

تهیه عکس نقشه با استفاده از دوربین های غیر متریک در پرنده های بدون سرنشین غیر خود کار

میلاد رضائی^۱، صفا خزایی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوماتیک، دانشگاه ملیورن، استرالیا ۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۲/۱۲/۰۴، پذیرش: ۹۳/۰۸/۰۴)

چکیده

فتوگرامتری هوایی با استفاده از دوربین های متریک روش مرسوم تهیه نقشه های عکسی است. اما در بعضی از موارد استفاده از این تکنیک به دلیل برخی مسائل به ویژه هزینه های بالا و ریسک های جانی عملاً دور از انتظار می باشد. یک روش جایگزین، استفاده از پرنده های بدون سرنشین و دوربین های غیر متریک می باشد. در این تحقیق به منظور ارزیابی کارایی این روش، یک مطالعه موردی در شهرک صنعتی نکا با استفاده از یک کوادروتور غیر خودکار و دوربین غیر متریک ۱۰ مگا پیکسلی Sony-HX5V برای تولید نقشه های عکسی بزرگ مقیاس انجام شد. نتایج تجربی نشان می دهد که روش مذکور دارای قابلیت تولید نقشه های عکسی با مقیاس ۱:۵۰۰ تا ۱:۱۰۰ و تولید منحنی میزان های ۱۵ سانتی متری می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد این روش از لحاظ هزینه و زمان انجام پروژه نسبت به روش فتوگرامتری هوایی مرسوم در مناطق با وسعت های چند صد هکتاری کاملاً برتری دارد.

کلید واژه ها: پرنده های بدون سرنشین غیر خودکار، دوربین غیر متریک، کوادروتور، نقشه عکسی.

Ortho-Photo Generation Using Non-Metric Cameras in Non-Automatic UAVs

M. Ramezani, S. Khazaei*

Imam Hossein University

(Received: 08/10/2013; Accepted: 02/09/2014)

Abstract

Aerial photogrammetry using metric cameras is a common method for generating an ortho-photo. But use of this technique is not occasionally possible due to some problems like high cost and human casualties. An alternative approach is using nonmetric cameras mounted on unmanned aerial vehicles. In this research, to evaluate this approach, a practical case study in the industrial complex of Neka is conducted for generating a large scale ortho-photo by using a non-automatic Quadrotor and a 10 mega-pixel sony-HX5V camera. The experimental results show that the mentioned approach has an ability to generate ortho-photos in scales from 1:500 to 1:100 as well as contours with 15 cm intervals. Moreover, the results show that this approach is superior to the conventional aerial photogrammetry in areas of several hundred acres in terms of cost and time.

Keywords: Non-Automatic Unmanned Aerial Vehicles, Nonmetric Cameras, Quadrotor, Ortho-Photo.

*Corresponding Author E-mail: skhazai@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

نقشه عکسی یا تصویر ارتو^۱ در واقع یک تصویر قائم از عوارض زمین است که فاقد خطاهای تیلت^۲ (عدم تراز بودن دوربین) و جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع^۳ می‌باشد. بنابراین عکس نقشه همانند یک نقشه مسطحاتی موقعیت مسطحاتی صحیحی از عوارض را ارائه می‌دهد و در نتیجه می‌توان فواصل، زوایا و مساحت عوارض را بر روی آن محاسبه نمود. بر اساس این ویژگی‌ها، بدیهی است استفاده از عکس نقشه در کاربردهای مختلف مدیریت بحران نظیر ارزیابی و پایش بحران‌های طبیعی (مانند زلزله، سیل و آتش‌سوزی مراتع) و نیز در کاربردهای حوزه پدافند غیرعامل نظیر ارزیابی میزان خسارات وارده ناشی از حملات هوایی و شناسایی و موقعیت‌یابی اهداف نظامی خاص (مانند میادین مین و تردد گروهک‌های تروریستی، اشراک و قاچاقچیان) بسیار گسترده است. امروزه روش‌هایی که برای تهیه نقشه‌های عکسی استفاده می‌شود فتوگرامتری هوایی، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و یا استفاده از لیزر اسکنرهای هوایی می‌باشد. فتوگرامتری هوایی به همراه فناوری دوربین‌های رقومی متریک که امروزه قابلیت اخذ تصاویری با مقیاس ۱:۳۰۰۰ را نیز دارا می‌باشند، قابلیت تولید نقشه‌های عکسی در محدوده ۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۵۰۰۰ را دارا هستند [۱]. تصاویر ماهواره‌ای نیز به عنوان منابعی برای تهیه نقشه‌های مسطحاتی و تصاویر ارتو مورد استفاده واقع می‌شوند. اکنون نقشه‌هایی در مقیاس‌های ۱:۴۵۰۰۰ تا ۱:۵۰۰۰ توسط ماهواره‌ها امکان‌پذیر می‌باشد [۲]. استفاده از لیزر اسکنرها نیز چه به صورت زمینی و چه به صورت هوایی در تولید نقشه‌ها کاربرد داشته و قابلیت تولید نقش‌هایی با مقیاس ۱:۵۰۰ را دارا می‌باشند. البته پردازش‌های مربوط به داده‌های لیزر اسکنر دشوارتر از دیگر روش‌ها می‌باشد [۳].

اما در بعضی از موارد اجرایی به دلیل مسائلی از قبیل محدودیت هزینه، امکانات، مدت زمان انجام پروژه و دسترسی به داده‌ها، استفاده از چنین تکنیک‌هایی کاری طاقت‌فرسا و عملاً دور از انتظار می‌باشد. در این موارد نیازمند به یک روش میسر و مقرون به صرفه می‌باشیم که نه تنها متناسب با ابعاد منطقه و سرعت تغییرات باشد بلکه دقت مورد نیاز را نیز برآورده نماید. به منظور غلبه یا کاهش مشکلات فوق روشی که به تازگی برای تهیه نقشه‌های عکسی بزرگ مقیاس استفاده گردیده است روش استفاده از وسایل پرواز بدون سرنشین (پهباد) یا فتوگرامتری هوایی برد کوتاه است. به طور معمول پهبادهای دارای حداکثر وزن ۵ کیلوگرم، حداکثر برد ۱۰ کیلومتر، و حداکثر ارتفاع پرواز ۲۵۰ متر می‌باشند، به دلیل ارزان قیمت بودن در کاربردهای فتوگرامتری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

فتوگرامتری هوایی برد کوتاه یک شاخه جدید از فتوگرامتری است که اخیراً در بسیاری از کاربردهای نقشه‌برداری مورد استفاده قرار

می‌گیرد [۴]. می‌توان این طور بیان کرد که فتوگرامتری هوایی برد کوتاه تلفیقی از فتوگرامتری هوایی و فتوگرامتری برد کوتاه می‌باشد که در آن با نصب یک حسگر اخذ داده بر روی یک پرنده بدون سرنشین (پهباد) تصاویر غیرمتریک هوایی اخذ می‌گردد.

فتوگرامتری هوایی برد کوتاه امکان دسترسی به مناطقی را ایجاد می‌نماید که به طور معمول از طریق فتوگرامتری هوایی کاری سخت و غیر ممکن است. به عنوان مثال، در تهیه نقشه یک منطقه با ابعادی بین ۱ تا ۱۰۰ هکتار استفاده از فتوگرامتری هوایی بنا به دلایل کوچک بودن منطقه (هر عکس هوایی رقومی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ منطقه‌ای به مساحت ۴۰ هکتار را پوشش می‌دهد)، مجوزهای پرواز، هزینه‌های موجود معقول و به صرفه نخواهد بود، بنابراین در چنین پروژه‌هایی نمی‌توان از فتوگرامتری هوایی استفاده نمود. در ضمن در پروژه‌هایی که احتیاج به قدرت تفکیک بالایی از عوارض وجود دارد باید پرواز در ارتفاع پایین انجام گیرد تا بتوان به قدرت تفکیک مناسب رسید در چنین پروژه‌هایی نیز امکان پرواز وسایل پرواز سرنشین‌دار در ارتفاع پایین‌تر از ۵۰۰ وجود ندارد. همین طور رسیدن به این ارتفاع و تصویربرداری از سطح زمین از طریق روش‌هایی مانند جراثقیل و یا بالابر و غیره محدودیت‌های حمل و نقلی و زمانی بسیاری به همراه دارند. به غیر از موارد مذکور در کاربردهای مختلف مدیریت بحران و پدافند غیرعامل که وسعت منطقه محدود و احتیاج به تصاویر بزرگ مقیاس با جزئیات بالا بوده و نیاز فوری به اطلاعات در کوتاه‌ترین زمان ممکن می‌باشد، روش فتوگرامتری هوایی برد کوتاه به بهترین نحو پاسخگوی نیازها خواهد بود.

در خصوص فتوگرامتری با استفاده از پهبادهای غیرخودکار و دوربین‌های غیرمتریک تحقیقات متعددی صورت گرفته است. اولین تجربه توسط پهباد Hagi انجام شد که در ارتفاع ۱۵۰ متری با سرعت ۱۱ m/s به صورت غیرخودکار پرواز داده شد [۵]. اما سرعت بالای این پهباد در هنگام پرواز و وجود لرزش‌های موتور، موجب کاهش قابل ملاحظه کیفیت تصاویر می‌شد که این خود مانع رسیدن به نتایج رضایت بخش می‌گردید. در ضمن سیستم برای بلند شدن و فرود آمدن احتیاج به یک باند پرواز در نزدیکی منطقه مورد نظر داشت که همین امر محدودیت در استفاده از سیستم ایجاد می‌نمود. برای رفع مشکلات مذکور در سال ۱۹۸۰ و در تحقیق [۶] یک چرخ بال مدل ارائه شد که قابلیت حمل بار تا حداکثر ۳ کیلوگرم را دارا بود و می‌توانست در محدوده ارتفاعی ۱۰ تا ۱۰۰ متر پرواز نماید. در ضمن این سیستم قابلیت حمل دوربین‌هایی با اندازه متوسط همچون دوربین Rolleiflex SLX را داشت و به منظور تقلیل لرزش‌های وارد به دوربین از دیوارهای پلی استر استفاده شد که این دیوارها در قسمت تحتانی بالگرد همچون سکویی نصب می‌گردیدند. کار اخذ تصویر در این سیستم به طور غیرخودکار از طریق ارتباط رادیویی انجام می‌گرفت. در اینجا لازم به ذکر است که هدف اصلی استفاده از

¹ Ortho-Photo

² Tilt

³ Relief Displacement

⁴ Unmanned Aerial Vehicle

$$r = \sqrt{2} \times \frac{H}{f} \times \frac{p}{2} \quad (1)$$

در رابطه بالا، H/f معرف مقیاس تصویر است. در اینجا لازم به توضیح است که قدرت تفکیک مورد نیاز بر اساس دقت مساحتی نقشه عکسی مورد نیاز تعیین می‌شود که این مقدار در فتوگرامتری هوایی به صورت مرسوم $0/2$ میلی‌متر در مقیاس نقشه در نظر گرفته می‌شود. همچنین لازم به توضیح است که استفاده از $p/2$ در رابطه (۱) در واقع به این دلیل است که در عکس‌برداری توسط دوربین‌های غیرمتریک پهبادها، دقت اندازه‌گیری‌ها بر روی تصویر به میزان $0/5$ پیکسل قابل انتظار است [۱۸].

از آنجا که سامانه‌های پهباد ارزان قیمت قابلیت حمل بارهای سنگین همچون دوربین‌های متریک را ندارند، بنابراین به منظور کاهش هزینه‌ها لازم است از دوربین‌های غیرمتریک سبک وزن و مقرون به صرفه استفاده گردد. همچنین، برنامه‌ریزی مربوط به این گونه سامانه‌ها با توجه به خودکار یا غیرخودکار بودن پرواز متفاوت می‌باشد. در پروازهای خودکار باید مراکز عکس‌برداری نسبت به سامانه مختصات محلی و یا جهانی طراحی گردند. در ضمن طراحی باندهای پرواز متناسب با ارتفاعات و نوع عارضه مورد نظر متفاوت است. از سوی دیگر، تهیه مجوز پرواز برای پهبادهای غیرخودکار نسبت به وسایل پرواز سرنشین‌دار میسرتر و دارای پروسه اداری کمتری می‌باشد. با این حال اخذ مجوز از کمیته هوانوردی و مالک منطقه‌ای که در آن پرواز انجام خواهد شد جز مسائلی است که باید در برنامه‌ریزی پرواز مورد توجه قرار گیرد.

در فتوگرامتری با پهباد طراحی پرواز برای کاربردهای مختلف متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال در طراحی پروازی که برای مناطق کوهستانی و یا مدل‌سازی عوارضی همچون ساختمان‌ها در نظر گرفته می‌شود، باندهای پرواز موازی با سطح متوسط زمین نخواهند بود بلکه طراحی به گونه‌ای انجام می‌گیرد تا صفحه سنسور دوربین موازی با سطح مورد عکس‌برداری باشد [۴].

۲-۲. عکس‌برداری

تفاوت اصلی عکس‌برداری توسط سامانه‌های پهباد نسبت به سامانه‌های هوایی این است که این سامانه‌ها در محدوده ارتفاعی پایین پرواز می‌کنند. بنابراین پهبادها امکان قدرت تفکیک بیشتری را نسبت به پرواز در ارتفاعات بالا ایجاد می‌نمایند. در ضمن در بیشتر پروژه‌های فتوگرامتری که تا امروز توسط این سامانه‌ها انجام شده است از دوربین‌های غیرمتریک موجود در بازار استفاده گردیده است [۱۹] و [۲۰]. دوربین‌های غیرمتریک دارای پارامترهای توجیه داخلی ناپایداری می‌باشند و بنابراین در هر پروژه مستلزم تعیین پارامترهای کالیبراسیون دوربین می‌باشد. بنابراین پیش از عکس‌برداری باید در ابتدا از طریق عکس‌برداری از یک آزمون فیلد پارامترهای کالیبراسیون را به دست آورد یا از طریق خودکالیبراسیون پارامترهای دوربین را تهیه نمود.

فتوگرامتری در اکثر پهبادهای مجهز به وسایل ناوبری GPS و INS نظیر بالگرد RMAX [۷]، بالن‌های هلیوم [۸]، کایت‌ها [۹]، بال ثابت‌ها [۱۰]، و مینی بالگردها [۱۱]، موقعیت‌یابی و متعاقباً کمک به پشتیبانی هدایت خودکار پهباد می‌باشد. از جمله سایر تحقیقات در خصوص فتوگرامتری با پهبادهای غیرخودکار و دوربین‌های غیرمتریک می‌توان به تحقیقات [۴] و [۱۲] اشاره نمود که با اهداف ژئورفرنس کردن و تولید تصاویر ارتو انجام شده‌اند. همچنین می‌توان به تحقیقات [۱۵-۱۳] اشاره داشت که با هدف مدل‌سازی سه بعدی سازه‌ها در کاربردهای معماری انجام شده‌اند.

با توجه به تولید پهبادهای غیرخودکار در صنایع هوا فضای کشور و نیز سهولت تهیه دوربین‌های غیرمتریک، هدف از انجام این تحقیق امکان‌سنجی تهیه نقشه‌های بزرگ مقیاس با استفاده از فتوگرامتری پهباد است تا مشخص گردد که استفاده از این گونه سامانه‌های بومی در مقایسه با فتوگرامتری هوایی مرسوم معقول و مقرون به صرفه است یا خیر. در این راستا این تحقیق در نظر دارد تا در قالب یک مطالعه موردی این بررسی را انجام دهد.

در ادامه این مقاله در بخش ۲، به بررسی معیارها و شرایط استفاده از فتوگرامتری هوایی برد کوتاه جهت تهیه نقشه‌های عکسی بزرگ مقیاس پرداخته می‌شود. و سپس در بخش ۳ موضوع مورد مطالعه و آزمون‌های انجام شده ارائه می‌شوند و در انتها (بخش ۴) به ارزیابی نتایج و پاسخ این سؤال که آیا این گونه سامانه‌ها می‌توانند در تولید نقشه‌های بزرگ مقیاس از مناطق نامسطح (دارای توپوگرافی) به کار روند پرداخته می‌شود.

۲. فتوگرامتری هوایی با استفاده از پهبادها و دوربین‌های غیرمتریک

مراحل یک پروژه فتوگرامتری با استفاده از پهبادها و دوربین‌های غیرمتریک مشابه فتوگرامتری هوایی مرسوم می‌باشد [۱۶]. بر این اساس معیارهای اصلی پروژه که به چهار قسمت تفکیک می‌شوند عبارتند از [۱۷]: برنامه‌ریزی پرواز، عملیات پرواز و عکس‌برداری، محاسبات و پردازش تصاویر، و طراحی نقاط کنترل. به دلیل این که محاسبات و پردازش تصاویر شامل هر دو مبحث تهیه و تبدیل می‌باشند این دو مبحث در قالب یک بخش قبل از طراحی نقاط کنترل مطرح گردیده‌اند.

۲-۱. برنامه‌ریزی پرواز

در برنامه‌ریزی پرواز سامانه‌های پهباد، در ابتدا با توجه به نوع و ابعاد منطقه و ارتفاع پرواز اولین مسئله‌ای که باید در نظر گرفته شود انتخاب وسیله پرواز است. سپس با توجه به محدودیت‌های هر یک از این سامانه‌ها در حمل بار و قدرت تفکیک مورد نیاز، دوربین مناسب باید انتخاب گردد. رابطه بین قدرت تفکیک مکانی تصویر (r) با اندازه ابعاد آشکارسازهای دوربین (p)، ارتفاع پرواز از سطح زمین (H) و فاصله کانونی (f) از لحاظ تئوری به صورت زیر است [۱۷]:

ناهمگرایی معادلات را بالا می‌برد. در این گونه سامانه‌ها معادلات DLT در صورت حضور نقاط کنترل می‌تواند روش مناسبی برای تعیین مقادیر اولیه باشد. برای سامانه‌هایی که دارای سامانه ناوبری GPS/INS می‌باشند نیز می‌توان از اطلاعات آن‌ها به عنوان مقادیر اولیه در لحظه عکس‌برداری استفاده کرد.

با توجه به مطالب مذکور و توجه به این مسئله که در فتوگرامتری پهباد نحوه عکس‌برداری تصاویر می‌تواند به صورت پوششی و یا همگرا باشد و بر خلاف فتوگرامتری هوایی استاندارد خاصی برای عکس‌برداری در این سامانه‌ها وجود ندارد نمی‌توان گفت که نرم‌افزارهای مربوط به پروژه‌های فتوگرامتری هوایی می‌توانند جوابگوی این سامانه‌ها به طور کامل باشند مگر این که تمامی استانداردهای موجود در فتوگرامتری هوایی در این گونه سامانه‌ها رعایت شود.

۲-۴. طراحی نقاط کنترل

در پروژه‌های فتوگرامتری هوایی تعداد نقاط کنترل معمولاً متناسب با مقیاس نقشه مورد نظر می‌باشد. به عنوان مثال برای تولید نقشه‌های مسطحاتی ۱:۵۰۰ از تصاویر ۱:۴۰۰۰ در هر باند هر سه مدل فاصله یک نقطه کنترل مسطحاتی انتخاب می‌گردد و برای تولید منحنی میزان‌های ۰/۵ در تمامی مدلهای مجاور در یک باند و در باندهای مجاور از هر ۴ باند یک نقطه به عنوان نقطه کنترل ارتفاعی انتخاب می‌شود. در ضمن در فتوگرامتری هوایی به دلیل وسعت بالای منطقه و پرهزینه بودن نصب تارگت معمولاً سعی بر آن است که از عوارض طبیعی به عنوان نقاط کنترل استفاده شود. هر چند استانداردهای موجود برای طراحی نقاط کنترل به صورت مصنوعی در تحقیق [۲۲] آورده شده است.

اما در فتوگرامتری هوایی برد کوتاه به دلیل کوچک بودن ابعاد منطقه احتمال حضور نقاط طبیعی مناسب به عنوان نقاط کنترل کمتر می‌باشد. بنابراین طراحی تارگت از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. از آنجایی که ابعاد تارگت‌ها نسبت مستقیم با ابعاد پیکسل‌های حسگر دارند و معمولاً اندازه پیکسل‌های دوربین‌های غیرمتریک از دوربین‌های متریک کوچک‌تر است، بنابراین می‌توان از تارگت‌هایی با ابعاد کوچک‌تر از استانداردهای موجود در فتوگرامتری هوایی استفاده نمود. از طرفی از آنجایی که ابعاد منطقه مورد نظر در فتوگرامتری پهباد بسیار کمتر از بلوک‌های فتوگرامتری هوایی می‌باشد بنابراین حضور نقاط کنترل در این گونه پروژه‌ها بسیار اندک خواهد بود. همچنین، از لحاظ اندازه‌گیری نقاط کنترل در فتوگرامتری هوایی این نقاط متناسب با دقت مورد نیاز اندازه‌گیری خواهند شد. البته در پروژه‌هایی که هدف تولید نقشه‌های بزرگ مقیاس باشد دقت مسطحاتی و ارتفاعی برداشت این نقاط حائز اهمیت هستند و از طریق شبکه‌های نقشه‌برداری برداشت می‌شوند که همین امر باعث افزایش هزینه در پروژه خواهد شد. اما در فتوگرامتری پهباد متناسب با کاربرد می‌توان این نقاط را در یک

به طور کلی، عملیات عکس‌برداری متناسب با خودکار یا غیر خودکار بودن پرواز متفاوت است. در پروازهای خودکار سامانه‌های پهباد براساس نقاط عکس‌برداری طراحی شده در برنامه‌ریزی پرواز توسط GPS/INS کار اخذ تصاویر را به صورت خودکار انجام می‌دهند اما در پروازهای غیر خودکار عملیات پرواز و عکس‌برداری توسط اپراتور از طریق لینک رادیویی بین پهباد و کنترلر انجام می‌گیرد. در ضمن باید ذکر نمود که این سامانه‌ها به دلیل سبک بودن وابستگی شدیدی به شرایط جوی موجود در منطقه دارند. معمولاً این گونه سامانه‌ها در شرایط حضور باد تا حداکثر ۲۰ km/h قابل پرواز می‌باشند [۴]. همچنین در مورد پهبادهای بالگرد به دلیل لرزش شدیدی که موتور ایجاد می‌نماید، در لحظه پرواز لرزش‌های شدیدی به دوربین وارد می‌شود که می‌توان این لرزش‌ها را از طریق افزایش سرعت شاتر به حداقل رساند. در ضمن می‌توان با قرار دادن دمپرهایی لرزش موتور به دوربین را خنثی نمود.

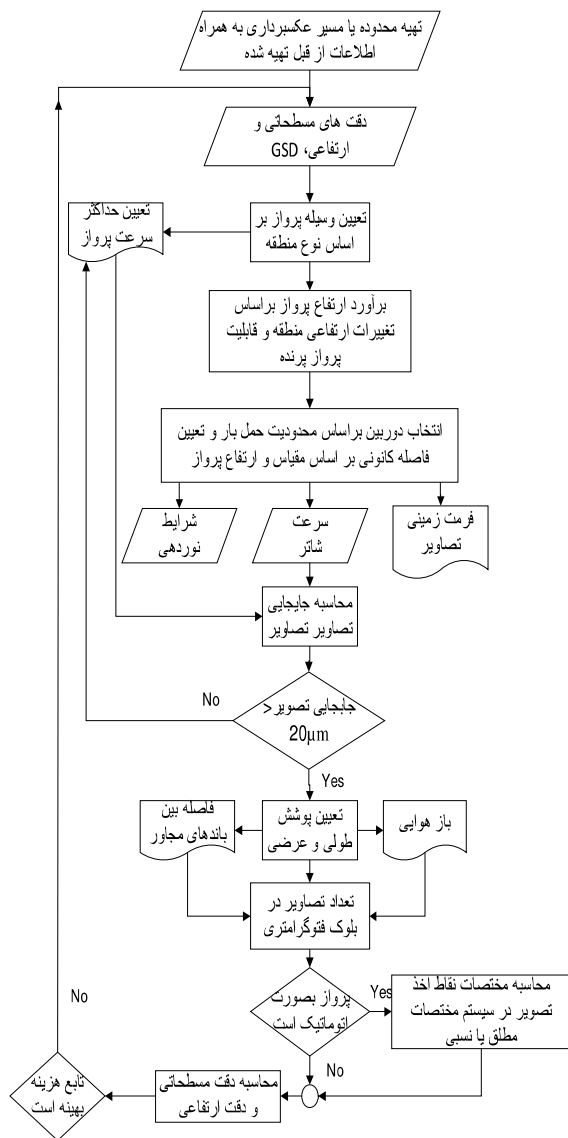
علاوه بر موارد مطرح شده در بالا عملیات عکس‌برداری سامانه‌های پهباد بر خلاف فتوگرامتری هوایی تنها به صورت پوششی (با بهینه‌ترین پوشش‌های طولی و عرضی برابر با ۶۰ درصد و ۲۰ درصد) نیست و می‌تواند متناسب با طراحی پرواز به صورت همگرا نیز باشد. بنابراین دیده می‌شود که در این گونه سامانه‌ها به دلیل بالا بودن قابلیت مانور به ویژه سامانه‌های بالگرد تنوع نحوه عکس‌برداری در این گونه سامانه‌ها بسیار بیشتر از سامانه‌های پرواز سرنشین‌دار می‌باشد [۴].

۲-۳. محاسبات و پردازش تصاویر

در فتوگرامتری هوایی محاسبات و پردازش تصاویر در قسمت تهیه و تبدیل قرار داشته و در آن‌ها مباحث مثلث‌بندی هوایی، سرشکنی بلوک، ترسیم عوارض و خروجی‌های مورد نظر مطرح می‌گردند. لازم به ذکر است که در محاسبات فتوگرامتری به منظور استخراج اطلاعات سه بعدی از تصاویر، معادلات غیرخطی به صورت خطی نوشته می‌شود و از طریق تکرار محاسبات، جواب نهایی برای مجهولات به دست می‌آید. تعداد تکرارها بستگی به انتخاب مناسب مقادیر اولیه دارد که در پروژه‌های هوایی استاندارد این مقادیر از طریق معادلات DLT^۱ و یا روش M4 ارائه شده توسط آکرمن به دست می‌آید [۲۱]. در سامانه‌هایی که دارای GPS/INS می‌باشند می‌توان از مقادیر آن‌ها نیز به عنوان مقادیر اولیه استفاده کرد. بنابراین، مقادیر اولیه برای پارامترهای مجهول نقش بسیار مهمی در سرشکنی بلوک ایفا می‌کنند. در فتوگرامتری هوایی برد کوتاه نیز محاسبات می‌تواند مشابه محاسبات فتوگرامتری هوایی می‌باشد و می‌توان از طریق معادلات شرط هم خطی پارامترهای مجهول را به دست آورد. اما به دلیل ناپایداری این گونه سامانه‌ها در لحظه عکس‌برداری و تحت تأثیر قرار گرفتن این گونه سامانه‌ها در هنگام حضور باد نمی‌توان مقادیر اولیه زوایای چرخشی ω و φ را برای این سامانه‌ها صفر در نظر گرفت. بنابراین استفاده از روش آکرمن احتمال

^۱ Direct Linear Transform

تصاویر (n_p)، پوشش طولی و عرضی (p, q) و زاویه دید دوربین بر اساس اطلاعات موجود از منطقه محاسبه شدند. در این پروژه به دلیل عکس‌برداری قائم از سطح زمین و تهیه نقشه توپوگرافی در طراحی پرواز خطوط پرواز موازی با سطح زمین در نظر گرفته شد تا عکس‌برداری در راستای نادیر انجام گیرد. به منظور طراحی پرواز در این‌گونه پروژه‌ها یک الگوریتم طراحی پرواز در قالب روند جریان شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲. الگوریتم طراحی پرواز انجام شده در این آزمون

۲-۳. پهباد مورد استفاده

در این پروژه، از بین سه گزینه سامانه پهباد در دسترس بخش خصوصی کشور (کوادروتور، هواپیما و بالگرد) کوادروتور به دلیل برخورداری از قابلیت مانور بالاتر، هدایت آسان، عدم نیاز به باند پرواز

شبکه محلی و یا جهانی برداشت نمود و به دلیل محدودیت ابعاد منطقه هزینه کمتری را شامل خواهند شد.

۳- مشخصات پروژه (مطالعه موردی)

در این قسمت یک پروژه فتوگرامتری هوایی برد کوتاه که توسط یکی از سامانه‌های پهباد غیر خودکار انجام شده است، تشریح می‌شود. منطقه مورد نظر در این تحقیق (شکل (۱))، زمینی به ابعاد ۵۰ متر واقع در شهرک صنعتی نکا می‌باشد. شهرک صنعتی نکا در ۵ کیلومتر جاده نکا- بهشهر می‌باشد. مختصات جغرافیایی مرکز منطقه مورد عکس‌برداری به طول $6^{\circ} 23' 53''$ شرقی و عرض $54'' 39' 36''$ شمالی است. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود منطقه انتخاب شده دارای توپوگرافی مناسب برای سنجش تصاویر از نقطه‌نظر تهیه نقشه‌های توپوگرافی بزرگ مقیاس بوده و در ضمن علی‌رغم حضور عوارض طبیعی، عوارض مصنوعی همچون جاده آسفالتی، دیوار و ساختمان نیز در منطقه حضور دارد. همچنین مطالعه موردی انجام شده در شرایط جوی به نسبت ناپایدار با حضور باد با سرعت ۱۷ کیلومتر در ساعت، دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۷۸ درصد انجام شد.



شکل ۱. نمایی از منطقه عکس‌برداری شده واقع در شهرک صنعتی نکا توسط کوادروتور

۳-۱. طراحی پرواز

طراحی پرواز براساس منطقه مورد نظر و دقت‌های مورد نیاز انجام گرفت. در ابتدا پارامترهای پرواز همچون فاصله کانونی، مقیاس

است که دوربین از طریق آن به بدنه وصل می‌شود و توسط دمپ‌های مخصوص (از جنس پلاستیک نرم)، ارتعاشات سامانه به دوربین تا حدود زیادی خنثی می‌گردد.

پهبادی که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفت فاقد سامانه ناوبری خودکار بود و بنابراین هدایت سامانه توسط اپراتور از ایستگاه زمینی صورت گرفت. منطقه مورد عکس‌برداری نیز توسط یک نمایشگر در ایستگاه زمینی قابل مشاهده می‌باشد و از طریق یک لینک رادیویی دستوراتی همچون اخذ تصویر، بلند شدن و فرود آمدن و هدایت سامانه توسط کنترلر انجام می‌گیرد. با این حال سامانه در مقایسه با سامانه‌های سنگین‌تر محدودیت‌های پرواز بیشتری در شرایط جوی ناپایدار دارد به گونه‌ای که ثابت نگه‌داشتن سامانه در مسیر پرواز در زمان حضور باد با سرعت بیشتر از ۲۰ کیلومتر بر ساعت در منطقه مشکل خواهد بود. در ضمن به دلیل سبک بودن سامانه و محدود بودن قدرت موتورها نسبت به موتورهای بنزینی، سامانه قابلیت حمل دوربین‌های سنگین و یا سامانه ناوبری سنگین را ندارد. همین‌طور در پروژه‌هایی با ابعاد بزرگ به دلیل محدودیت زمانی در پرواز، باید چندین بار عملیات پرواز انجام گیرد تا تمام منطقه پوشش داده شود و همین مسئله باعث تغییر در پارامترهای کالیبراسیون دوربین و اتلاف زمان می‌باشد. از دیگر معایب این سامانه محدودیت در ارتفاع پرواز می‌باشد که حداکثر تا ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین قابل پرواز هستند و از طرفی با افزایش ارتفاع منطقه از سطح MSL^۳ حداکثر وزن باری که توسط سامانه می‌تواند حمل گردد، کاهش می‌یابد.

علاوه بر این در سامانه‌های کوادروتور یک رایانه پرواز وجود دارد که این رایانه از دو بخش هدایت کننده پرواز و بخش HRS^۴ تشکیل شده است. بخش هدایت کننده پرواز در واقع بخش کنترلی و تولید سیگنال را بر عهده دارد و در بخش HRS مجموعه سنسورهای ژيروسکوپ، شتاب‌سنج و مغناطیس‌سنج وجود دارد که از طریق این سنسورها وضعیت کوادروتور مشخص می‌شود. به محض مشخص شدن وضعیت کوادروتور توسط سنسورها باز خوردی به سامانه کنترل داده می‌شود و هدایت کننده پرواز متناسب با پارامترهای وضعیت دستوراتی به موتورها می‌دهد تا موتورها به گونه‌ای حرکت کنند که سامانه به حالت پایدار باقی بماند. علاوه بر این خلبان نیز می‌تواند دستوراتی به سامانه دهد که دستورات خلبان مقدم بر دستورات رایانه پرواز می‌باشد. دستورات خلبان توسط رادیو کنترل و مشاهده پرند از طریق ایستگاه زمینی به سامانه ارسال و از طریق گیرنده‌ای که بر روی سامانه نصب می‌باشد به قسمت هدایت کننده پرواز منتقل می‌شوند.

۳-۳. طراحی نقاط کنترل

نقاط کنترل چه به صورت طبیعی و چه به صورت مصنوعی بر طبق

برای بلند شدن و فرود آمدن، هزینه کمتر و توانایی کافی برای حمل دوربین و باطری مورد نظر به عنوان وسیله پرواز انتخاب شد که در شکل (۳) نشان داده شده است. به طور معمول قیمت این سامانه‌ها متناسب با امکانات نصب شده بر روی آن‌ها از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار متغیر می‌باشد [۲۳].



شکل ۳. پهباد کوادروتور با نام زحل از شرکت فرانس، ساخت ۱۳۸۹

بر طبق طبقه‌بندی سامانه‌های پهباد [۴]، کوادروتورها در کلاس OM^۱ قرار می‌گیرند. پهباد مورد استفاده [۲۴] که در سال ۱۳۸۹ ساخته شده و از IMU^۲ برای تثبیت خود بهره می‌گیرد از ۴ موتور اصلی از نوع براشلس ۱۰۰ واتی برخوردار می‌باشد. طول هر یک از پروانه‌ها ۳۰ سانتی‌متر بوده در حالی که ابعاد خود سامانه به ۶۵ سانتی‌متر می‌رسد. حداکثر وزن برخاست ۲ کیلوگرم بوده و حداکثر حمل بار توسط این سامانه ۷۰۰ گرم (شامل باطری، گیرنده و دوربین) می‌باشد. همچنین زمان پروازی متناسب با تعداد باطری استفاده شده و ارتفاع پروازی می‌تواند از ۱۲ دقیقه تا ۴۵ دقیقه متغیر باشد. از مزایای اصلی این سامانه می‌توان به ابعاد کوچک آن اشاره نمود که این ویژگی قابلیت پرواز سامانه را در محیط‌های بسته و داخل بناها ایجاد می‌نماید. حداکثر سرعت این پهباد در حدود ۴۰ کیلومتر بر ساعت بوده که با برخورداری از ۴ موتور، قابلیت مانور سامانه را در مسیرهای تنگ و در بین ساختمان‌ها افزایش می‌دهد. این پهباد به دلیل عمود پرواز بودن احتیاجی به باند پرواز نداشته و می‌تواند به راحتی (به صورت پرتابل) در پروژه‌های فتوگرامتری مورد استفاده قرار گیرد. در قسمت تحتانی این سامانه یک پایه تعبیه شده

³ Mean Sea Level

⁴ Heading Reference System

¹ Open Source & Manual

² Inertial Measurement Units (IMU)

$$\text{RMSE}_X = \sqrt{\frac{\sum dx_i^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$\text{RMSE}_Y = \sqrt{\frac{\sum dy_i^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$\text{RMSE}_Z = \sqrt{\frac{\sum dz_i^2}{n-1}} \quad (4)$$

در روابط بالا، $dX_i = \sqrt{\frac{\sum dX_i^2}{3}}$ و $dX_{ij} = \bar{X}_i - X_{si}$ ، $dX_i = \sqrt{\frac{\sum dX_i^2}{3}}$ در روابط بالا، \bar{X}_i متوسط X_{si} ها و X_{si} مختصات X قرائت شده نقطه کنترل i ام از ایستگاه شماره s می‌باشند. دقت‌های مسطحاتی و ارتفاعی به دست آمده از این طریق به ترتیب ۱۶mm و ۵mm میلی‌متر می‌باشد. لازم به توضیح است که هرچند این خطا به طور مستقیم در محاسبات وارد می‌شود اما در دقت به دست آمده از روش فتوگرامتری تأثیرگذار نیست، زیرا که در این مورد مطالعاتی سامانه مختصات به صورت محلی در نظر گرفته شده است و هدف اصلی صرفاً تعیین دقت این روش می‌باشد. بهتر بودن دقت ارتفاعی نسبت به مسطحاتی را می‌توان به این صورت توجیه نمود که به دلیل مشخص نکردن مراکز تارگت‌ها، از هر ایستگاه که قرائت انجام می‌شد زان دقیقاً در وسط تارگت قرار داده نمی‌شد.

۳-۴. کالیبراسیون دوربین

به دلیل محدودیت حمل بار توسط کوادروتور، در این مقاله دوربینی انتخاب شد که علی‌رغم سبک بودن، پارامترهای طراحی شده در برنامه‌ریزی پرواز را نیز دارا باشد، بنابراین دوربین غیر متریک Sony-DSC-HX5V انتخاب شد که دارای سنسور CMOS^۱ با ابعاد ۱۶/۶۲×۶/۱۶ میلی‌متر می‌باشد. مشخصات این دوربین که توسط کارخانه سازنده تعیین شده است در جدول (۱) آمده است. بر اساس طراحی انجام شده فاصله کانونی ۴ میلی‌متر و سرعت شاتر ۱/۱۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در ضمن شرایط نوردهی نیز به طور تجربی توسط تغییر در چپه دیافراگم به طور دستی صورت گرفت (f=3.4, iso=200). پیش از عکس‌برداری از بلوک، آزمون فیلیدی به اندازه ابعاد منطقه مورد نظر در نظر گرفته شد و تارگت‌های طراحی شده در سطح آزمون فیلد به طور همگون پراکنده شدند که نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده از آزمون فیلد در شکل (۵) آورده شده است و از نقاط مختلف آزمون فیلد عکس‌برداری در ارتفاع تقریباً ۳۰ متری انجام گرفت. تصاویر توسط نرم‌افزار Australis6 [۲۵] مورد پردازش قرار گرفتند و پارامترهای کالیبراسیون دوربین استخراج شدند. پارامترهای مذکور در جدول (۲) آورده شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات دوربین Sony-DSC-HX5V

مشخصه	مقدار
Resolution	10 Mpixel
Pixel Dimention	1.7 μm
Weight	200 g
Dimensions	103×58×29 mm

استانداردهای موجود و دقت مورد نیاز در کل بلوک به طور یکنواخت انتخاب می‌شوند. هر چند امروزه سامانه‌های GPS/INS از لحاظ تئوری حضور نقاط کنترل را به صفر رسانده است ولی از لحاظ عملی همچنان بر طبق دستورالعمل‌ها و استانداردهای موجود، نقاط کنترل ارتفاعی و مسطحاتی در منطقه انتخاب می‌شوند. لازم به ذکر است که به دلیل فاصله زمانی بین عکس‌برداری و علامت‌گذاری نقاط مصنوعی معمولاً سعی بر آن است که از نقاط طبیعی به عنوان نقاط کنترل استفاده شود. نحوه پراکندگی و طراحی نقاط همان‌طور که در تحقیق [۴] آورده شده است. در این تحقیق نیز نحوه پراکندگی تارگت‌ها (کنترل و چک) منطبق با فواصل طراحی شده برای باز هوایی و فاصله بین باندها در نظر گرفته شد تا هم به لحاظ مسطحاتی و ارتفاعی پراکندگی مناسبی ایجاد شود و هم هدایت پروازی توسط خلبان از ایستگاه زمینی آسان‌تر گردد. در این تحقیق، ۲۱ تارگت با ابعاد ۳۰ در ۳۰ در تمامی منطقه مورد نظر قرار داده شد. جنس این تارگت‌ها از پلیمر بوده و پوششی از شیرنگ مشکی بر روی آن‌ها قرار داده شد. در مراکز تارگت‌هایی که در مناطق پست‌تر قرار داشتند شب رنگ‌های سفیدی به شکل دایره و به قطر ۱۵ سانتی‌متر تعبیه شد و تارگت‌هایی که در ارتفاعات قرار داشتند به دلیل بزرگ‌تر بودن مقیاس تصاویر، دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر در مرکز آن‌ها در نظر گرفته شد. این نقاط حین یک عملیات نقشه‌برداری توسط دوربین توتال استیشن Nivo 3.m در یک شبکه محلی مختصات گذاری شدند. نمونه‌ای از تارگت‌های استفاده شده در شکل (۴) آورده شده است.



شکل ۴. نمونه‌ای از تارگت‌های ۱۰ سانتی‌متری طراحی شده در آزمون عملی

نحوه عملیات بدین صورت بود که در ابتدا از طریق ۳ نقطه در نقاط مختلف منطقه یک شبکه محلی درجه یک بسته شد و سپس مراکز هر یک از تارگت‌ها از سه نقطه شبکه قرائت شد و سپس از طریق روابط (۲-۴) دقت‌های مسطحاتی و ارتفاعی برای نقاط کنترل محاسبه شد. لازم به ذکر است که علی‌رغم قرائت تارگت‌ها چندین نقطه نیز از عوارض موجود در منطقه به عنوان نقاط کنترل قرائت شدند.

^۱ Complementary Metal Oxide Semiconductor

جدول ۲. پارامترهای کالیبراسیون دوربین (توجیه داخلی)

پارامتر	مقدار
C	4.3645 mm
x_p	0.0059 mm
y_p	0.0163 mm
K_1	0.0003458
K_2	0
K_3	0
P_1	0
P_2	0

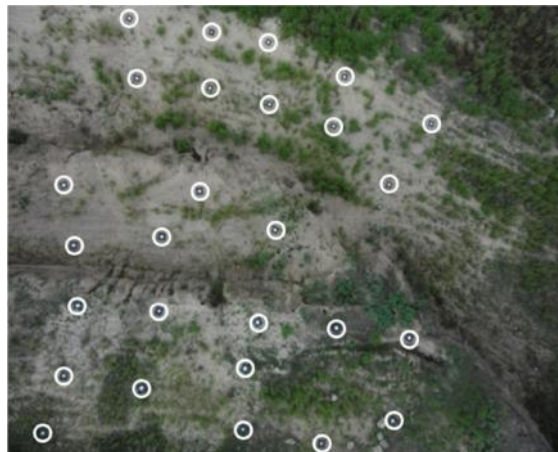
محدوده پوششی به صورت تجربی و به دو دلیل حذف گپ (فضای خالی) در تصاویر و افزایش دقت ارتفاعی انجام گردید. همان‌طور که در رابطه (۵) دیده می‌شود، دقت ارتفاعی با باز هوایی نسبت عکس داشته و بنابراین انتخاب تصاویر با پوشش بیشتر از ۸۰ درصد منجر به کاهش دقت ارتفاعی می‌شود. عدم انتخاب تصاویر با پوشش کمتر از ۷۰ درصد نیز به دلیل حذف گپ در تصاویر است. در مقایسه با فتوگرامتری هوایی مرسوم که اختلاف جابه‌جایی ارتفاعی با ارتفاع پرواز زیاد است که این امر محدوده‌های پنهان در تصاویر را کمتر می‌کند در پرنده‌های بدون سرنشین به دلیل ارتفاع پایین پرنده احتمال حضور محدوده‌های پنهان در تصاویر بیشتر می‌باشد و علت عدم انتخاب پوشش کمتر از ۷۰ درصد کم کردن این مناطق پنهان می‌باشد.

در این بخش موزاییک تصاویر توسط الگوریتم SIFT^۱ انجام گرفت. این الگوریتم عوارضی را در عکس پیدا می‌کند که این عوارض مستقل از مقیاس، دوران، جابه‌جایی و تا حدودی تغییرات روشنایی می‌باشند [۲۶]. بعد از استخراج این عوارض که موسوم به نقاط کلیدی می‌باشند، توسط الگوریتم RANSAC^۲ عوارض متناظر بین دو تصویر با اعتمادپذیری بالایی استخراج شدند. حال با داشتن نقاط متناظر می‌توان ماتریس انتقال بین دو تصویر را به دست آورد و از این طریق یک تصویر را به فضای تصویر دیگر منتقل نمود. بدین صورت قسمت‌های مشترک تصاویر بر روی یکدیگر قرار می‌گیرند و پوشش طولی تصاویر و دوران آن‌ها نسبت به یکدیگر مشخص می‌شود. اگر پوشش تصاویر با یکدیگر در آستانه تعریف شده قرار نگیرد در آن صورت الگوریتم با تصویر بعدی تکرار خواهد شد. مراحل مختلف موزاییک بین دو تصویر در قالب یک روند جریان در شکل (۶) آورده شده است. از این مسئله نه تنها می‌توان برای استخراج تصاویر بهینه بهره جست بلکه می‌توان یک کنترل اولیه از عدم وجود گپ در بین تصاویر و اخذ صحیح تصاویر بعد از عملیات عکس‌برداری انجام داد.

۴. نتایج تجربی

در این قسمت با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعه موردی انجام شده و تحقیقات صورت گرفته به بررسی امکان‌سنجی اینگونه سامانه‌ها برای تهیه نقشه‌های عکسی پرداخته می‌شود.

مدت زمان انجام یک پروژه فتوگرامتری هوایی برد کوتاه و هزینه مربوط به آن قابل مقایسه با دیگر روش‌های تولید نقشه‌های توپوگرافی نیست. به عبارت دیگر می‌توان گفت که این سامانه‌ها در هر بار پرواز قابلیت عکس‌برداری از منطقه‌ای با ابعاد در حدود چند صد متر را دارا می‌باشند و سرعت اخذ داده در اینگونه سامانه‌ها بسیار بالاتر از روش‌های دیگر همچون نقشه‌برداری زمینی است. مدت زمان مربوط به مورد مطالعاتی در این مقاله در جدول (۳) آورده شده است.



شکل ۵. نمایی از آزمون فیلد

۳-۵. عکس‌برداری هوایی و پردازش تصویر

بلافاصله بعد از انجام کالیبراسیون، کوادروتور بر اساس طراحی پرواز از قبل انجام شده در ابتدای باند اول پرواز قرار گرفت. به دلیل عدم مجهز بودن پهباد به سامانه پرواز خودکار، پرواز توسط اپراتور هدایت شد. بنابراین امکان اخذ تصاویر در موقعیت‌های طراحی شده وجود نداشت. به منظور حل این مشکل سامانه توسط سرو موتوری که برای اخذ تصاویر به صورت غیرخودکار توسط اپراتور تعبیه شده بود در حالتی قرار داده شد تا دوربین هر ۵/۰ ثانیه تصویر اخذ نماید. بدین صورت این اطمینان حاصل شد که تصاویر دارای پوشش طولی کافی می‌باشند. اما پوشش بیش از حد تصاویر نیز باعث کاهش شدید دقت ارتفاعی می‌شود. بر طبق رابطه (۵) [۲۱]، باز تصاویر (b) با دقت ارتفاعی (dZ) نسبت عکس داشته بنابراین با افزایش بیش از حد پوشش طولی تصاویر، نسبت $\frac{H}{b}$ بزرگ شده که همین امر باعث کاهش دقت ارتفاعی می‌شود.

$$dZ = \frac{H}{f} \frac{H}{b} \sigma_p \quad (۵)$$

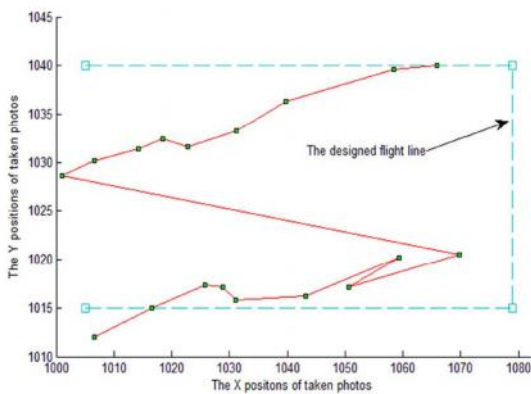
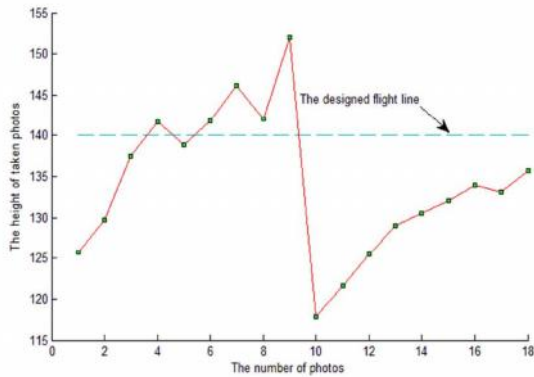
در رابطه بالا، σ_p خطای پارالاکس می‌باشد.

به دلیل غیرخودکار بودن اخذ تصاویر، تصاویری که در هر باند اخذ شد از مقایسه محدوده‌های مشترک دو به دو با یکدیگر موزاییک داده شدند و تصاویری که قسمت پوششی آن‌ها از ۷۰ درصد بیشتر و از ۸۰ درصد کمتر بوده به عنوان تصاویر بهینه استخراج شدند. انتخاب این

¹ Scale Invariant Feature Transform

² RANdom Sample Consensus

مربوط به نقاط چک و کنترل نشان داده شده است. با توجه به نتایج دقت مربوط به این آزمون و سامانه‌های مشابه دیگر می‌توان با اعتمادپذیری بالایی بیان نمود که این‌گونه سامانه‌ها می‌توانند برای تولید نقشه‌های عکسی بزرگ مقیاس و برای تولید منحنی میزان‌هایی با فاصله کمتر از ۰/۵ متر استفاده شوند.



شکل ۶. بالا: موقعیت ارتفاعی تصاویر اخذ شده را نشان می‌دهد که با دور شدن پرنده از دید خلبان، اختلاف ارتفاع نسبت به ارتفاع طراحی شده بیشتر می‌شود. پایین: موقعیت تصاویر اخذ شده را به صورت مسطحاتی نشان می‌دهد که با دور شدن پرنده از دید خلبان موقعیت پرنده نسبت به موقعیت طراحی شده افزایش می‌یابد.

جدول ۴. دقت نقاط (متر) در دو حالت با تعداد نقاط کنترل و چک متفاوت.

'RMSE	X(m)	Y(m)	Z(m)
۲۰ نقطه چک	۰/۰۴۰	۰/۰۱۸	۰/۰۷۵
۳ نقطه کنترل	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱
۱۷ نقطه چک	۰/۰۱۹	۰/۰۱۴	۰/۰۴۷
۶ نقطه کنترل	۰/۰۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۱۸

جدول ۳. مدت زمان صرف شده در هر مرحله از آزمون

زمان (در منطقه با ابعاد ۱۰۰×۵۰ متر)	مرحله انجام شده
۱ روز	نصب تارگت‌ها و نقشه‌برداری زمینی
۵ دقیقه	عکس‌برداری از آزمون فیلد
۲ دقیقه	عکس‌برداری از بلوک
۶۰ دقیقه	استخراج تصاویر بهینه
۵ ساعت	مثلث‌بندی
۱ هفته	ترسیم
۱ هفته	تولید مدل ارتفاعی و نقشه منحنی میزان
۱ ساعت	تولید تصویر ارتو

در آزمونی که انجام شد به دلیل عدم حضور هدایت خودکار و انجام هدایت به صورت غیراتوماتیک و توسط خلبان از پایگاه زمینی، اعمال کامل طراحی پرواز مقدور نبود و باندهای پروازی به لحاظ موقعیت مسطحاتی و ارتفاعی با طراحی پرواز اختلاف زیادی داشتند که این تفاوت‌ها در شکل (۶) آورده شده است. همین‌طور به دلیل عدم هدایت خودکار و ارتفاع گرفتن پهباد، با دور شدن از دید خلبان و متعاقباً کاهش مقیاس تصاویر، پراکندگی نقاط چک نیز متمرکز به سمت مراکز تصاویر شدند. همین امر منجر به کاهش کنترل دقت در گوشه‌های تصویر شده است، البته هدف در این مطالعه موردی در محدوده ابعاد ذکر شده می‌باشد، که این دقت در تمامی نقاط منطقه مورد نظر تأمین شده است.

همچنین در آزمون انجام شده به دلیل افزایش سرعت در محاسبات و ارزیابی دقت از ماتریس‌های بنیادین استفاده شد. این ماتریس‌ها که از هندسه پروژکتیو تبعیت می‌کنند بیشتر در بینایی رایانه و ویدئوگرامتری استفاده می‌شوند [۲۷] و در آزمون انجام شده دیده شد که نه تنها سرعت محاسبات قابل مقایسه با سرشکنی دسته اشعه نمی‌باشد، بلکه دقت نیز با سرشکنی دسته اشعه برابری می‌نماید. به عنوان مثال در آزمون انجام شده بعد از استخراج تصاویر بهینه که ۱۰ درصد تصاویر اخذ شده را در بر می‌گیرد، از طریق روش موزاییک در هر باند ۹ تصویر استخراج گردید و نقاط متناظر استخراج شده از این تصاویر در معادلات سرشکنی بر مبنای ماتریس بنیادین قرار گرفتند. در ابتدا محاسبات از طریق قرار دادن سه نقطه از نقاط اندازه‌گیری واقع در اطراف بلوک به عنوان نقاط کنترل انجام شد و همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، دقت مسطحاتی و ارتفاعی که برای نقاط چک از طریق تفاضل مقادیر مشاهداتی و محاسباتی از مدل به دست آمد به ترتیب ۴۴mm و ۷۵mm بود. بردارهای خطای مربوط به نقاط چک و کنترل برای این حالت در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود یک خطای سامانه‌ای در وسط بلوک دیده می‌شود. اما با قرار دادن ۶ نقطه کنترل از بین نقاط اندازه‌گیری شده واقع در اطراف بلوک دقت‌های مسطحاتی و ارتفاعی برای نقاط چک به ۲۴mm و ۴۷mm رسید. برای این حالت نیز، در شکل (۷-ب) بردارهای خطای

¹ Root Mean Square Error

۵. نتیجه گیری

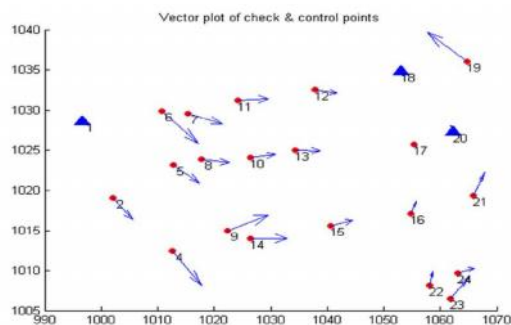
در این تحقیق سعی بر آن شد تا به امکان سنجی روش جدید فتوگرامتری پهباد در کاربردهای فتوگرامتری به ویژه تهیه نقشه‌های بزرگ مقیاس عکسی پرداخت. می‌توان این روش را در حد فاصل فتوگرامتری هوایی و فتوگرامتری برد کوتاه قرار داد. ارزیابی نتایج نشان داد که رسیدن به دقت‌های مناسب برای تولید نقشه‌های بزرگ مقیاس از طریق دوربین غیرمتریک موجود در بازار عملاً کاری امکان‌پذیر می‌باشد. استفاده از سامانه‌های پهباد نیز منجر به کاهش دخالت انسانی در کاربردهای فتوگرامتری می‌شود. همین مسئله باعث می‌شود تا به کارگیری این گونه سامانه‌ها در مناطق غیرقابل دسترس و یا خطرناک به عنوان یک ایده عملی و مقرون به صرفه باشد. وسیله پرواز کوادروتور نیز به عنوان یک سامانه پهباد در آزمون عملی مورد استفاده قرار گرفت و دیده شد که هر چند پرواز به طور غیر خودکار انجام شد اما نتایج به دست آمده در حد انتظار بود و با پارامترهای طراحی پرواز مطابقت می‌کرد. در ضمن می‌توان از مزایای این سامانه نسبت به سامانه‌های دیگر به صدای کمتر موتورها و هزینه کمتر تعمیر و نگهداری از این گونه پهبادها اشاره نمود. هر چند سامانه محدودیت زیادی در حمل بار و مقاومت در برابر شرایط جوی ناپایدار از خود نشان می‌دهد ولی می‌توان از آن در تولید نقشه‌های بزرگ مقیاس استفاده کرد. در پروژه‌هایی با ابعاد بزرگ می‌توان از دیگر سامانه‌های پهباد استفاده کرد که قابلیت پرواز خودکار را داشته باشند. پرواز خودکار بسیاری از مسائل مربوط به پوشش و مقیاس تصاویر را از بین خواهد برد و در این صورت مراحل عکس‌برداری به عکس‌برداری هوایی استاندارد بسیار نزدیک‌تر خواهد شد. در ضمن با افزایش اندازه ابعاد تصاویر می‌توان منطقه بیشتری را در هر تصویر پوشش داد. البته با افزایش اندازه تصاویر ابعاد دوربین نیز افزایش می‌شود که همین مسئله منجر به حرکت به سمت استفاده از پهبادهایی با قابلیت حمل بار بیشتر می‌گردد.

۶. تقدیر

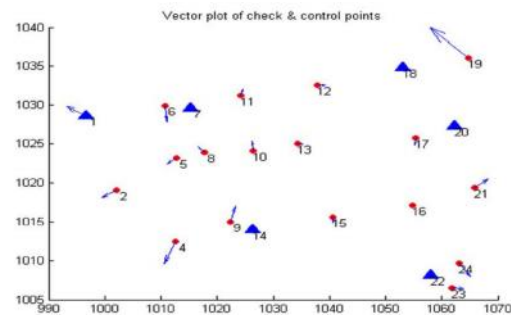
کلیه سخت‌افزارهای پروازی مورد استفاده در این تحقیق توسط شرکت هوافضای فرناس در اختیار قرار داده شد که بدین وسیله از ایشان تشکر و قدردانی به عمل می‌آید. همچنین نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از دانشگاه جامع امام حسین (ع) و به‌ویژه مهندس حامد میرزاعلی که زمینه انجام این تحقیق را فراهم نمودند، کمال تشکر را داشته باشند.

۷. منابع

- [1] "Tariff of Surveying Services, Civil Design Regulations Approved 1352"; No. 2339, 1385 (In Persian).
- [2] [Http://www.Iranarea.Ir/Default.aspx](http://www.Iranarea.Ir/Default.aspx) (Accessed December 10 2011)
- [3] <http://www.riegl.com> (Accessed December 10 2011)
- [4] Eisenbeiss, H. "UAV Photogrammetry"; Ph.D. Thesis, ETHZ Univ., Zurich, 2009.



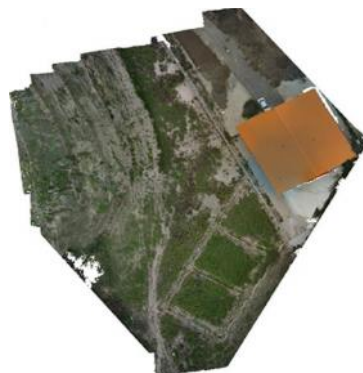
الف



ب

شکل ۷. بردارهای خطا برای نقاط چک (نقاط قرمز) و نقاط کنترل (مثلث‌های آبی). الف: در حالت استفاده از ۳ نقطه کنترل. ب: در حالت استفاده از ۶ نقطه کنترل.

نقشه عکسی تولید شده در این مطالعه موردی در شکل (۸) نشان داده شده است. قدرت تفکیک این تصویر به دست آمده ۲ سانتی‌متر است که با میزان تئوری آن (رابطه (۱)) مطابقت دارد. مقدار قدرت تفکیک تئوری در این مطالعه موردی با فاصله کانونی در نظر گرفته شده در جدول (۲) و میانگین ارتفاعی ۴۰ متر ۱ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین، به لحاظ اینکه جابه‌جایی ارتفاعی و تیلت در تصویر حذف شده است هر پیکسل دارای مختصات متناظر با پیکسل زمینی در سامانه مختصات تعریف شده است. این تصویر یکپارچه که موسوم به تصویر ارتو می‌باشد نه تنها ابعاد و موقعیت عوارض را همانند یک نقشه‌برداری با دقت بالا نشان می‌دهد بلکه به لحاظ رادیومتریکی نیز به دلیل حضور بافت در شناسایی عوارض به صورت بصری بسیار مؤثر و مفید است.



شکل ۹. نقشه عکسی منطقه عکس‌برداری شده در مقیاس ۱:۲۰۰

- [15] Yasuda, Y.; Miyatsuka, Y. "Archaeological 3D Visualization for Chinese Fortress Sites"; GIS Development, <http://www.gisdevelopment.net/application/archaeology/general/archg0015.htm>. (Accessed May 19 2014).
- [16] Mcglone, C.; Mikhail, E.; Bethel, J. "Manual of Photogrammetry"; Fifth Ed., The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.
- [17] Moffitt, F. H.; Mikhail, E. M. "Photogrammetry"; Third Ed., p 91-98.
- [18] Kersten, T. "Digital Aerial Triangulation in Production - Experiences with Block Switzerland"; Photogrammetric week, Wichmann, 1999.
- [19] Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., Rinaudo, F. "UAV and RPV Systems for Photogrammetric Surveys in Archaeological Areas: Two Tests in the Piedmont Region"; J. of Archaeological Sci. 2011, 38, 697-710.
- [20] Quaritsch, M.; Kuschnig, R.; Hellwagner, H.; Rinner, B.; "Fast Aerial Image Acquisition and Mosaicking for Emergency Response Operations by Collaborative UAVs"; In proc. of the 8th Int. ISCRAM Conf., Lisbon, Portugal, 2011.
- [21] Samadzadegan, F. "Analytical Computation in Photogrammetry and Computer Vision"; Tehran Univ. Press: Tehran, 2009.
- [22] "Regulations of Digital Maps Generation in Scale 1:500, 1:1000, 1:2000"; 1380 (In Persian)
- [23] "Phantom 2 Vision+"; <http://www.dji.com/product>, 2014.
- [24] <http://farnaspasargad.ir/> (Accessed February 10 2014)
- [25] Photometrix Ltd., "Australis 6.06 Software User Manual"; 2005. <http://www.photometrix.com.au/support.html>, 2009.
- [26] Lowe, D.G.; "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints"; J. of Int. Computer Vision 2004, 60, 91-110.
- [27] Faugeras, O. "Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint"; MIT Press, 1993.
- [5] Przybilla, H.; Wester-Ebbinghaus, W.; "Bildflug Mit Ferngelenktem Kleinflugzeug"; J. of Bildmessung und Luftbildwesen, Zeitschrift fuer Photogrammetrie und Fernerkundung 1979, 137-142.
- [6] Wester-Ebbinghaus, W.; "Aerial Photography by Radio Controlled Model Helicopter"; J. of The Photogrammetric Record 1980, 10, 85-92.
- [7] Yahama, Y. "Sky Systems Corporate Website"; <http://www.yamaha-motor.co.jp/global/about/business/sky/index.html>, 2009.
- [8] Gruen, A., Zhang, L., Visnovcova, J. "Automatic Reconstruction and Visualization of a Complex Buddha Tower of Bayon, Angkor, Cambodia"; J. DGPF. 2001, 21, 289-301.
- [9] Aber, J. S.; Aber, S. W.; Pavri, F. "Unmanned Small-Format Aerial Photography from Kites for Acquiring Large Scale, High-Resolution, Multiview-Angle Imagery"; J. of the Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sci. 2002.
- [10] Herwitz, S. R.; Leung, J. G.; Higgins, R. G.; Dunagan, S. E. "Remote Command-and-Control of Imaging Payloads Using Commercial Off-the-Shelf Technology"; J. of Geoscience and Remote Sensing Symposium 2002, 2726-2728.
- [11] Eugster, H; Nebiker, S. "Geo-Registration of Video Sequences Captured from Mini UAVs - Approaches and Accuracy Assessment"; J. of Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sci., 5th Symposium on Mobile Mapping Tech., Padua, Italy, 2007.
- [12] Barazzetti, L.; Brumana, R.; Oreni, D.; Previtali, M.; Roncoroni, F. "True-Orthophoto Generation from UAV Images: Implementation of a Combined Photogrammetric and Computer Vision Approach", ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sci., II-5, 2014.
- [13] Karras, G. E.; Mavromati, D.; Madani, M.; Mavrelis, G.; Lymeropoulos, E.; Kambourakis, A.; Gesafidis, S. "Digital Orthophotography in Archaeology with Low-Altitude Non-Metric Images"; Int. Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, WG V/2 & 5, Thessaloniki, Greece, XXXII-5/W11, 8-11, 1999.
- [14] Zischinsky, T.; Dorfner, L.; Rottensteiner, F. "Application of a New Model Helicopter System in Architectural Photogrammetry, In: International Archives of Photogrammetry"; Remote Sensing and Spatial Information Sci., ISPRS Congress, Amsterdam, the Netherlands, XXXIII, B5/2, 959-965, 2000.