

تعیین مختصات مراکز تصویر در فتوگرامتری پهپاد مبتنی بر PPP

مینا توکلی^۱، ناصر عبدی^{۲*}، حدیثه سادات حسنی^۲

^۱ کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

minat9675@gmail.com

^۲ استادیار گروه ژئودزی و مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

abdi@tafreshu.ac.ir

h.hasani@tafreshu.ac.ir

(دریافت: خرداد ۱۴۰۳، تصویب: شهریور ۱۴۰۳)

چکیده

در سال‌های اخیر، روش‌هایی مانند بهره‌گیری از سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای (GNSS) در تعیین مختصات مراکز تصویر، برای تولید خروجی‌های با کیفیت‌تر و کاهش تعداد نقاط کنترل زمینی، در فتوگرامتری پهپاد مورد توجه ویژه قرار گرفته است. هرچند استفاده از روش‌های تعیین موقعیت تفاضلی، با موفقیت در فتوگرامتری پهپاد مورد استفاده قرار گرفته است، لیکن چالش اصلی این روش‌ها نیاز به ایستگاه مرجع می‌باشد. در مطالعه حاضر، کارایی روش تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) در تعیین مختصات مراکز تصویر در فتوگرامتری پهپاد مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از این روش، نیاز ما به وجود ایستگاه‌های مرجع را از میان برداشته و دقت‌هایی قابل مقایسه با روش‌های تفاضلی متداول ارائه می‌دهد. در این تحقیق از مجموعه داده‌های فتوگرامتری پهپاد در محدوده شهر قطور استان آذربایجان غربی استفاده شده است. در روش پیشنهادی، مختصات مراکز تصاویر با روش PPP و با استفاده از سرویس پردازش برخط NRCAN محاسبه شده و محاسبات فتوگرامتری بر مبنای مختصات بدست آمده انجام شده است. به منظور مقایسه، محاسبات بار دیگر با استفاده از روش تعیین موقعیت نسبی پس پردازش (PPK) و نرم‌افزار REDtoolbox صورت پذیرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با در اختیار داشتن مشاهدات گیرنده پهپاد، اطلاعات مربوط به زمان اخذ تصاویر، اختلاف فواصل مرکز فاز آنتن گیرنده تا مراکز تصویر و پارامترهای تبدیل بین سیستم‌های مختصات جهانی و محلی، با PPP می‌توان به مختصات مراکز تصویر با دقت مطلوب در فتوگرامتری، دست پیدا کرد. از مقایسه نتایج PPP و PPK در مؤلفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی، به ترتیب میانگین اختلاف‌هایی در حدود ۲ و ۷ سانتی متر بدست آمد، که می‌تواند بیانگر توانایی روش PPP در فتوگرامتری باشد. همچنین، ارزیابی نقاط کنترل زمینی به روش PPP و PPK به ترتیب میانگین خطایی در حدود ۱۲/۳۳ و ۱۱/۶۲ سانتی متر نشان داد. در نهایت نتایج عددی نشان می‌دهند که در صورت فراهم بودن شرایط، PPP می‌تواند جایگزین مناسبی برای PPK و RTK در فتوگرامتری پهپاد، با حفظ دقت و کیفیت قابل مقایسه باشد.

کلمات کلیدی: فتوگرامتری پهپاد، PPP، PPK، GNSS، GCP

۱- مقدمه

رشد روز افزون استفاده از پهپادها در چند سال گذشته، غیرقابل انکار است. با توجه به قابلیت پهپادها در اخذ داده از محیط‌های پیچیده و صعب‌العبور و همچنین سهولت بهره‌برداری از آنها، کاربرد آن را به طور قابل توجهی از کاربردهای صرفاً نظامی به کاربردهای صنعتی و زیست محیطی تبدیل کرده‌است [۱]. همچنین، در مقایسه با فتوگرامتری هوایی، اخذ داده توسط پهپاد مقرون به صرفه بوده و داده‌های جمع‌آوری‌شده از قدرت تفکیک بالایی برخوردار هستند [۲]. تصویربرداری بر مبنای پهپادها مشابه سیستم‌های تصویربرداری هوایی و ماهواره‌ای، امکان برچسب‌گذاری مکانی^۱ را فراهم می‌کنند که به طور خودکار مختصات موقعیت اخذ تصاویر را در فراداده‌های تصاویر در حین ثبت قرار می‌دهد که فرآیند ایجاد مدل سه‌بعدی از منطقه را تسهیل می‌کند.

با توجه به پیشرفت روزافزون در فناوری کنترل پهپاد، این اجازه به کاربران داده شده‌است تا بتوانند با دانش و مهارت خود از پهپادها در پروژه‌های اجرایی استفاده کنند. به همین منظور طیف گسترده‌ای از پهپادهای ارزان قیمت برای اهداف مختلف در دسترس است.

تقاضای رو به گسترش برای کاربردهای مختلف به وضوح، مستلزم مطالعات بیشتر در کاوش راه‌هایی برای به دست آوردن اطلاعات قابل اعتمادتر است. برای دستیابی به این هدف، لازم است روش‌های دستیابی به تصاویر دقیق و تولید خروجی‌های با کیفیت‌تر، مورد بررسی قرار گیرند [۳].

عوامل مختلفی بر بهبود کیفیت محصولات پهپاد اثرگذار است. یکی از آنها که می‌تواند به طور قابل توجهی کیفیت محصولات پهپاد را بهبود بخشد، طراحی و اندازه‌گیری نقاط کنترل زمینی^۲ (GCP) می‌باشد. این نقاط، مختصات زمینی معلوم دارند و به عنوان نقاط مرجع در فتوگرامتری پهپادها عمل می‌کنند. طراحی و تعیین مختصات این نقاط در منطقه مورد نظر، به طور قابل توجهی بر دقت مختصات بدست آمده تاثیرگذار می‌باشند.

استفاده از نقاط کنترل زمینی دقیق که به خوبی توزیع شده‌اند، برای اتصال صحیح مدل‌های فتوگرامتری به زمین لازم است. برای اطمینان از دقت کلی مجموعه داده‌ها، نیاز است

مکان، توزیع و تعداد نقاط کنترل زمینی در منطقه مورد بررسی قرار گیرد [۴]. نقاط کنترل زمینی یک مؤلفه کلیدی را برای فرآیند زمین مرجع سازی و تصحیح خطاهای ناشی از اعوجاج یا عوامل دیگر را فراهم می‌کنند.

در مناطقی که نقاط کنترل زمینی وجود ندارند، مدلسازی با پهپاد مشکلاتی را ایجاد می‌کند. نقاط کنترل زمینی ممکن است در مناطقی با توپوگرافی‌های پیچیده، مانند کوه‌ها یا جنگل‌های انبوه قابل دسترسی نباشند. در برخی از مناطق ممکن است به دلیل نگرانی‌های نظارتی یا ایمنی محدود شوند، که قرار دادن نقاط کنترل را دشوار یا غیرممکن می‌کند.

از آنجا که فتوگرامتری، معمولاً در زمین مرجع سازی غیرمستقیم از نقاط کنترل زمینی استفاده می‌کند، جمع‌آوری داده‌ها به صورت میدانی نه تنها می‌تواند زمان‌بر و پرهزینه باشد بلکه در مناطق صعب‌العبور که دستیابی به نقاط کنترل زمینی سخت است، چالش برانگیز خواهد بود [۵-۷]. همچنین برای دستیابی به دقت مکانی بالا، نقاط کنترل زمینی، باید به طور همگن در سراسر منطقه مورد نظر توزیع شده، حاشیه‌های منطقه را پوشش داده و فواصل استاندارد بین آنها وجود داشته باشد، که نیازمند کار میدانی و بررسی‌های جداگانه بیشتری در منطقه خواهد بود [۸،۹].

پهپادهای مجهز به گیرنده‌های سیستم ناوبری ماهواره‌ای با توانایی تعیین موقعیت کینماتیک آنی (RTK)^۳، امکان زمین مرجع سازی مستقیم پروژه فتوگرامتری را بدون استفاده از/با کاهش نقاط کنترل زمینی فراهم می‌کنند. با این حال، ایجاد روش‌های صحیح برای کاهش خطاهای سیستماتیک، ضروری است. برای این منظور، مارتینز و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی چندین ایستگاه ثابت GNSS به طور همزمان مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده تصحیحات ایستگاه‌های مختلف، می‌توان بدون نیاز به استفاده از GCP یا عکس‌های مایل، دقت ارتفاعی را بهبود بخشید. در صورتیکه پهپاد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین پرواز کند، دقت ارتفاعی حدود ۱۴ درصد بهبود می‌یابد، در حالیکه برای ارتفاع پرواز ۷۰ و ۹۰ متر، بهبود دقت ارتفاعی به ۳۵ درصد رسید [۱۰].

جولیان توماستیک و همکاران (۲۰۱۹) قابلیت بکارگیری تکنولوژی RTK/PPK^۴ را در تولید محصولات فتوگرامتری

۳ Real-Time Kinematic (RTK)

۴ Post-Processed Kinematics (PPK)

۱ Geotagging

۲ Ground Control Point (GCP)

برمبنای پهپاد آزمایش کردند. نتایج بدست آمده حاکی از دقت قابل قبول این روش در مقایسه با نتایج به دست آمده برمبنای رویکرد استاندارد (استفاده از نقاط کنترل زمینی) است. همچنین در این مطالعه تأثیر پوشش گیاهی، الگوهای پرواز و روش‌های پردازش بر دقت نتایج بررسی شد. نتایج روش RTK/PPK در مقایسه با رویکرد مبتنی بر نقاط کنترل به وضوح دقیق‌تر و کمتر متأثر از عوامل مذکور بود. اگرچه افزایش تعداد GCP ها احتمالاً منجر به افزایش دقت خواهد شد، اما چنین رویکردی در مناطق غیرقابل دسترسی و خطرناک نامطلوب است. در اکثر موارد RMSE های مسطحاتی روش RTK/PPK از ۱۰ سانتی متر تجاوز نمی‌کرد و RMSE های ارتفاعی زیر ۲۰ سانتی متر بود. با توجه به دقت قابل قبول روش RTK/PPK در تولید داده‌های مکانی بدون نیاز/با کاهش نقاط کنترل، نیاز اصلی برای سنجش از دور مناطق غیرقابل دسترسی و خطرناک پاسخ گفته می‌شود. اگر سؤال اصلی این بود که آیا روش RTK/PPK می‌تواند راه حل مناسب برای نقشه برداری چنین مناطقی باشد، پاسخ می‌تواند این باشد: بله. با این حال، به منظور بهره برداری بیشتر بایستی پارامترهای فنی پهپادها (حداکثر زمان پرواز، عملیات پرواز مجزا و غیره) به درستی تنظیم شوند [۱۱].

جیوان و سانگ مین (۲۰۱۸) مقایسه ای بین نتایج بدست آمده از فتوگرامتری پهپاد با تکنولوژی RTK بدون GCP در مقایسه با فتوگرامتری پهپاد بدون RTK انجام دادند. برای این منظور نتایج نشان می‌دهد که RMSE مؤلفه مسطحاتی و ارتفاعی بدون تکنولوژی RTK با ۵ نقطه کنترل به ترتیب برابر با ۴/۸ و ۸/۲ سانتی متر و ۶/۲ و ۱۲ سانتی متر با ۳ نقطه کنترل بدست آمد. از سوی دیگر، با روش RTK و بدون نقطه کنترل زمینی، خطاها در مختصات مسطحاتی و ارتفاعی به ترتیب به ۱۳/۱ سانتی متر و ۱۵/۷ سانتی متر محاسبه شد. به طور کلی، فتوگرامتری پهپاد با پشتیبانی از فناوری RTK، امکان تعیین موقعیت دقیق بدون نقطه کنترل را فراهم می‌کند [۱۲].

به طور سنتی، دقت محصول فتوگرامتری در سطح سانتی متر با نقاط کنترل زمینی (GCP) در فتوگرامتری پهپاد به دست می‌آید. در سال‌های اخیر استفاده از پهپادهای مجهز به فناوری‌های کینماتیک پس پردازش و کینماتیک آنی (PPK/RTK) گسترش یافته‌اند. دقت در سطح سانتی متر را

می‌توان با موقعیت یابی نسبی/تفاضلی با این تجهیزات به دست آورد. از سوی دیگر، PPP^۱ (موقعیت یابی نقطه ای دقیق)، که نوع خاصی از موقعیت یابی مطلق است، به طور مؤثر در بسیاری از کاربردها استفاده می‌شود. تایلان اوکلان و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی عملکرد روش‌های PPP و PPP-AR^۲ (موقعیت یابی PPP با رفع ابهام صحیح) داده‌های GNSS به دست آمده از پهپادها پرداختند. تکنیک PPP به عنوان یک نوع خاص از موقعیت یابی مطلق نیازی به نصب ایستگاه مرجع با مختصات معلوم ندارد. تنها با استفاده از داده‌های GNSS سینماتیک جمع‌آوری شده از پهپاد، می‌توان با پیاده‌سازی این تکنیک مختصاتی با دقت در سطح سانتی متر بدست آورد. روشی به نام PPP-AR که با توسعه تکنیک PPP پدیدار شد، اجزای مختصات افقی و عمودی با دقت بالا را با زمان همگرایی کوتاه‌تر ارائه می‌کند. تکنیک PPP-AR پتانسیل قابل توجهی در بهبود دقت مختصات به دست آمده از داده‌های GNSS کینماتیک پهپاد دارد. از این نظر، تکنیک‌های PPP و PPP-AR جایگزین مهمی برای موقعیت یابی نسبی/تفاضلی در زمین مرجع سازی مستقیم برای فتوگرامتری پهپاد هستند. این روش به ویژه در کاربردهای مبتنی بر مناطق جنگلی و کشاورزی به یک روش محبوب تبدیل شده‌است [۱۳]. در این تحقیق هدف آن است تا با کمک یک داده واقعی، توانایی PPP در تعیین مختصات مراکز تصویر به عنوان جایگزینی برای PPK و در نهایت استفاده از آنها در فتوگرامتری پهپاد را مورد مطالعه قرار دهیم.

۲- تعیین موقعیت ماهواره ای نقطه ای دقیق (PPP)

در سال‌های اخیر، استفاده از گیرنده‌های دقیق سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی^۳ (GNSS)، در پهپادهای فتوگرامتری به منظور دستیابی به موقعیت دقیق مراکز تصویر، متداول شده است. پهپادها با استفاده از GNSS می‌توانند به دقتی در سطح سانتی متر در موقعیت یابی دست یابند که برای تولید مدل‌های سه بعدی دقیق ضروری است [۱۴]. استفاده از GNSS در پهپادها همچنین باعث کاهش نیاز به نقاط کنترل زمینی شده و همین امر می‌تواند زمان و

^۳ Global Navigation Satellite System (GNSS)

^۱ Precise Point Positioning (PPP)

^۲ Precise Point Positioning-Ambiguity Resolution

هزینه مورد نیاز برای تولید مدل‌های سه بعدی دقیق را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۱۵].

تعیین موقعیت ماهواره‌ای انواع مختلفی دارد که شامل مطلق یا نسبی، استاتیک یا کینماتیک، پس پردازش یا آنی خواهد بود. هر عملیات تعیین موقعیت ماهواره‌ای، ترکیبی از دسته بندی‌های فوق، خواهد بود [۱۶، ۱۷]. تکنیک‌های کینماتیک آنی و کینماتیک پس پردازش از رایج‌ترین شیوه‌های تعیین موقعیت نسبی هستند [۱۶، ۱۷]. همچنین تکنیک تعیین موقعیت نقطه ای دقیق یکی دیگر از تکنیک‌های تعیین موقعیت ماهواره ای است که می‌تواند موقعیت‌های دقیق را با خطاهایی در سطح چند سانتی‌متر تعیین کند [۱۸].

PPP یک شیوه تعیین موقعیت ماهواره ای، با استفاده از مشاهدات کد و فاز یک گیرنده به تنهایی است. در تعیین موقعیت با این روش، نیازی به وجود ایستگاه مرجع نیست و موقعیت‌یابی با به کار گرفتن اطلاعات دقیق مداری و ساعت ماهواره‌ها انجام می‌شود [۱۶، ۱۷]. این مزیت، باعث برطرف شدن محدودیت شعاع عملکرد که در روش‌های نسبی وجود دارد، خواهد شد.

استفاده از روشهای RTK و PPK در نقشه برداری با پهپاد معمول است، لیکن عمدتاً به دلیل نا آشنا بودن کارشناسان مربوطه با تکنیک PPP و همچنین عدم پیاده سازی آن در نرم افزارهای فتوگرامتری، تاکنون استفاده از این تکنیک در سطح جامعه نقشه برداری به ویژه در کشور ما، برای نقشه برداری با پهپاد مرسوم نبوده است. در این مقاله قصد داریم مقایسه ای بین نتایج مختصات مراکز تصویر در دو حالت PPP و PPK برای یک داده واقعی انجام دهیم.

تکنیک PPP، برای اولین بار توسط زومبرگ در سال ۱۹۹۷ معرفی شد. با این توضیح که شبکه‌هایی از ده‌ها تا صدها گیرنده سیستم موقعیت‌یابی جهانی با کارکرد دائمی در محدوده ای با دامنه ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر فعالیت می‌کردند. برای حفظ بار محاسباتی مرتبط با تجزیه و تحلیل چنین داده‌هایی از نظر اقتصادی، رویکرد این است که ابتدا موقعیت دقیق ماهواره‌ها و تصحیحات ساعت از یک شبکه جهانی از گیرنده‌های GPS تعیین می‌شود. سپس، داده‌های شبکه محلی با تخمین پارامترهای گیرنده تجزیه و تحلیل می‌شوند. پارامترهای ماهواره در مقادیر تعیین شده در راه حل جهانی ثابت نگه داشته می‌شوند. این «موقعیت یابی دقیق» امکان تجزیه و تحلیل داده‌ها از

صدها تا هزاران مکان را هر روز فراهم می‌کند، با نتایجی که از نظر کیفیت با تجزیه و تحلیل همزمان همه داده‌ها قابل مقایسه است. چارچوب مرجع راه‌حل‌های جهانی می‌تواند عاری از انحرافات تحمیل شده توسط محدودیت‌ها یا اشتباهات هر مکانی باشد [۱۹].

در دهه اخیر، استفاده از PPP در کاربردهای استاتیک و کینماتیک ماهواره ای متداول شده و چندین نرم افزار و درگاه‌های پردازش برخط متعدد برای این منظور توسعه داده شده‌اند. در این روش، از مشاهدات کد و فاز عاری از اثر یونسفر یک گیرنده دو فرکانسه یا چند فرکانسه استفاده می‌شود. این مشاهدات، همراه با محصولات دقیق مدار و ساعت ماهواره که از وب سایت‌های مراکز مختلف، مانند IGS در دسترس هستند، استفاده می‌کنند. اگرچه استفاده مستقیم از مشاهدات ایستگاه‌های مرجع، در این روش لازم نیست، اما هنوز نیاز به یک شبکه مبنایی برای تولید محصولات دقیق مدار و ساعت ماهواره‌ها وجود دارد [۱۶].

مهمترین مزیت این روش، نسبت به تکنیک‌های موقعیت‌یابی نسبی، این است که نیازی به یک یا چند ایستگاه مرجع که مختصات آنها مشخص باشد، وجود ندارد. این ویژگی امکان استفاده از روش PPP را در مناطق دورافتاده و دسترس‌ناپذیر ممکن می‌سازد. همچنین استفاده از اصلاحات پیش‌پردازش‌شده در این روش، عامل رسیدن به موقعیت با دقت بالایی خواهد بود و نسبت به برخی روش‌ها، در پیاده‌سازی ساده‌تر و کم هزینه‌تر است [۲۰، ۲۱].

در این روش کاربر، کاملاً مستقل از ایستگاه مرجع است، بنابراین PPP می‌تواند در صرف زمان، منابع و حجم داده‌های زیاد که معمولاً باید بین گیرنده مرجع و گیرنده متحرک انتقال یابند، صرفه جویی کند. به لطف داده‌های تصحیح معتبر جهانی یا منطقه ای (مدار ماهواره، تصحیح ساعت ماهواره، تأخیرهای یونسفری) نیازی به مشاهدات هم زمان و محدودیت در فاصله وجود ندارد [۱۶].

از سوی دیگر، مهم ترین نقطه ضعف این تکنیک، مدت زمان همگرایی نسبتاً طولانی مورد نیاز است. دقت واقعی به دست آمده و زمان همگرایی مورد نیاز، به کیفیت اصلاحات و نحوه اعمال آنها در گیرنده بستگی دارد که به عنوان یک عامل محدود کننده در کاربردهای آنی در تکنیک PPP محسوب می‌شوند.

در ابتدا تعیین موقعیت مطلق برای کاربردهای پس پردازش توسعه داده شد، اما بعداً با در دسترس بودن

محصولات مداری و ساعت دقیق از طریق ماهواره، به روشی برای خدمات آنی تبدیل شد. PPP از شبکه‌ای از ایستگاه‌های مرجع جهانی برای محاسبه تخمین‌های دقیق مدارهای ماهواره‌های GNSS و خطاهای ساعت استفاده می‌کند. سپس، این محاسبات از طریق ماهواره یا اینترنت به کاربر نهایی تحویل داده می‌شود.

خطاهای بالقوه موجود در این روش به صورت مستقیم در دقت نتایج کار اثرگذار هستند. تحقیقات متفاوتی برای شناسایی و رفع این خطاها انجام شده‌است که نتایج، منجر به یافتن راه‌حلهایی برای بهبود عملکرد PPP شده‌است. در روش PPP برخلاف سایر روش‌های تعیین موقعیت مطلق، هر آنچه که باعث بوجود آمدن خطا در تعیین موقعیت می‌شود، با دقتی در سطح سانتی‌متر مدل می‌شود. این عوامل خطا شامل خطای مربوط به ماهواره، گیرنده و محیط هستند. [۲۲].

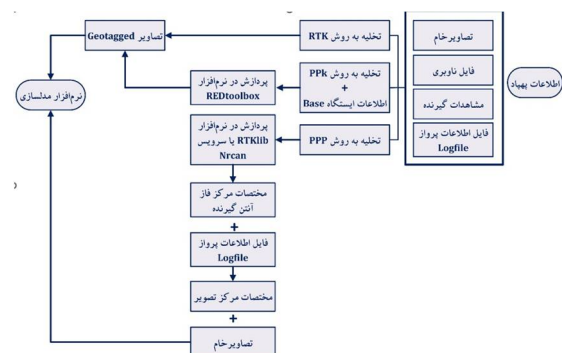
نکته دیگری که باید به آن توجه کرد این است که PPP به طور قابل توجهی زمان بیشتری نسبت به روش‌های نسبی برای به دست آوردن یک موقعیت دقیق نیاز دارد. با ترکیب مشاهدات GPS و GLONASS، و به طور کلی با ادغام مشاهدات GNSS چند سامانه و چند فرکانسی، می‌توان زمان همگرایی PPP را به طور قابل توجهی کاهش داد [۲۱، ۲۳، ۲۴].

عوامل دیگری که می‌تواند در روش PPP تأثیرگذار باشد، تعداد ماهواره‌های موجود، هندسه ماهواره، محیط استقرار گیرنده و شرایط جوی است.

موقعیتیابی در روش تعیین موقعیت مطلق دقیق سازگاری بیشتری نسبت به روش‌های نسبی دارد، چرا که به صورت مستقیم از ماهواره‌ها بهره می‌گیرد و تعیین موقعیت در این روش در چارچوب مرجع جهانی است. مختصات که از پردازش مشاهدات PPP بدست می‌آید نیز در چارچوب مرجع ماهواره‌ها قرار دارد یعنی سیستم مختصات آن، سیستم مختصات جهانی است. از آنجائیکه در PPP ایستگاه مرجعی وجود نداشته و فقط مشاهدات گیرنده پهنای پردازش می‌شود، مختصات محاسبه شده در چارچوب مرجع جهانی است، در حالیکه در روش‌های RTK یا PPK ایستگاه مرجع وجود داشته و هر مختصاتی که به ایستگاه مرجع نسبت داده شود، مختصات پهنای هم در آن سیستم مختصات خواهد بود.

۳- روش پیشنهادی

اجرای این تحقیق از دو قسمت عمده تشکیل شده است. مرحله اول شامل عملیات پرواز و تخلیه اطلاعات پهنای است و مرحله دوم شامل فرآیند پردازش این اطلاعات می‌باشد. شکل ۱ فلوچارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- فلوچارت روش پیشنهادی

پس از طراحی پرواز و اخذ داده توسط پهنای، تخلیه اطلاعات صورت می‌گیرد. با تخلیه داده‌های پهنای علاوه بر تصاویر اخذ شده، سه نوع فایل اطلاعاتی دیگر نیز، به عنوان ورودی برای پردازش در دسترس قرار می‌گیرد:

- (۱) فایل Navigation: شامل اطلاعات ناوبری ماهواره‌ها می‌باشد.

- (۲) فایل Observation: شامل مشاهدات کد و فاز است که گیرنده چند فرکانسه پهنای در طول پرواز خود ثبت کرده است.

- (۳) Logfile: این فایل در واقع فایل مشخصات پرواز است که همراه با عکس‌های پهنای ذخیره می‌شود و برای پردازش مجموعه داده‌ها با استفاده از روش‌های PPK و PPP لازم خواهد بود. ستون‌های این فایل به ترتیب حاوی اطلاعاتی از جمله شماره تصاویر، زمان تصویربرداری برحسب ثانیه از هفته GPS، هفته GPS، اختلاف مختصات مرکز فاز آنتن گیرنده با مرکز تصویر (در سه جهت شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و قائم) که به میلی متر درج شده اند و طول و عرض و ارتفاع ژئودتیکی می‌باشند. از این اطلاعات برای برچسب گذاری جغرافیایی تصاویر استفاده می‌شود [۲۶].

داده‌های اخذ شده توسط پهنای شامل تصاویر منطقه، اطلاعات لحظات تصویربرداری و مشاهدات گیرنده GNSS است. پردازش این اطلاعات به سه روش (RTK، PPK و PPP) امکان پذیر است. اگر استخراج اطلاعات از پهنای به روش

PPK انجام شود، در این حالت خروجی پهپاد شامل تصاویر خام، مشاهدات GNSS و اطلاعات لحظات تصویر برداری خواهد بود. همچنین مشاهدات ایستگاه مرجع نیز باید در اختیار ما قرار گیرد. مشاهدات گیرنده و تصاویر پهپاد باید در این مرحله با استفاده از یک نرم افزار پردازشی مانند Redtoolbox به تصاویر Geotagged تبدیل شوند. در نهایت از این تصاویر در نرم افزارهای مدل سازی مانند Agisoft metashape می توان استفاده کرد.

فرآیند استخراج اطلاعات در روش PPP همانند روش PPK خواهد بود، با این تفاوت که اطلاعات مربوط به ایستگاه مرجع در روش PPP مورد نیاز نیست. ضمن اینکه استفاده از روش PPP در کارهای پهپادی متعارف نیست، به همین دلیل این روش در نرم افزارهای پردازشی مربوطه مانند Redtoolbox پیاده سازی نشده است و نیاز است از نرم افزارها و یا سرویس های دیگری مانند نرم افزار RTKlib یا سرویس برخط NRcan استفاده کرد.

در این تحقیق مشاهدات گیرنده GNSS علاوه بر روش PPP به روش PPK نیز پردازش شده اند. نتایج پردازش به روش PPK به عنوان نتایج مرجع در این تحقیق به شمار می آید که از آنها برای ارزیابی دقت و کارایی روش PPP استفاده خواهد شد. با این توضیحات در مرحله اول لازم است تا اطلاعات پهپاد به هر دو روش PPK و PPP پردازش شوند. از رایج ترین ابزارهای پردازش داده های GNSS، می توان به نرم افزارهای REDtoolbox، RTKlib و سرویس برخط NRcan اشاره کرد که در این قسمت به تشریح هر کدام پرداخته می شود.

REDtoolbox: این نرم افزار با در اختیار داشتن مشاهدات گیرنده های GNSS پهپاد و ایستگاه مرجع، همچنین اطلاعات لحظات تصویر برداری و دیگر اطلاعات لازم، پس از انجام پردازش به شیوه PPK، داده های موقعیت را به تصاویر متصل می کند. بنابراین با استفاده از این نرم افزار، تصاویر خام به تصاویر Geotagged تبدیل خواهند شد [۲۷].

RTKlib: یک مجموعه نرم افزار منبع باز برای انجام پردازشهای تعیین موقعیت استاندارد و دقیق است. با استفاده از داده های خام GNSS، می توان به صورت آنی و پس پردازش برای تعیین دقیق موقعیت با دقتی در سطح سانتی متر از آن استفاده کرد [۲۸]. از این نرم افزار می توان در پردازش به روش PPP نیز استفاده کرد. این نرم افزار از تمام سامانه های ناوبری ماهواره ای (GPS، GLONASS، Galileo،

BeiDou، SBAS، QZSS) و فرمت های اصلی تبادل فایل و داده پشتیبانی می کند.

سرویس برخط NRcan: این سرویس داده های سیستم ماهواره ای ناوبری جهانی (GNSS) ارسال شده توسط کاربر را با استفاده از روش تعیین موقعیت مطلق دقیق (PPP) پردازش می کند [۲۹]. با تصحیحات دقیق مدار و ساعت ماهواره، کاربران دو یا چند فرکانسه می توانند بدون در نظر گرفتن تراکم ایستگاه های مرجع نزدیک، به دقت موقعیت یابی در سطح سانتی متر در چارچوب مرجع جهانی دست یابند. یکی از مزایای مهم استفاده از این سرویس، اصلاح و کاهش مدت زمان همگرایی اولیه PPP است.

PPP بر مدار دقیق ماهواره و اطلاعات دقیق ساعت ماهواره ها متکی است. NRCan داده های دقیق مدار و ساعت ماهواره ها را از سازمان های بین المللی مانند سرویس بین المللی GNSS (IGS) به دست می آورد. این اصلاحات برای بهبود دقت موقعیت یابی بر روی داده های خام PPP اعمال می شود.

حل ابهام فاز، یک مرحله مهم در پردازش PPP است. حل ابهامات اعداد صحیح، امکان دقت موقعیت یابی در سطح سانتی متر را فراهم می کند. NRCan از الگوریتم های پیچیده ای برای رفع ابهامات با استفاده از داده های اضافی، مانند اندازه گیری فاز حامل یا مدل های دقیق ماهواره و گیرنده استفاده می کند. با توجه به اینکه منابع خطای مختلف از جمله تأخیرهای یونوسفر و تروپوسفر، اثرات چند مسیری و خطاهای مربوط به گیرنده بر دقت PPP تأثیر می گذارند، NRCan از مدل ها و الگوریتم های پیشرفته ای برای تخمین و تصحیح این خطاها استفاده می کند که منجر به راه حل های موقعیت یابی دقیق می شود. NRCan می تواند گزارش تولید کند، آمار را محاسبه کند یا نتایج را بر اساس نقاط مرجع شناخته شده اعتبار سنجی کند تا دقت نتایج PPP را ارزیابی کند.

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در دقت نتایج نحوه توزیع ماهواره ها می باشد. توزیع ماهواره ها در آسمان به چپش یا الگوی ماهواره ها که از یک مکان خاص روی زمین مشاهده می شود، اشاره دارد. توزیع آسمانی ماهواره ها بسته به عوامل مختلفی از جمله مدار ماهواره ها، ارتفاعات، تمایلات و زمان خاص رصد می تواند متفاوت باشد. توجه به این نکته مهم است که توزیع آسمانی ماهواره ای پویا و دائماً در حال تغییر است.

پس از اتمام پردازش اطلاعات PPP، مختصات‌های مرکز فاز آنتن گیرنده GNSS پهپاد در اختیار قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه نرخ مشاهدات گیرنده GNSS پهپاد هر ۰/۲ ثانیه یکبار بوده است، بنابراین این مختصات نیز به ازای هر ۰/۲ ثانیه در دسترس خواهد بود. این در حالیست که بررسی لحظات تصویربرداری در فایل اطلاعات پرواز Timestamp نشان می‌دهد که شاتر دوربین هر ۳-۴ ثانیه یکبار و به صورت نامنظم و با زمان‌های اعشاری، باز و بسته شده و تصویربرداری کرده است. از آنجایی که تناسبی بین زمان تصویربرداری و زمان مشاهدات گیرنده GNSS وجود ندارد و هیچکدام از لحظات عکس برداری دقیقاً منطبق بر زمان‌های مشاهدات گیرنده نیست، بنابراین در مرحله اول نیاز است تا بین لحظات مشاهدات گیرنده (هر ۰/۲ ثانیه) درونیایی انجام گیرد تا بتوان مختصات مرکز فاز آنتن GNSS را در لحظات تصویربرداری تعیین کرد.

مختصات مرکز فاز آنتن گیرنده در لحظات تصویربرداری، در نرم‌افزارهای مدلسازی فتوگرامتری قابل استفاده نیست و لازم است مختصات مراکز تصویر در اختیار باشد، زیرا اطلاعات مکانی لازم برای موقعیت یابی دقیق و تراز کردن تصاویر در یک مدل سه بعدی را فراهم می‌کند. در حقیقت برای رسیدن به مختصات مراکز تصویر در لحظات تصویربرداری، لازم است دو مرحله زیر انجام شود:

۱- انجام درونیایی برای یافتن مختصات مرکز فاز آنتن گیرنده در لحظات تصویر برداری.

۲- اعمال اختلاف فواصل مرکز فاز آنتن گیرنده و مراکز تصویر (موجود در فایل اطلاعات پرواز پهپاد) برای رسیدن به مختصات مراکز تصویر.

به منظور درونیایی برای رسیدن به مختصات مرکز فاز آنتن گیرنده در لحظات تصویربرداری از فایل مختصات مرکز فاز آنتن گیرنده و فایل Timestamp که لحظات تصویربرداری در آن موجود است استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای انجام درونیایی وجود دارد که باید با توجه به شرایط پروژه انتخاب شود. برای این کار از درونیایی خطی استفاده شده است، چرا که با توجه به مسیر مستقیم پرواز و مدت زمان مشاهدات گیرنده (۰/۲ ثانیه) به نظر نمی‌رسد پهپاد در این فاصله زمانی از مسیر مستقیم خود انحراف قابل توجهی پیدا کرده باشد، لذا این روش پاسخگوی نیاز ما می‌باشد.

در ادامه اختلاف فواصل مرکز فاز آنتن گیرنده و مراکز تصویر که در فایل Timestamp موجود هستند را به نتایج

مرحله قبل اعمال می‌کنیم. در نهایت، مختصات مراکز تصویر در لحظات تصویربرداری در چارچوب مرجع جهانی تعیین می‌شود.

برای ارزیابی صحت مختصات مراکز تصویر بدست آمده با روش PPP نیاز است تا روش دیگری به عنوان مرجع وجود داشته باشد. در این تحقیق، مختصات مراکز تصاویر با روش PPK به عنوان روش مرجع، نیز تعیین شده است. فرآیند پردازش اطلاعات پهپاد به روش PPK با استفاده از نرم‌افزار Redtoolbox انجام شده است.

ورودی‌های این نرم افزار شامل تصاویر، اطلاعات مربوط به پهپاد، فایل Navigation، فایل‌های Observation که شامل مشاهدات کد و فاز گیرنده‌های GNSS روی پهپاد و مشاهدات ایستگاه Base است.

فایل نتایج حاصل از پردازش اطلاعات در این نرم‌افزار شامل ستون‌هایی است که نام و تعداد تصاویر، عرض جغرافیایی و طول جغرافیایی و مختصات UTM مراکز تصاویر و همچنین ارتفاع نسبت به بیضوی WGS84 و ارتفاع نسبت به ژئوئید را در اختیار ما قرار می‌دهد. همچنین بعد از پردازش، تصاویر حاصل بصورت Geotagged و آماده ورود به نرم افزارهای مدلسازی در فتوگرامتری هستند. بعبارت دیگر پس از پردازش صورت گرفته از مختصاتهای دقیق تعیین شده برای مراکز تصویر، در برچسب گذاری مکانی تصاویر بصورت اتوماتیک در نرم افزار استفاده می‌شود و تصاویر زمین مرجع شده، مجدد ذخیره شده و آماده ورود به نرم افزارهای مدلسازی سه بعدی هستند.

از آنجائی که روش PPP مختصات را در چارچوب مرجع جهانی و روش PPK مختصات را در چارچوب مرجع مرتبط با ایستگاه مرجع ارائه می‌دهند، و به دلیل وجود اختلاف بین چارچوب مرجع‌های جهانی و محلی، مختصات‌های بدست آمده به روش PPP نیز با مختصات‌های بدست آمده با روش PPK (مقادیر مرجع) دارای اختلاف هستند. این اختلافات از طریق اعمال ترانسفورماسیون با در دست داشتن پارامترهای لازم صورت خواهد پذیرفت. در ساده ترین حالت این اختلافات می‌تواند بصورت Shift باشد که اصولاً در شبکه‌های حاصل از تعیین موقعیت ماهواره ای اینچنین است.

برای رفع مقدار این Shift باید از اختلاف بین شبکه محلی و جهانی منطقه مورد نظرمان (در این تحقیق ایران) اطلاع داشته باشیم. شبکه محلی و جهانی ایران دارای مختصات مشخصی هستند و با مقایسه آنها می‌توان به مقدار

اختلاف بین این دو سیستم مختصات دست پیدا کرد. با اعمال این مقدار به نتایج بدست آمده از مختصات مراکز تصویر در لحظات تصویربرداری با روش PPP، به سیستم مختصات محلی خواهیم رسید و امکان ارزیابی روش PPP با نتایج مرجع فراهم می‌شود.

۴- نتایج پیاده‌سازی

۴-۱- معرفی داده

اطلاعات استفاده شده در این تحقیق، مربوط به عملیات نقشه‌برداری با پهپاد است که در تاریخ ۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۲ در شهر قطور واقع در استان آذربایجان غربی انجام شده است. بخش قطور دارای توپوگرافی کوهستانی بوده و در زون ۳۸ قرار دارد. شکل ۲ و ۳ مسیر حرکت پهپاد و لحظات عکسبرداری را نشان می‌دهد.

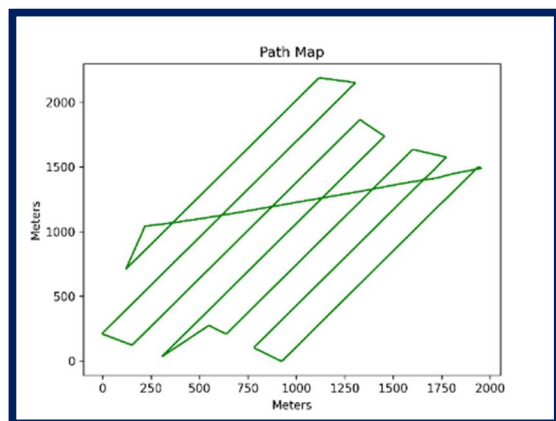


شکل ۲- مسیر حرکت پهپاد و ایستگاه‌های تصویربرداری بر روی تصویر ماهواره‌ای

به طور کلی برای اخذ اطلاعات از این منطقه، سه پرواز و هر کدام به مدت حدود ۲۰ دقیقه انجام شده است. در مجموع تعداد ۵۲۷ تصویر اخذ شده است. ارتفاع پرواز ۴۳۲ متر و قدرت تفکیک مکانی تصاویر حدوداً ۵ سانتی‌متر و مساحت تحت پوشش ۲۶۴ هکتار می‌باشد.

تعداد نقاط گرهی برابر با ۲۱۴۲۶۲ می‌باشد. از نقاط گرهی در انجام مثلث بندی هوایی استفاده می‌شود. متوسط خطای تصاویر باز ثبت^۱ نقاط شده برابر با ۰/۲۸۸ پیکسل است این خطا به تفاوت بین موقعیت پیش بینی شده یک نقطه در یک عکس و موقعیت پیش بینی شده آن در

عکس دیگر اشاره دارد. جدول شماره ۱ اطلاعات مربوط به عملیات پرواز را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مسیر حرکت پهپاد

جدول ۱- اطلاعات پرواز

جدول اطلاعات پرواز		
۱	تعداد تصاویر	۵۲۷
۲	ارتفاع پرواز	۴۳۲ متر
۳	قدرت تفکیک مکانی	۵/۲۴ cm/pix
۴	منطقه تحت پوشش	۲/۹۶ km
۵	تعداد مراکز تصویر	۵۲۷
۶	تعداد نقاط گرهی	۲۱۴۲۶۲
۷	خطای تصاویر توجیه شده	۰/۲۸۸ پیکسل

عملیات فتوگرامتری با پهپاد Matrice 300 انجام شده‌است (شکل ۴) که این مدل پهپاد، مجهز به گیرنده GNSS چند فرکانسه و شامل مشاهدات کد و فاز است [۲۵].



شکل ۴- پهپاد Matrice 300

به همین جهت این دستگاه می‌تواند سیگنال‌ها را از چند سامانه ماهواره ای، از جمله GPS، GLONASS، BeiDou و

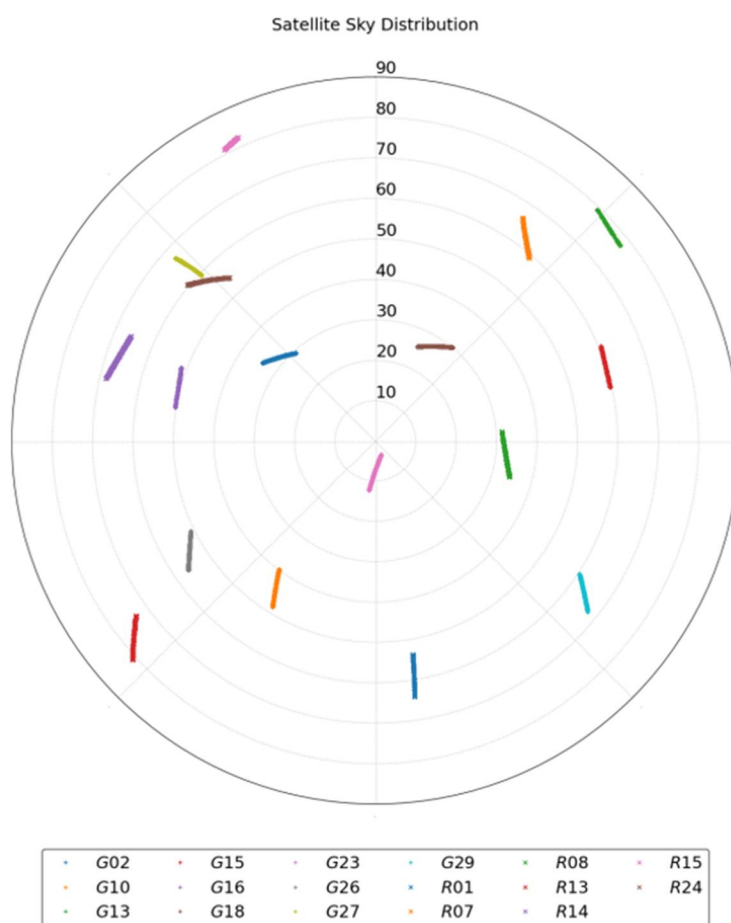
^۱ Reprojection

Galileo دریافت کند. همچنین نرخ مشاهدات گیرنده مذکور هر ۰/۲ ثانیه یکبار می‌باشد. اخذ تصاویر توسط دوربین Zenmuse P1 با فاصله کانونی ۳۵ میلیمتر انجام شد. در معرفی این پهپاد، دو اصطلاح مقاوم بودن و هوشمند بودن به چشم می‌خورد. همچنین زمان پرواز آن به ۵۵ دقیقه افزایش یافته‌است که برای همگرایی نتایج که یکی از چالش‌ها در روش PPP است، مدت زمان بیشتری را در اختیار داریم. از دیگر ویژگی‌های این پهپاد، می‌توان به مقاومت در محیط‌های بادی با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه، قابلیت پرواز تا ارتفاع ۷۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریا و با سرعت ۲۳ متر بر ثانیه و افزایش سرعت پایین آمدن در آسمان تا ۷ متر بر ثانیه اشاره کرد. این پهپاد مجهز به سنسورهای تشخیص موانع از تمامی جهات می‌باشد که محدوده تشخیص آن حداکثر ۴۰ متر می‌باشد. این

سنسورها در ۶ جهت اصلی نصب شده‌اند و احتمال اصابت با عوارض موجود در منطقه را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد.

۲-۴- نتایج بدست آمده بر اساس روش پیشنهادی

یکی از دلایل استفاده از این پهپاد در این پژوهش، مشخصات گیرنده GNSS نصب شده روی آن و همچنین مدت زمان پروازی بالای آن بوده است. این گیرنده چند فرکانسه است و مشاهدات هر چهار سامانه فعال ماهواره‌ای را دریافت می‌کند که با داشتن این قابلیت، در ارزیابی نتایج می‌توان به دقت‌های بالاتری دست پیدا کرد. مشاهدات کد و فاز توسط گیرنده با نرخ ۰/۲ ثانیه ثبت شده‌است.



شکل ۵- آرایش ماهواره‌ها در زمان اخذ مشاهدات گیرنده

است. ابهام فاز در تعیین موقعیت ماهواره‌ای در حدود ۶۸ درصد رفع شده‌است که این میزان، نتایج قابل اعتمادی را ارائه خواهد دارد. در جدول ۲ می‌توان به برخی از گزارشات ارائه شده توسط NRCan اشاره کرد.

مدت زمان مشاهده در این پرواز در حدود ۱۸ دقیقه و ۴۳ ثانیه بوده است. در پردازش اطلاعات، از دقیق ترین محصولات مداری استفاده شده است. گیرنده مورد نظر دو فرکانسه بوده و هر دو مشاهدات کد و فاز را دریافت کرده

همانطور که اشاره شد، توزیع ماهواره‌ها یکی از عوامل تاثیرگذار بر دقت نتایج است. شکل ۵ آرایش ماهواره‌ها در زمان اخذ مشاهدات گیرنده را نشان می‌دهد.

به منظور مقایسه روش‌های PPP و PPK در شکل ۶ نمایی از اختلاف مختصات‌های بدست آمده برای مراکز تصویر نمایش داده شده است. محور افقی شماره عکس‌ها را نشان می‌دهد و محور عمودی مقدار اختلاف در واحد متر را مشخص کرده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد همانطور که انتظار می‌رفت، کیفیت تعیین مؤلفه‌های مسطحاتی نسبت به مؤلفه ارتفاعی بهتر است.

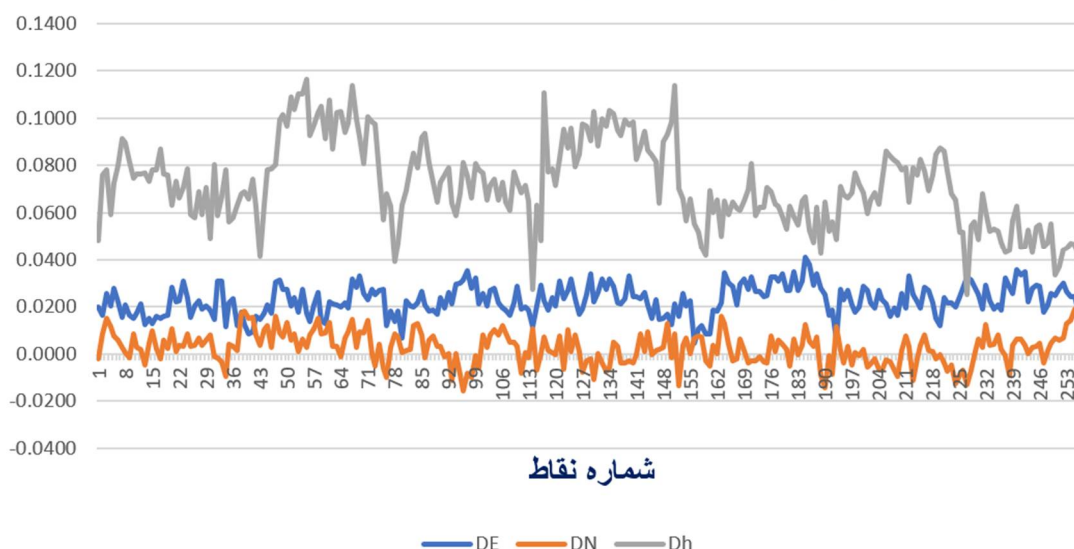
جدول ۳ نیز مقادیر اختلاف در حالت‌های بیشینه و کمینه و میانگین را نشان می‌دهد. نتایج عددی نشان می‌دهند که روش PPP امکان رسیدن به مختصات مراکز تصویر در مؤلفه‌های مسطحاتی را با میانگین اختلاف ۲

سانتیمتر و در مؤلفه ارتفاعی را با میانگین اختلاف ۷ سانتی‌متر فراهم می‌کند.

جدول ۲- استراتژی پردازش PPP

استراتژی پردازش PPP		
۱	مدت زمان مشاهده	۰۰:۱۸:۴۳.۲۰۰
۲	محصولات مورد استفاده	IGS final (دقیق‌ترین نوع محصولات)
۳	مشاهدات گیرنده	کد و فاز
۴	نوع فرکانس گیرنده	دو فرکانسه
۵	زاویه برش ارتفاعی	۷/۵ درجه
۶	اپک‌های حذف شده	۰ درصد
۷	رفع ابهامات	۶۸/۴۴ درصد
۸	نرخ مشاهدات	۰/۲ ثانیه

ارزیابی نتایج روش PPP و مرجع در مؤلفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی



شکل ۶- ارزیابی نتایج روش پیشنهادی و روش مرجع برای مؤلفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی در واحد متر

جدول ۳- مقادیر آماری مربوط به اختلاف مختصات‌های مراکز تصاویر در مؤلفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی در واحد متر

شرقی-غربی (E)	شمالی-جنوبی (N)	قائم (h)	
۰/۰۴۱۱	۰/۰۱۸۸	۰/۱۱۶۶	بیشترین مقدار
۰/۰۰۳۶	۰/۰۱۵۵	۰/۰۲۵۲	کمترین مقدار
۰/۰۲۲۷	۰/۰۰۲۵	۰/۰۷۲۳	میانگین
۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۹	۰/۰۱۸۵	انحراف معیار

در ادامه از مختصات مراکز تصویر بدست آمده با روش پیشنهادی در مدلسازی سه‌بعدی پهپاد مینا استفاده شد و نتایج آن مجدداً با روش مرجع مقایسه گردید. این مقایسه در تخمین نقاط کنترل زمینی و چک و پارامترهای توجیه داخلی و خارجی انجام گرفت.

به همین منظور از نرم افزار Agisoft Metashape یکی از رایج‌ترین نرم‌افزارهای فتوگرامتری برای مدل سازی سه بعدی استفاده شد [۳۰].

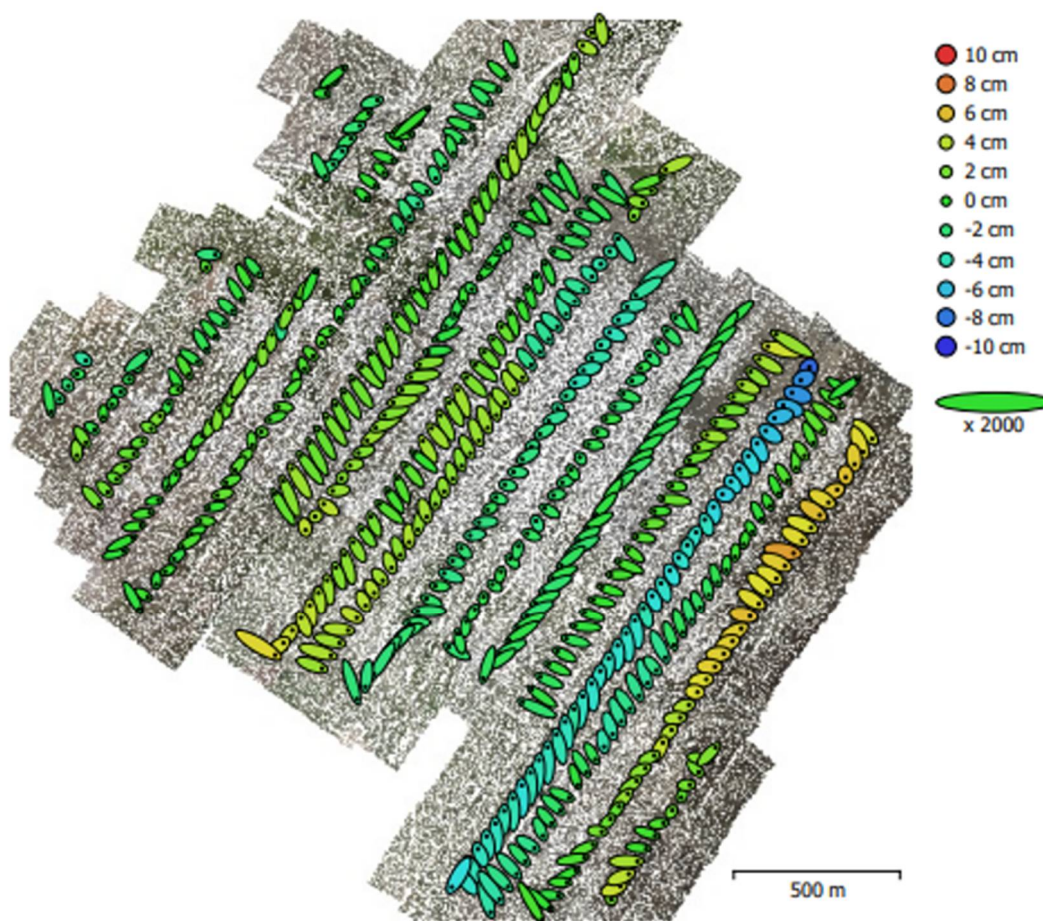
در اولین مرحله تصاویر و مختصات مراکز تصویر، به عنوان ورودی به نرم افزار معرفی گردید. مرحله تناظرایی نرم افزار با استخراج ویژگی‌های مشابه و تطبیق آن‌ها می‌تواند موقعیت دوربین را برای هر تصویر پیدا کند و پارامترهای کالیبراسیون دوربین را اصلاح کند. همچنین، با انجام مثلث بندی، پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین را بهبود می‌دهد. لازم به ذکر است که در این تحقیق تعداد ۱۴ نقطه کنترل و ۳ نقطه چک برای ارزیابی PPP در مقایسه با PPK در نظر گرفته شده است.

ارزیابی نقاط کنترل زمینی و نقاط چک از مقایسه روش PPP و PPK انجام شد و نتایج در مورد نقاط کنترل زمینی و نقاط چک، به ترتیب میانگین خطایی در حدود ۱۰/۶ و ۱۲/۳ سانتی متر را برای PPP در مقایسه با مقادیر میانگین خطایی در حدود ۱۰/۵ و ۱۱/۶ سانتی متر برای PPK را

نشان داد. مقادیر بدست آمده حکایت از موفقیت کارایی PPP در تخمین موقعیت نقاط کنترل زمینی و چک در فتوگرامتری پهپاد دارد.

ارزیابی دیگر روی مختصات مراکز تصاویر صورت پذیرفت. در این مرحله از ارزیابی نتایج نشان می‌دهند، مختصات مراکز تصویر به روش PPP با میانگین خطای حدود ۳/۶ سانتی متر قابل برآورد است در حالیکه مقدار مذکور برای روش PPK در حدود ۲/۶ سانتی متر بوده است.

شکل ۷ و جدول ۴، خطای موقعیت مراکز تصاویر را نشان می‌دهد. به طور کلی مقادیر برآورد خطا در تعیین مکان دوربین در منطقه متفاوت است که این مقدار در فتوگرامتری پهپاد می‌تواند از صفر تا ۱۰ سانتی متر متغیر باشد. در اکثر مسیر پرواز این خطا مقداری در حدود ۲ تا ۴ سانتی متر بوده‌است که قابل قبول است.



شکل ۷- موقعیت مراکز تصویر به همراه دقت تعیین آن‌ها

تحقیق، PPP در مجموع با مقدار خطای متوسط حدوداً ۳/۶ سانتی متر، در برآورد موقعیت مراکز تصاویر، دقت قابل قبولی را ارائه داده است.

جدول فوق نشان می‌دهد، همانطور که انتظار می‌رود، تعیین موقعیت مراکز تصویر در مؤلفه مسطحاتی با خطای کمتری نسبت به مؤلفه ارتفاعی صورت می‌پذیرد. در این

جدول ۴- برآورد میانگین خطای موقعیت مراکز تصویر در واحد سانتیمتر

نوع خطا	مقدار (cm)
خطای X	۱/۸۰۹
خطای Y	۱/۸۶۴
خطای Z	۲/۵۳۶
خطای XY	۲/۵۹۸
خطای کل	۳/۶۳۱

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله کارایی تکنیک PPP برای تعیین موقعیت مراکز تصویر در مدلسازی سه بعدی با پهپاد در مقایسه با روش PPK مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از مشاهدات عملیات فتوگرامتری با پهپاد در منطقه شهر قطور استفاده شد و پردازش مشاهدات گیرنده GNSS روی پهپاد به روش PPP با استفاده از سرویس پردازش برخط NRCAN انجام گرفت. در نظر گرفتن چند نکته برای ارزیابی کارایی این روش لازم است: ۱- زمان تصویربرداری پهپاد با نرخ مشاهدات گیرنده GNSS متفاوت است و برای رسیدن به مختصات مراکز تصویر در لحظات تصویربرداری، حداقل نیاز به انجام یک درون‌یابی خطی می‌باشد.

۲- پردازش مشاهدات گیرنده به روش PPP ما را به مختصات مرکز فاز آنتن گیرنده می‌رساند. بنابراین اختلاف فاصله‌های بین مرکز فاز آنتن گیرنده و مراکز تصویر در لحظات تصویربرداری که در فایل اطلاعات پرواز موجود است باید به نتایج پردازش PPP اعمال شوند.

۳- در روش PPP سیستم مختصات، همان چارچوب مرجع جهانی بوده ولی در روش PPK سیستم مختصات محلی است. بین این دو سیستم مختصات اختلافاتی وجود دارد که لازم است برای ارزیابی دقیق نتایج، در نظر گرفته شوند.

نتایج تعیین مختصات مراکز تصاویر به روش PPP با در نظر گرفتن کلیه موارد بالا، با نتایج مرجع (روش PPK) مقایسه شد. نتایج عددی نشان دادند که روش PPP، امکان

رسیدن به مختصات مراکز تصاویر با میانگین اختلاف حدوداً ۲ و ۷ سانتی متر به ترتیب در مؤلفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی را خواهد داشت، که بیانگر توانایی روش PPP به عنوان جایگزینی برای روش PPK می‌باشد.

همچنین از مقایسه روش PPP و PPK در ارزیابی نقاط کنترل زمینی و نقاط چک، به ترتیب میانگین خطایی در حدود ۱۰/۶ و ۱۲/۳ سانتی متر را برای PPP در مقایسه با مقادیر میانگین خطایی در حدود ۱۰/۵ و ۱۱/۶ سانتی متر برای PPK را نشان داد.

نتایج ارزیابی روی تعیین مختصات مراکز تصاویر نیز نشان داد که مختصات مراکز تصویر به روش PPP با میانگین خطای حدود ۳/۶ سانتی متر قابل برآورد است در حالیکه مقدار مذکور برای روش PPK در حدود ۲/۶ سانتی متر بوده است.

به طور کلی و در مجموع، نتایج عددی در تعیین موقعیت مراکز تصویر، برآورد موقعیت نقاط کنترل زمینی و نقاط چک عملکرد خوبی را برای روش پیشنهادی (استفاده از PPP) به عنوان جایگزینی برای PPK را نشان داد.

در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد، روش پیشنهادی این مقاله، روی مجموعه داده‌های دیگر و با مدت زمان بیشتر برای ارزیابی‌های تکمیلی بکار گرفته شود. با توجه به توسعه روزافزون تکنیک PPP و استفاده از آن در کاربردهای آبی پیشنهاد می‌گردد، استفاده از روش پیشنهادی بصورت آبی نیز مورد مطالعه قرار گیرد و مقایسه با روش RTK نیز صورت پذیرد.

۶- تشکر و قدردانی

از مسئولین محترم شرکت «جهان پیمایش سیستم» به ویژه آقای مهندس سرپولکی و همچنین آقای مهندس رادنیا که با در اختیار قرار دادن داده‌های مربوطه، امکان انجام این تحقیق را مسیر ساختند، کمال تشکر و قدردانی را داریم. همچنین از مسئولین محترم «شرکت مهندسی مشاور دستور نوین» به ویژه آقای مهندس جواهری و همچنین آقای مهندس فتحی که با راهنمایی‌های خود ما را در انجام این تحقیق یاری رساندند کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

[۱] S. Adams, C. Friedland, "A Survey of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Usage for Imagery Collection in Disaster Research and Management," 2021.

- [۲] H. Fazeli, F. Samadzadegan, F. Dadrasjavan, "Evaluating the Potential Of RTK-UAV For Automatic Point Cloud Generation In 3d Rapid Mapping," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLI-B6, 2016.
- [۳] F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, D. S. "UAV Photogrammetry for Mapping And 3d Modeling – Current Status and Future Perspectives," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019.
- [۴] E. Sanz-Ablanedo, J.H. Chandle, J. Rodríguez-Pérez, C. Ordóñez, "Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used," *Remote Sens*, 2018.
- [۵] X. An, X. Meng, W. Jiang, " Multi-constellation GNSS precise point positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination," *Satellite Navigation*, vol 1,2020.
- [۶] G. Forlani, F. Diotri, R. Roncella, "Indirect UAV strip georeferencing by on-board GNSS data under poor satellite coverage," *Remote Sens*, 2019.
- [۷] E. Cledat, L.V. Jospin, D.A. Cucci, J. Skaloud, "Mapping quality prediction for RTK/PPK-equipped micro-drones operating in complex natural environment," *ISPRS J. Photogrammetry*,2020.
- [۸] E. Sanz-Ablanedo, J.H. Chandle, J. Rodríguez-Pérez, C. Ordóñez, "Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used," *Remote Sens*, 2018.
- [۹] L. Teppati Losè, F. Chiabrando, F. Giulio Tonolo, "Are measured ground control points still required in UAV based large scale mapping? Assessing the positional accuracy of an RTK multi-roto platform," *Remote Sens*, vol. XLIII-B1, 2020.
- [۱۰] P.Martínez-Carricondo, F. Agüera-Vega & Fernando CarvajalRamírez," Accuracy Assessment Of RTK/PPK UAV photogrammetry Projects using Differential Corrections from Multiple GNSS Fixed Base Stations," *GEOCARTO INTERNATIONAL*, vol. 38, 2023.
- [۱۱] J. Tomašík, O. Martin Mokroš, P. Surový, A. Grznárová. J. Merganič, " UAV RTK/PPK Method—An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas?" *Remote Sens*, 2019.
- [۱۲] L. Jae-One, S. Sang-Min, "Assessment of Positioning Accuracy of UAV Photogrammetry based on RTK-GPS," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, 2018.
- [۱۳]. T. Ocalan, T. Turk, N. Tunaliloglu, M. Gurturk, "Investigation of accuracy of PPP and PPP-AR methods for direct georeferencing in UAV photogrammetry," *Earth Science Informatics*, 2022.
- [۱۴] H. Kim, C. Hyun, H. Park, J. Cha, "Image Mapping Accuracy Evaluation Using UAV with Standalone, Differential (RTK), and PPP GNSS Positioning Techniques in an Abandoned Mine Site," *Sensors*, 2023.
- [۱۵] C. Chi, X. Zhan, S. Wang, Y. Zhai, "Enabling robust and accurate navigation for UAVs using real-time GNSS precise point positioning and IMU integration," *The Aeronautical Journal*, vol.125, 2021.
- [۱۶] X. An, X. Meng, W. Jiang, " Multi-Constellation GNSS Precise Point Positioning with Multi-Frequency Raw Observations and Dual-Frequency Observations of Ionospheric-Free Linear Combination," *Satellite Navigation*, vol 1,2020.
- [۱۷] عبدی، ن.، "ارزیابی کارایی تعیین موقعیت مطلق دقیق به عنوان جایگزینی برای تکنیک‌های نسبی،" نشریه سپهر، ۱۳۹۶.
- [۱۸] N. Abdi, A. Ardalan, R. Karimi, M. Rezvani, "Performance Assessment of Multi-GNSS Real-Time PPP Over Iran," *Advances in Space Research*, 2017.
- [۱۹] J. F. Zumberge, M. B. Heftin, D.C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb, " Precise Point Positioning for The Efficient and Robust analysis Of GPS Data from Large Networks," *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, No. B3, 1997.
- [۲۰] X. An, X. Meng, W. Jiang, " Multi-constellation GNSS precise point positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination," *Satellite Navigation*, vol 1,2020.
- [۲۱] U. Robustelli, M. Cutugno, G. Pugliano, "Low-Cost GNSS and PPP-RTK: Investigating the Capabilities of the u-blox ZED-F9P Module," *Sensors*, 2023.
- [۲۲] M. Abou-Galala, M. Rabah, M. Kaloop, Z. Zidan, "Assessment of the accuracy and convergence period of Precise Point Positioning," *Alexandria Engineering Journal*, vol 57, 2018.
- [۲۳] B. Grayson, N. T. Penna, J. P. Mills, D. S. Grant, " GPS precise point positioning for UAV photogrammetry," *The Photogrammetric Record*, 2018.
- [۲۴] B. Erol, E. Turan, S. Erol, R. Alper Kuçak, " Comparative performance analysis of precise point positioning technique in the UAV – based mapping," *Measurement*, vol. 233, 2024.
- [۲۵] DJI. (2023). DJI Matrice 300 RTK user manual. DJI. Retrieved from:
https://dl.djicdn.com/downloads/matrice-300/20230518UM/M300_RTK_User_Manual_EN_v4.0.pdf

- [۲۶] R. Watson, J. Gross, "Evaluation of Kinematic Precise Point Positioning Convergence with an Incremental Graph Optimizer," *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 2018.
- [۲۵] M. Gurturk, M. Soykan, "Accuracy assessment of kinematic PPP versus PPK for GNSS flights data processing," *Survey Review*, 2020.
- [۲۷] REDtoolbox user manual. Retrieved from:
<https://www.redcatch.at/redtoolbox/>
- [۲۸] Takasu, T. (2013). RTKLIB user manual. RTKLIB. Retrieved from https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf
- [۲۹] NRCan user manual. Retrieved from: <https://clss.nrcan-rncan.gc.ca/clss/standards-normes/toc-canlan-terre-can>
- [۳۰] Agisoft LLC. (2023). Agisoft Metashape user manual. Agisoft LLC. Retrieved from:
<https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>