نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال نهم، شماره نخست، بهار ۱۴۰۰

Vol.9, No.1, Spring 2021

۱۰۵ -۱۲٤

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3

شبیه‌سازی و تحلیل اثرات پوشش‌های طولی و عرضی تصویر بر کیفیت بازسازی سه-بعدی در فتوگرامتری پهپاد و تعیین مقدار بهینه پوشش‌های فوق

علی عرفان‌زاده[1*]، محمد سعادت سرشت[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار گروه فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸

چکیده

انتخاب پوشش طولی و عرضی مؤثر و بهینه با توجه به کیفیت، سرعت، هزینه و هدف هر عملیات فتوگرامتری پهپاد، به‌عنوان یک پارامتر مهم تلقی می‌شود. تا به امروز تحقیقات متعددی به‌صورت عملیات اجرایی سعی و خطا برای این منظور انجام پذیرفته است اما این‌روش‌ها به دلیل هزینه بالا وزمانبر بودن، هنوز نتوانسته‌اند رفتارسنجی کاملی از تأثیر پارامترهای پوشش طولی و عرضی در کیفیت بازسازی سه‌بعدی را به دست دهند. در این مقاله با توجه به محدودیت‌های زمان و هزینه، یک روش شبیه‌سازی برای بررسی جامع رفتارسنجی تأثیر پوشش طولی و عرضی تصاویر در کیفیت بازسازی سه‌بعدی در فتوگرامتری پهپاد مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، با توجه به پیچیدگی موضوع و برای ساده‌سازی آن، مسأله بازسازی سه‌بعدی یک نقطه فرضی از مشاهدات تصویری با پوشش‌های مختلف توسط شبیه‌سازی تحلیلی مونت-کارلو مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده در پنج حالت ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد، نشان می‌دهد تغییر پوشش‌های طولی و عرضی میتواند خطای مسطحاتی را تا ۱۰ برابر و خطای کامل بازسازی سه‌بعدی را تا ۵ برابر بهبود دهد. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت که برای دستیابی به کیفیت بالاتر بازسازی سه‌بعدی، وقتی مجموع پوشش طولی و عرضی بیشتر از ۱۲۰٪ باشد، بهتر است اختلاف پوشش‌ها افزایش یابد و وقتی کمتر از ۱۲۰٪ است، بهتر است اختلاف پوشش‌ها کاهش یابد. به‌علاوه اگر لازم است یکی از پوشش‌ها زیر ۵۰ درصد انتخاب شود پوشش دیگر بین ۸۵ تا ۹۵ درصد در نظر گرفته شود یا هر دو پوشش بالای ۵۰ درصد انتخاب شوند تا کیفیت بازسازی سه‌بعدی از دست نرود. در این تحقیق برای اولین بار فرایند جدیدی در چهار گام بر مبنای الگوریتم جبهه پرتو به منظور شناسایی و انتخاب پوششهای تصویری بهینه معرفی گردید.

کلید واژه‌ها : پوشش طولی و عرضی تصویر، بازسازی سه‌بعدی، فتوگرامتری پهپاد، شبیه‌سازی مونت‌کارلو.

[*] نویسنده مکاتبه کننده: ایران، تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی

تلفن: ۸۸۰۰۸۸۳۷-۰۲۱

Email: ali.erfanzadeh@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]

[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

۱- مقدمه

توسعه امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری سامانه‌های فتوگرامتری پهپاد در یک دهه اخیر، همچنین سرعت و کیفیت بالا، هزینه کمتر و تنوع در خروجی‌های آن از همه مهم‌تر دسترسی و انعطاف بالا برای اهداف تهیه نقشه و محصولات مکانی باعث شده تا از آن به‌عنوان یک سیستم مؤثر برای جمع‌آوری اطلاعات مکانی به‌طور گسترده مورد استقبال و استفاده قرار گیرد[۶].

به‌طورکلی قبل از انجام هرگونه عملیات میدانی در فتوگرامتری پهپاد، موضوع طراحی شبکه با توجه به کیفیت تصویری و هندسی موردنیاز، منابع مالی موجود، اهداف اصلی و فرعی پروژه، امکانات فنی قابل دسترس، شرایط محیطی و محدودیت‌های ایمنی و امنیتی، برای دستیابی به یک خروجی بهینه از اهمیت بالایی برخوردار است. در این رابطه، علاوه بر مشخصات سنجنده تصویربرداری مورد استفاده و ارتفاع پرواز، پوشش طولی و عرضی تصویربرداری به عنوان یکی از پارامترهای اساسی در طراحی شبکه فتوگرامتری پهپاد مطرح می‌باشد که تأثیر مستقیمی بر کیفیت بازسازی سه‌بعدی و هزینه‌ی عملیات میدانی دارد. برای تعیین مقادیر بهینه پوشش‌های طولی و عرضی تصویربرداری، آگاهی کامل از رفتار و تأثیر این پارامترها بر کیفیت بازسازی سه‌بعدی و هزینه‌های عملیات میدانی و دفتری در شرایط مختلف محیطی و توپوگرافی الزامی است. برای این منظور تاکنون محققان به برداشت داده با دوربین‌های متنوع، در ارتفاع‌های پرواز متفاوت و با پوشش‌های تصویربرداری مختلفی به روش سعی و خطا اقدام نموده‌اند. اگرچه این روش قابلیت درنظرگرفتن کلیه عوامل مؤثر در نتایج را دارد، اما به دلیل زمان و هزینه بسیار بالای آن، هنوز نتوانسته است یک رفتارسنجی جامعی از تأثیر پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصویربرداری بر بازسازی سه‌بعدی را به دست دهد. در واقع در این تحقیقات، مثال‌های عملی محدودی با مقادیر گسسته از پارامترها نسبت به هم و در شرایط محیطی متنوع از مسأله، مورد بررسی قرارگرفته‌اند و نگرش جامع و قابل اطمینانی از تحلیل مسأله را بازگو نمی‌کنند. علاوه‌براین دستورالعمل‌های استاندارد فتوگرامتری پهپاد بر اساس این تحقیقات و به‌صورت تجربی، بطور کلی پوشش طولی و عرضی تصویری بین ۶۰ تا ۸۰ درصد را پیشنهاد داده‌اند که تعیین بهینه آن برای کاربران در پروژه‌های اجرایی مختلف با ابهام همراه است.

در این تحقیق سعی بر آن است تا با استفاده از یک روش مبتنی بر شبیه‌سازی، به رفتارسنجی پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصویربرداری و تأثیر آن بر کیفیت بازسازی سه‌بعدی و هزینه‌ها پرداخته و تحلیل جامعی از رفتار این پارامترها به دست دهیم. برای این منظور کلیه تحلیل‌های شبیه‌سازی روی یک نقطه زمینی فرضی با مختصات سه‌بعدی معلوم صورت گرفته است. از این نقطه فرضی، تصویربرداری با پوشش‌های طولی و عرضی مختلف صورت گرفته، مختصات عکسی محاسبه شده و بازسازی سه‌بعدی آن به روش تقاطع فضایی انجام پذیرفته است. در طول فرآیند تصویربرداری و بازسازی سه‌بعدی، سعی شده است خطاها و ناپایداری‌های اتفاقی موجود در کلیه پارامترها از طریق تابع توزیع آماری گوسین شبیه‌سازی شود. علت به‌کارگیری تابع توزیع گوسین، مفاهیم مطرح در تئوری اندازه‌گیری در مهندسی نقشه‌برداری و قضیه حد مرکزی در علم آمار بوده است. برای حفظ جامعیت تحلیل و حصول اطمینان بیشتر به نتایج در شرایط محیطی مختلف، آزمون‌ها در پنج حالت به ترتیب با شرایط ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد انجام شده است. همچنین از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای بررسی کیفیت بازسازی سه‌بعدی نقطه زمینی استفاده شده که جزئیات آن در مقاله آمده است. در این مقاله، ابتدا در بخش دوم به پیشینه تحقیقات انجام شده و نقد و بررسی آن‌ها پرداخته شده، سپس جزئیات روش شبیه‌سازی تحلیلی مونت‌کارلو برای بازسازی سه‌بعدی با مشاهدات فتوگرامتری در بخش سوم تشریح می‌شود. در ادامه، در بخش چهارم آزمون‌های بررسی تأثیر

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

پوشش طولی و عرضی بر صحت بازسازی سه‌بعدی و نتایج آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها (بخش پنجم) تحلیلی بر نتایج حاصل از آزمونها ارائه می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

اولین استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین برای اهداف فتوگرامتری، به سال ۱۹۷۹ برمی‌گردد که توسط یک پرنده بال ثابت انجام شده است[۴]. در ادامه، با توجه به ظهور دوربین‌های رقومی، قابلیت دسترسی و انعطاف-پذیری بالای این سیستم‌ها و مهم‌تر از همه هزینه کمتر در به‌کارگیری آن‌ها به‌عنوان جایگزینی برای فتوگرامتری هوایی کلاسیک، علی‌رغم غیرمتریک بودن دوربین‌های به‌کاررفته در آن‌ها، مورد استقبال زیاد کاربران قرار گرفته است[۵]. به‌طورکلی، کیفیت خروجی در هر عملیات فتوگرامتری پهپاد به تنظیم پارامترهای طراحی شبکه وابسته است که شامل پارامترهای مختلفی از جمله نوع و مشخصات سنجنده و عدسی، نوع و مشخصات پرنده، کیفیت و هندسه تصویربرداری، الگوریتم نرم‌افزار پردازش تصویر، تعداد و پراکندگی نقاط کنترل زمینی و مشاهدات کمکی می-باشد. در این بین، پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصاویر نقش کلیدی در هر عملیات فتوگرامتری پهپاد با توجه به زمان، هزینه و کیفیت بازسازی سه‌بعدی دارد.

تا به امروز تحقیقات متعددی به‌صورت عملیات اجرایی سعی و خطا برای تحلیل آن انجام پذیرفته است. از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعه راچینسکی و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد که در آن تأثیر پوشش طولی و عرضی به ترتیب (۶۰ و ۷۰)، (۷۰ و ۸۰)، (۸۰ و ۹۰) را بر روی کیفیت هندسی مدل سه‌بعدی سطح مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد با افزایش پوشش‌های طولی و عرضی مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*[۱]) محاسبه‌شده برای نقاط کنترل کاهش یافته و برای نقاط چک رفتاری تصادفی داشته است[۱۵]. در مطالعه‌ی دیگری سنکال و همکاران (۲۰۲۱) کیفیت مدل سه‌بعدی سطح حاصل از فتوگرامتری پهپاد برای دو حالت پوشش‌های طولی و عرضی (۶۰ و ۷۰) و (۷۰ و ۸۵) را در ارتفاع‌های ۱۳۰ و ۱۹۰متر به کمک ابر نقطه لیزر اسکنر و نقشه دوبعدی منطقه مورد مطالعه قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد به‌طورکلی افزایش پوشش تصویری باعث افزایش دقت بازسازی سه‌بعدی شده است. همچنین نشان داده شده است که اختلاف ارتفاع نقاط کنترل تأثیر کمتری نسبت به پارامترهای ارتفاع پرواز و پوشش‌های تصویربرداری بر روی دقت مدل سه‌بعدی سطح دارند[۳]. دولورس و گارسیا (۲۰۱۶) تحقیقی مبتنی بر تأثیر پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصاویر، ارتفاع پرواز و نقاط کنترل هوایی را بر روی کیفیت هندسی ارتوفتو با استفاده از ۱۵۰ نقطه چک انجام داده است. در این تحقیق پرواز برای پوشش‌های طولی و عرضی به ترتیب (۵۰ و ۸۰) و (۴۰ و ۷۰) و ارتفاع پرواز ۳۰ تا ۸۰ متر با گام ۱۰ متر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد خطای مسطحاتی با شیب ۰/۰۳ در ارتفاع پرواز افزایش می‌یابد. در مورد پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصویری نتایج نشان می‌دهند افزایش پوشش منجر به افزایش دقت بازسازی سه‌بعدی شده که این افزایش دقت در ارتفاع‌های پرواز پایین قابل توجه است[۱۱]. علاوه بر این رومبائو و همکاران (۲۰۱۶) تحقیقی انجام داده‌اند که در آن تأثیر پارامترهای ارتفاع پرواز و پوشش طولی و عرضی تصاویر روی کیفیت هندسی ارتوفتو مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای پارامترهای ارتفاع به ترتیب مقادیر ۳۰ تا ۹۰ متر با گام ۱۰ متر و پوشش طولی و عرضی تصویری (۴۰ و ۷۰) و (۳۰ و ۶۰) درصد در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این تحقیق با محاسبه *RMSE* برای ۱۵۰ نقطه چک از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد همیشه افزایش ارتفاع پرواز بیشتر منجر به مقادیر *RMSE* بالاتر نمی‌شود. علاوه بر این، افزایش پوشش‌ها باعث افزایش دقت، استحکام و اعتمادپذیری

[۱] *Root mean squar error*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

در نتایج می‌شود[۸]. لیتائو و همکاران در سال ۲۰۱۶ میزان تأثیر پارامترهای ارتفاع پرواز، پوشش‌های طولی و عرضی، زاویه تیلت عکس‌برداری و شرایط آب و هوایی را بر روی کیفیت هندسی مدل ارتفاعی زمین مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد پوشش تصویربرداری بعد از پارامتر ارتفاع پرواز بیشترین تأثیر را بر روی کیفیت مدل ارتفاعی داشته است و مدل ارتفاعی حاصل از شرایط آب و هوایی ابری کیفیت بهتری نسبت به شرایط آفتابی دارد[۱۰]. همچنین باری و کوکلی (۲۰۱۵) نشان داده‌اند با رعایت پوشش طولی و عرضی ۸۰*۸۰ درصد و فاصله نمونه‌برداری زمینی ۱ سانتی‌متر، کسب دقت بالای مسطحاتی و ارتفاعی به ترتیب ۴۱ و ۶۱ میلی‌متر امکان‌پذیر می‌باشد[۱۴]. رومبائو و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیق خود، کیفیت هندسی ارتوفتو را با توجه به پارامترهای ارتفاع پرواز، حالات پرواز پرنده ایستاده[۱] و متحرک[۲] در ایستگاه‌های عکس‌برداری، و لحاظ پوشش اضافی منطقه پرواز شامل ۱۰ درصد ابعاد منطقه، مورد ارزیابی قرار داد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند هنگام پرواز با ۱۰ درصد پوشش اضافی از منطقه مورد مطالعه، دقت ارتوفتو در حدود ۳ سانتی‌متر افزایش می‌یابد[۹]. شهبازی و همکاران (۲۰۱۵)، تأثیر پارامترهای پوشش تصویربرداری، قرائت عکسی به روش شناسایی تارگت‌ها به‌صورت اتوماتیک و دستی در تصاویر، طراحی نقاط کنترل با توجه به توپوگرافی و قابلیت دید، و کیفیت رادیومتریکی تصاویر را بر روی کیفیت هندسی مدل سه‌بعدی سطح با استفاده از یک ابر نقطه متراکم لیزر اسکنر از منطقه مورد بررسی قرار داده است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داده است افزایش پوشش تصویری باعث افزایش دقت بازسازی سه‌بعدی می‌شود[۱۲]. در تحقیقی دیگر که توسط کرایدرمن و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده است نشان می‌دهد برای پارامترهای ارتفاع پرواز ۱۱۸ متر و پوشش‌های طولی و عرضی ۷۵ و ۷۵ درصد، کیفیت مدل سه‌بعدی خیلی نزدیک به کیفیت آن در تعیین موقعیت به روش کینماتیک آنی (*RTK*)[۳] بوده است[۱]. در مطالعه دیگری ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) کیفیت محصولات فتوگرامتری پهپاد را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. این تحقیق نشان می‌دهد با رعایت پوشش‌های طولی و عرضی به ترتیب ۸۰ و ۵۰ درصد و ابعاد پیکسل زمینی ۵ سانتی‌متر، همچنین نسبت باز هوایی به ارتفاع پرواز ۰/۴ در برجسته‌بینی می‌توان به دقتی مناسب برای تهیه نقشه ۱/۵۰۰ دست یافت[۱۸]. در ادامه، هاربرینک و همکاران (۲۰۰۸) کیفیت مدل سه‌بعدی سطح حاصل از تصاویر فتوگرامتری پهپاد را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق برای پوشش‌های طولی و عرضی به‌ترتیب ۶۰ و۳۰ و ارتفاع پرواز ۱۰۰ متری، به‌صورت غیرقابل انتظاری، دقت مسطحاتی و ارتفاعی را به‌ترتیب ۲ و ۴ سانتی‌متر نشان می‌دهد[۷]. با توجه به تحقیقات انجام شده، اگرچه در زمینه تأثیر و تحلیل پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصاویر نسبت به کیفیت بازسازی سه‌بعدی به روش فتوگرامتری پهپاد بررسی‌های کلی و سودمندی انجام پذیرفته است اما این تحقیقات عمدتاً به حالات بسیار خاصی از پارامترهای پوشش طولی و عرضی محدود شده است. همچنین به رابطه مشخصی بین میزان دقت بازسازی سه‌بعدی و مقادیر پوشش‌های طولی و عرضی اشاره نشده است. علاوه بر این، در تحلیل‌های صورت گرفته در این تحقیقات، میزان اثرگذاری پارامترهای محیطی و دوربین روی رابطه پارامترهای پوشش تصویری و کیفیت بازسازی سه‌بعدی بررسی نشده است. بنابراین این تحقیقات در عین سودمندی برای شناخت فتوگرامتری پهپاد، برای تحلیل دقیق رفتار-

[۱] *Stop*

[۲] *Cruising*

[۳] *Real Time Kinematic*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

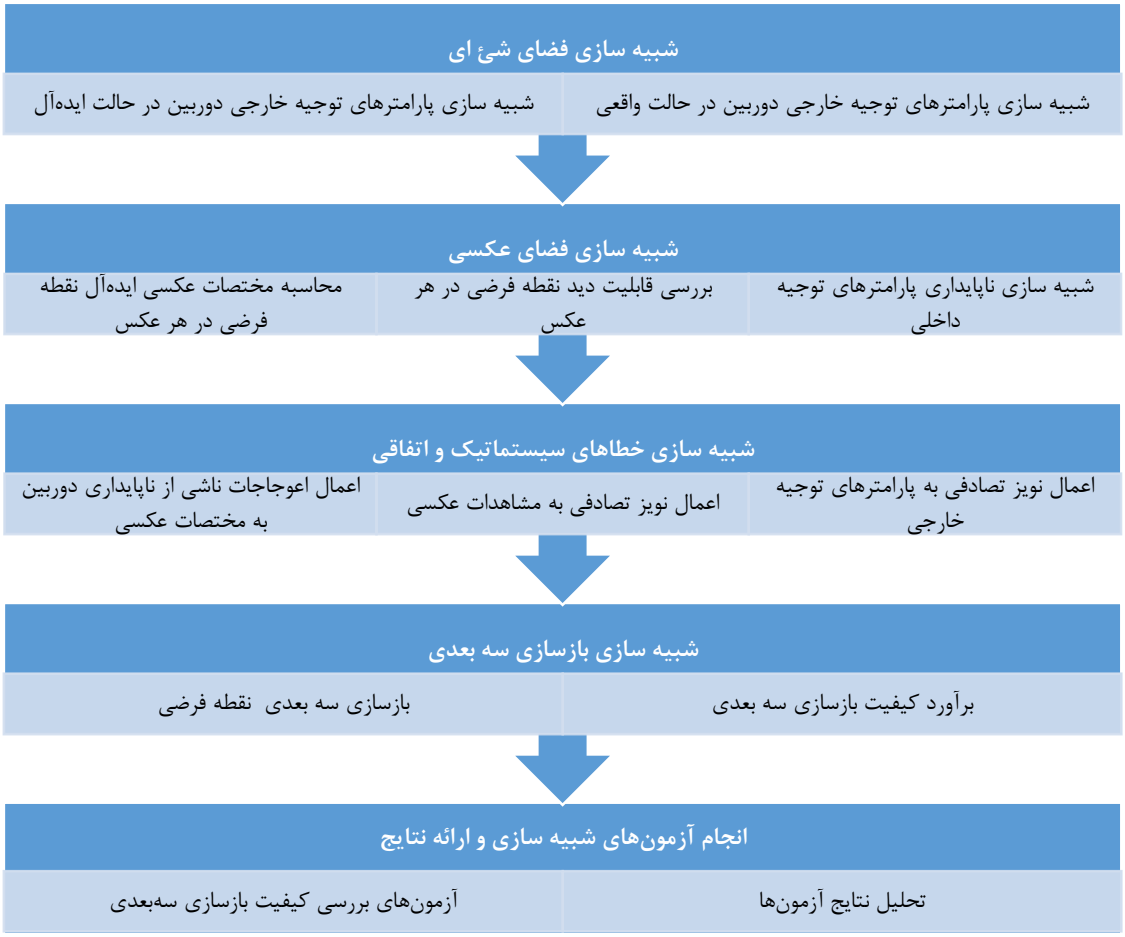
سنجی تأثیر پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصاویر بر بازسازی سه‌بعدی، کامل و جامع نبوده است. همچنین لازمه انتخاب پوشش تصویری بهینه، آگاهی از این رفتارسنجی در کنار لحاظ هزینه و زمان پرواز و پردازش می‌باشد. بنابراین درصورتی‌که بتوان رفتار فوق را شفاف‌سازی نمود، آنگاه نتایج این تحقیق می‌تواند یک دستورالعمل و راه‌حل بهینه پیش‌روی کاربران با توجه به شرایط محیطی مختلف قرار دهد. در یک جمله، این تحقیق تلاشی اولیه برای دستیابی به این مهم با ساده‌سازی مسأله و به‌کارگیری اصول انتشار خطا در موضوع بازسازی سه‌بعدی فتوگرامتری پهپاد می‌باشد.

۳- شبیه‌سازی تحلیلی مونت‌کارلو در بازسازی سه‌بعدی به روش فتوگرامتری پهپاد

همان‌طور که پیش‌تر مطرح گردید روش پیشنهادی با توجه به سرعت بالا، هزینه کمتر و جامعیت نتایج شبیه‌سازی نسبت به عملیات میدانی، برای تحلیل تأثیر پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصویری روی کیفیت بازسازی سه‌بعدی به روش فتوگرامتری پهپاد انتخاب شده است. برای انجام شبیه‌سازی بازسازی سه-بعدی فتوگرامتری، از اصول انتشار خطا در نقشه‌برداری در قالب روش مونت‌کارلو استفاده شده است.

روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک طبقه از الگوریتم‌های محاسبه‌گر می‌باشند که برای محاسبه نتایج خود بر نمونه‌گیری‌های تکرارشونده تصادفی اتکا کرده و با پیمایش، تمام فضای مسأله جواب را می‌یابند[۲]. این روش شبیه‌سازی به دلیل اتکا بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی، اغلب به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که تکرارهای زیادی از آن توسط رایانه قابل اجرا باشد[۱۶]. معمولاً گرایش به استفاده از روش مونت‌کارلو زمانی بیشتر می‌شود که محاسبه پاسخ دقیق با کمک الگوریتم‌های قطعی ناممکن یا ناموجه باشد[۲۰]. مهم‌تر از همه روش مونت‌کارلو برای شبیه‌سازی و تحلیل پدیده‌هایی که عدم قطعیت زیادی در ورودی‌های آن‌ها وجود دارد بسیار مفید است[۱۳و۱۷]. در این تحقیق و با توجه به رفتار اتفاقی، ناپایداری و عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای کالیبراسیون، خطاهای مشاهدات عکسی، خطاهای مثلث‌بندی هوایی، و پارامترهای ناوبری پرواز، روش مونت‌کارلو در تحلیل انتشار خطاها مورد استفاده قرار گرفته است. برای ساده‌سازی مسأله و کاهش محاسبات تکراری که ذات روش مونت‌کارلو است، مسأله بازسازی سه‌بعدی برای فقط یک نقطه فرضی مورد بررسی قرار گرفته است. برای یک نقطه فرضی با مختصات سه‌بعدی معلوم، دوربین با مشخصات معلوم در ارتفاع پرواز معلوم قرار گرفته و با پوشش تصویری معلوم از نقطه فرضی فوق، تصویربرداری کرده و مشاهدات تصویری محاسبه می‌شود. کاربر همچنین میزان خطاهای اتفاقی و سطح ناپایداری در پارامترهای مختلف توجیه داخلی، توجیه خارجی و مشاهدات عکسی را تعیین می‌کند. سپس در یک فرآیند تقاطع فضایی، پرتوهای شبیه‌سازی شده در فضای سه‌بعدی یکدیگر را قطع کرده و نقطه فوق بازسازی سه‌بعدی می‌شود. این بازسازی سه‌بعدی نقطه به دفعات در یک فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شده و خطاهای بازسازی محاسبه شده و متوسط آن‌ها با استفاده از شاخص $RMSE$ برآورد می‌شود. این خطای متوسط، برای حالات مختلف پارامترهای طراحی شبکه محاسبه می‌گردد. از آنجایی‌که برای انجام شبیه‌سازی به روش مونت‌کارلو لازم است تا تابع توزیع خطای پارامترهای اتفاقی مشخص گردد، به دلیل مشخص نبودن رفتار آماری پارامترهای اتفاقی در فتوگرامتری پهپاد و با توجه به قضیه حد مرکزی در علم آمار از تابع توزیع گوسین به‌عنوان تابع توزیع خطاهای اتفاقی و ناپایداری‌ها در این تحقیق استفاده شده و آزمون‌ها انجام پذیرفته است. به‌طورکلی فلوچارت شبیه‌سازی بازسازی سه‌بعدی در فتوگرامتری پهپاد را می‌توان در پنج بخش مطابق شکل(۱) تقسیم کرد که در این تحقیق بر مبنای آن تحلیل و رفتارسنجی پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصاویر نسبت به کیفیت بازسازی سه‌بعدی انجام شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]



شکل ۱: دیاگرام شبیه‌سازی بازسازی سه‌بعدی در فتوگرامتری پهپاد

در ادامه هر یک از موارد دیاگرام شکل (۱) توضیح داده می‌شود.

۳-۱- شبیه‌سازی پارامترهای توجیه خارجی دوربین در حالت ایده‌آل

یک نقطه فرضی سه‌بعدی با مختصات $X=[0\ 0\ 0]$ را در نظر بگیرید. فرض کنید پرنده فرضی در محوطه بالای این نقطه در ارتفاع h_0 در نوارهای متعدد با پوشش طولی p_x و عرضی p_y مشخص ($0<p_x,p_y<1$) در راستای محور xy پرواز عکس‌برداری قائم انجام می‌دهد بر این اساس پارامترهای توجیه خارجی EOP[1] برای هر ایستگاه تصویربرداری در شرایط ایده‌آل به دست می‌آید. ارتفاع پرواز اولیه h_0 را طوری در نظر می‌گیریم که بر اساس استاندارد ابعاد پیکسل زمینی GSD[2] موردنیاز نقشه درخواستی تأمین شود. طبق استاندارد برای نقشه ۱:۲۰۰۰-۱:۱۰۰۰-۱:۵۰۰ مقدار GSD_0 را برابر ۴-۸-۱۶ سانتیمتر در نظر می‌گیرند. ازاین‌رو،ارتفاع پرواز بر اساس رابطه (۱) به دست می‌آید که در آن ps ابعاد پیکسل سنجنده و c_0 فاصله اصلی اولیه می‌باشد. بعداً با تغییر ضریب ارتفاع پرواز ($0.5<k_h<2$) می‌توان ارتفاع پرواز را مطابق رابطه (۲) تغییر داد.

$$h_0 = \frac{GSD_0.c_0}{ps} \quad \text{رابطه(۱)}$$

[1] *Exterior Orientation Parameters*

[2] *Ground Sampling Distance*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

$$h = k_h * h_0$$ رابطه(۲)

۳-۲- شبیه‌سازی پارامترهای توجیه خارجی دوربین در حالت واقعی

در فتوگرامتری پهپاد به‌واسطه سبک بودن پرنده و تأثیر شرایط آب و هوایی بر آن همچنین خطاهای ناوبری، پارامترهای توجیه خارجی در حالت واقعی EOP' در لحظه اخذ هر تصویر دارای اختلاف موقعیت و وضعیت نسبت به شرایط ایده‌آل یا طراحی شده EOP می‌باشند. ازاین‌رو برای شبیه‌سازی ناپایداری پرنده و ناوبری آن، یک سطح از خطاهای اتفاقی با انحراف معیار مشخص به پارامترهای توجیه خارجی هر عکس اعمال می‌گردد. مطابق رابطه (۳) انحراف معیار موقعیت و وضعیت ایستگاه‌های عکس‌برداری برابر با S_p و S_a در نظر گرفته شده است. اگرچه می‌توان انحراف معیار موقعیت XYZ یا وضعیت wpk را برای سه جهت سه مقدار متفاوت در نظر گرفت اما این امر موجب پیچیدگی شبیه‌سازی می‌شود و از آن اجتناب شده است.

$$EOP' = EOP + dEOP$$ رابطه(۳)

و

$$dEOP = [N(0.S_p)\ for\ XYZ\ \&\ N(0.S_a) for\ wpk$$

در رابطه(۳)، $N(0,S)$ یک مقدار اتفاقی از تابع توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار S می‌باشد.

۳-۳- محاسبه مختصات عکسی ایده‌آل نقطه فرضی در هر عکس

پس از محاسبه پارامترهای توجیه خارجی هر عکس EOP_i' می‌توان مختصات سه‌بعدی نقطه فرضی $X=[0,0,0]$ را در سیستم مختصات هر دوربین از رابطه(۴) به دست آورد که در آن T_i مختصات مرکز تصویر و R_i ماتریس دوران ایستگاه تصویربرداری iام می‌باشد. سپس با شرط هم خطی می‌توان مختصات عکسی ایده‌آل مربوط به نقطه فرضی را طبق رابطه(۵) در هر عکس به دست آورد،که در آن $X_i'=[X_i', Y_i', Z_i']$ مجهول و c فاصله اصلی عدسی دوربین می‌باشد.

$$X_i' = R_i'(X - T_i) = -R_i T_i'$$ رابطه(۴)

$$y_i = -c\frac{Y_i'}{Z_i'} \qquad x_i = -c\frac{X_i'}{Z_i'}$$ رابطه(۵)

۳-۴- بررسی قابلیت دید نقطه فرضی در هر عکس

اگر مختصات عکسی خارج از محدوده عکس باشد نقطه در عکس غیر قابل دید بوده و در محاسبات تقاطع فضایی، این عکس باید کنار گذاشته شود. ازاین‌رو دو شرط رابطه(۶) برای هر عکس باید برقرار باشد که در آن b,a ابعاد عکس در راستای x,y به پیکسل است.

$$|x_i| < \frac{ps.b}{2} \quad و \quad |y_i| < \frac{ps.a}{2}$$ رابطه(۶)

۳-۵- شبیه‌سازی پارامترهای توجیه داخلی دوربین غیر متریک و ناپایدار

دوربین رقومی با فاصله اصلی c_0 و ابعاد سنجنده $[a,b]$ پیکسل $(a>=b)$ با ابعاد پیکسل ps میکرومتر را در نظر بگیرید (a در راستای y و b در راستای x است). در این صورت فاصله نمونه‌برداری زمینی طبق رابطه(۷) محاسبه می‌شود.

$$GSD = \frac{ps.h}{c}$$ رابطه(۷)

فرض کنید این دوربین دارای پارامترهای توجیه داخلی (IOP)[1] و اضافی مشخص و ثابت شامل پارامترهای توجیه داخلی c,x_0,y_0 ، اعوجاج شعاعی عدسی $k1,k2,k3,k4$ و اعوجاج خروج از مرکز عدسی $P1,P2,P3,P4$ و افینیتی $B1,B2$ بوده که نشان‌دهنده میزان اعوجاجات هندسی عکسی است و برای تمامی تصاویر بلوک مقدار یکسانی دارد. همچنین فرض کنید که هر یک از پارامترهای فوق دارای سطحی از تغییرات اتفاقی $(dIOP= N(0,S_{dIOP})$ است که در آن S_{dIOP} انحراف معیار هر پارامتر می‌باشد $IOP'=IOP+dIOP$. مقادیر $dIOP$ نشان‌دهنده ناپایداری دوربین غیر متریک است و باعث می‌شود پارامترهای توجیه داخلی به‌طور دقیق در بازسازی سه‌بعدی بکار گرفته نشوند. توجه

[1] *Internal Orientation Parameters*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

شود که اگرچه IOP و $dIOP$ برای تمامی تصاویر ثابت است اما در تکرارهای مختلف مونت‌کارلو پارامترهای IOP ثابت و $dIOP$ متغیر است. برای شبیه‌سازی مقادیر پارامترهای IOP و $dIOP$ می‌توان از نتایج کالیبراسیون یک دوربین موجود استفاده کرد. در این تحقیق از مقادیر عددی کالیبراسیون دوربین فانتوم ۳ با ابعاد تصویر ۳۰۰۰*۴۰۰۰ پیکسل استفاده شده است (جدول (۱)).

جدول ۱: فایل کالیبراسیون دوربین فانتوم ۳

	IOP calibration	IOP std dev	IOP real
C	3.589100000000	0.016200000000	3.594910658612
XP	-0.024200000000	0.000600000000	-0.024113756618
YP	0.013100000000	0.001300000000	0.013202027516
K1	0.001636420000	0.000052784800	0.001628706851
K2	-0.000055649300	0.000001680200	-0.000055554899
K3	-0.000001846020	0.000000074548	-0.000001856387
P1	-0.000015092000	0.000003381350	-0.000015494870
P2	-0.000251020000	0.000008300680	-0.000250871771
B1	-0.000003341720	0.000001376020	-0.000003423852
B2	0.000000000000	0.000000410390	0.000000059506

برای شبیه‌سازی ناپایداری پارامترهای توجیه داخلی دوربین، مقادیر پارامترهای IOP و انحراف معیار S_{IOP} هر یک از آن‌ها را از خروجی کالیبراسیون دوربین یک مثال واقعی در نظر می‌گیریم. اکنون بر اساس تابع توزیع گوسی $N(0,S_{dIOP})$ تغییرات هر پارامتر را به‌صورت اتفاقی حساب کرده و اعوجاجات عکسی $\Delta x,\Delta y$ را روی یک گرید عکسی با IOP و $IOP' = IOP + dIOP$ حساب کرده و از هم کم می‌کنیم تا گرید اعوجاج باقیمانده عکسی $\Delta x,\Delta y$ که معادل همان ناپایداری دوربین غیر متریک است از رابطه $d\Delta x = \Delta x_{IOP'} - \Delta x_{IOP}$ و $d\Delta y = \Delta y_{IOP'} - \Delta y_{IOP}$ حاصل شود. ازآنجایی‌که در این شبیه‌سازی، در نظر داریم پارامتر T را به‌عنوان متوسط اعوجاج عکسی ناشی از خطای کالیبراسیون بر حسب پیکسل توسط کاربر معرفی کنیم، T را به مقدار متوسط بردارهای اعوجاج باقیمانده $d\Delta x,d\Delta y$ در بالا مطابق با رابطه $\frac{T}{\frac{\sum\sqrt{(\Delta x2+\Delta y2)}}{m}}$ تقسیم کرده و مقدار آن را در گرید اعوجاج عکسی $d\Delta x$, $d\Delta y$ به دست آمده در بالا ضرب می‌کنیم تا مقدار متوسط اعوجاج گرید عکسی نهایی برابر مقدار T گردد. در این رابطه m تعداد رئوس گرید اعوجاجات فوق است.

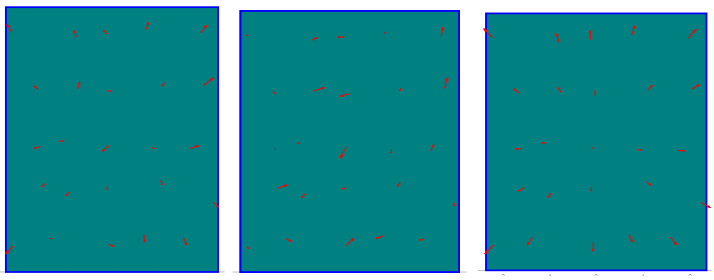
۳-۶- اعمال اعوجاجات ناشی از ناپایداری دوربین به مختصات عکسی

با در دست داشتن گرید اعوجاجات $d\Delta x,d\Delta y$ مربوط به ناپایداری دوربین، از طریق درون‌یابی بایلینیر[۱] میزان اعوجاجات مربوط به مشاهدات عکسی محاسبه و به مختصات عکسی با استفاده از رابطه (۸) اعمال می‌شود. باز هم تأکید می‌شود با توجه به منطق تکراری در روش مونت‌کارلو در به‌کارگیری فضای جست‌وجوی اتفاقی برای متغیرهای ورودی در راستای برآورد جواب احتمالی همچنین با در نظر گرفتن حالت استاتیک اعوجاجات پارامترهای کالیبراسیون در هر ایستگاه تصویربرداری برای شبیه‌سازی، در هر تکرار مونت‌کارلو مدل این اعوجاجات برای تمامی تصاویر یکسان است اما در تکرارهای مختلف به‌صورت تصادفی تغییر می‌کند شکل (۲-الف).

رابطه(۸) $x' = x + d\Delta x$ و $y' = y + d\Delta y$

[۱] *Bilinear*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]



ج ب الف

شکل ۲: اعمال اعوجاجات ناشی از ناپایداری دوربین به مختصات عکسی (الف)، اعمال نویز تصادفی به مشاهدات عکسی (ب) و برآیند این دو (ج)

۳-۷- اعمال نویز تصادفی به مشاهدات عکسی

با توجه به کیفیت تصاویر که بسته به میزان حساسیت *(ISO)* [۱]، کشیدگی، روشنایی و کنتراست[۲] تصویر تغییر می‌کند یک سطح از نویز اتفاقی با تابع توزیع گوسی $N(0,S_o)$ که در آن S_o انحراف معیار نویز مشاهدات بوده و یکسان برای همه تصاویر است به مشاهدات عکسی طبق رابطه (۹) اعمال می‌شود شکل (۲- ب). اگر S_o در واحد پیکسل باشد آنگاه کافی است آن را در ps ضرب کرد تا به واحد متریک تبدیل شده و هم واحد مختصات xy شود.

رابطه(۹)

$$x'' = x' + N(0.S_o)\ .\ y'' = y' + N(0.S_o)$$

۳-۸- اعمال نویز تصادفی به پارامترهای توجیه خارجی در مثلث‌بندی هوایی

در این مرحله قبل از بازسازی سه‌بعدی با توجه به فرض تابع توزیع نرمال برای خطاهای اتفاقی پارامترهای مثلث‌بندی هوایی و دو انحراف معیار زاویه‌ای S_{ATa} و موقعیتی S_{ATp} که به‌عنوان ضریبی از ابعاد فاصله نمونه‌برداری زمینی در جدول(۲) متناسب با واقعیت و تجربه متخصص به‌عنوان انحراف معیار تعریف شده است. خطاهای مثلث‌بندی هوایی در قالب اعمال نویز مطابق روابط(۱۰) به پارامترهای توجیه خارجی شبیه‌سازی شده اعمال می‌شود. توجه شود که ماهیت این خطاهای اتفاقی با خطاهای S_a و S_p که برای شبیه‌سازی ناپایداری در ناوبری پهپاد می‌باشد متفاوت است. این خطاها در مرحله دوم بر روی پرتوهای مربوط به مشاهدات قابل دید از تصاویر مختلف اعمال شده و در نتیجه کیفیت تقاطع دسته پرتوها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع در فرآیند تقاطع فضایی، خطاهای S_a و S_p مدل تابعی معادلات تقاطع در شرط هم خطی را تغییر می‌دهد و خطاهای S_{ATa} و S_{ATp} مدل آماری آن را از طریق اعمال ماتریس واریانس کوواریانس المان‌های توجیه خارجی تغییر می‌دهد.

ازآنجایی‌که پیش‌تر مطرح گردید کاربر خطای مثلث‌بندی را بر اساس ضریبی از ابعاد پیکسل زمینی GSD معرفی می‌کند. بنابراین می‌توان از روابط (۱۰) این خطاها را محاسبه نمود که در آن k_p و k_a ضرایب خطاهای موقعیتی و دورانی مثلث‌بندی هوایی بر حسب GSD هستند.

۳-۹- بازسازی سه‌بعدی نقطه فرضی

اکنون با در دست داشتن مشاهدات عکسی $x''y''$ که حاوی ناپایداری توجیه داخلی دوربین و خطاهای قرائت اتفاقی می‌باشند و همچنین پارامترهای توجیه داخلی IOP' و توجیه خارجی EOP'' تصاویر مختلف که حاوی خطاهای اتفاقی و ناپایداری پهپاد می‌باشند،

[۱] *International Standards Organization*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

می‌توان با اعمال تقاطع فضایی پرتوهای نظیر، مختصات سه‌بعدی زمینی نقطه فرضی را به دست آورد بطوریکه مجموع مربعات باقیمانده‌های عکسی کمینه شود. برای این منظور کافی است بر اساس شرط هم خطی رابطه(۱۱) کمینه شود. در رابطه(۱۱)، R_{123} ترانهاده ستون‌های اول تا سوم ماتریس دوران هر عکس است. برای حل مسأله کافی است از F نسبت به X مشتق گرفته و برابر صفر قرار دهیم. با حل سه معادله و سه مجهول، مختصات سه‌بعدی نقطه فرضی X' بازسازی می‌شود بطوریکه $F(X')\rightarrow min$.

رابطه(۱۰)
$$EOP'' = EOP' + dEOP \qquad \text{و} \qquad S_{ATp} = k_p.GSD \qquad \text{و} \qquad S_{ATa} = \frac{k_a.GSD}{h}$$
$$dEOP = [N(0.S_{ATp})\ for\ XYZ\ \&\ N(0.S_{ATa}) for\ wpk$$

رابطه(۱۱)
$$F(X) = \sum\left(\left[x_i'' - \frac{c.R_{1i}(X-T_i)}{R_{3i}(X-T_i)}\right]^2 + \left[y_i'' - \frac{c.R_{2i}(X-T_i)}{R_{3i}(X-T_i)}\right]^2\right)$$

۳-۱۰- برآورد کیفیت بازسازی سه‌بعدی

در روش مونت‌کارلو محاسبه جواب احتمالی بر مبنای تکرار و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف اتفاقی از تابع توزیع پارامترها انجام می‌گیرد. ازآنجایی‌که در این پژوهش لازم است تا روابط بین پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصاویر نسبت به کیفیت بازسازی سه-بعدی آشکار گردد، بنابراین بازسازی سه‌بعدی در حالات مختلف با n تکرار مونت‌کارلو (در اینجا n=۱۰۰) انجام می‌شود تا در اطراف نقطه فرضی X=[۰ ۰ ۰] نقاط $X'=[X',Y',Z']$ به‌صورت پراکنده بازسازی شوند. اکنون با توجه به معلوم بودن مقدار واقعی مجهول و n مقدار برآورد شده برای آن، کیفیت مسطحاتی ($RMSExy$) و ارتفاعی($RMSEz$) بازسازی سه‌بعدی نقطه فرضی با استفاده از معیار $RMSE$ برآورد می‌شود.

۴- آزمون‌های تحلیل تأثیر پوشش طولی و عرضی تصاویر نسبت به کیفیت بازسازی سه‌بعدی

همان‌طور که پیش‌تر در مقدمه نیز مطرح گردید ازآنجایی‌که رفتار هر پارامتر طراحی شبکه نسبت به کیفیت بازسازی سه‌بعدی، علاوه بر مقادیر خود پارامتر، تحت تأثیر پارامترهای محیطی و دستگاهی قرار دارد بنابراین برای دستیابی به نتایج با اطمینان و اعتماد بیشتر، لازم است آزمون‌ها در شرایط مختلفی که بیانگر شرایط مختلف محیطی و کیفیت دوربین است انجام گردد. ازآنجایی‌که حالات بسیار زیادی برای مقادیر و خطای این پارامترها وجود دارد تا در این شرایط پارامترهای پوشش طولی و عرضی رفتارسنجی بشوند، برای این منظور در این تحقیق پنج حالت ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد مطابق جدول(۲) با توجه به تجربه شخص خبره در نظر گرفته شده است. در واقع تصویربرداری از نقطه فرضی زمینی برای هر حالت از پوشش تصویری که در طول گام‌های پنج درصدی با پارامترهای دارای مقادیر مطابق جدول(۲) انجام شده و در ۱۰۰ بار تکرار روش مونت‌کارلو انجام می‌شود. مقادیر جدول(۲) انحراف معیار توابع توزیع گوسی هستند که منجر به مقادیر اتفاقی برای پارامتر مربوطه در تکرارهای مونت‌کارلو خواهند شد. سپس با استفاده از معیار $RMSE$ میزان خطای متوسط مسطحاتی و ارتفاعی در بازسازی سه‌بعدی برآورد می‌گردد. لازم به ذکر است که در سیستم‌های پیچیده بجای انتشار خطا از طریق مدل‌سازی آماری نویز مشاهدات و پارامترها، به روش آزمون و تکرار در مونت‌کارلو، رفتار آماری نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد[۱۹].

توجه شود که وقتی پارامتری به‌صورت انحراف معیار بیان می‌شود، این مقادیر متوسط تغییرات است که ۷۰٪ موارد کمتر از این مقادیر و ۳۰٪ موارد بین این

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

مقدار و سه برابر آن هستند. مطابق جدول(۲) پارامترهای S_aو S_p، به ترتیب بیانگر انحراف معیار زاویه تیلت و انحراف معیار موقعیت نسبت به شرایط ایده‌آل یا طراحی شده است. k_a و k_p ضریب فاصله نمونه‌برداری زمینی برای محاسبه انحراف معیار خطای دورانی و موقعیتی مثلث‌بندی هوایی، T متوسط اعوجاجات عکسی ناشی از ناپایداری دوربین، S_o انحراف معیار مشاهدات عکسی (نویز مشاهدات عکسی)، p_x و p_y به ترتیب پوشش طولی و عرضی تصاویر و k_c و k_h به ترتیب ضریب فاصله کانونی و ضریب ارتفاع پرواز است که مقادیر آن‌ها در تمام پنج حالت ثابت بوده است. بااین‌حال برای فاصله کانونی، مقدار فاصله کانونی جدول(۱) در نظر گرفته شده و برای ارتفاع پرواز، مقدار آن متناسب با نقشه با مقیاس ۱/۵۰۰ یا فاصله نمونه‌برداری چهار سانتی‌متر شبیه‌سازی انجام شده است.

جدول ۲: مقدار پارامترها، انحراف معیار و بازه تغییرات آن‌ها برای پنج حالت ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد با توجه به تجربه شخص خبره که بیانگر شرایط مختلف محیطی و کیفیت دوربین است.

پارامتر/حالت	واحد	ایده‌آل	عالی	خوب	متوسط	بد	تغییرات
S_a	درجه	۰	۱	۲	۴	۸	-
S_p	متر	۰	۰/۲	۰/۵	۱	۵	-
T	-	۰/۰۲۵	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۱	-
S_o	پیکسل	۰/۰۵	۰/۲	۰/۴	۱	۲	-
k_a	GSD	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۱	۲	-
k_p	GSD	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۱	۲	-
p_x	درصد	-	-	-	-	-	۳۰:۵:۹۵
p_y	درصد	-	-	-	-	-	۳۰:۵:۹۵
k_c	-	۱	۱	۱	۱	۱	-
k_h	-	۱	۱	۱	۱	۱	-

۴-۱- تحلیل تأثیر و رفتار پوشش تصویری بر کیفیت بازسازی سه‌بعدی به روش فتوگرامتری پهپاد

برای رفتار سنجی پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصاویر نسبت به کیفیت بازسازی سه‌بعدی، مطابق ستون تغییرات جدول (۲) پوشش‌های طولی و عرضی تصویری را بین ۳۰ تا ۹۰ درصد هر پنج درصد افزایش داده و برای هر حالت با توجه به فرض نرمال بودن تابع توزیع خطاها و انحراف معیار پارامترهای مورد نظر مطابق جدول (۲)، تصویربرداری و بازسازی سه‌بعدی نقطه زمینی برای ۱۰۰ بار تکرار مونت‌کارلو انجام شده است. با توجه به معلوم بودن مقدار واقعی مختصات نقطه زمینی و ۱۰۰ موقعیت بازسازی شده به روش مونت‌کارلو برای آن، در هر حالت کیفیت مسطحاتی (*RMSExy*)، ارتفاعی (*RMSEz*) و کامل (*RMSExyz*) بازسازی سه‌بعدی با استفاده از شاخص *RMSE* برآورد شده است. همچنین تغییرات نسبی خطای بازسازی سه‌بعدی در راستا، و عمود بر نوارهای پرواز نیز مطابق رابطه (۱۲) محاسبه شده تا ناهمگونی خطاها برای پوشش‌های طولی و عرضی تصویری متفاوت بررسی گردد.

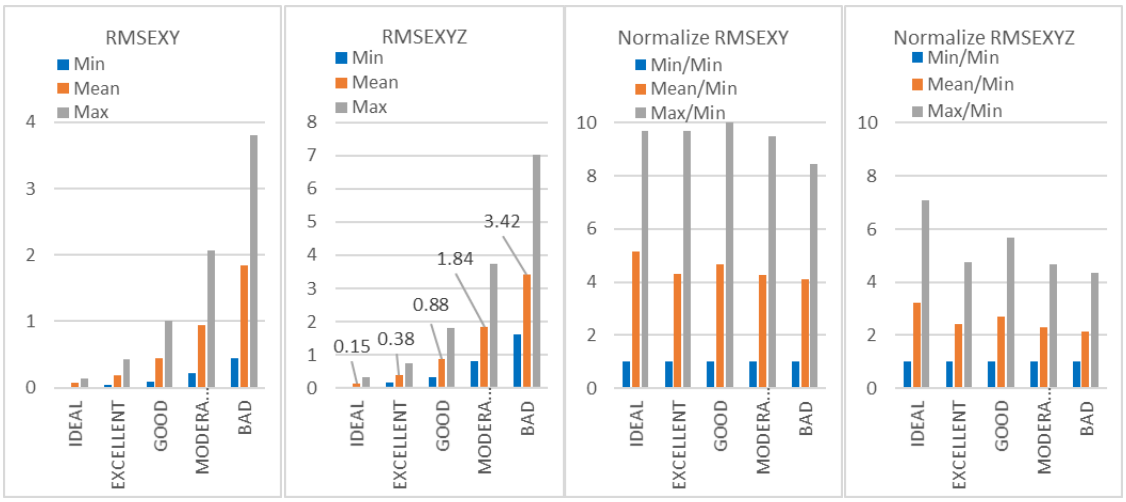
$$\left|\frac{\mathrm{RMSEx}-\mathrm{RMSEy}}{\mathrm{RMSEx}y}\right| \qquad \text{رابطه(۱۲)}$$

این فرایند در پنج حالت ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد برای انحراف معیارهای تنظیم شده در جدول (۲)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

تکرار شده است. به این ترتیب با فرض پنج حالت، ۱۸۰ زوج مرتب پوشش طولی و عرضی، و ۱۰۰ تکرار مونت‌کارلو، برای تحلیل تأثیر پوشش طولی و عرضی بر بازسازی سه‌بعدی، تعداد ۹۰ هزار آزمون انجام شده است که خلاصه آن‌ها در قالب نمودارهای شکل (۴) نمایش یافته‌اند. توجه شود درصورتی‌که هر دو پوشش طولی و عرضی زیر ۵۰٪ باشد، امکان بازسازی سه‌بعدی برای کل عوارض زمینی وجود ندارد لذا از آن‌ها صرف‌نظر شده است.

شکل(۳) پارامترهای آماری کمینه، متوسط و بیشینه خطاهای مسطحاتی، ارتفاعی و کامل بازسازی سه‌بعدی نشان داده شده در نمودارهای شکل(۴) می‌باشد. نمودارهای ج و د در این شکل نشان می‌دهند تغییر پوشش‌های طولی و عرضی قادر است خطای مسطحاتی را تا ۱۰ برابر و خطای کامل بازسازی سه‌بعدی را تا ۵ برابر بهبود دهد (در حالت ایده‌آل تا ۷ برابر). همچنین نمودار ب در شکل (۳) نشان می‌دهد خطای متوسط بازسازی سه‌بعدی(*RMSExyz*) در حالت بد تا عالی حدود ۲۳، ۱۲، ۶ و ۲٫۵ برابر خطای متوسط درحالت ایده‌آل است. لذا شرایط محیطی و کیفیت دوربین می‌تواند خطای کامل بازسازی سه‌بعدی را بیش از ۲۰ برابر افزایش دهد.



شکل ۳: نمودار کیفیت بازسازی سه‌بعدی حاصل از تغییرات پوشش طولی و عرضی برای شرایط ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد. (الف) و (ب) مقادیر کمینه، متوسط و بیشینه برای خطای مسطحاتی و کامل بازسازی سه‌بعدی است. (ج) و (د) مقایر نسبی این خطاها نسبت به مقدار کمینه است.

همچنین با توجه به نمودارهای شکل (۴) که در آن محور افقی نشان‌دهنده پوشش طولی و محور قائم بیانگر پوشش عرضی برای طول گام‌های ۵ درصدی است، و با توجه به مقادیر نمایش یافته شده به‌صورت گراف‌های حبابی برای کیفیت مسطحاتی (*RMSExy*)، کامل (*RMSExyz*) و ناهمگونی نسبی بازسازی سه‌بعدی (قدر مطلق تغییرات نسبی خطاهای مسطحاتی مطابق رابطه (۱۲) در پنج حالت ایده‌آل تا بد، می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری نمود:

- کمترین خطای بازسازی سه‌بعدی (*RMSExyz*) مربوط به پوشش $px=95, py=95$ و بیشترین خطا مربوط به پوشش $px=50, py=30$ است.
- حداکثر قدر مطلق اختلافات نسبی خطای بازسازی سه‌بعدی در راستای x و y برای حالات ایده‌آل تا بد بین ۱۵٪ تا ۳۰٪ خطای مسطحاتی است که در حالات پوشش طولی و عرضی هم‌زمان بالای ۸۰٪ یا زیر ۵۵٪ رخ داده است. این به این معناست که وقتی تعداد پرتوهای تصویری در تقاطع بسیار کم باشد،

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

استحکام شبکه پایین آمده و با تفاوت بین پوشش‌های طولی و عرضی، ناهمگونی بین خطای x و y در بازسازی سه‌بعدی رخ می‌دهد. همچنین وقتی تعداد پرتوها به‌واسطه پوشش‌های بالای تصویری به‌صورت تصاعدی بالا می‌رود، هندسه تقاطع وابسته به باز کلی تقاطع در دو راستا (یعنی زاویه اولیه و آخرین پرتو در آن راستا) شده و چون باز کلی به ابعاد تصویر نیز وابسته است با توجه به نسبت ۳ به ۴ ابعاد تصویر در این آزمون (*w=4000, h=3000 pixels*) شاهد حدود ۳۰٪ تغییرات خطای x نسبت به y خواهیم بود.

- با دقت در نمودارهای شکل(۴) می‌توان مشاهده نمود خطای جذر میانگین مربعات خطا بازسازی سه‌بعدی (*RMSExyz*) حالت متقارن نداشته و در راستای پوشش طولی عموماً و به‌طور متوسط ۵٪ بیشتر از راستای پوشش عرضی است. علت این امر کمتر بودن باز طولی نسبت به باز عرضی برای کل عکس‌های پوشش‌دار می‌باشد. از سوی دیگر خطای مسطحاتی بازسازی سه‌بعدی (*RMSExy*) تقریباً حالت متقارن داشته و به باز کلی در راستای پوشش طولی و عرضی وابسته نیست.
- با دقت در نمودارهای شکل (۴) می‌توان مشاهده نمود در کلیه حالات ایده‌آل تا بد، خطای بازسازی سه بعدی با افزایش هم‌زمان پوشش‌های طولی و عرضی کاهش می‌یابد. البته این موضوع را می‌توان از مقایسه نمودارهای شکل (۵) نیز نتیجه‌گیری نمود.
- مطابق نمودارهای شکل (۴) برای کیفیت مسطحاتی و کامل در حالات ایده‌آل تا بد می‌توان نتیجه گرفت افزایش پوشش عرضی منجر به خطای کامل بازسازی سه‌بعدی کمتری نسبت به افزایش پوشش طولی خواهد شد، بخصوص اگر اختلاف پوشش طولی و عرضی زیاد بشود. برای مثال در نمودار حالت خوب، بیشترین اختلاف خطای بازسازی سه‌بعدی (*RMSExyz*) مربوط به دو حالت py=۳۰ ، px=۹۵ و py=۹۵ ، px=۳۰ می‌باشد که خطای اولی ۰٫۷۶ *GSD* به‌طور متوسط ۱۵٪ از خطای دومی ۰٫۶۶ *GSD* بیشتر است. با این‌حال افزایش پوشش عرضی بجای طولی هیچ‌گاه توصیه نمی‌شود زیرا هزینه و زمان تصویربرداری را افزایش خواهد داد. این در حالی است که تأثیر تغییرات پوشش طولی و عرضی متقارن روی خطای مسطحاتی بازسازی سه‌بعدی تقریباً یکسان است.
- مطابق نمودارهای شکل (۴) برای حالات ایده‌آل تا بد می‌توان نتیجه گرفت بیشترین خطاهای بازسازی سه‌بعدی (*RMSExyz*) وقتی است که یکی از پوشش‌ها بین ۵۰ تا ۸۰ درصد و دیگری بین ۳۰ تا ۴۵ درصد باشد. بنابراین اگر می‌خواهید یکی از پوشش‌ها را زیر ۵۰ درصد انتخاب کنید پوشش دیگر را بین ۸۵ تا ۹۵ درصد بگذارید یا هر دو پوشش را بالای ۵۰ درصد انتخاب نمایید تا خطای بازسازی سه‌بعدی بالا نرود.
- مطابق نمودارهای شکل (۴) برای حالات ایده‌آل تا بد می‌توان مشاهده کرد که در پوشش‌های طولی زیر ۶۰ درصد، با افزایش پوشش عرضی، الزاماً خطای بازسازی سه‌بعدی (*RMSExyz*) کاهش نمی‌یابد. همین‌طور در پوشش‌های عرضی زیر ۶۰ درصد نیز، با افزایش پوشش طولی الزاماً خطای بازسازی سه‌بعدی (*RMSExyz*) کاهش نمی‌یابد. علت این امر استحکام هندسی پایین شبکه است که رفتار خطاها را از حالت منظم خارج کرده و نشان‌دهنده افزایش اهمیت باز کلی عکس‌های پوشش‌دار نسبت به میزان پوشش عکس‌ها می‌باشد.
- مطابق شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت در حالاتیکه مجموع پوشش‌های طولی و عرضی با هم برابر است با نزدیک شدن پوشش‌ها به هم خطای مسطحاتی و بازسازی سه‌بعدی حداکثر تا ۵۰٪ افزایش می‌یابد زیرا تعداد پرتوها در تقاطع فضایی کاهش می‌یابد. با این‌حال این قاعده برای وقتی مجموع پوشش‌ها برابر یا کمتر از ۱۲۰٪ است به‌واسطه استحکام پایین شبکه صادق نبوده و خطای کامل (نه مسطحاتی) بازسازی سه‌بعدی حداکثر تا ۲۵٪ کاهش می‌یابد. بنابراین در تصویربرداری برای حالات با مجموع پوشش‌های طولی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

و عرضی بیشتر از ۱۲۰ درصد بهتر است مقادیر آن‌ها تا حد ممکن از هم دور در نظر گرفته شود این در حالی است که برای حالاتی که مجموع پوشش طولی و عرضی کمتر از ۱۲۰ درصد است بهتر است تا مقادیر پوشش‌های طولی و عرضی نزدیک به هم در نظر گرفته شود.

۴-۲- انتخاب پوشش تصویری بهینه در فتوگرامتری پهپاد

برای انتخاب پوشش‌های تصویری بهینه در فتوگرامتری پهپاد لازم است تعادلی بین هزینه و کیفیت صورت بگیرد. همانطورکه ذکر شد، بیش از ۱۸۰ حالت جفت پوشش طولی و عرضی برای پنج حالت ایده‌آل تا بد مطابق شکل (۴) مورد آزمون قرار گرفته است. برای اینکه تحلیل پوشش تصویری بهینه مستقل از شرایط محیطی و دوربین باشد، شاخص کیفیت را برای پنج حالت ایده‌آل تا بد بعد از نرمالیزاسیون خطا متوسط‌گیری می‌کنیم تا شاخص کیفیت متوسط[1] برای همه حالات به دست آید. البته اگر دوربین و شرایط تصویربرداری مشخص باشد می‌توان این تحلیل را مستقیماً برای یکی از حالات ایده‌آل تا بد انجام داد. همچنین می‌توان این شاخص را در حالت تحلیل مسطحاتی برای *(RMSExy)* و در حالت تحلیل سه‌بعدی با *RMSExyz* محاسبه نمود.

شکل (۶) شاخص کیفیت متوسط (*RMSExyz*) را در مقابل فاکتور هزینه تصویربرداری[2] نشان می‌دهد.

به‌طورکلی هزینه تصویربرداری هوایی ارتباط مستقیم با مدت‌زمان پرواز دارد که برابر با مجموع مدت‌زمان صعود پرنده، قرارگیری در وضعیت مناسب، عکسبرداری روی مسیرهای طراحی شده و فرود پرنده برای سورتی‌های مختلف پروازی است. این در حالی است که مدت‌زمان موردنیاز برای تصویربرداری هوایی با فرض ثابت درنظرگرفتن سرعت پرنده، به طول خط پرواز بستگی دارد که خود به ابعاد و شکل منطقه و فاصله نوارهای پرواز وابسته است. فاصله نوارهای پرواز به ارتفاع پرواز و پوشش عرضی بستگی دارد. ارتفاع پرواز با توجه به *GSD* مورد نیاز، ابعاد پیکسل سنجنده، فاصله کانونی عدسی دوربین و ضریب کاهش حد تفکیک مکانی سیستم تصویربرداری تعیین می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حجم پرواز رابطه معکوس با *GSD*(100-py)* دارد. با فرض یکسان بودن *GSD*، تابع هزینه نسبی برابر نسبت حجم پرواز *py* به حجم پرواز *py=٪۳۰* در نظر گرفته می‌شود که برابر است با *CostFactor=70/(100-py)* که به‌عنوان شاخص هزینه پرواز در نظر گفته شده است.

مطابق شکل(۶) می‌توان رفتار تغییرات کیفیت بازسازی سه‌بعدی را در مقابل هزینه تصویربرداری برای جفت پوشش‌های مختلف طولی و عرضی برای متوسط پنج حالت ایده‌آل تا بد مشاهده کرد. هر نقطه نشان دهنده ضریب هزینه و شاخص کیفیت برای یک زوج پوشش طولی و عرضی می‌باشد. خط قرمز پاسخ‌های بهینه با کمترین هزینه یا خطای توأم می‌باشند که به آن جبهه پرِتو[3] یا سطح ۱ می‌گویند. به همین صورت می‌توان سطوح دیگری از جبهه پرتو را مطابق الگوریتم زیر محاسبه نمود (خطوط خاکستری به‌صورت نمادین).

[1] *Accuracy Index*

[2] *Cost Factor*

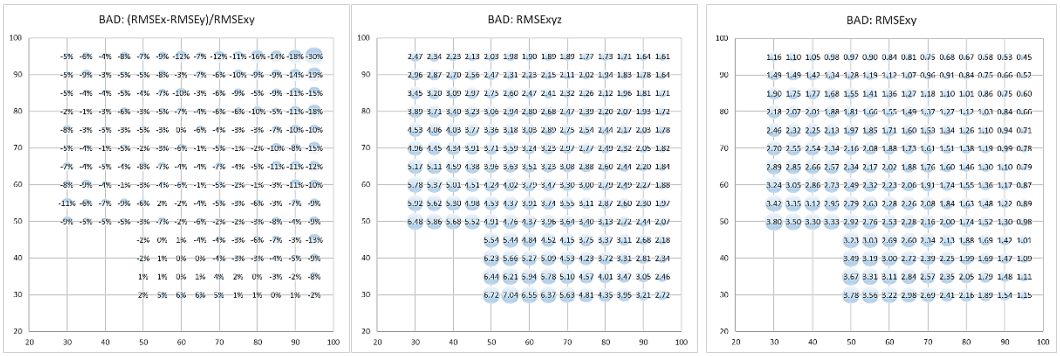
[3] *Pareto Front*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

Consider [px(i),py(i),CostFactor(i),AccuracyIndex(i)];i=1:180
For i=1:180
ParetoFront(i)=sum(CostFactor<=CostFactor(i) & AccuracyIndex<=AccuracyIndex(i));
end



[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]



شکل ۴: از راست به چپ خطاهای مسطحاتی (واحد *GSD*)، کامل (واحد *GSD*) و ناهمگونی نسبی (واحد درصد) بازسازی سه‌بعدی با تغییر پوشش درصد طولی (افقی) و عرضی (قائم)، از بالا به پایین برای حالات ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد.

برای تعیین پوشش‌های تصویری بهینه، چهار گام زیر باید طی شود:

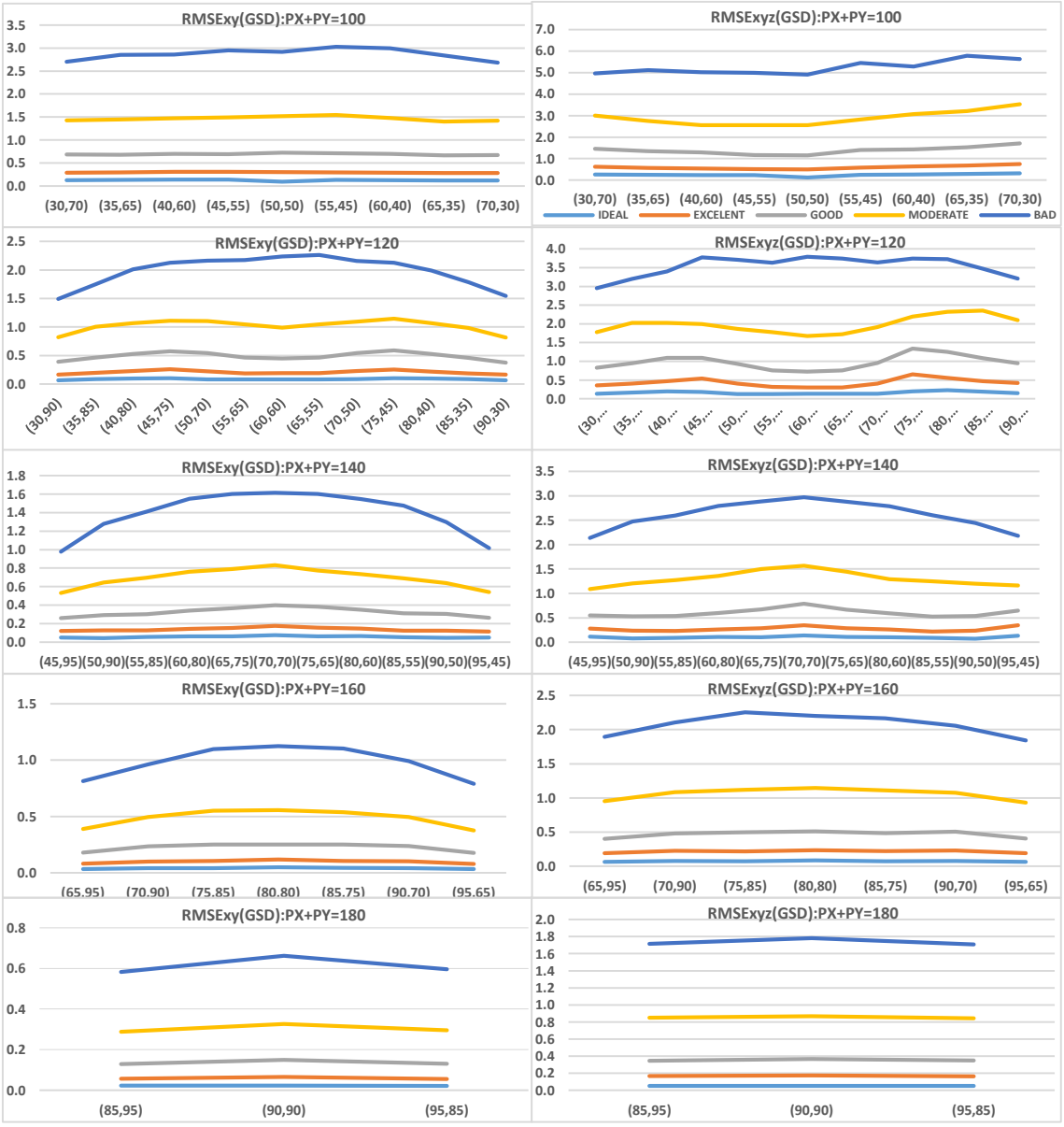
الف) برای سادگی در تحلیل مسأله‌ی انتخاب پوشش تصویری بهینه، خطاهای بازسازی سه‌بعدی متوسط را که بین ۰ تا ۱۰۰ درصد می‌باشند به ده کلاس ۱۰ درصدی طبقه‌بندی می‌شوند. بنابراین اولویت‌های ۱ تا ۱۰ به دست می‌آید که ۱ کمترین خطا (بیشترین کیفیت بازسازی سه‌بعدی) و ۱۰ بیشترین خطای بازسازی سه‌بعدی (کمترین کیفیت بازسازی سه‌بعدی) را دارد. بنابراین ۱۸۰ حالت پوشش تصویری با ده شاخص کیفیت مطابق شکل (۷-الف) ایجاد می‌شود.

ب) اعمال قیود حداقل و حداکثر پوشش طولی و عرضی تصویری به ۱۸۰ حالت اولیه شامل قید برجسته‌بینی $px>=۶۰$ ، محدودیت فاصله زمانی عکس‌برداری دو عکس متوالی طبق رابطه $px>=1-V.f.\Delta t/H.d_x$ که در آن V سرعت پرنده، f فاصله کانونی، Δt فاصله زمانی دو عکس متوالی، H ارتفاع پرواز و d_x ابعاد عکس در راستای پوشش طولی می‌باشد. محدودیت هزینه پردازش به متوسط تعداد عکس‌ها n برای بازسازی سه‌بعدی هر نقطه برمی‌گردد که قید $(1-px/100)(1-py/100)>1/n$ را به دنبال دارد. شکل ساده‌تر این قید، اعمال $px<=Th$ است که معمولاً Th برابر۸۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. محدودیت زمان و هزینه پرواز $py<=Th$ است که Th معمولاً برابر ۸۰ درصد می‌باشد. محدودیت تهیه ارتوفتوموزائیک حقیقی از مناطق شهری که $px>=۶۰$ و $py>=۶۰$ باید باشد. در شکل (۷-ب) پوشش‌های طولی بین ۶۰ تا ۸۵ درصد و پوشش‌های عرضی ۸۰ درصد و کمتر انتخاب شده‌اند.

ج) انتخاب پوشش تصویری بهینه با حداقل سطح جبهه پرتو برای هر کلاس صحت. در شکل (۷-ج) برای هر یک از کلاس‌های با شاخص کیفیت ۲ تا ۱۰، پوشش تصویری انتخاب شده است که مطابق شکل (۶-چپ) دارای سطح جبهه پرتو حداقل باشد. برای مثال کلاس ۱۰ دارای سه پوشش تصویری (۳۰و۷۰)-(۳۵و۷۰)-(۳۰و۶۵) می‌باشد که سطوح جبهه پرتو متناظر آن‌ها به ترتیب ۸-۱۷-۱۰ است لذا پوشش تصویری بهینه برای کلاس ۱۰ حالت (۳۰و۶۵) با سطح جبهه پرتو ۸ می‌باشد.

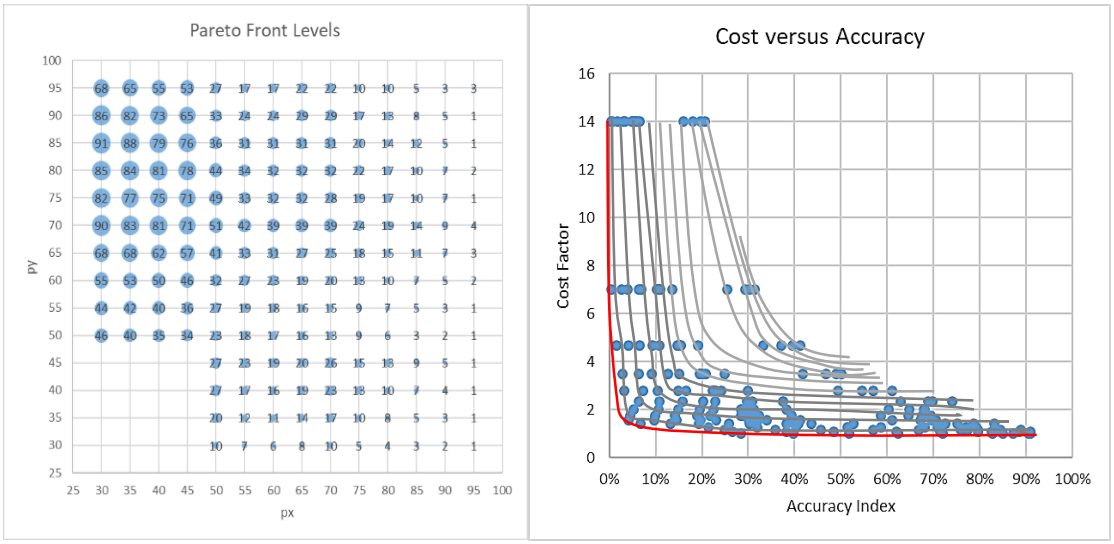
د) از بین پوشش‌های تصویری بهینه باقیمانده، بسته به اولویت هزینه کمتر یا کیفیت بازسازی سه‌بعدی بالاتر، یکی از حالات را انتخاب می‌کنیم. در شکل (۷-ج) پوشش طولی ۸۵ و عرضی ۵۵ دارای بالاترین کیفیت و پوشش طولی ۶۰ و عرضی ۳۰ دارای کمترین هزینه پرواز می‌باشد. توجه کنید که این پوشش‌های تصویری بهینه با فرض به‌کارگیری شاخص کیفیت متوسط پنج حالت ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد حاصل از *RMSExyz* به دست آمده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

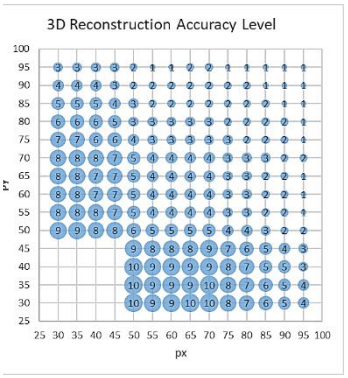


شکل ۵: تغییرات خطای مسطحاتی و کامل بازسازی سه‌بعدی (محور قائم واحد *GSD*) برای *px+py* ثابت (محور افقی واحد درصد) در حالات ایده‌آل تا بد (اندکس رنگ‌های مختلف در نمودار بالا راست آمده است)

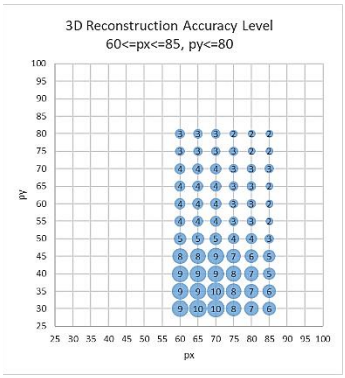
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]



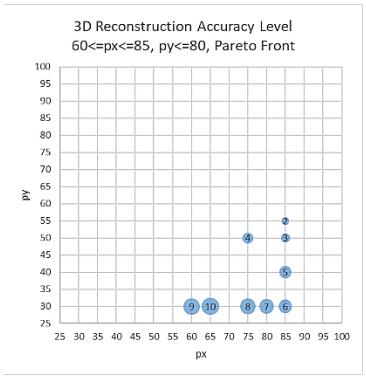
شکل ۶: تغییرات کیفیت بازسازی سه‌بعدی در مقابل هزینه تصویربرداری و سطوح جبهه پرتو در آن (راست) و سطح جبهه پرتو مربوط به هر جفت پوشش طولی و عرضی (چپ)



الف) نمایش خطاهای بازسازی سه‌بعدی در ۱۰ کلاس مختلف (۱۸۰ پوشش تصویری)



ب) حذف پوشش‌های طولی کمتر از ۶۰٪ (شرط برجسته‌بینی) و بیشتر از ۸۵٪ (شرط محدودیت هزینه پردازش) و حذف پوشش‌های عرضی بالای ۸۰٪ (شرط محدودیت هزینه و زمان عکس‌برداری) (۶۶ پوشش تصویری)



ج) تعیین حالات بهینه از طریق انتخاب کمترین سطح جبهه پرتو برای هر کلاس خطا مطابق شکل ۶-چپ (۹ پوشش تصویری)

شکل ۷: فرآیند انتخاب پوشش‌های طولی و عرضی بهینه در کاربرد تهیه نقشه سه‌بعدی از منطقه شهری

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تحلیل و بررسی میزان تأثیرگذاری پارامترهای پوشش طولی و عرضی نسبت به کیفیت بازسازی سه‌بعدی به‌صورت جامع و در شرایط مختلف محیطی و دوربین برای یک نقطه فرضی انجام شده است. علاوه بر این در آن به مسأله انتخاب پوشش بهینه و مؤثر برای انجام عملیات فتوگرامتری پهپاد با توجه به اهداف و شرایط پرداخته شده است. مهم‌ترین نتایج این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

تغییر پوشش‌های طولی و عرضی قادر است خطای مسطحاتی *RMSExy* را تا ۱۰ برابر و خطای کامل *RMSExyz* بازسازی سه‌بعدی را تا ۵ برابر بهبود دهد.

همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد ناهمگونی خطاها در راستای پوشش طولی و عرضی بین ۱۵٪ تا ۳۰٪ خطای مسطحاتی است که در حالاتی که هر دو پوشش طولی و عرضی بالای ۸۰٪ یا زیر ۵۵٪ باشند این ناهمگونی بیشتر می‌شود.

از نتایج دیگر این تحقیق می‌توان گفت در تصویربرداری با مجموع پوشش‌های طولی و عرضی بیشتر (یا کمتر) از ۱۲۰ درصد بهتر است مقادیر پوشش‌ها تا حد امکان از هم دور (یا با هم یکسان) در نظر گرفته شود.

یک نتیجه کاربردی دیگر این تحقیق آن است که اگر می‌خواهید یکی از پوشش‌ها را زیر ۵۰ درصد انتخاب کنید پوشش دیگر را بین ۸۵ تا ۹۵ درصد بگذارید یا هر دو پوشش را بالای ۵۰ درصد انتخاب نمایید تا کیفیت بازسازی سه‌بعدی از دست نرود.

اگرچه با افزایش هم‌زمان هر دو پوشش طولی و عرضی، کیفیت بازسازی سه‌بعدی همیشه افزایش می‌یابد اما در پوشش‌های طولی یا عرضی زیر ۶۰ درصد، افزایش پوشش در یک راستا الزاماً موجب بهبود کیفیت بازسازی نمی‌شود.

همچنین می‌توان گفت افزایش پوشش عرضی تأثیر بیشتری در بهبود کیفیت بازسازی سه‌بعدی نسبت به پوشش طولی دارد. این در حالی است که هر دو پوشش طولی و عرضی در بهبود کیفیت مسطحاتی بازسازی تأثیر یکسان دارند.

در این تحقیق برای اولین بار فرایند جدیدی در چهار گام بر مبنای الگوریتم جبهه پرتو به منظور شناسایی و انتخاب پوشش‌های تصویری بهینه معرفی گردید.

با توجه به مطرح بودن مبحث عکس‌برداری مایل برای ایجاد شهر سه‌بعدی در کاربرد شهر هوشمند، پیشنهاد می‌شود برای تحقیقات آتی، مشابه این آزمون‌ها برای عکس‌برداری مایل نیز انجام شود. همچنین می‌توان کلیه آزمون‌های این تحقیق را در حالت عکس‌برداری کراس نیز تکرار نمود و نتایج آن را ارائه داد.

مراجع

[1] *C. Cryderman, S. B. Mah, and A. Shufletoski, "E VALUATION OF UAV PHOTOGRAMMETRIC ACCURACY FOR MAPPING AND EARTHWORKS COMPUTATIONS," vol. 68, no. 4, pp. 309–317, 2014.*

[2] *C.P. Robert and G. Casella. «Monte Carlo Statistical Methods» (second edition). New York: Springer-Verlag, 2004, ISBN 0-387-21239-6*

[3] *E. Şenkal, G. Kaplan, and U. Avdan, "Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles ' imagery on archaeological sites," vol. 6, no. 2, pp. 81–89, 2021.*

[4] *Eisenbeiss, Henri, "Research Collection", D. Thesis, University of Technology Dresden born, 2009.*

[5] *F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, and D. Sarazzi, "UAV PHOTOGRAMMETRY FOR MAPPING AND 3D MODELING – CURRENT STATUS AND FUTURE PERSPECTIVES – ," vol. XXXVIII, no. September, pp. 14–16, 2011.*

[6] *G. Rock, J. B. Ries, and T. Udelhoven, "Sensitivity analysis of UAV-photogrammetry for creating digital*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

elevation models (DEM) SENSITIVITY ANALYSIS OF UAV-PHOTOGRAMMETRY FOR CREATING DIGITAL ELEVATION MODELS (DEM),” no. September 2016, 2012.

[7] Haarbrink, R. B.; Eisenbeiss, Henri, “Accurate DSM production from unmanned helicopter systems,”1259-1264, 2008.

[8] I. C. Rumbao, J. M. Peña, F. L. Granados, and I. C. Rumbao, “Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes,” Int. J. Remote Sens., vol. 0, no. 0, pp. 1–16, 2016.

[9] I. Clavero-rumbao, A. Garcí, and F. Ló, “Assessing Optimal Flight Parameters for Generating Accurate Multispectral Orthomosaicks by UAV to Support Site-Specific Crop Management, ” pp. 12793–12814, 2015.

[10] J. P. Leitão, M. M. De Vitry, A. Scheidegger, and J. Rieckermann, “Assessing the quality of Digital Elevation Models obtained from mini-Unmanned Aerial Vehicles for overland flow modelling in urban areas,” pp. 5629–5670, 2015.

[11] M. Dolores, N. García, J. Emilio, M. De Larriva, and A. García-ferrer, “An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Orthomosaicks to Survey Archaeological Areas,” 2016.

[12] M. Shahbazi, G. Sohn, J. Théau, and P. Menard, “Development and Evaluation of a UAV-Photogrammetry System for Precise 3D Environmental Modeling,” pp. 27493–27524, 2015.

[13] M. C. Method, “The beginning,” pp. 125–130, 1945.

[14] P. Barry and R. Coakley, “ACCURACY OF UAV PHOTOGRAMMETRY COMPARED WITH NETWORK RTK GPS.”

[15] R. J. Raczynski, “Accuracy analysis of products obtained from UAV-borne photogrammetry influenced by various flight parameters,” REEF ENVIRONMENTS,” no. February, pp. 1–6, 2017.

[16] R. E. Caflisch, Monte Carlo and quasi-Monte Carlo methods, Acta Numerica vol. 7 .Cambridge University Press, 1998 .pp. 1–49.

[17] www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp.

[18] Y. Zhang, “PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING OF LOW-ALTITUDE IMAGES ACQUIRED BY UNPILOTED AERIAL VEHICLES,” vol. 26, no. June, pp. 190–211, 2011.

[19] H. Hastedt, “Monte-Carlo-Simulation In Close-Range Photogrammetry MONTE-CARLO-SIMULATION IN CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY,” no. January 2004, 2014.

[20] Douglas Hubbard "How to Measure Anything: Finding the Value of Intangibles in Business" pg. 46, John Wiley & Sons, 2007.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]

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

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.9 No.1, Spring 2021

Research Paper

The Simulation Analysis of the Effect of Imaging Target detection Side¬lap/Overlap on the Quality of 3D Reconstruction in UAV Photogrammetry and Determination of their Optimal Values

Ali Erfanzadeh [1*], Mohammad Saadatseresht [2]

1- Master student of photogrammetry, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
2- Associate Professor of Photogrammetry, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

Abstract

The selection of effective and optimal sidelap/overlap of images according to the quality, speed, cost and purpose of each UAV photogrammetric project is considered as an important parameter. Since two decades ago, several researches have been carried out based on a trial and error strategy for this purpose, in which different drones and cameras have been utilized for imaging with different sidelaps/overlaps and analyzing the results obtained from them. Due to their high cost and time-consuming these operational methods, have not yet been able to provide a perfect behavioral assessment of the impact of imaging sidelap/overlap parameters on the quality of three-dimensional reconstruction. These studies merely provide an overview of the sidelap/overlap of images between 60 and 80% empirically. In this paper, a simulation method is used to comprehensively evaluate the effect of the imaging sidelap/overlap parameters on the quality of three-dimensional reconstruction in UAV photogrammetry. For this purpose, due to the complexity of the subject and to simplify it, the problem of three-dimensional reconstruction of a hypothetical object point has been analyzed by Monte Carlo analytical simulation using vertical aerial images with different sidelaps/overlaps. The results of the performed experiments in five modes of ideal, excellent, good, medium and bad respectively , show that changing the sidelap/overlap of images can improve the 3D reconstruction error for RMSExy up to 10 times and for RMSExyz up to 5 times. It can also be said that to achieve a higher quality of three-dimensional reconstruction, when the total sidelap/overlap of images is more than 120%, it is better to increase the coverage difference, and when it is less than 120%, it is better to reduce it. In addition, if you want to choose one of sidelap or overlap below 50%, leave the another one between 85% and 95%, or select both above 50% to keep the quality of the 3D reconstruction. In this research, for the first time, a new four step process on the basis of the Pareto front algorithm was introduced in order to identify and select the optimal imaging sidelap/overlap.

Key words : *sidelap/overlap of images, 3D reconstruction, UAV photogrammetry, Simulation, Monte Carlo.*

Correspondence Address*: Photogrammetry Group, School of Surveying and Geo-spatial Information Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Tel*: : +98 21-88008837*
Email : *ali.erfanzadeh@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.6.3]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.105]