

# مدل سازی باقیمانده‌های عکسی حاصل از مثلث بندی هوایی شبکه تصاویر فتوگرامتری پهپاد و ارزیابی آن

ابوالفضل شریفی<sup>۱</sup>

محمد سعادت سرشت<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۴

\*\*\*\*\*

## چکیده

کالیبراسیون دوربین رکن مهم هر پروژه فتوگرامتری است. تاکنون مدل‌های اعوجاج متعددی برای کالیبراسیون دوربین متریک به کار گرفته شده است مانند مدل براون که حداکثر ۱۲ پارامتر شامل فاصله اصلی، مختصات نقطه اصلی، اعوجاج فیزیکی عکسی شامل اعوجاجات شعاعی، اعوجاجات مماسی و ... را در یک فرآیند سرشکنی باندل، به صورت خودکالیبراسیون برآورد می‌نماید. این راهکار کماکان برای دوربین‌های ناپایدار و غیرمتریک در فتوگرامتری پهپاد نیز به کار گرفته شده که اگرچه باعث بهبود معنی داری در مختصات سه بعدی شی‌ای می‌شود اما هنوز اعوجاجاتی به واسطه ناپایداری هندسی دوربین در مختصات عکسی باقی می‌ماند. این اعوجاجات باقیمانده، منجر به پارالاکس و ایجاد پله ارتفاعی بین مدل‌های سه بعدی در برجسته-بینی می‌شود. در این مقاله یک روش پس پردازش برای کاهش اعوجاجات باقیمانده عکسی بعد از خودکالیبراسیون دوربین غیرمتریک در پروژه‌های فتوگرامتری پهپاد مطرح می‌گردد. روش ارائه شده مدل سازی باقیمانده‌های عکس به کمک یک روش اجزاء محدود است. داده‌های استفاده شده در این تحقیق تصاویر پهپاد فتوگرامتری اخذ شده توسط دوربین‌های ILCE\_7RM2، FC300S، FC6310 است. پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی در محیط برنامه نویسی Matlab انجام شده و از نرم افزار متاشیپ<sup>۳</sup> نیز برای پردازش اولیه استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده روی چند داده فتوگرامتری پهپاد با مشخصات و مقیاس‌های متفاوت بیانگر کاهش باقیمانده‌های عکسی تا ۷۰ درصد در پس از مدل سازی و تصحیح اعوجاجات روی تصاویر است. همچنین با انجام برجسته‌بینی سه بعدی روی تصاویر تصحیح یافته، شاهد کاهش ۶۰ درصدی پله بین مدل‌های استریو هستیم که منجر به کیفیت هندسی بالاتر تهیه مدل رقومی ارتفاعی، ارتوفتو و تهی نقشه با برجسته‌بینی سه بعدی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کالیبراسیون دوربین، دوربین غیرمتریک، ناپایداری دوربین، مدل دینامیکی اعوجاجات دوربین، پله بین مدل‌ها

\*\*\*\*\*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) abolfazl.sharifi@ut.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده سیستم اطلاعات مکانی و نقشه برداری دانشگاه تهران msaadat@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت فناوری پهپادها به عنوان سکوی برداشت داده مکانی، روش فتوگرامتری پهپاد با هدف تهیه نقشه بیش از پیش رواج پیدا کرده است. از مزایای این روش می توان به مقرون به صرفه بودن، تسریع در روند انجام پروژه، حد تفکیک بالای داده های مکانی مورد برداشت و تولید محصولات مکانی مختلف نظیر ارتوفتوموزائیک، مدل رقومی سطح و زمین، مدل سه بعدی بافت دار و نقشه سه بعدی اشاره کرد.

آنچه در یک پروژه فتوگرامتری پهپاد از لحاظ شاخص کیفیت اهمیت دارد گذشته از طراحی شبکه، دوربین و کالیبراسیون دقیق آن است. دوربین های متریک هندسه مستحکمی دارند و پارامترهای کالیبراسیون آنها کوچک، معلوم و پایدار است. در نتیجه استفاده از دوربین های متریک دقت بالایی را به همراه خواهد داشت اما به علت وزن و اندازه بالا و گران قیمت بودن، استفاده از آنها در پهپادهای فوق سبک و مورد استفاده عموم، عملاً امکان پذیر نمی باشد. از این رو امروزه دوربین های رقومی غیرمتریک و ناپایدار بخش جدایی ناپذیر سامانه های فتوگرامتری پهپاد شده اند. اگرچه تلاش های زیادی برای کاهش و رفع این محدودیت از طریق بهبود کیفیت هندسی دوربین های سبک و ارزان از غیرمتریک به متریک در حال انجام است اما روش های اجرایی کاهش ارتفاع پرواز، افزایش پوشش های طولی و عرضی، تراکم بالای نقاط کنترل زمینی و مانند آن با این دوربین های غیرمتریک، عملاً منجر به افزایش هزینه و زمان با هدف حفظ کیفیت هندسی محصولات مکانی شده است. مشکل اصلی استفاده از این دوربین های غیرمتریک، هندسه ضعیف و پایدار نبودن پارامترهای کالیبراسیون است که اهمیت کالیبراسیون هندسی درست این دوربین ها را دوچندان می کند.

روش های زیادی برای کالیبراسیون دوربین مطرح شده است که خود کالیبراسیون مبتنی بر چند جمله ای براون<sup>۱</sup> از

مهم ترین آنها است. این مدل پارامترهای فیزیکی ثابتی را برای مدل سازی هندسه دوربین در یک بلوک در نظر می گیرد که برای یک دسته از تصاویر دارای مقادیر پارامترهای یکسانی می باشد. عدم در نظر گرفتن یک مدل دینامیکی که رفتارهای موضعی در مکان و زمان را مدل سازی کند موجب می شود که برآورد پارامترهای مجهول در سرشکنی به واسطه باقی ماندن خطاهای سیستماتیک در مشاهدات، اریب شده و اعتبار نتایج سرشکنی مخدوش گردد. در این مقاله سعی بر آن است که با استفاده از یک مدل دینامیکی و به صورت پس پردازش رفتارهای مکانی باقیمانده های حاصل از سرشکنی اولیه مدل سازی شوند. روش پیشنهادی یک روش اجزاء محدود است که با برازش شبکه اعوجاجات بایلینیر دوبعدی بر باقیمانده های عکسی، رفتار سیستماتیک این باقیمانده ها را در تصاویر مختلف و به صورت مجزا مدل سازی می کند.

پیشینه تحقیق حاضر به شرح زیر است:

سلف کالیبراسیون دوربین برای اولین بار توسط (Faugeras, Luong, & Maybank, 1992; Maybank & Faugeras, 1992) بر اساس معادلات کروپا<sup>۲</sup> (Kruppa, 1939) مطرح گردید. این روش در تلاش برای یافتن کالیبراسیون دوربین با یافتن پارامترهای اصلی بر مبنای هندسه پروجکتیو برای یک دسته از تصاویر است. ارتباط نزدیکی بین کالیبراسیون یک دوربین مونو و تبدیل اپی پولاری که تحت یک انتقال به وجود می آید وجود دارد. تبدیل اپی پولار دو قید به کالیبراسیون دوربین اضافه می کند. اگر دو تبدیل اپی پولار ناشی از جابه جایی دوربین در دسترس باشد آنگاه کالیبراسیون دوربین به کمک یک منحنی چهار پارامتری تعریف می شود این روش تا زمانی که سه تصویر از یک منظر موجود باشد قابل اجرا است. در ادامه Hartley از این ایده ها برای سلف کالیبراسیون بیش از سه دوربین استفاده کرد و یک الگوریتم عملی برای بازسازی اقلیدوسی از چند منظر ارائه شد. این الگوریتم بر روی داده های واقعی و

## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( ... )

مدل سازی باقیمانده های عکسی حاصل از مثلث بندی هوایی شبکه تصاویر فتوگرامتری ... / ۲۵

شدن نیروی جانبی به دوربین و لنز و عدم پایداری صفحه سنسور CCD موقعیت نقطه اصلی  $(x_0, y_0)$  و فاصله اصلی  $c$  در تصاویر مختلف متفاوت است. از این رو ایده Image Variant به این صورت که موقعیت نقطه اصلی و مقدار فاصله اصلی برای هر عکس متفاوت باشد مطرح و معادله شرط هم خطی به صورت زیر بیان شد.

$$x = (x_0 + \Delta x_1) - (c + \Delta c) \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0) + dx}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) + dz}$$

$$y = (y_0 + \Delta y_1) - (c + \Delta c) \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0) + dy}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) + dz}$$

$i = 1$ : number of image

رابطه (۱)

بنابراین به ازای هر تصویر سه پارامتر دیگر به مجهولات اضافه می شود. انتظار می رود تغییر فاصله اصلی و موقعیت نقطه اصلی در محدوده چند صدم میلی متر تخمین زده شود. نتایج حاصل از اجسامنت در این حالات ضعیف نمی یابد. و تأثیرات ناشی از وابستگی پارامترها نیز کاهش می یابد. همچنین به علت ناهمواری سطح سنسور که ناشی از فرآیند ساخت و نصب آن است، مقدار پارامترهای ثابت تصاویر در مکان های مختلف سنسور متفاوت است.

روش پیشنهادی مدل سازی این رفتار استفاده از روش اجزاء محدود است. از یک شبکه منظم شطرنجی شکل با ابعاد مشخص استفاده شده است و هر نقطه از شبکه مقدار تصحیح مربوطه را به صورت بردار ارائه می دهد. معادلات شرط هم خطی طبق روابط زیر (رابطه ۲) تعمیم داده می شوند. اعوجاجات گرید منظم به عنوان مجهول وارد سرشکنی می شوند (Hastedt, Luhmann, & Tecklenburg, 2002).

$$x_{korr} = (1 - x_i - y_i + x_i \cdot y_i) \cdot k_{x[i,j]} + (x_i - x_i \cdot y_i) \cdot k_{x[i+1,j]} + (y_i - x_i \cdot y_i) \cdot k_{x[i,j+1]} + x_i \cdot y_i \cdot k_{x[i+1,j+1]}$$

معادله مشابه برای  $x_{korr}$

رابطه (۲)

شبه سازی شده با نویز تست شده و نتایج عالی را به همراه داشته است (Hartley, 1993).

Lourakis و Deriche ساده سازی معادلات کروپا را ارائه کردند و نشان دادند که چگونه می توان از این معادلات برای سلف کالیبراسیون دوربین استفاده کرد. این ساده سازی به صورت جبری و صرفاً براساس ماتریس اساسی انجام گرفت. این الگوریتم نسبت به نویز اندازه گیری پایدار و قابل اعتماد است (Lourakis & Deriche, 1999).

Lei و همکاران نیز روشی برای حل معادلات کروپا برای سلف کالیبراسیون دوربین ارائه دادند. این روش ابتدا با استفاده از بهینه سازی ژنتیکی فاکتورهای مقیاس را تعیین می کند و سپس پارامترهای اصلی دوربین از قیود خطی محاسبه می شود (Lei, Wu, Hu, & Tsui, 2002).

Astrom و Heyden عنوان کردند که در صورت مشخص بودن ابعاد تصویر و عدم وجود انحراف در صفحه تصویر سلف کالیبراسیون دوربین های با فوکوس و بزرگنمایی مداوم امکان پذیر خواهد بود. اگرچه روش آن ها کالیبراسیون دوربین را از طریق سرشکنی دسته اشعه غیرخطی انجام می دهد اما هیچ راه حلی برای محاسبه مقادیر اولیه پیشنهاد نکرده است (Heyden & Astrom, 1997).

سپس Pollefeys و همکاران ثابت کردند که عدم وجود انحراف در صفحه تصویر برای سلف کالیبراسیون دوربین کافی است و یک الگوریتم بهینه سازی برای پارامترهای دوربین ارائه دادند (Pollefeys, Koch, & Van Gool, 1999). کالیبراسیون تحلیلی دوربین با استفاده از سرشکنی سلف کالیبراسیون در اوایل دهه ۱۹۷۰ توسعه داده شد (Duane, 1971) و در سال ۱۹۸۰ به ابزاری برای کالیبراسیون دوربین در فتوگرامتری برد کوتاه تبدیل شد (C. Fraser & Brown, 1986). در سال ۲۰۰۲، Thomas Luhmann و همکاران ایده کالیبراسیون دوربین به صورت Image Variant و Finite Element را مطرح کردند. آن ها استدلال نمودند که نمی توان فرض کرد که پارامترهای کالیبراسیون دوربین در کل مدت زمان عکسبرداری ثابت باشند بلکه به دلایلی از قبیل وارد

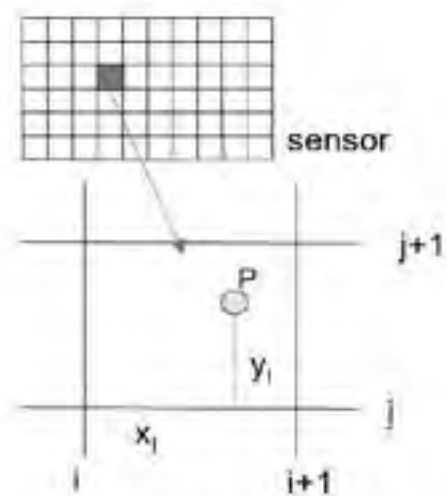
رایانه‌ای ندارد. در این روش نیاز است تا تنها دوربین یک الگوی مسطح و مشخص را از حداقل دو جهت مشاهده کند. در مقایسه با تکنیک‌های کلاسیک که از تجهیزات گران قیمت استفاده می‌کنند، روش پیشنهادی بسیار ساده و قابل انعطاف است (Zhang, 2000).

در سال ۲۰۰۰، Xu Gang و همکاران در یک مقاله نشان دادند که با توجه به دو ماتریس هموگرافی برای دو صفحه در فضا، یک رابطه خطی بین دوران و انتقال بین دو دوربین، فاصله کانونی دو دوربین و معادلات صفحه در فضا وجود دارد و می‌توان از این رابطه برای کالیبراسیون دوربین استفاده کرد. نتایج تجربی نشان داده است که با استفاده از برآورد یک حدس اولیه می‌توان راه حل را با به حداقل رساندن تفاوت بین مشاهدات و استفاده مجدد بهینه کرد (Xu, Terai, & Shum, 2000).

در سال ۲۰۰۱، Gruen و Beyer مدل پایه توسط معادلات غیرخطی شرط هم‌خطی را ارائه کردند که شامل پارامترهای اضافی برای تصحیح اعوجاجات و توجیه داخلی می‌شد (Gruen & Beyer, 2001).

در سال ۲۰۰۶ و طی یک پژوهش توسط Fraser.C.S و Al-Ajlouni یک فرآیند کالیبراسیون وابسته به فاصله کانونی ارائه شد که به موجب آن تصحیح مختصات تصویر برای توجیه داخلی و مدل‌سازی اعوجاجات لنز به‌عنوان تابعی از فاصله کانونی مطرح شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که روش پیشنهادی برای پروژه‌های فتوگرامتری با دقت متوسط و از راه دور مناسب است (C. S. Fraser & Al-Ajlouni, 2006).

در سال ۲۰۰۸، Habed.A و B.Boufama در مقاله‌ای مجموعه جدیدی از معادلات برای سلف کالیبراسیون یک دوربین متحرک با پارامترهای ثابت ارائه کردند. برخلاف اکثر روش‌های موجود که نیاز به حل معادلات با سه یا چند مجهول دارند، معادلات پیشنهادی فقط دو متغیره هستند. به‌طور خاص، نشان داده می‌شود که سه عامل مقیاس موجود در معادلات کروپا، که ناشی از سه‌گانه تصاویر



نگاره ۱: گرید در نظر گرفته شده برای نوشتن معادلات در این روش تغییر و رفتار پارامترها به صورت خطی در نظر گرفته شده است و روابط استفاده شده نسبت به رفتارهای متفاوت پارامترهای کالیبراسیون انعطاف‌پذیر نیستند. در حالی که در این مقاله مدل مورد استفاده نسبت به رفتار باقیمانده‌های عکسی انعطاف‌پذیر است (Hastedt et al., 2002).

در سال ۱۹۹۹، Pollefeys.M مدعی شد که برای بازسازی سه‌بعدی، یکی از موارد مهم بازیابی پارامترهای کالیبراسیون دوربین است. کالیبراسیون دوربین برای به دست آوردن اطلاعات متریک در مورد صحنه با استفاده از دوربین مورد نیاز است. چندین تکنیک برای این کار ارائه شده است اما دستیابی به یک کالیبراسیون متریک به‌طور همزمان دشوار است. بنابراین، در مقاله حاضر، یک رویکرد طبقه‌بندی شده ارائه شده است، که از پروژکتور از طریق افاین استفاده می‌کند. اگر کالیبراسیون افاین مشخص باشد، می‌تواند برای مقابله با تغییر فاصله کانونی نیز استفاده شود (Pollefeys & Van Gool, 1999).

در سال ۲۰۰۰، طی یک تحقیق در ارتباط با کالیبراسیون دوربین توسط Zhang.Z یک تکنیک جدید و انعطاف‌پذیر برای کالیبراسیون راحت دوربین پیشنهاد شده است. این روش نیاز به دانش تخصصی از هندسه سه‌بعدی یا دید

## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( ... )

مدل سازی باقیمانده های عکسی حاصل از مثلث بندی هوایی شبکه تصاویر فتوگرامتری ... / ۲۷

۵۶ و ۵۸ درصد بهبود دقت مسطحانی و ارتفاعی به دست آمد (Babapour, Mokhtarzade, & Valadan Zoej, 2017).

خود کالیبراسیون دوربین، دقت و استحکام مثلث بندی هوایی را برای تصاویر پهپاد تعیین می کند. تصاویر پهپاد اخذ شده از خطوط انتقال طولانی، استحکام هندسی پایینی دارند که ممکن است کالیبراسیون دوربین را تحت تأثیر قرار دهد.

برای حل چنین مشکلاتی، روش های سنتی با بیش از سه نقطه کنترل زمینی کار می کنند، در حالی که این مطالعه یک روش خود کالیبراسیون جدید تنها با یک نقطه کنترل طراحی می کند. به نحوی که ابتدا، مدل های اعوجاج دوربین موجود به دو دسته، یعنی مدل های فیزیکی و ریاضی دسته بندی می شوند و فرمول های ریاضی آنها به تفصیل مورد بهره برداری قرار می گیرند. دوم، در چارچوب SfM، یک روش خود کالیبراسیون دوربین طراحی شده است که استراتژی های اولیه سازی پارامترهای اعوجاج دوربین و ترکیب مشاهدات سیستم ناوبری جهانی ماهواره ای با دقت بالا را ترکیب می کند. این روش می تواند به دقت افقی و عمودی به ترتیب به ۰/۰۴ متر و ۰/۰۵ متر در هنگام استفاده از یک نقطه کنترل برسد (Huang, Jiang, & Jiang, 2021).

### ۲- روش پیشنهادی برای مدل سازی اعوجاجات باقیمانده عکسی

همانطور که در مقدمه ذکر شد روش پیشنهادی برای کالیبراسیون دوربین یک روش پس پردازش است. روش پس پردازش به علت سادگی پیاده سازی و به عنوان روش مقدماتی برای بررسی میزان بهبود نتایج انتخاب شده است. روش اصولی تر برای این کار، پردازش همزمان مدل دینامیکی در فرآیند محاسبات باندل اجستمنت است. منظور از مدل دینامیکی، مدلی است که مقادیر پارامترهای آن وابسته به زمان بوده و برای عکس های متوالی به تدریج تغییر می کند.

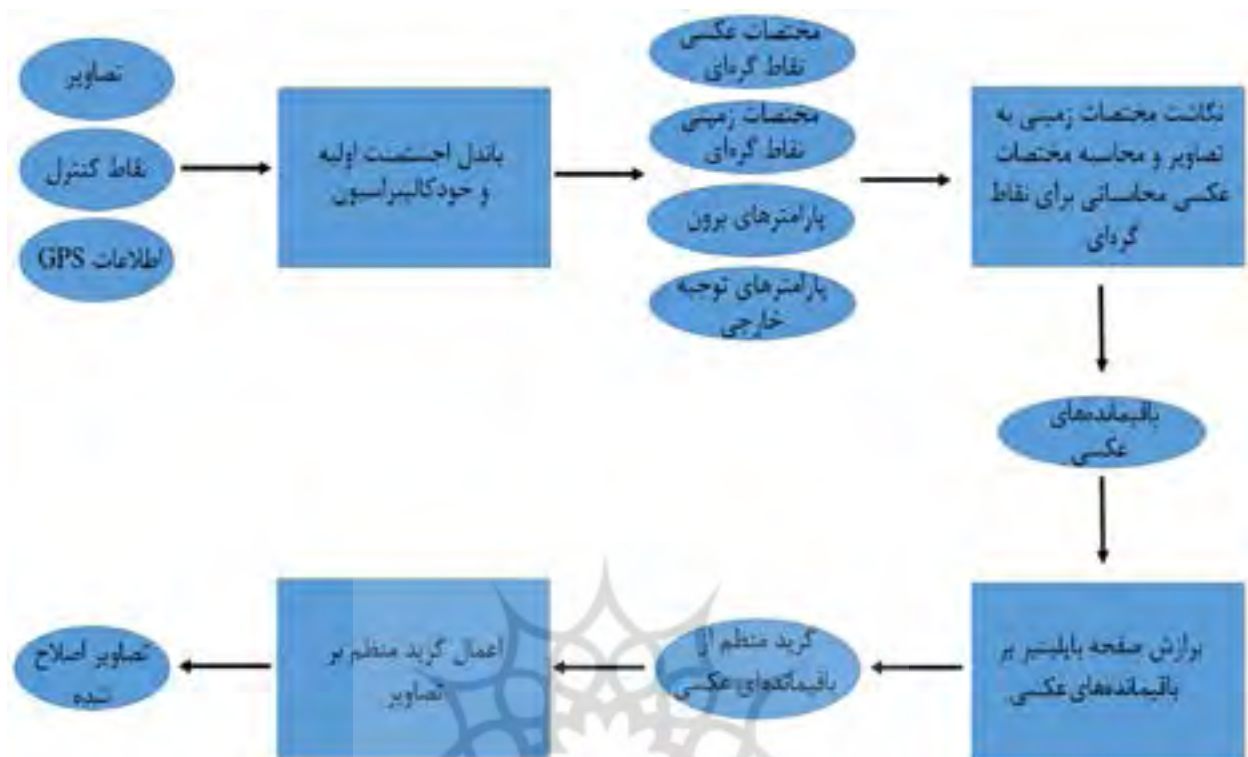
است، مستقل نیستند بلکه با یکدیگر ارتباط نزدیکی دارند (Habed & Boufama, 2008; Pollefeys et al., 1999).

خود کالیبراسیون مداوم و پیوسته دوربین استریو با استفاده از دنبال کردن پارامترهای دوربین در سال ۲۰۰۹ توسط تاو دنگ انجام گرفت. در تحقیق انجام شده یک چارچوب سازگار برای خود کالیبراسیون دوربین مطرح می شود به طوری که براساس یک تجزیه و تحلیل عملی از حساسیت بازسازی استریو، پارامترهای مهم برای خود کالیبراسیون شناسایی می شوند (Dang, Hoffmann, & Stiller, 2009).

کاربرد سنجنده های تصویربرداری رقومی و تعیین پارامترهای توجیه خارجی تصاویر با استفاده از سنجنده های IMU/GPS باعث ایجاد تحولی عظیم در زمینه فتوگرامتری هوایی شده است. سنجنده های تصویربرداری رقومی به طور قابل ملاحظه ای موجب کاهش حجم پردازش داده ها، به منظور تولید اطلاعات مورد نیاز کاربران در حوزه های مختلف شده است. همچنین تعیین مستقیم پارامترهای توجیه خارجی تصاویر با استفاده از ترکیب سیستم های ناوبری روش های توجیه سنجنده را متحول نموده است (Chio, 2016).

با ظهور دوربین های دیجیتال جدید، به ویژه دوربین های غیرمتریک کم وزن که بر روی وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (پهپادها) نصب می شوند، مدل های کالیبراسیون دوربین باید مطابق با ماهیت پیچیده چند اعوجاجی آنها تقویت شوند.

در سال ۲۰۱۶ طی یک تحقیق، یک روش کالیبراسیون جدید پیشنهاد و ارزیابی شده است که توانایی زیادی در مدل سازی اعوجاج های پیچیده تصویر دارد و نیازی به اطلاعات اضافی زمینی ندارد. این روش از ویژگی های خط مستقیم برای شناسایی و مدل سازی اعوجاج تصویر از طریق فرآیند خود کالیبراسیون استفاده می کند. روش پیشنهادی بر روی تصاویر دیجیتال UltraCam متریک و همچنین تصاویر یک پهپاد با دوربین غیرمتریک اجرا شد. نتایج به دست آمده بسیار امیدوارکننده بود، زیرا در مورد تصاویر پهپاد، به ترتیب



نگاره ۲: فلوچارت روش پیشنهادی برای مدل‌سازی اعوجاجات باقیمانده عکس

## ۲-۱- کالیبراسیون اولیه

برای انجام پردازش تصاویر و باندل اجسمنت اولیه شبکه فتوگرامتری از نرم‌افزار متاشیپ<sup>۱</sup> استفاده شده است. کالیبراسیون دوربین در این نرم‌افزار با استفاده از یک چندجمله‌ای مدل براون در باندل اجسمنت و همراه با پارامترهای توجیه خارجی و مختصات زمینی نقاط گره‌ای با معیار کمترین مربعات وزن‌دار باقیمانده‌های مشاهدات برآورد می‌شوند. این پارامترها، به‌عنوان ورودی روش پیشنهادی اجزاء محدود (Reddy, 2019) مورد استفاده قرار می‌گیرند تا پارامترهای اعوجاج باقیمانده عکسی از طریق یک مدل دینامیکی به‌دست آید.

با توجه به استفاده از نرم‌افزار متاشیپ نیاز است تا مدل ریاضی آن برای انجام محاسبات فتوگرامتری مورد استفاده قرار گیرد. مدل ریاضی نرم‌افزار برای بازسازی سه‌بعدی به شرح رابطه (۳) است.

$$x = X/Z$$

$$y = Y/Z$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$x' = x(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_1(r^2 + 2rx^2) + 2P_2 xy)$$

$$y' = y(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_2(r^2 + 2ry^2) + 2P_1 xy)$$

$$u = w/2 + c_x + x'f + x'B_1 + y'B_2$$

$$v = h/2 + c_y + y'f$$

رابطه (۳)

که در آن (X, Y, Z) مختصات نقاط در سیستم مختصات محلی دوربین، (u, v) مختصات نگاشت شده نقاط در سیستم مختصات تصویر (به پیکسل)، f فاصله کانونی دوربین، ضرایب  $K_1, K_2, K_3, K_4$  ضرایب اعوجاج شعاعی،  $P_1, P_2$  ضرایب اعوجاج مماسی،  $B_1, B_2$  ضرایب کشیدگی و عدم تعادل و w, h طول و عرض تصویر به پیکسل می‌باشند. به این ترتیب باقیمانده‌های عکسی بعد از سرشکنی با مدل براون به‌دست می‌آید (Agisoft, 2020).

## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( ... )

مدل سازی باقیمانده های عکسی حاصل از مثلث بندی هوایی شبکه تصاویر فتوگرامتری ... / ۲۹

بایلینیر<sup>۲</sup> بر باقیمانده های نقاط گره ای نامنظم استفاده می شود. برای این کار قیود درون عکسی نیز در کنار معادلات بایلینیر استفاده می شوند. یکی از مشکلات این روش نیاز به تراکم کافی به نقاط گرهی در هر تصویر است زیرا در نواحی بدون نقاط گرهی، قابلیت اعتماد به درستی مدل اعوجاجات از دست می رود. همچنین ابعاد گرید اعوجاجات روی نتیجه نهایی مؤثر است و باید مورد بررسی قرار گیرد.

### ۲-۲-۱- معادلات صفحه بایلینیر

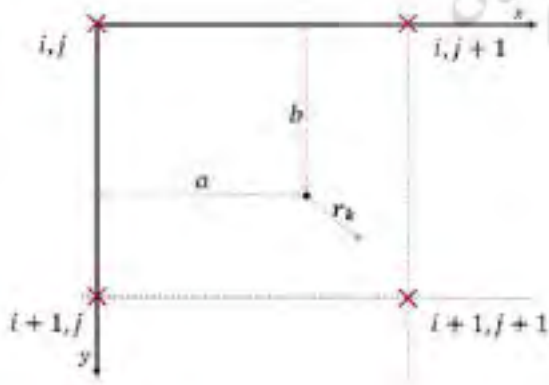
در نگاره ۴ که سیستم مختصات محلی یک رأس از گرید منظم را نشان می دهد،  $r_k$  باقیمانده مشاهدات نامنظم عکسی و  $a$  و  $b$  مختصات نقطه  $K$  در سیستم مختصات محلی هستند. همچنین باقیمانده رئوس مجهول می باشند. بنابراین هر نقطه گره ای در تصویر دو معادله خواهد داشت که در دو جهت  $x$  و  $y$  به صورت روابط (۴) و (۵) نوشته می شوند (Dumitru, Ploeanu, & Badea, 2013).

$$rx_k = (1 - a)(1 - b)rx_{i,j} + a(1 - b)rx_{i,j+1} + b(1 - a)rx_{i+1,j} + abrx_{i+1,j+1}$$

رابطه (۴)

$$ry_k = (1 - a)(1 - b)ry_{i,j} + a(1 - b)ry_{i,j+1} + b(1 - a)ry_{i+1,j} + abry_{i+1,j+1}$$

رابطه (۵)



نگاره ۴: سیستم مختصات محلی هر نود گرید منظم

### ۲-۲- کالیبراسیون اجزاء محدود<sup>۱</sup>

رفتار باقیمانده های عکسی بعد از سرشکنی اولیه می تواند در مکان به صورت سراسری یا موضعی باشد (نگاره ۳). رفتارهای سراسری در مکان توسط روش های مرسوم مانند مدل براون مدل سازی می شوند. البته برای مدل سازی ناپایداری دوربین با این مدل ها نیز همانطور که در قسمت پیشینه تحقیق (مقدمه) ذکر شد می توان با در نظر گرفتن پارامترهای مجزا برای هر تصویر عمل نمود.



نگاره ۳: رفتار موضعی باقیمانده های عکسی در مکان

رفتارهای موضعی در مکان به این معنی است که در نقاطی از یک تصویر باقیمانده ها رفتاری متفاوت با سایر نقاط دارند. این نوع رفتارها قابل مدل سازی با روش های سلف کالیبراسیون مرسوم نیستند. ایده مطرح شده در این تحقیق استفاده از روش اجزاء محدود است (Zienkiewicz, Taylor, Nithiarasu, & Zhu, 1977) تا بتوان اعوجاجات تصویری را به صورت موضعی در مکان مدل کرد. در این روش، ساخت یک گرید منظم به نحوی که هر نود آن دو مؤلفه دارد مدنظر است.

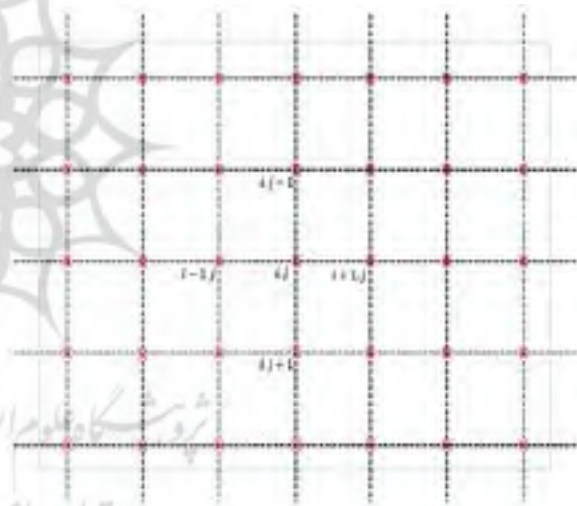
این گرید را می توان به یک توری تشبیه کرد که رفتار آن در هر تصویر متفاوت است و رفتارهای مختلف در نقاط مختلف تصویر را نیز مدل می کند. به عبارت دیگر انتظار می رود تا این روش رفتارهای موضعی در مکان را نیز مدل سازی کند. برای محاسبه دو مؤلفه اعوجاج  $xy$  در رئوس این گریدهای منظم تصویری، از برازش یک صفحه

### ۲-۲-۲- قیود درون عکسی

این قیود وابستگی مکانی اعوجاجات را در نظر می گیرند. همانطور که در نگاره ۵ نشان داده شده است باقیمانده در هر رأس برابر با میانگین ۴ همسایگی آن رأس در نظر گرفته می شود. بنابراین به ازای هر نود دو معادله خواهیم داشت.

$$FX_{i,j} = \frac{FX_{i-1,j} + FX_{i+1,j} + FX_{i,j-1} + FX_{i,j+1}}{4} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$FY_{i,j} = \frac{FY_{i-1,j} + FY_{i+1,j} + FY_{i,j-1} + FY_{i,j+1}}{4} \quad \text{رابطه (۷)}$$



نگاره ۵: ۴ همسایگی هر رأس از گرید منظم در معادلات قیود درون عکسی

### ۲-۳-۱- مرحله اول: باندل اجستمنت اولیه و خودکالیبراسیون

- ورودی: تصاویر، اطلاعات GPS و IMU
  - پردازش: استخراج فیچر، تناظریابی نقاط و سرشکنی باندل
  - خروجی: پارامترهای توجیه خارجی، ضرایب مدل براون و مختصات عکسی و زمینی نقاط گره‌ای
- در مرحله اول نیاز است تا تصاویر در قالب یک بلوک فتوگرامتری پردازش شوند و نتایج حاصل از آن برای مرحله دوم مورد استفاده قرار گیرند. تصاویر و اطلاعات GPS و IMU سنجنده به عنوان ورودی به نرم افزار متاشیپ معرفی می شوند. پس از تناظریابی تصاویر و استخراج نقاط گره‌ای سرشکنی باندل با در نظر گرفتن چندجمله‌ای براون برای کالیبراسیون دوربین انجام می گیرد. در نتیجه این سرشکنی اولیه پارامترهای توجیه خارجی تصاویر، ضرایب چندجمله‌ای براون و مختصات زمینی نقاط گره‌ای محاسبه می شوند.

### ۲-۳-۲- مرحله دوم: محاسبه باقیمانده‌های عکسی

#### نقاط گرهی

- ورودی: پارامترهای توجیه خارجی، ضرایب مدل براون و مختصات زمینی نقاط گره‌ای
- پردازش:
- نگاشت مختصات زمینی به تصاویر و محاسبه مختصات عکسی محاسباتی
- محاسبه باقیمانده‌های مختصات نقاط نامنظم عکسی

- خروجی: باقیمانده‌های عکسی مربوط به نقاط گرهی نامنظم در هر عکس

در این مرحله ابتدا مختصات زمینی نقاط گره‌ای به کمک مدل ریاضی نرم افزار، پارامترهای توجیه خارجی و ضرایب براون به روی هر تصویر نگاشت می شوند. اختلاف مختصات محاسبه شده از این روش برای هر نقطه و مختصات نقاط گره‌ای مشاهده شده بردار باقیمانده

### ۲-۳- پیاده سازی

پیاده سازی الگوریتم مذکور در سه مرحله (که در ادامه شرح داده می شود) انجام می گیرد. لازم به ذکر است که اجرای این مراحل به صورت متوالی بوده و نتایج حاصل از هر مرحله به عنوان ورودی در مرحله بعدی استفاده می شوند. مرحله اول توسط نرم افزار متاشیپ و مرحله دوم و سوم در نرم افزار MATLAB پیاده سازی شده اند.

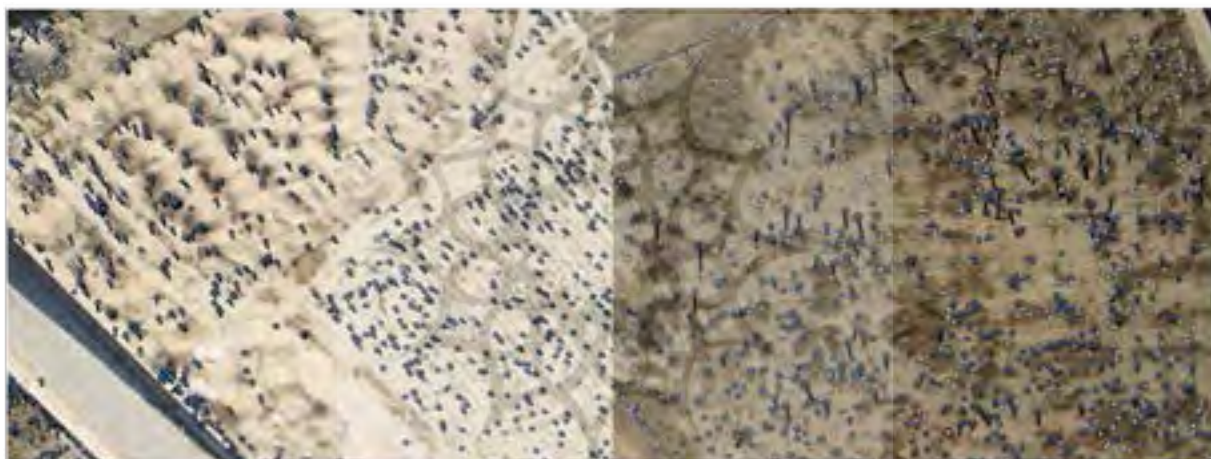


## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( )

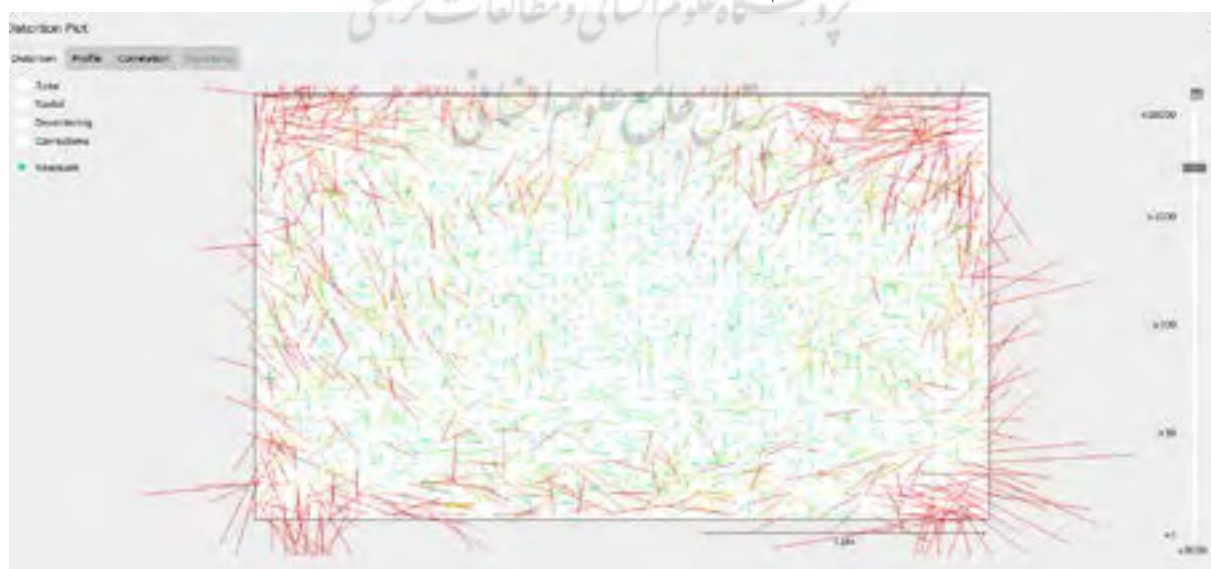
مدل سازی باقیمانده های عکسی حاصل از مثلث بندی هوایی شبکه تصاویر فتوگرامتری ... / ۳۱

قسمتی از آن‌ها را خطاهای سیستماتیک دانست که توسط چندجمله‌ای مدل براون مدل سازی نشده‌اند. لازم به ذکر است از آنجاکه به واسطه وجود خطاهای سیستماتیک در سرشکنی، برآورد پارامترها به صورت اریب می‌باشد، به نتایج سرشکنی نیز نمی‌توان به طور کامل اطمینان نمود. بررسی بیشتر روی نگاره ۷ نشان می‌دهد سطح خطاهای سیستماتیک در تصاویر بسیار بیشتر از خطای متوسط باقیمانده‌ها در گزارش نرم افزار است زیرا فرض نرم افزار این است که برآورد پارامترهای سرشکنی بدون حضور خطاهای سیستماتیک به صورت ناریب بوده است.

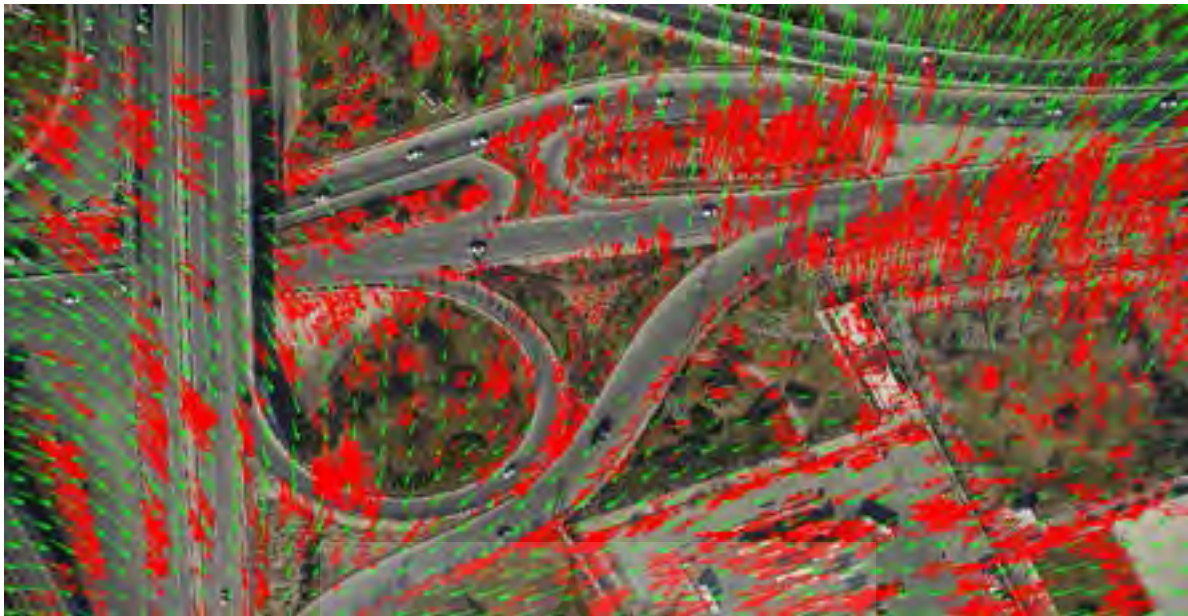
عکسی را می‌دهد. این باقیمانده در دو جهت  $x$  و  $y$  تعریف می‌شود. به منظور بررسی رفتار باقیمانده های عکسی یک دسته از تصاویر اخذ شده از منطقه شهر آفتاب توسط نرم افزار متاشیپ پردازش شده و از خودکالیبراسیون براون برای مدل کردن اعوجاجات تصویر استفاده می‌شود. نگاره ۶ نشان دهنده باقیمانده های عکسی در دو تصویر دلخواه پس از سرشکنی اولیه است. همانطور که دیده می‌شود بخشی از این باقیمانده‌ها خطای اتفاقی بوده و بخشی دیگر دارای الگوی سیستماتیک می‌باشد. به وضوح مشاهده می‌شود که هنوز باقیمانده های عکسی الگوی مشخصی دارند و می‌توان



نگاره ۶: باقیمانده نقاط گره‌ای نامنظم (به منظور نمایش بهتر مقیاس ۱۰ به باقیمانده‌ها اعمال شده است)



نگاره ۷: میانگین باقیمانده های عکسی



نگاره ۸: قرمز: باقیمانده‌های عکسی و سبز: گرید منظم محاسبه شده برای یک تصویر با ابعاد ۲۰۰ پیکسل (ضریب اغراق ۱۰۰)

هستند محاسبه می‌شوند. نگاره ۸ گرید محاسبه شده برای یک تصویر را نشان می‌دهد که رفتار سیستماتیک باقیمانده‌های عکسی در آن مشهود است. پس از محاسبه گرید منظم برای هر تصویر حال هر یک از گریدها بر تصویر مورد نظر اعمال می‌گردد تا در نتیجه آن تصاویر اصلاح شده به دست آیند. در واقع با انجام این کار خطاهای سیستماتیک که چندجمله‌ای براون آن را مدل نکرده است از روی تصاویر برداشته می‌شوند. بنابراین در ادامه، از این تصاویر اصلاح شده برای برجسته‌بینی و تولید نقشه استفاده شده است.

### ۳-۳-۲- آزمون‌های ارزیابی روش پیشنهادی

برای ارزیابی روش پیشنهادی بهبود صحت هندسی تصاویر فتوگرامتری پهپاد از سه مجموعه داده مختلف که توسط سنجنده‌های متفاوت و با مقیاس‌های گوناگون به روش فتوگرامتری پهپاد اخذ شده‌اند استفاده شده است. خصوصیات داده‌های استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است. داده شهر آفتاب به علت ارتفاع پرواز زیاد، هندسه ضعیف شبکه و کیفیت پایین تصاویر و داده‌های آبیک و

### ۳-۳-۳- مرحله سوم: پیاده‌سازی مدل اجزا محدود

- ورودی: باقیمانده‌های عکسی مختصات نقاط گرهی نامنظم در هر عکس
- پردازش:
- برآزش صفحه بایلینیر بر باقیمانده‌های عکسی و محاسبه گرید منظم
- اعمال گرید منظم بر تصاویر و تولید تصاویر اصلاح شده
- خروجی: گرید منظم از باقیمانده‌های عکسی و تصاویر اصلاح شده

از آنجاکه نقاط گره‌ای در سطح تصویر به صورت غیریکنواخت پراکنده هستند، نیاز است تا یک گرید منظم که رفتار باقیمانده‌ها در هر قسمت از تصویر را نشان دهد محاسبه گردد. در اینجا دو گرید منظم به کمک مقدار باقیمانده‌ها در جهت  $x$  و  $y$  محاسبه می‌شود، تا یکی رفتار باقیمانده‌ها در جهت  $x$  و دیگری رفتار باقیمانده‌ها در جهت  $y$  را مدل کنند. لازم به ذکر است که در این مقاله تنها از قیود درون عکسی استفاده شده است. با نوشتن روابط فوق، مجهولات که همان باقیمانده‌های عکسی رئوس گرید منظم

جدول ۱: داده های آزمون شده در تحقیق

منطقه	دوربین	تعداد تصاویر	GSD(cm)	ابعاد تصویر	Pixel Size(mm)
شهر آفتاب	ILCE-7RM2	250	4	7952 × 5304	0.0045
آبیک	FC6310	195	2	4864 × 3648	0.0026
کلورادو	FC300S	82	2.5	4000 × 3000	0.0016

مقایسه با نگاره ۷ قبل از حذف این اعوجاجات می باشد. نتایج حاصله بیانگر کاهش ۷۰ درصدی باقیمانده های عکسی است.

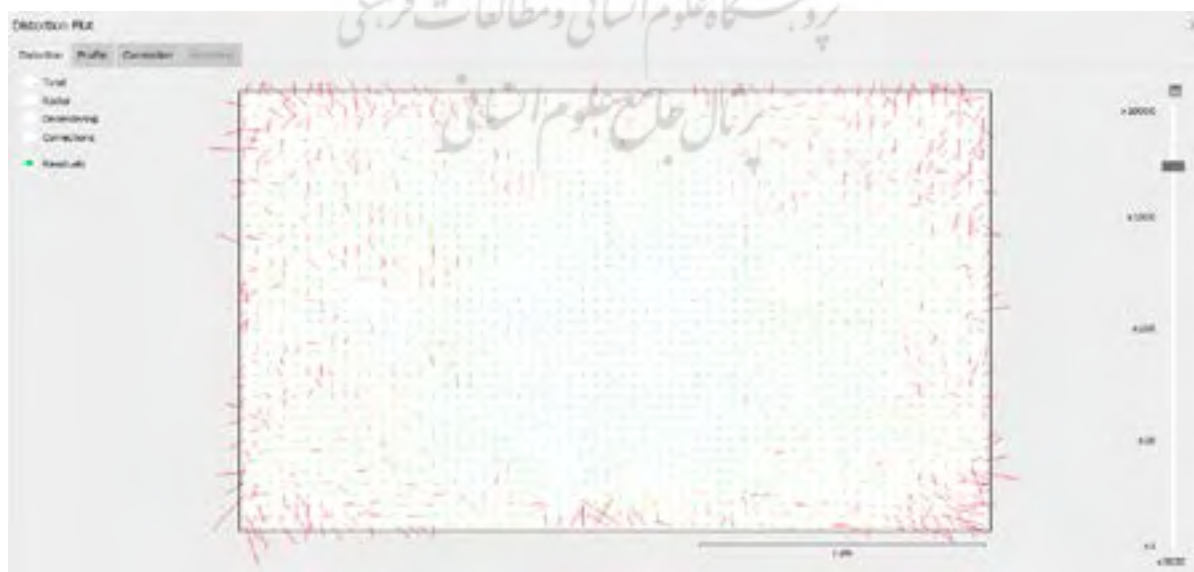
کلورادو به علت ارتفاع پرواز پایین و هندسه شبکه مستحکم مورد تست قرار گرفته است.

### ۳-۱- آزمون بررسی تأثیر روش پیشنهادی بر صحت مثلث بندی هوایی

### ۳-۲- آزمون بررسی پله بین مدل های برجسته بینی

یکی از شاخص های مهم در خط تولید تهیه نقشه به روش فتوگرامتری، کیفیت برجسته بینی مدل های سه بعدی و بررسی میزان پله ارتفاعی بین آنها است. چرا که تولید نقشه نیاز به برجسته بینی و دید استریو دارد و به همین علت میزان پله مدل به عنوان معیاری برای ارزیابی تصحیح هندسی تصاویر استفاده می شود. برای برجسته بینی از تصاویر با پوشش طولی (Maybank & Faugeras, 1992) ۶۰ درصد استفاده می شود و پله مدل قبل و بعد از اعمال گرید اعوجاجات به تصاویر محاسبه می شود. پارامتر مؤثر دیگر در این روش ابعاد گرید است لذا با تغییر ابعاد گرید و اعمال آن بر نقاط

پس از تولید تصاویر اصلاح شده، برای بررسی تأثیر حذف اعوجاجات باقیمانده در عکس ها به روش پیشنهادی نیاز است تا سرشکنی بلوک به کمک تصاویر اصلاح شده انجام شود و بعد از سرشکنی مجدداً میزان باقیمانده های عکسی مورد ارزیابی قرار گیرند. در این مرحله استخراج نقاط و تناظریابی به کمک تصاویر اصلاح شده انجام می شود اما پارامترهای توجیه خارجی و ضرایب چند جمله ای مدل براون ثابت و برابر با مقادیر حاصل از سرشکنی اولیه خواهند بود. نگاره ۹ میانگین باقیمانده های عکسی پس از سرشکنی ثانویه برای تصاویر اصلاح شده را نشان می دهد که قابل



نگاره ۹: میانگین باقیمانده های عکسی پس از اصلاح تصاویر و پردازش ثانویه

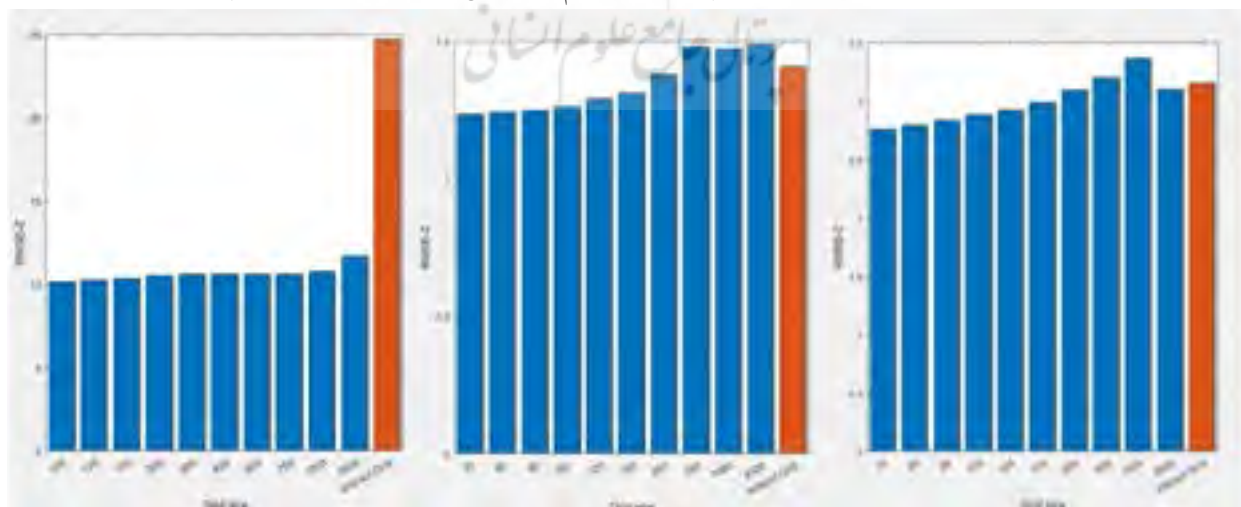
اعمال گزید با ابعاد ۷۰ پیکسل این مقدار به ۲/۷ برابر GSD می‌رسد. نکته قابل توجه این است که اعمال گزید با ابعاد بزرگ نه تنها باعث کاهش پله مدل نمی‌شود بلکه افزایش آن را نیز تا ۳/۴ برابر GSD در پی دارد. لذا ضروری است تا ابعاد گزید بزرگ در نظر گرفته نشده و با توجه به حجم محاسبات به صورت بهینه محاسبه و استفاده شود.

نتایج آزمون پله مدل روی داده کلرادو در نمودارهای نگاره (۱۰-چپ) ارائه شده است. رفتار تغییر پله مدل با اعمال گزیده‌های مختلف بسیار شبیه به داده آبیگ است. مقدار پله مدل به طور متوسط ۱/۴ برابر GSD است که پس از اعمال گزید با ابعاد ۷۰ پیکسل این مقدار به ۱/۲ برابر GSD می‌رسد. با نگاه به هر سه نمودار نگاره ۱۰ متوجه می‌شویم در داده شهر آفتاب، ناپایداری دوربین بسیار بالاتر از دو داده دیگر بوده و اعمال روش پیشنهادی تا ۶۰ درصد نتایج را بهبود داده است اما در داده آبیگ و کلرادو این بهبود حدود ده برابر کمتر یعنی به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد بوده است. به این ترتیب در نگاه اول به این نتیجه می‌رسیم که روش پیشنهادی برای دوربین‌های غیرمتریک اما پایدار و با اعوجاجات قابل مدل با روش براون خیلی مؤثر نیست. نگاره‌های (۱۱ و ۱۲) پروفیل طولی و عرضی روی یک مدل دلخواه از داده شهر آفتاب را قبل و بعد از اعمال گزید منظم نشان می‌دهد که بیانگر کاهش پله مدل است.

گره‌ای تأثیر این پارامتر نیز بررسی و مقدار بهینه آن برای هر داده محاسبه می‌شود. میزان پله یا ناسازگاری ارتفاعی دو مدل همسایه، با معیار متوسط پله در کل یک مدل (RMSE-Z) معرفی می‌شود. واحد اندازه‌گیری پله نیز GSD در نظر گرفته شده است. نگاره (۱۰-راست) میزان پله مدل برای داده شهر آفتاب را نشان می‌دهد. در این نمودار محور X نشان‌دهنده ابعاد گزید و محور Z میزان پله مدل را می‌دهند همچنین رنگ قرمز نشان‌دهنده میزان پله مدل در سرشکنی اولیه و قبل از اعمال گزید بر تصاویر و رنگ آبی بیانگر میزان پله پس از اعمال گزید بر تصاویر است.

با توجه به نمودارهای نگاره (۱۰-راست) میزان پله مدل در یک مدل دلخواه از داده شهر آفتاب قبل از اعمال گزید ۲۵ برابر GSD است. کاهش میزان پله پس از اعمال گزید و کوچک شدن ابعاد آن نیز مشهود است به نحوی که با اعمال گزید با ابعاد ۱۰۰ پیکسل میزان پله مدل به ۱۰ برابر GSD کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که اعمال گزید با ابعاد ۲۰۰۰ پیکسل نیز باعث کاهش پله مدل می‌شود اما بهبود خطا حدود ۸۰ درصد گزید ۱۰۰ پیکسلی است. هر چه ابعاد گزید کاهش می‌یابد، پله مدل با سرعت کمتر و به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

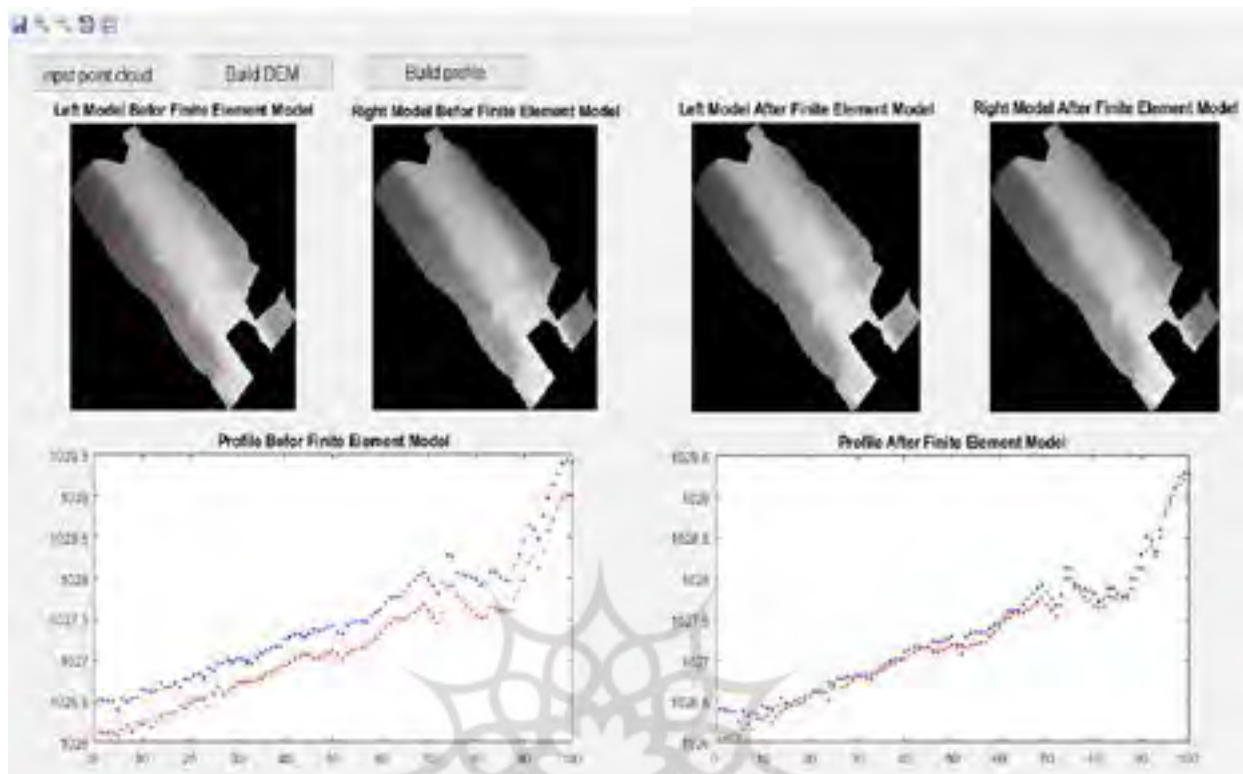
نمودار نگاره (۱۰-وسط) نشان‌دهنده پله مدل داده آبیگ است که به طور متوسط ۳/۲ برابر GSD است و پس از



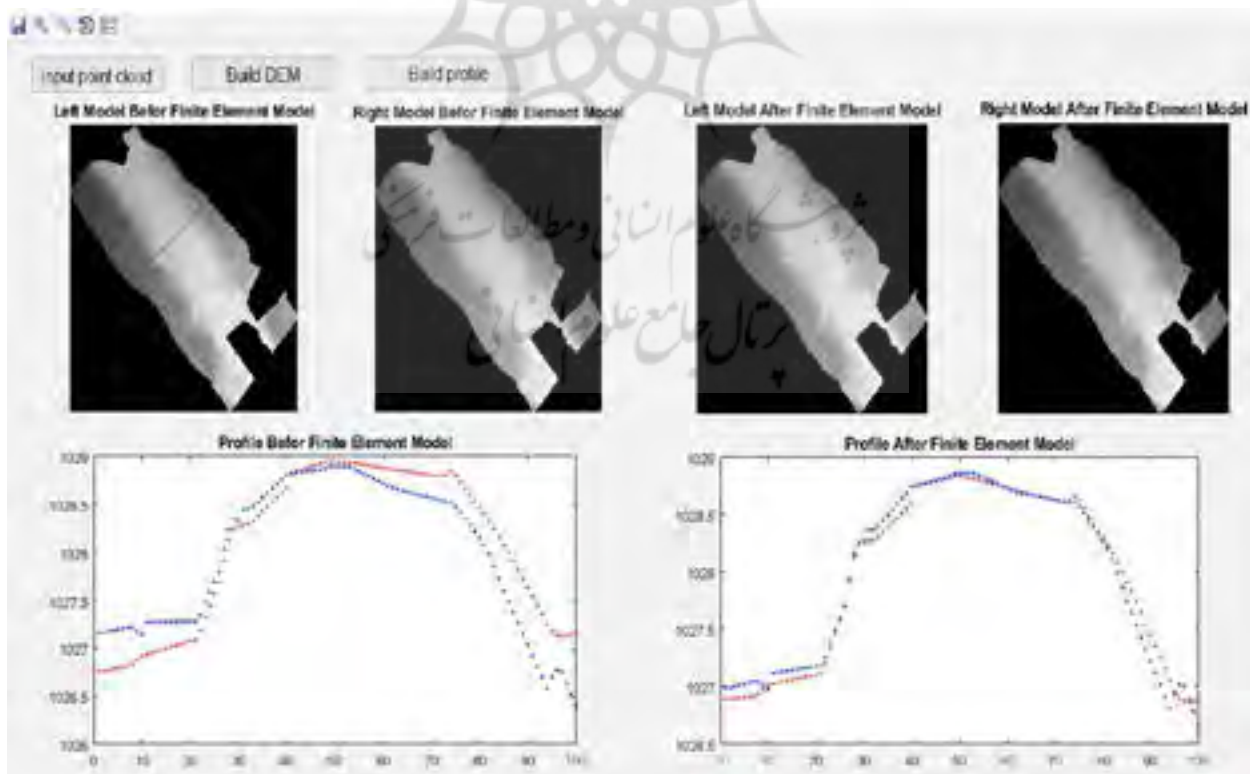
نگاره ۱۰: نمودار میزان پله بین مدل‌های متوالی برای داده شهر آفتاب (راست)، آبیگ (وسط) و کلرادو (چپ)

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ( )

مدل سازی باقیمانده های عکسی حاصل از مثلث بندی هوایی شبکه تصاویر فتوگرامتری ... / ۳۵



نگاره ۱۱: پروفیل عرضی بیانگر پله بین دو مدل استریو متوالی در داده شهر آفتاب قبل و بعد از اعمال روش پیشنهادی



نگاره ۱۲: پروفیل طولی بیانگر پله بین دو مدل استریو متوالی در داده شهر آفتاب قبل و بعد از اعمال روش پیشنهادی

### ۳-۳- آزمون تعیین ابعاد بهینه گرید اعوجاجات

به منظور بررسی و تعیین ابعاد بهینه گرید اعوجاجات برای هر یک از داده‌های فوق از تعدادی مدل استریو متوالی انتخابی در سطح بلوک استفاده شده است. به عنوان مثال ۱۱ مدل مختلف در ۱۱ منطقه از بلوک تصاویر شهر آفتاب انتخاب و میزان پله مدل با ابعاد مختلف گرید محاسبه می‌شود. همچنین مدت زمان پردازش به عنوان هزینه محاسباتی در نظر گرفته شده است. حال برای هر مدل نمودار هزینه - دقت نرمال شده مطابق نگاره ۱۳ محاسبه و با فرض وزن یکسان برای دو شاخص دقت و هزینه، نزدیک‌ترین حالت به مبدأ مختصات به عنوان حالت بهینه برای هر مدل معرفی شده است.

این کار برای تمام ۱۱ مدل انجام و ابعاد گرید با بیشترین فراوانی به عنوان گرید بهینه برای کل بلوک در نظر گرفته شده است. ابعاد گرید بهینه برای هر داده در جدول (۲) شرح داده شده است.

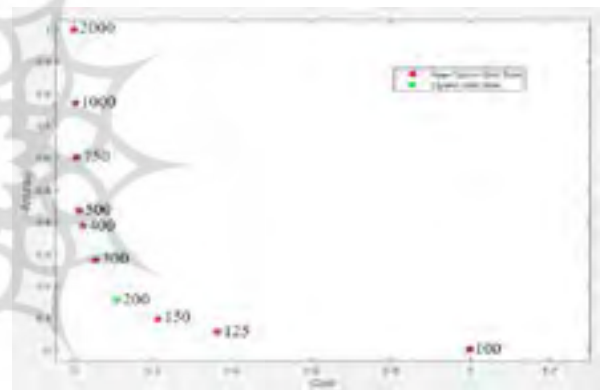
جدول ۲: ابعاد بهینه گرید اعوجاجات

منطقه	ابعاد گرید بهینه	فراوانی
شهر آفتاب	۲۰۰	۷/۱۱
آبیک	۱۵۰	۷/۱۰
کلرادو	۱۵۰	۲/۵

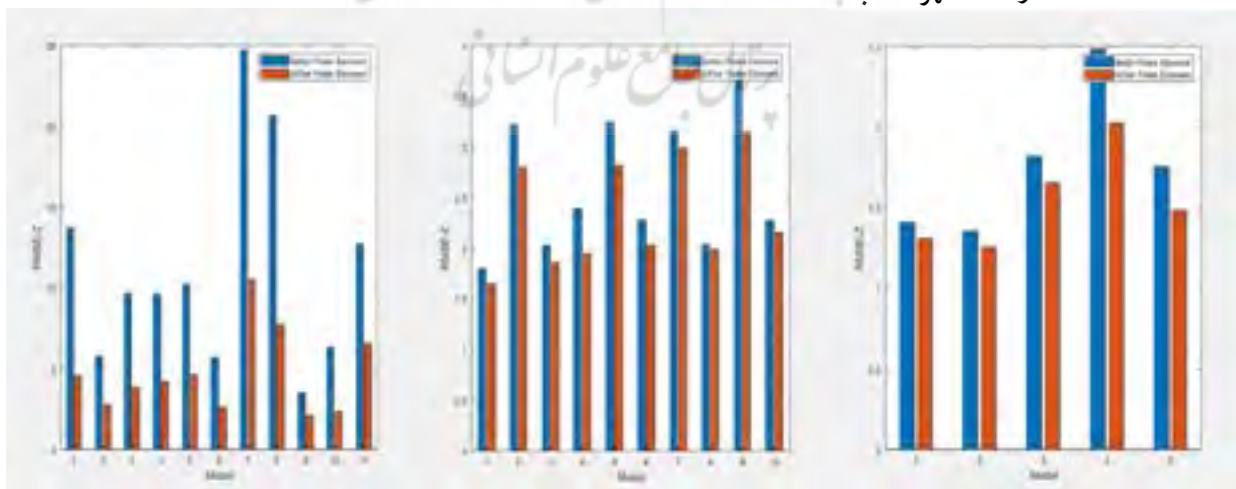
همانطور که دیده می‌شود ابعاد گرید ۱۵۰ تا ۲۰۰ پیکسل نتایج بهینه‌ای را به دنبال داشته است و توصیه می‌شود.

### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق ضمن بررسی روش‌های کالیبراسیون دوربین در پروژه‌های فتوگرامتری پهپاد، با توجه به ناپایداری دوربین غیرمتریک و وجود اعوجاجات موضعی، به ارائه روشی برای کالیبراسیون دینامیکی دوربین پرداخته شد. الگوریتم پیشنهادی به صورت پس پردازش بوده و کاهش باقیمانده‌های عکسی و افزایش دقت سازگاری مدل‌های استریو در برجسته‌بینی را به همراه دارد.



نگاره ۱۳: نمودار هزینه - دقت یک مدل دلخواه از داده شهر آفتاب



نگاره ۱۴: مقایسه خطای متوسط ارتفاعی تعدادی پله مدل استریو متوالی قبل و بعد از اعمال گرید بهینه با ابعاد ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۵۰ پیکسل مربوط به داده‌های شهر آفتاب (راست)، آبیک (وسط) و کلرادو (چپ)

### منابع و مأخذ

- 1- Agisoft, L. (2020). Agisoft metashape user manual: Standard edition. In.
- 2- Babapour, H., Mokhtarzade, M., & Valadan Zoej, M. J. (2017). A novel post-calibration method for digital cameras using image linear features. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2698-2716.
- 3- Chio, S.-H. (2016). VBS RTK GPS-assisted self-calibration bundle adjustment for aerial triangulation of fixed-wing UAS images for updating topographic maps. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22, 665-684.
- 4- Dang, T., Hoffmann, C., & Stiller, C. (2009). Continuous stereo self-calibration by camera parameter tracking. *IEEE Transactions on image processing*, 18(7), 1536-1550.
- 5- Duane, C. B. (1971). Close-range camera calibration. *Photogramm. Eng*, 37(8), 855-866.
- 6- Dumitru, P. D., Plopeanu, M., & Badea, D. (2013). Comparative study regarding the methods of interpolation. *Recent advances in geodesy and Geomatics engineering*, 1, 45-52.
- 7- Faugeras, O. D., Luong, Q.-T., & Maybank, S. J. (1992). Camera self-calibration: Theory and experiments. Paper presented at the European conference on computer vision.
- 8- Fraser, C., & Brown, D. (1986). Industrial photogrammetry: New developments and recent applications. *The Photogrammetric Record*, 12(68), 197-217.
- 9- Fraser, C. S., & Al-Ajlouni, S. (2006). Zoom-dependent camera calibration in digital close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(9), 1017-1026.
- 10- Gruen, A., & Beyer, H. A. (2001). System calibration through self-calibration. In *Calibration and orientation of cameras in computer vision* (pp. 163-193): Springer.
- 11- Habed, A., & Boufama, B. (2008). Camera self-calibration from bivariate polynomials derived from Kruppa's equations. *Pattern Recognition*, 41(8), 2484-2492.
- 12- Hartley, R. I. (1993). Euclidean reconstruction from uncalibrated views. Paper presented at the Joint European-US workshop on applications of invariance in

می توان نتیجه گیری کرد که استفاده از ایده فوق در دوربین های غیرمتریک با ناپایداری هندسی بالا بسیار کارآمد است به طوری که در یک نمونه، کاهش ۷۰ درصدی باقیمانده های عکسی و کاهش ۶۰ درصدی پله ارتفاعی مدل ها در برجسته بینی را به همراه داشته است. از طرفی استفاده از این الگوریتم در دوربین های غیرمتریک با پایداری هندسی بالاتر تأثیر کمتری روی نتایج داشته و در آزمون ها نشان داده شد کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی پله ارتفاعی بین مدل ها را به دنبال داشته است. با این حال در این نوع دوربین ها باز هم مدل های استریوی متوالی با پله شدید پیدا می شوند که اعمال تصحیحات فوق اگر از هزینه های محاسباتی آن چشم پوشی کنیم موجب بهبود خطاهای هندسی در برجسته بینی خواهد شد. همچنین ابعاد گرید ۱۵۰ تا ۲۰۰ پیکسل برای اعمال روش پیشنهادی توصیه می شود.

### ۵- پیشنهادات

پیشنهادات ادامه تحقیق را در سه بخش می توان خلاصه نمود. اول اینکه عوامل مختلفی نظیر وزن مشاهدات و وزن معادلات قید می تواند روی برآورد گرید اعوجاجات مؤثر باشد که با استفاده از روش VCE می توان مقادیر بهینه آنها را برآورد نمود. نکته قابل تأمل دیگر در تکمیل راهکار پیشنهادی، اعمال وابستگی زمانی بین گرید اعوجاجات در تصاویر متوالی در کنار اعمال وابستگی مکانی آنها است. در این تحقیق تنها از قیود درون عکسی استفاده شد در حالی که اعوجاجات می توانند وابستگی زمانی نیز داشته باشند. بنابراین ایده اعمال وابستگی زمانی بین گرید اعوجاجات در تصاویر متوالی در کنار اعمال وابستگی مکانی و بررسی میزان درستی آن می تواند در تحقیقات پیش رو مورد بررسی قرار گیرد. همچنین اگرچه در روش پیشنهادی استفاده از ایده اجزاء محدود به صورت پس پردازش است اما درست تر آن است که این گرید اعوجاجات همزمان با باندل اجستمنت برآورد شوند.

structure recovery for multi-planar scenes from two perspective images. Paper presented at the Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No. PR00662).

24- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), 1330-1334.

25- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Nithiarasu, P., & Zhu, J. (1977). The finite element method (Vol. 3): McGraw-hill London.

computer vision.

13- Hastedt, H., Luhmann, T., & Tecklenburg, W. (2002). Image-variant interior orientation and sensor modelling of high-quality digital cameras. INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 34(5), 27-32.

14- Heyden, A., & Astrom, K. (1997). Euclidean reconstruction from image sequences with varying and unknown focal length and principal point. Paper presented at the Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.

15- Huang, W., Jiang, S., & Jiang, W. (2021). Camera Self-Calibration with GNSS Constrained Bundle Adjustment for Weakly Structured Long Corridor UAV Images. Remote Sensing, 13(21), 4222.

16- Kruppa, E. (1939). Zur ermittlung eines objektes zwei perspektiven mit innerer orientierung. Sitz-Ber. Akad. Wiss., Wien, math. naturw. Kl. Abt., IIa (122), 1948.

17- Lei, C., Wu, F., Hu, Z., & Tsui, H.-T. (2002). A new approach to solving kruppa equations for camera self-calibration. Paper presented at the Object recognition supported by user interaction for service robots.

18- Lourakis, M. I., & Deriche, R. (1999). Camera self-calibration using the singular value decomposition of the fundamental matrix: From point correspondences to 3D measurements. INRIA,

19- Maybank, S. J., & Faugeras, O. D. (1992). A theory of self-calibration of a moving camera. International journal of computer vision, 8(2), 123-151.

20- Pollefeys, M., Koch, R., & Van Gool, L. (1999). Self-calibration and metric reconstruction inspite of varying and unknown intrinsic camera parameters. International journal of computer vision, 32(1), 7-25.

21- Pollefeys, M., & Van Gool, L. (1999). Stratified self-calibration with the modulus constraint. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21(8), 707-724.

22- Reddy, J. N. (2019). Introduction to the finite element method: McGraw-Hill Education.

23- Xu, G., Terai, J.-i., & Shum, H.-Y. (2000). A linear algorithm for camera self-calibration, motion and