

تحلیل رفتار و تأثیر پارامترهای طراحی شبکه فتوگرامتری پهپاد بر روی کیفیت بازسازی سه بعدی به روش شبیه سازی مونت کارلو

علی عرفان زاده^۱

محمد سعادت سرشت^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸

چکیده

آگاهی از رفتار و تأثیر پارامترهای طراحی شبکه فتوگرامتری پهپاد بر روی کیفیت بازسازی سه بعدی برای دستیابی به کیفیتی بهینه در بازسازی سه بعدی، یکی از بخش های مهم در اجرای یک پروژه فتوگرامتری پهپاد با توجه به شرایط و محدودیت های موجود می باشد. اما به دلیل پیچیدگی، زمانبر بودن و هزینه بالای آن در واقعیت، هنوز تحقیق جامعی برای رفتارسنجی پارامترهای طراحی شبکه و بازسازی سه بعدی انجام نشده است. برای غلبه بر چالش های فضای واقعی در این مقاله روش شبیه سازی برای بررسی پارامترها به کار برده شده است. برای این منظور در محیط نرم افزار متلب از یک نقطه با مختصات معلوم تصویربرداری شده است و پس از اعمال خطاهای سیستماتیک و اتفاقی به پارامترها، با استفاده از معادلات شرط هم خطی مشاهدات عکسی و حل آن ها به روش کمترین مربعات خطا، بازسازی سه بعدی انجام شده و کیفیت آن به روش مونت کارلو مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمون های انجام شده نشان می دهد پارامترهای ناپایداری هندسی دوربین غیرمتریک، کیفیت مشاهدات تصویری و دقت مثلث بندی هوایی به ترتیب رابطه مستقیم، رابطه عکس و رابطه مستقیم با کیفیت صحت بازسازی سه بعدی دارند. همچنین با افزایش فاصله کانونی بدون تغییر ارتفاع، صحت مسطحاتی متناسب با افزایش بزرگنمایی و صحت ارتفاعی تقریباً متناسب با مقدار آن افزایش می یابد. که در حالت GSD ثابت، خطای مسطحاتی بازسازی سه بعدی کاهش می یابد اما خطای ارتفاعی متناسب با نصف افزایش بزرگنمایی افزایش می یابد. علاوه بر این نتایج نشان داده است افزایش ارتفاع پرواز برخلاف حالت استریو، خطای مسطحاتی و ارتفاعی بازسازی سه بعدی به صورت خطی افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد با افزایش پوشش تصویربرداری خطای بازسازی سه بعدی کاهش می یابد. این شبیه سازی اگرچه ممکن است کاملاً منطبق بر واقعیت نباشد، اما می تواند یک نوع رفتارسنجی از پارامترها را ارائه نماید که به عنوان یک تحقیق مکمل برای تحقیقات سعی و خطای معمول خواهد بود.

واژه های کلیدی: پارامترهای طراحی شبکه، شبیه سازی، مونت کارلو، کیفیت بازسازی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری دانشگاه تهران ali.erfanzadeh@ut.ac.ir

۲- دانشیار فتوگرامتری دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) msaadat@ut.ac.ir

۱- مقدمه

در فتوگرامتری پهپاد پیشنهاد شده است. همچنین با توجه به پیچیدگی موضوع و برای ساده‌سازی آن، مسئله بازسازی سه‌بعدی برای یک نقطه فرضی زمینی مورد بررسی قرار گرفته است.

در روش پیشنهادی از یک نقطه زمینی با مختصات معلوم با توجه به مقدار تنظیم شده برای پارامترهای طراحی شبکه و انحراف معیار آن‌ها متناسب با واقعیت و تجربه شخص خبره، تصویربرداری به صورت شبیه‌سازی صورت گرفته است. سپس با اعمال خطاهای اتفاقی و سیستماتیک روی مشاهدات تصویری و پارامترهای مثلث‌بندی هوایی، معادلات شرط هم خطی مشاهدات عکسی نقطه مورد نظر را تشکیل داده و با استفاده از روش کمترین مربعات خطا در حل معادلات غیرخطی، بازسازی سه‌بعدی انجام شده است. سپس کیفیت آن به روش مونتکارلو مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مروری بر پیشینه تحقیق:

اولین آزمایش استفاده از پرنده‌های بدون سرنشین برای اهداف فتوگرامتری، در سال ۱۹۷۹ توسط یک پرنده بال ثابت انجام شده است (Eisenbeiss and Zürich, 2009, p. 13). از آن پس با توجه به ظهور دوربین‌های دیجیتال، قابلیت دسترسی، انعطاف بالای این سیستم‌ها و هزینه کمتر آن به عنوان جایگزینی مناسب برای فتوگرامتری هوایی کلاسیک مورد استقبال زیاد کاربران قرار گرفته است (Remondino, Barazzetti, Nex, Scaioni, & Sarazzi, 2011, p. 25).

از آنجا که کیفیت محصولات فتوگرامتری پهپاد تحت تأثیر پارامترهای طراحی شبکه است، از گذشته تا به امروز تحقیقات زیادی در این راستا انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیق SENKAL و همکاران در سال ۲۰۲۱ اشاره کرد که در آن پارامترهای نقاط کنترل زمینی و هوایی، پوشش تصویربرداری و ارتفاع پرواز را بر روی کیفیت مدل سه‌بعدی سطح مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد اختلاف ارتفاع نقاط کنترل تأثیر کمتری نسبت به پارامترهای ارتفاع پرواز

امروزه راهکار فتوگرامتری پهپاد در بین فناوری‌های نقشه‌برداری زمینی و هوایی، تبدیل به یکی از مؤثرترین روش‌های برداشت داده‌های مکانی با توجه به ملاحظات زمان، هزینه، کیفیت و تنوع خروجی‌ها شده است (SENKAL (Rock & et al, 2011, p.69) & et al, 2021, p.82).

آنچه در یک پروژه فتوگرامتری پهپاد از لحاظ معیار کیفیت اهمیت دارد انتخاب مؤثر پارامترهای طراحی شبکه با توجه به شرایط و محدودیت‌های مورد نظر است. این امر با آگاهی کامل از رفتار و تأثیر این پارامترها نسبت به کیفیت بازسازی سه‌بعدی در شرایط و محدودیت‌های مختلف محقق می‌شود.

گرچه تا به امروز تحقیقات متعددی به صورت سعی و خطا برای این منظور انجام پذیرفته، که در آن از پرنده‌ها و دوربین‌های مختلف با ارتفاع پروازها و پوشش‌های مختلف به منظور تصویربرداری استفاده شده سپس داده‌ها با نرم‌افزارهای مختلف پردازش و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است؛ اما به دلیل هزینه و زمان بالای این روش، تا به امروز تحقیق جامعی برای رفتارسنجی پارامترهای طراحی شبکه نسبت به کیفیت بازسازی سه‌بعدی انجام نشده است. در این رابطه پارامترهای مختلفی شامل میدان دید دوربین با تنظیم فاصله کانونی، میزان ناپایداری هندسی پارامترهای توجیه داخلی دوربین، خطاهای موقعیت و تیلت عکس‌برداری در ناوبری پرواز، ارتفاع پرواز و ابعاد پیکسل زمینی طراحی شده، میزان پوشش طولی و عرضی تصاویر، نویز مشاهدات تصویری ناشی از کیفیت تصاویر، خطاهای مثلث‌بندی هوایی در یکپارچه‌سازی تصاویر، در فرآیند تهیه نقشه از تصاویر هوایی پهپاد وجود دارند که می‌توان از آن‌ها به عنوان پارامترهای مؤثر در طراحی شبکه فتوگرامتری پهپاد یاد کرد.

در این مقاله روش شبیه‌سازی، به دلیل انعطاف‌پذیری و سرعت بالا همچنین هزینه کمتر آن برای رفتارسنجی جامع پارامترهای فوق بر روی کیفیت بازسازی سه‌بعدی

افزایش پوشش‌های طولی و عرضی دقت برای نقاط کنترل کاهش یافته و برای نقاط چک رفتاری تصادفی داشته است. آزمایش مربوط به سرعت‌های مختلف پرند نشان می‌دهد که میزان RMSE در نقاط کنترل با افزایش سرعت کاهش یافته و برای نقاط چک رفتاری تصادفی داشته است.

Alidoost و Arefi در سال ۲۰۱۷ تحقیقی در راستای ارزیابی کیفیت نرم‌افزارهای Agisoft Photoscan، Pix4dMapper، SURE و 3Dsurvey انجام داده است. در این تحقیق با در نظر گرفتن پارامترهای دقت مدل سه‌بعدی و کیفیت ابر نقطه از طریق مقایسه پروفیل‌های ارتفاعی، کاربرپسندی، زمان پردازش و چگالی ابر نقطه، نرم‌افزارهای Agisoft Photoscan، Pix4dMapper، SURE و 3Dsurvey به ترتیب بیشترین امتیاز را داشتند.

تحقیق بعدی مربوط به Burns است که در سال ۲۰۱۷ انجام شده است. در این تحقیق کیفیت مدل سه‌بعدی سطح حاصل از دو نرم‌افزار Agisoft Photoscan و Pix4dMapper توسط پارامترهای خطای بازنگری نقاط با مختصات معلوم، خطای مکانی در نقاط با موقعیت‌های معلوم و تعداد عکس‌های به کار گرفته شده در مدل‌سازی سه‌بعدی سطح از کل مجموع تصاویر اخذ شده از ناحیه مورد نظر، ارزیابی شده است. نتایج حاصل از مقایسه پارامترهای فوق در این تحقیق برتری نرم‌افزار Pix4dMapper بر Agisoft Photoscan را نشان داده است.

García و Dolores در سال ۲۰۱۶ تحقیقی مبتنی بر تأثیر پارامترهای پوشش طولی و عرضی تصاویر، ارتفاع پرواز و نقاط کنترل هوایی را بر روی کیفیت هندسی ارتوفتو انجام داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد خطای مسطحاتی با شیب ۰/۳ در ارتفاع پرواز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش پوشش منجر به افزایش دقت شده که این افزایش دقت در ارتفاعات پایین پرواز قابل توجه است.

علاوه بر این Rumbao و همکاران در سال ۲۰۱۶ تحقیقی انجام داده‌اند که در آن تأثیر پارامترهای ارتفاع پرواز و پوشش طولی و عرضی تصاویر روی کیفیت هندسی ارتوفتو

و پوشش‌های تصویربرداری بر روی دقت مدل سه‌بعدی سطح دارند.

در ایران عباسپورو ورشوساز در سال ۱۳۹۷ تحقیقی در راستای تأثیر تعداد و پراکندگی نقاط کنترل بر روی دقت مدل سه‌بعدی حاصل از تصاویر فتوگرامتری پهپاد انجام داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد اضافه شدن نقاط کنترل در مرکز بلوک باعث افزایش دقت ارتفاعی شده و تأثیر کمتری بر روی دقت مسطحاتی دارند. همچنین دادرس جوان و صمدزادگان، در سال ۱۳۹۷ تحقیقی در راستای ارزیابی کیفیت مدل سه‌بعدی سطح در حالت استفاده از مختصات مراکز عدسی به کمک تکنیک PPK^۱ انجام داده‌اند.

Forlani و همکاران در سال ۲۰۱۸ تأثیر نقاط کنترل زمینی و هوایی و کیفیت آن‌ها را بر روی دقت مدل سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش کیفیت مختصات مراکز عدسی دقت مدل سه‌بعدی افزایش یافته و در صورت اضافه شدن یک نقطه کنترل زمینی دقت ارتفاعی مدل سه‌بعدی سطح در حدود دو برابر افزایش می‌یابد.

Boesch و Gindraux در سال ۲۰۱۷ کیفیت هندسی مدل سه‌بعدی سطح حاصل از یک منطقه یخچالی را با توجه به پارامتر نقاط کنترل، ارزیابی کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در صورت پراکندگی مناسب نقاط کنترل، افزایش تعداد نقاط کنترل تا یک محدوده مشخص تأثیر معناداری روی دقت مدل سه‌بعدی دارند که در این مقاله به ۲۰ نقطه کنترل در ۱ کیلومتر اشاره شده است.

Raczynski در سال ۲۰۱۷ تحقیقی انجام داده که در آن تأثیر پارامترهای ارتفاع پرواز، پوشش طولی و عرضی تصاویر همچنین سرعت پرند در ایستگاه‌های عکس‌برداری را بر روی کیفیت هندسی مدل سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد به‌طور کلی افزایش ارتفاع باعث کاهش دقت می‌شود. همچنین نتایج حاصل از بررسی پوشش‌های تصویری در این تحقیق نشان می‌دهد با

سال ۲۰۱۵ اشاره کرد این تحقیق با هدف ارزیابی کیفیت بصری ارتوفتو و کیفیت هندسی مدل سه بعدی حاصل از چهار نرم افزار Agisoft Photoscan، Pix4D Mapper، MicMac و Menci APS انجام شده است. نتایج نشان می دهد به ترتیب MicMac، Agisoft Photoscan، Menci APS و Pix4D Mapper کمترین تا بیشترین مقادیر دقت را داشتند.

تحقیق بعدی، تحقیق Ruzgienė و همکاران در سال ۲۰۱۵ است که در آن تأثیر تعداد، پراکندگی و دقت نقاط کنترل، روی کیفیت مدل سه بعدی سطح ارزیابی شده است. نتایج نشان می دهد که پراکندگی نقاط کنترل بیشتر از تعداد نقاط کنترل بر روی دقت مدل سه بعدی سطح تأثیرگذار است.

Barry و Coakley در سال ۲۰۱۵ اقدام به ارزیابی کیفیت هندسی محصولات فتوگرامتری پهپاد کرده اند. نتایج حاصل از این مطالعه دستیابی به دقت مسطحاتی ۴۱ میلی متر برای ارتوفتو و دقت ارتفاعی ۶۸ میلی متر برای مدل سه بعدی با استفاده از ۱۰ نقطه کنترل را نشان می دهد.

Mesas-Carrascosa و همکاران در سال ۲۰۱۵، تأثیر پارامترهای ارتفاع پرواز، حالات پرواز stop و cursing پرنده در ایستگاه های عکس برداری و پوشش اضافی پرواز را بر روی کیفیت هندسی ارتوفتو مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج نشان می دهد با افزایش ارتفاع، دقت مسطحاتی ارتوفتو کاهش می یابد. علاوه بر این، هنگام پرواز با ۱۰ درصد پوشش اضافی از منطقه مورد مطالعه، دقت ارتوفتو در حدود ۳ سانتی متر افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می دهند پرواز در حالت cursing به دلیل پایداری بیشتر پهپاد و جهت آن در ایستگاه های عکس برداری دقت بیشتری نسبت به حالت stop داشته است.

Shahbazi در سال ۲۰۱۵، تأثیر پارامترهای قرائت عکسی، توپوگرافی نقاط کنترل و قابلیت دید و کیفیت رادیومتریکی تصاویر را بر روی کیفیت هندسی مدل سه بعدی سطح، مورد بررسی قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان داده است در صورتی که تارگت ها به صورت اتوماتیک در تصاویر قرائت شوند نسبت به حالت استخراج دستی توسط کاربر،

مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد همیشه افزایش ارتفاع منجر به مقادیر RMSE بالا نمی شود. علاوه بر این، افزایش پوشش ها باعث افزایش دقت، استحکام و اعتمادپذیری در نتایج می شود.

Gerke و Przybilla در سال ۲۰۱۶ تحقیقی انجام دادند که در آن تأثیر توپوگرافی منطقه، پرواز متقاطع با ارتفاع کمتر از بخشی از منطقه مورد مطالعه و پخش و تعداد نقاط کنترل زمینی و هوایی را بر روی کیفیت هندسی مدل سه بعدی سطح، مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد به طور کلی پرواز متقاطع باعث افزایش دقت شده است، که برای منطقه با توپوگرافی خشن این افزایش دقت ناچیز بوده ولی در توپوگرافی هموار و در حالت تعداد نقاط کنترل کمتر افزایش دقت برای مؤلفه ی ارتفاعی قابل توجه است. همچنین نشان داده شده است با اضافه شدن موقعیت مراکز تصویر که به روش کینماتیک آبی فراهم شده، افزایش دقت مسطحاتی و ارتفاعی ناشی از پرواز متقاطع قابل توجه نمی باشند.

Niederheiser و همکاران در سال ۲۰۱۶ تحقیقی در راستای ارزیابی کیفیت ابر نقطه نرم افزارهای Agisoft Photoscan، Pix4dMapper، SURE و MicMac انجام دادند. نتایج نشان می دهند ابر نقطه دو نرم افزار Agisoft Photoscan و MicMac کامل تر بوده و مناطق گیاهی را بهتر از دو نرم افزار دیگر پوشش داده است. همچنین نتایج نشان می دهند افزایش کیفیت دوربین رابطه مستقیم با تراکم ابر نقطه دارد.

Leitão و همکاران در سال ۲۰۱۶ میزان تأثیر پارامترهای ارتفاع پرواز، پوشش های طولی و عرضی، زاویه تیلت عکس برداری و شرایط آب و هوایی را بر روی کیفیت هندسی مدل ارتفاعی زمین مورد بررسی قرار داده اند. این تحقیق نشان می دهد پارامتر ارتفاع پرواز بیشترین تأثیر را بر روی کیفیت مدل ارتفاعی دارد و شرایط آب و هوایی ابری کیفیت بهتری نسبت به شرایط آفتابی دارد.

علاوه بر این می توان به تحقیق Mendes و همکاران در

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س)

تحلیل رفتار و تأثیر پارامترهای طراحی شبکه فتوگرامتری پهپاد ... / ۳۱

نقاط حاصل از چهار نرم افزار Agisoft Photoscan، MicMac، Pix4dMapper و PMVS را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج حاصله با مقایسه کیفیت بصری و هندسی از طریق پروفیل‌های ارتفاعی نشان می‌دهد که دو نرم افزار Agisoft Photoscan و SURE نسبت به دو نرم افزار دیگر از کیفیت بالایی برخوردار بوده‌اند.

در تحقیقی دیگر، Cryderman و همکاران در سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهند دقت حاصل از فتوگرامتری پهپاد برای تهیه نقشه ۱/۲۰۰ و منحنی میزان ۰/۱۴ متر کفایت می‌کند. در مطالعه دیگری Tahar در سال ۲۰۱۳ نشان می‌دهد با اضافه شدن نقاط کنترل در محدوده‌های مرکز بلوک فتوگرامتری دقت ارتفاعی با شیب بیشتری نسبت به دقت مسطحاتی افزایش می‌یابد.

Rock و همکاران در سال ۲۰۱۱ در تحقیق خود نشان داده‌اند با افزایش تعداد نقاط کنترل زمینی کیفیت مثلث‌بندی هوایی و مدل ارتفاعی زمین افزایش می‌یابد. در مطالعه دیگری Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۱ کیفیت محصولات فتوگرامتری پهپاد را مورد ارزیابی قرار دادند. این تحقیق نشان می‌دهد در فتوگرامتری پهپاد می‌توان به دقتی مناسب برای تهیه نقشه ۱/۵۰۰ دست یافت.

Haarbrink و همکاران در سال ۲۰۰۸ کیفیت مدل سه‌بعدی سطح حاصل از تصاویر فتوگرامتری پهپاد را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق برای پوشش‌های طولی و عرضی به ترتیب ۶۰ و ۳۰ و ارتفاع پرواز ۱۰۰ متری دقت مسطحاتی و ارتفاعی را به ترتیب ۰/۰۲ متر و ۰/۰۴ متر نشان می‌دهد.

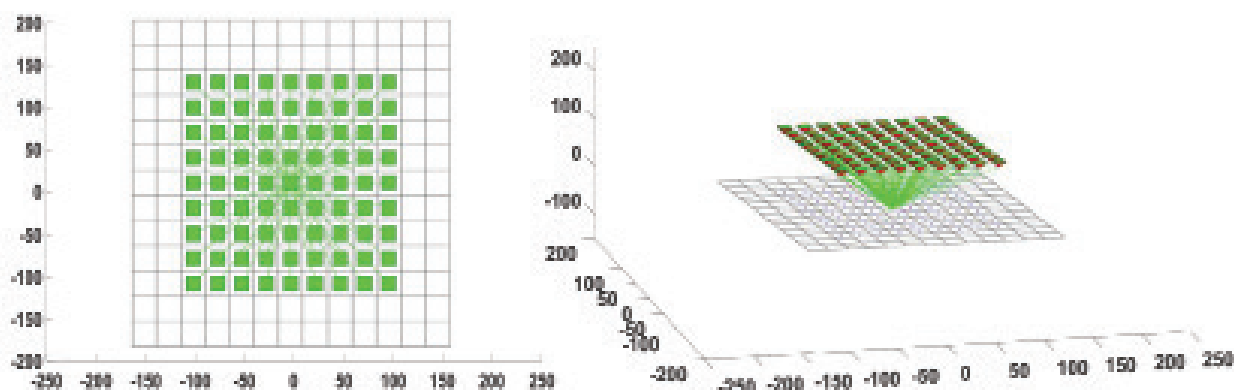
تحقیقات فوق اگرچه اطلاعات مفیدی در زمینه پارامترهای طراحی شبکه و تأثیرات آن‌ها بر روی محصولات مختلف فتوگرامتری پهپاد در اختیار کاربران قرار می‌دهد اما هنوز کاربران این حرفه به دلیل عدم جامعیت این تحقیقات در بررسی پارامترها همچنین عدم ارائه یک رابطه بین مقادیر دقت محصولات و مقادیر پارامترها و نتایج گوناگون در تحقیقات مختلف، در انتخاب بهینه پارامترها با توجه

کالیبراسیون در حدود ۰/۸۱ بهبود می‌یابد. همچنین نشان می‌دهد در صورت حذف سایه‌ها از طریق انطباق هیستوگرام تصاویر، دقت ارتفاعی در حدود ۰/۶ سانتی‌متر و مسطحاتی ۱ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. در مورد تأثیر نقاط کنترل، دقت در حالتی که نقاط کنترل قابلیت دید بهتری داشته باشند نسبت به حالتی که نقاط کنترل قابلیت دید کمتری داشته باشند ولی از توپوگرافی ارتفاعی مناسبی برخوردار باشند در حدود سه برابر است.

Harwin و همکاران در سال ۲۰۱۵ تأثیر روش‌های کالیبراسیون را بر روی کیفیت مدل سه‌بعدی سطح مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد به‌طور کلی self-calibration دقت بیشتری را نسبت به pre-calibration برای دقت نهایی مدل ارائه می‌دهد. همچنین نشان داده شده است self-calibration و pre-calibration با تعداد نقاط کنترل بیشتر، نتایج بهتری نسبت به استفاده از تعداد نقاط کنترل کمتر دارد. Self-calibration و pre-calibration با استفاده از تصاویر قایم و مایل، نتایج بهتری نسبت به استفاده از تصاویر قائم داشته و این تأثیر در روش self-calibration و نقاط کنترل با دقت پایین بیشتر نمایان می‌شود.

در تحقیقی دیگر Bhandari و همکاران در سال ۲۰۱۵ کیفیت مدل سه‌بعدی سطح حاصل از سه نرم افزار Agisoft Photoscan، Pix4dMapper و LPS را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد بیشترین دقت را نرم افزار Pix4dMapper داشته و نرم افزار Agisoft Photoscan فقط دقت بیشتری نسبت به LPS ارائه می‌دهد.

در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۴ Turner و همکاران کیفیت ارتوفتو حاصل از سه نرم افزار Agisoft Photoscan و Pix4dMapper و Budler را به روش زمین مرجع‌سازی مستقیم مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج حاصله نشان می‌دهد دقت ارتوفتو حاصل از نرم افزار Agisoft Photoscan ۰/۱۱ متر، Pix4dMapper ۰/۲۴ متر و روش Budler، ۰/۷۶ متر است. Remondino و همکاران در سال ۲۰۱۴ کیفیت ابر



نگاره ۱: شبیه‌سازی پارامترهای توجیه خارجی دوربین در حالت ایده‌آل

با پوشش طولی p_x و عرضی p_y مشخص ($0 < p_x, p_y < 1$) در راستای محور xy پرواز و عکس‌برداری قائم انجام می‌دهد که بر این اساس پارامترهای توجیه خارجی EOP^۱ برای هر ایستگاه تصویربرداری در شرایط ایده‌آل به‌دست می‌آید. ارتفاع پرواز اولیه h_0 را طوری در نظر می‌گیریم که براساس استاندارد GSD^۲ مورد نیاز نقشه درخواستی تأمین شود (برای نقشه ۱:۵۰۰-۱:۱۰۰۰-۱:۲۰۰۰ مقدار GSD_0 برابر ۴-۸-۱۶ سانتی‌متر است). لذا طبق رابطه (۱) ارتفاع پرواز به‌دست می‌آید. که در آن ps ابعاد پیکسل سنجنده و c_0 فاصله اصلی اولیه می‌باشد. چون در حالت واقعی، تغییراتی را در پارامترهای توجیه خارجی خواهیم داشت به دلیل موضوع قابلیت دید، در این مرحله در دو سر هر نوار یک عکس اضافی و در بالا و پایین بلوک دو نوار اضافی در نظر می‌گیریم. بعداً با تغییر ضریب ارتفاع پرواز $0.5 < k_h < 2$ می‌توان ارتفاع پرواز را طبق رابطه (۲) تغییر داد. لازم به ذکر است در این مقاله ارتفاع پرواز برای فاصله نمونه‌برداری زمینی برابر با ۸ سانتی‌متر تنظیم شده و آزمون‌ها انجام شده است.

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

$$h = k_h \cdot h_0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

به هدف، شرایط و هزینه‌ها با چالش‌های زیادی مواجه می‌شوند. از این‌رو با توجه به تنوع سنجنده‌های غیرمتریک فتوگرامتری پهپاد و شرایط محیطی مختلف، نیاز به تحلیل سیستماتیک انواع پارامترهای طراحی شبکه و میزان تأثیر آن‌ها بر کیفیت بازسازی سه‌بعدی کاملاً دیده می‌شود که در این تحقیق به آن پرداخته شده است.

۲- تشریح گام به گام روش شبیه‌سازی تحلیلی صحت بازسازی سه‌بعدی

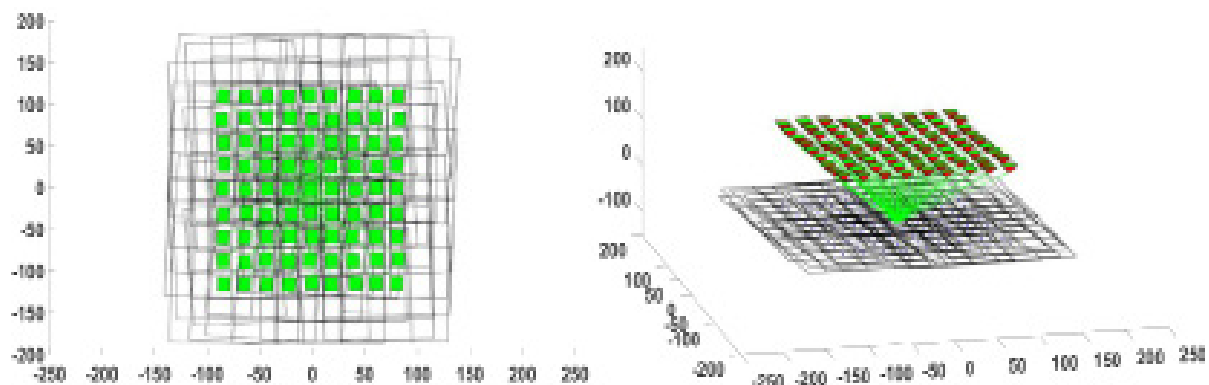
همانطور که در بخش قبل ذکر شد روش پیشنهادی با توجه به سرعت بالا و هزینه کمتر، برای بررسی رفتار پارامترهای طراحی شبکه بر روی کیفیت بازسازی نقاط به روش فتوگرامتری پهپاد، مبتنی بر استفاده از محیط شبیه‌سازی تحلیلی به روش مونت کارلو انتخاب شده است. در ادامه مراحل لازم برای انجام شبیه‌سازی بازسازی سه‌بعدی در فتوگرامتری پهپاد برای یک نقطه فرضی توضیح داده می‌شود.

۲-۱- شبیه‌سازی پارامترهای توجیه خارجی دوربین در حالت ایده‌آل

مطابق نگاره ۱ یک نقطه فرضی سه‌بعدی با مختصات $X=[0 \ 0 \ 0]$ را در نظر بگیرید. فرض کنید که پرنده فرضی در محوطه بالای این نقطه در ارتفاع h_0 در نوارهای متعدد

1- Exterior Orientation Parameter

2- Ground Sampling Distance



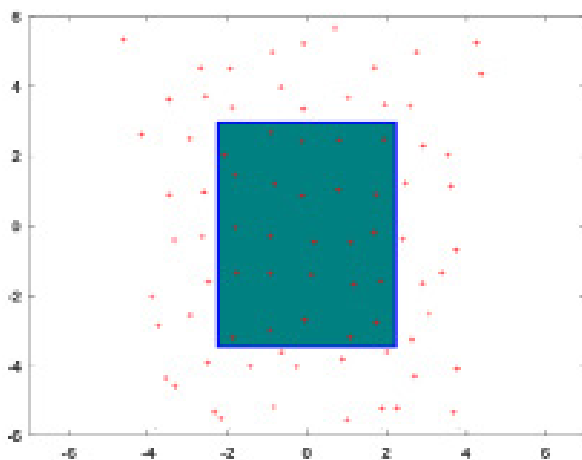
نگاره ۲: شبیه‌سازی پارامترهای توجیه خارجی در حالت واقعی

آورد که در آن مختصات مرکز تصویر و R_i ماتریس دوران ایستگاه تصویربرداری نام می‌باشد. سپس با شرط هم‌خطی می‌توان مختصات عکسی ایده‌آل مربوط به نقطه فرضی را طبق رابطه (۵) در هر عکس به‌دست آورد که در آن $X'_i = [X'_i, Y'_i, Z'_i]$ مختصات نقطه زمینی در سیستم مختصات دوربین و c فاصله اصلی عدسی دوربین می‌باشد. در نگاره ۳ تمامی نقاط عکسی مربوط به عکس‌های مختلف در یک فریم کنار هم نشان داده شده‌اند. تنها نقاط فریم قابل دید می‌باشند.

$$X'_i = R'_i(X - T_i) = -R'_i T_i \quad \text{رابطه (۴)}$$

و

$$x_i = -c \frac{X'_i}{Z'_i}, y_i = -c \frac{Y'_i}{Z'_i} \quad \text{رابطه (۵)}$$



نگاره ۳: محاسبه مختصات عکسی ایده‌آل نقطه فرضی در هر عکس (میلی‌متر)

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

در فتوگرامتری پهپاد به‌واسطه سبک بودن پرنده، تأثیر شرایط آب و هوایی بر آن و خطاهای ناوبری، پارامترهای توجیه خارجی (EOP') در لحظه اخذ هر تصویر دارای اختلاف موقعیت و وضعیت نسبت به شرایط ایده‌آل (EOP) می‌باشند. از این‌رو برای شبیه‌سازی ناپایداری پارامترهای توجیه خارجی EOP' یک سطح از خطای اتفاقی به پارامترهای توجیه خارجی هر عکس مطابق رابطه (۳) اعمال می‌شود. اگر فرض شود که تابع توزیع این خطاها رفتاری گوسی شکل دارد دو انحراف معیار زاویه‌ای S_p و موقعیتی S_p توسط کاربر تعریف می‌شود. لذا

$$EOP' = EOP + dEOP$$

و

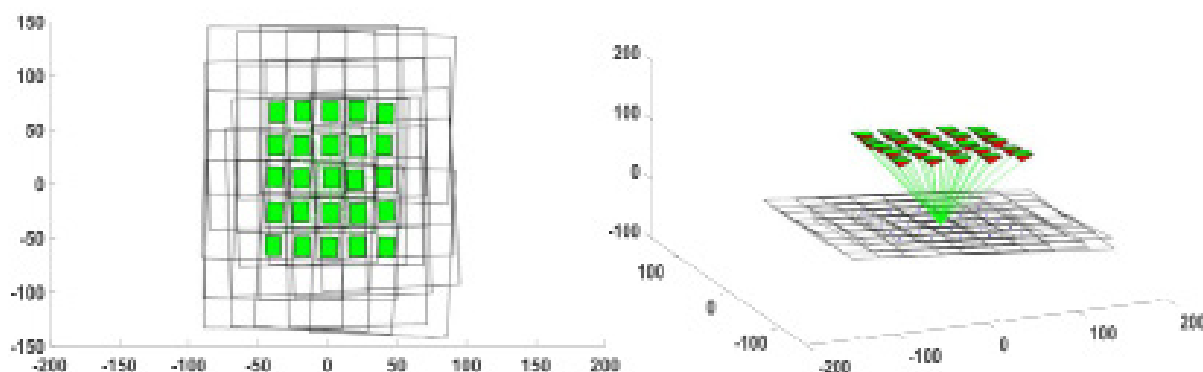
$$dEOP = [N(0, S_p), N(0, S_p), N(0, S_p), N(0, S_a), N(0, S_a), N(0, S_a)]$$

رابطه (۳)

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

۲-۳- 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) به‌دست



نگاره ۴: بررسی قابلیت دید نقطه فرضی در هر عکس

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 و $N(0, S_{dIOP})$ یک مقدار اتفاقی از تابع توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار S_{dIOP} می‌باشد. مقادیر $dIOP$ نشان‌دهنده ناپایداری دوربین غیرمتریک است و باعث می‌شود پارامترهای توجیه داخلی به‌طور دقیق در بازسازی سه‌بعدی به‌کار گرفته نشوند. توجه شود که اگرچه IOP و $dIOP$ برای تمامی تصاویر ثابت می‌باشد 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 ۴ پرو استفاده شده است (جدول ۱).

$$c = k_c \cdot c_0 \quad \text{و} \quad 0.5 \leq k_c \leq 2 \quad \text{رابطه (۷)}$$

و

$$GSD = \frac{ps \cdot h}{c} \quad \text{رابطه (۸)}$$

برای شبیه‌سازی ناپایداری پارامترهای توجیه داخلی دوربین، مقادیر پارامترهای فوق IOP و انحراف معیار S_{dIOP} هر یک از آن‌ها را از خروجی کالیبراسیون دوربین یک مثال واقعی در نظر می‌گیریم. اکنون براساس تابع توزیع گوسی $N(0, S_{dIOP})$ تغییرات هر پارامتر را به‌صورت اتفاقی حساب

۲-۴- بررسی قابلیت دید نقطه فرضی در هر عکس

اگر مختصات عکسی خارج از محدوده عکس باشد نقطه در عکس غیرقابل دید بوده و در محاسبات تقاطع فضایی، این عکس باید کنار گذاشته شود (نگاره ۴). از این‌رو دو شرط رابطه (۶) برای هر عکس باید برقرار باشد.

$$|x_i| = \frac{ps \cdot b}{2}$$

و

$$|y_i| = \frac{ps \cdot a}{2}$$

رابطه (۶)

در روابط فوق a, b و ابعاد سنجنده $(a \geq b)$ و ps ابعاد پیکسل به میکرون می‌باشد.

۲-۵- شبیه‌سازی پارامترهای توجیه داخلی دوربین

غیرمتریک و ناپایدار

دوربین رقومی با فاصله اصلی c_0 و ابعاد سنجنده $[a, b]$ پیکسل $(a \geq b)$ با ابعاد پیکسل ps میکرون را در نظر بگیرید (a در راستای y و b در راستای x است). سپس با تغییر ضریب فاصله اصلی می‌توان فاصله اصلی را طبق روابط (۷) تغییر داد. در این صورت فاصله نمونه‌برداری زمینی طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود. فرض کنید این دوربین دارای پارامترهای توجیه داخلی و اضافی مشخص و ثابت IOP شامل پارامترهای توجیه داخلی c, x_0, y_0 ، اعوجاج شعاعی عدسی k_1, k_2, k_3, k_4 ، اعوجاج خروج از مرکز عدسی P_1, P_2, P_3, P_4 و افینیتی B_1, B_2 بوده که نشان‌دهنده میزان

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 غیرمتریک است از رابطه $d\Delta x = \Delta x_{IOP'} - \Delta x_{IOP}$ و $d\Delta y = \Delta y_{IOP'} - \Delta y_{IOP}$ حاصل شود. از آنجا که برای شبیه‌سازی در نظر است تا کاربر متوسط اعوجاجات عکسی $d\Delta x, d\Delta y$ ناشی از ناپایداری دوربین را بر حسب پیکسل T به عنوان ورودی معرفی کند، بزرگی بردارهای گرید اعوجاجات عکسی را در یک فاکتور مقیاس طبق رابطه (۹) که در آن m تعداد رئوس گرید است ضرب می‌کنیم. به این ترتیب میانگین بزرگی اعوجاجات گرید برابر T خواهد شد.

رابطه (۹)

$$T = \frac{\sum (\Delta x^2 + \Delta y^2)}{m}$$

۶-۲- 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 bilinear میزان اعوجاجات مربوط به مشاهدات عکسی محاسبه و به مختصات عکسی با استفاده از رابطه $x' = x + d\Delta x$ و

۷-۲- اعمال نویز تصادفی به مشاهدات عکسی

با توجه به کیفیت تصاویر که بسته به میزان ISO، کشیدگی، روشنایی و کنتراست تصویر تغییر می‌کند یک سطح از نویز اتفاقی با تابع توزیع گوسی $N(0, S_0)$ که در آن S_0 انحراف معیار نویز مشاهدات بوده و یکسان برای همه تصاویر است به مشاهدات عکسی طبق رابطه (۱۰) اعمال می‌شود (نگاره ۵-چپ). اگر S_0 در واحد پیکسل باشد آنگاه کافی است آن را در p_s ضرب کرد تا به واحد متریک تبدیل شده و هم واحد مختصات x y شود.

$$x'' = x' + N(0, S_0) \text{ و } y'' = y' + N(0, S_0)$$

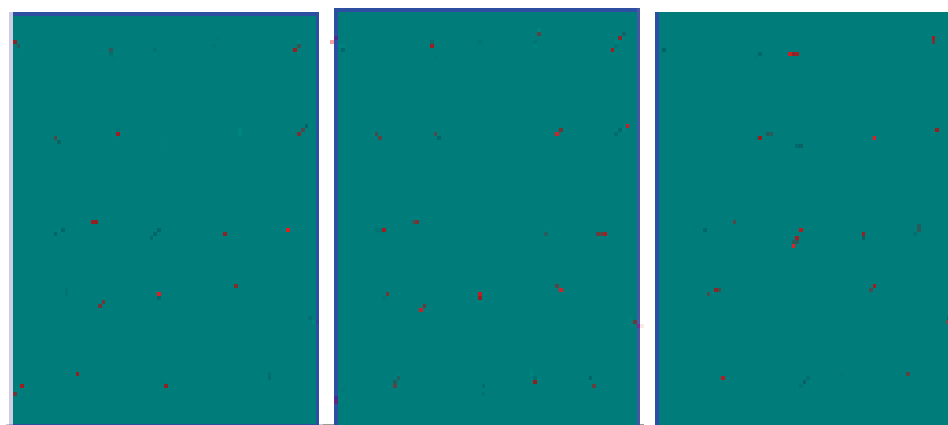
رابطه (۱۰)

۸-۲- اعمال نویز تصادفی به پارامترهای توجیه خارجی

در این مرحله قبل از بازسازی سه‌بعدی، خطاهای مثلث‌بندی هوایی در قالب اعمال نویز مطابق روابط (۱۱) به پارامترهای توجیه خارجی شبیه‌سازی می‌شود. اگر فرض

جدول ۱: پارامترهای توجیه داخلی و دقت آن‌ها برای دوربین به کار رفته در پهپاد فانتوم ۴

پارامتر	واحد	IOP calibration	IOP std dev	IOP real
c	میلی‌متر	3.589100000000	0.016200000000	3.594910658612
XP	میلی‌متر	-0.024200000000	0.000600000000	-0.024113756618
YP	میلی‌متر	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



نگاره ۵: اعمال اعوجاجات ناشی از ناپایداری دوربین به مختصات عکسی (وسط)، اعمال نویز تصادفی به مشاهدات عکسی (چپ) و برآیند این دو (راست)

$$F(X) = \sum \left[\left(x_i'' - \frac{c \cdot R_{1i} - (X - T_i)}{R_{2i}(X - T_i)} \right)^2 + \left(y_i'' - \frac{c \cdot R_{2i} - (X - T_i)}{R_{2i}(X - T_i)} \right)^2 \right] \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در روابط فوق R_{123} ترانهاده ستون‌های اول تا سوم ماتریس دوران هر عکس است. برای حل مسئله کافی است از نسبت F به X مشتق گرفته و برابر صفر قرار دهیم. با حل سه معادله و سه مجهول، مختصات سه‌بعدی نقطه فرضی X' بازسازی می‌شود به‌طوری که $F(x) \rightarrow \min$. برای این منظور از روش کمترین مربعات غیرخطی با دستور lsqnonlin در Matlab استفاده شده است که در آن مقدار اولیه $[0,0,0]$ به‌عنوان نقطه شروع و روش Levenberg-Marquardt برای تعیین گام‌های بعدی بهینه‌سازی استفاده شده است.

۲-۱۰- برآورد کیفیت بازسازی سه‌بعدی

بازسازی سه‌بعدی برای کل n تکرار مونت کارلو (در اینجا $n=100$) انجام می‌شود تا در اطراف $X=[0 \ 0 \ 0]$ نقاط $X'=[X', Y', Z']$ به‌صورت پراکنده بازسازی شوند. اکنون فاصله مسطحاتی و ارتفاعی این نقاط از مبدأ مطابق روابط (۱۳) که نشان‌دهنده صحت مسطحاتی و ارتفاعی بازسازی سه‌بعدی است محاسبه می‌شود.

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum Z'^2}{n}}, RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum X'^2}{n}}, RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum Y'^2}{n}}$$

$$RMSE_{XYZ} = \sqrt{\frac{\sum X'^2 + Y'^2 + Z'^2}{n}}, RMSE_{XY} = \sqrt{\frac{\sum X'^2 + Y'^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

شود که تابع توزیع این خطاها رفتاری گوسی شکل دارد دو انحراف معیار زاویه‌ای S_{ATa} و موقعیتی S_{ATp} توسط کاربر تعریف می‌شود.

توجه شود که ماهیت این خطاهای اتفاقی با خطاهای S_p و S_a که برای واقعی سازی پارامترهای توجیه خارجی در مرحله دوم اعمال شد متفاوت است. از آنجا که کاربر خطای مثلث‌بندی را براساس ضریبی از ابعاد پیکسل زمینی GSD معرفی می‌کند می‌توان از روابط (۱۱) این خطاها را محاسبه نمود. که در آن k_p و k_a ضرایب خطاهای موقعیتی و دورانی مثلث‌بندی هوایی بر حسب GSD هستند.

$$S_{ATa} = \frac{k_a \cdot GSD}{h} \text{ و } S_{ATp} = k_p \cdot GSD$$

و

$$EOP'' = EOP' + N(0, S_{AT})$$

رابطه (۱۱)

۲-۹- بازسازی سه‌بعدی نقطه فرضی

تا اینجا پارامترهای توجیه داخلی و خارجی و مشاهدات عکسی با اعمال خطاهای اتفاقی و سیستماتیک در دست می‌باشند. اکنون می‌توان با اعمال الگوریتم تقاطع فضایی روی مختصات دوبعدی عکسی $x''y''$ و پارامترهای توجیه خارجی EOP'' ، مختصات سه‌بعدی زمینی نقطه فرضی را به دست آورد به‌طوری که مجموع مربعات باقیمانده‌های عکسی کمینه شود. برای این منظور کافی است براساس شرط هم خطی رابطه (۱۲) کمینه شود.

جدول ۲: مقدار پارامترها، انحراف معیار و بازه تغییرات آن‌ها برای پنج حالت ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد

پارامتر/حالت	واحد	ایده‌آل	عالی	خوب	متوسط	بد	تغییرات
S_a	درجه	۰	۱	۲	۴	۸	۰:۰/۴:۸
S_p	متر	۰	۰/۲	۰/۵	۱	۵	۰:۰/۲۵:۵
T	-	۰/۰۲۵	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۱	۰:۰/۰۵:۱
S_o	پیکسل	۰/۰۵	۰/۲	۰/۴	۱	۲	۰:۰/۱:۲
k_a	GSD	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۱	۲	۰:۰/۱:۲
k_p	GSD	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۱	۲	۰:۰/۱:۲
P_x+P_y	درصد	۹۰+۸۰	۸۰+۸۰	۷۰+۸۰	۶۰+۸۰	۶۰+۶۰	۹۰:۵:۱۹۰
k_c	-	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۵:۰/۷۵:۲
k_h	-	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۵:۰/۷۵:۲

جدول (۲) مقادیر اولیه و تغییرات هر پارامتر را نشان می‌دهد. در ادامه، گراف‌های مختلف صحت مسطحاتی و ارتفاعی بازسازی سه‌بعدی برای آزمون‌های فوق مورد بررسی قرار گرفته و نتایج کلی ارائه می‌شود. لازم به ذکر است در این مقاله ارتفاع پرواز برای فاصله نمونه‌برداری زمینی برابر با ۸ سانتی‌متر و فاصله کانونی طبق جدول (۱) تنظیم شده و آزمون‌ها انجام شده‌اند.

۳-۱- آزمون تأثیر ناپایداری سکوی پرواز در حین

تصویربرداری بر صحت بازسازی سه‌بعدی

افزایش ناپایداری سکوی تصویربرداری تأثیر معنی‌داری روی متوسط صحت بازسازی سه‌بعدی مطابق نگاره ۶ ندارد اگرچه به‌صورت اتفاقی در بعضی حالات مرزی به‌واسطه تیلت، ناهمگونی پوشش‌ها و آفست عکس‌ها، قابلیت دید در بعضی نقاط از دست رفته و در بعضی نقاط افزایش یافته که به‌دنبال آن شاهد کاهش یا افزایش حداکثر ۲۰ درصدی صحت بازسازی سه‌بعدی هستیم.

۳-۲- آزمون تأثیر ناپایداری دوربین بر صحت بازسازی سه‌بعدی

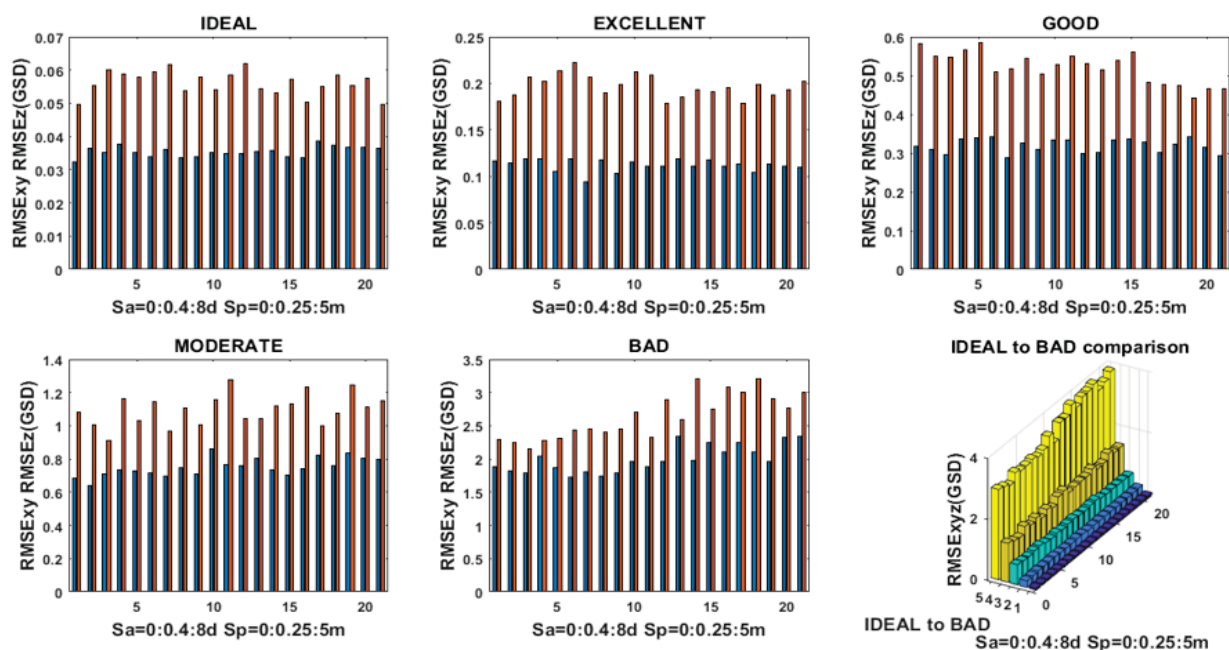
با افزایش ناپایداری دوربین، صحت بازسازی سه‌بعدی مطابق نگاره ۷ به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. هر چه شرایط تصویربرداری و کیفیت دوربین بدتر شود، سرعت کاهش

۳- آزمون‌های رفتارسنجی و تأثیر پارامترهای طراحی

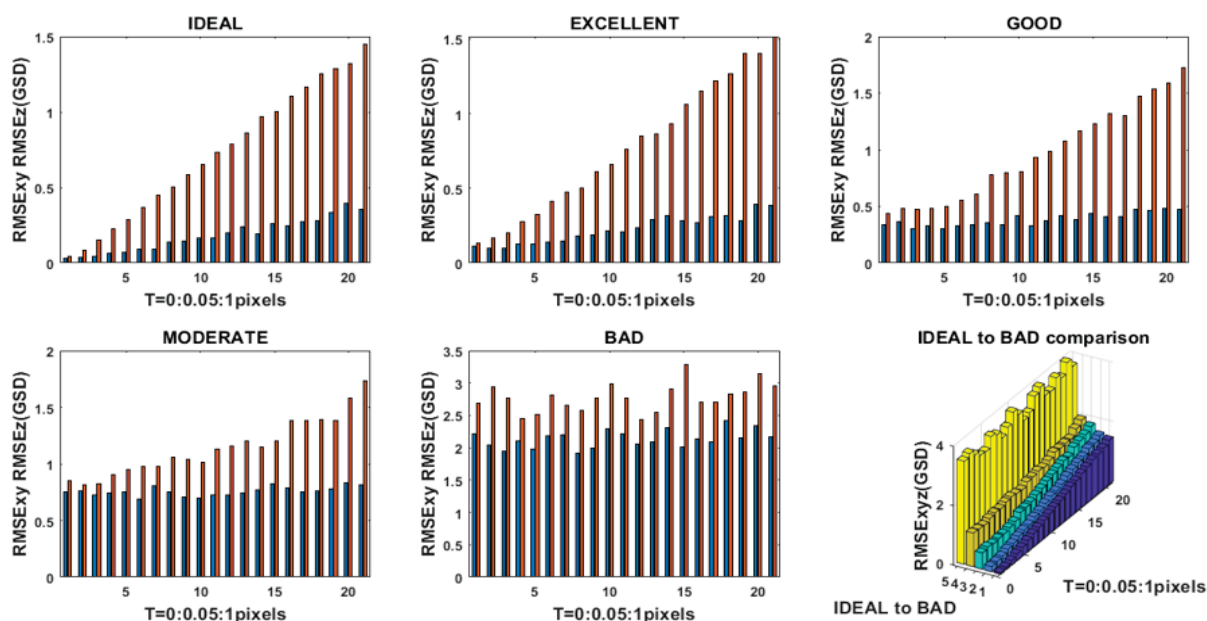
شبکه بر صحت بازسازی سه‌بعدی

با توجه به اجرای گام‌های بخش قبل، اکنون کاربر می‌تواند ده پارامتر ضریب فاصله اصلی k_c ، ضریب ارتفاع پرواز k_h ، میزان ناپایداری هندسی دوربین T، انحراف معیار زاویه‌ای S_a و موقعیتی S_p خطاهای ناوبری پرواز، میزان پوشش طولی P_x و عرضی P_y تصاویر، انحراف معیار نویز مشاهدات تصویری S_o ، ضرایب خطاهای موقعیتی k_p و دورانی k_a مثلث‌بندی هوایی را مطابق ستون تغییرات جدول (۲) تغییر داده و کیفیت بازسازی سه‌بعدی را در حالات مختلف برآورد نماید. لازم به ذکر است که مقدار اولیه مشخصی برای هر پارامتر در پنج حالت ایده‌آل، عالی، خوب، متوسط و بد با توجه به شرایط واقعی و براساس تجربیات فرد خبره در نظر گرفته شده است (جدول ۲). که این امر موجب دستیابی به نتایج با اطمینان بالا می‌شود. و شبیه‌سازی به روش مونت‌کارلو با ۱۰۰ بار تکرار انجام می‌شود. در روش مونت‌کارلو به‌جای مدل‌سازی آماری نویز مشاهدات و پارامترها مثلاً با تابع توزیع گوسین و به‌کارگیری روابط انتشار خطا، با تکرار الگوریتم بازسازی، نتایج مختلفی حاصل آمده و رفتار آماری نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد^۱.

1- (Design et al., 2012, p.740) (Mooney, 1997, p.5) (www.palissade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp)



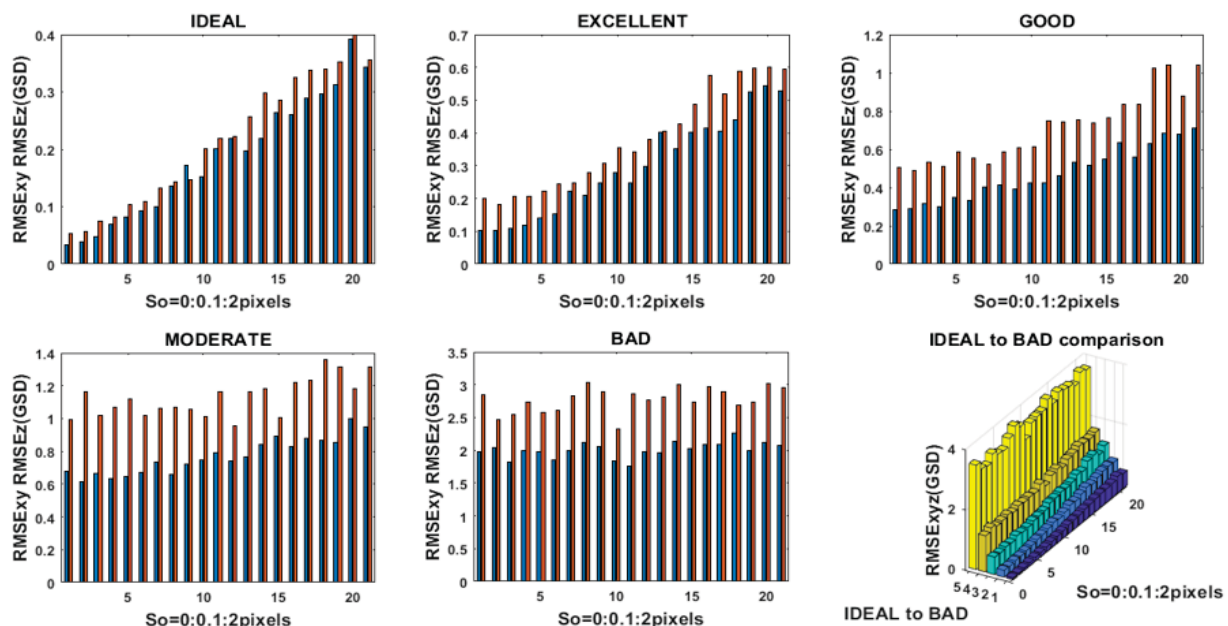
نگاره ۶: نتایج حاصل از آزمون تأثیر ناپایداری سکوی پرواز در حین تصویربرداری بر صحت بازسازی سه‌بعدی



نگاره ۷: نتایج حاصل از آزمون تأثیر ناپایداری دوربین بر صحت بازسازی سه‌بعدی

کمتر می‌شود به طوری که در حالت بد، صحت بازسازی سه‌بعدی تقریباً بدون کاهش و ثابت است. همچنین صحت ارتفاعی به مسطحاتی نزدیک‌تر می‌شود به طوری که در حالت ایده‌آل تا ۳ برابر و در حالت بد به کمتر از ۱/۵ برابر می‌رسد.

۳-۳- آزمون تأثیر کیفیت تصویر بر صحت بازسازی هرچه کیفیت تصاویر به واسطه افزایش سطح نویز و تار شدن آن کاهش یابد خطای اتفاقی مشاهدات تصویری افزایش یافته و صحت بازسازی سه‌بعدی مطابق نگاره ۸



نگاره ۸: نتایج حاصل از آزمون تأثیر کیفیت تصویر بر صحت بازسازی سه‌بعدی

نگاره ۹ نشان می‌دهد خطای بازسازی سه‌بعدی با افزایش خطای مثلث‌بندی هوایی به صورت خطی افزایش می‌یابد. اگر خطای مثلث‌بندی هوایی از صفر به دو GSD افزایش یابد آنگاه در حالت ایده‌آل تا بد خطای بازسازی سه‌بعدی به ترتیب ۲۵، ۶، ۴، ۲ و ۱/۵ برابر خواهد شد.

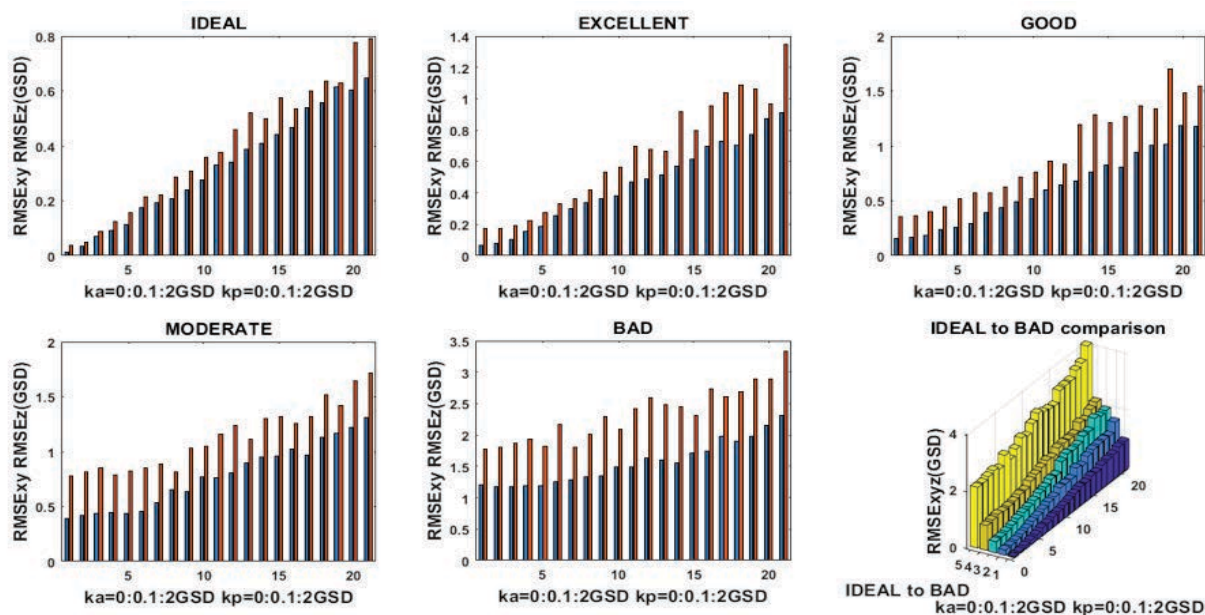
کاهش می‌یابد. این کاهش در حالت ایده‌آل تا بد به صورت نسبتاً خطی بوده و برای نویز ۲ پیکسل بین ۱۰، ۳، ۲، ۱/۵ و ۱ برابر حالت بدون نویز است به طوری که در حالت بد تأثیر این خطا به واسطه خطاهای دیگر بسیار ناچیز است.

۳-۴- آزمون تأثیر خطای مثلث‌بندی هوایی بر صحت بازسازی سه‌بعدی

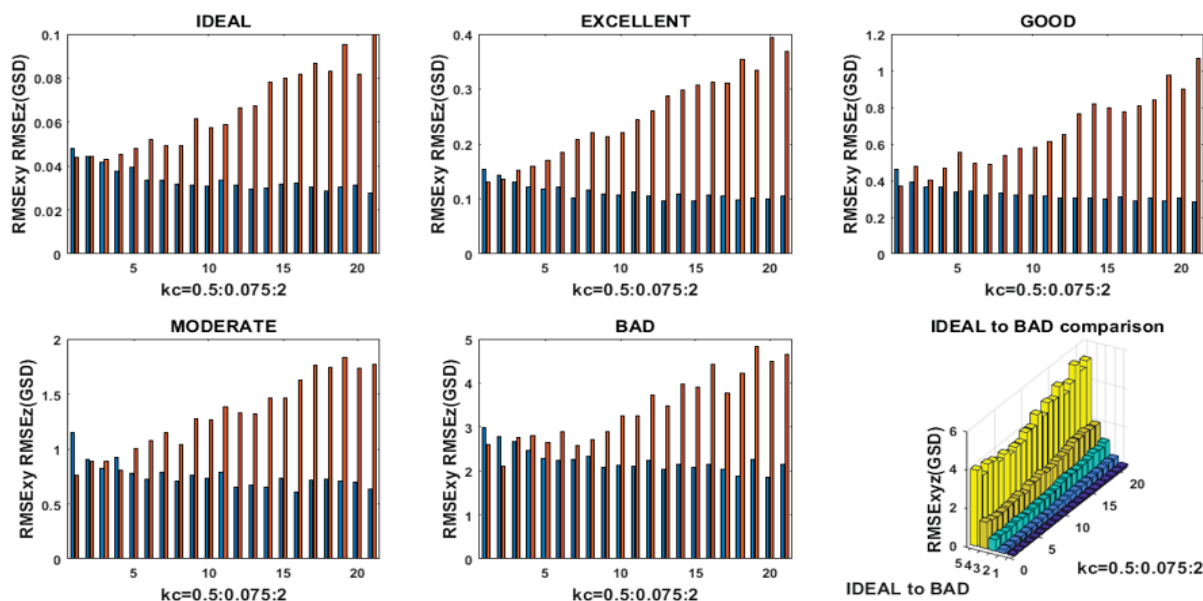
۳-۵- آزمون تأثیر میدان دید عدسی بر صحت بازسازی سه‌بعدی (GSD ثابت)

مطابق نگاره ۱۰ با کاهش میدان دید و افزایش بزرگنمایی یا فاصله کانونی دوربین از ۵/۰ به ۲، با فرض حفظ GSD با افزایش ارتفاع، اگرچه نواحی پنهان کمتر شده و تولید ارتوفتوموزائیک با کیفیت بالاتری میسر می‌گردد اما خطای مسطحاتی بازسازی سه‌بعدی به آرامی تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد. ولی خطای ارتفاعی به واسطه افزایش ارتفاع و کاهش استحکام هندسی شبکه با شدت بیشتری تا دو برابر افزایش می‌یابد. توجه شود که با افزایش ارتفاع مشکل نورپردازی و تارایی تصاویر بیشتر می‌شود که تأثیر آن بر کیفیت تصاویر، در این آزمون لحاظ نشده است.

منظور از خطای مثلث‌بندی هوایی، خطای اتفاقی پارامترهای توجیه خارجی حاصل از محاسبات باندل اجستمنت است که به هندسه شبکه (پوشش تصویری، توپوگرافی زمین، میدان دید دوربین، تعداد و تراکم نقاط گرهی و کنترل، وجود مشاهدات GNSS دقیق مراکز تصویر) و خطاهای مشاهداتی (کیفیت تصاویر، کیفیت نقاط کنترل و مشاهدات GNSS مراکز تصویر) وابسته است. خطای پارامترهای موقعیت سرشکن شده دوربین ضریبی از GSD و خطای وضعیت دوربین ضریبی از نسبت GSD/h در نظر گرفته شده است که در آزمون‌ها عددی بین ۰ تا ۲ برای آن لحاظ شده است. نتایج حاصل از این آزمون مطابق

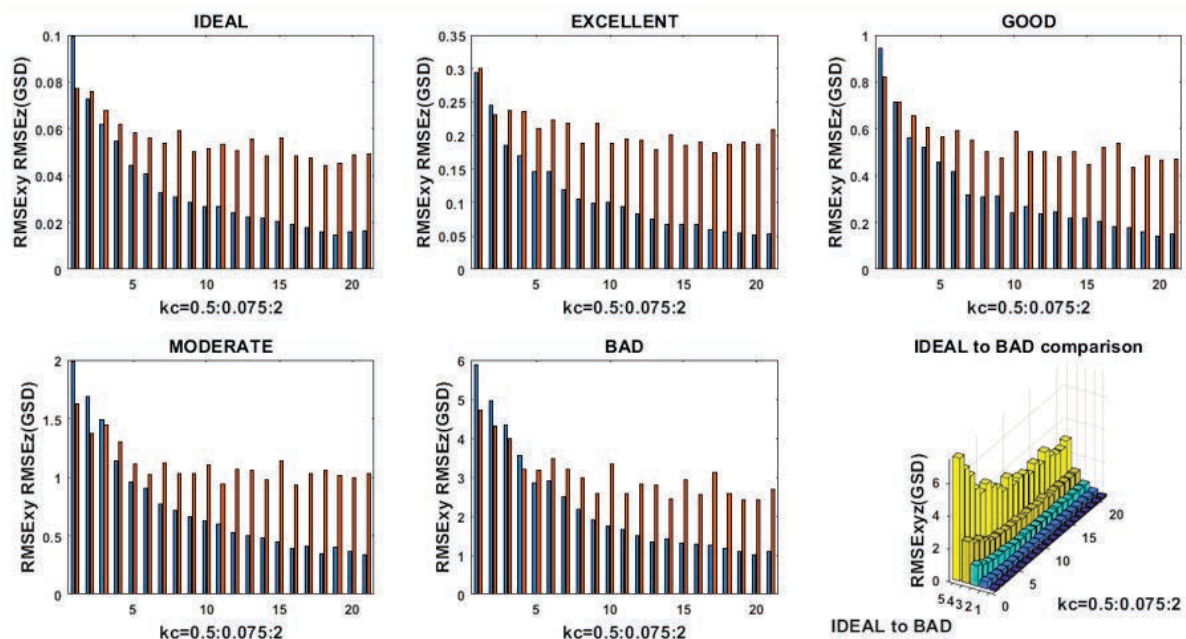


نگاره ۹: نتایج حاصل از آزمون تأثیر خطای مثلث بندی هوایی بر صحت بازسازی سه بعدی

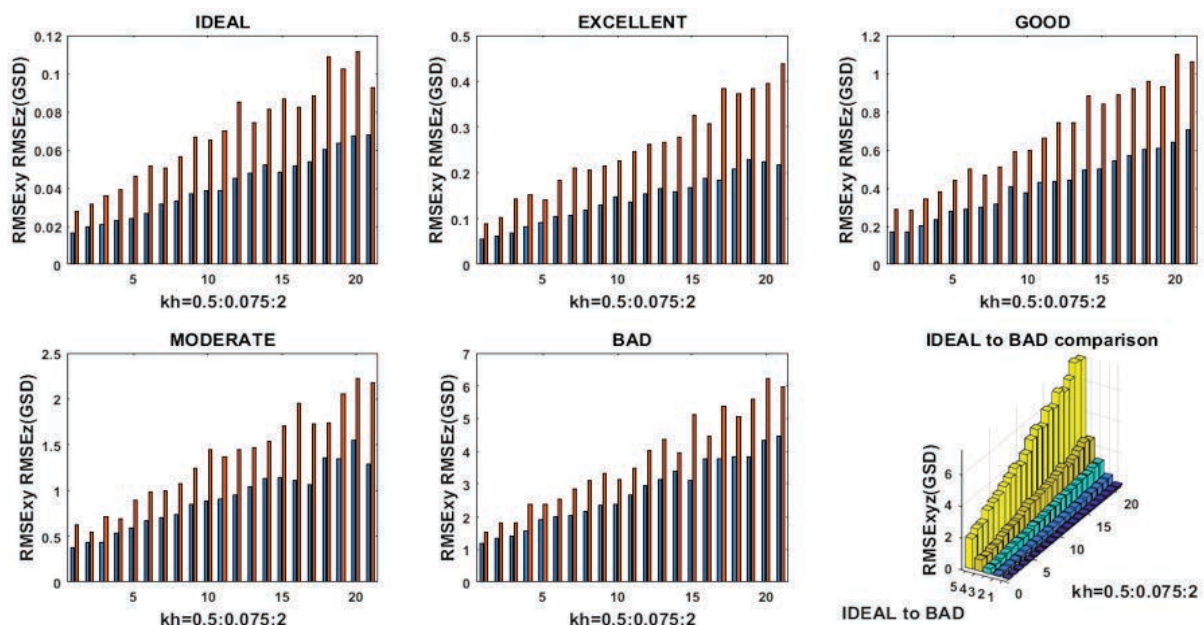


نگاره ۱۰: نتایج حاصل از آزمون تأثیر میدان دید عدسی بر صحت بازسازی سه بعدی (ثابت)

۳-۶- آزمون تأثیر میدان دید عدسی بر صحت بازسازی سه بعدی در حالت ارتفاع ثابت
با کاهش میدان دید و افزایش بزرگنمایی دوربین از ۰/۵ به ۲، با فرض ثابت بودن ارتفاع پرواز که منجر به افزایش تعداد GSD در واحد سطح و کاهش ابعاد عکس روی زمین می شود، مطابق نگاره ۱۱ خطای سطحی بازسازی سه بعدی به صورت غیرخطی و متناسب با معکوس بزرگنمایی تغییر می یابد. برای مثال در صورتی که بزرگنمایی دو برابر شود، خطای سطحی به ۱:۲ حالت استاندارد کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین خطای ارتفاعی بازسازی



نگاره ۱۱: نتایج حاصل از آزمون تأثیر میدان دید عدسی بر صحت بازسازی سه‌بعدی (ارتفاع ثابت بوده و منظور از GSD مقدار متناسب با $kc=1$ است و منظور GSD تغییر یافته نمی‌باشد)



نگاره ۱۲: نتایج حاصل از آزمون تأثیر ارتفاع پرواز بر صحت بازسازی سه‌بعدی (منظور از GSD مقدار متناسب با $k_h=1$ است)

سه‌بعدی با افزایش بزرگ‌نمایی تقریباً ثابت مانده اما با کاهش بزرگ‌نمایی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. برای مثال در صورتی‌که بزرگ‌نمایی نصف شود خطای ارتفاعی دو برابر خواهد شد. توجه شود که این آزمون در عملیات واقعی رخ نمی‌دهد زیرا در عمل متناسب با تغییر میدان دید و بزرگ‌نمایی دوربین، ارتفاع پرواز را تغییر می‌دهند. هدف این آزمون صرفاً درک تأثیر تغییر فاصله کانونی در یک ارتفاع ثابت روی کیفیت بازسازی سه‌بعدی بوده است.

رنگ آبی بیانگر خطای مسطحاتی می باشد.

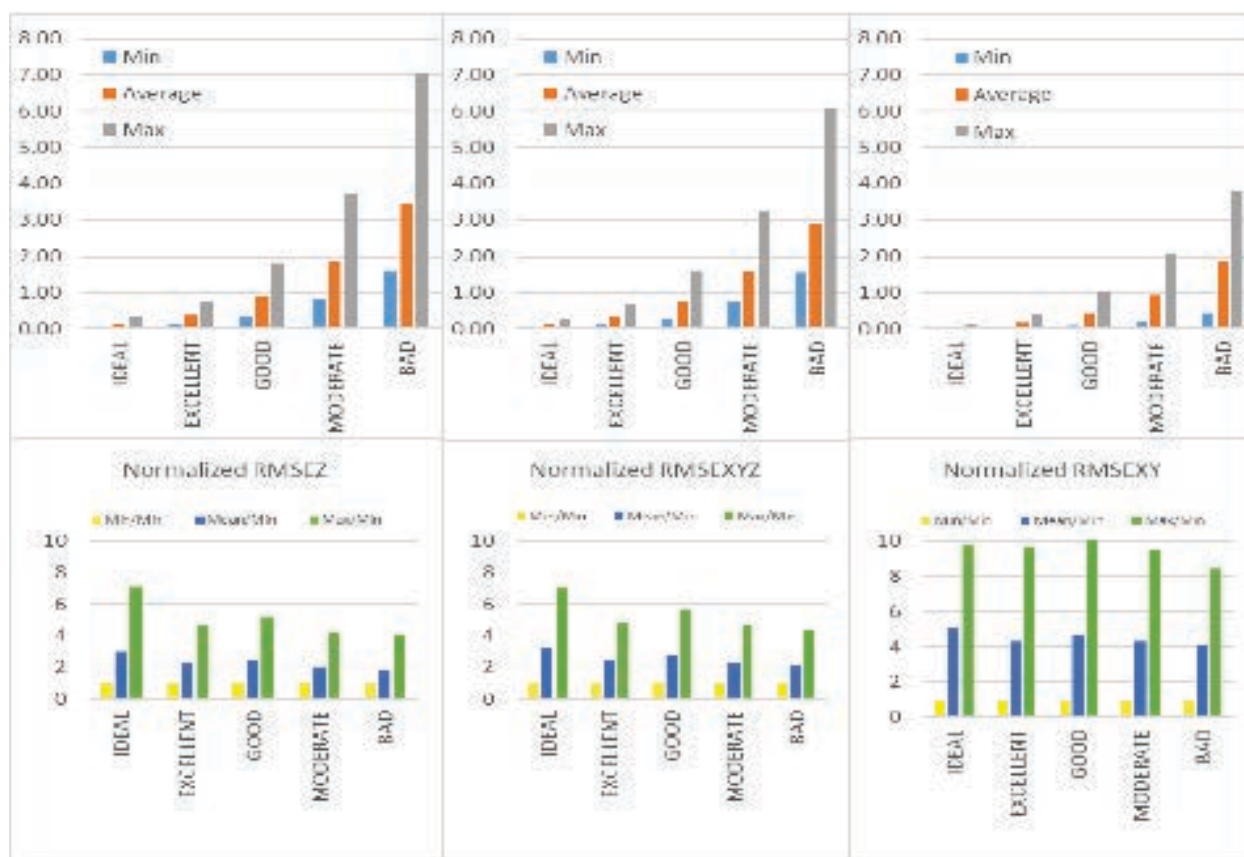
۳-۸- آزمون تأثیر پوشش های تصویربرداری بر صحت بازسازی سه بعدی

مطابق نگاره ۱۳، از بررسی نمودارها پی می بریم تغییر پوشش های طولی و عرضی قادر است خطای مسطحاتی را تا ۱۰ برابر و خطای ارتفاعی و کامل بازسازی سه بعدی را تا ۵ برابر (در حالت ایده آل تا ۷ برابر) بهبود دهد. کمترین خطای بازسازی سه بعدی مربوط به پوشش $px=95, py=95$ و بیشترین خطا مربوط به پوشش $px=50, py=30$ است. همچنین با خراب شدن شرایط تصویربرداری و خطاهای مربوطه، خطای مسطحاتی و کامل بازسازی سه بعدی در

۳-۷- آزمون تأثیر ارتفاع پرواز بر صحت بازسازی سه بعدی

با افزایش ارتفاع پرواز، خطای مسطحاتی و ارتفاعی بازسازی سه بعدی مطابق نگاره ۱۲ به صورت خطی افزایش می یابد. به طوری که با تغییر ارتفاع پرواز از نصف به دو برابر استاندارد، خطای مسطحاتی و ارتفاعی بازسازی سه بعدی از نصف تا دو برابر خطای اولیه تغییر می نماید.

به بیان دیگر برخلاف حالت استریو که خطای ارتفاعی بازسازی سه بعدی با توان دو ارتفاع پرواز تغییر می نمود، در اینجا به واسطه تصویربرداری چند عکسی خطای ارتفاعی مشابه خطای مسطحاتی متناسب با ارتفاع پرواز تغییر می کند. لازم به ذکر است در تمامی آزمون های فوق برای نمودارهای دو بعدی رنگ قرمز بیانگر خطای ارتفاعی و



نگاره ۱۳: نمودار کیفیت بازسازی سه بعدی حاصل از تغییرات پوشش طولی و عرضی برای شرایط ایده آل، عالی، خوب،

متوسط و بد به ترتیب از چپ به راست RMSE_{xy}، RMSE_z و RMSE_{xyz}.

بالا مقادیر مطلق و پایین مقادیر نرمالیزه شده با Min

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (زمین)

تحلیل رفتار و تأثیر پارامترهای طراحی شبکه فتوگرامتری پهپاد ... / ۴۳

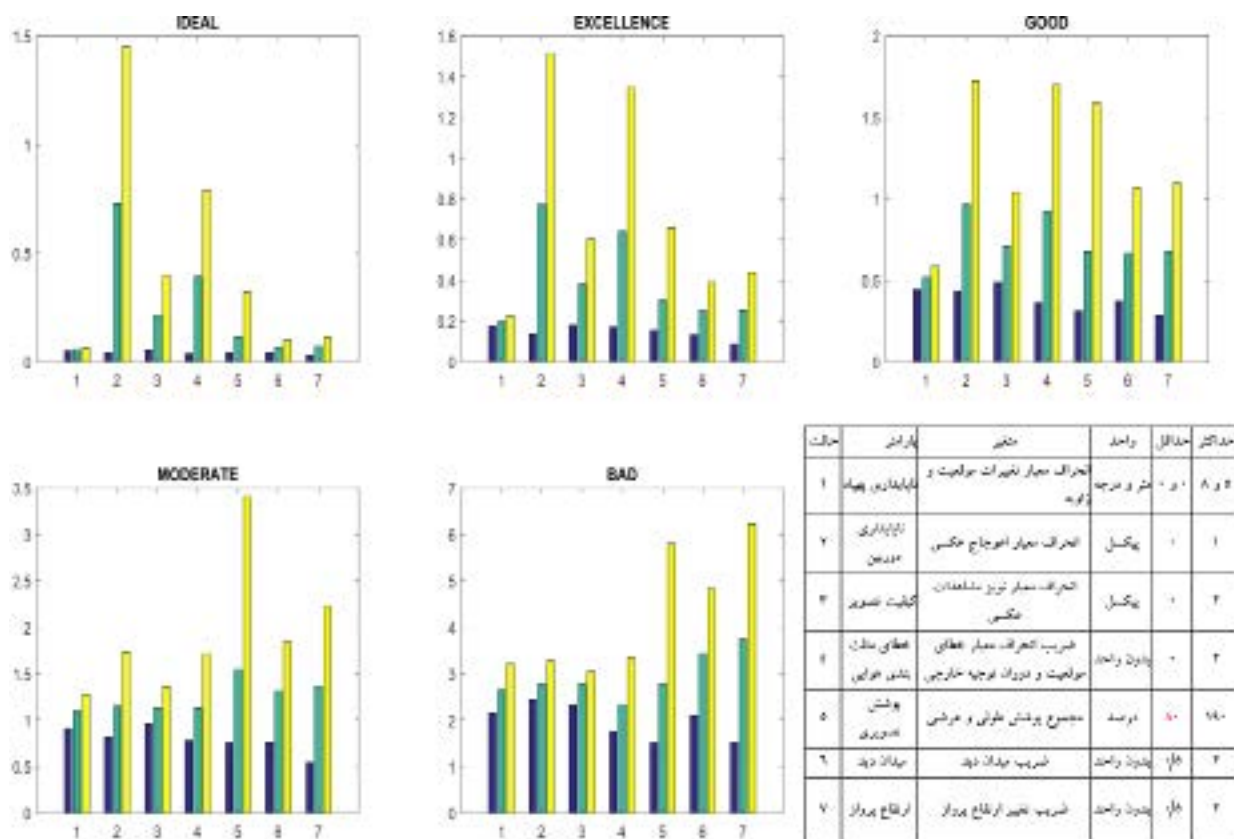
خطای مثلث‌بندی هوایی بیشترین تأثیر را در مقایسه با پارامترهای دیگر در صحت بازسازی سه‌بعدی داشته‌اند. اما با بدتر شدن شرایط به تدریج از اهمیت آن‌ها کاسته شده و پارامترهای به‌ترتیب پوشش تصویری، ارتفاع پرواز و میدان دید اهمیت می‌یابند. در کلیه حالات می‌توان گفت پارامتر ناپایداری پهپاد کمترین اهمیت را در کنترل خطای بازسازی سه‌بعدی داشته است.

با نگاه به حداکثر و حداقل خطاهای بازسازی سه‌بعدی و میزان تغییرات آن‌ها می‌توان دریافت که در شرایط ایده‌آل تا بد خطای بازسازی سه‌بعدی ابتدا به تغییرات ناپایداری دوربین حساس است سپس به خطای مثلث‌بندی هوایی نیز حساسیت پیدا می‌کند و در ادامه پوشش تصویری هم به آن‌ها اضافه می‌شود. با بدتر شدن شرایط، اهمیت دو پارامتر اول کم شده و حساسیت خطای بازسازی سه‌بعدی

حالت بد تا عالی به‌طور متوسط ۲۳، ۱۲، ۶ و ۲/۵ برابر حالت ایده‌آل است. در اینجا پوشش‌های طولی و عرضی را بین ۳۰ تا ۹۰ درصد هر ۵ درصد افزایش داده‌ایم. توجه شود در صورتی که هر دو پوشش طولی و عرضی زیر ۵۰٪ باشد، امکان بازسازی سه‌بعدی برای کل عوارض زمینی وجود ندارد. بنابراین از آن‌ها در این آزمون صرف‌نظر کرده‌ایم. آزمون‌ها در پنج حالت ایده‌آل تا بد انجام شده است و برای هر حالت خطای مسطحاتی، ارتفاعی و کامل بازسازی سه‌بعدی محاسبه شده است.

۳-۹- آزمون مقایسه نسبی تأثیر هر یک از پارامترها بر صحت بازسازی سه‌بعدی

با توجه به نگاره ۱۴ از متوسط خطاها دیده می‌شود که در حالات ایده‌آل و عالی دو پارامتر ناپایداری دوربین و



نگاره ۱۴: مقایسه مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر خطای بازسازی سه‌بعدی با تغییر پارامترهای مختلف در جدول فوق برای حالات ایده‌آل تا بد

منابع و مأخذ

- ۱- دادرس جوان، صمد زادگان، سوادکوهی، آفاقلی زاده؛ فرزانه، فرهاد، محمد، محمد (۱۳۹۷). ارزیابی توانایی فتوگرامتری پهپاد در مدل سازی سه بعدی مسیر بدون نقاط کنترل زمینی. بیست و پنجمین همایش ملی ژئوماتیک و سومین همایش ملی مهندسی اطلاعات مکانی، ص ۱۰-۱.
- ۲- عباس پور، خوش لهجه آذر، ورشوساز؛ محمدمهدی، مهدی، مسعود (۱۳۹۷). تأثیر تعداد و موقعیت قرارگیری نقاط کنترل زمینی در دقت به دست آمده برای نقشه تهیه شده به روش فتوگرامتری پهپاد مینا، ص ۹-۱.

3- Alidoost, F., & Arefi, H. (2017). comparison of UAS-BASED Photogrammetry Software for 3D point cloud Generation: A Survey over A Historical Site. *Isprs Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4.

4- Barry, P., & Coakley, R. (2013). Accuracy of UAV photogrammetry compared with network RTK GPS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.*, 2, 2731.

5- Bhandari, B., Oli, U., Pudasaini, U., & Panta, N. (2015, May). Generation of high resolution DSM using UAV images. In *FIG Working Week* (pp. 17-21).

6- Burns, J. H. R., & Delparte, D. (2017). Comparison of commercial structure-from-motion photogrammetry software used for underwater three-dimensional modeling of coral reef environments. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 127.

7- Cryderman, C., Mah, S. B., & Shufletoski, A. (2014). Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations. *Geomatica*, 68(4), 309-317.

8- Design, L., Wang, N., Chang, Y., El-sheikh, A. A., Wang, N., Chang, Y., & Carlo, A. A. E. M. (2012). Monte Carlo simulation approach to life cycle cost management. 2479(May 2010).

9- Eisenbeiß, H. (2009). UAV photogrammetry (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

10- Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., Cella, U. M. D., Roncella, R., & Santise, M. (2018). Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. *Remote Sensing*, 10(2), 311.

11- Gerke, M., & Przybilla, H. J. (2016). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, (1), 17-30.

به پارامترهای میدان دید و ارتفاع پرواز بعد از پوشش تصویری بیشتر می شود.

به طور خلاصه باید گفت با بدتر شدن شرایط تصویربرداری و دوربین، اهمیت پارامترها در خطای بازسازی سه بعدی و حساسیت به آن ها ابتدا روی ناپایداری دوربین و خطای مثلث بندی هوایی و پوشش تصویری است، سپس اهمیت دو پارامتر اول کم شده و اهمیت پارامترهای پوشش تصویری، میدان دید و ارتفاع پرواز افزایش می یابد. در این رابطه اگرچه پارامتر ناپایداری پهپاد کمترین اهمیت را دارد اما با بدتر شدن شرایط تأثیر مخرب آن بر نتایج بیشتر می شود.

۴- نتیجه گیری

این تحقیق ضمن معرفی پارامترهای مؤثر در بازسازی سه بعدی به روش فتوگرامتری پهپاد به بررسی رفتار و تأثیر این پارامترها روی کیفیت بازسازی سه بعدی در محیط شبیه سازی پرداخته است. به این معنی که با تغییر هر کدام از پارامترها از نصف تا دو برابر حالت استاندارد کیفیت بازسازی چگونه تغییر می کند. بنابراین هر چه این شبیه سازی به واقعیت نزدیک تر باشد، نتایج آن کاربردی تر خواهد بود. البته این امر موجب پیچیدگی بیشتر شبیه سازی و حجم محاسبات بالاتر خواهد شد. حتی اگر این شبیه سازی دارای نتایج عددی بسیار قابل اطمینان و کاملاً مطابق با واقعیت نباشد، می تواند یک نوع رفتارسنجی از پارامترها را ارائه نماید که به عنوان یک تحقیق مکمل برای تحقیقات سعی و خطای معمول خواهد بود.

۵- پیشنهادات

با توجه به مطرح بودن مبحث عکس برداری مایل برای ایجاد شهر سه بعدی در کاربرد شهر هوشمند، پیشنهاد می شود در ادامه تحقیق، مشابه این آزمون ها برای عکس برداری مایل نیز انجام شود.

Information Sciences, 41.

22- Raczyński, R. J. (2017). Accuracy analysis of products obtained from UAV-borne photogrammetry influenced by various flight parameters (Master's thesis, NTNU).

23- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling-current status and future perspectives. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 38(1), C22.

24- Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., & Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. *The photogrammetric record*, 29(146), 144-166.

25- Rock, G., Ries, J. B., & Udelhoven, T. (2011, September). Sensitivity analysis of UAV-photogrammetry for creating digital elevation models (DEM). In *Proceedings of the Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics*, Zurich, Switzerland (Vol. 1416).

26- Ruzgienė, B., Berteška, T., Gečyte, S., Jakubauskienė, E., & Aksamitauskas, V. Č. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*, 73, 619-627.

27- SENKAL, E., Kaplan, G., & Avdan, U. (2021). Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on archaeological sites. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 6(2), 81-89.

28- Shabbazi, M., Sohn, G., Théau, J., & Menard, P. (2015). Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. *Sensors*, 15(11), 27493-27524.

29- Tahar, K. N. (2013). An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 40, 93-98.

30- Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2013). Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738-2745.

31- Zhang, Y., Xiong, J., & Hao, L. (2011). Photogrammetric processing of low-altitude images acquired by unpiloted aerial vehicles. *The Photogrammetric Record*, 26(134), 190-211.

12- Gindraux, S., Boesch, R., & Farinotti, D. (2017). Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on glaciers. *Remote Sensing*, 9(2), 186.

13- Haarbrink, R. B., & Eisenbeiss, H. (2008). Accurate DSM production from unmanned helicopter systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B1), 1259-1264.

14- Harwin, S., Lucieer, A., & Osborn, J. (2015). The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. *Remote Sensing*, 7(9), 11933-11953.

15- Leitão, J. P., Moy de Vitry, M., Scheidegger, A., & Rieckermann, J. (2016). Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(4), 1637-1653.

16- Mendes, T., Henriques, S., Catalao, J., Redweik, P., & Vieira, G. (2015, October). Photogrammetry with UAV's: quality assessment of open-source software for generation of orthophotos and digital surface models. In *Proceedings of the VIII Conferencia Nacional De Cartografia e Geodesia*, Lisbon, Portugal (pp. 29-30).

17- Mesas-Carrascosa, F. J., Clavero Rumbao, I., Torres-Sánchez, J., García-Ferrer, A., Peña, J. M., & López Granados, F. (2017). Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2161-2176.

18- Mesas-Carrascosa, F. J., Notario García, M. D., Meroño de Larriva, J. E., & García-Ferrer, A. (2016). An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaicks to survey archaeological areas. *Sensors*, 16(11), 1838.

19- Mesas-Carrascosa, F. J., Torres-Sánchez, J., Clavero-Rumbao, I., García-Ferrer, A., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., & López-Granados, F. (2015). Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaicks by UAV to support site-specific crop management. *Remote Sensing*, 7(10), 12793-12814.

20- Mooney, C. Z. (1997). Monte carlo simulation (No. 116). Sage

21- Niederheiser, R., Mokroš, M., Lange, J., Petschko, H., Prasicek, G., & Elberink, S. O. (2016). deriving 3D point clouds from Terrestrial Photographs-com parision of different sensors and Software. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial*

