

آنالیز و مقایسه دقت تولیدات نرم افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا در مناطق شهری و غیر شهری

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 نرم افزار تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا، Inpho UASmaster، UASmas، Photomodeler UAS (PhUAS)، Agisoft metashape (AgisMesh) و Pix4D Mapper، برای مدل سازی سه بعدی در مناطق شهری و غیر شهری با حداقل نقاط کنترل زمینی انجام گرفت. برای این منظور، تولیدات مختلف این نرم افزارها 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 نرم افزار AgisMesh در مدل سازی سه بعدی انواع سطوح در همه مناطق تست بهترین نتایج داشت ولی در بازسازی لبه های ساختمان ها در مناطق شهری عملکرد ضعیفی دارد. در مقابل Pix4D در مناطق با بافت یکنواخت نتایج ضعیفی داشته ولی در تشخیص اختلاف ارتفاع و بازسازی لبه ساختمان ها، قوی تر عمل می کند. در بررسی های کمی، تولیدات این نرم افزارها 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 سانتی متر 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 دقت های ۸۳/۱، ۱/۲۰ و ۲/۷۴ سانتی متر، PhUAS دارای دقت های ۹۰/۶، ۲/۹۶ و ۷/۲۴ سانتی متر، Pix4D دارای دقت های ۷۲/۴، ۳/۴۶ و ۳/۵۹ سانتی متر نسبت به AgisMesh داشتند.

واژه های کلیدی: فتوگرامتری پهپادمبنا، نرم افزارهای پیشرفته فتوگرامتری، مدل سازی سه بعدی، پهپاد، دقت هندسی

۱- استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران (نویسنده مسئول) h_emami@ut.ac.ir

۲- مربی آموزشی، گروه مهندسی نقشه برداری، 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 تطبیقی 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; To Hassanalani & Abdelkefi, 2017; Honarmand & Shahriari, 2021; To et al., 2021). از کاربردهای غیرنظامی پهپادها نیز می‌توان به عنوان نمونه به حادثه فوکوشیما 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, 2020) ایجاد شهرهای هوشمند آتی (Mohamed, Moscholios, 2020) ایجاد شهرهای هوشمند آتی (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 لجستیک 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^۱ 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, 2016).

شرایط جنگلی، کاربردهای کشاورزی، استفاده از یک نوع داده، بیشتر از منظر الگوریتم های ماشین بینایی بحث گردیده است که این الگوریتم ها با اینکه بیشتر روی حالت های 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 ویژگی های دوربین، فاصله نمونه برداری زمینی، فاصله پهپاد تا سطح زمین، طراحی پرواز، کیفیت هندسی و رادیومتریکی 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 به کارگیری داده های مختلف که در شرایط متفاوت و از مناطق مختلف گرفته شده اند، استفاده شده است.

نرم افزار Trimble UASmas محصول کمپانی تریمبل و ترکیبی کامل از یک ایستگاه کاری فتوگرامتری است و دارای یک محیط کاربرپسند می باشد. این نرم افزار دارای قابلیت های نظیر، گردش کار کاملاً اتوماتیک، مثلث بندی هوایی، پالایش و بهبود پارامترهای کالیبراسیون دوربین^۱، تولید ابرنقاط متراکم، تولید ارتوموزاییک همگن، قابلیت ویرایش گسترده برای همه مراحل، تجسم و نمایش استریوسکوپی^۲ می باشد. این نرم افزار از الگوریتم های مدرن ماشین بینایی^۳ همراه با تکنیک های پیشرفته فتوگرامتری، نتایج دقیق را با حداقل تعامل دستی به صورت خودکار تولید می کند و برای هر نوع داده های پهپاد و یا دوربینی های دستی برد کوتاه طراحی شده است. نرم افزار AgisMesh تولید شده به وسیله کمپانی روسی AgiSoft می باشد و دارای ابزارهای مختلفی جهت طراحی و ویرایش فایل های گرافیکی استفاده می کند (Verhoeven, 2011). پ. نرم افزار PhUAS^۴ به عنوان یک ابزار پیشرو در فتوگرامتری و محصولی از کشور کانادا؛ توسط کمپانی

(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 در نتیجه تصاویر می تواند پوشش عرضی و طولی بیشتری داشته باشد (Eisenbeiß, 2009). برداشت نقاط صعب العبور، دقت بالا و سرعت بالای عملیات، ارائه خروجی های متنوع نظیر مدل رقومی ارتفاعی زمین (Orengo et al., 2021; Uysal, Toprak, & Polat, 2015)، ارتوفتو با قدرت تفکیک مکانی بالا، نقشه توپوگرافی و مدل سازی سه بعدی از مزایای فتوگرامتری پهپادمبنا است (Remondino et al., 2011).

برای تولیدات مختلف در فتوگرامتری پهپادمبنا، نرم افزارهای تخصصی مختلف با الگوریتم های پیشرفته پردازش تصاویر، گسترش داده شده اند و همه آنها تولیدات تقریباً مشابهی دارند. در دهه اخیر، نرم افزارهای مختلف فتوگرامتری پهپاد مبنای تولید و گسترش داده شده اند. از معروف ترین آنها می توان به نرم افزارهای Inpho UASmaster، Mapper Pix4D، Photomodeler UAS، Agisoft metashape، DroneDeploy Enterprise 3D Map، PrecisionHawk 3D map، Open Drone Map، RealityCapture، SimActive Correlator3D، Drone Mapper، Bentley ContextCapture، WebODM، Menci APS، 3Dsurvey، 3DF Zephyr، Correlator 3D، Menci APS و غیره اشاره کرد. چند مورد از این نرم افزارها، به عنوان نرم افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا که در کشور ما زیاد مورد استفاده قرار می گیرند، در این تحقیق مورد ارزیابی کمی و کیفی قرار گرفته اند، عبارتند از Inpho UASmaster (UASmas)، Photomodeler از Agisoft metashape (AgisMesh) (UAS (PhUAS) و Mapper Pix4D. دقت تولیدات مختلف این چهار نرم افزار تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا، به صورت جامع بررسی نگردیده است و در برخی تحقیقات، این نرم افزارها با سایر نرم افزارها به صورت عمومی و گزینشی مقایسه شده است. این تحقیق، یک تحقیق مقایسه ای است که بیشتر جنبه کاربردی و عملی دارد. تحقیقات انجام شده در این زمینه، اغلب بین دو نرم افزار بوده و در یک شرایط خاص، مثل

1- Camera refinement

2- Stereoscopic visualization

3- Modern computer-vision

4- PhotoModeler for Unmanned Aircraft Systems

نرم افزار Pix4D را به طور کلی بهتر از Photomod معرفی کردند. جینی و همکارانش (Gini et al., 2013) در تحقیقی مدل مثلث بندی بلوک شامل پارامترهای توجیه خارجی و کیفیت نقاط کنترل زمینی، یک سری داده های مختلف در پنج خط پرواز با ۴۹ عکس حاصل از پهپاد با بال ثابت را در نرم افزارهای فتوگرامتری و ماشین بینایی مورد مقایسه قرار دادند. آن ها مدل مثلث بندی نرم افزارهای LPS.EyeDEA، Agisoft Photoscan و Pix4D تولیدات ابرنقاط مترکم سطح را مقایسه کردند. بررسی آنان نشان داد که دقت نتایج نرم افزارهای فتوگرامتری بهتر از نرم افزارهای ماشین بینایی 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 نرم افزار مختلف فتوگرامتری را برای پردازش داده ها از سیستم های کم هزینه پهپاد در شرایط جنگلی مورد بررسی قرار دادند. آن ها ارتوموزائیک مناطق جنگلی حاصل در شش نرم افزار DroneDep7loy; (B) Pix4Dmapper; (C) AgiSoft PhotoScan; (D) APS; (E) PrecisionMapper; (F) Maps Made Easy را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج آن ها نشان داد که مقدار خطای ریشه مربعی متوسط (RMSE) نرم افزارهای DroneDeploy و Pix4Dmapper نسبت به نرم افزارهای دیگر کمتر و در حدود ۱/۲۲ و ۱/۲۷ سانتی متر برآورد گردید. کایماریس و همکارانش (Kaimaris, Patias, & Sifnaiou, 2017) در تحقیقی محصول ابرنقاط مترکم سطح را در دو نرم افزار Agisoft PhotoScan و Imagine UAV of Erdas مورد بررسی قرار دادند و با هشت نقطه کنترل زمینی مقایسه کردند. آن ها به خطای تقریباً یکسان برای هر دو نرم افزار رسیدند و اعلام کردند نتایج دقت هندسی Agisoft PhotoScan تا اندازه ای بهتر بوده ولی تفاوت معنی داری بین دقت هندسی دو نرم افزار نبوده است. آنگر و همکارانش (Unger, Reich, & Heipke, 2014) در تحقیقی ابرنقاط و ارتوفتو دو نرم افزار Photoscan و pix4dmapper را مورد بررسی قرار دادند.

Systems INC ارائه شده است. در سال ۲۰۱۶ این شرکت محصول PhUAS را برای پردازش داده های فتوگرامتری پهپاد مینا معرفی نمود. نرم افزار PhUAS یک نسخه از نرم افزار Photomodeler است که دارای ویژگی های خاصی برای داده های پهپاد در نظر گرفته شده است (Barazzetti, Binda, Scaioni, & Taranto, 2011). در سال ۲۰۱۹ میلادی این نرم افزار 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 مترکم، مدل های سه بعدی، سطوح با بافت واقعی را تولید کند. پردازش انواع تصاویر قائم، مایل، برد کوتاه و ماهواره ای، کالیبراسیون خودکار، پشتیبانی از پروژه های چند دوربین، و مدل سازی چهاربعدی برای صحنه های پویا از ویژگی های این نرم افزار است. نرم افزار Mapper Pix4D محصول شرکت Pix4d سوئیس، یکی از بهترین نرم افزارها در حوزه پردازش تصاویر پهپاد و پردازش انواع تصاویر هوایی و زمینی است. همچنین این نرم افزار اخیراً قابلیت جدیدی بنام تحلیلگر ابری^۱ یک فناوری نوآورانه دیگری در کنار Pix4D ارائه داده است که خروجی این نرم افزار را برای کاربردهای مختلف نقشه برداری مهیا می سازد.

تحقیقات قبلی در شرایط خاص و در کاربردهای خاصی، کارایی و عملکرد برخی از این نرم افزارها را مورد بررسی قرار داده اند. سوزیدلایت و همکارانش (Suziedelyte Visockiene, Brucas, & Ragauskas, 2014) دو نرم افزار Pix4D و Photomod را در تولیدات ارتوموزائیک و مدل سه بعدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که دوربین عکس برداری نصب شده در UAV باید کالیبراسیون شود. در حالی که نرم افزار Mapper Pix4D دارای قابلیت خود کالیبراسیون است و قبل از تهیه تصاویر، نیازی به معلوم بودن پارامترهای دوربین وجود ندارد. نرم افزار Photomod چنین عملکردی را ندارد، بنابراین پارامترهای دوربین عکس برداری باید معلوم باشد. در نتایج آن ها

تخصصی فتوگرامتری پهپاد مینا شامل PhUAS، UASmas، AgisMesh و Pix4D که در کشور ما زیاد مورد استفاده قرار می گیرند، با در نظر گرفتن حداقل نقاط کنترل زمینی، بر روی چهار سری داده های متفاوت از مناطق مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. داده های مورد استفاده با دوربین های مختلف، تحت شرایط متفاوت، از مناطق مختلف با ارتفاع پرواز متفاوت در نظر گرفته شده اند. دو سری از داده ها مربوط به ایران و دو سری دیگر مربوط به کشورهای دیگر در مناطق شهری و غیر شهری است. این تحقیق در پنج بخش خلاصه شده است: بعد از مقدمه در بخش دوم معرفی داده های تحقیق و خصوصیات آن ها آورده شده است. مدل سازی و پیش پردازش داده ها در بخش سوم بحث شده است و در بخش چهارم مقایسه و آنالیز نتایج صورت گرفته و نهایتاً در بخش آخر نتیجه گیری کلی از این تحقیق، بحث و بررسی گردیده است.

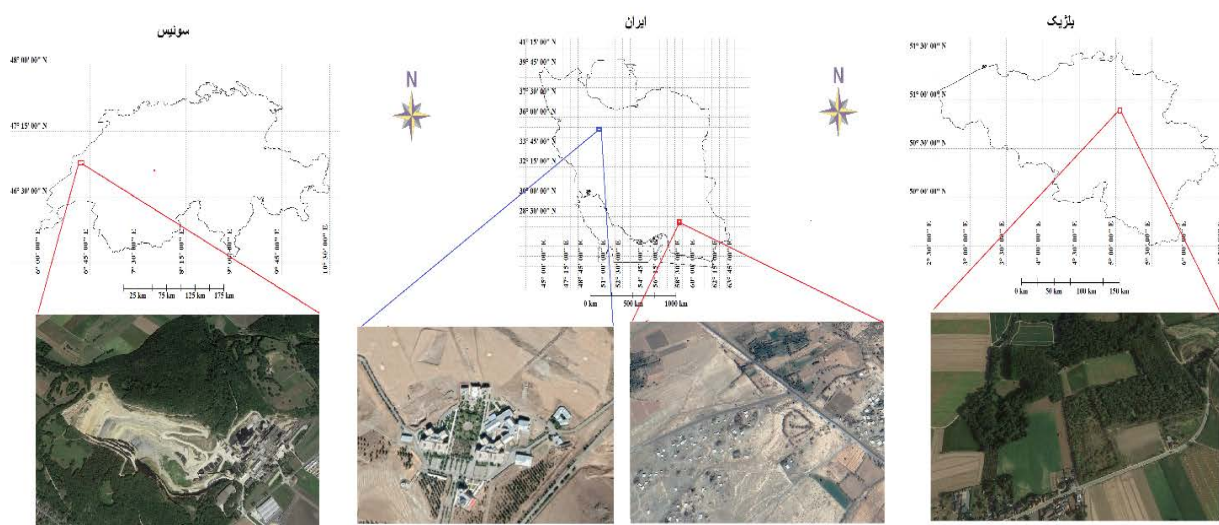
۲- مواد و روش ها

۲-۱- مناطق تحقیق

در این تحقیق از داده های چهار منطقه مختلف استفاده شده است، منطقه اول چاه لک از استان هرمزگان ایران با طول جغرافیایی ($58^{\circ} 03' 00''$ تا $58^{\circ} 03' 21''$) و عرض جغرافیایی ($27^{\circ} 20' 45''$ تا $27^{\circ} 20' 57''$)، دومی محدوده دانشگاه تفرش با طول جغرافیایی ($50^{\circ} 02' 47''$ تا $50^{\circ} 30' 30''$) و عرض جغرافیایی ($34^{\circ} 40' 22''$ تا $34^{\circ} 40' 57''$)، مورد استفاده قرار گرفتند. داده های سوم مربوط به منطقه ای از بلژیک با طول جغرافیایی ($04^{\circ} 54' 09''$ تا $04^{\circ} 54' 32''$) و عرض جغرافیایی ($50^{\circ} 52' 53''$ تا $50^{\circ} 52' 08''$)، که نوع منطقه دارای پوشش گیاهی متراکم و مرتع، مناطق مسکونی و گودبرداری بوده است. داده های چهارم مربوط به منطقه ای از سوئیس با طول جغرافیایی ($06^{\circ} 31' 54''$ تا $06^{\circ} 33' 42''$) و عرض جغرافیایی ($46^{\circ} 39' 27''$ تا $46^{\circ} 39' 03''$) مورد استفاده قرار گرفتند. نگاره (۱) مناطق تست مورد مطالعه را در این تحقیق نشان می دهد.

نتایج آن ها نشان داد که مقدار خطای مربع ریشه نقاط چک در نرم افزار Pix4Dmapper بهتر از Photoscan در همه جهات های xyz بوده است. پادوآ و همکارانش (Pádua et al., 2018) در تحقیقی، کاربرد فتوگرامتری پهپاد مینا را برای بررسی مدل سازی سه بعدی سایت های میراث فرهنگی به وسیله دو نرم افزار Pix4D و Agisoft Photoscan از لحاظ دقت مدل سازی و عملکرد سهولت استفاده آن ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که در مقایسه با اندازه گیری های زمینی، هر دو نتایج قابل اعتمادی را با انحراف معیار $1/8$ سانتی متر برای Agisoft و $1/6$ سانتی متر برای مدل تولید شده از Pix4D به دست آوردند. کابادای و همکارانش (KABADAYI, Yunus, & Yiğit, 2020) در تحقیقی مدل سازی سه بعدی ابنیه تاریخی را با استفاده از دو نرم افزار Agisoft photomodeler و photomodeler قرار دادند. نتایج آن ها با استفاده از نقاط چک نشان داد که دقت هندسی متوسط در مختصات سه بعدی مدل سازی ابنیه تاریخی، $1/79$ و $2/17$ سانتی متر به ترتیب در photomodeler و Agisoft داشتند که دقت مدل سازی 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 آن ها نشان داد که کارایی نرم افزار Agisoft در تولید موزاییک تصویری بهتر از Pix4D می باشد.

با توجه به اینکه کیفیت و دقت نسبی و مطلق تولیدات فتوگرامتری پهپاد مینا به عوامل مختلفی بستگی دارد از جمله پارامترهای مختلفی نظیر ویژگی های دوربین، فاصله نمونه برداری زمینی، فاصله پهپاد تا سطح زمین، طراحی پرواز، کیفیت هندسی و رادیومتری 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 نرم افزار تخصصی فتوگرامتری پهپاد مینا جهت نقشه برداری و مدل سازی سه بعدی با حداقل نقاط کنترل زمینی است. برای این منظور نرم افزارهای



نگاره ۱: مناطق مورد مطالعه در این تحقیق

۲-۲- داده‌های تحقیق و مشخصات آن‌ها
در این تحقیق، بر روی 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 4864×3448 و فاصله کانونی $8/8$ میلی‌متر، پیکسل سایز $2/61 \times 2/61$ میکرومتر که شامل 105 عکس در شش خط پرواز و در سری دوم داده‌ها با همان دوربین از یک منطقه ساختمانی با سقف‌های شیروانی با بافت یکسان با 194 عکس در نه خط پرواز از ارتفاع 120 متری با متوسط پوشش عرضی 60 درصد و پوشش طولی 80 درصد در هر دو سری داده، جمع‌آوری شده است. در داده‌های مربوط به کشور بلژیک از دوربین NEX-5R با رزولوشن 4912×3264 و فاصله کانونی $5/2$ میلی‌متر، پیکسل سایز $4/912 \times 3/264$ میکرومتر که شامل 41 عکس در هفت خط پرواز با متوسط پوشش عرضی 60 و پوشش طولی 80 اخذ شده است. در داده‌های مربوط به سوئیس از دوربین Canon IXUS 220HS با رزولوشن 4000×3000 و فاصله

۳-۲- روش تحقیق
در این تحقیق، تولیدات مختلف نرم‌افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا، AgisMesh، PhUAS، UASmas و Pix4D، بر روی چهار سری داده‌های مختلف در مناطق شهری و غیرشهری مورد ارزیابی قرار گرفتند. 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،

جدول ۱: داده‌های تحقیق و مشخصات آن‌ها

مناطق تست	مشخصات دوربین	تعداد خط پرواز	تعداد عکس‌ها	سطح تصویربرداری (m ²)	ارتفاع پرواز (m)	قدرت تفکیک زمینی (cm/pix)
ایران	Model: FC6310 (8.8mm), Resolution: 4864 x 3648, Pixel Size: 2.61 x 2.61 μm	۶	۱۰۵	۲۷۳۰۰۰	۱۶۵	۳/۲۲
	Model: FC6310 (8.8mm), Resolution: 5472 x 3648, Pixel Size: 2.41 x 2.41 μm	۹	۱۹۴	۲۸۴۰۰۰	۱۲۰	۲/۹۵
بلژیک	Model: NEX-5R (5.2mm), Resolution: 4912 x 3264, Pixel Size: 4.912 x 3.264	۷	۴۹	۴۶۵۰۰	۸۲	۲/۲۲
سوئیس	Model: Canon IXUS 220HS (4.3mm), Resolution: 4000 x 3000, Pixel Size: 1.55 x 1.55 μm	۱۱	۱۲۷	۶۱۶۰۰۰	۲۴۶	۷/۵۸

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 (۶) استفاده گردید.

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum (XSoft_i - Xsoft_j)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum (YSoft_i - Ysoft_j)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum (ZSoft_i - Zsoft_j)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$RMSE_{Random} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

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

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 میانگین ۱ را می‌توان از معادله (۱) و (۲) محاسبه کرد.

$$RMSE_{xyz} = \sqrt{\frac{\sum (XYZRe_i - XYZcheck_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE_{Check} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

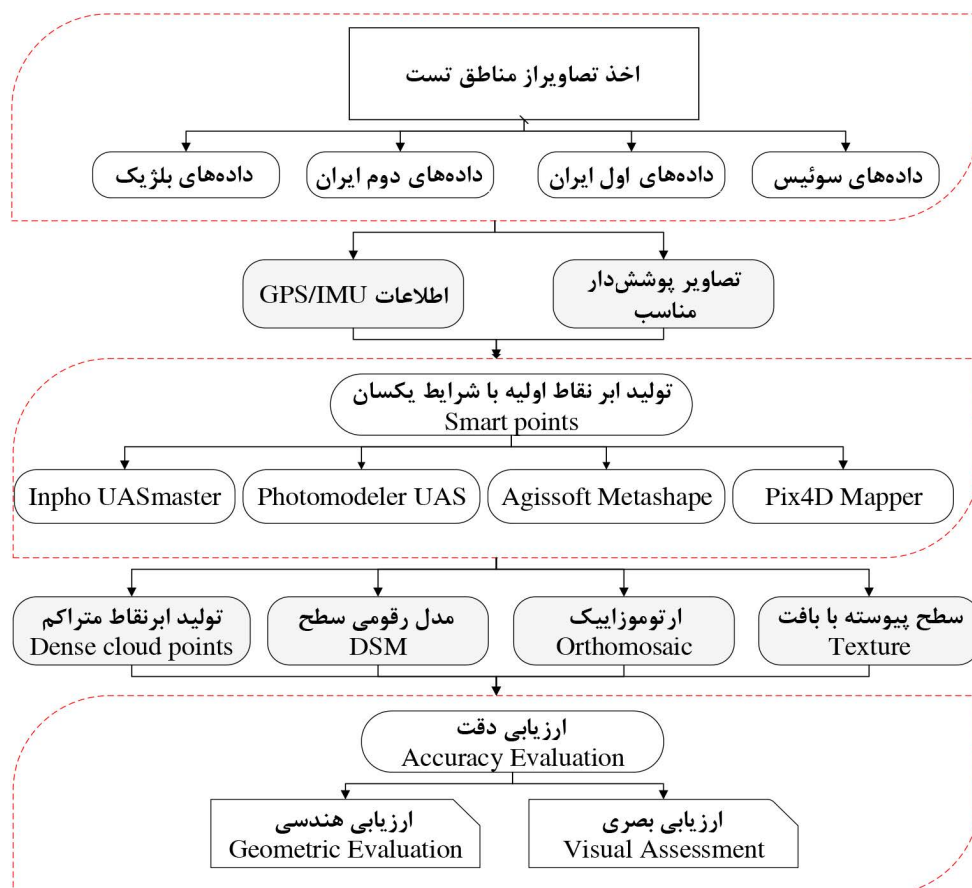
در این معادلات $RMSE_x$ و $RMSE_y$ و $RMSE_z$ به ترتیب مقدار خطای ریشه مربعی متوسط در جهت‌های مختصات X، Y و Z می‌باشد،

بالا و ارتوفتو مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج حاصل هم به صورت کمی و هم کیفی مورد ارزیابی و تجزیه-تحلیل قرار گرفت. در بررسی‌های کمی، 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 (به دلیل خروجی بصری مناسب نسبت به سایر نرم‌افزارها) به عنوان 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

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 به پادمبنا 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



نگاره ۲: مراحل روند اجرای این تحقیق

را برای افزایش تعداد نقاط بیشتر انجام می دهد. همچنین، در AgisMesh در هنگام تولید ابرنقاط متراکم، کاربر کیفیت خروجی را می تواند انتخاب کند که اینکار باعث می شود ابرنقاط تولیدی دارای دقت و کیفیت بهتری از لحاظ تراکم، گرافیک، رنگ داشته باشند و نقاط زمین و غیرزمین را با محاسبه شاخص ها (مثل شاخص گیاهی) و فیلترهای مختلف تشخیص داده و مدل رقومی سطح و مدل رقومی ارتفاعی را با کیفیت خوبی تولید می کند. نرم افزار UASMas از سرشکنی باندل و الگوریتم مثلث بندی Match-AT استفاده می کند و برخلاف AgisMesh پارامترهای ترفیع موقعیت عکس برداری را کاربر می تواند براحتی وارد کند و از حالت ترکیبی تصاویر هوایی، ماهواره ای و داده های لایدار می تواند استفاده کند. همچنین، از الگوریتم تناظریابی تطبیق تصویر چندپرتوی^۲ برای تولید نقاط متناظر استفاده می کند و از تکنیک هایی مانند فیلتر کردن نویز، مدل سازی لبه و تشخیص مرز برای به دست آوردن یک مدل سطح دقیق استفاده می کند. همچنین برای تولید ابرنقاط متراکم از الگوریتم تناظریابی SGM^۳ برای تولید مدل رقومی سطح زمین و مدل رقومی ارتفاعی بهره می برد. در PhUAS پارامترهای کالیبراسیون دوربین را بایستی به نرم افزار معرفی کرد، این نرم افزار از سلف کالیبراسیون استفاده نمی کند و از سرشکنی باندل حالت ترفیع تقاطع همزمان استفاده می کند و قادر نیست پارامترهای کالیبراسیون و پارامترهای اعوجاج عدسی را در پردازش تصاویر محاسبه نماید. توجهات و مثلث بندی در PhUAS حالت دستی و نیمه اتوماتیک دارد و لذا کاربر باید با تمام الگوریتم های فتوگرامتری و ماشین بینایی آشنا باشد. در Pix4D از الگوریتم های ساختار سه بعدی (SFM)^۴ یک صحنه از مجموعه ای از تصاویر دوبعدی استفاده می شود و بیشتر از الگوریتم های پردازش و مدل سازی ماشین بینایی استفاده می کند. همچنین از الگوریتم یادگیری ماشین برای طبقه بندی ابرنقاط متراکم بهره می برد.

یکنواخت انتخاب شدند تا عملکرد نرم افزارها 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 مدل سازی سه بعدی در شرایط همسان در نرم افزارها ایجاد گردید. همچنین، چون تولیدات نرم افزارها روی چهار سری داده مختلف خیلی زیاد بودند، در این تحقیق سعی گردید که تولیداتی که دارای اختلافاتی در خروجی نرم افزارها بودند، به عنوان نتایج این تحقیق منعکس گردد.

۳-۱- ارزیابی بصری نتایج

همه نرم افزارهای فتوگرامتری پهپادمبنا سعی دارند تولیدات آن ها و پارامتری ورودی و خروجی الگوریتم ها به صورت خودکار و اتوماتیک باشد، از این رو در اغلب آن ها کاربر نمی تواند نقش چندانی در تعیین پارامترها ایفا نماید. با این حال، دسترسی محدود به تعیین پارامترها ورودی و خروجی وجود دارد، زیرا نرم افزارهای فوق، نرم افزارهای منبع باز نیستند و از جزئیات الگوریتم آن ها اطلاعات کافی در دسترس نیست.

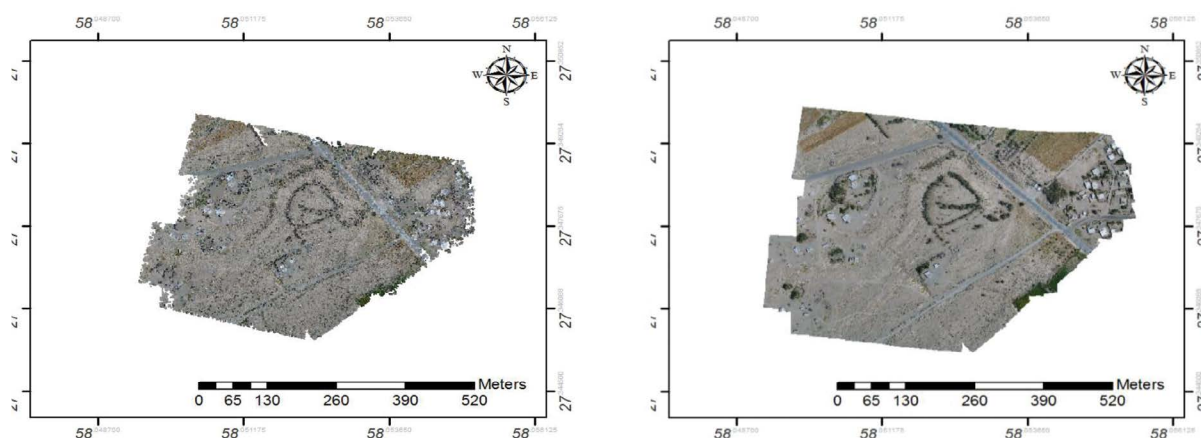
در AgisMesh پارامترهای ترفیع موقعیت هر دوربین به صورت اتوماتیک محاسبه می شود و اگر کاربر بخواهد در یک پروژه های این پارامترها را وارد کند امکان وارد کردن XYZ مرکز دوربین عکس برداری وجود دارد ولی نمی توان پارامترهای وضعیت را به سادگی در هر ایستگاه وارد کرد. لذا در این نرم افزار از الگوریتم سلف کالیبراسیون و سرشکنی باندل برای تعیین توأم پارامترهای ترفیع و تقاطع (مختصات زمینی)، پارامترهای اعوجاج عدسی استفاده می کند و برای تولید ابرنقاط متراکم از الگوریتم PMVS^۱ که شامل آشکارسازی عوارض با اپراتورهای مختلف، سپس الگوریتم تناظریابی مبتنی بر عوارض نقطه ای و خطی استفاده می کند و این عوارض را در هر تصویر تحت عنوان نقاط کلیدی پیدا کرده و سپس تناظریابی سایر نقاط

2- Multi-ray image matching

3- Semi-global matching (SGM)

4- Structure from Motion (SFM)

1- Patch-based Multi View Stereo



نگاره ۳: ابرنقاط تولید شده، الف) با AgisMesh، ب) PhUAS

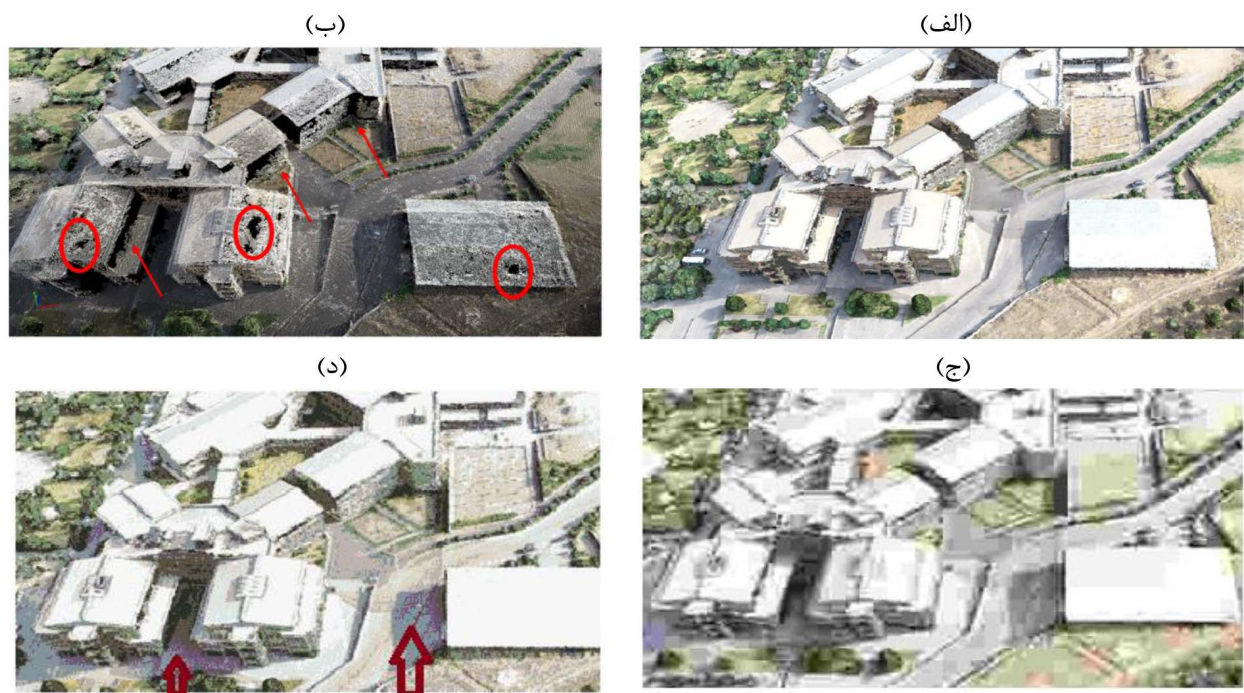
از نظر بصری تفاوت کیفیت ابرنقاط تولیدی دو نرم افزار مشهود است که در نگاره (۳) نشان داده شده است. علاوه بر این، نرم افزارهای Pix4D و UASmas در تولید ابرنقاط مترکم تفاوتی از نظر بصری با نرم افزار AgisMesh نداشتند. همچنین مقایسه ابرنقاط روی این داده ها و داده های دیگر که حاوی مناطق شهری زیاد بودند، مطابق نگاره (۴)، و اجزای ساختمانی دارای تصاویری با بافت یکنواختی بودند نظیر سقف ساختمان ها، انجام گرفت تا عملکرد نرم افزارها سنجیده شود، زیرا کارایی الگوریتم های مختلف تناظریابی نقاط متناظر، که در نرم افزارهای فتوگرامتری پهنادمنها به کار می رود در چنین سطوحی نتایج خود را بهتر نمایش می دهند.



نگاره ۴: قسمتی از داده های سری دوم ایران با بافت یکنواختی در سقف ساختمان ها

با تولید ابرنقاط این داده ها در نرم افزارها مورد تست، Pix4D در مقایسه با سایر نرم افزارها عملکرد خیلی ضعیفی داشت. این نرم افزار که در ابرنقاط مترکم

در مقایسه ابرنقاط مترکم، نرم افزارهای مورد بررسی، با مقایسه ابرنقاط روی داده های که حاوی مناطق شهری زیاد نبودند در خروجی ابرنقاط تفاوت محسوسی بین خروجی های UASmas، AgisMesh و Mapper Pix4D نبود. ولی در مناطق ساختمانی و شهری تفاوت ها بیشتر نمایان گردید. نرم افزار PhUAS بعد از تولید کردن هر بخش از روند کار خود نرم افزار به صورت فایل متنی دقت و صحت کار را به کاربر نمایش می دهد، که باید مدنظر داشت که این ویژگی برگرفته از نسخه برد کوتاه نرم افزار بوده که برای اندازه گیری های دقیق بر روی اجسام و مشاهده دقت آن ها نیز می باشد که در این نسخه هم از آن قابلیت استفاده شده است. همچنین در تولید ابرنقاط مترکم، این امکان را به کاربر می دهد که تمامی تولیدات را در ابعاد و اندازه های دلخواه خروجی گرفته و سپس نقاط کنترل معرفی نماید. در حالی که در AgisMesh هنگام خروجی گرفتن از تولیدات مختلف نرم افزار مانند مدل رقومی زمین و غیره، اگر نقاط کنترل معرفی نشوند و یا منطقه مورد نظرم به ابعاد و اندازه واقعی تعریف نشود نرم افزار قادر به خروجی گرفتن نخواهد بود. همچنین، در AgisMesh در هنگام تولید ابرنقاط مترکم، کاربر کیفیت خروجی را می تواند 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 نرم افزار PhUAS چنین امکانی تعبیه نشده است، لذا



نگاره ۵: ابرنقاط در سطوح با بافت یکسان، (الف) با AgisMesh (ب) با Pix4D (ج) PhUAS (د) UASmas

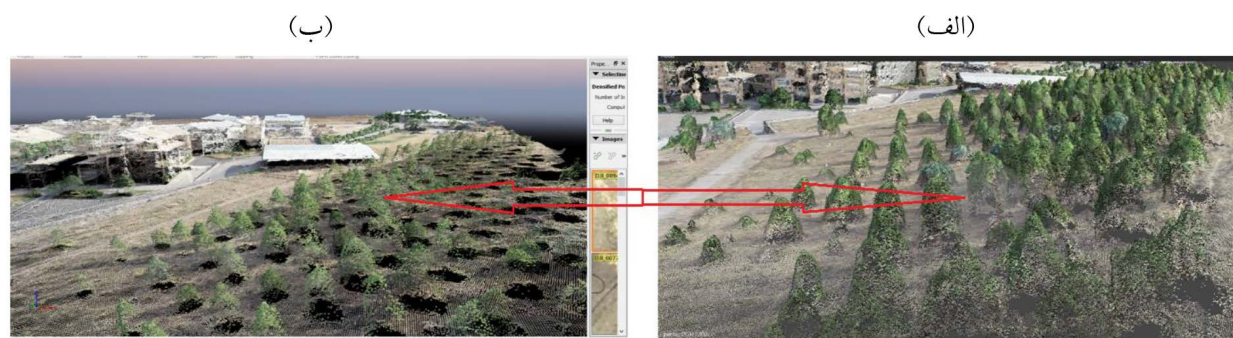
به همین دلیل است که احتمالاً در بافت‌های یکنواخت و همگن نتایج معیوب یا در صحنه‌های پیچیده نتیجه رضایت بخشی حاصل نمی‌گردد. در مقابل، سایر نرم‌افزارها عملکرد مناسبی در این سطوح داشتند. در حالی که در سایر بافت‌های طبیعی مثل پوشش گیاهی، درختان، زمین‌های بایر که از بافت‌های گوناگون برخوردارند عملکرد و کارایی 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 (۶) نشان داده شده است.

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

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 مترکم، 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.



نگاره ۶: 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

را حذف کند، مثلاً با معرفی کردن رنگ عوارض مصنوعی به نرم افزار، می توان 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 پوشش های گیاهی کاربرد فراوانی دارد، یا در روش دیگری بر اساس اختلاف ارتفاع انجام شده با معرفی کردن فاصله و زاویه شیب می توان 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 می کند. به عبارتی، در این نرم افزارها قابلیت طبقه بندی، فیلترگذاری و استفاده از روش های باثبات

عملکرد بصری مشابه داشتند و باز Pix4D عملکرد ضعیفی داشته و در مکان هایی که سایه وجود دارد در تناظریابی با مشکلاتی مواجه هست. در نگاره (۷) نمونه ای از خروجی AgisMesh و Pix4D در مناطقی حاوی درختان نشان داده شده است. در تولید مدل رقومی سطح^۱ و مدل رقومی ارتفاعی^۲ در نرم افزارهای مورد مقایسه، یکی از قابلیت های حائز اهمیت در نرم افزار UASmas و AgisMesh قابلیت فیلترگذاری بر روی ابرنقاط متراکم هست، که با استفاده از این امر کاربر می تواند پوشش های گیاهی ضعیف و بزرگ هر منطقه و همچنین عوارض مصنوعی بر روی سطح زمین

1- DSM

2- DEM

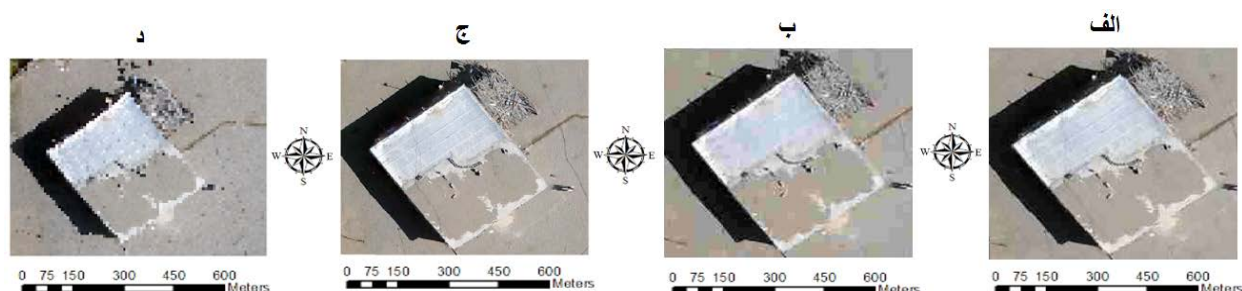
انترپلاسیون ابرنقاط روی زمین و غیرزمین (ساختمان‌ها، درختان، پوشش گیاهی، خطوط انتقال نیرو و ...) وجود دارد که به طور تقریباً اتوماتیک امکان تولید مدل رقومی ارتفاعی زمین وجود دارد. همچنین در UASmas ابزارهای مشابه فتوگرامتری سنتی فراهم گردیده است، مثلاً نقاط کنترل زمینی را می‌توان از یک فایل با فرمت ساده متنی فراخوانی کرد. کاربر در تولید ابرنقاط و مدل‌های سه بعدی، کنترل کامل پردازش را در اختیار دارد که از مزیت‌های این نرم افزار است. در مقابل رابط کاربری کاربرپسند ندارد و دارای یک رابط بسیار سخت و گیج کننده‌ای است که بایستی کاربر از جزئیات فنی هواپیماهای بدون سرنشین و دوربین‌های عکس برداری، آگاهی کامل داشته باشند و همچنین این نرم افزار نیاز به فایل پارامترهای دوربین دارد و قادر نیست آن را از روی اطلاعات خود تصاویر^۱ بخواند. که از محدودیت‌های اصلی این نرم افزار است. علاوه بر آن، پردازش با استفاده از تنظیمات پیش فرض این نرم افزار امکان پذیر 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 به صورت اتوماتیک همانند نرم افزارهای AgisMesh و UASmas وجود ندارد و ویرایش ارتفاعی ابرنقاط می‌تواند به صورت 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 نرم افزار Pix4D با اینکه امکان ویرایش دستی نتایج پردازش توسط کاربر را به صورت محدود فراهم می‌کند، لذا امکان به وجود آوردن یک مدل رقومی ارتفاعی با کیفیت امکان پذیر نیست. تولید ارتوفتو با بافت واقعی نیز در نرم افزارهای مورد تست، به صورت بصری مورد بررسی قرار گرفت. در سه نرم افزار

انترپلاسیون ابرنقاط روی زمین و غیرزمین (ساختمان‌ها، درختان، پوشش گیاهی، خطوط انتقال نیرو و ...) وجود دارد که به طور 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 سه بعدی، کنترل کامل پردازش را در اختیار دارد که از مزیت‌های این نرم افزار است. در مقابل رابط کاربری کاربرپسند ندارد و دارای یک رابط بسیار سخت و گیج کننده‌ای است که بایستی کاربر از جزئیات فنی هواپیماهای بدون سرنشین و دوربین‌های عکس برداری، آگاهی کامل داشته باشند و همچنین این نرم افزار نیاز به فایل پارامترهای دوربین دارد و قادر نیست آن را از روی اطلاعات خود تصاویر^۱ بخواند. که از محدودیت‌های اصلی این نرم افزار است. علاوه بر آن، پردازش با استفاده از تنظیمات پیش فرض این نرم افزار امکان پذیر 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 به صورت اتوماتیک همانند نرم افزارهای AgisMesh و UASmas وجود ندارد و ویرایش ارتفاعی ابرنقاط می‌تواند به صورت 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 نرم افزار Pix4D با اینکه امکان ویرایش دستی نتایج پردازش توسط کاربر را به صورت محدود فراهم می‌کند، لذا امکان به وجود آوردن یک مدل رقومی ارتفاعی با کیفیت امکان پذیر نیست. تولید ارتوفتو با بافت واقعی نیز در نرم افزارهای مورد تست، به صورت بصری مورد بررسی قرار گرفت. در سه نرم افزار

بصری تقریباً یکسان بود با جزئی تفاوت در لبه ساختمان‌ها که Agisoft نسبت به دو نرم افزار دیگر عملکرد خوبی نداشت. در تولید ارتوفتو نیز در برخی ساختمان‌ها با بافت ضعیف، نرم افزار PhUAS عملکردی خوبی نداشت نمونه از خروجی ارتوفتو در یک ساختمان کوچک در نگاره (۸) نشان داده شده است.

با اینکه در سه نرم افزار مورد تست بجز PhUAS عملکرد یکسان داشتند ولی در مناطق ساختمانی بجز Pix4D بقیه نرم افزارها 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 صاف تر از دو نرم افزار 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 نرم افزارهای 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 نرم افزارهای مورد تست، نشان داد که انواع مختلف پوشش زمین مانند دیوارها، تپه‌ها و درختان، تفاوت کیفیت قابل توجهی را در بازسازی نهایی مدل سه بعدی بجز نرم افزار PhUAS نشان نمی‌دهد. برای همه نرم افزارها، به دلیل منابع مختلف خطا در فرآیند تناظریابی و الگوریتم‌های انترپلاسیون مختلف، مناطق گپ در سطوح با بافت یکنواخت در نرم افزار Pix4D ایجاد می‌شوند ولی کیفیت بازسازی سه بعدی ارتوفتوی آن در لبه ساختمان‌ها عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. همچنین به دلیل مناطق پنهان و سایه در اطراف درختان



نگاره ۸: 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

فتوگرامتری پهپادمبنا با حداقل نقطه کنترل بوده که در داده‌های مربوط به سوئیس، بلژیک، داده‌های سری اول ایران و دوم ایران به ترتیب از ۵، ۴، ۴ 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 (۱۴) 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

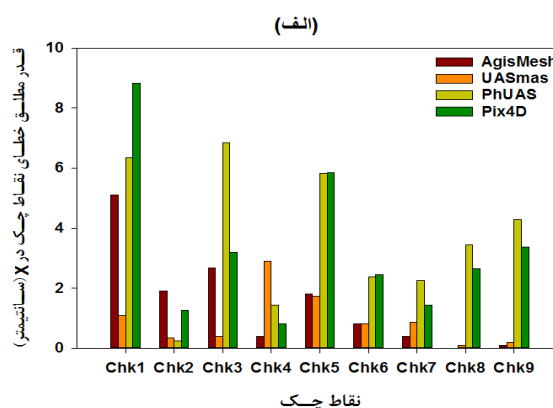
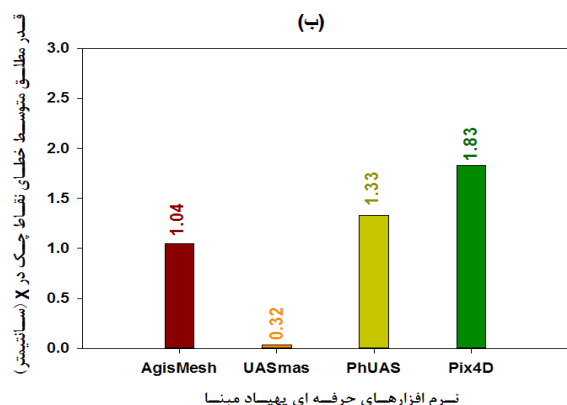
و خطای عدم تطابق در مناطق گیاهی و همچنین سایه در گوشه دیوارها، در ابرنقاط ایجاد شده شکاف وجود دارد که این شکاف در AgisMesh حداقل مقدار است و آن شاید قابلیت‌های زیاد الگوریتم‌های فیلتر کردن در آن نرم‌افزار باشد که در سایر نرم‌افزارها محدود است. همچنین به دلیل نامناسب بودن زاویه دید تصاویر برای همه نرم‌افزارها،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

۳-۲- ارزیابی نتایج به‌صورت کمی

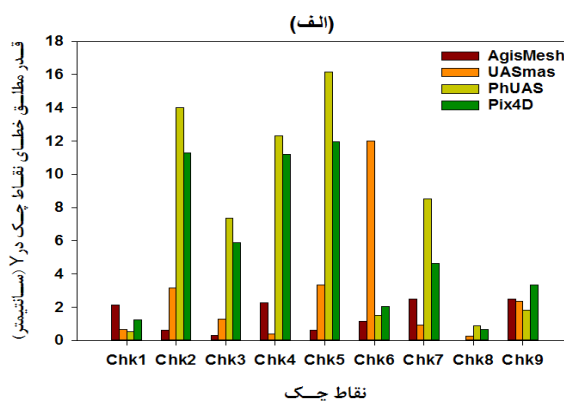
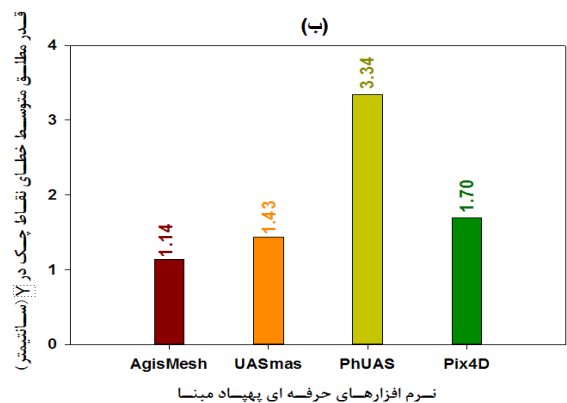
در این بخش، هدف بررسی و ارزیابی نتایج به‌صورت کمی و دقت هندسی تولیدات در چهار نرم‌افزار تخصصی

سانتی متر در PhUAS، AgisMesh، UASmas، Pix4D و حاصل گردید. که دو نرم افزار AgisMesh و UASmas دارای دقت یکسان می باشند که تفاوت خطای کمتر از ۲ میلی متر تفاوت محسوسی نبوده و این دو نرم افزار هم از لحاظ بصری و هم نتایج کمی، دقت حاصل از نقاط چک دارای عملکرد همسانی می باشند. به دلیل اینکه نتایج بصری AgisMesh نسبت به سایر نرم افزارهای مورد تست، مطلوب و مناسب بود، لذا ارزیابی نتایج کمی همه نرم افزارها نسبت به AgisMesh سنجیده شده است. ابتدا نرم افزار UASmas بررسی گردیده و نتایج خطای نقاط تصادفی در مناطق مسکونی و ساختمان ها، به صورت اختلاف مختصات بین UASmas و Agisoft و خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات در نگاره های (۱۵) الف و ب نشان داده شده است.

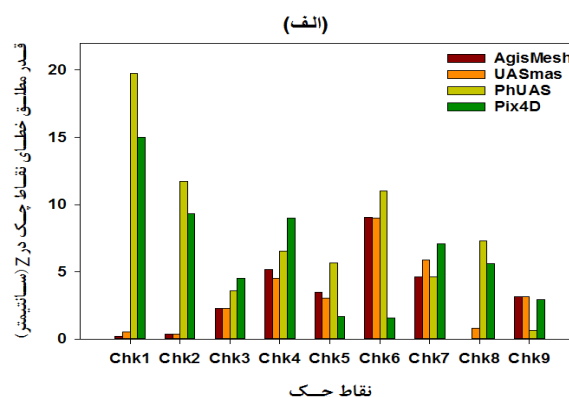
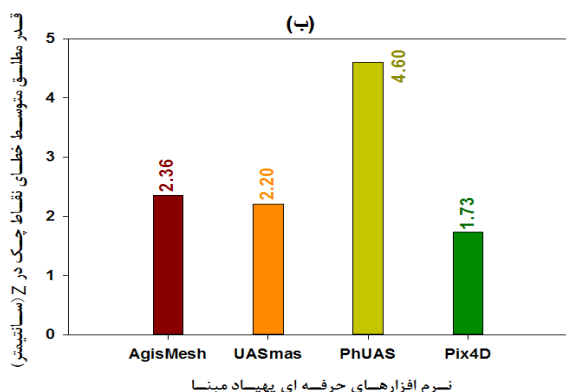
در داده های مورد استفاده در سه کلاس متفاوت، کلاس اول مربوط به مناطق مسکونی، کلاس دوم در مناطق بایر که تغییرات ارتفاعی ناچیزی داشته اند و کلاس سوم در مناطق پوشش گیاهی شامل گیاهان، محصولات کشاورزی و درختان انتخاب شدند، در مجموع در هر کلاس پانزده نقطه و مجموعاً ۴۵ نقطه، به صورت تصادفی انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفتند. با ارزیابی نقاط چک حاصل از مجموعه داده های مورد تست در این تحقیق، همانطور که در نگاره های ۱۱ تا ۱۴ مشاهده می گردد، 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 نرم افزارهای می باشد. به طوری کلی نتایج نقاط چک نشان داد که خطای ریشه مربعی متوسط به ترتیب ۲/۸۲، ۲/۶۳، ۵/۸۴ و ۳/۰۳



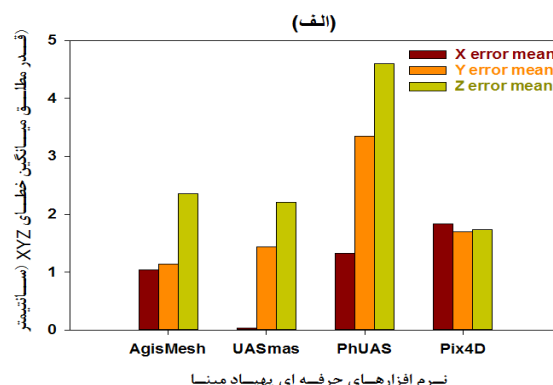
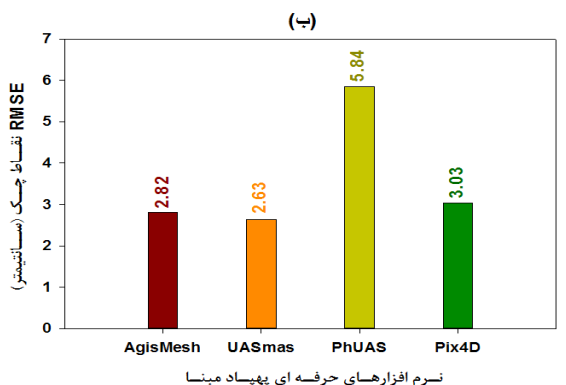
نگاره ۱۱: خطای نقاط چک در جهت مختصات X، الف) خطای هر نقطه چک، ب) متوسط خطای مطلق کل نقاط چک



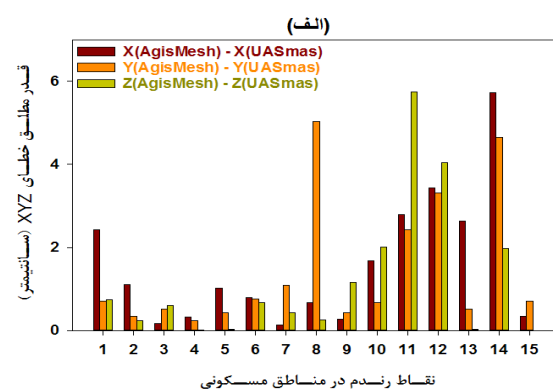
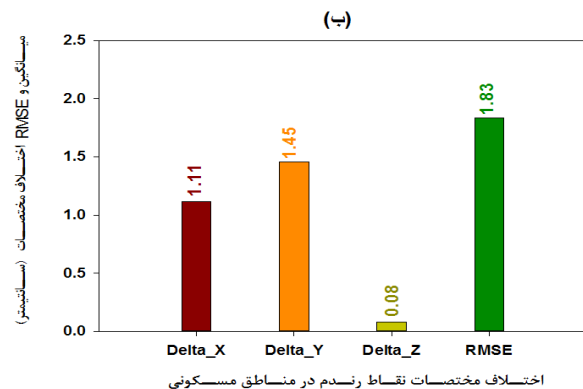
نگاره ۱۲: خطای نقاط چک در جهت مختصات Y، الف) خطای هر نقطه چک، ب) متوسط خطای مطلق کل نقاط چک



نگاره ۱۳: خطای نقاط چک در جهت مختصات Z، الف) خطای هر نقطه، ب) متوسط خطای مطلق کل نقاط چک



نگاره ۱۴: متوسط خطا مؤلفه‌های مختصات و خطای نقاط چک، الف) متوسط خطا، ب) خطای ریشه مربعی متوسط



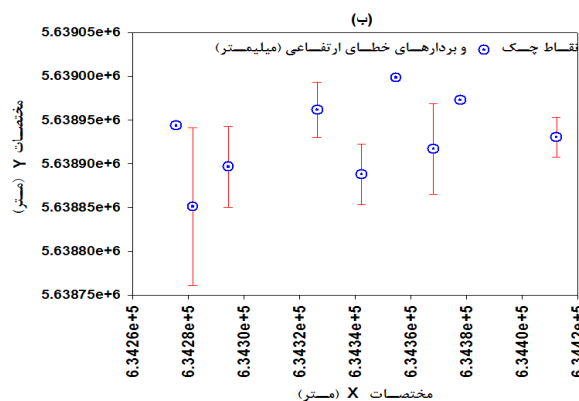
نگاره ۱۵: خطای نقاط تصادفی در مناطق مسکونی و ساختمان‌ها، الف) اختلاف مختصات بین UASmas و Agisoft، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

همچنین در این مرحله برای بررسی و ارزیابی توزیع نقاط کنترل و بردارهای خطای مسطحاتی و ارتفاعی در نقاط چک، نگاره‌های (۱۶) 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 مسکونی و ساختمان‌ها، به صورت اختلاف مختصات بین UASmas و Agisoft 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

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (پژوهش)

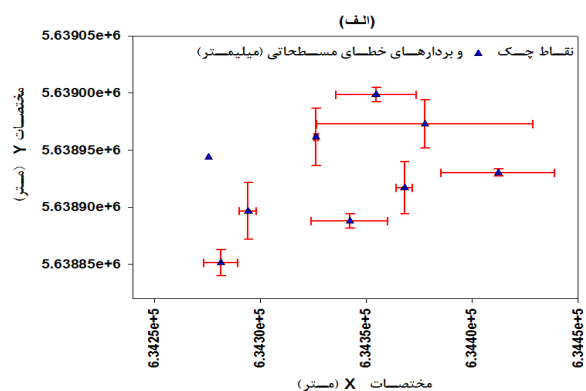
آنالیز و مقایسه دقت تولیدات نرم افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپاد مینا و ... / ۷۹

بالاترین دقت، مناطق مسکونی ۱/۸۳ سانتی متر و مناطق فضای سبز بالاترین خطا و کمترین دقت، ۲/۷۴ سانتی متر 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 نگاره های ۱۸ تا ۲۰ نشان داده شده است.

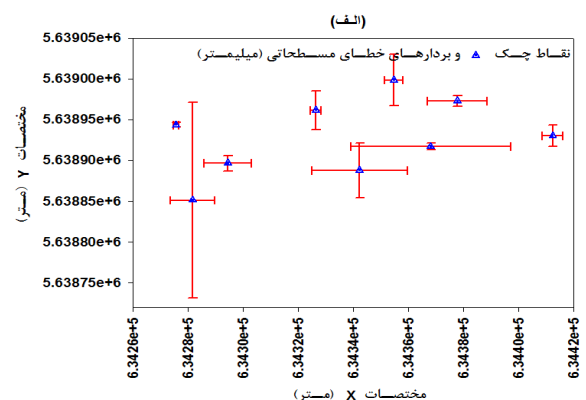
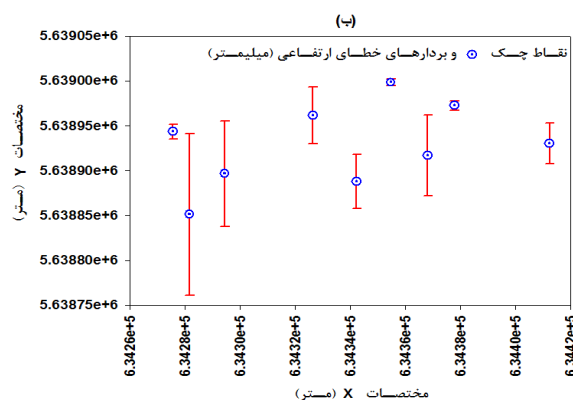


گیاهی و درختان، به صورت اختلاف مختصات بین Agisoft UASmas و خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات در نگاره های (۲۱) الف و ب نشان داده شده است.

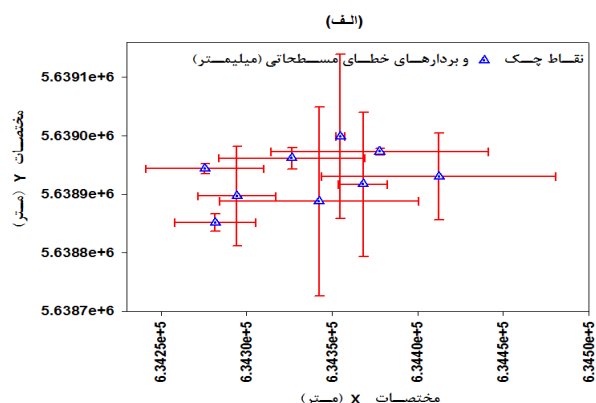
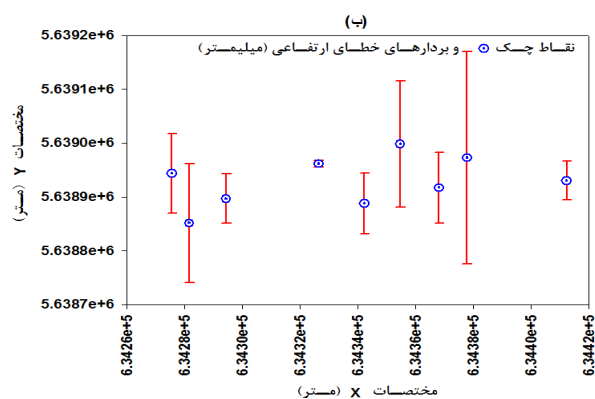
نتایج بررسی نقاط چک، نشان می دهد که خطای ریشه مربعی متوسط حاصل در مناطق بایر ۱/۲۰ سانتی متر



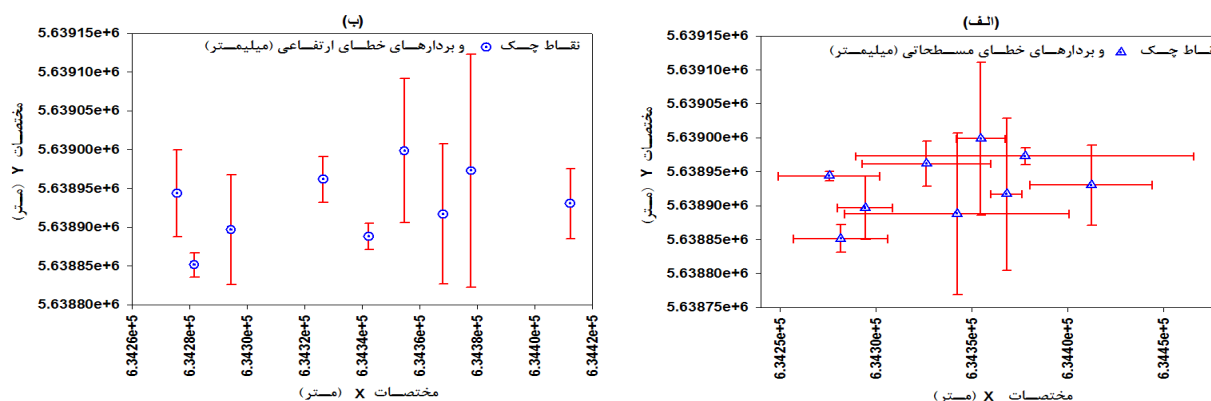
نگاره ۱۶: بردارهای خطای AgisMesh در نقاط چک، (الف) خطای مسطحانی، (ب) خطای ارتفاعی



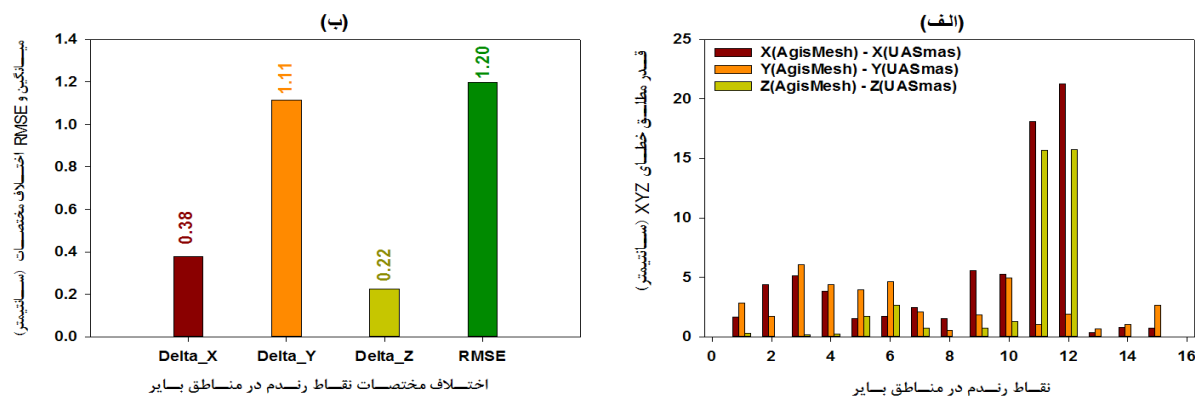
نگاره ۱۷: بردارهای خطای UASmas در نقاط چک، (الف) خطای مسطحانی، (ب) خطای ارتفاعی



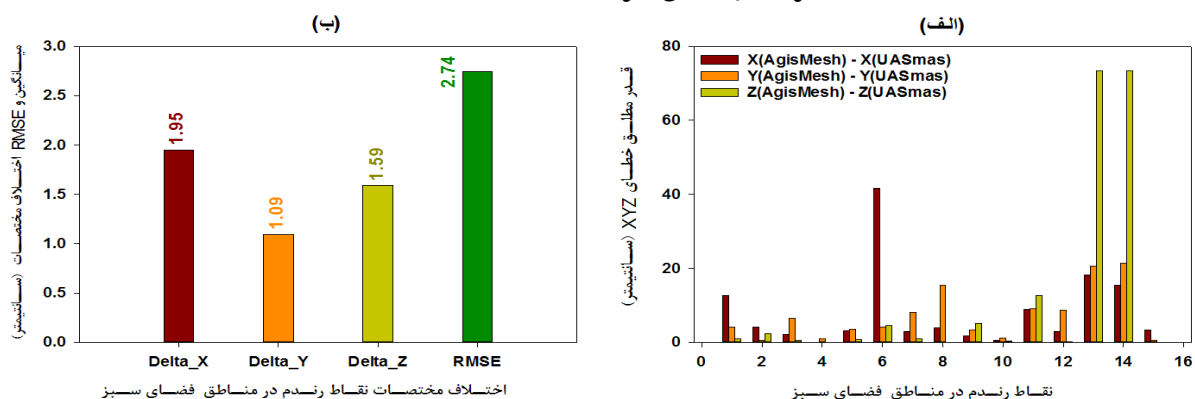
نگاره ۱۸: بردارهای خطای PhUAS در نقاط چک، (الف) خطای مسطحانی، (ب) خطای ارتفاعی



نگاره‌های ۱۹: بردارهای خطای Pix4D در نقاط چک، الف) خطای مسطحانی، ب) خطای ارتفاعی

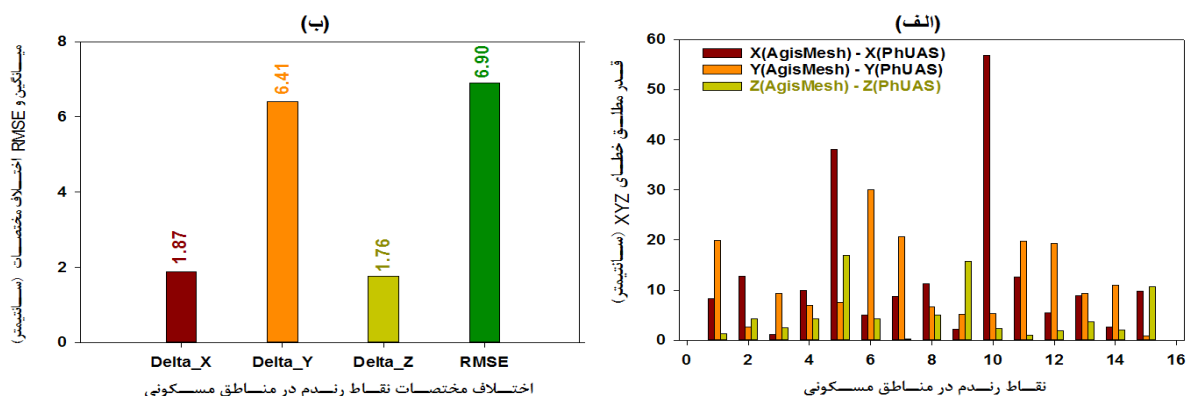


نگاره ۲۰: خطای نقاط تصادفی در مناطق بایر، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و UASmas، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات



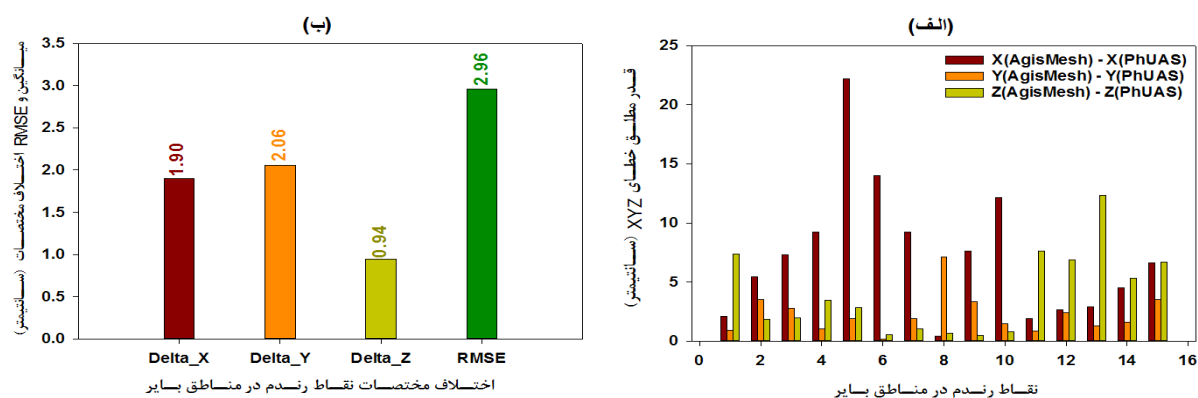
نگاره ۲۱: خطای نقاط تصادفی در مناطق فضای سبز، الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و UASmas، ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

نتایج نگاره‌های ۲۲ تا ۲۴ نشان می‌دهد که خطای ریشه مربعی متوسط حاصل در مناطق بایر ۲/۹۶ سانتی متر بالاترین دقت، مناطق مسکونی ۶/۹۰ سانتی متر و مناطق فضای سبز بالاترین خطا و کمترین دقت، ۷/۲۴ سانتی متر 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.



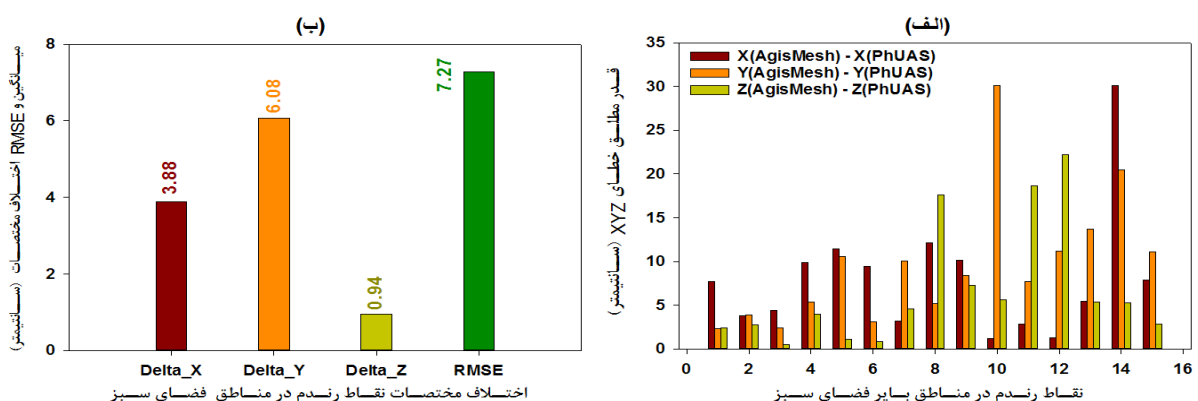
نگاره ۲۲: خطای نقاط تصادفی در مناطق مسکونی و ساختمان‌ها، الف) اختلاف مختصات بین PhUAS و Agissoft،

ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات



نگاره ۲۳: خطای نقاط تصادفی در مناطق باير، الف) اختلاف مختصات بین PhUAS و Agissoft، ب) خطای ریشه مربعی

متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

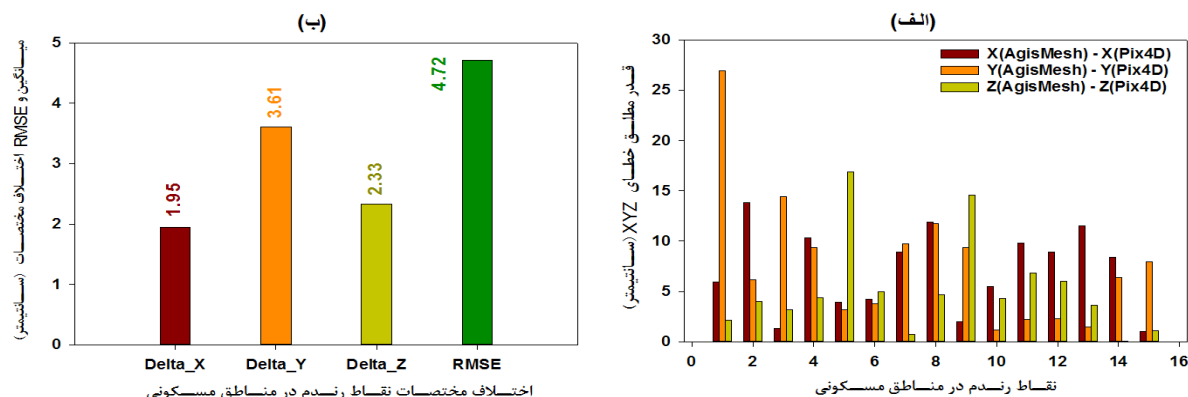


نگاره ۲۴: خطای نقاط تصادفی در مناطق فضای سبز، الف) اختلاف مختصات بین PhUAS و Agissoft، ب) خطای ریشه

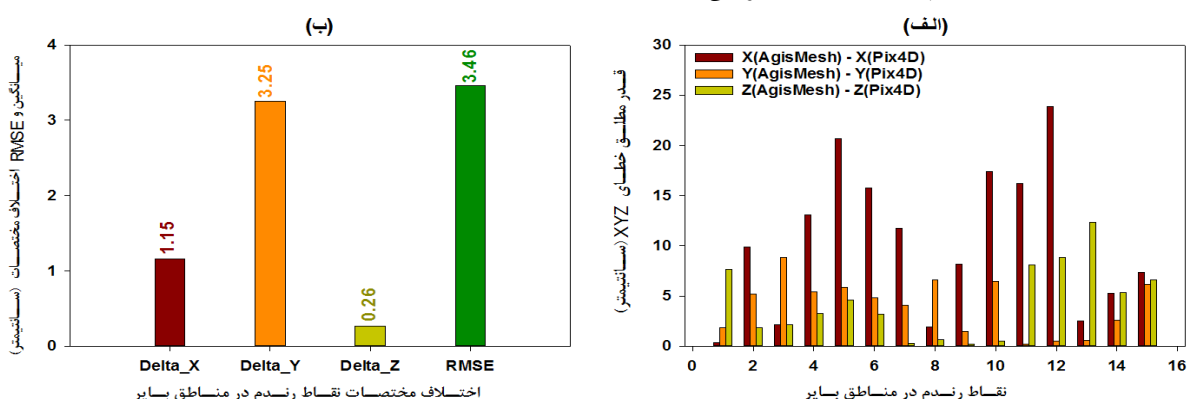
مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

نتایج نگاره‌های ۲۵ تا ۲۷ نشان می‌دهد که خطای ریشه مربعی متوسط حاصل در مناطق باير ۳/۴۶ سانتی‌متر بالاترین دقت، مناطق مسکونی ۴/۷۲ 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، ۲/۶۳، ۵/۲۸ و ۳/۰۳ سانتی‌متر در AgisMesh،

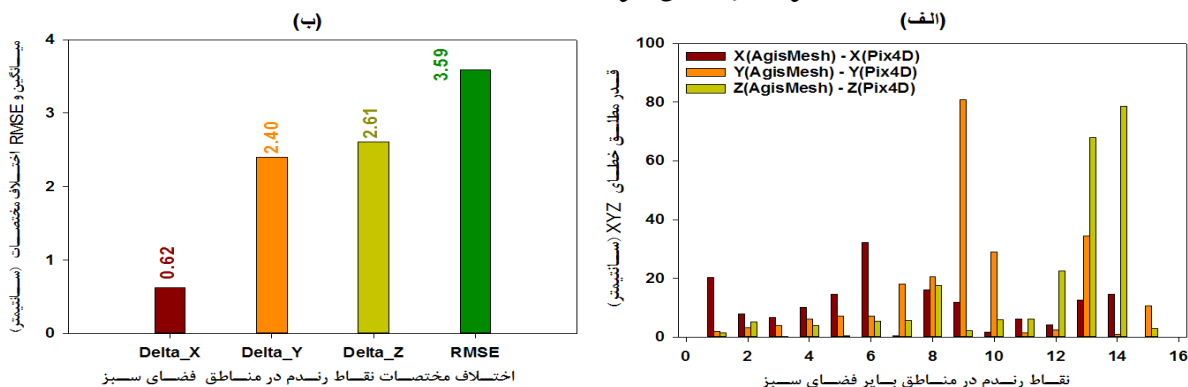
PhUAS، Pix4D و UASmas حاصل گردید. علاوه بر آن، ترتیب دارای دقت‌های ۱/۸۳، ۱/۲۰ و ۲/۷۴ سانتی‌متر، نتایج کمی با انتخاب نقاط تصادفی در سه منطقه ساختمانی، مناطق بایر و فضای سبز با در نظر گرفتن خطای ریشه مربعی متوسط به صورت نسبی نشان داد که UASmas به نسبت به AgisMesh داشتند. PhUAS دارای دقت‌های ۶/۹۰، ۲/۹۶ و ۷/۲۴ سانتی‌متر، Pix4D دارای دقت‌های ۴/۷۲، ۳/۴۶ و ۳/۵۹ سانتی‌متر



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



نگاره ۲۶: خطای نقاط تصادفی در مناطق بایر، (الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و Pix4D، (ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات



نگاره ۲۷: خطای نقاط تصادفی در مناطق فضای سبز، (الف) اختلاف مختصات بین Agisoft و Pix4D، (ب) خطای ریشه مربعی متوسط و خطای متوسط اختلاف مختصات

جدول ۲: 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 تصادفی	نقاط تصادفی انتخابی در مناطق مختلف			
		فضای سبز	آب	مسکونی	خطای نسبتی
AgisMesh	۳/۵۱	۲/۷۴	۱/۲۰	۱/۸۳	۲/۸۲
Inpho UASmaster					۲/۶۳
Photomodeler UAS	۱۰/۴۵	۷/۲۷	۲/۹۶	۶/۹۰	۵/۸۴
Pix4D Mapper	۶/۸۷	۳/۵۹	۳/۴۶	۴/۷۲	۳/۰۳

جدول ۳: زمان پردازش و تعداد ابرنقاط متراکم (در بالاترین کیفیت هر نرم افزار) در نرم افزارهای مورد تست

نرم افزار	منطقه	تعداد عکس	تعداد ابرنقاط متراکم	زمان پردازش (ساعت)
AgisMesh	سوئیس	۱۲۷	۳۷۲۲۳۴۷۱	۶/۲۲
Pix4D			۳۱۶۳۹۹۵۰	۵/۲۸
PhUAS			۱۰۵۷۹۸۳۵	۲/۵۸
UASmas			۳۱۴۹۱۰۵۶۶	۵/۱۲
AgisMesh	تفرش	۱۹۴	۵۵۸۳۵۲۰۶	۱۰/۴۰
Pix4D			۴۸۵۷۶۶۲۹	۸/۲۸
PhUAS			۱۶۹۲۷۷۳۶	۳/۳۴
UASmas			۴۹۰۷۹۱۴۶	۷/۵۰

همچنین، برای ارزیابی کارایی و سرعت نرم افزارها در تولید محصولات مختلف، نتایج زمان پردازش در دو سری از داده های در یک سیستم پردازش شده بودند، در جدول (۳) نشان داده شده اند. بدیهی است زمان پردازش، علاوه بر سخت افزار سیستم پردازشگر، به عوارض موجود در منطقه تست بستگی دارد، هر چه بافت متفاوت در تصاویر موجود باشد تعداد نقاط متناظر بیشتری توسط الگوریتم های تناظریابی یافت می گردد. به دلیل اینکه فقط دو سری از داده های در یک سیستم پردازش شده بودند و دو سری دیگر از داده ها در دو سیستم مختلف از نظر سخت افزاری اجرا شده بودند، قابل مقایسه نبودند، لذا جدول (۳) زمان

۴- نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان دهنده دقت، توانایی و کارایی نرم افزاری تخصصی فتوگرامتری پهپادمبنا برای بازسازی سه بعدی تولیدات مختلف با استفاده از تصاویر هوایی با وضوح بالا در سطوح مختلف زمین با ویژگی های متفاوت بود. بررسی و مقایسه جامع نرم افزارهای تخصصی فتوگرامتری پهپاد مبنا با حداقل نقاط کنترل زمینی، برای اولین

اتوماتیک بودن نرم افزار خود را دارند ولی در این تحقیق، خروجی مناطق با بافت یکنواخت در Pix4D خلاف آن را نشان داد که مداخله کاربر در مراحل پردازش جزء مزایای نرم افزار می باشد. در Pix4D امکان ویرایش دستی نتایج پردازش به صورت محدود توسط کاربر را فراهم می کند و کاربر تأثیر محدودی در پردازش دارد. به همین دلیل است که نتایج رضایت بخشی در مناطق با بافت یکسان به دست نمی آید 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، نرم افزار PhUAS عملکرد ضعیفی هم از لحاظ بصری و هم لحاظ هندسی نسبت به سه نرم افزار دیگر داشت. در PhUAS پارامترها یا حد آستانه های مختلف در مراحل پردازش نیازمند است که کاربر وارد کند، لذا بایستی کاربر از جزئیات الگوریتم های فتوگرامتری و ماشین بینایی اطلاع کافی داشته باشد که کیفیت خروجی نرم افزار، 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 بررسی های کمی، ابتدا با استفاده از نقاط چک که در محاسبات دخالت داده نشده بودند، تولیدات مختلف این نرم افزارها 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 $۳/۰۳$ سانتی متر در AgisMesh، UASmas، Pix4D و PhUAS حاصل گردید. علاوه بر آن، نتایج کمی حاصل با انتخاب نقاط تصادفی در سه منطقه ساختمانی، مناطق بایر و فضای سبز با در نظر گرفتن خطای ریشه مربعی متوسط به صورت نسبی نشان داد که در UASmas به ترتیب دارای دقت های $۱/۸۳$ ، $۱/۲۰$ و $۲/۷۴$ سانتی متر، PhUAS

بار به صورت یکجا مورد بررسی قرار گرفته و به صورت بصری، کمی و ساختاری ارزیابی و مقایسه گردیده است. در این ارزیابی، از معیارهای مختلف بصری و هندسی برای اندازه گیری کیفیت و دقت ابرنقاط و انواع مدل های رقومی سطوح تولید شده، استفاده گردید. نرم افزاری تخصصی فتوگرامتری پهنادامنا شامل UASmas، PhUAS، AgisMesh و Pix4D، بر روی چهار سری داده های مختلف با ویژگی های متفاوت سطح زمین مورد ارزیابی قرار گرفتند. دو سری از داده ها مربوط به ایران و دو سری دیگر مربوط به سایر کشورها در مناطق شهری و غیرشهری بوده است. داده ها 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 نرم افزارها به صورت کمی و کیفی مورد ارزیابی و تجزیه تحلیل قرار گرفته است. تا مشخص گردد در کدام مناطق با عوارض مختلف و برای اهداف مختلف کدام نرم افزار مناسب است.

در ارزیابی عمومی و بصری نرم افزارها، از لحاظ رابط کاربری، مدت زمان پردازش و غیره هر کدام از نرم افزارهای 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، نرم افزار UASmas علیرغم اینکه رابط کاربری بسیار سختی دارد و بایستی تمامی پارامترهای دوربین را وارد کرد که یکی از محدودیت های این نرم افزار است. ولی نتایج بصری و مشابه AgisMesh دارد. در کل، نتایج بصری نشان داد که نرم افزار AgisMesh و UASmas در مدل سازی سه بعدی انواع سطوح در همه مناطق تست، عملکرد بهتری دارد ولی AgisMesh در بازسازی لبه های ساختمان ها 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 لبه های مناطق ساختمانی، قوی عمل می کند دو نرم افزار دیگر از نظر بصری حالت بینابینی بین این دو نرم افزار دارند. با اینکه شرکت های اغلب این نرم افزارها ادعای تمام

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*

دارای دقت‌های ۶/۹۰، ۲/۹۶ و ۷/۲۴ سانتی‌متر، Pix4D دارای دقت‌های ۴/۷۲، ۳/۴۶ و ۳/۵۹ سانتی‌متر نسبت به AgisMesh داشتند. با در نظر گرفتن 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 'G10 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/ifer2986-012>.

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., &

- 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>.

