آنالیز و مقایسه دقت تولیدات نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا در مناطق شهری و غیرشهری

حسن امامی [۱] سیدقاسم رستمی [۲]

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰

****

چکیده

در این تحقیق بررسی و مقایسه دقت تولیدات مختلف چهار نرم‌افزار تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا، Inpho UASmaster (UASmas)، Photomodeler UAS (PhUAS)، Agisoft metashape (AgisMesh) و Pix4D Mapper، برای مدل‌سازی سه‌بعدی در مناطق شهری و غیرشهری با حداقل نقاط کنترل زمینی انجام گرفت. برای این منظور، تولیدات مختلف این نرم‌افزارها بر روی چهار سری داده، دو سری مربوط به ایران و دو سری مربوط به دیگر کشورها، از مناطق بایر، مسکونی، فضای سبز و مناطقی با بافت یکنواخت، به صورت کمی و کیفی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج کیفی بصری نشان داد که نرم‌افزار AgisMesh در مدل‌سازی سه‌بعدی انواع سطوح در همه مناطق تست بهترین نتایج داشت ولی در بازسازی لبه‌های ساختمان‌ها در مناطق شهری عملکرد ضعیفی دارد. در مقابل Pix4D در مناطق با بافت یکنواخت نتایج ضعیفی داشته ولی در تشخیص اختلاف‌ارتفاع و بازسازی لبه ساختمان‌ها، قوی‌تر عمل می‌کند. در بررسی‌های کمی، تولیدات این نرم‌افزارها ابتدا با استفاده از نقاط چک و سپس با انتخاب نقاط تصادفی در سه کلاس مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نقاط چک با در نظر گرفتن خطای ریشه مربعی متوسط، به ترتیب ۲/۸۲، ۲/۶۳، ۵/۲۸ و ۳/۰۳ سانتی‌متر در AgisMesh، UASmas، Pix4D و PhUAS حاصل گردید. همچنین، نتایج نقاط تصادفی در سه منطقه مسکونی، بایر و فضای سبز نشان داد که UASmas به ترتیب دقت‌های ۸۳ /۱، ۱/۲۰ و ۲/۷۴ سانتی‌متر، PhUAS دارای دقت‌های۹۰ /۶، ۲/۹۶ و ۷/۲۴ سانتی‌متر، Pix4D دارای دقت‌های ۷۲ /۴، ۳/۴۶ و ۳/۵۹ سانتی‌متر نسبت به AgisMesh داشتند.

واژه‌های کلیدی: فتوگرامتری پهپادمبنا، نرم‌افزارهای پیشرفته فتوگرامتری، مدل‌سازی سه‌بعدی، پهپاد، دقت هندسی

****

۱- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران (نویسنده مسئول) h_emami@ut.ac.ir
۲- مربی آموزشی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بجنورد، خراسان شمالی، ایران gh.rostami@ub.ac.ir

۱- مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های جمع‌آوری اطلاعات مبتنی بر فتوگرامتری با پرنده هدایت‌پذیر از دور (پهپاد) مبنا و سنسورهای تصویربرداری هوایی کم‌هزینه، سرعت نقشه‌برداری سه‌بعدی را در بسیاری از کاربردهای عمرانی، کشاورزی، نظامی و باستان‌شناسی بهبود بخشیده است. به منظور پردازش تصاویر و بازسازی خودکار سه‌بعدی، الگوریتم‌های مختلف فتوگرامتری و ماشین‌بینایی بر اساس روش‌های تطابق‌یابی نقاط متناظر متراکم، گسترش داده شده‌اند. در حال حاضر، تعدادی زیادی از نرم‌افزارهای تجاری و منبع باز برای رسیدگی به تمام مراحل یک مدل‌سازی سه‌بعدی مبتنی بر تصویر، از پیش‌پردازش تصویر تا تولید محصولات سه‌بعدی ایجاد شده است. از آنجا که انتخاب بهترین راه حل برای مدل‌سازی و نقشه‌برداری سه‌بعدی مسئله مهمی در بسیاری از پروژه‌ها است، در این تحقیق، عملکرد و دقت تولیدات مختلف نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا ارزیابی می‌گردد. پهپادها هم‌اکنون به‌طور گسترده در زمینه‌های مخابرات، ناوبری جهانی، تحقیقات هواشناسی، جغرافیایی و جاسوسی به‌کار گرفته شده‌اند (Doole, Ellerbroek, Knoop, & Hoekstra, 2021; Hassanalian & Abdelkefi, 2017; Honarmand & Shahriari, 2021; To et al., 2021). از کاربردهای غیرنظامی پهپادها نیز می‌توان به عنوان نمونه به حادثه فوکوشیمایِ ژاپن که از پهپادها برای بررسی آسیب‌های وارده به این نیروگاه استفاده شد، نام برد (Fawcett et al., 2020; Khan et al., 2020) و سایر کاربردهای غیرنظامی برای پهپادها می‌توان (Panday, Pratihast, Aryal, & Kayastha, 2020) به تهیه مدل‌های سه‌بعدی از مکان‌های باستانی (Eisenbeiss, Lambers, Sauerbier, & Li, 2005)، استخراج ساختمان‌ها و مدل‌سازی سه‌بعدی آن‌ها، به‌روزرسانی نقشه‌های کاداستر (Nex & Remondino, 2014)، بررسی داده‌های ترافیکی برای پیشبینی ترافیک شهری (Salvo, Caruso, & Scordo, 2014)، نظارت و بررسی تغییرات توپوگرافی رودخانه‌ها و پوشش‌های گیاهی (Watanabe & Kawahara, 2016)، سناریوی پس از سانحه در مناطق خاص با استفاده از پهپاد فتوگرامتری و سیستم اطلاعات جغرافیایی (de Oliveira Silva, de Mello Bandeira, & Campos, 2017)، واکنش سریع در مواقع عملیات نجات (Balasingam, 2017; Haarbrink & Koers, 2006)، کشاورزی دقیق (Radoglou-Grammatikis, Sarigiannidis, Lagkas, & Moscholios, 2020)، ایجاد شهرهای هوشمند آتی (Mohamed, Al-Jaroodi, Jawhar, Idries, & Mohammed, 2020) اشاره نمود. همچنین، شرکت‌های معروف آمازون و گوگل اقدام به طراحی و آزمایش پهپادهای ترابری نموده‌اند. از ویژگی‌های بارز این طرح می‌توان به بالارفتن سرعت تحویل سفارش‌ها به مشتریان اشاره کرد (Aurambout, Gkoumas, & Ciuffo, 2019; Campbell, Sweeney, & Zhang, 2017).

امروزه در اروپا، پهپادهای هلندی نقش قابل توجهی در قالب نیروهای امداد و نجات، اورژانس و آمبولانس ایفای نقش می‌نمایند و به کمک مصدومان و زخمی‌ها می‌شتابند و در خدمات درمانی فوری نقش اساسی ایجاد می‌کنند (Aurambout et al., 2019; Balasingam, 2017). با توجه به پیشرفت روزافزون تکنولوژی، پهپادها از نظر کاربرد به پهپادهای نظامی (Ayamga, Akaba, & Nyaaba, 2021; Rauch, 2021)، پهپادهای تجسسی و جاسوسی (Yaacoub, Noura, Salman, & Chehab, 2020)، پهپادهای پشتیبانی و لجستیکی و پهپادهای غیرنظامی و تجاری (Ko & Song, 2021; Liu, Dai, Wang, Shukla, & Imran, 2020; Surmann et al., 2021) تقسیم‌بندی می‌شوند. امروزه، فتوگرامتری پهپادمبنا یکی دیگر از شاخه‌های اساسی در مهندسی نقشه‌برداری است (Trubia, Curto, Severino, Arena, & Puleo, 2021). در فتوگرامتری پهپادمبنا، دوربین بر روی پهپاد با بال ثابت یا گرداننده[1] نصب شده؛ و قادر به جمع‌آوری داده‌های فتوگرامتری است (Remondino, Barazzetti, Nex, Scaioni, & Sarazzi, 2011). در این شاخه از فتوگرامتری می‌توان مدل‌های سه‌بعدی، تصاویر قائم‌سازی شده (ارتوفتو)، ابرنقاط متراکم، نقشه‌های توپوگرافی، کاداستر زراعی، کاداستر شهری و سایر نقشه‌های موضوعی را تولید نمود (Sona, Pinto, Pagliari,

1- Fixed or Rotary wing

(Passoni, & Gini, 2014). فتوگرامتری پهپادمبنا در مقایسه با فتوگرامتری هوایی، به دلیل کوچک بودن پهپاد و ارتفاع پایین پرواز، تعداد تصاویر بیشتری خواهد داشت و درنتیجه تصاویر می‌تواند پوشش عرضی و طولی بیشتری داشته باشد (Eisenbeiß, 2009). برداشت نقاط صعب‌العبور، دقت بالا و سرعت بالای عملیات، ارائه خروجی‌های متنوع نظیر مدل رقومی ارتفاعی زمین (Orengo et al., 2021; Uysal, Toprak, & Polat, 2015)، ارتوفتو با قدرت تفکیک مکانی بالا، نقشه توپوگرافی و مدل‌سازی سه‌بعدی از مزایای فتوگرامتری پهپادمبنا است (Remondino et al., 2011).

برای تولیدات مختلف در فتوگرامتری پهپادمبنا، نرم‌افزارهای تخصصی مختلف با الگوریتم‌های پیشرفته پردازش تصاویر، گسترش داده شده‌اند و همه آن‌ها تولیدات تقریباً مشابهی دارند. در دهه اخیر، نرم‌افزارهای مختلف فتوگرامتری پهپاد مبنا، تولید و گسترش داده شده‌اند. از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به نرم‌افزارهای Inpho UASmaster، Photomodeler UAS، Agisoft metashape، Mapper Pix4D، DroneDeploy Enterprise 3D Map، PrecisionHawk 3D map، Open Drone Map، RealityCaptur،SimActive Correlator3D، Drone Mapper، Bentley ContextCapture، WebODM، Menci APS، 3Dsurvey،3DF Zephyr، Correlator 3D،Menci APS و غیره اشاره کرد. چند مورد از این نرم‌افزارها، به‌عنوان نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا که در کشور ما زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این تحقیق مورد ارزیابی کمی و کیفی قرار گرفته‌اند، عبارتند از Inpho UASmaster (UASmas) ، Photomodeler (UAS (PhUAS)، Agisoft metashape (AgisMesh و Mapper Pix4D. دقت تولیدات مختلف این چهار نرم‌افزار تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا، به‌صورت جامع بررسی نگردیده است و در برخی تحقیقات، این نرم‌افزارها با سایر نرم‌افزارها به‌صورت عمومی و گزینشی مقایسه شده است. این تحقیق، یک تحقیق مقایسه‌ای است که بیشتر جنبه کاربردی و عملی دارد. تحقیقات انجام شده در این زمینه، اغلب بین دو نرم‌افزار بوده و در یک شرایط خاص، مثل شرایط جنگلی، کاربردهای کشاورزی، استفاده از یک نوع داده، بیشتر از منظر الگوریتم‌های ماشین‌بینایی بحث گردیده است که این الگوریتم‌ها با اینکه بیشتر روی حالت‌های بصری و نمایشی تأکید دارند که در مقایسه با دقت هندسی تولیدات فتوگرامتری پهپادمبنا، عملکرد ضعیفی دارند. همچنین، تولیدات فتوگرامتری پهپادمبنا به عوامل مختلفی بستگی دارد از جمله پارامترهای مختلفی نظیر ویژگی‌های دوربین، فاصله نمونه‌برداری زمینی، فاصله پهپاد تا سطح زمین، طراحی پرواز، کیفیت هندسی و رادیومتریک دوربین تصویربرداری، دقت، تعداد و پراکندگی نقاط کنترل زمینی، و عوامل دیگر دخیل هستند. در این تحقیق با در نظر گرفتن تأثیر جامع این پارامترها و با به‌کارگیری داده‌های مختلف که در شرایط متفاوت و از مناطق مختلف گرفته شده‌اند، استفاده شده است.

نرم‌افزار Trimble UASmas محصول کمپانی تریمبل و ترکیبی کامل از یک ایستگاه‌کاری فتوگرامتری است و دارای یک محیط کاربرپسند می‌باشد. این نرم‌افزار دارای قابلیت‌های نظیر، گردش کار کاملاً اتوماتیک، مثلث‌بندی هوایی، پالایش و بهبود پارامترهای کالیبراسیون دوربین[1]، تولید ابرنقاط متراکم، تولید ارتوموزاییک همگن، قابلیت ویرایش گسترده برای همه مراحل، تجسم و نمایش استریوسکوپی[2] می‌باشد. این نرم‌افزار از الگوریتم‌های مدرن ماشین‌بینایی[3] همراه با تکنیک‌های پیشرفته فتوگرامتری، نتایج دقیق را با حداقل تعامل دستی به صورت خودکار تولید می‌کند و برای هر نوع داده‌های پهپاد و یا دوربینی‌های دستی بردکوتاه طراحی شده است. نرم‌افزار AgisMesh تولید شده به‌وسیله کمپانی روسی AgiSoft می‌باشد و دارای ابزارهای مختلفی جهت طراحی و ویرایش فایل‌های گرافیکی استفاده می‌کند (Verhoeven, 2011). پ. نرم‌افزار PhUAS [4] به‌عنوان یک ابزار پیشرو در فتوگرامتری و محصولی از کشور کانادا؛ توسط کمپانی EOS

1- Camera refinement
2- Stereoscopic visualization
3- Modern computer-vision
4- PhotoModeler for Unmanned Aircraft Systems

Systems INC ارائه شده است. در سال ۲۰۱۶ این شرکت محصول PhUAS را برای پردازش داده‌های فتوگرامتری پهپادمبنا معرفی نمود. نرم‌افزار PhUAS یک نسخه از نرم‌افزار Photomodeler است که دارای ویژگی‌های خاصی برای داده‌های پهپاد در نظر گرفته شده است (*Barazzetti, Binda, Scaioni, & Taranto, 2011*). در سال ۲۰۱۹ میلادی این نرم‌افزار یک رابط کاربر پسند جدید، برای هر دو نسخه استاندارد و نسخه پهپاد ایجاد و باهم ترکیب کرد که قادر هست به طور خودکار تولیدات مختلف از تصاویر نظیر، ابرنقاط متراکم، مدل‌های سه‌بعدی، سطوح با بافت واقعی را تولید کند. پردازش انواع تصاویر قائم، مایل، بردکوتاه و ماهواره‌ای، کالیبراسیون خودکار، پشتیبانی از پروژه‌های چند دوربینه، و مدل‌سازی چهاربعدی برای صحنه‌های پویا از ویژگی‌های این نرم‌افزار است. نرم‌افزار Mapper Pix4D محصول شرکت Pix4d سوئیس، یکی از بهترین نرم‌افزارها در حوزه پردازش تصاویر پهپاد و پردازش انواع تصاویر هوایی و زمینی است. همچنین این نرم‌افزار اخیراً قابلیت جدیدی بنام تحلیلگر ابری[1] یک فناوری نوآورانه دیگری در کنار Pix4D ارائه داده است که خروجی این نرم‌افزار را برای کاربردهای مختلف نقشه برداری مهیا می‌سازد.

تحقیقات قبلی در شرایط خاص و در کاربردهای خاصی، کارایی و عملکرد برخی از این نرم‌افزارها را مورد بررسی قرار داده اند. سوزیدلایت و همکارانش (Suziedelyte Visockiene, Brucas, & Ragauskas, 2014) دو نرم‌افزار Pix4D و Photomod را در تولیدات ارتوموزائیک و مدل سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که دوربین عکس‌برداری نصب شده در UAV باید کالیبراسیون شود. در حالی‌که نرم‌افزار Mapper Pix4D دارای قابلیت خود کالیبراسیون است و قبل از تهیه تصاویر، نیازی به معلوم بودن پارامترهای دوربین وجود ندارد. نرم‌افزار Photomod چنین عملکردی را ندارد، بنابراین پارامترهای دوربین عکس‌برداری باید معلوم باشد. در نتایج آن‌ها نرم‌افزار Pix4D را به‌طور کلی بهتر از Photomod معرفی کردند. جینی و همکارانش (Gini et al., 2013) در تحقیقی مدل مثلث‌بندی بلوک شامل پارامترهای توجیه خارجی و کیفیت نقاط کنترل زمینی، یک سری داده‌های مختلف در پنج خط پرواز با ۴۹ عکس حاصل از پهپاد با بال ثابت را در نرم‌افزارهای فتوگرامتری و ماشین‌بینایی مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها مدل مثلث‌بندی نرم‌افزارهای EyeDEA، LPS Agisoft Photoscan، وPix4D تولیدات ابرنقاط متراکم سطح را مقایسه کردند. بررسی آنان نشان داد که دقت نتایج نرم‌افزارهای فتوگرامتری بهتر از نرم‌افزارهای ماشین‌بینایی است، ولی غالباً زمان محاسباتی بسیار زیادی هم دارند. براچ و همکارانش(Brach, Chan, & Szymanski, 2019) و سونا و همکارانش (Sona et al., 2014) در تحقیقاتی ارزیابی دقت ارتوموزائیک شش نرم‌افزار مختلف فتوگرامتری را برای پردازش داده‌ها از سیستم‌های کم‌هزینه پهپاد در شرایط جنگلی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ارتوموزائیک مناطق جنگلی حاصل در شش نرم‌افزار DroneDep7loy; (B) Pix4Dmapper; (C) AgiSoft PhotoScan; (D) APS; (E) PrecisionMapper; (F) Maps Made Easy. را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار خطای ریشه مربعی متوسط (RMSE) نرم‌افزارهای DroneDeploy و Pix4Dmapper نسبت به نرم‌افزارهای دیگر کمتر و در حدود ۱/۲۲ و ۱/۲۷ سانتی‌متر برآورد گردید. کایماریس و همکارانش (Kaimaris, Patias, & Sifnaiou, 2017) در تحقیقی محصول ابرنقاط متراکم سطح را در دو نرم‌افزار Agisoft PhotoScan و Imagine UAV of Erdas مورد بررسی قرار دادند و با هشت نقطه کنترل زمینی مقایسه کردند. آن‌ها به خطای تقریباً یکسان برای هر دو نرم‌افزار رسیدند و اعلام کردند نتایج دقت هندسی Agisoft PhotoScan تا اندازه‌ای بهتر بوده ولی تفاوت معنی‌داری بین دقت هندسی دو نرم‌افزار نبوده است. آنگر و همکارانش (Unger, Reich, & Heipke, 2014) در تحقیقی ابرنقاط و ارتوفتو دو نرم‌افزار Photososcan و pix4dmapper را مورد بررسی قرار دادند.

1- Analist Cloud

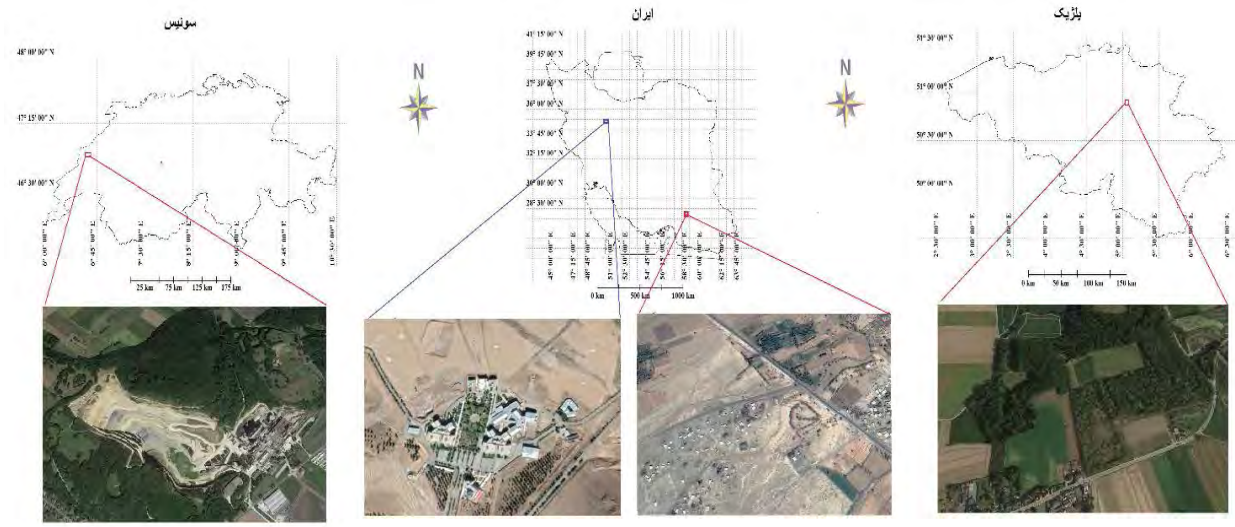
نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار خطای مربع ریشه نقاط چک در نرم‌افزار Pix4Dmapper بهتر از Photososcan در همه جهات‌های xyz بوده است. پادوآ و همکارانش (Pádua et al., 2018) در تحقیقی، کاربرد فتوگرامتری پهپاد مبنا را برای بررسی مدل‌سازی سه‌بعدی سایت‌های میراث فرهنگی به‌وسیله دو نرم‌افزار Pix4D و Agisoft Photoscan از لحاظ دقت مدل‌سازی و عملکرد سهولت استفاده آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی، هر دو نتایج قابل اعتمادی را با انحراف معیار ۱/۸ سانتی‌متر برای Agisoft و ۱/٦ سانتی‌متر برای مدل تولید شده از Pix4D به‌دست آوردند. کابادای و همکارانش (KABADAYI, Yunus, & YİĞİT, 2020) در تحقیقی مدل‌سازی سه‌بعدی ابنیه تاریخی را با استفاده از دو نرم‌افزار Agisoft و photomodeler مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها با استفاده از نقاط چک نشان داد که دقت هندسی متوسط در مختصات سه‌بعدی مدل‌سازی ابنیه تاریخی، ۱/۷۹ و ۲/۱۷ سانتی‌متر به ترتیب در photomodeler و Agisoft داشتند که دقت مدل‌سازی photomodeler را بهتر از Agisoft ارزیابی کردند. چن و همکارانش (CHEN & XU, 2020) در تحقیقی Pix4D و Agisoft برای محصول موزاییک تصاویر پهپاد در کاربردهای کشاورزی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که کارایی نرم‌افزار Agisoft در تولید موزاییک تصویری بهتر از Pix4D می‌باشد.

با توجه به اینکه کیفیت و دقت نسبی و مطلق تولیدات فتوگرامتری پهپاد مبنا به عوامل مختلفی بستگی دارد از جمله پارامترهای مختلفی نظیر ویژگی‌های دوربین، فاصله نمونه‌برداری زمینی، فاصله پهپاد تا سطح زمین، طراحی پرواز، کیفیت هندسی و رادیومتریک دوربین تصویربرداری، دقت، تعداد و پراکندگی نقاط کنترل زمینی و عوامل دیگر دخیل هستند. هدف از این تحقیق، بررسی و مقایسه دقت هندسی و بصری، برای چهار نرم‌افزار تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا جهت نقشه‌برداری و مدل‌سازی سه‌بعدی با حداقل نقاط کنترل زمینی است. برای این منظور نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپاد مبنا شامل UASmas ،PhUAS، AgisMesh و Pix4D که در کشور ما زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند، با درنظرگرفتن حداقل نقاط کنترل زمینی، بر روی چهار سری داده‌های متفاوت از مناطق مختلف مورد ارزیابی قرارگرفتند. داده‌های مورد استفاده با دوربین‌های مختلف، تحت شرایط متفاوت، از مناطق مختلف با ارتفاع پرواز متفاوت در نظر گرفته شده‌اند. دو سری از داده ها مربوط به ایران و دو سری دیگر مربوط به کشورهای دیگر در مناطق شهری و غیرشهری است. این تحقیق در پنج بخش خلاصه شده است: بعد از مقدمه در بخش دوم معرفی داده‌های تحقیق و خصوصیات آن‌ها آورده شده است. مدل‌سازی و پیشپردازش داده‌ها در بخش سوم بحث شده است و در بخش چهارم مقایسه و آنالیز نتایج صورت گرفته و نهایتاً در بخش آخر نتیجه‌گیری کلی از این تحقیق، بحث و بررسی گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مناطق تحقیق

در این تحقیق از داده‌های چهار منطقه مختلف استفاده شده است، منطقه اول چاه لک از استان هرمزگان ایران با طول جغرافیایی (°۵۸ ´۰۳ تا °۵۸ ´۲۱ ″۰۳) و عرض جغرافیایی (°۲۷ ´۲۰ ″۴۵ تا °۲۷ ´۲۰ ″۵۷)، دومی محدوده دانشگاه تفرش با طول جغرافیایی (°۵۰ ´۰۲ ″۴۷ تا °۵۰ ´۳۰ ″۰۳) و عرض جغرافیایی (°۳۴ ´۴۰ ″۲۲ تا °۳۴ ´۴۰ ″۵۷)، مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های سوم مربوط به منطقه‌ای از بلژیک با طول جغرافیایی (°۰۴ ´۵۴ ″۰۹ تا °۰۴ ´۵۴ ″۳۲) و عرض جغرافیایی (°۵۰ ´۵۲ ″۵۳ تا °۵۰ ´۵۲ ″۰۸)، که نوع منطقه دارای پوشش گیاهی متراکم و مرتع، مناطق مسکونی و گودبرداری بوده است. داده‌های چهارم مربوط به منطقه‌ای از سوئیس با طول جغرافیایی (°۰۶ ´۳۱ ″۵۴ تا °۰۶ ´۳۳ ″۴۲) و عرض جغرافیایی (°۴۶ ´۳۹ ″۲۷ تا °۴۶ ´۳۹ ″۰۳) مورد استفاده قرار گرفتند. نگاره (۱) مناطق تست مورد مطالعه را در این تحقیق نشان می‌دهد.



نگاره۱: مناطق مورد مطالعه در این تحقیق

۲-۲- داده‌های تحقیق و مشخصات آن‌ها

در این تحقیق، برروی چهار سری داده با مشخصات متفاوت که با سه نوع دوربین مختلف با ارتفاع پرواز متفاوت اخذ شده بودند، استفاده شده است. داده‌های اول مربوط به منطقه‌ای از کشور سوئیس، داده‌های دوم و سوم مناطقی از ایران و داده‌های چهارم مربوط به منطقه‌ای از بلژیک مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در سری اول از داده‌های مربوط به ایران از دوربین FC6310 با قدرت تفکیک مکانی ٤٨٦٤ x ٣٤٤٨ و فاصله کانونی ۸/ ۸ میلی‌متر، پیکسل سایز ۲/٦۱ x ۲/٦۱ میکرومتر که شامل ۱۰۵ عکس در شش خط پرواز و در سری دوم داده‌ها با همان دوربین از یک منطقه ساختمانی با سقف های شیروانی با بافت یکسان با ۱۹٤ عکس در نه خط پرواز از ارتفاع ۱۲۰ متری با متوسط پوشش عرضی ٦۰ درصد و پوشش طولی ۸۰ درصد در هر دو سری داده، جمع‌آوری شده است. در داده‌های مربوط به کشور بلژیک از دوربین NEX-5R با رزولوشن ٤٩١٢ x ٣٢٦٤ و فاصله کانونی ۵/۲ میلی‌متر، پیکسل سایز ٤/٩١٢ x ٣/٢٦٤ میکرومتر که شامل ٤١ عکس در هفت خط پرواز با متوسط پوشش عرضی ٦۰ و پوشش طولی ۸۰ اخذ شده است. در داده‌های مربوط به سوئیس از دوربین Canon IXUS 220HS با رزولوشن ٤۰۰۰ x ۳۰۰۰ و فاصله کانونی ٤/۳ میلی‌متر، پیکسل سایز ۱/۵۵ x ۱/۵۵ میکرومتر که شامل ۱۲۷ عکس در یازده خط پرواز با متوسط پوشش عرضی ۵۵ و پوشش طولی ۸٤ مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های تحقیق با دوربین‌های متفاوت، در ارتفاع پروازهای مختلف و از مناطقی که حاوی پوشش درختی و مناطق بایر، ساختمان‌ها، مزارع زیر کشت و پوشش گیاهی طبیعی، انتخاب گردیده‌اند. در جدول (۱) مناطق مورد مطالعه، داده‌های تحقیق و مشخصات آن‌ها نشان داده شده است.

۲-۳- روش تحقیق

در این تحقیق، تولیدات مختلف نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا، UASmas، PhUAS، AgisMesh و Pix4D، بر روی چهار سری داده‌های مختلف در مناطق شهری و غیرشهری مورد ارزیابی قرارگرفتند. مراحل اصلی این مطالعه همانطور که در نگاره (۲) نشان داده شده است، عبارتند از: جمع‌آوری تصویر، ایجاد ابرنقاط اولیه، تولید محصولات مختلف فتوگرامتری پهپادمبنا و ارزیابی دقت. در مرحله اول، تهیه تصاویر و همچنین معرفی کردن آن‌ها به نرم‌افزارهای منتخب و انجام توجیه داخلی، در مرحله دوم، پردازش بر روی تصاویر معرفی شده شامل تعیین موقعیت ایستگاه‌های عکس‌برداری و معرفی نقاط کنترل زمینی،

جدول۱: داده‌های تحقیق و مشخصات آن‌ها

مناطق تست	مشخصات دوربین	تعداد خط پرواز	تعداد عکس‌ها	سطح تصویربرداری(m2)	ارتفاع پرواز(m)	قدرت تفکیک زمینی(cm/pix)
ایران	Model: FC6310 (8.8mm), Resolution: 4864 x 3648, Pixel Size: 2.61 x 2.61 ìm	٦	١٠٥	٢٧٣٠٠٠	١٦٥	٣/٢٢
	Model: FC6310 (8.8mm), Resolution: 5472 x 3648, Pixel Size: 2.41 x 2.41 ìm	٩	١٩٤	٢٨٤٠٠٠	١٢٠	٢/٩٥
بلژیک	Model: NEX-5R (5.2mm), , Resolution: 4912 x 3264 Pixel Size: 4.912 x 3.264	٧	٤٩	٤٦٥٠٠	٨٢	٢/٢٢
سوئیس	Model: Canon IXUS 220HS (4.3mm), Resolution: 4000 x 3000, Pixel Size: 1.55 x 1.55 ìm	١١	١٢٧	٦١٦٠٠٠	٢٤٦	٧/٥٨

ایجاد ابرنقاط اولیه و همچنین ابرنقاط متراکم بوده است. در مرحله سوم، بخشی از تولیدات فتوگرامتری پهپادمبنا که شامل سطح پیوسته ابرنقاط متراکم، مدل رقومی زمین و تولید سطح با بافت واقعی بوده است.

گردش کار مشترک برای تولید ابرنقاط متراکم شامل برآورد پارامترهای توجیه، رجیستر کردن تصاویر، تولید نقاط گرهی، ایجاد ابرنقاط متراکم و مدل‌سازی سه‌بعدی در شرایط همسان در نرم‌افزارها ایجاد گردید. در مرحله نهایی ارزیابی بصری و هندسی از تولیدات مختلف نرم‌افزارها انجام گرفته است. ارزیابی دقت هندسی از پارامتر آماری ریشه مربع میانگین۱ را می‌توان از معادله (۱) و (۲) محاسبه کرد.

$$RMSE_{xyz} = \sqrt{\frac{\sum(XYZRe_i - XYZcheck_i)}{n}}$$

رابطه(۱)

$$RMSE_{Check} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2}$$

رابطه(۲)

در این معادلات $RMSE_x$ و $RMSE_y$ و $RMSE_z$ به ترتیب مقدار خطای ریشه مربعی متوسط در جهت‌های مختصات X، Y و Z می‌باشد،

در حالت اول بررسی، $XYZRe_i$ و $XYZcheck_i$ به ترتیب مختصات نقاط متناظر نقاط چک حاصل از تولیدات نرم‌افزارها و مختصات نقاط چک که با سیستم تعیین موقعیت جهانی به‌دست آمده است و n تعداد کل نقاط مورد بررسی است.

در حالت دوم مقایسه دقت هندسی مختصات، نقاط رندوم انتخابی در سه منطقه مختلف مناطق بایر، مناطق حاوی پوشش گیاهی از جمله درختان و مناطق ساختمانی از معالات (۳) تا (٦) استفاده گردید.

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum(XSoft_i - Xsoft_j)}{n}}$$

رابطه(۳)

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum(YSoft_i - Ysoft_j)}{n}}$$

رابطه(٤)

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum(ZSoft_i - Zsoft_j)}{n}}$$

رابطه(٥)

$$RMSE_{Random} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2}$$

رابطه(٦)

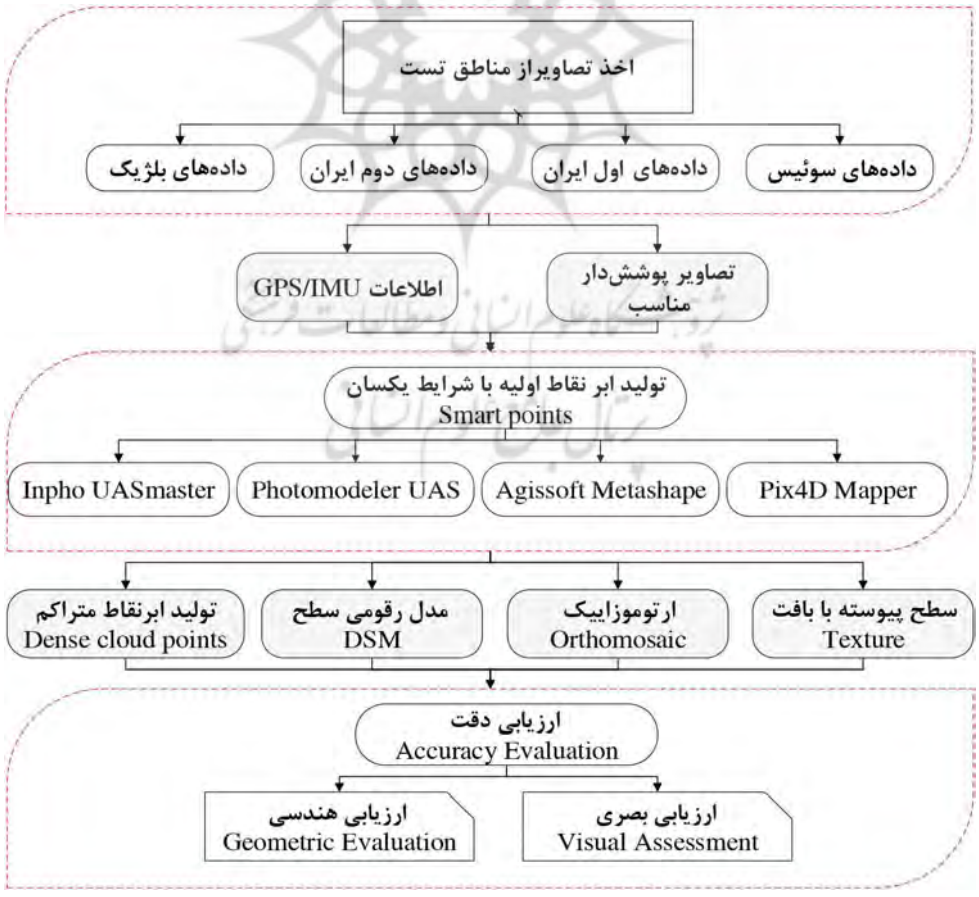
در این معادلات $RMSE_x$ و $RMSE_y$ و $RMSE_z$ به ترتیب

1- Root Mean Square Error (RMSE)

مقدار خطای ریشه مربعی متوسط در جهت‌های مختصات X، Y و Z می‌باشد، در حالت دوم بررسی، $XYZSoft_i$ و $XYZSoft_j$ به ترتیب مختصات نقاط تصادفی انتخابی، مقایسه شده در تولیدات نرم‌افزارهای مورد مطالعه در مناطق بایر، مناطق حاوی پوشش گیاهی و مناطق ساختمانی می‌باشد و n تعداد کل نقاط تصادفی انتخابی در هر منطقه است.

۳- نتایج و بحث

ارزیابی تولیدات مختلف نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا مورد استفاده در ایران، بر روی دو مؤلفه اصلی کیفیت بصری و دقت هندسی متمرکز شده است. در این ارزیابی سعی شده است با حداقل نقاط کنترل زمینی، تولیدات مختلف این نرم‌افزارها شامل، سطح پیوسته ابرنقاط متراکم، مدل رقومی زمین، سطح پیوسته ابرنقاط با کیفیت بالا و ارتوفتو مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج حاصل هم به صورت کمّی و هم کیفی مورد ارزیابی و تجزیه- تحلیل قرار گرفت. در بررسی‌های کمّی، ابتدا با استفاده از نقاط کنترل چک که در محاسبات دخالت داده نشده بودند، تولیدات مختلف این چهار نرم‌افزار مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس، با توجه به داده‌های مورد استفاده، ارزیابی در سه کلاس مختلف از مناطق شهری و غیرشهری شامل مناطق مسکونی، مناطق حاوی پوشش گیاهی و مناطق بایر انجام گرفت. برای مقایسه تولیدات مختلف نرم‌افزارهای لیست شده، تولیدات AgisMesh (به‌دلیل خروجی بصری مناسب نسبت به سایر نرم‌افزارها) به‌عنوان نرم‌افزار مبنا در ارزیابی کمی، نظر گرفته شده است و تولیدات سه نرم‌افزار مختلف نسبت به آن مورد بررسی و ارزیابی گردیده است. تصاویر شامل مناطق ساختمانی، مناطق دارای پوشش گیاهی و مناطق با بافت



نگاره۲: مراحل روند اجرای این تحقیق

یکنواخت انتخاب شدند تا عملکرد نرم‌افزارها مورد بررسی و چالش برانگیز باشد. برای تولید ابرنقاط متراکم و ارتوفتو و سایر تولیدات شامل برآورد پارامترهای توجیه، رجیستر کردن تصاویر، تولید نقاط گرهی، ایجاد ابر نقطه متراکم و مدل‌سازی سه‌بعدی در شرایط همسان در نرم‌افزارها ایجاد گردید. همچنین، چون تولیدات نرم‌افزارها روی چهار سری داده مختلف خیلی زیاد بودند، در این تحقیق سعی گردید که تولیداتی که دارای اختلافاتی در خروجی نرم‌افزارها بودند، به‌عنوان نتایج این تحقیق منعکس گردد.

۳-۱- ارزیابی بصری نتایج

همه نرم‌افزارهای فتوگرامتری پهپادمبنا سعی دارند تولیدات آن‌ها و پارامتری ورودی و خروجی الگوریتم‌ها به‌صورت خودکار و اتوماتیک باشد، از این‌رو در اغلب آن‌ها کاربر نمی‌تواند نقش چندانی در تعیین پارامترها ایفا نماید. با این حال، دسترسی محدود به تعیین پارامترها ورودی و خروجی وجود دارد.، زیرا نرم‌افزارهای فوق، نرم‌افزارهای منبع‌باز نیستند و از جزئیات الگوریتم آن‌ها اطلاعات کافی در دسترس نیست.

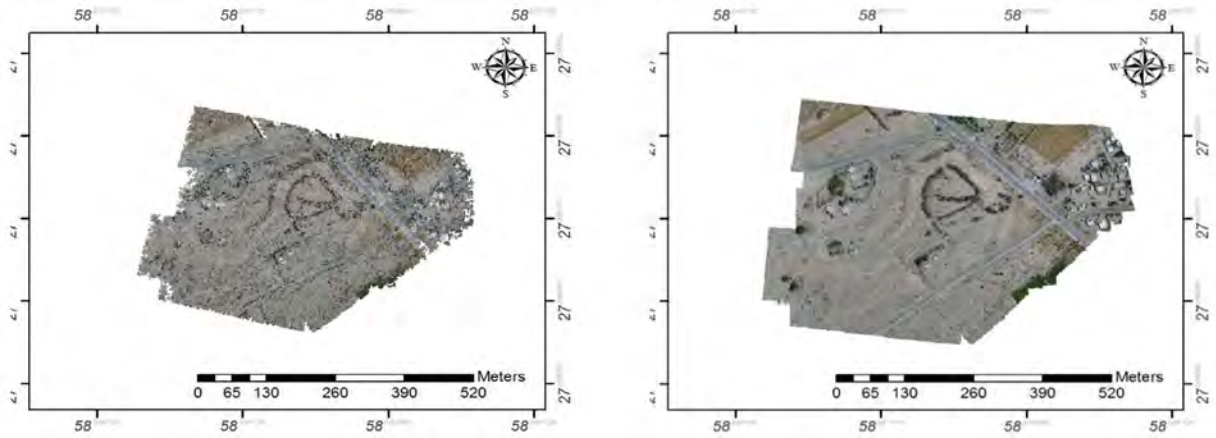
در AgisMesh پارامترهای ترفیع موقعیت هر دوربین به‌صورت اتوماتیک محاسبه می‌شود و اگر کاربر بخواهد در یک پروژهای این پارامترها را وارد کند امکان وارد کردن XYZ مرکز دوربین عکس‌برداری وجود دارد ولی نمی‌توان پارامترهای وضعیت را به‌سادگی در هر ایستگاه وارد کرد. لذا در این نرم‌افزار از الگوریتم سلفکالیبراسیون و سرشکنی باندل برای تعیین توأم پارامترهای ترفیع و تقاطع (مختصات زمینی)، پارامترهای اعوجاج عدسی استفاده می‌کند و برای تولید ابرنقاط متراکم از الگوریتم PMVS[1] که شامل آشکارسازی عوارض با اپراتورهای مختلف، سپس الگوریتم تناظریابی مبتنی بر عوارض نقطه‌ای و خطی استفاده می‌کند و این عوارض را در هر تصویر تحت عنوان نقاط کلیدی پیدا کرده و سپس تناظریابی سایر نقاط را برای افزایش تعداد نقاط بیشتر انجام می‌دهد. همچنین، در AgisMesh در هنگام تولید ابرنقاط متراکم، کاربر کیفیت خروجی را می‌تواند انتخاب کند که اینکار باعث می‌شود ابرنقاط تولیدی دارای دقت و کیفیت بهتری از لحاظ تراکم، گرافیک، رنگ داشته باشند و نقاط زمین و غیرزمین را با محاسبه شاخص‌ها (مثل شاخص گیاهی) و فیلترهای مختلف تشخیص داده و مدل رقومی سطح و مدل رقومی ارتفاعی را با کیفیت خوبی تولید می‌کند. نرم‌افزار UASMas از سرشکنی باندل و الگوریتم مثلث‌بندی Match-AT استفاده می‌کند و برخلاف AgisMesh پارامترهای ترفیع موقعیت عکس‌برداری را کاربر می‌تواند براحتی وارد کند و از حالت ترکیبی تصاویر هوایی، ماهواره‌ای و داده‌های لایدار می‌تواند استفاده کند. همچنین، از الگوریتم تناظریابی تطبیق تصویر چندپرتوی[2] برای تولید نقاط متناظر استفاده می‌کند و از تکنیک‌هایی مانند فیلتر کردن نویز، مدل‌سازی لبه و تشخیص مرز برای به دست آوردن یک مدل سطح دقیق استفاده می‌کند. همچنین برای تولید ابرنقاط متراکم از الگوریتم تناظریابی SGM[3] برای تولید مدل رقومی سطح زمین و مدل رقومی ارتفاعی بهره می‌برد. در PhUAS پارامترهای کالیبراسیون دوربین را بایستی به نرم‌افزار معرفی کرد، این نرم‌افزار از سلف کالیبراسیون استفاده نمی‌کند و از سرشکنی باندل حالت ترفیع تقاطع همزمان استفاده می‌کند و قادر نیست پارامترهای کالیبراسیون و پارامترهای اعوجاج عدسی را در پردازش تصاویر محاسبه نماید. توجیهات و مثلث‌بندی در PhUAS حالت دستی و نیمه‌اتوماتیک دارد و لذا کاربر باید با تمام الگوریتم‌های فتوگرامتری و ماشین‌بینایی آشنا باشد. در Pix4D از الگوریتم‌های ساختار سه‌بعدی (SFM)[4] یک صحنه از مجموعه‌ای از تصاویر دوبعدی استفاده می‌شود و بیشتر از الگوریتم‌های پردازش و مدل‌سازی ماشین‌بینایی استفاده می‌کند. همچنین از الگوریتم یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی ابرنقاط متراکم بهره می‌برد.

1- Patch-based Multi View Stereo

2- Multi-ray image matching

3- Semi-global matching (SGM)

4- Structure from Motion (SFM)

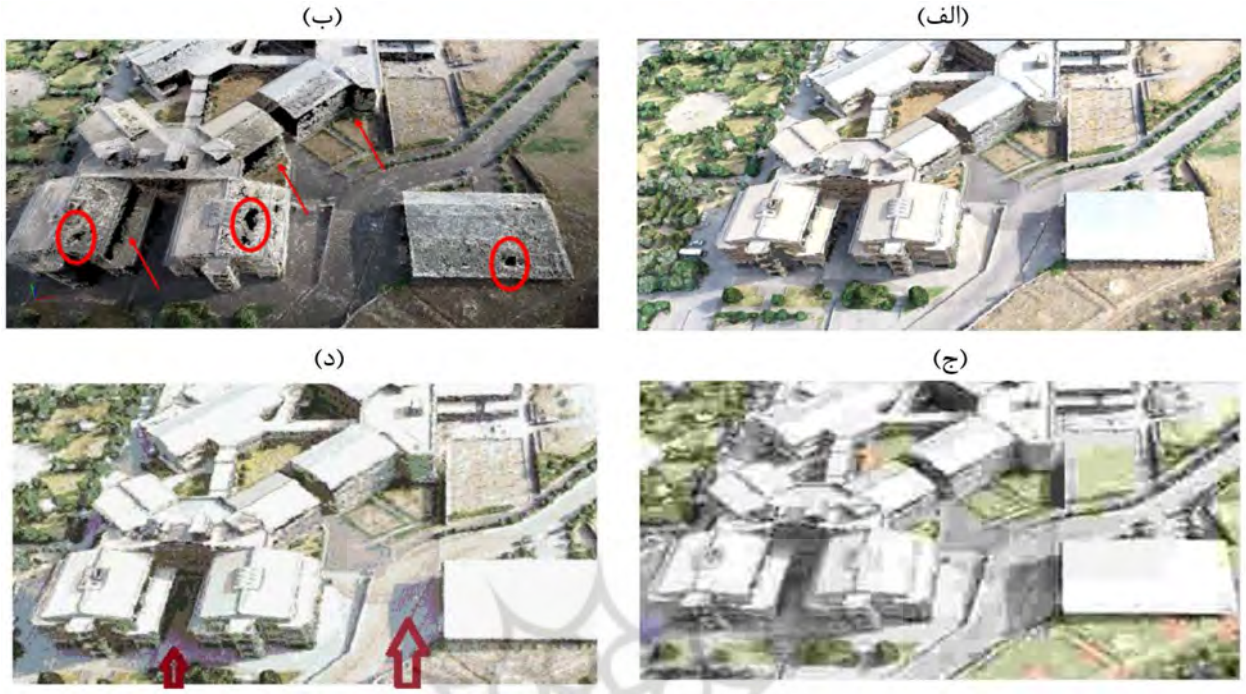


نگاره۳: ابرنقاط تولید شده، الف) با AgisMesh، ب) PhUAS

در مقایسه ابرنقاط متراکم، نرم‌افزارهای مورد بررسی، با مقایسه ابرنقاط روی داده‌های که حاوی مناطق شهری زیاد نبودند در خروجی ابرنقاط تفاوت محسوسی بین خروجی‌های UASmas، AgisMesh و Pix4D Mapper نبود. ولی در مناطق ساختمانی و شهری تفاوت‌ها بیشتر نمایان گردید. نرم‌افزار PhUAS بعد از تولید کردن هر بخش از روند کار خود نرم‌افزار به‌صورت فایل متنی دقت و صحت کار را به کاربر نمایش می‌دهد، که باید مدنظر داشت که این ویژگی برگرفته از نسخه برد کوتاه نرم‌افزار بوده که برای اندازه‌گیری‌های دقیق بر روی اجسام و مشاهده دقت آن‌ها نیز می‌باشد که در این نسخه هم از آن قابلیت استفاده شده است. همچنین در تولید ابرنقاط متراکم، این امکان را به کاربر می‌دهد که تمامی تولیدات را در ابعاد و اندازه‌های دلخواه خروجی گرفته و سپس نقاط کنترل معرفی نماید. در حالی‌که در AgisMesh هنگام خروجی گرفتن از تولیدات مختلف نرم‌افزار مانند مدل رقومی زمین و غیره، اگر نقاط کنترل معرفی نشوند و یا منطقه مورد نظرمان به ابعاد و اندازه واقعی تعریف نشود نرم‌افزار قادر به خروجی گرفتن نخواهد بود. همچنین، در AgisMesh در هنگام تولید ابرنقاط متراکم، کاربر کیفیت خروجی را می‌تواند انتخاب کند که این کار باعث می شود در ابرنقاط تولیدی به دقت و کیفیت بهتری از لحاظ تراکم، گرافیک و رنگ داشته باشد که در نرم‌افزار PhUAS چنین امکانی تعبیه نشده است، لذا از نظر بصری تفاوت کیفیت ابرنقاط تولیدی دو نرم‌افزار مشهود است که در نگاره (۳) نشان داده شده است. علاوه بر این، نرم‌افزارهای Pix4D و UASmas در تولید ابرنقاط متراکم تفاوتی از نظر بصری با نرم‌افزار AgisMesh نداشتند. همچنین مقایسه ابرنقاط روی این داده‌ها و داده‌های دیگر که حاوی مناطق شهری زیاد بودند، مطابق نگاره (٤)، و اجزای ساختمانی دارای تصاویری با بافت یکنواختی بودند نظیر سقف ساختمان‌ها، انجام گرفت تا عملکرد نرم‌افزارها سنجیده شود، زیرا کارایی الگوریتم‌های مختلف تناظریابی نقاط متناظر، که در نرم‌افزارهای فتوگرامتری پهپادمبنا به‌کار می‌رود در چنین سطوحی نتایج خود را بهتر نمایش می‌دهند.

نگاره٤: قسمتی از داده‌های سری دوم ایران با بافت یکنواختی در سقف ساختمان‌ها

با تولید ابرنقاط این داده‌ها در نرم‌افزارها مورد تست، Pix4D در مقایسه با سایر نرم‌افزارها عملکرد خیلی ضعیفی داشت. این نرم‌افزار که در ابرنقاط متراکم با

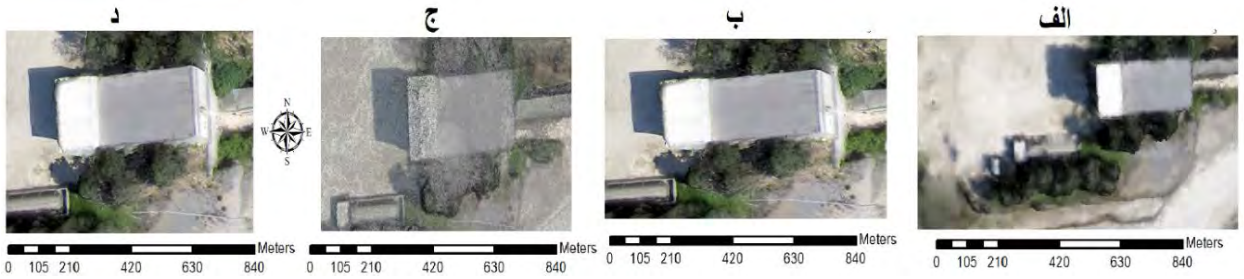


نگاره۵: ابرنقاط در سطوح با بافت یکسان، الف) با AgisMesh ب) با Pix4D ج) PhUAS د) UASmas

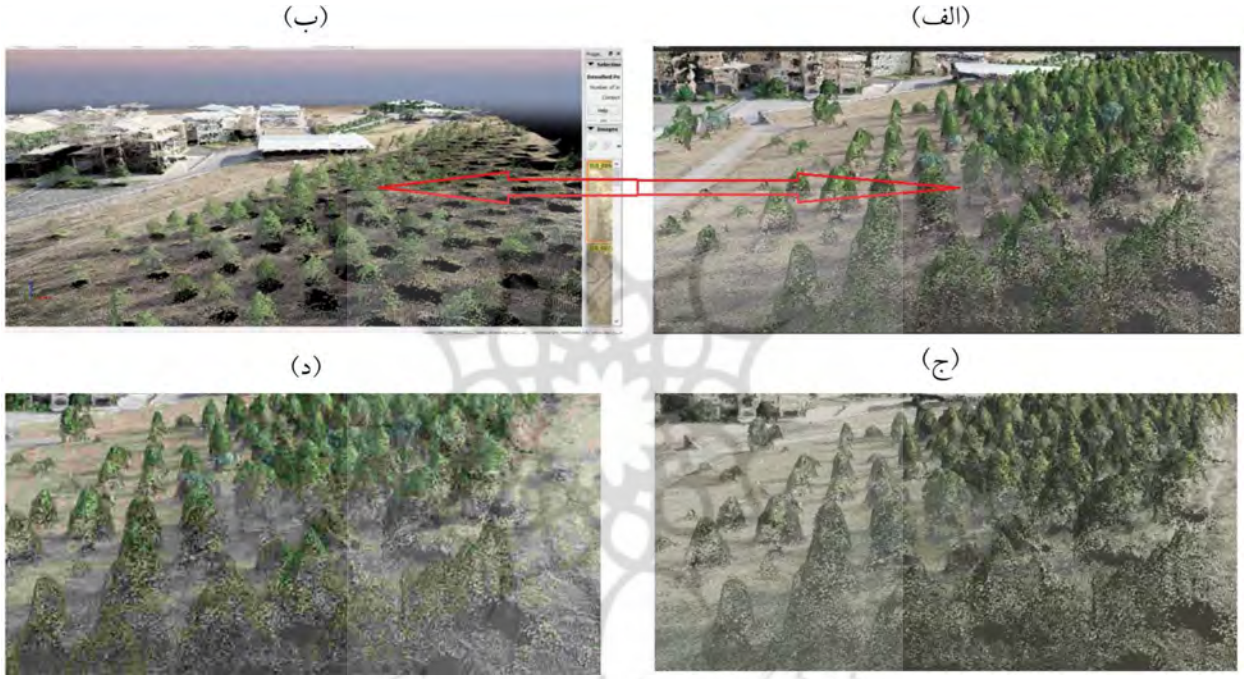
AgisMesh رقابت تنگاتنگی داشت ولی در تولید ابرنقاط با بافت یکسان و مشابه کارایی و عملکرد مناسبی ندارد ولی سه نرم‌افزار دیگر، عملکرد مشابهی داشتند. همچنین در AgisMesh هنگام تولید ابرنقاط متراکم، کاربر کیفیت خروجی را می‌تواند انتخاب کند که این کار باعث می‌شود در ابرنقاط تولیدی دارای به دقت و کیفیت بهتری از لحاظ تراکم، گرافیک و رنگ داشته باشیم. نگاره (۵) ابرنقاط تولید شده در سطوح با بافت یکسان و یکنواخت را نشان می‌دهد.

همانطور که در نگاره (۵) دیده می‌شود، سطوح سقف ساختمان‌ها که بافت یکسان و سفید رنگی دارند، نرم‌افزار Pix4D در تولید ابرنقاط در نواحی با بافت یکسان و یکنواخت، شاهد گپ‌هایی زیادی است که قادر به تناظریابی مناسب نقاط متناظر در چنین سطوحی نیست. این گپ ابرنقاط، احتمالاً ناشی از دو دلیل باشد، یکی استفاده از الگوریتم‌های ضعیف تناظریابی در این نرم‌افزار در مقایسه با سایر نرم‌افزارها، و دیگری در این نرم‌افزار، کاربر تأثیر محدودی در پردازش دارد، لذا تعیین اغلب پارامترها با کاربر نیست و روند پردازش تصاویر کاملاً خودکار است. به همین دلیل است که احتمالاً در بافت‌های یکنواخت و همگن نتایج معیوب یا در صحنه‌های پیچیده نتیجه رضایت بخشی حاصل نمی‌گردد. در مقابل، سایر نرم‌افزارها عملکرد مناسبی در این سطوح داشتند. در حالی‌که در سایر بافت‌های طبیعی مثل پوشش گیاهی، درختان، زمین‌های بایر که از بافت‌های گوناگون برخوردارند عمکلرد و کارایی نرم‌افزارهای تست شده مشابه هم بوده و تفاوت محسوس بصری در ابرنقاط تولید شده ندارند و همه نرم‌افزارها نسبتاً عملکرد خوب و مشابهی داشتند. در مقابل، در سطوحی که تقریباً بافت یکسان دارند فقط نرم‌افزارهای AgisMesh و UASmas خروجی مناسب بصری داشتند، که ابرنقاط این نرم‌افزارها شارپتر و برای چشم قابل تشخیص‌تر بودند که ممکن است در این دو نرم‌افزار از الگوریتم‌های پردازش تصویر خاص برای این موضوع استفاده کرده باشند. نمونه بافت‌های تولید شده در نرم‌افزارهای تست شده در مناطق انتخابی در نگاره (٦) نشان داده شده است.

در مناطق با پوشش درختان نیز ابرنقاط متراکم تولید شده توسط نرم‌افزارهای UASmas، PhUAS و AgisMesh



نگاره۶: ابرنقاط با بافت، الف) UASmas، ب) Pix4D ، ج) PhUAS، د) Agisoft



نگاره ۷: ابرنقاط در مناطق درختی، الف) با AgisMesh ب) با Pix4D ج) PhUAS د) UASmas

عملکرد بصری مشابه داشتند و باز Pix4D عملکرد ضعیفی داشته و در مکان‌هایی که سایه وجود دارد در تناظریابی با مشکلاتی مواجه هست. در نگاره (۷) نمونه‌ای از خروجی AgisMesh و Pix4D در مناطقی حاوی درختان نشان داده شده است. در تولید مدل رقومی سطح[1] و مدل رقومی ارتفاعی[2] در نرم‌افزارهای مورد مقایسه، یکی از قابلیت‌های حائز اهمیت در نرم‌افزار UASmas و AgisMesh قابلیت فیلترگذاری بر روی ابرنقاط متراکم هست، که با استفاده از این امر کاربر می‌تواند پوشش‌های گیاهی ضعیف و بزرگ هر منطقه و همچنین عوارض مصنوعی بر روی سطح زمین را حذف کند، مثلاً با معرفی کردن رنگ عوارض مصنوعی به نرم‌افزار، می‌توان هر عارضه موجود در منطقه که از لحاظ رنگی با رنگ معرفی شده شباهت داشته را شناسایی و حذف کند که این روش در فیلتر کردن پوشش‌های گیاهی کاربرد فراوانی دارد، یا در روش دیگری بر اساس اختلاف ارتفاع انجام شده با معرفی کردن فاصله و زاویه شیب می‌توان عوارض را تشخیص داد که این بخش بیشتر در فیلتر کردن مناطق مسکونی کاربرد دارد که این مزیت در تهیه مدل رقومی ارتفاعی از روی مدل رقومی سطح، کمک شایانی به کاربر می‌کند. به‌عبارتی، در این نرم‌افزارها قابلیت طبقه‌بندی، فیلترگذاری و استفاده از روش‌های باثبات

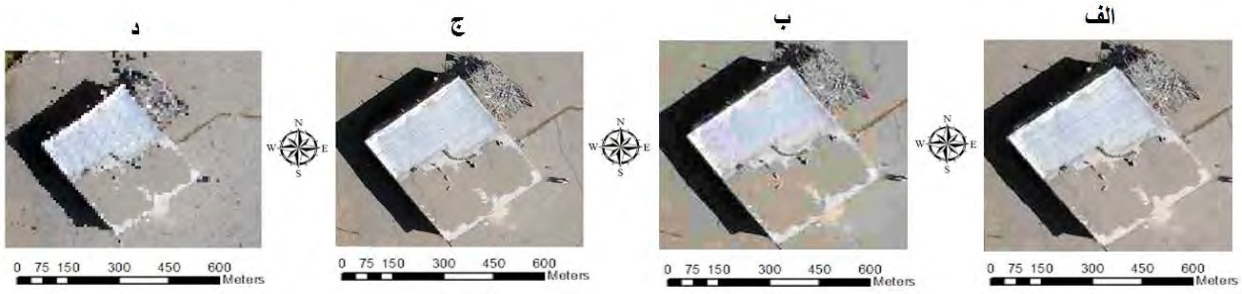
1- DSM
2- DEM

انترپلاسیون ابرنقاط روی زمین و غیرزمین (ساختمان‌ها، درختان، پوشش گیاهی، خطوط انتقال نیرو و ...) وجود دارد که به‌طور تقریباً اتوماتیک امکان تولید مدل رقومی ارتفاعی زمین وجود دارد. همچنین در UASmas ابزارهای مشابه فتوگرامتری سنتی فراهم گردیده است، مثلاً نقاط کنترل زمینی را می‌توان از یک فایل با فرمت ساده متنی فراخوانی کرد. کاربر در تولید ابرنقاط و مدل‌های سه‌بعدی، کنترل کامل پردازش را در اختیار دارد که از مزیت‌های این نرم‌افزار است. در مقابل رابط کاربری کاربرپسند ندارد و دارای یک رابط بسیار سخت و گیج‌کننده‌ای است که بایستی کاربر از جزئیات فنی هواپیماهای بدون سرنشین و دوربین‌های عکس‌برداری، آگاهی کامل داشته باشند و همچنین این نرم‌افزار نیاز به فایل پارامترهای دوربین دارد و قادر نیست آن را از روی اطلاعات خود تصاویر[1] بخواند. که از محدودیت‌های اصلی این نرم‌افزار است. علاوه بر آن، پردازش با استفاده از تنظیمات پیش‌فرض این نرم‌افزار امکان‌پذیر است، با این حال منجر به کیفیت نامطلوب خروجی می‌گردد، لذا کاربر بایستی در زمینه فتوگرامتری خبره باشد و پارامترهای ورودی را آگاهانه با توجه به نوع داده‌ها تنظیم نماید. در مقابل در PhUAS بعد از تولید مدل رقومی سطح، الگوریتم‌ها و فیلترهای جداسازی نقاط غیرزمین از نقاط سطح زمین به‌صورت اتوماتیک همانند نرم‌افزارهای AgisMesh و UASmas وجود ندارد و ویرایش ارتفاعی ابرنقاط می‌تواند به‌صورت محدود و دستی انجام گیرد، مثلاً نقاط ارتفاعی بالای درخت را انتخاب کرد و ارتفاع آن‌ها را به ارتفاع زمینی کنار نقاط تغییر داد که کاری بسیار زمان‌بر و تقریبی است. همچنین نرم‌افزار Pix4D با اینکه امکان ویرایش دستی نتایج پردازش توسط کاربر را به‌صورت محدود فراهم می‌کند، لذا امکان به‌وجود آوردن یک مدل رقومی ارتفاعی با کیفیت امکان‌پذیر نیست. تولید ارتوفتو با بافت واقعی نیز در نرم‌افزارهای مورد تست، به‌صورت بصری مورد بررسی قرار گرفت. در سه نرم‌افزار AgisMesh، UASmas و Pix4D خروجی ارتوفتو از لحاظ بصری تقریباً یکسان بود با جزئی تفاوت در لبه ساختمان‌ها که Agisoft نسبت به دو نرم‌افزار دیگر عملکرد خوبی نداشت. در تولید ارتوفتو نیز در برخی ساختمان‌ها با بافت ضعیف، نرم‌افزار PhUAS عملکردی خوبی نداشت نمونه از خروجی ارتوفتو در یک ساختمان کوچک در نگاره (۸) نشان داده شده است.

با اینکه در سه نرم‌افزار مورد تست بجز PhUAS عملکرد یکسان داشتند ولی در مناطق ساختمانی بجز Pix4D بقیه نرم‌افزارها در لبه مناطق ساختمانی و شهری مشکل دارند و لبه‌های صاف در برخی ساختمان‌ها ایجاد نمی‌گردد. همانطور که در نگاره (۹) نشان داده شده است در مناطق شهری، لبه ساختمان‌ها در Pix4D بهتر و صاف‌تر از دو نرم‌افزار AgisMesh و UASmas عمل می‌کند. با اینکه Pix4D در تولید ابرنقاط متراکم دارای نقص‌های اساسی در سطوح با بافت یکنواخت بود ولی در ارتوفتو، در مناطق ساختمانی بهتر عمل می‌کند.

نگاره (۹) و (۱۰) نمونه از نواقص موجود در لبه ساختمان‌ها را در نرم‌افزارهای مورد تست نشان می‌دهد. همانطور که در نگاره‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌گردد، Pix4D ارتوفتوهای بهتری در مناطق ساختمانی نسبت به AgisMesh و UASmas ارائه می‌دهد که می‌تواند برای تهیه نقشه ارتوفتو در مناطق شهری بسیار مفید باشد. کیفیت کلی بصری ابرنقاط و مدل‌های رقومی حاصل از نرم‌افزارهای مورد تست، نشان داد که انواع مختلف پوشش زمین مانند دیوارها، تپه‌ها و درختان، تفاوت کیفیت قابل توجهی را در بازسازی نهایی مدل سه‌بعدی بجز نرم‌افزار PhUAS نشان نمی‌دهد. برای همه نرم‌افزارها، به دلیل منابع مختلف خطا در فرآیند تناظریابی و الگوریتم‌های انترپلاسیون مختلف، مناطق گپ در سطوح با بافت یکنواخت در نرم‌افزار Pix4D ایجاد می‌شوند ولی کیفیت بازسازی سه‌بعدی ارتوفتوی آن در لبه ساختمان‌ها عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. همچنین به دلیل مناطق پنهان و سایه در اطراف درختان

1- EXIF



نگاره۸: نمونه ساختمان‌ها با بافت ضعیف در ارتوفتو تولیدی، الف) UASmas، ب) Pix4D، ج) AgisMesh، د) PhUAS

نگاره ۹: نمونه‌ای از ارتوفتو و نواقص در لبه ساختمان‌ها، الف) AgisMesh، ب) Pix4D

نگاره ۱۰: نمونه از ارتوفتو و نواقص در لبه ساختمان‌ها، الف) UASmas ، ب) Pix4D

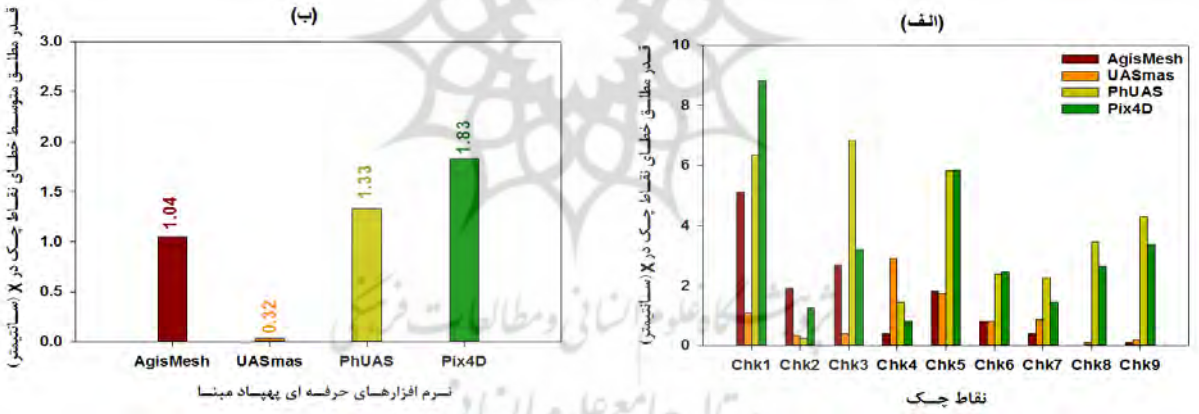
و خطای عدم تطابق در مناطق گیاهی و همچنین سایه در گوشه دیوارها، در ابرنقاط ایجاد شده شکاف وجود دارد که این شکاف در AgisMesh حداقل مقدار است و آن شاید قابلیت‌های زیاد الگوریتم‌های فیلتر کردن در آن نرم‌افزار باشد که در سایر نرم‌افزارها محدود است. همچنین به دلیل نامناسب بودن زاویه دید تصاویر برای همه نرم‌افزارها، در لبه دیوارها مناطق شکاف بیشتری ایجاد می‌شود.

۳-۲- ارزیابی نتایج به‌صورت کمی

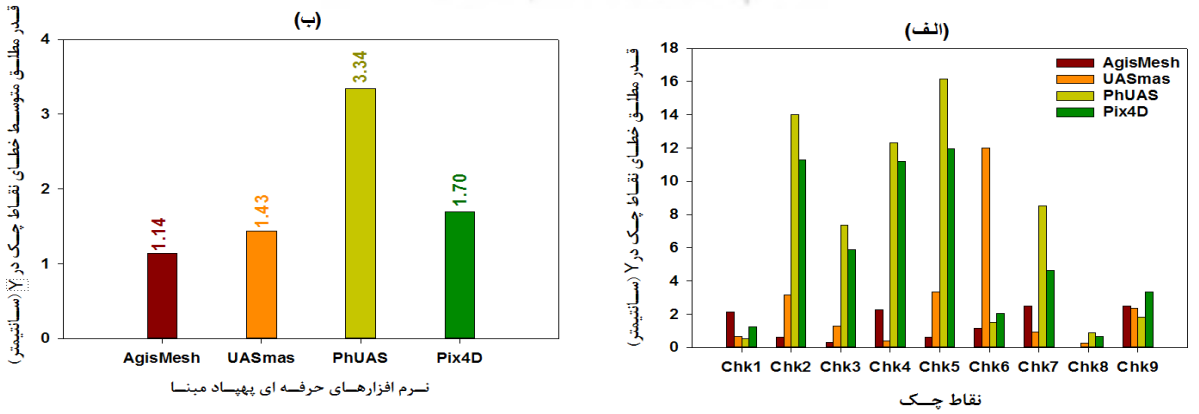
در این بخش، هدف بررسی و ارزیابی نتایج به‌صورت کمی و دقت هندسی تولیدات در چهار نرم‌افزار تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا با حداقل نقطه کنترل بوده که در در داده‌های مربوط به سوئیس، بلژیک، داده‌های سری اول ایران و دوم ایران به ترتیب از ۵، ٤، ٤ و ۵ نقطه کنترل استفاده گردید. بقیه نقاط کنترل به نسبت یک سوم به‌عنوان نقاط چک در نظر گرفته شدند و در محاسبات دخالت داده نشدند. همچنین نقاط چک در ابتدا و انتهای منطقه مطالعه با بیشترین فاصله انتخاب گردیدند.

در نگاره‌های (۱۱) تا (١٤) میانگین خطای نقاط چک در جهت‌های XYZ ارزیابی شده است و همچنین خطای ریشه مربعی متوسط نشان داده شده است. در مرحله دوم برای مقایسه دقت نسبی بین نرم‌افزارها، نقاط تصادفی انتخابی

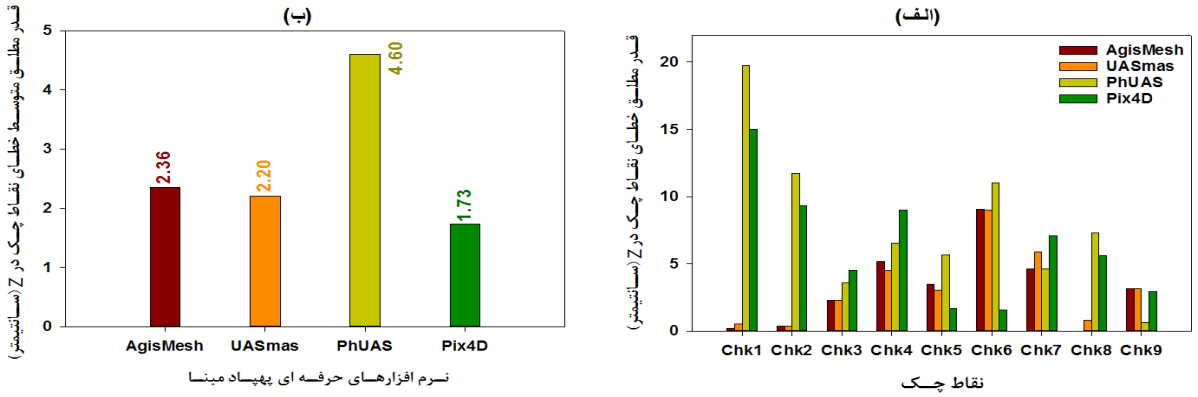
در داده‌های مورد استفاده در سه کلاس متفاوت، کلاس اول مربوط به مناطق مسکونی، کلاس دوم در مناطق بایر که تغییرات ارتفاعی ناچیزی داشته‌اند و کلاس سوم در مناطق پوشش گیاهی شامل گیاهان، محصولات کشاورزی و درختان انتخاب شدند، در مجموع در هر کلاس پانزده نقطه و مجموعاً ٤٥ نقطه، به‌صورت تصادفی انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفتند. با ارزیابی نقاط چک حاصل از مجموعه داده‌های مورد تست در این تحقیق، همانطور که در نگاره‌های ۱۱ تا ١٤ مشاهده می‌گردد، مقادیر مثبت و منفی در باقیمانده مختصات در جهت X بیانگر اتفاقی بودن خطاهاست و میانگین خطای ریشه مربعی متوسط در مختصات ارتفاعی کمتر از مسطحاتی در همه نرم‌افزارهای می‌باشد. به‌طوری کلی نتایج نقاط چک نشان داد که خطای ریشه مربعی متوسط به ترتیب ۲/۸۲، ۲/٦۳، ٥/٨٤ و ۳/۰۳ سانتی‌متر در AgisMesh، UASmas، Pix4D و PhUAS حاصل گردید. که دو نرم‌افزار AgisMesh و UASmas دارای دقت یکسان می‌باشند که تفاوت خطای کمتر از ۲ میلی‌متر تفاوت محسوسی نبوده و این دو نرم‌افزار هم از لحاظ بصری و هم نتایج کمی، دقت حاصل از نقاط چک دارای عملکرد همسانی می‌باشند. به‌دلیل اینکه نتایج بصری AgisMesh نسبت به سایر نرم‌افزارهای مورد تست، مطلوب و مناسب بود، لذا ارزیابی نتایج کمّی همه نرم‌افزارها نسبت به AgisMesh سنجیده شده است. ابتدا نرم‌افزار UASmas بررسی گردیده و نتایج خطای نقاط تصادفی در مناطق مسکونی و ساختمان‌ها، به‌صورت اختلاف مختصات بین Agisoft و UASmas و خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات در نگاره‌های (۱۵) الف و ب نشان داده شده است.



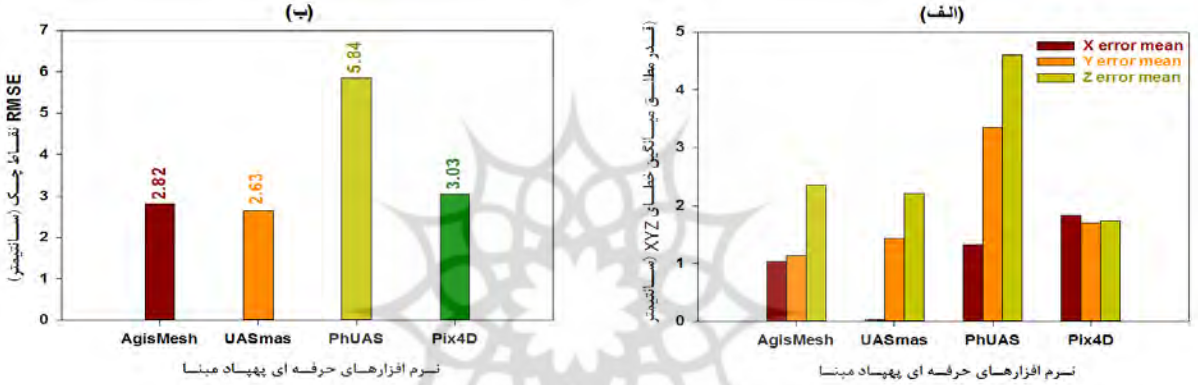
نگاره۱۱: خطای نقاط چک در جهت مختصات X، الف) خطای هر نقطه چک، ب) متوسط خطای مطلق کل نقاط چک



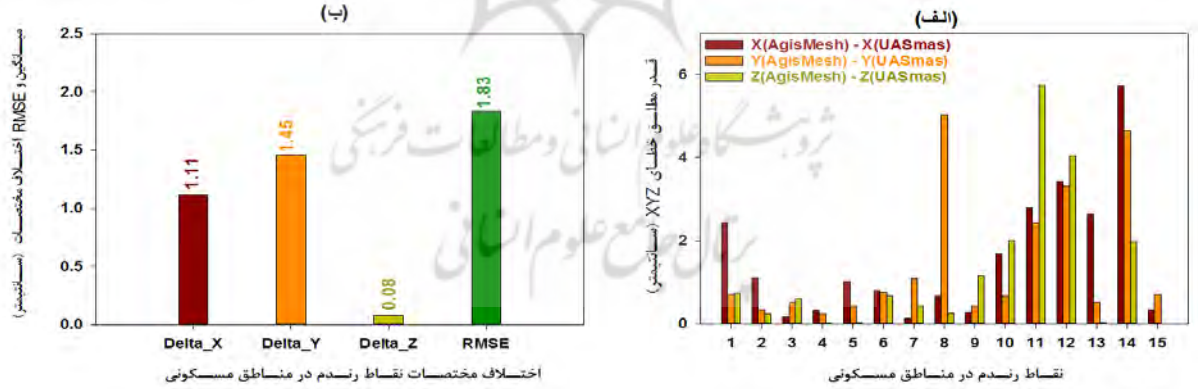
نگاره۱۲: خطای نقاط چک در جهت مختصات Y، الف) خطای هر نقطه چک، ب) متوسط خطای مطلق کل نقاط چک



نگاره۱۳: خطای نقاط چک در جهت مختصات Z، الف) خطای هر نقطه، ب) متوسط خطای مطلق کل نقاط چک



نگاره۱٤: متوسط خطا مؤلفه‌های مختصات و خطای نقاط چک، الف) متوسط خطا، ب) خطای ریشه مربعی متوسط

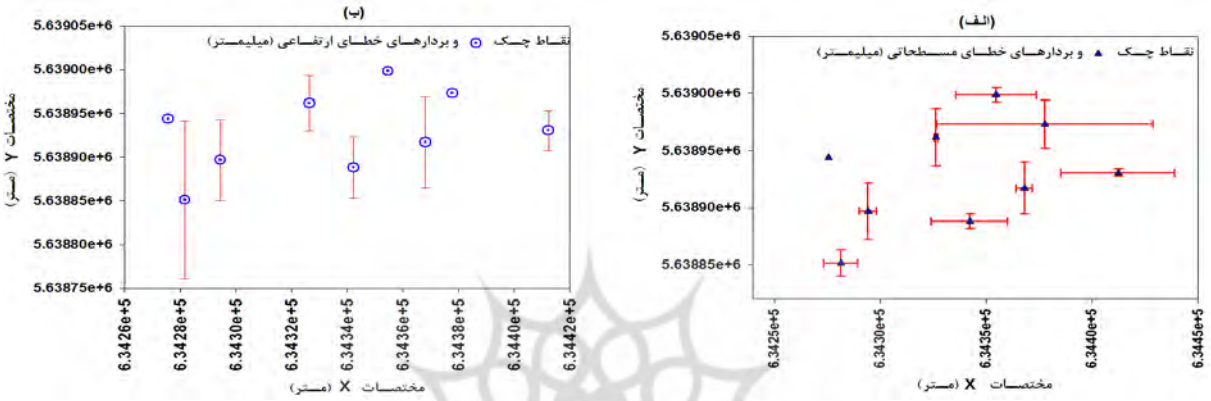


نگاره۱۵: خطای نقاط تصادفی در مناطق مسکونی و ساختمان‌ها، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و UASmas، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

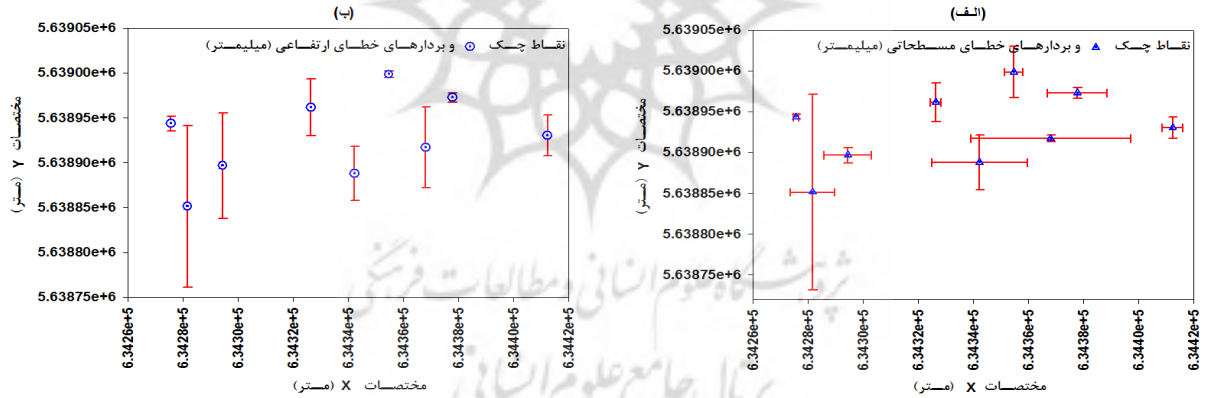
همچنین در این مرحله برای بررسی و ارزیابی توزیع نقاط کنترل و بردارهای خطای مسطحاتی و ارتفاعی در نقاط چک، نگاره‌های (۱٦) تا (۱۹) بردارهای خطای نرم‌افزارهای مورد تحقیق را در بعد خطای مسطحاتی و خطای ارتفاعی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج خطای نقاط تصادفی در مناطق بایر، به‌صورت اختلاف مختصات بین Agisoft و UASmas و خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات در در نگاره‌های (۲۰) الف و ب نشان داده شده است. علاوه بر دو کلاس مذکور، نتایج خطای نقاط تصادفی در کلاس فضای سبز اعم از پوشش

گیاهی و درختان، به‌صورت اختلاف مختصات بین Agisoft و UASmas و خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات در نگاره‌های (۲۱) الف و ب نشان داده شده است.

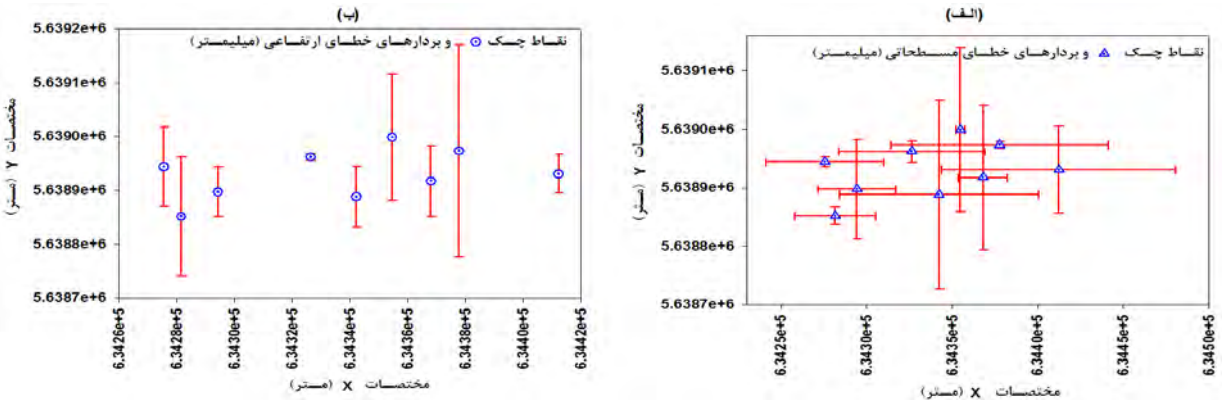
نتایج بررسی نقاط چک، نشان می‌دهد که خطای ریشه مربعی متوسط حاصل در مناطق بایر ۱/۲۰ سانتی‌متر بالاترین دقت، مناطق مسکونی ۱/۸۳ سانتی‌متر و مناطق فضای سبز بالاترین خطا و کمترین دقت، ۲/۷۴ سانتی‌متر را دارا هستند. همین فرآیند ارزیابی بین PhUAS نسبت به AgisMesh در همان سه کلاس با همان نقاط تصادفی انتخابی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج در نگاره‌های ۱۸ تا ۲۰ نشان داده شده است.



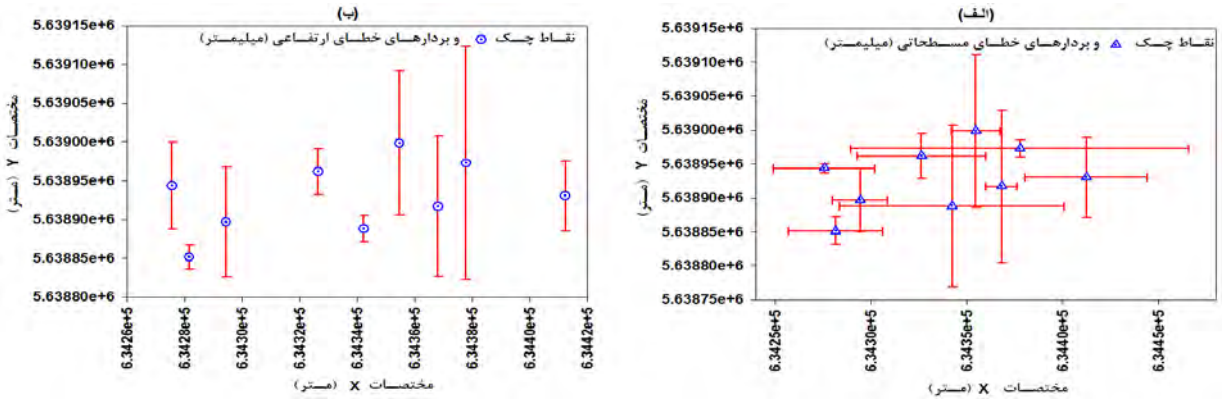
نگاره۱۶: بردارهای خطای AgisMesh در نقاط چک، الف) خطای مسطحاتی، ب) خطای ارتفاعی



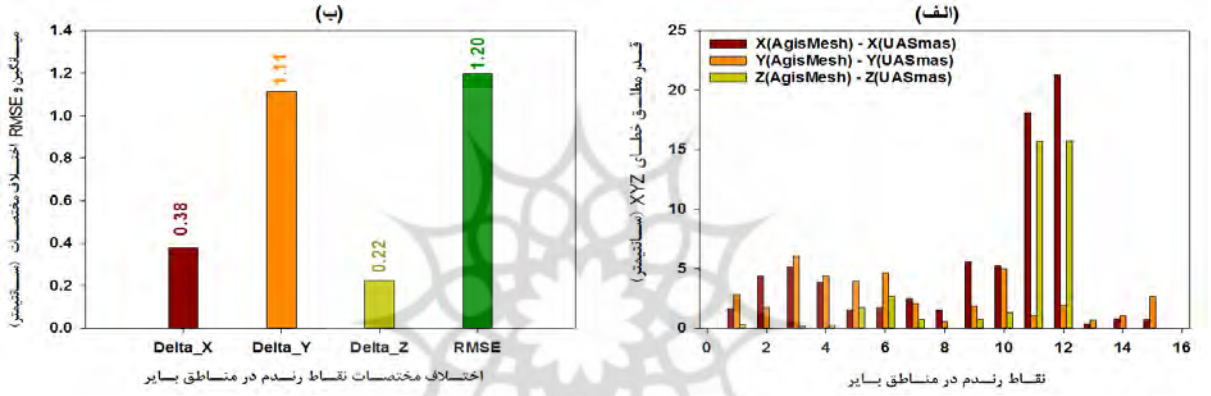
نگاره۱۷: بردارهای خطای UASmas در نقاط چک، الف) خطای مسطحاتی، ب) خطای ارتفاعی



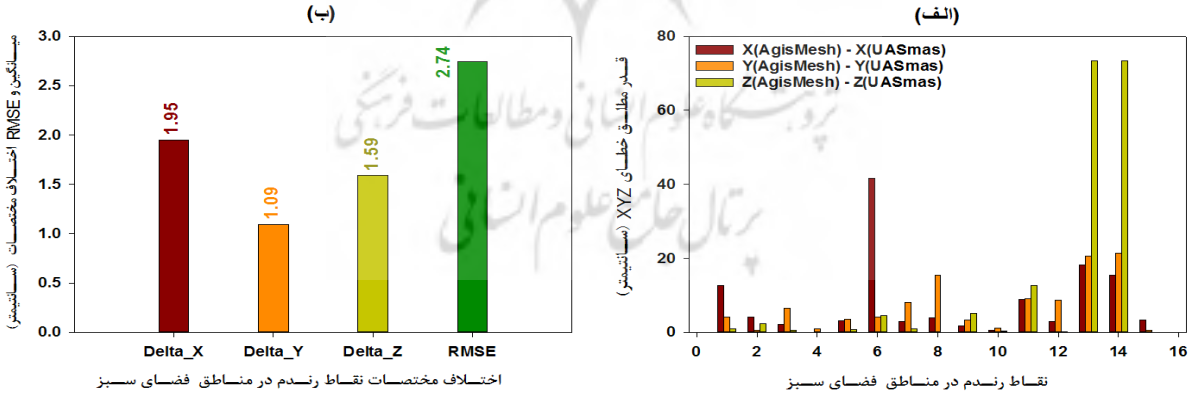
نگاره۱۸: بردارهای خطای PhUAS در نقاط چک، الف) خطای مسطحاتی، ب) خطای ارتفاعی



نگاره‌های۱۹: بردارهای خطای Pix4D در نقاط چک، الف) خطای مسطحاتی، ب) خطای ارتفاعی

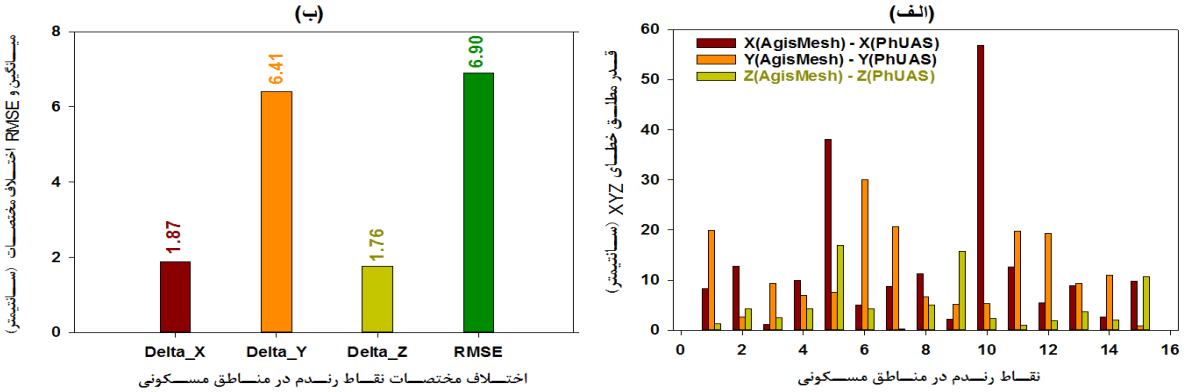


نگاره۲۰: خطای نقاط تصادفی در مناطق بایر، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و UASmas، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

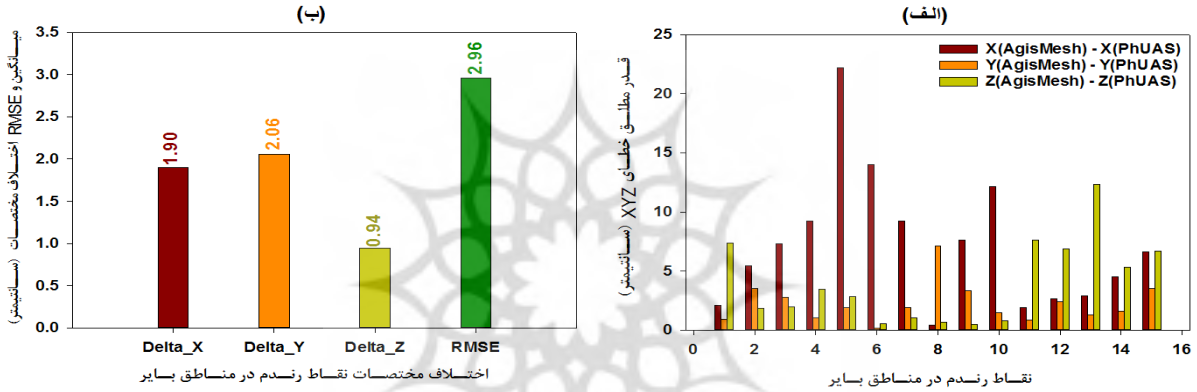


نگاره۲۱: خطای نقاط تصادفی در مناطق فضای سبز، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و UASmas، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

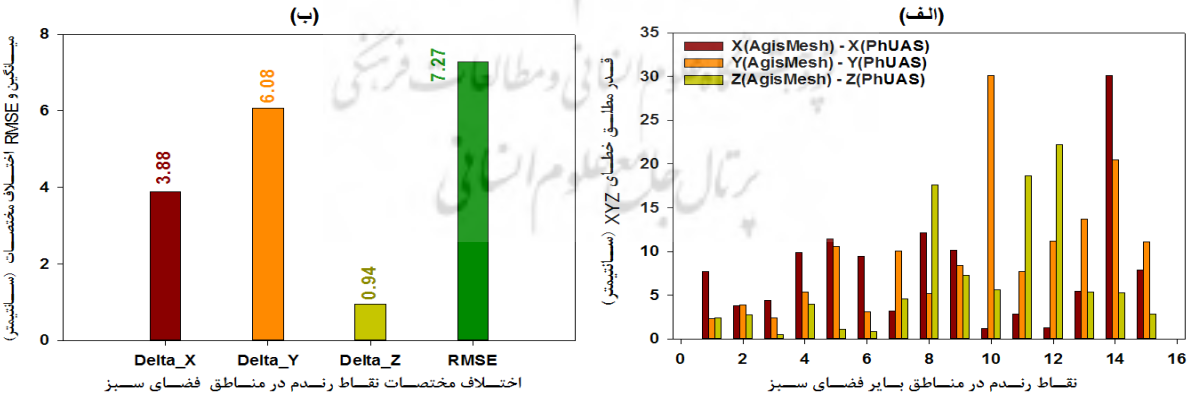
نتایج نگاره‌های ۲۲ تا ۲٤ نشان می‌دهد که خطای ریشه مربعی متوسط حاصل در مناطق بایر ۲/۹٦ سانتی‌متر بالاترین دقت، مناطق مسکونی ٦/۹۰ سانتی‌متر و مناطق فضای سبز بالاترین خطا و کمترین دقت، ۷/۲٤ سانتی‌متر را دارا هستند. این نرم‌افزار هم در نتایج حاصل از نقاط چک و هم نتایج نقاط تصادفی در هر سه کلاس دارای کمترین دقت نسبت به سه نرم‌افزار مذکور می‌باشد. همین فرآیند ارزیابی بین Pix4D نسبت به AgisMesh در همان سه کلاس با همان نقاط تصادفی انتخابی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج در نگاره‌های ۲۵ تا ۲۷ نشان داده شده است.



نگاره۲۲: خطای نقاط تصادفی در مناطق مسکونی و ساختمان‌ها، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و PhUAS، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات



نگاره۲۳: خطای نقاط تصادفی در مناطق بایر، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و PhUAS، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

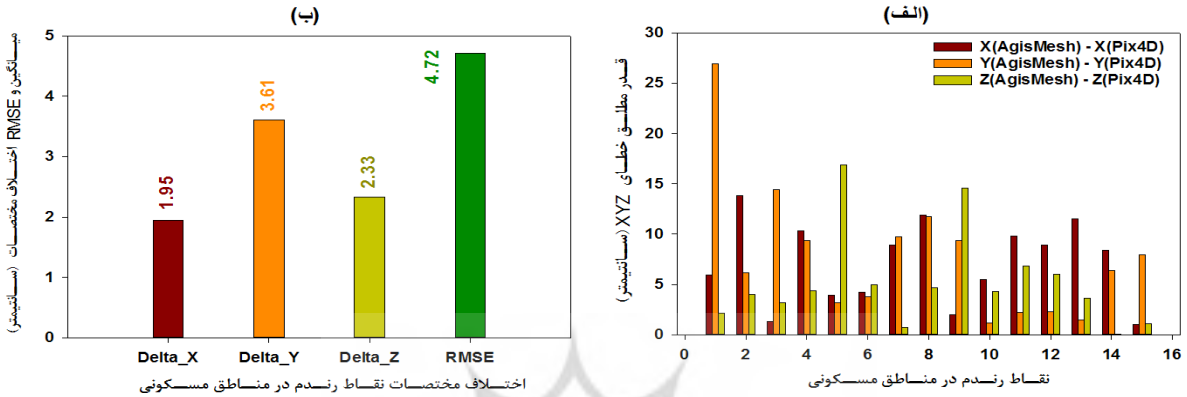


نگاره۲٤: خطای نقاط تصادفی در مناطق فضای سبز، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و PhUAS، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

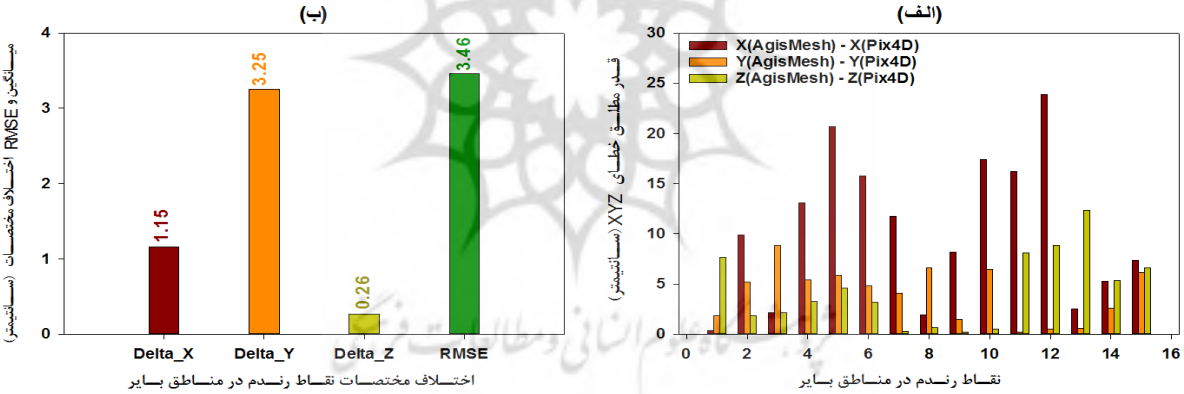
نتایج نگاره‌های ۲۵ تا ۲۷ نشان می‌دهد که خطای ریشه مربعی متوسط حاصل در مناطق بایر ۳/٤٦ سانتی‌متر بالاترین دقت، مناطق مسکونی ٤/۷۲ سانتی‌متر و مناطق فضای سبز بالاترین خطا و کمترین دقت، ۳/۵۹ سانتی‌متر را دارا هستند.

نتایج کلی در چهار نرم‌افزار مورد تست در جدول (۲) به‌طور خلاصه نشان داده شده است. همچنین نتایج نقاط چک نشان داد که خطای ریشه مربعی متوسط به ترتیب ۲/۸۲، ۲/٦۳، ۵/۲۸ و ۳/۰۳ سانتی‌متر در AgisMesh،

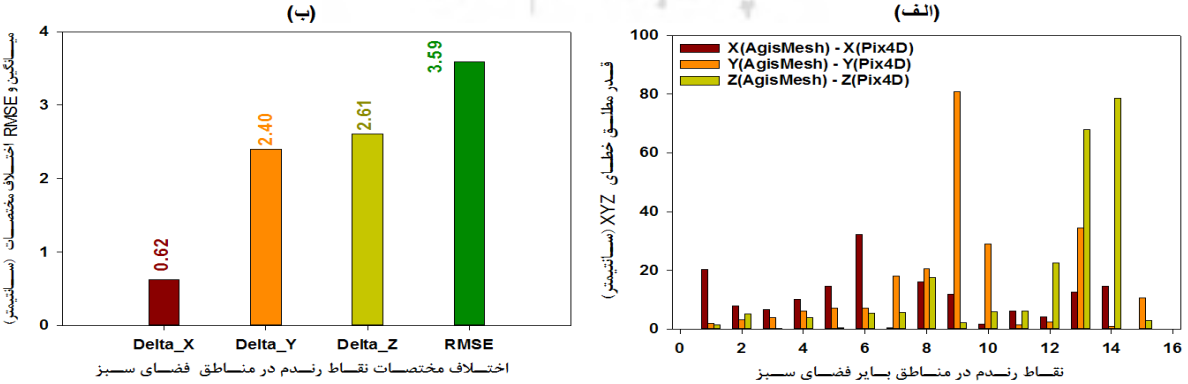
UASmas، Pix4D و PhUAS حاصل گردید. علاوه بر آن، نتایج کمی با انتخاب نقاط تصادفی در سه منطقه ساختمانی، مناطق بایر و فضای سبز با در نظر گرفتن خطای ریشه مربعی متوسط به‌صورت نسبی نشان داد که UASmas به ترتیب دارای دقت‌های ۱/۸۳، ۱/۲۰ و ۲/۷٤ سانتی‌متر، PhUAS دارای دقت‌های ٦/۹۰، ۲/۹٦ و ۷/۲٤ سانتی‌متر، Pix4D دارای دقت‌های ٤/۷۲، ۳/٤٦ و ۳/۵۹ سانتی‌متر نسبت به AgisMesh داشتند.



نگاره ۲۵: خطای نقاط تصادفی در مناطق مسکونی و ساختمان‌ها، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و Pix4D، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات



نگاره۲٦: خطای نقاط تصادفی در مناطق بایر، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و Pix4D، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات



نگاره۲۷: خطای نقاط تصادفی در مناطق فضای سبز، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و Pix4D، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

جدول۲: نتایج خطای ریشه مربعی متوسط در نقاط چک و نقاط تصادفی انتخابی در سه کلاس مختلف

Professional drone-based softwares	RMSE (cm) خطای ریشه مربعی متوسط					
	نقاط چک	نقاط تصادفی انتخابی در مناطق مختلف				متوسط RMSE نقاط تصادفی
		خطای نسبی	مسکونی	باير	فضای سبز	
AgisMesh	۲/۸۲	AgisMesh	۱/۸۳	۱/۲۰	۲/۷٤	۳/۵۱
Inpho UASmaster	۲/٦۳	Inpho UASmaster				
Photomodeler UAS	۵/۸٤	AgisMesh	٦/۹۰	۲/۹٦	۷/۲۷	۱۰/٤۵
		Photomodeler UAS				
Pix4D Mapper	۳/۰۳	AgisMesh	٤/۷۲	۳/٤٦	۳/۵۹	٦/۸۷
		Pix4D Mapper				

جدول۳: زمان پردازش و تعداد ابرنقاط متراکم (در بالاترین کیفیت هر نرم‌افزار) در نرم‌افزارهای مورد تست

نرم‌افزار	منطقه	تعداد عکس	تعداد ابرنقاط متراکم	زمان پردازش (ساعت)
AgisMesh	سوئیس	۱۲۷	۳۷۲۲۳٤۷۱	٦/۲۲
Pix4D			۳۱٦۳۹۹۵۰	۵/۲۸
PhUAS			۱۰۵۷۹۸۳۵	۲/۵۸
UASmas			۳۱٤۹۱۰۵٦٦	۵/۱۲
AgisMesh	تفرش	۱۹٤	۵۵۸۳۵۲۰٦	۱۰/٤۰
Pix4D			٤۸۵۷٦٦۲۹	۸/۲۸
PhUAS			۱٦۹۲۷۷۳٦	۳/۳٤
UASmas			٤۹۰۷۹۱٤٦	۷/۵۰

همچنین، برای ارزیابی کارایی و سرعت نرم‌افزارها در تولید محصولات مختلف، نتایج زمان پردازش در دو سری از داده‌های در یک سیستم پردازش شده بودند، در جدول(۳) نشان داده شده‌اند. بدیهی است زمان پردازش، علاوه بر سخت‌افزار سیستم پردازشگر، به عوارض موجود در منطقه تست بستگی دارد، هر چه بافت متفاوت در تصاویر موجود باشد تعداد نقاط متناظر بیشتری توسط الگوریتم‌های تناظریابی یافت می‌گردد. به‌دلیل اینکه فقط دو سری از داده‌های در یک سیستم پردازش شده بودند و دو سری دیگر از داده‌ها در دو سیستم مختلف از نظر سخت‌افزاری اجرا شده بودند ، قابل مقایسه نبودند، لذا جدول (۳) زمان پردازش و تعداد ابرنقاط متراکم (در بالاترین کیفیت هر نرم‌افزار) دو سری داده را در نرم‌افزارهای مورد تست نشان می‌دهد.

٤- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان دهنده دقت، توانایی و کارآیی نرم‌افزاری تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا برای بازسازی سه‌بعدی تولیدات مختلف با استفاده از تصاویر هوایی با وضوح بالا در سطوح مختلف زمین با ویژگی‌های متفاوت بود. بررسی و مقایسه جامع نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپاد مبنا با حداقل نقاط کنترل زمینی، برای اولین

بار به‌صورت یکجا مورد بررسی قرار گرفته و به‌صورت بصری، کمی و ساختاری ارزیابی و مقایسه گردیده است. در این ارزیابی، از معیارهای مختلف بصری و هندسی برای اندازه‌گیری کیفیت و دقت ابرنقاط و انواع مدل‌های رقومی سطوح تولید شده، استفاده گردید. نرم‌افزاری تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا شامل AgisMesh، PhUAS، UASmas و Pix4D، بر روی چهار سری داده‌های مختلف با ویژگی‌های متفاوت سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفتند. دو سری از داده‌ها مربوط به ایران و دو سری دیگر مربوط به سایر کشورها در مناطق شهری و غیرشهری بوده است. داده‌ها از مناطق بایر، مسکونی و ساختمانی، مناطقی با فضای سبز حاوی گیاهان و درختان و مناطقی با بافت کاملاً یکنواخت انتخاب شده و تولیدات مختلف این نرم‌افزارها به صورت کمّی و کیفی مورد ارزیابی و تجزیه‌تحلیل قرار گرفته است. تا مشخص گردد در کدام مناطق با عوارض مختلف و برای اهداف مختلف کدام نرم‌افزار مناسب است.

در ارزیابی عمومی و بصری نرم‌افزارها، از لحاظ رابط کاربری، مدت زمان پردازش و غیره هر کدام از نرم‌افزارهای مورد تست دارای مزایا و معایبی هستند. با اینکه در این تحقیق دو AgisMesh و UASmas دقت هندسی و بصری مشابه و نزدیک هم داشتند. همچنین، نرم‌افزار UASmas علیرغم اینکه رابط کاربری بسیار سختی دارد و بایستی تمامی پارامترهای دوربین را وارد کرد که یکی از محدودیت‌های این نرم‌افزار است. ولی نتایج بصری و مشابه AgisMesh دارد. در کل، نتایج بصری نشان داد که نرم‌افزار AgisMesh و UASmas در مدل‌سازی سه‌بعدی انواع سطوح در همه مناطق تست، عملکرد بهتری دارد ولی AgisMesh در بازسازی لبه‌های ساختمان‌ها در مناطق شهری عملکرد ضعیفی دارد. در مقابل Pix4D در مناطق با بافت یکنواخت عملکرد خیلی ضعیفی دارد ولی در تشخیص اختلاف ارتفاع و همچنین بازسازی لبه‌های مناطق ساختمانی، قوی عمل می‌کند دو نرم‌افزار دیگر از نظر بصری حالت بینابینی بین این دو نرم‌افزار دارند. با اینکه شرکت‌های اغلب این نرم‌افزارها ادعای تمام اتوماتیک بودن نرم‌افزار خود را دارند ولی در این تحقیق، خروجی مناطق با بافت یکنواخت در Pix4D خلاف آن‌را نشان داد که مداخله کاربر در مراحل پردازش جزء مزایای نرم‌افزار می‌باشد. در Pix4D امکان ویرایش دستی نتایج پردازش به‌صورت محدود توسط کاربر را فراهم می‌کند و کاربر تأثیر محدودی در پردازش دارد. به همین دلیل است که نتایج رضایت‌بخشی در مناطق با بافت یکسان به‌دست نمی‌آید و در سایر مناطق ابرنقاط تولیدی از کیفیت خوبی برخوردار نیستند، زیرا ویرایش دستی نتایج کاملاً محدود است و از ابزارهای ویرایشی مناسب برخوردار نیست. در این تحقیق، نرم‌افزار PhUAS عملکرد ضعیفی هم از لحاظ بصری و هم لحاظ هندسی نسبت به سه نرم‌افزار دیگر داشت. در PhUAS پارامترها یا حد آستانه‌های مختلف در مراحل پردازش نیازمند است که کاربر وارد کند، لذا بایستی کاربر از جزئیات الگوریتم‌های فتوگرامتری و ماشین‌بینایی اطلاع کافی داشته باشد که کیفیت خروجی نرم‌افزار، خیلی وابسته به این پارامترها است. همچنین پردازش خودکار PhUAS نتایج رضایت بخشی ندارد و ابزارهای ویرایشی لازم و کافی برای ویرایش دستی برای کاربر تعبیه نشده است.

در بررسی‌های کمّی، ابتدا با استفاده از نقاط چک که در محاسبات دخالت داده نشده بودند، تولیدات مختلف این نرم‌افزارها مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس، با انتخاب نقاط تصادفی در سه کلاس مختلف از مناطق شهری و غیرشهری شامل مناطق مسکونی، مناطق حاوی پوشش گیاهی و مناطق بایر انجام گرفت. نتایج نقاط چک نشان داد که خطای ریشه مربعی متوسط به ترتیب ۲/۸۲، ۲/۶۳، ۵/۲۸ و ۳/۰۳ سانتی‌متر در AgisMesh، UASmas، Pix4D و PhUAS حاصل گردید. علاوه بر آن، نتایج کمّی حاصل با انتخاب نقاط تصادفی در سه منطقه ساختمانی، مناطق بایر و فضای سبز با در نظر گرفتن خطای ریشه مربعی متوسط به‌صورت نسبی نشان داد که در UASmas به ترتیب دارای دقت‌های ۱/۸۳، ۱/۲۰ و ۲/۷۴ سانتی‌متر، PhUAS

دارای دقت‌های ٦/٩٠، ٢/٩٦ و ٧/٢٤ سانتی‌متر، Pix4D دارای دقت‌های ٤/٧٢، ٣/٤٦ و ٣/٥٩ سانتی‌متر نسبت به AgisMesh داشتند. با در نظر گرفتن جمیع مزایا و ارزیابی بصری و دقت هندسی، AgisMesh، UASmas، Pix4D و PhUAS را می‌توان از رتبه یک تا چهار ارزیابی نمود.

۵- منابع و مآخذ

1- Aurambout, J.-P., Gkoumas, K., & Ciuffo, B. (2019). Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential and access to citizens across European cities. European Transport Research Review, 11(1), 1-21. doi: https://doi.org/10.1186/s12544-019-0368-2.

2- Ayamga, M., Akaba, S., & Nyaaba, A. A. (2021). Multifaceted applicability of drones: A review. Technological Forecasting and Social Change, 167, 120677. doi: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120677.

3- Balasingam, M. (2017). Drones in medicine—the rise of the machines. International journal of clinical practice, 71(9), e12989. doi: https://doi.org/10.1111/ijcp.12989.

4- Barazzetti, L., Binda, L., Scaioni, M., & Taranto, P. (2011). Photogrammetric survey of complex geometries with low-cost software: Application to the 'G1 temple in Myson, Vietnam. Journal of Cultural Heritage, 12(3), 253-262. doi: https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.12.004.

5- Brach, M., Chan, J.-W., & Szymanski, P. (2019). Accuracy assessment of different photogrammetric software for processing data from low-cost UAV platforms in forest conditions. iForest-Biogeosciences and Forestry, 12(5), 435. doi: https://doi.org/10.3832/ifor2986-012.

6- Campbell, J. F., Sweeney, D., & Zhang, J. (2017). Strategic design for delivery with trucks and drones. Supply Chain Analytics Report SCMA (04 2017).

7- CHEN, P.-F., & XU, X.-G. (2020). A comparison of photogrammetric software packages for mosaicking unmanned aerial vehicle (UAV) images in agricultural application. Acta Agronomica Sinica, 46(7), 1112-1119. doi: https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2020.91066.

8- de Oliveira Silva, L., de Mello Bandeira, R. A., & Campos, V. B. G. (2017). The use of UAV and geographic information systems for facility location in a post-disaster scenario. Transportation Research Procedia, 27, 1137-1145. doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.031.

9- Doole, M., Ellerbroek, J., Knoop, V. L., & Hoekstra, J. M. (2021). Constrained Urban Airspace Design for Large-Scale Drone-Based Delivery Traffic. Aerospace, 8(2), 38. doi: https://doi.org/10.3390/aerospace8020038.

10- Eisenbeiß, H. (2009). UAV photogrammetry. ETH Zurich. http://hdl.handle.net/20.500.11850/20976.

11- Eisenbeiss, H., Lambers, K., Sauerbier, M., & Li, Z. (2005). Photogrammetric documentation of an archaeological site (Palpa, Peru) using an autonomous model helicopter. Paper presented at the CIPA 2005. http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:352-0-253687.

12- Fawcett, D., Panigada, C., Tagliabue, G., Boschetti, M., Celesti, M., Evdokimov, A., . . . Rascher, U. (2020). Multi-scale evaluation of drone-based multispectral surface reflectance and vegetation indices in operational conditions. Remote sensing, 12(3), 514. doi: https://doi.org/10.3390/rs12030514.

13- Gini, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G., & Dosso, P. (2013). UAV photogrammetry: Block triangulation comparisons. Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, 1, W2.

14- Haarbrink, R., & Koers, E. (2006). Helicopter UAV for photogrammetry and rapid response. Paper presented at the 2nd Int. Workshop "The Future of Remote Sensing", ISPRS Inter-Commission Working Group I/V Autonomous Navigation.

15- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones:A review. Progress in Aerospace Sciences, 91, 99-131. doi: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003.

16- Honarmand, M., & Shahriari, H. (2021). Geological Mapping Using Drone-Based Photogrammetry: An Application for Exploration of Vein-Type Cu Mineralization. Minerals, 11(6), 585. doi: https://doi.org/10.3390/min11060585.

17- KABADAYI, A., Yunus, K., & YİĞİT, A. Y. (2020). Comparison of documentation cultural artifacts using the 3D model in different software. Mersin Photogrammetry

Kayastha, R. B. (2020). A review on drone-based data solutions for cereal crops. Drones, 4(3), 41. doi: https://doi.org/10.3390/drones4030041.

27- Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., & Moscholios, I. (2020). A compilation of UAV applications for precision agriculture. Computer Networks, 172, 107148. doi: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148.

28- Rauch, M. S. (2021). Drones in Military Warfare: The moral and emotional implications of an emerging technology. Paper presented at the Academy of Management Proceedings. doi: https://doi.org/10.5465/AMBPP.2021.235.

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

30- Salvo, G., Caruso, L., & Scordo, A. (2014). Urban traffic analysis through an UAV. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 111, 1083-1091. doi: https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.143.

31- Sona, G., Pinto, L., Pagliari, D., Passoni, D., & Gini, R. (2014). Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. Earth Science Informatics, 7(2), 97-107. doi: https://doi.org/10.1007/s12145-013-0142-2.

32- Surmann, H., Kaiser, T., Leinweber, A., Senkowski, G., Slomma, D., & Thurow, M. (2021). Small Commercial UAVs for Indoor Search and Rescue Missions. Paper presented at the 2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA). doi: https://doi.org/10.1109/ICARA51699.2021.9376551.

33- Suziedelyte Visockiene, J., Brucas, D., & Ragauskas, U. (2014). Comparison of UAV images processing softwares. Journal of Measurements in Engineering, 2(2), 111-121.

34- To, A., Liu, M., Hairul, M. H. B. M., Davis, J. G., Lee, J. S., Hesse, H., & Nguyen, H. D. (2021). Drone-based AI and 3D Reconstruction for Digital Twin Augmentation. arXiv preprint arXiv:2106.03797.

35- Trubia, S., Curto, S., Severino, A., Arena, F., & Journal, 2(2), 51-58. doi: https://dergipark.org.tr/en/pub/mephoj/issue/58058/717483.

18- Kaimaris, D., Patias, P., & Sifnaiou, M. (2017). UAV and the comparison of image processing software. International Journal of Intelligent Unmanned Systems. doi: https://doi.org/10.1108/IJIUS-12-2016-0009.

19- Khan, N. A., Brohi, S. N., & Jhanjhi, N. (2020). UAV's applications, architecture, security issues and attack scenarios: a survey Intelligent computing and innovation on data science (pp. 753-760): Springer.

20- Ko, Y. D., & Song, B. D. (2021). Application of UAVs for tourism security and safety. Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics. doi: https://doi.org/10.1108/APJML-07-2020-0476.

21- Liu, Y., Dai, H.-N., Wang, Q., Shukla, M. K., & Imran, M. (2020). Unmanned aerial vehicle for internet of everything: Opportunities and challenges. Computer communications, 155, 66-83. doi: https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.03.017.

22- Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., Jawhar, I., Idries, A., & Mohammed, F. (2020). Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities. Technological Forecasting and Social Change, 153, 119293. doi: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.05.004.

23- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. Applied geomatics, 6(1), 1-15. doi: https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x.

24- Orengo, H. A., Garcia□Molsosa, A., Berganzo□Besga, I., Landauer, J., Aliende, P., & Tres□Martínez, S. (2021). New developments in drone□based automated surface survey: Towards a functional and effective survey system. Archaeological Prospection. doi: https://doi.org/10.1002/arp.1822.

25- Pádua, L., Adão, T., Hruška, J., Marques, P., Sousa, A., Morais, R., . . . Peres, E. (2018). UAS-based photogrammetry of cultural heritage sites: A case study addressing Chapel of Espírito Santo and photogrammetric software comparison. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Geoinformatics and Data Analysis. doi: https://doi.org/10.1145/3220228.3220243.

26- Panday, U. S., Pratihast, A. K., Aryal, J., &

Puleo, L. (2021). The use of UAVs for civil engineering infrastructures. Paper presented at the AIP Conference Proceedings. doi: https://doi.org/10.1063/5.0047880.

36- Unger, J., Reich, M., & Heipke, C. (2014). UAV-based photogrammetry: monitoring of a building zone. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives 40 (2014), 40(5), 601-606. doi: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-601-2014.

37- Uysal, M., Toprak, A., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. Measurement, 73, 539-543. doi: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010.

38- Verhoeven, G. (2011). Taking computer vision aloft–archaeological three□dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. Archaeological prospection, 18(1), 67-73. doi: https://doi.org/10.1002/arp.399.

39- Watanabe, Y., & Kawahara, Y. (2016). UAV photogrammetry for monitoring changes in river topography and vegetation. Procedia Engineering, 154, 317-325. doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.482.

40- Yaacoub, J.-P., Noura, H., Salman, O., & Chehab, A. (2020). Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations. Internet of Things, 11, 100218. doi: https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی