

(علمی-ترویجی)

## راه‌اندازی ایستگاه کالیبراسیون دوربین‌های غیر متریک، به منظور بکارگیری در سکوهای پرنده بدون سر نشین (پهپاد)

امروزه، بکارگیری سنجنده‌های تصویربرداری غیرمتریک در سکوهای بدون سر نشین بسیار متداول شده است. بطوریکه می‌توان این روش را جایگزینی برای نقشه‌برداری زمینی در تهیه نقشه‌های بزرگ مقیاس دانست. به دلیل محدودیت‌هایی مانند ماهیت سکوی پهپاد، ابعاد و وزن سکو، استفاده از سنجنده‌های اپتیکی متریک با حجم و وزن بالا امکان‌پذیر نمی‌باشد. اغلب سنجنده‌های مورد استفاده در سکوهای پهپاد دوربین‌های سبک با ماهیت غیرمتریک می‌باشد. دانستن مقادیر پارامترهای توجیه داخلی سنجنده به منظور پایش تغییرات آنها و بهبود نتایج مثلث‌بندی این تصاویر نقش اساسی دارد. بنابراین، انجام کالیبراسیون هندسی آزمایشگاهی برای سنجنده‌های ذکر شده در شرایط مشابه در شرایط عملیاتی، نتایج مناسبتری را در مراحل بعدی تولید می‌نماید. ایستگاه موردنظر توانایی انجام مشاهدات کالیبراسیون طیف وسیعی از انواع دوربین‌های غیرمتریک را دارا بوده و با امکان ارزیابی صحت نتایج حاصل از روند کالیبراسیون، هم‌اکنون در حال خدمت‌رسانی است.

**واژه‌های کلیدی:** دوربین‌های غیرمتریک، کالیبراسیون هندسی، کنترل کیفی، سکوهای بدون سر نشین

نیکروز مستوفی<sup>۱\*</sup>، مربی، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب  
مهدی حسنلو<sup>۲</sup>، استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

\*نویسنده مخاطب، آدرس: تهران، کدپستی: ۱۹۸۱۹۷۴۵۸۱

### Construction of Non-metric Camera Calibration Station for Use in Unmanned Aerial Vehicles (UAV's)

In recent years, use of non-metric imaging sensors is becoming increasingly common in unmanned vehicles. This can be considered as an alternative to terrestrial mapping. Due to the limitations such as dimension, system weight, and the nature of UAV platform, it is not possible to use high volume and heavy metric sensors. Consequently, most sensors used in UAV platforms are light weight non-metric cameras. Determining the values of the internal parameters of the sensor is important in monitoring the variations of these sensors and improving the triangulation results of these images. Therefore, laboratory geometric calibration for these sensors under similar operating conditions produces better results in later stages. Our station is capable of performing calibration observations and also the calculations of a wide range of non-metric cameras and is currently serving in related organizations with ability to evaluate the accuracy of calibration results.

**Keywords:** Non-metric Camera, Camera Calibration, Quality Assessment, UAV

N. Mostofi<sup>1\*</sup>, Instructor, Department of Surveying, Islamic Azad University, South Tehran Branch

M. Hasanlou<sup>2</sup>, Assistant Professor, Department of Geomatics, Faculty of Engineering, University of Tehran

\*Corresponding Author, Postal Code: 1981974581, Tehran, IRAN

mostofi\_n@yahoo.com

## مقدمه

بنابر تعاریف بنیادی و بطور کلی، دوربین متریک دوربینی است که دارای ساختار هندسی مشخص و ثابتی باشد. به عبارت دیگر، مولفه‌ها و پارامترهای درون دوربین به دقت معلوم بوده و این مقادیر در بازه زمانی استاندارد کالیبراسیون دستخوش تغییر و دگرگونی نشود [۱]. این تغییرات و دگرگونی‌ها در ابعاد میکروسکوپی مورد بررسی قرار می‌گیرد و کوچکترین تغییر در این مقادیر باعث خروج دوربین از حیطة تعریف متریک خواهد شد. از آنجاکه تمامی مشاهدات و اندازه‌گیری‌های تصویری در ارتباط با این کمیت‌های درون سنجنده خواهد بود، لازم است بطور دقیق و صحیح مقادیر ذکر شده، محاسبه و بررسی شود.

در دوربین‌های تصویربرداری آنالوگ با ماهیت متریک جهت استقرار سیستم مختصات از علائم حاشیه‌ای تصویر استفاده می‌شود. درحالی‌که در دوربینهای رقومی متریک، با بکارگیری تعداد و ابعاد اجزای سازنده تصویر، به فرض ثابت بودن ابعاد و چیدمان منتظم آنها بیان می‌شود [۱]. از طرفی، در دوربین‌های غیرمتریک (آنالوگ و رقومی) نقطه اتکاء ثابت قابل دستیابی نبوده و ثبات هندسی ساختار داخلی دوربین همواره غیر قابل پیش‌بینی است. از سوی دیگر، در یک دوربین غیرمتریک غیر از صفحه حسگر و بدنه دوربین، لنز دوربین نیز دارای ساختار مشخص نمی‌باشد. یعنی پارامترهای اعوجاج شعاعی و مماسی در این نوع دوربین‌ها نامعلوم بوده و علاوه بر مجهول بودن این مقادیر به علت ناپایداری سازه دوربین، مقادیر یاد شده با گذر زمان در اثر تغییرات محیطی مانند فشار و درجه حرارت و یا تغییرات شتاب به راحتی دستخوش تغییر می‌شود.

با توجه به گستردگی روزافزون استفاده از دوربین‌های غیرمتریک در عرصه ژئوماتیک، ابزارهای محاسباتی متفاوت و متعددی جهت یافتن مقادیر مجهول دوربین تصویربرداری موجود و در دسترس است [۲]. به‌طورکلی، ابزارهای موجود با دورویکرد کلی بینایی کامپیوتری و فتوگرامتری تهیه می‌شود. در رویکرد بینایی کامپیوتری منظور از یافتن مقادیر مجهول دوربین، بهینه‌سازی دید ریات و بهبود روند کنترل و هدایت آن است. درحالی‌که در ابزارهای مبتنی بر روابط فتوگرامتری (از جمله رابطه شرط هم خطی و معادلات دسته اشعه)، محاسبه مقادیر یاد شده به منظور بکارگیری مجهولات در روند محاسبه مختصات و کاربردهای دقیقتر می‌باشد [۳].

در تحقیقات اخیر، سای<sup>۱</sup> و همکارانش در زمینه کالیبراسیون دوربین‌های غیرمتریک با بهره‌گیری از روش تغییر فوکوس و آنالیز تغییرات با استفاده از نقاط هدف دایره‌ای شکل،

اقدام به محاسبه پارامترهای مجهول دوربین شده است. در مطالعه آنها جهت دوری از مسائل مربوط به مات‌شدگی نقاط هدف به علت قرارگیری در فواصل متفاوت نسبت به دوربین، از روش تحلیل جابجایی فاز برای کالیبراسیون استفاده شده است [۴-۵]. به منظور افزایش دقت استخراج مدل سه بعدی قطعات صنعتی و کنترل کیفی آنها، اوسامنتیاگا<sup>۲</sup> و همکارانش کالیبراسیون همزمان چهار دوربین غیرمتریک را برای پایش تولیدات خط تولید صنعتی را بکار برده و بهبود نتایج حاصل از کالیبراسیون را ارائه نمودند [۶]. از سوی دیگر، کرامر<sup>۳</sup> و همکارانش روشی را جهت کالیبراسیون دوربین با استفاده از انجام خودکالیبراسیون مبتنی بر روش تبدیل فوریه ابداع و ارائه نمودند [۷].

پروفیسور فریزر<sup>۴</sup> و همکارانش، با بکارگیری روش‌های مبتنی بر فتوگرامتری و با بهره بردن از مزایای مدل‌های ریاضیمستحکم و استفاده از مدل‌های شناخته شده اعوجاجات، اقدام به مدلسازی روند کالیبراسیون دوربین نمودند. در این تحقیقات با اتکاء به استحکام فیزیکی یکسری نقاط هدف در فضای جسم، با فرض ثابت بودن موقعیت نسبی آنها در طول مدت تصویربرداری، اقدام به حل مجهولات بصورت توأم و در یک روند تعدیل آزاد شده است [۸]. از آنجاکه در این روش‌ها تنها وسیله رسیدن به پارامترهای مجهول استفاده از استحکام فیزیکی نقاط، فارغ از موقعیت و مختصات آنها است، بنابراین بدون نیاز به مشاهدات ژئودتیکی که خود در بسیاری از موارد عامل محدودیت محاسبات بشمار می‌روند، پروسه کالیبراسیون به انجام می‌رسد [۹]. بهترین و کاراترین مثال برای این روش را می‌توان روش خودکالیبراسیون دانست که بنا بر اهمیت استفاده از این روش در تحقیق حاضر بطور کاملتر توضیح داده خواهد شد [۱۰].

با توجه به توسعه روز افزون کاربرد سکوها پهباد در تهیه نقشه‌های بزرگ مقیاس از یک سو و بکارگیری دوربین‌های غیرمتریک در این سکوها از سوی دیگر، زیرساخت آماده‌ای جهت پایش تغییرات هندسی این دوربین‌ها در کشور موجود نبوده است. روندهای موجود بطور عمده در قالب مطالعاتی بوده و بدون اتکاء به سیستم نرم‌افزاری ویژه جهت کنترل کیفی مشاهدات و نتایج مبتنی بر آزمون‌های سرشکنی‌شده است. از این‌رو، حاصل این تحقیق برای اولین بار در کشور به عنوان آزمایشگاهی متمرکز جهت انجام کالیبراسیون هندسی انواع دوربین‌های غیرمتریک پیاده شده است.

2. Usamentiaga  
3. Cramer  
4. Fraser

1. Cai

## روش تحقیق

همانگونه که در بخش قبل اشاره شد، مدل اصلی بکار رفته در این پژوهش مبتنی بر روابط پایه<sup>۵</sup> شرط هم خطی<sup>۵</sup> و خودکالیبراسیون می باشد که در ادامه تشریح می شود. روندنمای شکل ۱، بیانگر مراحل اجرایی تحقیق حاضر است.



شکل (۱): مراحل اجرایی تحقیق.

**الف) خودکالیبراسیون:** خودکالیبراسیون، یک مفهوم تعمیم یافته کالیبراسیون در حین انجام مشاهدات<sup>۶</sup> است. در این روش مشاهدات واقع بر روی شیء، هم به عنوان داده لازم برای تعیین نقاط بر روی شیء و هم برای تعیین پارامترهای کالیبراسیون دوربین استفاده می شود. در این روش معادلات شرط هم خطی با معادلات مربوط به پارامترهای کالیبراسیون ترکیب شده و مجموعه معادلات حاصل به طور همزمان حل می شود. ویژگی مهم روش خودکالیبراسیون در عدم نیاز به نقاط کنترل در فضای شیئی است. تعداد و انواع پارامترهای اضافی استفاده شده در این روش نقش اساسی در دسترسی به دقت بالا را دارند [۹-۱۲].

مدل ریاضی خودکالیبراسیون، از دو دهه اخیر تا کنون مورد استفاده کاربران فتوگرامتری قرار گرفته است. با استفاده از قابلیت‌های خاص این مدل ریاضی، می توان پارامترهای توجیه داخلی (پارامترهای کالیبراسیون سنجنده) و توجیه خارجی (پارامترهای وضعیت) سنجنده و مختصات سه بعدی نقاط مورد اندازه گیری را بدون احتیاج به وجود نقطه کنترل زمینی، بدست آورد. نتایج حاصل برای پروسه کالیبره نمودن سیستم با این روش، مستقل از نوع ساختار قرارگیری ایستگاه-های تصویربرداری می باشد که بنابر این دلیل نیز مدلی مناسب جهت بکارگیری در فتوگرامتری برد کوتاه خواهد بود. اساس مدل ریاضی بکار رفته در مدل خودکالیبراسیون، بر اساس معادلات شرط هم خطی است. در معادلات شرط هم خطی توسعه یافته (رابطه<sup>۱</sup>)، ترم‌های کالیبراسیون (پارامترهای توجیه داخلی) بصورت جملات و به عنوان انحراف مرکز تصویر، C به عنوان فاصله اصلی سنجنده بیان می شود. همچنین، عوامل مختلف مختل کننده شرط هم خطی از جمله اعوجاجات لنز و غیره به صورت رابطه<sup>(۲)</sup> ذکر می شود [۱].

$$x - x_o + \Delta x = -c \frac{R_1}{R_3} \quad (1)$$

$$y - y_o + \Delta y = -c \frac{R_2}{R_3}$$

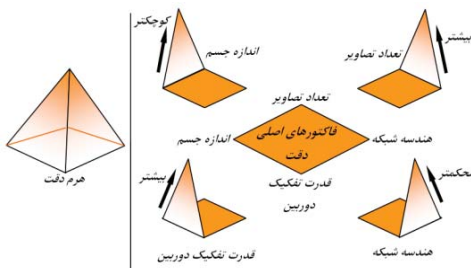
$$\Delta x = \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_{af} + \Delta x_{ref} + \dots \quad (2)$$

$$\Delta y = \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_{af} + \Delta y_{ref} + \dots$$

در رابطه<sup>(۲)</sup> جملات با زیرنویس r، نشان دهنده اعوجاج شعاعی لنز، جملات با زیرنویس d بیانگر اعوجاج مماسی لنز، جملات با زیرنویس af بیانگر خطای افاین<sup>۷</sup> در صفحه تصویر و خطای ناشی از انکسار نور با زیرنویس ref نشان داده می شود. لازم به ذکر است که مقادیر نسبی هر کدام از جملات فوق، وابسته به خصوصیات سیستم تصویربرداری می باشد. اگرچه، در اغلب موارد اعوجاج شعاعی لنز در تصویر به فرم اعوجاج شبکه ای و اعوجاج مماسی نیز معمولاً دارای مقدار بسیار کوچکی است.

حال، با قرار دادن پارامترهای مذکور در معادلات دسته اشعه، با توجه به درجه آزادی بالای موجود در شبکه متقارب و انجام تعدیل همزمان پارامترها، مجهولات مورد نظر بدست می آید. تفاوت عمده و مزیت اصلی این روش سرشکنی و تعدیل همزمان پارامترهای توجیه داخلی و مختصات نقاط در یک سرشکنی آزاد می باشد که باعث می شود که اولاً مجهولات کالیبراسیون از دستگاه معادلاتی با درجه آزادی بالا بدست آید و ثانیاً سرشکنی آزاد مجهولات موجب کاهش آثار فیزیکی ناشناخته دخیل در برقراری ارتباط بین فضای تصویر و فضای جسم می شود [۱۳].

**ب) طراحی شبکه فتوگرامتری:** همانگونه که پیشتر توضیح داده شد، برای دستیابی به دقت‌های مورد نظر لازم است یکسری پردازش‌های اولیه قبل از انجام مشاهدات صورت پذیرد. در حالت کلی، عوامل موثر در دقت نهایی به صورت شکل ۲ در نظر گرفته شده است که حد مطلوب بین هر کدام از عوامل موثر با انجام طراحی شبکه بدست می آید [۱۳].



شکل (۲): فاکتورهای اساسی مطرح در رسیدن به سطح دقت بالاتر.

### آزمون‌های بعد از سرشکنی

روش‌های معمول معیار دقت عبارتند از واریانس هر پارامتر، حداکثر یا متوسط واریانس‌های هر مختصه XYZ و یا همه مختصات نقاط شئی، بیضی‌های خطا و مقادیر و بردارهای ویژه ماتریس  $\hat{C}_x$  و غیره. از آنجاکه معیارهای دقت به ماتریس‌های  $\hat{C}_x$  و  $\hat{C}_y$  وابسته‌اند و ترم  $\hat{\sigma}_0^2$  مبتنی بر برآورد باقیمانده مشاهدات است، معیار صحت قابل تعیین می‌باشد. بعد از انجام سرشکنی، می‌توان آنالیزهایی مبنی بر سازگاری ماتریس وزن انتخابی، امکان وجود خطای سیستماتیک در مشاهدات و نهایتاً به کمک فاکتور واریانس ثانویه، دقت حاصل را روی تک تک مجهولات بدست آورد. یکی از آزمون‌ها آماری مورد استفاده بعد از سرشکنی، تست آماری فاکتور واریانس ثانویه می‌باشد. عموماً فاکتور واریانس اولیه (قبل از سرشکنی) مقدار مشخصی مانند عدد یک در نظر گرفته می‌شود. بعد از انجام سرشکنی مقدار برآورد شده آن، یعنی فاکتور واریانس ثانویه بدست می‌آید. در صورتیکه فرض برابر بودن  $\hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$  در آزمون‌های آماری رد نشود، آنگاه می‌توان دانست که اولاً ماتریس وزن انتخاب شده ماتریس مناسبی بوده و نشانگر این واقعیت است که خطای فاحش<sup>۱۰</sup> در مشاهدات وجود ندارد [۱۷].

در شروع سرشکنی مقدار اولیه فاکتور واریانس (ماتریس وزن واحد) را به علت عدم اطلاع از وزن مشاهدات، عدد یک انتخاب نموده و سرشکنی آغاز می‌شود. بعد از اتمام محاسبات سرشکنی، مقدار محاسبه شده فاکتور واریانس (فاکتور واریانس ثانویه) برای مشاهدات، برآورد می‌شود. در مرحله دوم با جایگذاری مقدار فاکتور واریانس جدید با عناصر قطر اصلی ماتریس وزن، محاسبات سرشکنی تکرار می‌شود. اگر مقدار حاصل برای فاکتور واریانس ثانویه در این مرحله، در آزمون آماری در بازه قبولی (سطح اطمینان ۹۵٪) قرار گیرد، مورد تایید قرار خواهد گرفت [۱۲ و ۱۵]. حال در صورتی که تست آماری انجام شده، فرض  $\hat{\sigma}_0^2 = \sigma_0^2$  را رد کند، آنگاه لازم است یک بار دیگر سرشکنی با استفاده از  $\hat{\sigma}_0^2$  بجای  $\sigma_0^2$  و سپس بار دیگر تست آماری سازگاری  $\hat{\sigma}_0^2$  با  $\sigma_0^2$  انجام پذیرد. در صورت رد مجدد این تست مشخص می‌شود که در مشاهدات انجام شده اشتباه یا خطای سیستماتیک وجود دارد که لازم است با استفاده از روش‌های موجود، اقدام به حذف آنها از مشاهدات نمود [۱۸].

هدف از طراحی شبکه‌های فتوگرامتری برد کوتاه، ارضای معیارهایی نظیر دقت، قابلیت اطمینان و هزینه می‌باشد. مبنای طراحی شبکه‌ها این روش، مبتنی بر مثلث‌بندی دسته اشعه<sup>۱۱</sup> به عنوان مدل ریاضی است که در آن مختصات سه‌بعدی نقاط شئی، موقعیت و وضعیت ایستگاه‌های دوربین و پارامترهای کالیبراسیون دوربین بصورت همزمان و دقیق بدست می‌آیند. رابطه کلی انتشار خطا در این مدل ریاضی را می‌توان به عنوان مبنایی برای طراحی شبکه بصورت زیر در نظر گرفت [۱۴-۱۰]:

$$\bar{\sigma}_c = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot S \cdot \sigma = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot d \cdot \sigma_a, \quad (3)$$

که در آن،  $\bar{\sigma}_c$  متوسط انحراف معیار خطای مختصات XYZ نقاط شئی، S عدد مقیاس (نسبت فاصله متوسط دوربین تا شئی (d) به فاصله اصلی دوربین (c)،  $\sigma$  خطای متوسط مختصات xy نقاط عکسی،  $\sigma_a$  خطای متناظر زاویه‌ای برابر با  $\sigma/c$ ، q فاکتور طراحی یا ضریب استحکام هندسی شبکه و k تعداد متوسط تصاویر اخذ شده در یا نزدیک هر ایستگاه دوربین می‌باشد. به این ترتیب دقت اندازه‌گیری وابسته به چهار پارامتر اساسی قدرت تفکیک زاویه‌ای دوربین، استحکام شبکه، تعداد پرتوهای متقاطع در هر نقطه شئی و مقیاس تصویربرداری می‌باشد.

در عمل وجود قیود دید<sup>۹</sup> متعدد بهم وابسته که پیش شرط تشکیل تصویر مناسب بوده و فرایند طراحی شبکه را مقید می‌سازد، اثر قابل توجهی روی پیکربندی ایستگاه‌های دوربین گذاشته و موجب پیچیدگی طراحی می‌شوند. از طرف دیگر، معیارهای کیفیت نظیر دقت، قابلیت اعتماد و هزینه، طراحی شبکه را امری پیش از پیش پیچیده می‌سازد. قیود موثر بر طراحی شبکه را می‌توان به سه گروه قیود مرتبط با فاصله، قابلیت دید و قابلیت دسترسی دوربین، قیود مرتبط با معیارهای کیفی تقسیم نمود [۱۵].

در راستای کنترل کیفی نتایج و برای اطمینان از صحت آنها نیز لازم است یکسری آزمون‌های آماری نیز روی مقادیر حاصل از فرایند تعدیل انجام گیرد تا بتوان کیفیت و یا دقت نهایی مجهولات را نیز بدست آورد. در این پژوهش، این مهم با طی چهار مرحله به انجام رسیده است که در ادامه تشریح می‌شود. لازم به ذکر است که هیچیک از ابزارهای کالیبراسیون موجود، روند کنترل کیفی نتایج را به صورت جامع مانند آنچه در این پژوهش انجام شده است، انجام نمی‌دهد [۱۶].

مشاهدات دارای استحکام مناسبی می‌باشد. همانگونه که قبلاً نیز توضیح داده شد، مقادیر وابستگی بین پارامترها نباید بیشتر از ۰/۷ باشد. به‌طورکلی، وجود نقاط مینایی با پایداری مناسب، برای هر دو روش کالیبراسیون امری اجتناب‌ناپذیر است [۱۰ و ۲۰].

### اجرا و پیاده‌سازی

الزامات مشخص شده در مبنای ریاضی، مبنای عمل در این مرحله بوده و با ایجاد سخت‌افزارهای فیزیکی و بستر پایه انجام مشاهدات و پیاده‌سازی نرم‌افزاری مراحل انجام محاسبات کالیبراسیون و کنترل کیفی آنها منجر به ایجاد ایستگاه کالیبراسیون دوربین‌های غیرمتریک می‌شود.

**الف) ایجاد زیرساخت فضای مشاهداتی:** با توجه به تحقیقات انجام شده فضای استاندارد مشاهدات<sup>۱۲</sup> «کنج سه وجهی» به عنوان گزینه مناسب برای اجرا در آزمایشگاه انتخاب شد. با توجه به فضای در نظر گرفته شده در فضای آزمایشگاه و سایر شرایط موجود در نهایت اقدام به ساخت این فضای استاندارد مشاهدات شد [۲۰-۱۹]. این نوع فضای استاندارد مشاهدات به دلیل اشغال فضای کم و هزینه ساخت و نگهداری پایین است. از طرفی، به لحاظ وجود مفهوم عمق در این فضا محاسبات با صحت مناسبی منجر به یافتن مقادیر کالیبراسیون می‌شود. فضای استاندارد مشاهدات کنج سه وجهی در نظر گرفته شده شامل نقاط هدف بازتابنده کددار و معمولی است. اهداف کددار تعداد کمتری از نقاط هدف معمولی دارند و برای ارضاء قید حداقل تعداد پیکسل‌ها و رهایی از محدودیت ابعاد نقاط هدف، قطرهای متفاوتی دارند. مستحکم بودن ساختار فضای استاندارد مشاهدات و در نتیجه پایه‌ای که قرار است فضای استاندارد مشاهدات روی آن قرار بگیرد عامل مهمی است که برآورده نکردن آن در طولانی مدت باعث تغییر شکل صفحات فضای استاندارد مشاهدات و تغییر زاویه‌های صفحات آن می‌شود. این موضوع ساختار شبکه طراحی شده را دچار نقص می‌کند.

برای استحکام بخشی و دادن ثبات سازه‌ای به تست فیلد لازم است. اسکلتی مستحکم و حتی الامکان صلب برای آن طراحی و ساخته شود. جهت تأمین استحکام و پایداری کافی در این اسکلت، از پروفیل فلزی ۴ سانتی‌متر در ۶ سانتی‌متر و با انجام جوشکاری اتصالات استفاده شده است.

### تست صحت شبکه از طریق کنترل طول‌های معلوم

روش دیگری که می‌توان از طریق آن صحت محاسبات انجام شده در شبکه را بدست آورد، بررسی از طریق طول‌های اندازه‌گیری شده است. بدین ترتیب که با برآورد مجدد مقادیر طول‌های ستون مقیاس<sup>۱۱</sup> که برای معرفی مقیاس وارد محاسبات شده بودند را یکبار دیگر از موقعیت تعدیل شده دو سر آنها محاسبه می‌شود.

مقایسه نتایج حاصل از مقایسه دو طول مشاهده و محاسبه شده، به منظور کنترل مجدد روند محاسبات، برآورد مناسبی از صحت محاسبات خواهد بود. تعدادی از طول‌های در نظر گرفته شده برای معرفی مقیاس را به عنوان چک در نظر گرفته (از مقادیر آنها برای برآورد مقیاس استفاده نمی‌شود) و مقدار آن از سرشکنی محاسبه می‌شود. در صورتی که روند درستی برای محاسبات طی شده باشد، نباید اختلاف فاحشی بین مقادیر مشاهده شده طول‌های چک و مقادیر محاسباتی آنها ایجاد شود.

### بررسی پایداری و استحکام دوربین

با توجه به مقادیر بدست آمده از تعدیل انجام شده برای پارامترهای توجیه داخلی، بین مقادیر بدست آمده و اعدادی که از مشاهدات قبلی به عنوان مقادیر اولیه (که قبلاً از پروسه بررسی وضعیت هندسی دوربین بدست آمده بودند) استفاده شده بودند، بررسی می‌شود که آیا اختلاف معنی داری وجود دارد یا خیر. این امر نشان‌دهنده صحت محاسبات انجام شده نیز می‌باشد [۱۸]. وجود اختلافات ناچیز بین این نتایج و نتایج مراحل قبلی می‌تواند به دلایلی نظیر رخ دهد که مهمترین آن عبارتند از:

- تغییر هندسه داخلی دوربین،
- تغییرات موجود در فوکوس دوربین و
- تغییرات ایجاد شده در هندسه شبکه های مورد استفاده.

### بررسی وابستگی بین پارامترهای توجیه داخلی و خارجی

جهت برآورد دقیق مختصات نقطه اصلی یا به‌طورکلی تر کاهش وابستگی آماری پارامترهای توجیه خارجی و کالیبراسیون لازم است به لزوم ایجاد تنوع زوایای گردشی دوربین حول محور اپتیکی اشاره نمود [۱۳]. در صورت وابستگی قابل قبول پارامترهای توجیه خارجی و کالیبراسیون می‌توان نتیجه گرفت که شبکه ایجاد شده برای انجام



شکل (۴): نصب صفحات فضای استاندارد با انجام پوشش و تنظیمات لازم جهت استقرار صفحات بر روی اسکلت زیرساخت.

نقاط هدف مورد استفاده در این تست فیلد از نوع بازتابنده نور می‌باشد. کنتراست نقطه هدف در سطح فضای استاندارد مشاهدات یکی از مهمترین پارامترهای آن است، برای اندازه‌گیری دقیق مرکز نقاط باید کنتراست آن بالا در نظر گرفته شود. این عمل در فتوگرامتری برد کوتاه معمولاً با کمک فلاشرهای با سرعت بسیار بالا و قدرت کم در یک محیط کم نور انجام می‌شود. در این حالت تصویری با کنتراست بسیار بالا شبیه به تصاویر باینری تولید می‌شود. جنس سطح نقطه در این عمل بسیار مهم است. نقاط هدف در این پروژه، از مواد بازتاب دهنده نور ساخته شده اند تا ضمن ثبت بیشترین مقدار بازتاب نور فلاش، کنتراست تصویر نیز حاصل بهتر شود. مشخصه مهم دیگر که در نقاط هدف از نوع بازتابنده دارای اهمیت فراوانی است میدان بازتابش نقطه است. این میدان در نقاط هدف معمولی و نقاط هدف کددار وجود ندارد. این خاصیت باعث می‌شود نقاط هدف که زاویه برخورد اشعه دوربین با آنها از یک مقدار معین (زاویه میدان دید نقطه) کمتر باشد در تصویر ثبت نشود. الگوریتم‌های یافتن مرکز نقطه هدف باید از هر نقطه حداقل ۱۰-۵ پیکسل مشاهده کنند تا بتوانند مرکز آن را به دقت محاسبه کنند. اگر زاویه اشعه وارد شده از دوربین به نقطه هدف از مقدار مشخصی (معمولاً ۳۰ درجه) کمتر باشد تعداد پیکسل‌های ثبت شده و دقت محاسبه مرکز کاهش پیدا می‌کند. نمونه‌ای از نقاط مورد استفاده در شکل ۵ نشان داده شده است.

مراحل انجام این قسمت از کار در شکل ۳ نمایش داده شده است.

صفحات فضای استاندارد مشاهدات متشکل از سه صفحه از جنس MDF با ضخامت ۱۶ میلی‌متر ساخته شد. بنابراین، در این راستا دقت شد که ورق‌های MDF کاملاً تخت و بدون اعوجاج و برآمدگی و زدگی باشند تا بتواند نقش یک صفحه مسطح را در محاسبات طراحی شبکه ایفا کند. جهت استحکام اتصال پوشش وینیلی سطوح با سطح صفحات تست فیلد، از ورق MDF با پوشش براق استفاده شد. ورق‌های MDF سازنده فضای استاندارد مشاهدات با روکشی به رنگ مشکی مات وینیلی<sup>۱۳</sup> پوشانده شد. این روکش باعث می‌شود سطح سفید نقاط هدفی که بر روی فضای استاندارد مشاهدات نصب می‌شود در زمینه مشکی با کنتراست بارز دیده شوند و درک و تشخیص این نقاط را برای الگوریتم‌های تشخیص مرکز نقطه هدف، آسان شود. در ضمن، استفاده از بافت مات باعث جلوگیری از انعکاس نور تابیده از منابع کمکی خواهد شد. لازم به ذکر است که با تأکید بر جامعیت کاربرد تست فیلد در فاز دوم پروژه، ابعاد مورد نظر برای صفحات تست فیلد ۱/۵ در ۱/۵ متر تهیه شده است (شکل ۴).

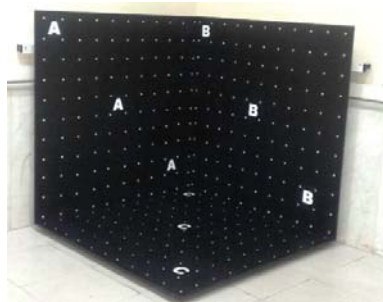


شکل (۳): اسکلت فلزی زیرساخت فضای استاندارد بعد از ساخت و پوشش توسط رنگ آمیزی.



شکل (۶): نصب نقاط بازتابنده بر روی صفحات و نشانه‌گذاری آنها با علائم و حروف.

محل قرارگیری فضای استاندارد مشاهدات در محیط آزمایشگاه به دلیل وابسته بودن مکان‌های ممکن عکس‌برداری به آن بسیار مهم است. فضای استاندارد مشاهدات باید در مکانی قرار بگیرد که کمترین تحرک در اطراف آن انجام پذیرد. مکان فضای استاندارد مشاهدات نباید در نزدیکی عواملی باشد که ممکن است در آینده به عملیات عکس‌برداری آسیب بزنند. با توجه به الزامات مورد بررسی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در فضای آزمایشگاه، ضمن بررسی فواصل ممکن از تست فیلد، محل مناسب برای استقرار تست فیلد مطابق با شکل ۷ با استفاده از اتصال صلب در آزمایشگاه مستقر شد.



شکل (۷): تثبیت اتصال تست فیلد در آزمایشگاه با استفاده از نقاط تعبیه شده.

در جهت جامع‌سازی هرچه بیشتر آزمایشگاه و امکان استفاده از آزمایشگاه برای مقاصد مختلف اجرایی و تحقیقاتی و با نظر ناظر محترم پروژه اقدام به تغییر عمده در فضای آزمایشگاه شد. در این مرحله دیوارهای اطراف محل استقرار با استفاده از رنگ آکرلیکی و هماهنگ با زمینه تست فیلد، به رنگ سیاه نقاشی شده و در فواصل منظم با استفاده از نقاط نشانه کددار نشانه‌گذاری شد. جهت ایجاد پوشش مناسب نقاط در فضای بین نقاط هدف کددار از نقاط بازتابنده نور نیز بهره گرفته شد. در شکل ۸ وضعیت نهایی آزمایشگاه نمایش داده شده است.



شکل (۸): نقاط هدف بازتابنده نور، آماده جهت نصب بر صفحات تست فیلد.

اگرچه تعداد نقاط هدف در شبکه اثر کمی روی دقت مثلث‌بندی نقاط شئی دارد اما، تعداد نقاط عکسی باید به حدی باشد که نه تنها موجب محاسبه دقیق پارامترهای توجیه خارجی<sup>۱۴</sup> سنجنده شود، بلکه در روند انجام خودکالیبراسیون با داشتن پراکندگی مناسب در سطح تصویر، برآورد پارامترهای کالیبراسیون عدسی را با قابلیت اعتماد آماری قابل قبولی میسر سازد. حداقل تعداد ۱۲ تا ۲۰ نقطه که به شکل مناسبی در سطح تصویر پراکنده شده‌اند به عنوان شاخصی مناسب برای این قید بصورت تجربی پذیرفته شده است. یک روش نسبتاً مناسب و ساده برای پیاده‌سازی قید پراکندگی نقاط عکسی، محاسبه نسبت مساحت کوچکترین چندضلعی محدب محاط<sup>۱۵</sup> بر نقاط تصویری به مساحت کل تصویر می‌باشد. هر چه این نسبت بیشتر باشد یعنی نقاط عکسی، سطح بیشتری از تصویر را پوشانده‌اند و در نتیجه نه تنها خودکالیبراسیون دوربین بلکه ترفیع فضایی عکس نیز از استحکام بالاتری برخوردار خواهد بود. بر این اساس با توجه به روابط بیان شده مقرر شد اهداف بازتابنده در فواصل منظم ۱۲ سانتی‌متری در راستای افقی و قائم در سطح صفحات تست فیلد نصب شوند. مراحل نصب این نقاط و نتیجه این اقدام در شکل ۹ نمایش داده شده است.



14. Exterior Orientation Parameters  
15. Convex-Hull

شکل (۹): سکوی عکسبرداری با امکان اعمال زاویه های مختلف و موقعیت کنترل کننده الکترونیکی و نقاله تنظیم زاویه.

### ج) ایجاد زیرساخت تعریف مقیاس در فضای

**استاندارد:** جهت اجتناب از بکارگیری نقاط کنترل مختصات دار، که مستلزم انجام مشاهدات ژئودتیک می باشد، ضمن استفاده از استحکام هندسی تست فیلد، با بکارگیری معادلات دسته اشعه اقدام به تعریف «ستون مقیاس» می شود. در مواردیکه هدف از انجام مشاهدات، صرفاً انجام کالیبراسیون و محاسبه مقادیر مجهول توجیه داخلی<sup>۱۶</sup> باشد، عدم وجود ستون مقیاس خللی در محاسبات ایجاد نمی کند. نقشی که تعریف مقیاس در این روند دارد، به عنوان ابزاری جهت کنترل صحت مشاهدات و محاسبات می باشد. بنابراین، با توزیع مناسب طول های معلوم و قابل اندازه گیری مستقیم در سطح تست فیلد به این امر اقدام شد. در تحقیقات مربوط به پروفوسور فریزر و همکارانش مراحل بکارگیری ستون مقیاس تشریح شده است. از آنجاکه این ستون ها با استفاده از آلیاژهای ویژه و با مشاهدات ژئودتیک ساخته شده و عموماً به لحاظ اقتصادی خرید این ابزارها مقدور نیست، از این رو تعریف این کمیت با استفاده از تعبیه نمودن نقاط هدف که قابلیت اندازه گیری مستقیم فاصله بین آنها ممکن است انجام شده است. ساختار فنی آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در روند مشاهدات همواره باید طول های مورد بحث بطور مستقل مشاهده شده و مقادیر حاصل بدون در نظر گرفتن مشاهدات قبلی این فواصل به روند سرشکنی دسته اشعه اضافه شود تا تغییرات احتمالی ابعاد تست فیلد خللی در روند محاسبات ایجاد ننماید.



شکل (۱۰): ساختار فنی نقاط نشانه جهت تعریف مقیاس: الف) دید جانبی و ب) دید فوقانی.

### د) محاسبات کالیبراسیون و گزارش گیری: در نگاه اول،

به نظر می رسد که شرایط محیط آزمایشگاه همسان با شرایط عملیاتی پرواز نیست ولی می توان با استفاده از تمهیداتی بیشترین مشابهت بین دو فضای یاد شده را ایجاد نمود. در این راستا لازم است تنظیم فوکوس دوربین بصورت ثابت و به ترتیب مقرر در عملیات پرواز برای مشاهدات آزمایشگاهی صورت گیرد. از سوی



شکل (۸): شمای کلی دیوارهای محل استقرار تست فیلد بعد از نصب نقاط هدف کددار.

### ب) ساخت سکوی مکانیزه استقرار دوربین: با توجه به

شرایط حاکم به ساختار شبکه طراحی شده جهت انجام مشاهدات، تهیه ابزاری برای تصویر برداری پایا از تست فیلد استاندارد اجتناب ناپذیر است. اگر به ابزارهای معمول و ساده مانند نردبان، جهت این پروسه اکتفا شود، پایایی و استحکام مورد نیاز بدست نخواهد آمد. سه پایه های عکسبرداری تهیه شده نیز برای ایستگاه های زمینی قابل استفاده بوده و در ارتفاع های بیشتر از ۱۵۰ سانتی متر از کف آزمایشگاه کارایی ندارند. با توجه به کارایی محدود اسلایدرهای موجود در بازار، با در نظر گرفتن الزامات مورد نیاز، اقدام به تهیه ایستگاه استقرار با امکان تغییر ارتفاع و زاویه دید موتوریزه شد. ساخت ابزار مورد بحث با رویکرد امکان کنترل ارتفاع رقومی، امکان دستیابی به ارتفاع ۳۲۰ سانتی متری از کف آزمایشگاه، امکان حرکت در آزمایشگاه و پایداری استقرار، امکان اعمال زوایای صفر تا ۴۵ درجه محور زاویه دید دوربین براساس الزام شبکه، امکان نصب پروجکتور در سکوی بالابر و امکان حمل در راستای قائم دوربین عکسبرداری تا وزن ۱۰ کیلوگرم بوده است که شمای کلی این وسیله در شکل ۹ نمایش داده شده است.





متمركز كالیبراسیون آزمایشگاهی كالیبراسیون این دوربین‌ها، به منظور بکارگیری آنها در سکوهای پهپاد ایجاد شد. با اجرای این پروژه، ضمن بومی‌سازی دانش كالیبراسیون، از خروج ارز و وابستگی به مراكز خارج از کشور جلوگیری می‌شود. در حال حاضر، مراكز مرتبط می‌توانند از این ایستگاه استفاده نموده و مقادیر عددی قابل اعتمادی از پارامترهای سنجنده‌های غیرمتریک مربوط به سکوهای بدون سرنشین را وارد پروسه مثلث‌بندی نماید. این امر باعث افزایش دقت مثلث‌بندی، کاهش مراحل تکرار جهت همگرایی جواب‌های سرشکنی نتایج و همچنین موجب صرفه جویی اقتصادی خواهد شد.

با اجرای سازوکار تشریح شده در این تحقیق، پارامترهای مجهول دوربین تصویربرداری با انجام مشاهداتی که در فضای آزمایشگاهی صورت می‌گیرد، قابل محاسبه خواهد بود. گزارش نهایی با جزئیات مورد نیاز تهیه شده و به شرح نتایج اشکال زیر و مطابق با ساختار استاندارد تهیه شده، برای یک دستگاه دوربین فیز-وان<sup>۱۸</sup> مدل آی ایکس یو-۱۰۰۰<sup>۱۹</sup> محاسبه شده است، نمایش داده می‌شود. ازجمله نتایج گزارش استاندارد می‌توان به مشخصات محاسبات سرشکنی صورت گرفته (شکل ۱۲) اشاره نمود که در آن، تعداد مشاهدات، تعداد درجات آزادی، مقدار فاکتور واریانس نهایی، دقت مشاهده نقاط می‌باشد.

Adjustment properties	Number of Observation	Degree of Freedom	Sigma0	RMSE of image coordinate (µm)
	15370	13941	1.105	0.5

شکل (۱۲): جدول مربوط به مشخصات محاسبات سرشکنی.

همانگونه که در بخش کنترل کیفی نتایج بیان شد، یکی از شاخص‌های مربوط به صحت نتایج، حذف وابستگی‌های موجود بین پارامترهای دوربین و تست طول‌های ثابت وارد شده در محاسبات می‌باشد. بنابراین، در گزارش نهایی تولید شده از طریق نرم‌افزار ایجاد شده مقادیر وابستگی اولیه و نهایی بین پارامترهای مجهول گزارش (شکل ۱۳) و نتایج مربوط به طول‌های ثابت در شکل ۱۴ و به عنوان نمونه برای دوربین فیس وان مدل آی ایکس یو-۱۰۰۰ آورده شده است. همچنین، خصوصیات فریم تصویر، ابعاد پیکسل‌های آن، مقدار فاصله کانونی اولیه (مقدار اسمی) و مقدار کالیبره شده نهایی و مختصات مرکز تصویر دوربین نیز (شکل ۱۵) جزء نتایج و گزارش نهایی است. سایر مقادیر کالیبراسیون مانند ضرایب اعوجاج شعاعی، گراف اعوجاج شعاعی اولیه و بالانس شده (شکل ۱۶)، مقادیر ضرایب اعوجاج مماسی (شکل ۱۶) و

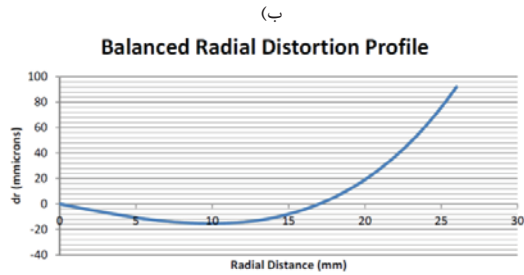
دیگر، در راستای واضح‌بینی نقاط و تشخیص صحیح و دقیق مرکز آنها لازم است عمق میدان تصویربرداری به نحوی مناسبی تنظیم شود. به همین جهت استفاده از نور کمکی جهت تصویر برداری از فضای تست فیلد اجتناب‌ناپذیر خواهد بود [۲۰]. از طرفی، با در نظر گرفتن روش محاسباتی خودکالیبراسیون، از بستر برنامه آوستورالیس<sup>۱۷</sup> جهت یافتن مقادیر مجهول دوربین استفاده می‌شود. توان بالای این نرم‌افزار در انجام محاسبات خودکالیبراسیون به همراه حل معادلات دسته اشعه یکی از عوامل انتخاب این نرم‌افزار به عنوان بستر محاسبات است. ولی روند کنترل کیفی نتایج از چهار دیدگاه اشاره شده در این نرم‌افزار پیش‌بینی نشده است. بنابراین، با پیاده‌سازی نرم‌افزار واسطی مطابق با الزامات مد نظر، اقدام به گزارش‌گیری به فرمت استاندارد تعریف شده از قبل می‌شود. نرم‌افزار واسط ضمن انجام تست آماری واریانس فاکتور ثانویه، انجام تست طول‌های معلوم و قیاس با نتایج قبلی همان دوربین و بررسی و حذف پارامترهای وابسته اقدام به تهیه گزارش کالیبراسیون دوربین مورد نظر می‌نماید. شمایی از واسط کاربر مربوط به نرم‌افزار یادشده در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱۱): واسط کاربر نرم‌افزار پیاده‌سازی شده جهت تهیه و تنظیم فایل کالیبراسیون.

## نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت دانستن دقیق و پایش تغییرات پارامترهای توجیه داخلی یک دوربین غیرمتریک، برای اولین بار ایستگاه



$$dr = k0*r + k1*r^3 + k2*r^5 + k3*r^7$$

Calibrated Principal Distance, CFL	146.943 mm	±0.002
Radial Lens Distortion Coefficient	K0=	3.46313e-003
	K1=	-1.18931e-005
	K2=	3.47409e-009
	K3=	-1.37306e-012

(ج)

(د) **شکل (۱۶):** الف) و ب) مقادیر ضرایب و گراف اعوجاج شعاعی و ج) و د) مقادیر ضرایب و گراف اعوجاج شعاعی بالانس شده.

Decentering Lens Distortion Coefficients	
P1=	-8.76225e-007
P2=	-2.34877e-006

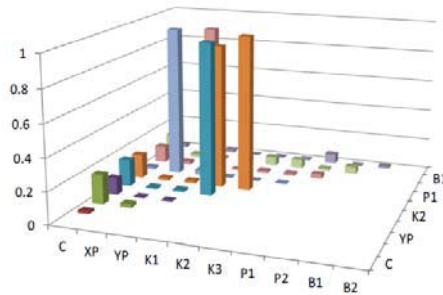
(الف)

Affine Parameters	
A1	-9.11744e-005
A2	2.57018e-005

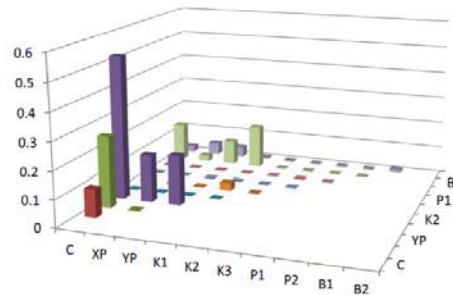
(ب)

**شکل (۱۷):** الف) مقادیر ضرایب اعوجاج مماسی و ب) مقادیر ضرایب افاین مربوط به صفحه حسگر.

ضرایب تبدیل افاین صفحه سنسور نیز در شکل ۱۷ نیز از نتایج تولید شده در گزارش نهایی برای دوربین مذکور است.



(الف)



(ب)

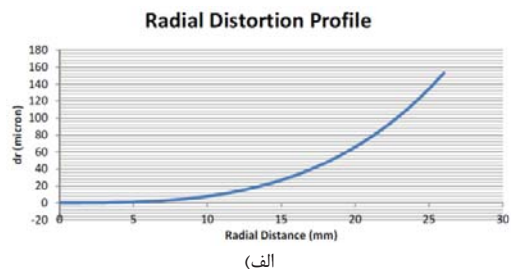
**شکل (۱۳):** مقادیر وابستگی بین پارامترها، الف) قبل از حذف پارامترهای وابسته و ب) بعد از حذف پارامترهای وابسته.

Scale bar ID.	Input Distance(mm)	Measured Distance(mm)	Diference(mm)
1	287.6200	287.6169	0.0031
2	294.3100	294.3085	0.0015
3	287.6200	287.6169	-0.0046
Mean Error(mm)			-0.001

**شکل (۱۴):** بررسی اختلاف مقادیر وارد شده و محاسبه شده برای طول‌های معلوم.

Camera Specification		
Image Format	Long Tracks=	53.4 mm / 11608 pixel
	Cross Tracks=	40.0 mm / 8708 pixel
Pixel Size	4.6*4.6 microns	
Nominal Focal Length	150 mm	
Computed Focal Length	146.4360 mm	±0.002
Principal Point	X <sub>pp</sub> =	-0.3888 mm / ±0.002
	Y <sub>pp</sub> =	-0.0133 mm / ±0.002

**شکل (۱۵):** مقادیر مجهولات دوربین.



$$dr = K1*r^3 + K2*r^5 + K3*R^7$$

Computed Principal Distance, C	146.4360 mm	±0.002
Radial Lens Distortion Coefficient	K1=	-1.18521e-005
	K2=	3.46210e-009
	K3=	-1.36831e-012

## مراجع

- [1] Atkinson, K.B., *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, Scotland, 1998.
- [2] Samdzadegan, F., Hahn, M., Sarpulakic, M., and Mostofi, N., "Geometric and Radiometric Evaluation of the Potential of a High Resolution CMOS-Camera", *The 20th International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Istanbul, Turkey, 2004.
- [3] Beyer, H.A. "Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-camera Based Photogrammetric Close-Range System", *Dissertation, ETH, Zurich, Switzerland*, 1992.
- [4] Cai, B.L., Wang, Y.W., Wu, J.J. and Wang, M.Y., "An Effective Method for Camera Calibration in Defocus Scene with Circular Gratings," *Opt. Lasers Eng.*, Vol. 114, pp. 44–49, 2019.
- [5] Tarabanis, K., Tsai, R.Y., and Allen, P.K., "Analytical Characterization of the Feature Detectability Constraints of Resolution, Focus, and Field-of View for Vision Sensor Planning", *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 59, pp. 340–358, 1994.
- [6] Usamentiaga R and Garcia, D.F., "Multi-Camera Calibration for Accurate Geometric Measurements in Industrial Environments", *Measurement*, Vol. 134, pp. 345–58, 2019.
- [7] Tang, R., Fritsch, D., and Cramer, M., "New Rigorous and Flexible Fourier Self-Calibration Models for Airborne Camera Calibration", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 71, pp. 76–85, 2012.

- [15] Abzal, A., Saadatseresht, M., and Varshosaz, M., "Development of a Novel Simplification Mask for Multi-Shot Optical Scanners", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 142, pp.12-20, 2018.
- [16] Olague G. and Mohr, R., "Optimal Camera Placement for Accurate Reconstruction", *Pattern Recognition*, Vol. 35, pp. 927-944, 2002.
- [17] Vaníček, P. and Krakiwsky, E.J., *Geodesy*, 2nd Edition, Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, 1986.
- [18] Gruen A. and Huang T.S., "Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision", Springer Science & Business Media, Berlin, Germany, 2013.
- [19] Krotkov, E. and Kories, R., "Adaptive Control of Cooperating Sensors: Focus and Stereo Ranging with an Agile Camera System", *1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*, 1988.
- [20] Saadatseresht, M., "To Developing the Automation of Vision Metrology Network Design via Vision Constraint Uncertainty Modeling and Camera Placement", Ph.D. Dissertation, *school of surveying and geospatial engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*, 2004 (In Persian).
- [8] Fraser, C.S., *Network Design*, Whittles Publishing, Scotland, UK, 1996.
- [9] Fraser, C.S., "Limiting Error Propagation in Network Design", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 4, pp. 561-570, 1987.
- [10] Fraser, C.S., "Digital Camera Self-Calibration", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 4, pp. 149-159, 1997.
- [11] Brown D.C., "The Bundle Adjustment - Progress and Prospects", *International Archive of Photogrammetry*, Vol. 21, No. 3, pp. 303-336, 1976.
- [12] Fraser, C.S. and Veres, S. A., "Self-Calibration of a Fixed-Frame Multiple-Camera System", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 11, pp. 1439-1445, 1980.
- [13] Fraser, C.S. "Network Design Considerations for Non-Topographic Photogrammetry", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 50, No. 8, pp. 1115-1126, 1984.
- [14] Fraser, C.S. "Automated Processes in Digital Photogrammetric Calibration, Orientation, and Triangulation", *Digital Signal Processing*, Vol. 8, No. 4, pp. 277-283, 1998.

