

طراحی شبکه پرواز سه‌بعدی فتوگرامتری پهپاد‌مبنا در نواحی شهری با تاکید بر کاهش اختلاف مقیاس زیاد و نقاط پنهان

سحر لطیف‌زاده^۱، فرشید فرنود احمدی^{۲*}، حمید عبادی^۳، علی مهدی‌نژاد گری^۴

^۱ کارشناسی ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
Sahar.latifzadeh@gmail.com

^۲ دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه تبریز
Farnood@tabrizu.ac.ir

^۳ استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
Ebadi@kntu.ac.ir

^۴ کارشناسی ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
Alimahdinezhad@yahoo.com

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

چکیده

استفاده از محصولات دقیق و به‌روز فتوگرامتری برای برنامه‌ریزی شهری بسیار حائز اهمیت است، زیرا شهرها سیستم‌های فیزیکی و اجتماعی پیچیده و پویایی می‌باشند که دائماً در حال تغییرند. یکی از روش‌های سریع و کم‌هزینه برای تولید این محصولات، فتوگرامتری پهپاد‌مبنا است اما محدودیت‌های این روش نیازمند راه‌حل‌های خاص برای توسعه سیستم در مناطق شهری است. در حال حاضر، اکثر پروژه‌های فتوگرامتری پهپاد در مناطق شهری بدون توجه به تغییرات ارتفاعی زمین و ارتفاعات عوارض مختلف و همچنین نقاط پنهان اجرا می‌شوند. هر سه مورد مذکور در دقت و کیفیت محصولات خروجی در مناطق دارای عوارض ارتفاعی تأثیر فراوانی می‌گذارند. سیستم توسعه‌یافته طراحی پرواز ارائه‌شده در این مقاله براساس اصول فتوگرامتری، علاوه بر توجه به ارتفاع عوارض گوناگون مانند ساختمان‌ها و ناهمواری‌های زمین که موجب یکنواختی حتی‌الامکان مقیاس و پیشگیری از برخورد پرنده به عوارض می‌شود، شامل تصویربرداری مایل جهت کاهش نقاط پنهان نیز هست. روش پیشنهادی در یک منطقه شهری پیاده‌سازی گردید. نتایج نشان از کیفیت بالای ابرنقطه خروجی و دقت مسطحاتی ۴/۴ و ۳/۶ سانتی‌متر و دقت ارتفاعی ۷ و ۴ سانتی‌متر در مقیاس درخواستی ۱/۷۵۰ دارد. همچنین، وجود تصاویر مایل می‌تواند سهم خوبی در تولید اطلاعات در اتصال بین دیوارها و زمین و تراکم نقاط نمای ساختمان‌ها در منطقه داشته باشند. نتایج حاکی از موفقیت‌آمیز بودن طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم طراحی شبکه سه‌بعدی پرواز فتوگرامتری پهپاد‌مبنا مبتنی بر مدل زمین و عوارض است.

واژگان کلیدی: فتوگرامتری پهپاد‌مبنا، مناطق شهری، طراحی پرواز سه بعدی، نقاط پنهان، ثبات مقیاس، تصویربرداری مایل

* نویسنده مسئول

۱- مقدمه

رشد جمعیت شهری، توسعه اقتصادی و اجتماعی باعث گسترش فزاینده فضای شهری شده است [۱] و به‌نوبه خود چالش‌های مهمی برای توسعه پایدار، مقاومت در برابر بلایای طبیعی، تغییرات آب‌وهوا و مدیریت منابع در مناطق شهری ایجاد کرده است [۲] [۳]. برای درک بهتر الگوهای پویا و حمایت از تصمیم‌گیرندگان در مورد توسعه بهینه شهری، تهیه نقشه و مدل سه‌بعدی به‌روز، دقیق و مداوم در مقیاس بزرگ ضروری است [۴]. در دهه‌های اخیر فتوگرامتری پهپادمبنا، تبدیل به روشی کم‌هزینه و قابل‌دسترس برای تصویربرداری هوایی شده است. اما این روش در تهیه نقشه شهری مشکلاتی چون نواحی پنهان^۱، تغییرات مقیاس زیاد، اعوجاجات نسبتاً شدید ارتوفتو در محل لبه ساختمان‌ها دارد و همچنین به علت ارتفاع پایین پرواز و ارتفاع بلند ساختمان‌ها احتمال برخورد پرنده با موانع به علت وزش ناگهانی باد و یا عدم کنترل خلبان افزایش می‌یابد. با طراحی شبکه بهینه پیش از انجام عملیات پرواز این مشکلات تا حد زیادی بهبود می‌یابند. اهمیت طراحی شبکه در فتوگرامتری به ویژه اندازه‌گیری دقیق در محیط‌های پیچیده به خوبی اثبات شده است [۵-۱۰]. طراحی پرواز را می‌توان از مهم ترین بخش‌های طراحی شبکه فتوگرامتری پهپادمبنا دانست، چراکه به‌غیراز نوع مدل ریاضی فتوگرامتری و پارامترهای آن، تقریباً بقیه فاکتورهای تأثیرگذار بر دقت نهائی، در این مرحله تعیین می‌شوند. طراحی پرواز به دقت اطلاعات مکانی موردنیاز، مقیاس نقشه مورد درخواست، توپوگرافی منطقه و مانور پذیری سکوی پرواز بستگی دارد [۱۱].

در پروژه‌های فتوگرامتری پهپادمبنا، ثبات مقیاس و یا تغییرات کم در آن، تأثیر بسیار زیادی در افزایش استحکام هندسی بلوک دارد. تعریف مقیاس در فتوگرامتری رقومی (در طراحی پرواز) با قدرت تفکیک مکانی پیکسل پیش‌بینی‌شده در زمین^۲ مرتبط است که معمولاً به‌عنوان GSD شناخته می‌شود. در این تعریف زمین یک صفحه در نظر گرفته‌شده و مقیاس در طول کل تصویر ثابت است. باین‌حال، حد تفکیک واقعی پیکسل به‌طور مستقیم به ارتفاع اخذ تصویر از سطح توپوگرافی و شفافیت عدسی مربوط می‌شود. ازجمله نکات

ضروری در طراحی پرواز پهپاد، رعایت اختلاف ارتفاع خطوط پرواز، متناسب با اختلاف ارتفاع موجود در منطقه و عوارض است که سبب حصول مقیاس یکسان در تصاویر و در نتیجه به حداکثر رساندن حد تفکیک نقشه‌ها می‌گردد [۱۲] [۱۳]. برای درنظرگیری شرایط واقعی منطقه وجود اطلاعات ارتفاعی پیش از طراحی پرواز ضروری است برای تهیه اطلاعات ارتفاعی راه‌های مختلفی وجود دارد. یکی از راه‌حل‌های آسان استفاده از اطلاعات ارتفاعی ماهواره‌ای است. امروزه راه‌حل‌های بسیاری برای اجرای مسیرهای پرواز پهپاد بر اساس توپوگرافی در دسترس است. با وجود این، نرم‌افزارهای موجود به مدل‌های ارتفاعی زمینی با وضوح پایین و دقت کم (مانند SRTM) متکی هستند. چنین مدل‌های زمینی با وضوح پایین و دارای دقت ارتفاعی متوسط ۱۰ متر و در مناطق کوهستانی حداکثر ± 30 می‌باشند. بنابراین، هنگامی که منطقه موردنظر محدود است و همچنین دارای عوارضی مانند ساختمان است (ارتفاع عوارض در مدل‌های ارتفاعی ماهواره‌ای در نظر گرفته نمی‌شوند مگر برخی از ماهواره‌ها همانند ALOS که مدل سطح تولید می‌کند البته با همان دقت پایین) استفاده از این روش‌ها ما را به‌دقت بالا در محصولات فتوگرامتری مناطق ذوعارضه نمی‌رساند، به همین علت اکثر نرم‌افزارهای پرواز سه‌بعدی توسعه‌یافته در مناطق شهری دچار ضعف هستند.

نکته مهم دیگری که برای تولید محصولات فتوگرامتری دقیق در مناطق ذوعارضه وجود دارد، مزایای ادغام تصاویر قائم و تصاویر مایل برای اهداف متریک هست [۱۴-۱۷]. وجود نواحی پنهان در مناطق شهری به علت وجود عوارض با ارتفاع‌های متفاوت و تراکم بالا سبب پایین آمدن کیفیت محصولات و ایجاد گپ می‌گردد که با اضافه کردن تصاویر مایل به بلوک فتوگرامتری توقع می‌رود این مشکلات برطرف گردد.

چندین روش برای طراحی شبکه پرواز، روش‌های کنترل و اجرای نرم‌افزار برای پرواز پهپادها در مقالات علمی منتشر شده‌است که در ادامه چند نمونه آورده شده‌است. یکی از مهمترین اشتراکات در دسترس بودن یک مدل تقریبی از منطقه یا شی است تا به کمک آن طراحی به‌گونه‌ای انجام گیرد که قابلیت دید تارگت‌ها لحاظ شود و به‌عنوان اطلاعات اولیه در طراحی شبکه به کار گرفته شود.

^۱ Occlusion area

^۲ Ground Sampling Distance

طراحی پرواز، دارای زمان پرواز کمتر درعین حال همپوشانی بیشتر تصاویر بودند.

چندین محقق توجه خود را به مطالعه تصویربرداری مایل و بهینه‌سازی الگوریتم‌های آن، به اصطلاح تصویربرداری غیرمتعارف^۵ معطوف کرده‌اند. از جمله [۱۷-۱۴] که توسط گروه ژئوماتیک Politecnico di Torino در موضوع تصاویر مایل، یکی در کلیسا S.Maria و دیگری در چشمه هرکول در باغ‌های وناریا^۶ [۲۳] ارائه شده‌است. در هر دو پروژه تصویربرداری هوایی با دوربین‌های مایل انجام شده و تصاویر حاصل از آن پردازش شده‌است. در [۲۴]، بررسی در مورد چگونگی تأثیر مراحل مختلف طراحی پرواز و جهت‌گیری‌های دوربین بر روی نتایج یک پروژه فتوگرامتری پهپادمنبا انجام گرفته‌است. از مجموعه مختلفی از داده‌ها با استفاده از پارامترهای مختلف در یک سایت باستانی استفاده شده‌است. جهت‌گیری دوربین و تنظیم برنامه‌های پرواز دو بعدی و سه بعدی با اخذ تصاویر مایل و قائم و همچنین پروازهایی با جهت نوارهای پروازی متفاوت انجام گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد ابرنقاط و دقت اطلاعات عمودی با استفاده از تصاویر مایل بهبود داده می‌شوند. اما باید توجه داشت در یک سایت باستان‌شناسی با سازه و دیواره‌های کوتاه امکان ارزیابی این نوع تصویربرداری به بهترین شکل موجود نیست و می‌بایست در یک منطقه شهری با عوارض بلند و بافت‌های مختلف تست انجام گیرد. در [۲۵]، یک سیستم تصویربرداری فتوگرامتری پهپادمنبا با پنج دوربین مایل برای تصویربرداری از منطقه شهری و تولید مدلسازی سه بعدی فضای شهری توسعه داده شده‌است. این سیستم توسط یک میکروکنترلر متصل به سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و سیستم ناوبری ماهواره‌ای (BDS) کنترل شده‌است. پس از تصویربرداری از منطقه شهری، تصاویر اخذ شده توسط پنج دوربین مایل با استفاده از محاسبات موازی در نرم‌افزار مدلسازی Smart3D پردازش شده‌اند. نتایج بررسی‌های انجام گرفته نشان داده که روش پیشنهادی در این مقاله می‌تواند به طور موثر مجموعه اطلاعات مکانی شهری را تکمیل کند و در مقایسه با روش‌های مرسوم تصویربرداری با پهپاد، حدود ۳۰ درصد بهبود یافته‌است.

در ETH^۱ زوریخ [۱۸] روشی جهت طراحی شبکه پرواز سه بعدی پهپاد برای مستندسازی کاوش‌های باستان‌شناسی در مناطق کوچک و تولید محصولات فتوگرامتری ارائه شده‌است. در این تحقیق از ارتوفتو و مدل رقومی سطح (DSM^۲) منطقه برای طراحی شبکه پیش از پرواز استفاده شده و در چهار سایت باستانی با شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌است. در [۱۹] رویکردی برای کنترل ثابت GSD در بلوک‌های فتوگرامتری به صورت پس پردازش پیشنهاد شده‌است. جهت تخمین میانگین ابعاد واقعی پیکسل زمینی از تکنیک میانگین‌گیری برای هر تصویر فتوگرامتری بر اساس ارتفاع آن‌ها با توجه به مدل رقومی ارتفاعی (DEM^۳) منطقه استفاده شده‌است. میانگین ابعاد واقعی پیکسل زمینی بر مبنای شرط هم‌خطی و روش تکرار برای هر تصویر، نوار و بلوک تخمین زده شده‌است. [۲۰] رویکردی برای طراحی یک پرواز خودکار با قید ثابت نگاه‌داشتن ارتفاع بر اساس الگوریتم FMS^۴ پیشنهاد داده‌است. این الگوریتم شامل دو پارامتر تنظیم است که بر اساس آن‌ها محدودیت ارتفاع پرواز و نرمی مسیر پرواز تنظیم می‌گردد و در محیط شبیه‌سازی شده سه بعدی با زمینی دارای تغییرات ارتفاعی تست شده‌است. در [۲۱] چارچوبی برای پرواز پهپاد با توجه به توپوگرافی زمین در مناطق با شیب زیاد به طور مثال مناطق کوهستانی ارائه شده‌است. در این الگوریتم ایستگاه‌های تصویربرداری با استفاده از اطلاعات ارتفاعی منطقه بر اساس بهترین صفحه برازش داده شده بر روی سطح محاسباتی، با ارتفاع یکسان از سطح طراحی شده‌است تا اندازه پیکسل ثابت بماند. در [۲۲]، روش طراحی نوارهای پرواز فتوگرامتری بر اساس DEM در قالب چهار حالت (بر اساس شیب زمین) ارائه شده‌است. در این طراحی پیش از پرواز، همپوشانی واقعی تصاویر و GSD در مدل ارتفاعی منطقه به طور دقیق محاسبه شده و بر اساس این پارامترها فاصله میان نوارها، بازتصویربرداری و ارتفاع پرواز به طور تطبیقی با توجه به توپوگرافی زمین طراحی شده‌است. برای ارزیابی روش ارائه شده، هر چهار حالت طراحی پرواز در یک شبیه‌سازی پیاده‌سازی شده‌اند. نتایج نشان داده‌است که حالت‌های طراحی پرواز ارائه شده به نسبت حالت سنتی

^۱ Swiss Federal Institute of Technology

^۲ Digital Surface Model

^۳ Digital Elevation Model

^۴ Fast Marching Square

^۵ Non-conventional

^۶ Venaria Reale

البته توجه به این نکته ضروری است که استفاده از این روش ملزم به در اختیار داشتن تجهیزات مختلف است.

مطالعه تحقیقات و بررسی روش‌های آن‌ها با در نظر گرفتن اهمیت تولید نقشه‌های بزرگ‌مقیاس دقیق شهری یا نیمه شهری، نشان از عدم توجه کافی به ارتفاع عوارض در کنار توپوگرافی در مناطق شهری به عنوان یک پارامتر موثر در طراحی پرواز دارد که این امر موجب کاهش کیفیت و عدم ثبات مقیاس در محصولات فتوگرامتری در این مناطق شده‌است. همچنین، به حل مشکل نقاط پنهان نمای ساختمان‌ها در مدل سه‌بعدی و اعوجاج ارتوفتوی مناطق شهری در لبه ساختمان‌ها و دیوارها در محصولات فتوگرامتری پهپادمبنا به درستی پرداخته نشده‌است. برای حل این مشکلات در این تحقیق به طراحی پرواز، به عنوان یکی از مهم‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین مراحل تهیه نقشه به روش فتوگرامتری در مناطق شهری، به شکل ویژه ای پرداخته شده‌است. یک روش طراحی پرواز فتوگرامتری در محیط سه بعدی مختص مناطق دارای عوارض ارتفاعی با ادغام تصویربرداری مایل بدون استفاده از سیستم‌های چند دوربینه انجام گرفته‌است و اثر این پارامترها بر دقت نهایی محصولات ارزیابی شده‌است.

۲- فرآیند بررسی پارامترهای موثر در طراحی پرواز سه‌بعدی در تحقیق

در این تحقیق، سیستمی برای طراحی پرواز سه‌بعدی پهپاد در مناطق ذوعارضه ارائه شده‌است که آن را به سوی اهداف خود با حفظ شرایط هندسی و الزامات کیفیت هدایت کند. همچنین، پیش‌پردازش‌هایی بر روی داده‌ها انجام گرفته تا محصولات نهایی با کیفیت تری تولید گردد. در بخش‌های زیر مشخصات فنی فتوگرامتری در نظر گرفته‌شده با جزئیات شرح داده شده‌است.

۲-۱- تولید اطلاعات ارتفاعی پیش از طراحی پرواز

همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، برای تولید محصولات مکانی دقیق از یک منطقه شهری وجود اطلاعات ارتفاعی منطقه پیش از طراحی پرواز ضروری است و هرچه این مدل‌های ارتفاعی دقیق‌تر باشد، طراحی انجام‌گرفته براساس آن‌ها نیز دقیق‌تر خواهد بود. DEM

اطلاعات ارتفاعی زمین و DSM اطلاعات ارتفاعی عوارض را برای طراحی ایستگاه‌های اخذ تصاویر فراهم می‌آورد. راه حل‌های در نظر گرفته‌شده برای تولید دقیق این مدل‌های ارتفاعی، انجام یک پرواز دوبعدی ابتدایی پیش از پرواز اصلی بر روی منطقه و یا استفاده از تصاویر پیشین منطقه در صورت اطمینان از عدم تغییر توپوگرافی و عوارض است. پس از انجام پردازش فتوگرامتری بر روی تصاویر پرواز اولیه (یا تصاویر پیشین منطقه)، DSM از ابرنقطه متراکم^۱ تولید می‌شود ولی برای تولید DEM، ابرنقطه متراکم نیازمند یک مرحله فیلتر است تا عوارض دست‌ساز بشر و پوشش گیاهی مرتفع که در منطقه شهری موجود است حذف شود و تنها نقاطی که متعلق به زمین هستند باقی بماند. در این مرحله وجود یک روش طبقه بندی بهینه از نظر زمان و دقت بسیار مفید است بدین جهت چند نرم افزار پرکاربرد که قابلیت فیلترینگ ابرنقطه را دارا هستند، مورد بررسی قرار گرفت. نرم‌افزارهای مورد استفاده همگی از نرم‌افزارهای پرکاربرد و عمومی برای پردازش ابرنقطه می‌باشند: Photoscan Agisoft^۲، Global mapper^۳، CloudCompare^۴ و Lastools^۵.

فلوچارت مراحل انتخاب روش بهینه فیلترینگ جهت جداسازی ابرنقاط سه بعدی زمینی از ابرنقاط عوارض دست‌ساز بشر و پوشش گیاهی مرتفع در شکل ۱ آورده شده‌است.

در این تست بر روی یک ابرنقطه سه بعدی از منطقه شیب‌دار و ذوعارضه در هر چهار نرم افزار، عملیات فیلترینگ انجام گرفت. سپس با مقایسه روش‌ها براساس دقت و زمان پردازش، روش مورد استفاده در نرم‌افزار Photoscan Agisoft بخصوص در نسخه نهایی متاشیپ^۶ انتخاب شد. این نرم افزار علاوه بر روش فیلترینگ ابرنقطه دقیق، امکان ارتباط با زبان برنامه نویسی پایتون و انجام مراحل پردازشی از طریق اسکریپ نویسی به صورت خودکار را نیز دارد. در نتیجه در این مطالعه اطلاعات ارتفاعی دقیق منطقه شهری با استفاده از نرم‌افزار متاشیپ و اسکریپت

۱ Dense point cloud

۲ <https://www.agisoft.com>

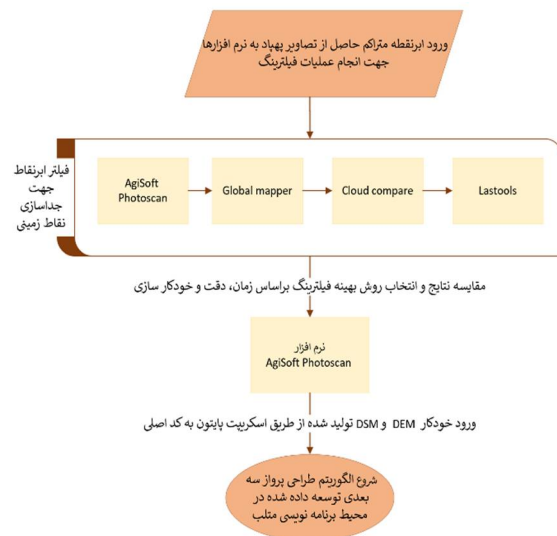
۳ <https://www.globalmapper.com>

۴ <https://www.cloudcompare.org>

۵ <http://lastools.org/>

۶ Metashape

نویسی به صورت خودکار تولید شد و به عنوان اولین داده ورودی به الگوریتم طراحی پرواز سه بعدی در محیط برنامه نویسی متلب وارد شد.



شکل ۱- فلوجارت مراحل انتخاب روش بهینه فیلتربینگ جهت جداسازی ابرنقاط سه بعدی زمینی از ابرنقاط عوارض دست‌ساز بشر و پوشش گیاهی مرتفع

۲-۲- بهینه‌سازی طراحی پرواز فتوگرامتری پهپادمبنا در منطقه شهری

طراحی پرواز علاوه بر اطلاعات ارتفاعی منطقه نیازمند چندین پارامتر ورودی توسط کاربر است تا براساس مقیاس و پوشش تصویربرداری درخواستی، GSD محاسبه شود. در پروژه‌های فتوگرامتری پهپادمبنا به علت محدودیت‌هایی که در مقایسه با فتوگرامتری هوایی دارد، معمولاً وضوح تصویر نهایی از GSD انتخابی کمتر است. با توجه به تنوع دوربین‌های مورد استفاده در انواع پهپادها و تاثیر وضوح عدسی بر کیفیت داده‌های مکانی، می‌بایست وضوح تصویر دوربین پهپاد مورد استفاده قبل از تصویربرداری تعیین شود و در محاسبات GSD در طراحی پرواز حتماً در نظر گرفته شود [۲۶]. زیرا خطاهای دیگری در ادامه فرآیند تبدیل محصولات به نقشه نهایی مانند خطاهای ترسیمی نیز وارد پروژه می‌گردد و رسیدن به نتایج نهایی دقیق نیازمند مدل اولیه دقیقی است.

در فرآیند طراحی پرواز وجه تمایز پرواز سه بعدی و پروازهای متداول محاسبه مؤلفه ارتفاعی ایستگاه‌های

تصویربرداری است. در طراحی پرواز دوبعدی متداول، هدف قرارگیری WPS^۱ در یک صفحه با ارتفاع ثابت برابر با ارتفاع پرواز، بالای منطقه است. مجموع ارتفاع میانگین منطقه و ارتفاع پرواز محاسباتی، برابر با مؤلفه ارتفاعی مختصات ایستگاه تصویربرداری در پرواز دوبعدی هست که برای همه نقاط یکسان است. در طراحی پرواز سه بعدی هدف، تعیین ارتفاع اخذ هر تصویر به طور جداگانه با توجه به سطح ارتفاعی زیر هر تصویر است تا ارتفاع پرنده از سطح زمین و عوارض تا حد ممکن ثابت بماند. تحقق این مهم در منطقه شهری نیازمند توجه ویژه به ارتفاع عوارض دارد. از موارد تاثیرگذار در طراحی پرواز این مناطق، تاثیر ارتفاع عوارض واقع در تصاویر و نوارهای پروازی مجاور در محاسبه ارتفاع هر ایستگاه تصویربرداری است. به این معنی که ممکن است در قسمت‌های مرکزی سطح تصویر بر روی زمین تا منطقه وسیعی عارضه‌ای وجود نداشته باشد ولی ارتفاع عوارض حاشیه‌ای سهم زیادی در تعیین ارتفاع ایستگاه مذکور را ایفا می‌کند. این مورد بخصوص در حالت پوشش تصویربرداری زیاد که در اکثر پروژه‌های فتوگرامتری پهپادمبنا جهت استحکام بلوک انجام می‌گیرد نمایان است. در راستای حل این مشکل، روشی نوین برای محاسبه ارتفاع زیر سطح هر عکس ارائه شده است.

۲-۲-۱- تعیین سطح مؤثر ارتفاعی

هدف ایجاد سطحی مؤثر است که ارتفاعات عوارض و نقاط زمینی درون این سطح بر ارتفاع پرواز تاثیرگذار باشد نه ارتفاعات کل سطح تصویر. ایجاد سطح مؤثر ارتفاعی، باعث کاهش تاثیر پوشش بالای تصویربرداری و افزایش تاثیر ارتفاعات مرکزی در ارتفاع یک عکس می‌شود. این سطح می‌بایست متغیری بر اساس پوشش طولی و عرضی تصاویر باشد. بدین صورت که هرچقدر پوشش تصاویر کمتر باشد سطح مؤثر بزرگ‌تر در نظر گرفته شود و بالعکس. نتیجه حاصل شده رابطه‌ای است که بر اساس فرمول پوشش تصاویر فتوگرامتری نوشته شده است. در صورت استفاده از این رابطه پوشش طولی و عرضی تصویربرداری هیچ تغییری نمی‌کند و ایجاد سطح مؤثر تنها بر محاسبه ارتفاع ایستگاه‌های تصویربرداری مؤثر است. فرمول ابداعی سطح مؤثر ارتفاعی (رابطه ۱) در زیر آمده است.

^۱ Waypoints

برای انتخاب راحت‌تر کاربر یک بازه اعداد برای دو پارامتر تنظیم توسط الگوریتم محاسبه‌شده و ارائه می‌گردد. این بازه نشان‌دهنده تعداد تصاویری است که براساس پوشش تصویربرداری، هر تصویر می‌تواند در جهت طول و عرض با آن‌ها پوشش داشته باشد. رابطه ۲ در زیر آمده است:

$$nE = \frac{99 Dx}{100B} \quad nL = \frac{99 Dy}{100W} \quad (2)$$

nE : نشان‌دهنده تعداد تصاویری است که یک عکس با سطح کامل با آن‌ها پوشش طولی دارد.

nL : نشان‌دهنده تعداد تصاویری است که یک عکس با سطح کامل با آن‌ها پوشش عرضی دارد.

بازه اعداد معتبر در nE و nL در رابطه ۳ آورده شده است.

$$0 < nE \leq ne - 1 \quad (3)$$

$$0 < nL \leq nl - 1$$

پس از محاسبه سطح موثر ارتفاعی برای هر تصویر بر روی زمین، ارتفاع نقاط زمینی و عوارض در این محدوده استخراج می‌شود. برای محاسبه ارتفاع توپوگرافی از DEM دقیقی که پیش از طراحی تولید شد استفاده شده است و برای استخراج ارتفاع دقیق عوارض شهری یک تست انجام شد که در زیربخش ۲-۲-۲ آورده شده است.

۲-۲-۲- استخراج ارتفاع عوارض

از آنجایی که یکی از داده‌های ورودی DSM منطقه است، ارتفاع عوارض به همراه مختصات زمینی در دسترس است. در این تحقیق دو روش استخراج ارتفاع مورد بررسی قرار گرفت:

۱- $nDSM$: در این مدل سه‌بعدی تفریقی هر پیکسل نشان‌دهنده ارتفاع مطلق عوارض تا سطح زمین است. برای تولید آن می‌بایست DEM و DSM از یک منطقه با رزولوشن یکسان و تفکیک دقیق در دسترس باشد. پس از تولید $nDSM$ از منطقه موردنظر، در نواحی که عوارض موجود است، ارتفاع آن‌ها در پیکسل ناحیه نیز وجود دارد و در مناطقی که تنها شامل نقاط زمینی هستند مقدار صفر قرار داده می‌شود.

$$RL = 1 - \frac{Dx - (nE+1) B}{Dx} \quad 0 < RL \leq 1$$

$$\text{if } 0/9 < RL = 1 \quad (1)$$

$$RW = 1 - \frac{Dy - (nL+1) W}{Dy} \quad 0 < RW \leq 1$$

$$\text{if } 0/9 < RW = 1$$

nE^1 : تعداد عکس‌های پوشش‌دار در جهت طولی

Dx^2 : طول زمینی عکس (در جهت پرواز)

B : باز تصویربرداری

RL^3 : مقداری که در مرکز عکس بر طول عکس اعمال می‌شود و بازه آن بزرگ‌تر از صفر و کوچک‌تر از یک هست.

nL^4 : تعداد عکس‌های پوشش‌دار در جهت عرضی

Dy^5 : عرض زمینی عکس (عمود بر جهت پرواز)

W : فاصله میان نوارهای پرواز

RW^6 : مقداری که در مرکز عکس بر عرض عکس اعمال می‌شود و بازه آن بین صفر تا یک هست.

مقادیر خروجی این فرمول (RW و RL) بر مقدار طول و عرض تصویر کامل در مرکز اعمال می‌شوند تا طول و عرض سطح مؤثر ایجاد شود. مقادیر خروجی هرگز صفر نمی‌شوند مگر اینکه باز تصویربرداری و یا فاصله بین نوارها صفر باشد که در این صورت پهپاد حرکتی نداشته است و هنگامی یک می‌شوند که استفاده از کل سطح عکس برای محاسبه ارتفاع مدنظر باشد. تعداد تصاویر مؤثر که با تصویر اصلی پوشش‌دارند، به‌عنوان پارامترهای قابل تنظیم برای کاربر در نظر گرفته‌شده که با متغیرهای nE و nL تعریف شده‌اند. هرچقدر nE بزرگ‌تر شود پوشش طولی با عکس‌های دورتر در نظر گرفته می‌شود و سطح مؤثر بزرگ‌تر می‌شود و با افزایش nL نیز همین فرایند در جهت عرضی تکرار می‌شود.

^۱ Number of images in the End overlap

^۲ Dimension of the image in x direction (along-track)

^۳ Reduce Image Length

^۴ Number of images in the Lateral overlap

^۵ Dimension of the image in y direction (perpendicular-track)

^۶ Reduce Image Width

۲- نقشه شیب: در این روش نقشه شیب منطقه با استفاده از DSM تولید شد سپس نقاط با بیشترین شیب از آن استخراج شده است که نشان دهنده وجود عارضه ارتفاعی در منطقه است. با کمک نقشه شیب می توان محل و ارتفاع ساختمان های شناسایی شده را از DSM استخراج نموده و با تطبیق مختصاتی تعیین کرد هر ساختمان در چه عکسی موجود است.

بررسی ها نشان داد از میان روش های ارائه شده، روش nDSM در مناطق شهری و ذوعارضه عملکرد بهتری دارد. زیرا ارتفاع عوارض بلند که از مشخصه های مهم منطقه شهری هستند، در هر شرایطی اعم از کوهستانی و یا مسطح، استخراج شده اند. در روش استفاده از نقشه شیب نتایج حاکی از آن است که ساختمان ها در منطقه کم شیب به خوبی استخراج شده اند اما در قسمت پرشیب و تپه ای ساختمان به درستی تشخیص داده نمی شود و ارتفاع حاصله تنها مربوط به زمین است. پس نقشه شیب به منظور استخراج ساختمان در این مناطق ضعف دارد.

در نهایت ارتفاع هر WPS شامل (رابطه ۴) ارتفاع پرواز محاسباتی بر اساس مقیاس درخواستی، میانگین ارتفاعات نقاط زمینی زیر هر عکس و در صورت وجود ارتفاع عوارض به طور مثال ساختمان، درخت و ... است.

$$H_n = h_{\text{calculated}} + h_{\text{DEM}} + h_{\text{nDSM}} \quad (4)$$

H_n : ارتفاع پرواز پهپاد در ایستگاه n ام

۲-۲-۳- تعدیل ارتفاعی ایستگاه های پرواز

در مرحله آخر طراحی پرواز سه بعدی یک تعدیل ارتفاعی دو شرطی برای ایستگاه های پرواز در نظر گرفته شد. در طراحی شبکه پرواز به صورت سه بعدی چون ارتفاعات ایستگاه ها متفاوت است، پرواز بر فراز ساختمان ها و دیگر عوارض نیازمند تمهیداتی است که تغییرات ارتفاعی ناگهانی، امنیت پرواز را به خطر نیندازد و تأثیر آن بر روی نتایج کاهش یابد. بدین منظور پس از محاسبه ارتفاعات سه بعدی ایستگاه های تصویربرداری، یک تعدیل ارتفاعی براساس بررسی های انجام گرفته در این پژوهش بر روی ارتفاع ایستگاه های تصویربرداری اعمال شد.

شرط اول) حد آستانه این شرط در هر نوار پرواز جداگانه محاسبه می گردد. با در نظر گرفتن ارتفاعات پرواز WPS در هر نوار، بیشترین و کمترین ارتفاع استخراج شده است. از بیشترین ارتفاع که شامل بلندترین عارضه و یا بلندترین نقطه زمینی است (در مناطق شهری بلندترین ساختمان محتمل تر است.) ارتفاع پرواز محاسباتی کسر و عدد حاصل شده به عنوان کمترین ارتفاع در کل نوار اعمال شده است. بدین صورت که ارتفاع تمام ایستگاه ها پس از گذر از این شرط یا باید بزرگ تر از این عدد باشند و یا اگر کوچک تر بودند برابر با این ارتفاع در نظر گرفته شوند. بنابراین هرگز ارتفاع پهپاد در هر نوار کمتر از بلندترین عارضه آن نوار پروازی نمی گردد.

شرط دوم) در شرط دوم، تغییرات ارتفاع بین هر دو ایستگاه در نظر گرفته می شود. هدف ایجاد حد آستانه برای تغییرات فرود و اوج پرنده در پرواز میان ایستگاهی می باشد. نکته قابل ذکر تعیین حد آستانه است. در این تحقیق حد آستانه بر اساس قانون پایه تغییر ارتفاع فتوگرامتری انتخاب گردیده است. بر اساس این قانون برای حفظ پوشش میان تصاویر در بلوک، تغییرات ارتفاع میان دو ایستگاه نباید بیشتر از ۱۰٪ باشد (رابطه ۵).

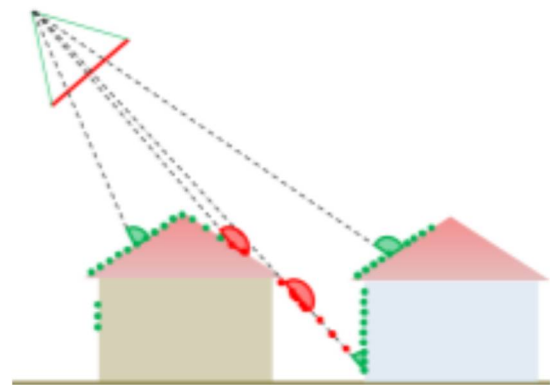
$$dh = h_{\text{calculated}} \times 0.1 \quad (5)$$

در خصوص اعمال مقدار dh برای تعدیل ارتفاعی ایستگاه های پرواز، شروط زیر مورد استفاده قرار گرفته است.

- اگر ارتفاع پرواز ایستگاه بعدی از ایستگاه کنونی پهپاد بیشتر باشد، ارتفاع پرواز ایستگاه کنونی بعلاوه مقدار dh شده و ارتفاع جدید حاصل می شود. سپس، اگر ارتفاع پرواز ایستگاه بعدی از ارتفاع جدید بزرگتر باشد، ارتفاع جدید جایگزین ارتفاع پرواز ایستگاه بعدی می شود.
 - اگر ارتفاع پرواز ایستگاه بعدی از ایستگاه کنونی پهپاد کمتر باشد، ارتفاع پرواز ایستگاه کنونی از مقدار dh کسر شده و ارتفاع جدید حاصل می شود. سپس، اگر ارتفاع پرواز ایستگاه بعدی از ارتفاع جدید کوچکتر باشد، ارتفاع جدید جایگزین ارتفاع پرواز ایستگاه بعدی می شود.
- سه بعدی سازی طراحی پرواز فتوگرامتری پهپاد مبنا پس از اعمال تعدیل ارتفاعی به پایان می رسد.

۳-۲- تصویربرداری مایل

مزیت مهم دستیابی به تصاویر از یک منظر مایل، امکان مشاهده عناصری است که معمولاً در تصویربرداری قائم در نواحی پنهان‌شده اطراف درختان و عوارض بلند قرار می‌گیرند و باعث ایجاد یک دید جدید از اشیا مانند لبه‌های جاده و ساختمان‌های کوتاه‌تر موجود در منطقه می‌گردد [۲۷].



شکل ۲- تصویربرداری مایل

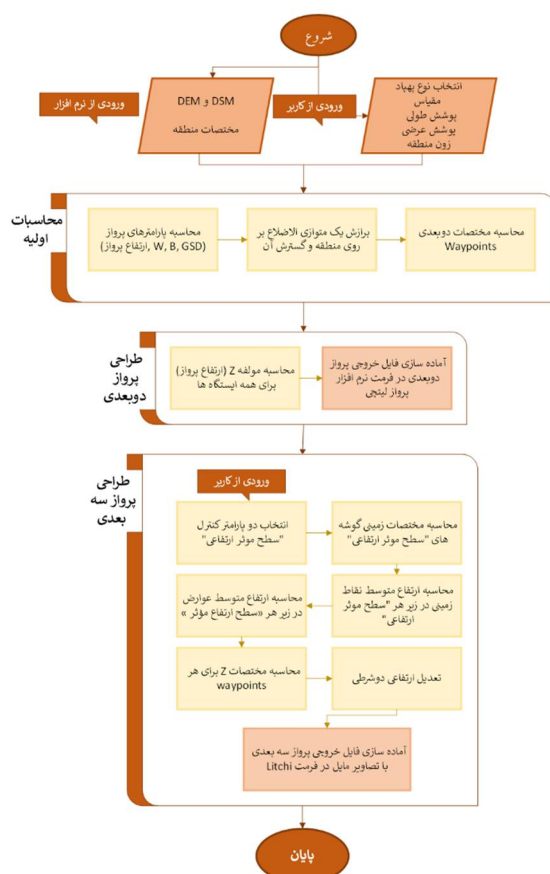
استفاده از سیستم‌های چند دوربینه برای تصویربرداری مایل، روشی است که در بسیاری از تحقیقات بررسی‌شده و نتایج بسیار خوبی هم به همراه داشته‌است، اما این تکنیک نیازمند خرید تجهیزات اغلب گران قیمت دارد و هدف نویسندگان در این تحقیق رسیدن به نتایج دقیق با استفاده از امکانات موجود می‌باشد، پس تصویربرداری مایل در این تحقیق با دوربین‌های مایل انجام نگرفته‌است. با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته در تصویربرداری منطقه شهری، زاویه مایل 30° برای تصاویر مایل انتخاب گردید با طراحی پرواز در هر ایستگاه هم تصاویر قائم و هم تصاویر مایل با تغییر زاویه دوربین و دوران پرنده با سیستم تصویربرداری مرکزی، اخذ شده‌است. از میان نرم افزارهای کاربردی پرواز پهپاد در زمینه نقشه برداری، تنها نرم‌افزار لیتچی^۱ قابلیت دریافت مختصات سه‌بعدی به صورت نقطه‌ای در یک فایل ورودی را دارد و همچنین در هر نقطه می‌توان زوایای دوربین و چرخش پلتفرم را تغییر داد.

برای بررسی مزیت وجود و تعداد تصاویر مایل در طراحی پرواز منطقه شهری دو حالت تصویربرداری مایل به طراحی پرواز سه بعدی اضافه شد، ۱_ اخذ دو تصویر مایل

در جهت طولی خط پرواز (30° جلو و عقب) ۲_ اخذ چهار تصویر مایل دو تصویر در جهت خط پرواز (30° جلو و عقب) و دو تصویر عمود بر خط پرواز (30° راست و چپ)

۴-۲- روش پیشنهادی

براساس نتایج بررسی‌هایی که بر روی عوامل موثر بر طراحی پرواز سه بعدی در مناطق شهری در بخش‌های ۱- ۲، ۲-۲ و ۳-۲ انجام گرفت، فلوجارت طراحی پرواز فتوگرامتری پهپاد‌مبنا پیشنهادی که دربردارنده فرآیند تحقیق در این پژوهش است، در شکل ۳ آورده شده‌است.



شکل ۳- روند نمای الگوریتم پیشنهادی

Waypoints: ایستگاه‌های تصویربرداری

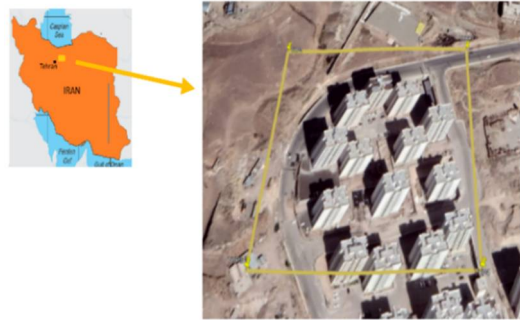
۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

برای تعیین محدودیت‌ها و مزایای الگوریتم پرواز سه بعدی توسعه داده شده، پیاده سازی در یک منطقه شهری انجام گرفت.

^۱ [https:// www.flylitchi.com](https://www.flylitchi.com)

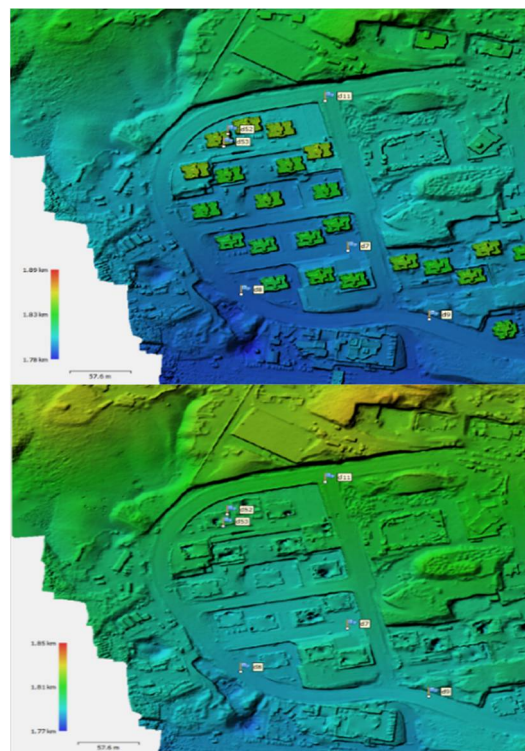
۳-۱- منطقه مورد مطالعه

برای ارزیابی بهتر روش پیشنهادی، یک منطقه شهری به وسعت ۴.۴ هکتار دارای اختلاف ارتفاع زمینی ۴۰ متر و ساختمان‌هایی با ارتفاعات بین ۳۰ تا ۴۳ متر برای پیاده سازی انتخاب شد. این منطقه واقع در شهر جدید پردیس در شمال شرق شهر تهران، می‌باشد.



شکل ۴ - جانمایی منطقه مورد مطالعه در Google Earth

برای تهیه اطلاعات ارتفاعی در مرحله طراحی پرواز اصلی، از داده‌های برداشت شده پیشین با اطمینان از عدم تغییرات منطقه برای تولید DSM همچنین DEM با روش منتخب در بخش تولید اطلاعات ارتفاعی روش تحقیق استفاده شده‌است.



شکل ۵ - DSM تولیدشده از منطقه پرواز (تصویر بالا) و DEM تولیدشده از منطقه پرواز (تصویر پایین)

۳-۲- پلتفرم

اخذ تصاویر در این پروژه نیازمند یک پلتفرم با مانورپذیری بالا در عملیات پرواز بود که از کوادکوپتر عمود پرواز فانتوم ۴ DJI استفاده شد که در جدول ۱ ویژگی‌های آن آورده شده‌است. گیمبال پهپاد فانتوم ۴ قابلیت دوران بین 90° - تا صفر درجه را داراست. که 90° - قائم و صفر درجه شمال را نشان می‌دهد. پس در طراحی پرواز تصاویر مایل 30° ، زوایا 60° - در نظر گرفته شده‌است.

جدول ۱ - اطلاعات دوربین پهپاد فانتوم چهار

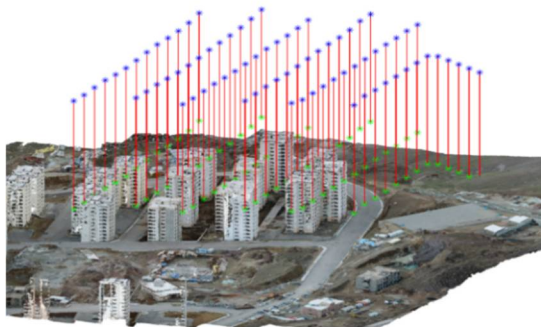
فاصله کانونی	۳/۶۱ میلی‌متر
ابعاد هر پیکسل	۱/۵ میکرومتر
ابعاد سنسور	۴.۵*۶ میلی‌متر
تعداد پیکسل‌ها در سطر و ستون	۴۰۰۰*۳۰۰۰

۳-۳- پیاده‌سازی طراحی پرواز سه‌بعدی مبتنی بر مدل رقومی زمین و ارتفاعات عوارض

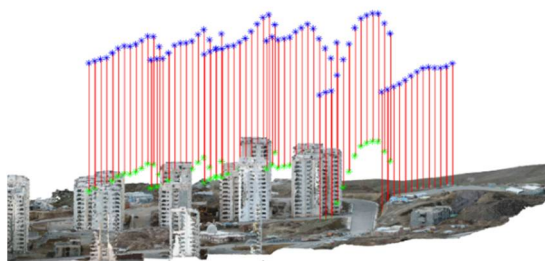
برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی دو طراحی پرواز با مقیاس تصویربرداری و پوشش طولی و عرضی یکسان اما سطح موثر ارتفاعی و تعداد تصاویر مایل متفاوت، انجام شد تا امکان مقایسه نتایج براساس این پارامترها فراهم شود. دو طراحی پرواز منتخب در ادامه آورده شده‌است:

- (۱) طراحی پرواز سه‌بعدی با اخذ یک تصویر قائم و دو تصویر مایل بر اساس سناریو ارتفاعی سطح کل تصویر
- (۲) طراحی پرواز سه‌بعدی با اخذ یک تصویر قائم و چهار تصویر مایل بر اساس سناریو ارتفاعی سطح مؤثر (ارتفاع مؤثر دو تصویر طولی از طرفین و یک تصویر عرضی از بالا و پایین برای هر تصویر)

در شکل ۶ پنجره ورود اطلاعات درخواستی توسط کاربر و پنجره بازه اعداد پارامتر سطح مؤثر (در پروژه حاضر) برای انتخاب کاربر نمایش داده شده‌اند. در هر دو طراحی پرواز تعداد ۷۸ ایستگاه در ۶ نوار پروازی جای گرفت. پس از تعیین ارتفاع پرواز برای هر ایستگاه بر اساس سطح زیر آن، تعدیل ارتفاعی دو شرطی بر روی تمامی ایستگاه‌های پروازی اعمال شده‌است.



شکل ۷ - نمایش مراکز تصویر سه‌بعدی طراحی شده در سناریو ارتفاعی کل سطح تصویر بر روی ابرنقطه منطقه



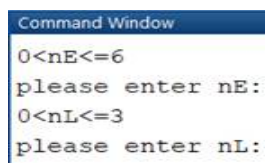
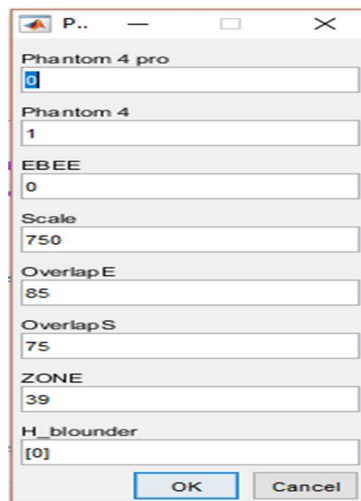
شکل ۸ - نمایش مراکز تصویر سه‌بعدی طراحی شده در سناریو ارتفاعی سطح موثر ارتفاعی بر روی ابرنقطه منطقه

در سناریو سطح موثر ارتفاعی همانطور که در شکل ۸ آورده شده است، اختلاف ارتفاع ۳۷ الی ۴۰ متری در چندین نقطه رخ داده و سرشکن شده است. زیرا ارتفاعات محلی تر شده که موجب تغییرات ارتفاعی بیشتری می‌شود. در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که ارتفاع نوارها با یکدیگر متفاوت است و همچنین در یک نوار ارتفاع ایستگاه‌ها نیز باهم تفاوت دارند. این تغییرات متناسب با ارتفاع سطح زمین و وجود عوارض زیر آن می‌باشند. در سناریو سطح موثر همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، ارتفاع پرواز ایستگاه‌های بیشتری، تنها شامل ارتفاعات نقاط زمینی و عوارض مرکزی آن‌ها می‌باشد.

در پایان اجرای الگوریتم برای ورود مختصات ایستگاه‌های پرواز و زوایای تصویربرداری به نرم افزار پرواز، فایلی شامل مختصات سه‌بعدی ایستگاه‌ها، زوایای تصویربرداری مایل، زوایای چرخش گیمبال و پلتفرم و دیگر پارامترهای پرواز تنظیم شد.

۳-۳-۱- اخذ داده

پایه‌سازی طراحی پروازهای توسعه داده شده یک روز به طول انجامید. ۹ نقطه کنترل (۷ نقطه مسطحاتی و ۲ نقطه ارتفاعی) با توزیع مناسب در منطقه توسط دستگاه



شکل ۶- پنجره‌های ورود اطلاعات کاربر

شرط اول تعدیل ارتفاع ایستگاه‌های پرواز در هر نوار جداگانه اجرا شده است که در هیچ‌کدام از حالت‌های پروازی، ارتفاعی سرشکن نشده، زیرا به حد آستانه تعیین شده نرسیده است. در شرط دوم، تعدیل ارتفاع میان هر دو ایستگاه موجود در طراحی پرواز با حد آستانه برابر با ۱۰٪ ارتفاع محاسباتی برآورده شد. تاثیر اعمال شرط دوم بر روی ارتفاع ایستگاه‌های پرواز در سناریوهای ارتفاعی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ - نتایج اعمال شرط دوم تعدیل ارتفاعی ایستگاه‌های پرواز

سناریو ارتفاعی سطح کل تصویر	سناریو ارتفاعی سطح موثر	حد آستانه تغییر ارتفاع میان دو ایستگاه
۹/۰۲ متر	۹/۰۲ متر	بیشترین اختلاف ارتفاع پیش از تعدیل ارتفاعی
۳۹/۶۷ متر	۴۰/۱۷ متر	بیشترین اختلاف ارتفاع پس از تعدیل ارتفاعی
۹/۰۲ متر	۹/۰۲ متر	

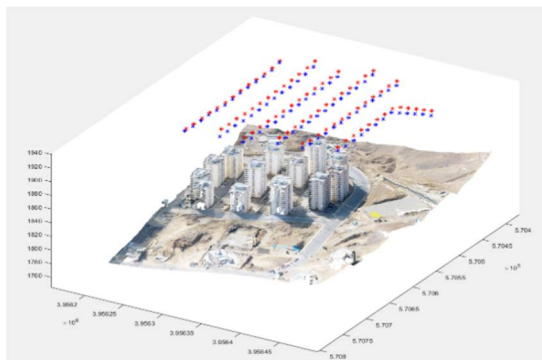
همانطور که در شکل ۷ آمده، در سناریو ارتفاعی کل سطح تصویر، ۳۹/۶۷ متر تنها در یک ایستگاه سرشکن نشده بلکه در ۵ ایستگاه پی‌درپی (ایستگاه‌های ۱ تا ۵) تعدیل شده است تا تغییر ارتفاعی ناگهانی رخ ندهد.

جداگانه بررسی شود؛ سپس، تصاویر تمامی گروه‌ها وارد محیط‌های پردازشی فتوگرامتری شده و محصولات فتوگرامتری حاصل از آنان تولید شده‌است. چهار گروه تصاویر در زیر آمده است:

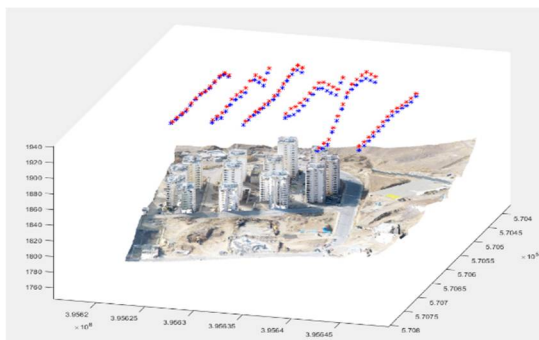
- ۱- تمام تصاویر اخذ شده (قائم و مایل) پرواز شماره ۱ گروه A⁺
- ۲- تصاویر قائم اخذ شده در پرواز شماره ۱ گروه A
- ۳- تمام تصاویر اخذ شده (قائم و مایل) پرواز شماره ۲ گروه B⁺
- ۴- تصاویر قائم اخذ شده پرواز ۲ گروه B

۴-۱- ارزیابی دقت قرارگیری پهپاد به صورت ارتفاعی

برای ارزیابی دقت قرارگیری پهپاد در ارتفاع‌های مختلف، ارتفاع ایستگاه‌های تصویربرداری پس از پرواز با ارتفاع ایستگاه‌های تصویربرداری طراحی شده مقایسه شده‌است.



شکل ۱۰- نمایش نقاط سه‌بعدی طراحی شده (قرمز) و نقاط سه‌بعدی برداشت‌شده بر اساس برجسب‌های مختصاتی (آبی) پرواز ۱



شکل ۱۱- نمایش نقاط سه‌بعدی طراحی شده (قرمز) و نقاط سه‌بعدی برداشت‌شده بر اساس برجسب‌های مختصاتی (آبی) پرواز ۲

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نقاط مراکز تصویر برداشت‌شده (نقاط آبی‌رنگ) کاملاً از الگوی طراحی شده

GPS مولتی فرکانس ۶۰۰ کانال رایمند پرو برداشت شد. سپس، پروازها از بالای ساختمانی (شکل ۹) در وسط منطقه آغاز گردید.



شکل ۹- نقطه Home point در بالای ساختمان

پس از پایان تصویربرداری بر اساس طراحی پروازهای توسعه داده‌شده مختص منطقه شهری و ارزیابی بصری آن‌ها، هدف کنترل صحت پرواز و ارزیابی کامل الگوریتم طراحی‌ها و سناریوهای اجرایی بر اساس دقت محصولات تولیدی است.

۴-۲- ارزیابی روش پیشنهادی

نتایج پیاده‌سازی دو الگوریتم طراحی شبکه سه‌بعدی در جدول ۳ آورده شده‌است.

جدول ۳- مقایسه پروازهای پیاده‌سازی شده

سناریو ارتفاعی	طراحی پرواز سه‌بعدی با اخذ یک تصویر قائم و دو تصویر مایل بر اساس سناریو ارتفاعی کل تصویر (پرواز ۱)	طراحی پرواز سه‌بعدی با اخذ یک تصویر قائم و چهار تصویر مایل بر اساس سناریو ارتفاعی سطح مؤثر (پرواز ۲)
تعداد ایستگاه‌ها	۷۸	۷۸
زمان پرواز (دقیقه)	۳۵	۵۰
تعداد تصاویر قائم	۷۸	۷۸
تعداد تصاویر مایل	۱۵۶	۳۱۲

پس از پایان پروازها، تصاویر برداشت‌شده در کل دو پرواز به چهار گروه تقسیم شدند تا نتایج حاصله براساس پارامترهای سناریو ارتفاعی و تعداد تصاویر مایل به‌طور

پرواز سه‌بعدی (نقاط قرمز رنگ) پیروی می‌کند. اختلاف ارتفاعی نسبی میان دو گروه نقاط در حالت سطح کامل محدوده‌ای میان ۱_۷ متر است و در حالت سطح موثر میان ۵-۱ متر است و اختلاف بین ۵ تا ۷ متر در نقاطی رخ داده که اختلاف ارتفاع میان دو ایستگاه بیشترین مقدار بوده است.

۴-۲- ارزیابی دقت و کیفیت ابرنقطه و محصولات فتوگرامتری حاصل از طراحی پروازهای پیاده‌سازی شده

یکی از روش‌های ارزیابی پروازهای طراحی شده، بررسی دقت ابرنقطه و محصولات فتوگرامتری حاصل از تصاویر اخذ شده است. از ۹ نقطه کنترل برداشت شده، ۵ نقطه به‌عنوان نقطه کنترل جهت زمین مرجع سازی ابرنقطه و ۴ نقطه چک جهت بررسی دقت تعیین گردید. از آنجایی که هدف این تحقیق تولید نقشه بزرگ مقیاس است، علاوه بر بررسی دقت نقاط چک، دقت مسطحاتی و ارتفاعی مطابق استاندارد نقشه‌برداری (رابطه ۶-رابطه ۷) برای پروژه‌های فتوگرامتری پهپاد مینا نیز بررسی شده است.

برای بررسی دقت عملی مدل بر اساس استاندارد می‌بایست نتایج نقاط چک به‌صورت مسطحاتی (برآیند خطا در جهت x, y) رابطه ۸ و ارتفاعی رابطه ۷ با استانداردها مقایسه گردد و تا حد امکان از آن‌ها کمتر باشد.

$$\sigma_{PL} = \text{عدد مقیاس نقشه } X / 2 \cdot 0.1 \text{ میلی‌متر} \quad (6)$$

$$\sigma_e = \frac{1}{3} X \text{ میزان} \quad (7)$$

$$\sigma_{PL} > \sqrt{RMSE(x)^2 + RMSE(y)^2} \quad (8)$$

در جدول ۴ خطای نقاط چک و خطای استاندارد مورد انتظار در چهارگروه تصاویر در حالت مسطحاتی و ارتفاعی آورده شده است. براساس نتایج آورده شده در جدول ۴، دقت مسطحاتی و ارتفاعی مدل سه بعدی حاصل در تمام گروه‌های تصاویر دو برابر دقت استاندارد بوده است به صورتی که با ورود خطا در مراحل دیگر مانند ترسیم نیز نتیجه دقیقی حاصل خواهد شد. گروه‌های تصاویر از دو جهت وجود و عدم وجود تصاویر مایل و سناریو تغییر ارتفاعی بین تصاویر قابل مقایسه می‌باشند. دقت در گروه B^+ که ادغام تصاویر قائم و چهار مایل در هر ایستگاه

است، از دیگر گروه‌ها بالاتر است، زیرا نقاط کنترل از عکس‌های بیشتری دیده می‌شوند و استحکام و دقت مدل سه بعدی فتوگرامتری افزایش می‌یابد.

با ارزیابی نتایج این گروه با گروه B این نکته قابل بیان است که دقت مسطحاتی و ارتفاعی در حالت وجود تصاویر مایل افزایش ۱ تا ۲ سانتی‌متری داشته است. البته این استدلال وابستگی به پارامترهای ورودی به الگوریتم و دقت برداشت نقاط کنترل نیز دارد. مقادیری که برای دقت در تمام حالت‌ها ذکر شده است، نسبت به دقت نقاط کنترل می‌باشد نه مطلق زمینی.

جدول ۴ - نتایج خطای نقاط چک و خطای استاندارد مورد انتظار در چهار گروه تصاویر

خطای استاندارد ارتفاعی	خطای کل	خطای راستای Z	خطای راستای Y	خطای راستای X	سانتی‌متر
۱۶	۸/۷	۷/۱	۴/۴	۲/۶	A ⁺
۱۶	۶/۹	۵	۳/۷	۲/۸	A
۱۶	۶	۳/۹	۳/۶	۲/۸	B ⁺
۱۶	۷/۱	۵	۳/۷	۳/۳	B

۴-۳- ارزیابی دقت و کیفیت محصولات خروجی

پس از اطمینان از دقت مثلث‌بندی، دیگر محصولات فتوگرامتری تولید شده‌اند. اولین و مهم‌ترین محصول ابرنقاط متراکم است که پس از مثلث‌بندی تولید شده است و محصول تناظریابی ابرنقطه غیرمتراکم است و هرچقدر این نمونه‌برداری متراکم‌تر و دقیق‌تر باشد، نمونه گسترده‌تری از زمین را به نمایش می‌گذارد. در شکل ۱۲ نمونه ابرنقاط متراکم تولیدی از سه گروه تصاویر (ابرنقاط متراکم حاصل از تصاویر گروه A و B تا حد زیادی مشابه هستند) آورده شده است.

در طراحی پروازهای سه بعدی اجرا شده، ترکیب توجه به ارتفاعات عوارض و زمین و تصاویر مایل موجب تولید ابرنقاط متراکم دقیقی با کاهش نقاط پنهان در اطراف ساختمان‌ها و نمای آن‌ها شده است. در شکل ۱۲(الف) مشاهده می‌شود که در ابرنقاط حاصل از تصاویر قائم نمای

ساختمان‌ها به‌خوبی تشکیل نشده ولی لبه ساختمان و جداول به‌خوبی تشکیل شده‌است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲ - ابرنقاط متراکم حاصل از تصاویر، (الف) گروه A - (ب) گروه A⁺ - (ج) گروه B⁺

در شکل ۱۲ (ب) که نشان‌دهنده ابرنقاط حاصل از ادغام تصاویر قائم و دو مایل در راستای خط پرواز است نمای ساختمان‌ها در مقایسه با ابرنقطه بدون تصاویر مایل، به‌خوبی تشکیل شده‌است. ابرنقاط متراکم حاصل از پرواز سه‌بعدی یک قائم و چهار مایل که در شکل ۱۲ (ج) آورده شده‌است، به جهت تصویربرداری پنج‌جانبه دیواره عوارض ارتفاعی مانند نمای ساختمان‌ها با دقت بالایی تولید شده‌است.

۴-۴- ارزیابی ثبات مقیاس در طراحی پرواز

سه‌بعدی

یکی از اهداف طراحی پرواز سه‌بعدی مبتنی بر اطلاعات ارتفاعی زمین و عوارض، کاهش اختلاف GSD و در نتیجه کاهش اختلاف مقیاس فاحش در بلوک فتوگرامتری است. جهت بررسی حفظ ثبات ارتفاعی در پروازهای پیاده‌سازی شده، ارتفاع ایستگاه‌های اخذ داده

پس از تصویربرداری از سطح محاسبه گردید. پس از پردازش تصاویر پروازهای سه‌بعدی و تولید ابرنقاط غیرمتراکم که در بخش پیش دقت آن ارزیابی گردید، ابرنقاط متراکم تولید شده و سپس مدل سه‌بعدی سطح (DSM) از آن حاصل شده‌است. چون این اطلاعات از ابرنقاطی با دقت ۷ سانتی‌متر (براساس جدول ۴) حاصل شده‌اند خود نیز دقیق‌اند. برای این ارزیابی تنها از تصاویر قائم دو پرواز (گروه A و B) استفاده شده‌است. به این صورت که تگ مختصاتی مراکز تصاویر گروه A استخراج و ارتفاعات سطح زیر هر عکس نیز از مدل رقومی سطح حاصل از پردازش تصاویر گروه A، با روش مشابه طراحی اولیه حاصل شده سپس فاصله مراکز تصویر تا سطح محاسبه می‌شود. برای گروه B نیز به همین صورت محاسبات انجام می‌شود با این تفاوت که ارتفاعات سطح موثر تصاویر در محاسبات تأثیرگذار بوده‌است.

در جدول ۵ به جهت اختصار و جمع‌بندی واضح‌تر به‌جای ارتفاع در هر تصویر میانگین ارتفاعات پهباد تا سطح در هر نوار پروازی در دو حالت طراحی شده و پیاده‌سازی شده، آمده‌است.

جدول ۵ - مقایسه ارتفاع پرواز طراحی شده و پیاده‌سازی شده

متر	ارتفاع متوسط طراحی گروه A	ارتفاع متوسط پیاده‌سازی گروه A	ارتفاع متوسط طراحی گروه B	ارتفاع متوسط پیاده‌سازی گروه B
نوار اول	۸۴/۳۳	۷۹/۶۲	۹۰	۸۵/۷۹
نوار دوم	۹۰	۸۱/۱۷	۸۷/۸۲	۸۳/۲۶
نوار سوم	۹۰	۸۲/۸۱	۸۷/۹۸	۸۲/۲۲
نوار چهارم	۹۰	۸۲/۳۱	۹۰/۶۸	۸۲/۷۲
نوار پنجم	۹۰	۸۲/۲۳	۹۰/۲۶	۸۲/۷۴
نوار ششم	۹۰	۸۷/۸	۹۰/۶	۸۵/۲۸

از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه اختلاف ارتفاعات زمینی ۴۰ متر بوده و دارای ساختمان‌هایی با ارتفاعات بین ۳۰ تا ۴۳ متر است پس توقع نمی‌رود که ارتفاع پهباد از سطح زیر هر ایستگاه دقیقاً ۹۰ متر (ارتفاع محاسباتی) باشد ولی تا حد امکان این ثبات حفظ گردیده‌است. همان‌طور که در بخش ارزیابی دقت قرارگیری پهباد به‌صورت ارتفاعی

جدول ۶ - میزان تغییرات GSD

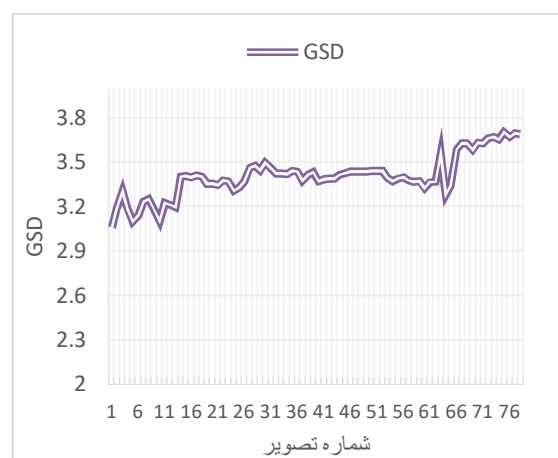
	بلوک فتوگرامتری A	بلوک فتوگرامتری B
میانگین ارتفاع پرواز اجرای (متر)	۸۲/۶۷	۸۲/۶۶
میانگین GSD در پرواز اجرای (سانتیمتر)	۳/۴۴	۳/۴۸
میزان تغییرات GSD نسبت به میانگین	۹٪	۸/۵٪

در بلوک فتوگرامتری A که طراحی ارتفاع پرواز ایستگاه‌ها بر اساس سطح کل عکس انجام شده، در ابتدای پرواز که ارتفاع سطح زمین بیشتر بوده، پیکسل سایز کوچک‌تر شده و هرچه به انتهای منطقه پیش رفته با کاهش ارتفاع زمین، اندازه پیکسل ۹٪ افزایش یافته است. در بلوک فتوگرامتری B که طراحی ارتفاع پرواز بر اساس فرمول سطح موثر ارتفاعی انجام گرفته، در ابتدا و انتهای منطقه GSD تقریباً یکسان است و تغییرات اندکی در میانه رخ داده است.

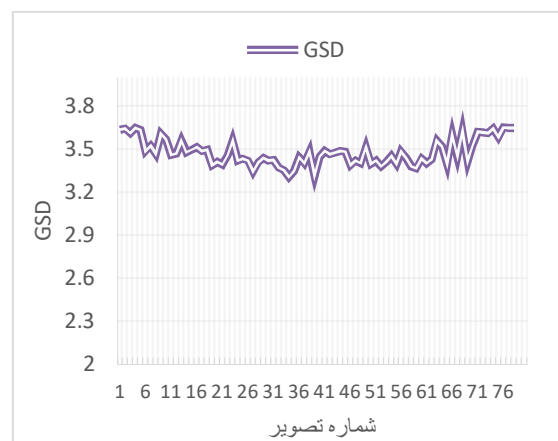
۴-۵- ارزیابی تراکم ابرنقاط

تحلیل دیگری برای ارزیابی ابرنقاط به وسیله ابزار تراکم^۱ نرم افزار CloudCompare انجام گرفته است. این ابزار برای ارزیابی کیفیت اطلاعات موجود در ابرنقاط مختلف استفاده می‌شود. در این تحقیق بر روی ابرنقاط حاصل از طراحی‌های پرواز سه‌بعدی که دارای تراکم ساختمان‌ها است، پیاده‌سازی و نتایج باهم مقایسه شده‌اند که امکان ارزیابی تأثیر طراحی‌های پرواز مختلف بر روی تعداد و توزیع نقاط را می‌دهد. خروجی این ابزار می‌تواند به اشکال مختلف باشد که در اینجا نقشه مقیاس‌دار رنگ‌آمیزی شده منطقه با نمودار توزیع تراکم سطح^۲، به‌عنوان خروجی انتخاب شده‌اند. با توجه به جدول ۷ که نتایج نمودارهای تراکم را نشان می‌دهد، همان‌طور که انتظار می‌رفت وجود تصاویر مایل برای بهبود تراکم ابرنقطه بسیار مهم است. تراکم گروه B⁺ از گروه A⁺ بیشتر است و این افزایش در کل ابرنقطه توزیع شده است بخصوص در نیمه پایینی دیواره ساختمان‌ها. این نکته بیانگر تراکم مناسب در نمای ساختمان و قسمت اتصال به زمین که معمولاً ابرنقاط دچار نقص هستند، است.

بحث شد، ایستگاه‌های تصویربرداری دارای اختلاف ارتفاعی ۱ تا ۶ متری با حالت طراحی شده است. پس ارتفاعات ایستگاه‌های تصویربرداری به‌طور کلی کمتر از ارتفاعات طراحی شده می‌باشند ولی موضوع اصلی ثبات GSD در بلوک فتوگرامتری است، یعنی اگر ارتفاع تمام ایستگاه‌های بلوک در کنار هم موجب ثبات مقیاس شوند، پس هدف طراحی برآورده شده است. برای بررسی روشن‌تر این موضوع در هر دو پرواز، بر اساس ارتفاع اخذ تصویر، GSD برای همه تصاویر محاسبه شده و به‌صورت نمودار تغییرات در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آورده شده است.



شکل ۱۳ - نمودار تغییرات GSD در بلوک فتوگرامتری A



شکل ۱۴ - نمودار تغییرات GSD در بلوک فتوگرامتری B

نتایج حاکی از این است که در هر دو بلوک GSD در یک بازه کوچک متغییر بوده است. اندازه پیکسل زمینی طراحی شده برابر با ۳/۷ سانتیمتر بود و از آنجایی که برداشت در ارتفاع کمتری انجام شده GSD نیز از میزان پیش‌بینی شده کمتر است ولی یک مقدار ثابت در تمامی تصاویر نیست. درصد تغییرات GSD بر اساس میانگین ارتفاع پروازهای اجرایی در جدول ۶ آورده شده است.

^۱ Density tool

^۲ Surface density

جدول ۷- نمایش تراکم ابرنقاط

تراکم (pt/m ²)			
گروه تصاویر	بیشترین نقاط	Mean	St. dev.
B	۳۲۰۰۰	۸۴۷/۹	۳۷۵/۵۶
A ⁺	۵۰۰۰۰	۸۱۲/۲۶	۳۱۰/۱۹
B ⁺	۵۶۵۰۰	۱۰۴۴/۲۷	۴۶۷/۹۶

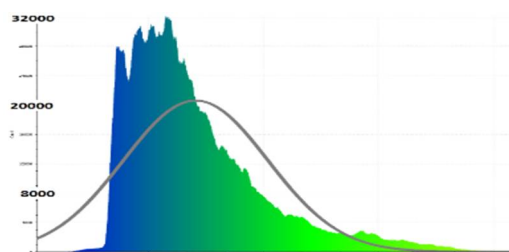
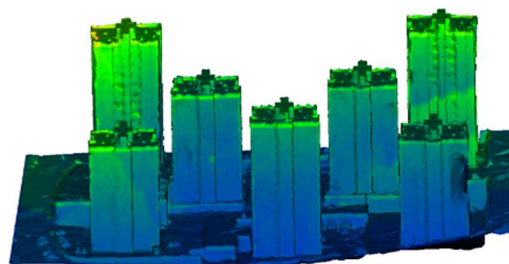
۴-۶- ارزیابی میزان نقاط پنهان ابرنقطه از طریق مقاطع عمودی

یکی از اهداف تحقیق کاهش نقاط پنهان در محصولات فتوگرامتری مناطق شهری بود. جهت بررسی این موضوع در ابرنقاط متراکم تولیدی، دو ساختمان یکسان در همه سناریوها (شکل ۱۸) به صورت نمونه انتخاب شده و برای بررسی تأثیر وجود و تعداد تصاویر مایل، صفحه‌ای به عمق ۵ میلی‌متر به صورت عمودی ابرنقاط منتخب را قطع کرده و نقاطی که در آن مقطع باقی‌مانده‌اند برای ارزیابی استفاده شده‌است. یک ساختمان از جهت نمای شرقی-غربی و ساختمان دیگر از نمای شمالی-جنوبی در نظر گرفته شده‌است. علت این انتخاب بررسی تأثیر تعداد تصاویر مایل است، زیرا در پرواز A⁺ دو تصویر مایل در جهت طولی خط پرواز (۳۰° جلو و عقب) اخذ شده که نوارهای پروازی در منطقه از شرق به غرب چیده شده‌اند و در پرواز B⁺ چهار تصویر مایل دو تصویر در جهت خط پرواز (۳۰° جلو و عقب) و دو تصویر عمود بر خط پرواز (۳۰° راست و چپ) یا شمالی-جنوبی اخذ شده‌اند.

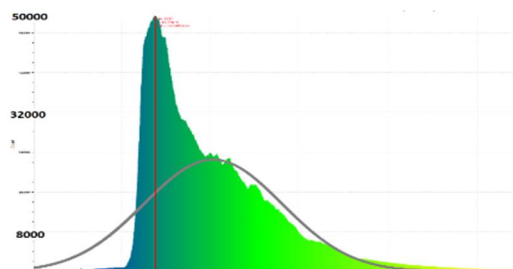
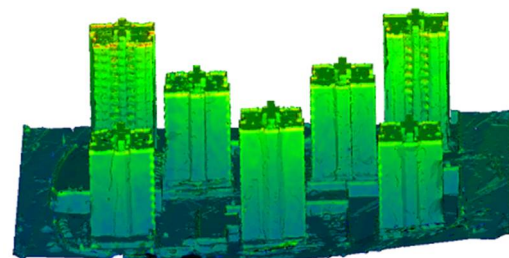


شکل ۱۸- ساختمان شماره ۱ بررسی نقاط پنهان ابرنقطه از نمای شرقی-غربی و ساختمان شماره ۲ بررسی نقاط پنهان ابرنقطه از نمای شمالی-جنوبی

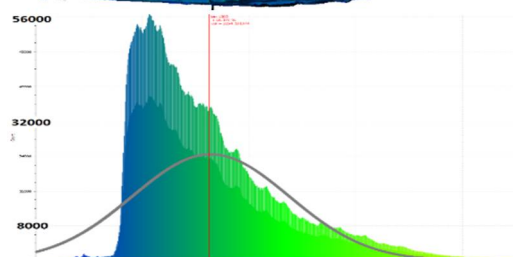
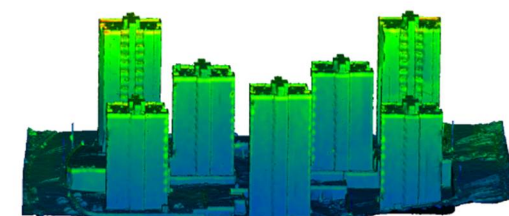
مقاطع عمودی در ابرنقاط سه گروه به شرح ذیل تولید شده‌اند:



شکل ۱۵- نمودار توزیع تراکم سطح ابرنقاط حاصل از B

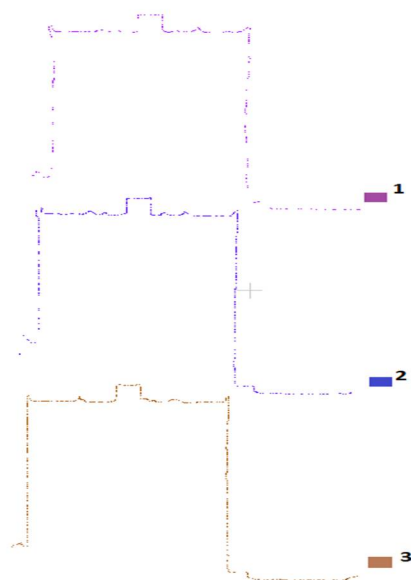


شکل ۱۶- نمودار توزیع تراکم سطح ابرنقاط حاصل از گروه A⁺



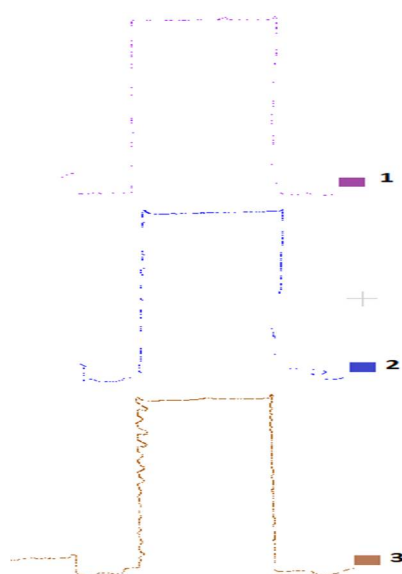
شکل ۱۷- نمودار توزیع تراکم سطح ابرنقاط حاصل از گروه B⁺

شماره ۱) مقطع عمودی ابرنقاط حاصل از پرواز قائم گروه A/B
 شماره ۲) مقطع عمودی ابرنقاط حاصل از ادغام تصاویر قائم و دو مایل_گروه A⁺
 شماره ۳) مقطع عمودی ابرنقاط حاصل از ادغام تصاویر قائم و چهار مایل_ گروه B⁺
 در ابتدا بررسی ابرنقطه ساختمان شماره ۱ از نمای شرقی- غربی انجام شده‌است.



شکل ۱۹- مقاطع عمودی حاصل از ابرنقطه شرقی-غربی ساختمان ۱
 نتایج حاکی از این است که در حالت ۱ شکل ۱۹ که تنها از تصاویر قائم استفاده شده‌است، نقاط پیوستگی بالایی ندارد. در این تصویربرداری به علت اینکه اخذ تصاویر تنها از یک منظر عمودی انجام گرفته، از دیواره یک سازه ارتفاعی نقاط زیادی برداشت نمی‌شود، پس نواحی پنهان ایجاد

می‌شود. در حالت‌های ۲ و ۳ که علاوه بر تصویر قائم دو تصویر مایل با تیلت ۳۰° از دو طرف نما اخذ شده‌اند افزایش پیوستگی محسوسی مشاهده می‌گردد و تقریباً مشابه می‌باشند اما حالت ۳ به علت وجود دو تصویر مایل اضافه عمود بر مقطع پیوستگی بیشتری دارد. در نمونه دوم به بررسی نمای شمالی-جنوبی پرداخته می‌شود.



شکل ۲۰- مقاطع عمودی حاصل از ابرنقطه شمالی-جنوبی ساختمان ۲

با توجه به شکل ۲۰ روشن است که وجود تصاویر مایل از جهت شمالی-جنوبی در حالت ۳ موجب تشکیل ابرنقطه ای با نقاط پنهان بسیار کم شده‌است. پیوستگی نقاط و شکل‌گیری کامل نمای ساختمان در مقطعی با عمق کم، نمایانگر تراکم بالای ابرنقطه می‌باشد. نکته قابل توجه در هر

دو نمونه، پیوستگی نقاط اتصال زمین به ساختمان در ابرنقاطی است که تصاویر مایل دارند.

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر با توجه به محدودیت‌های استفاده از پهپاد در مناطق شهری برای تولید محصولات فتوگرامتری دقیق، الگوریتمی برای طراحی پرواز سه بعدی با توجه به تاثیر توپوگرافی و عوارض موجود در منطقه بر روی ارتفاع اخذ تصاویر به همراه تصاویر مایل طراحی و پیاده سازی شده است. جهت بررسی صحت روش پیشنهادی، براساس طراحی پرواز ابداعی از یک منطقه شهری تصویربرداری انجام شد و مورد ارزیابی قرار گرفت که در ادامه اهم نتایج این مطالعه آورده شده است:

- توجه به ارتفاعات واقعی زمین و ارتفاع عوارض ارتفاعی موجود در منطقه شهری، در محاسبه ارتفاعات ایستگاه‌های تصویربرداری موجب کاهش بازه تغییرات GSD در بلوک فتوگرامتری می‌شود و محصولات حاصل از این طراحی پرواز سه بعدی نشان از دقت و کیفیت بالا در مقایسه با طراحی پرواز دو بعدی دارند.
- در محاسبه ارتفاع هر ایستگاه تصویربرداری در پرواز سه بعدی، یک رابطه "سطح موثر ارتفاعی" بر طبق پوشش تصاویر ارائه گردید که بر اساس آن می‌توان تاثیر ارتفاع عوارض دور از مرکز تصویر را با ایجاد یک سطح مؤثر در مرکز کاهش داد. نتایج پیاده سازی در منطقه شهری نشان داد که ثبات مقیاس در بلوک فتوگرامتری حاصل از رابطه سطح موثر ارتفاعی نسبت به حالت استفاده از سطح کل تصویر بیشتر است. در نتیجه فرمول ایجاد سطح موثر ارتفاعی در روند بهینه‌سازی پروژه‌های فتوگرامتری پهپادمبنا شهری تاثیر حائز اهمیتی دارد.
- بروز اعوجاج در لبه سقف ساختمان‌ها و دیوارها به علت عدم رویت دیواره‌های ارتفاعی در تصویربرداری قائم، از مهم ترین مشکلات تهیه محصولات دقیق فتوگرامتری از مناطق شهری است که جهت حل این مشکل در این تحقیق

مراجع

- [1] N. B. Grimm *et al.*, "Global change and the ecology of cities," *science*, vol. 319, no. 5864, pp. 756-760, 2008.
- [2] B. Cohen, "Urbanization in developing countries: Current trends, future projections, and key challenges for sustainability," *Technology in society*, vol. 28, no. 1-2, pp. 63-80, 2006.
- [3] Y. Dou, Z. Liu, C. He, and H. Yue, "Urban land extraction using VIIRS nighttime light data: An evaluation of three popular methods," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 2, p. 175, 2017.

- [4] X. Liu, A. de Sherbinin, and Y. Zhan, "Mapping urban extent at large spatial scales using machine learning methods with VIIRS nighttime light and MODIS daytime NDVI data," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 10, p. 1247, 2019.
- [5] C. Fraser, "Network Design in Close-range Photogrammetry and Machine Vision," *Atkinson (Ed.)*, pp. 256-282, 1996.
- [6] C. Fraser, "Design imperatives in digital non-topographic photogrammetry," in *Proceedings of 2nd Turkish-German Joint Geodetic Days Conference*, 1997: Technical University of Berlin, pp. 95-105.
- [7] G. Olague, "Automated photogrammetric network design using genetic algorithms," 2002.
- [8] S. Mason, "Expert system-based design of close-range photogrammetric networks," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 50, no. 5, pp. 13-24, 1995.
- [9] M. Saadatseresht, C. S. Fraser, F. Samadzadegan, and A. Azizi, "Visibility analysis in vision metrology network design," *The Photogrammetric Record*, vol. 19, no. 107, pp. 219-236, 2004.
- [10] A. Ibrahim, M. Golparvar-Fard, T. Bretl, and K. El-Rayes, "Model-driven visual data capture on construction sites: Method and metrics of success," in *Computing in Civil Engineering 2017*, 2017, pp. 109-116.
- [11] (2016). *Instructions for monitoring and technical control of maps and spatial information prepared using UAVs*.
- [12] M. Gašparović and D. Gajski, "Two-step camera calibration method developed for micro UAV's," in *XXIII ISPRS Congress*, 2016.
- [13] M. Gašparović and L. Jurjević, "Gimbal influence on the stability of exterior orientation parameters of UAV acquired images," *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 401, 2017.
- [14] M. Gerke, "Dense matching in high resolution oblique airborne images," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 38, p. W4, 2009.
- [15] J. Hohle, "Photogrammetric measurements in oblique aerial images," *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, vol. 2008, no. 1, p. 7, 2008.
- [16] F. Remondino *et al.*, "Oblique aerial imagery for NMA—some best practices," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 41, p. 639, 2016.
- [17] E. Rupnik, F. Nex, and F. Remondino, "Oblique multi-camera systems-orientation and dense matching issues," 2014.
- [18] H. Eisenbeiss and M. Sauerbier, "Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications," *The Photogrammetric Record*, vol. 26, no. 136, pp. 400-421, 2011.
- [19] D. Hernandez, B. Felipe, G. Aguilera Diego, and B. Arias-Pérez, *An Automatic Approach to UAV Flight Planning and Control for Photogrammetric Applications: A Test Case in the Asturias Region (Spain)*. 2013, pp. Pages 87-98.
- [20] V. González, C. Monje, L. Moreno, and C. Balaguer, "UAVs mission planning with flight level constraint using Fast Marching Square Method," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 94, pp. 162-171, 2017.
- [21] A. Manconi, M. Ziegler, T. Blöchliger, and A. Wolter, "Optimization of unmanned aerial vehicles flight planning in steep terrains," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 40, no. 7, pp. 2483-2492, 2019.
- [22] H. Zhao *et al.*, "Adaptable Flight Line Planning for Airborne Photogrammetry Using DEM," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 14, pp. 6206-6218, 2021.
- [23] I. Aicardi, F. Chiabrando, N. Grasso, A. M. Lingua, F. Noardo, and A. Spanò, "UAV PHOTOGRAMMETRY WITH OBLIQUE IMAGES: FIRST ANALYSIS ON DATA ACQUISITION AND PROCESSING," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, vol. 41, 2016.
- [24] F. Chiabrando, A. Lingua, P. Maschio, and L. T. Losè, "The influence of flight planning and camera orientation in UAVs photogrammetry. A test in the area of Rocca San Silvestro (LI), TUSCANY," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 42, p. 163, 2017.
- [25] B. Yang *et al.*, "A novel approach of efficient 3D reconstruction for real scene using unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry with five cameras," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 99, p. 107804, 2022.
- [26] S. A. Fakhri, M. Saadatseresht, M. Varshosaz, and H. Zakeri, "Automatic Estimation of the Spatial Resolution Coefficient of UAV Images Based on Siemens Star Target," (in eng), *Journal of Geomatics Science and Technology*, Research vol. 10, no. 4, pp. 191-204, 2021. [Online]. Available: <http://jgst.issge.ir/article-1-949-fa.html>.
- [27] D. Poli, K. Moe, and R. Gasser, "Growing Use of Oblique Imagery by Municipalities," *GIM INTERNATIONAL-THE WORLDWIDE MAGAZINE FOR GEOMATICS*, vol. 31, no. 7, pp. 20-23, 2017.