

جدول ۳- ارزیابی هندسی ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده از مجموعه داده اول با استفاده از نقاط چک. همه اندازه‌گیری ها به متر می‌باشند.

روش فاصله از نادیر			روش فاصله از مرکز تصویربرداری			روش مبتنی بر دوختن تصاویر			روش
XY Error	Y Error	X Error	XY Error	Y Error	X Error	XY Error	Y Error	X Error	نقطه چک
۰.۰۹۲۷	۰.۰۳۶۴	۰.۰۸۵۳	۰.۰۷۹۰	-۰.۰۲۳۸	۰.۰۷۵۳	۰.۰۸۷۳	-۰.۰۲۹۴	۰.۰۸۲۳	۱
۰.۰۸۲۴	-۰.۰۱۷۴	۰.۰۸۰۵	۰.۰۶۸۰	۰.۰۶۴۱	-۰.۰۲۲۰	۰.۰۶۵۹	۰.۰۶۲۵	-۰.۰۲۰۹	۲
۰.۱۲۸۸	-۰.۰۵۰۶	۰.۱۱۸۵	۰.۰۳۷۹	-۰.۰۳۶۴	۰.۰۱۰۴	۰.۰۶۱۹	۰.۰۱۹۵	۰.۰۵۸۷	۳
۰.۰۲۵۶	۰.۰۲۲۳	۰.۰۱۰۵	۰.۴۱۸۰	-۰.۰۳۳۲	۰.۰۲۵۵	۰.۰۰۴۳	-۰.۰۰۳۶	۰.۰۰۲۴	۴
۰.۰۷۵۶	۰.۰۵۳۳	۰.۰۵۳۶	۰.۰۵۹۳	۰.۰۵۴۷	۰.۰۲۲۸	۰.۰۶۰۵	۰.۰۳۲۷	۰.۰۵۰۹	۵
۰.۱۳۴۷	۰.۰۰۶۰	۰.۱۳۴۶	۰.۰۹۹۸	۰.۰۹۷۰	۰.۰۲۳۵	۰.۰۹۶۱	۰.۰۹۳۸	۰.۰۲۰۷	۶
۰.۰۵۰۴	۰.۰۴۹۸	-۰.۰۰۷۴	۰.۰۴۰۶	۰.۰۳۷۴	۰.۰۱۵۹	۰.۰۳۶۹	۰.۰۱۴۵	۰.۰۳۳۹	۷
۰.۰۸۵۹	۰.۰۳۵۵	۰.۰۷۸۲	۰.۰۶۰۴	۰.۰۵۱۱	۰.۰۳۲۲	۰.۰۶۱۳	۰.۰۴۳۷	۰.۰۴۳۱	RMSE

جدول ۴- ارزیابی هندسی ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده از مجموعه داده دوم با استفاده از نقاط چک. همه اندازه‌گیری ها به متر می‌باشند.

روش فاصله از نادیر			روش فاصله از مرکز تصویربرداری			روش مبتنی بر دوختن تصاویر			روش
XY Error	Y Error	X Error	XY Error	Y Error	X Error	XY Error	Y Error	X Error	نقطه چک
۰.۰۶۹۷	-۰.۰۴۴۸	-۰.۰۵۳۴	۰.۰۸۶۷	-۰.۰۵۰۹	۰.۰۷۰۱	۰.۰۶۸۰	-۰.۰۳۵۸	-۰.۰۵۷۸	۱
۰.۱۲۹۲	۰.۱۱۶۸	-۰.۰۵۵۲	۰.۰۷۰۷	۰.۰۱۰۲	۰.۰۷۰۰	۰.۱۱۹۸	-۰.۱۰۳۹	-۰.۰۵۹۸	۲
۰.۰۹۲۵	۰.۰۵۵۳	-۰.۰۷۴۲	۰.۰۷۰۲	-۰.۰۴۴۷	-۰.۰۵۴۲	۰.۰۶۰۰	۰.۰۳۴۵	-۰.۰۴۹۰	۳
۰.۱۶۹۰	-۰.۱۵۵۳	-۰.۰۶۶۸	۰.۱۹۰۵	۰.۱۱۷۵	-۰.۱۵۰۰	۰.۱۵۲۳	۰.۱۰۶۲	-۰.۱۰۹۲	۴
۰.۱۹۶۸	۰.۱۰۸۲	۰.۱۶۴۴	۰.۱۵۰۰	۰.۰۸۲۶	۱۲۵۲.۰	۰.۱۳۵۷	۰.۰۸۴۷	۰.۱۰۶۱	۵
۰.۱۴۴۷	۰.۰۶۴۳	۰.۱۲۹۶	۰.۱۲۲۱	-۰.۰۵۰۴	۰.۱۱۱۲	۰.۰۶۰۲	۰.۰۰۴۱	۰.۰۶۰۰	۶
۰.۱۳۴۸	-۰.۰۶۳۷	۰.۱۱۸۸	۰.۱۵۶۱	۰.۱۲۰۰	۰.۰۹۹۹	۰.۱۷۵۱	۰.۱۷۴۹	-۰.۰۰۹۲	۷
۰.۱۶۷۵	-۰.۰۶۸۶	۰.۱۵۲۸	۰.۱۴۴۳	-۰.۱۱۷۱	-۰.۰۴۱۸	۰.۰۹۰۰	-۰.۰۶۴۶	-۰.۰۶۲۷	۸
۰.۱۳۸۷	۰.۰۹۷۶	-۰.۰۹۸۶	۰.۱۳۸۸	۰.۰۲۹۶	۰.۱۳۳۱	۰.۱۵۷۹	۰.۰۴۳۳	۰.۱۵۱۹	۹
۰.۱۵۱۶	۰.۰۹۸۱	۰.۱۱۵۶	۰.۱۳۷۱	۰.۰۸۴۸	۰.۱۰۷۷	۰.۱۲۸۲	۰.۰۹۲۴	۰.۰۸۸۹	RMSE

۵- نتیجه‌گیری

امروزه تولید ارتوفتوموزاییک‌های بزرگ مقیاس از تصاویر پهپادمبنا روزبه‌روز در حال گسترش است. در روش‌های رایج برای تولید ارتوفتوموزاییک ابتدا تصاویر یک‌به‌یک ترمیم می‌شوند. سپس ارتوفتوهای تولید شده، با استفاده از روش‌های انطباق تصویر نسبت به یکدیگر توجیه و نواحی پوششدار آن‌ها استخراج می‌گردد. در نهایت لبه‌های برش در نواحی پوششدار تعیین و ارتوفتوها به یکدیگر دوخته می‌شوند. چنین فرایندی در پروژه‌های پهپادمبنا با تعداد بسیار زیاد تصاویر که معمولاً پوشش‌های طولی و عرضی بالا دارند، می‌تواند زمانبر و پیچیده باشد. در این تحقیق روشی ساده اما سریع برای تولید ارتوفتوموزاییک حقیقی، بدون نیاز به به تولید تک ارتوفتوها و تعیین لبه‌های برش ارائه شد که در پروژه‌های پهپادمبنا مزیت دارد. در این روش با استفاده از بهینه‌یابی برای پرکردن پیکسل‌های ارتوفتوموزاییک از دو معیار فاصله از نادیر و فاصله از مرکز تصویربرداری استفاده شد. مزیت استفاده از معیار مرکز تصویربرداری عدم نیاز به محاسبات برای تعیین موقعیت نقطه نادیر است که به نقاط

سهبعدی زمینی با پراکندگی مناسب نیاز دارد. در مقایسه با روش رایج تولید ارتوفتوموزاییک بر اساس دوختن تصاویر، روش پیشنهادی بر اساس فاصله از مرکز تصویربرداری توانسته است سرعت تولید ارتوفتوموزاییک را به طور متوسط ۴۲٪ افزایش دهد.

ارزیابی هندسی نشان داد ارتوفتوموزاییک‌های تولید شده با هر دو معیار استفاده شده دقت بالاتری دارند. همچنین تفاوت زیادی نیز در دقت ارتوفتوی تولیدی با این دو معیار مشاهده نشد. علاوه بر این، استفاده از بهینه‌یابی با هر دو معیار به طور قابل توجهی موجب کاهش اثر نداشت دوگانه در ارتوفتوموزاییک شده‌است. همچنین، اختلافات هندسی در لبه‌های برش نیز بسیار کم دیده شد. در تحقیقات آتی معیارهای دیگری نیز نظیر زاویه دید و فاصله از نقطه اصلی می‌توانند در تولید موزاییک استفاده و نتایج مقایسه شوند. همچنین، برای ارزیابی بهتر و کامل‌تر روش ارائه‌شده، در تحقیقات آتی به پیاده‌سازی الگوریتم بر روی مجموعه‌داده با ویژگی‌های مختلفی نظیر ارتفاع پرواز پایین، تصاویر با ساختمان‌های بلند در مناطق با پستی‌ها و بلندهای زیاد خواهیم پرداخت.

مراجع

- [1] Liu, Y., Zheng, X., Ai, G., Zhang, Y., and Zuo, Y. (2018). "Generating a high-precision true digital orthophoto map based on UAV images." *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Vol. 7, No. 9, PP. 333.
- [2] Ludwig, M., M Runge, C., Friess, N., Koch, T. L., Richter, S., Seyfried, S., et al. (2020). "Quality assessment of photogrammetric methods-A workflow for reproducible UAS orthomosaics." *Remote Sensing*. Vol. 12, No. 22, PP. 3831.
- [3] Lin, Y.-C., Zhou, T., Wang, T., Crawford, M., and Habib, A. (2021). "New orthophoto generation strategies from UAV and ground remote sensing platforms for high-throughput phenotyping." *Remote Sensing*. Vol. 13, No. 5, PP. 860.
- [4] Shoab, M., Singh, V. K., and Ravibabu, M. (2021). "High-precise true digital orthoimage generation and accuracy assessment based on UAV images." *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. Vol. 50, No. 4, PP. 613-622.
- [5] Wang, Q., Yan, L., Sun, Y., Cui, X., Mortimer, H., and Li, Y. (2018). "True orthophoto generation using line segment matches." *The Photogrammetric Record*. Vol. 33, No. 161, PP. 113-130.
- [6] Gharibi, H., and Habib, A. (2018). "True orthophoto generation from aerial frame images and LiDAR data: An update." *Remote Sensing*. Vol. 10, No. 4, PP. 581.
- [7] Sheng, Y. (2007). "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.
- [8] Habib, A. F., Bang, K.-I., Kim, C., and Shin, S. (2006). "True Ortho-photo Generation from High Resolution Satellite Imagery." In *Innovations in 3D Geo Information Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [9] Nielsen, M.Ø. (2004). "True orthophoto generation." Master's Thesis, Technical university of denmark, Lyngby, Denmark.

- [10] Zhang, J., Xu, S., Zhao, Y., Sun, J., Xu, S., and Zhang, X. (2023). "Aerial orthoimage generation for UAV remote sensing." *Information Fusion*, Vol. 89, PP. 91-120.
- [11] Li, X., Feng, R., Guan, X., Shen, H., and Zhang, L. (2019). "Remote sensing image mosaicking: Achievements and challenges." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. Vol. 7, No. 4, PP. 8-22.
- [12] Pellikka, M., and Lahtinen, V. (2021). "A robust method for image stitching." *Pattern Analysis and Applications*. Vol. 24, No. 4, PP. 1847-1858.
- [13] Xu, Q., Chen, J., Luo, L., Gong, W., and Wang, Y. (2021). "UAV image stitching based on mesh-guided deformation and ground constraint." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. Vol. 14, PP. 4465-4475.
- [14] Zhao, Q., Ma, Y., Zhu, C., Yao, C., Feng, B., and Dai, F. (2021). "Image stitching via deep homography estimation." *Neurocomputing*, Vol. 450, PP. 219-229.
- [15] Zhu, H., Jiang, Y., Zhang, C. and Liu, S. (2022). "Research on Mosaic Method of UAV Low-altitude Remote Sensing Image based on SIFT and SURF." In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2203, No. 1, PP. 012027. IOP Publishing.
- [16] Goh, J., Phang, S., and Chew, W. (2021). "Real-time and automatic map stitching through aerial images from UAV." In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2120, No. 1, PP. 012025. IOP Publishing.
- [17] Yuan, Y., Fang, F., and Zhang, G. (2020). "Superpixel-based seamless image stitching for UAV images." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*. Vol. 59, No. 2, PP- 1565-1576.
- [18] Pham, N. T., Park, S., and Park, C.-S. (2021). "Fast and Efficient Method for Large-Scale Aerial Image Stitching." *IEEE Access*. Vol. 9, PP. 127852-127865.
- [19] Gómez-Reyes, J. K., Benítez-Rangel, J. P., Morales-Hernández, L. A., Resendiz-Ochoa, E., and Camarillo-Gomez, K. A. (2022). "Image Mosaicking Applied on UAVs Survey." *Applied Sciences*. Vol. 12, No. 5, PP. 2729.
- [20] Chen, Y., Briese, C., Karel, W., and Pfeifer, N. (2014). "True orthophoto generation using multi-view aerial images." *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 40, No. 3, PP. 67.
- [21] Chen, G., Chen, S., Li, X., Zhou, P., and Zhou, Z. (2018). "Optimal seamline detection for orthoimage mosaicking based on DSM and improved JPS algorithm." *Remote Sensing*. Vol. 10, No. 6, PP. 821.
- [22] Chen, J., Li, Z., Peng, C., Wang, Y., and Gong, W. (2022). "UAV Image Stitching Based on Optimal Seam and Half-Projective Warp." *Remote Sensing*. Vol. 14, No. 5, PP.1068.
- [23] Chon, J., Kim, H., and Lin, C.-S. (2010). "Seam-line determination for image mosaicking: A technique minimizing the maximum local mismatch and the global cost." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 65, No. 1, PP. 86-92.
- [24] Huang, C.-M., Lin, S.-W., and Chen, J.-H. (2015). "Efficient image stitching of continuous image sequence with image and seam selections.: *IEEE Sensors Journal*. Vol. 15, No. 10, PP. 5910-5918.
- [25] Laaroussi, S., Baataoui, A., Halli, A., and Khalid, S. (2018). "A dynamic mosaicking method based on histogram equalization for an improved seamline." *Procedia Computer Science*. Vol. 127, PP. 344-352.
- [26] Li, M., Li, D., Guo, B., Li, L., Wu, T., and Zhang, W. (2018). "Automatic seam-line detection in UAV remote sensing image mosaicking by use of graph cuts." *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Vol. 7, No. 9, PP. 361.
- [27] Manandhar, P., Jalil, A., AlHashmi, K., and Marpu, P. (2021). "Automatic Generation of Seamless Mosaics Using Invariant Features." *Remote Sensing*. Vol. 13, No. 16, PP. 3094.
- [28] Nguyen, T. L., Byun, Y., Han, D., and Huh, J. (2018). "Efficient seamline determination for UAV image mosaicking using edge detection." *Remote Sensing Letters*. Vol. 9, No. 8, PP. 763-769.
- [29] Qu, Z., Wang, T., An, S., and Liu, L. (2018). "Image seamless stitching and straightening based on the image block." *IET Image Processing*. Vol. 12, No. 8, PP. 1361-1369.

- [30] Tian, J., Li, X., Duan, F., Wang, J., and Ou, Y. (2016). "An efficient seam elimination method for UAV images based on wallis dodging and gaussian distance weight enhancement." *Sensors*. Vol. 16, No. 5, PP. 662.
- [31] Wang, M., Yuan, S., Pan, J., Fang, L., Zhou, Q., and Yang, G. (2016). "Seamline determination for high resolution orthoimage mosaicking using watershed segmentation." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 82, No. 2, PP. 121-133.
- [32] Xandri, R., Pérez-Aragüés, F., Palà, V., and Arbiol, R. (2005). "Automatic generation of seamless mosaics over extensive areas from high resolution imagery." *World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI)*. Jul 13, Orlando.
- [33] Yang, Y., Gao, Y., Li, H., and Han, Y. (2011). "An algorithm for remote sensing image mosaic based on valid area." *2011 International Symposium on Image and Data Fusion*. Aug 9.
- [34] Yuan, S., Yang, K., Li, X., and Cai, H. (2020). "Automatic Seamline Determination for Urban Image Mosaicking Based on Road Probability Map from the D-LinkNet Neural Network." *Sensors*. Vol. 20, No. 7, PP. 1832.
- [35] Hsu, S., Sawhney, H. S., and Kumar, R. (2002). "Automated mosaics via topology inference." *IEEE Computer Graphics and Applications*. Vol. 22, No. 02, PP. 44-54.
- [36] Li, L., Yao, J., Lu, X., Tu, J., and Shan, J. (2016). "Optimal seamline detection for multiple image mosaicking via graph cuts." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 113, PP. 1-16.
- [37] Li, L., Tu, J., Gong, Y., Yao, J., and Li, J. (2019). "Seamline network generation based on foreground segmentation for orthoimage mosaicking." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 148, PP. 41-53.
- [38] Pan, J., Wang, M., Li, D., and Li, J. (2009). "Automatic generation of seamline network using area Voronoi diagrams with overlap." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*. Vol. 47, No. 6, PP. 1737-1744.
- [39] Pan, J., Wang, M., Ma, D., Zhou, Q., and Li, J. (2013). "Seamline network refinement based on area Voronoi diagrams with overlap." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*. Vol. 52, No. 3, PP. 1658-1666.
- [40] Pan, J., Fang, Z., Chen, S., Ge, H., Hu, F., and Wang, M. (2018). "An improved seeded region growing-based seamline network generation method." *Remote Sensing*. Vol. 10, No. 7, PP. 1065.
- [41] de Oliveira, H. C., Dal Poz, A. P., Galo, M., and Habib, A. F. (2018). "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, No. 2, PP. 443-457.
- [42] Hu, Y., Stanley, D., and Xin, Y. (2016). "True ortho generation of urban area using high resolution aerial photos." *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* 3, No. 4. May.
- [43] Boccoardo, P., Dequal, S., Lingua, A., and Rinaudo, F. (2001). "True digital orthophoto for architectural and archaeological applications." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 34, No. 5/W1, PP. 50-55.
- [44] Balletti, C., Guerra, F., Lingua, A., and Rinaudo, F. (2003). "True Digital Orthophoto of The San Marco Basilica. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*." Vol. 34, No. 5, PP. W12.
- [45] Biasion, A., Dequal, S., and Lingua, A. (2004). "A new procedure for the automatic production of true orthophotos." *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 35, PP. 1682-1777.
- [46] Hanusch, T. (2010). "Texture mapping and true orthophoto generation of 3D objects." PhD thesis. ETH Zurich.
- [47] Zhang, Y., Zhang, M., Du, S., Zou, Z., and Fan, C. (2018). "Seamline optimisation for urban aerial ortho-image mosaicking using graph cuts." *The Photogrammetric Record*. Vol. 33, No. 161, PP. 131-147.
- [48] Zhou, G., Wang, Y., Yue, T., Ye, S., and Wang, W. (2016). "Building occlusion detection from ghost images." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*. Vol. 55, No. 2, PP. 1074-1084.
- [49] Habib, A. F., Kim, E.-M., and Kim, C.-J. (2007). "New methodologies for true orthophoto generation." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 73, No. 1, PP. 25-36.
- [50] Bang, K., Habib, A. F., Shin, S., and Kim, K. (2007). "Comparative analysis of alternative methodologies for true ortho-photo generation from high resolution satellite imagery." *ASPRS annual*. May 7.

- [51] Barazzetti, L., Brumana, R., Oreni, D., Previtali, M., and Roncoroni, F. (2014). "True-orthophoto generation from UAV images: implementation of a combined photogrammetric and computer vision approach." *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* 2, No. 5. May 28.
- [52] Schickier, W., and Thorpe, A. (1998). "Operational procedure for automatic true orthophoto generation." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 32, PP. 527-532.
- [53] Amhar, F., Jansa, J., and Ries, C. (1998). "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.
- [54] Ettarid, M., M'h, A. A., and Aloui, R. (2005). "Digital true orthophotos generation." *Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8 Cairo*, April 16-21, Egypt.
- [55] Haggag, M., Zahran, M., and Salah, M. (2018). "Towards automated generation of true orthoimages for urban areas." *American Journal of Geographic Information System*, Vol. 7, No. 2, PP. 67-74.
- [56] de Oliveira, H. C., Galo, M., and Dal Poz, A. P. (2015). "Height-gradient-based method for occlusion detection in true orthophoto generation." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. Vol. 12, No. 11, PP. 2222-2226.
- [57] Dostal, C., and Yamafune, K. (2018). "Photogrammetric texture mapping: A method for increasing the Fidelity of 3D models of cultural heritage materials." *Journal of Archaeological Science: Reports* 18. PP. 430-436.
- [58] Hu, S., Li, Z., Wang, S., Ai, M., and Hu, Q. (2020). "A texture selection approach for cultural artifact 3D reconstruction considering both geometry and radiation quality." *Remote Sensing*. Vol. 12, No. 16, PP. 2521.
- [59] Ebrahimikia, M., and Hosseinaveh, A. (2022). "True Orthophoto Generation Based on Unmanned Aerial Vehicle Images Using Reconstructed Edge Points." *The Photogrammetric Record*.
- [60] Zheng, M., Zhou, S., Xiong, X., and Zhu, J. (2017). "A novel orthoimage mosaic method using the weighted A* algorithm for UAV imagery." *Computers & Geosciences*, Vol. 109, PP. 238-246.
- [61] Zheng, M., Xiong, X., and Zhu, J. (2017). "Automatic seam-line determination for orthoimage mosaics using edge-tracking based on a DSM." *Remote Sensing Letters*. Vol. 8, No.10, No. 977-986.
- [62] Ma, H.-c., and Sun, J. (2011). "Intelligent optimization of seam-line finding for orthophoto mosaicking with LiDAR point clouds." *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*. Vol. 12, No. 5, PP. 417-429.