

کالیبراسیون آزمایشگاهی دوربین‌های غیرمتریک و ارزیابی دقت کالیبراسیون در اثر تغییر پارامترهای مختلف

احسان مومنی^۱، علی ابذل^۲، دکتر مسعود ورشوساز^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری دانشگاه صنعتی خواجه نصیر

Hsn.Momeni@gmail.com

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری دانشگاه صنعتی خواجه نصیر

Ali_Abzal14@yahoo.com

۳. استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیر

varshosazm@kntu.ac.ir

چکیده

یکی از مهمترین مراحل انجام یک پروژه فتوگرامتری کالیبراسیون دوربین می‌باشد. به منظور بررسی نقش پارامترهای تأثیرگذار در فرایند کالیبراسیون، یک تست فیلد آزمایشگاهی متشکل از تارگت‌های بازتاباننده با ابعاد ۵ میلیمتر و در فواصل ۲۰ سانتیمتر از هم طراحی گردید. به منظور بررسی دقت در اثر تغییر پارامترهای مختلف، در طی دو پروژه مستقل، در دو فاصله مختلف و از ایستگاه‌های مختلف از تست فیلد تصویر برداری شد. از تعدادی طول مشخص در محدوده تست فیلد که با دقت بالایی توسط یک کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شده بودند نیز به عنوان شاخص‌های مقیاسی استفاده شد. در نهایت پس از انجام پردازش‌ها، نتایج حاصله از دو پروژه با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از تعداد بهینه‌ای تصویر و شاخص‌های مقیاسی می‌توان به دقت‌هایی در حد ۱۵ میکرومتر در کالیبراسیون دوربین غیرمتریک دست یافت.

واژگان کلیدی: کالیبراسیون، دوربین غیر متریک، تست فیلد، ارزیابی دقت، فتوگرامتری، برد کوتاه.

۱- مقدمه

ظهور دوربین‌های غیرمتریک دیجیتال بعلاوه ارزیابی قیمت و در دسترس بودن این دوربین‌ها برای همه، همچنین قابلیت نرم افزارهای فتوگرامتری برد کوتاه جهت پردازش تصاویر این نوع دوربین‌ها، موجب شد تا استفاده از این نوع دوربین‌ها در تولید مدل سه بعدی مورد توجه قرار گیرد. از آنجاییکه استفاده از هر نوع دوربین اعم از متریک یا غیر متریک مستلزم دانستن هندسه داخلی دوربین و میزان استحکام آن است و سنجش قابلیت دوربین جهت رسیدن به دقت‌های مورد نظر در پروژه‌های فتوگرامتری امری است اجتناب ناپذیر، انجام یک کالیبراسیون دقیق به منظور شناخت مسیر نور در داخل سیستم نوری دوربین، ضروری است.

بسته به هدف از کالیبراسیون و نوع امکاناتی که در دسترس داریم، روش‌های مختلفی را می‌توان در پیش گرفت که معمولا روش‌های دقیق‌تر پیچیدگی‌های بیشتری دارند. به طور کلی سرشکنی و کالیبراسیون دوربین‌ها مبتنی بر دو دیدگاه است:

* پیش کالیبراسیون^۱: یافتن پارامترهای دوربین قبل از تصویربرداری، در آزمایشگاه به روش‌های مختلف.

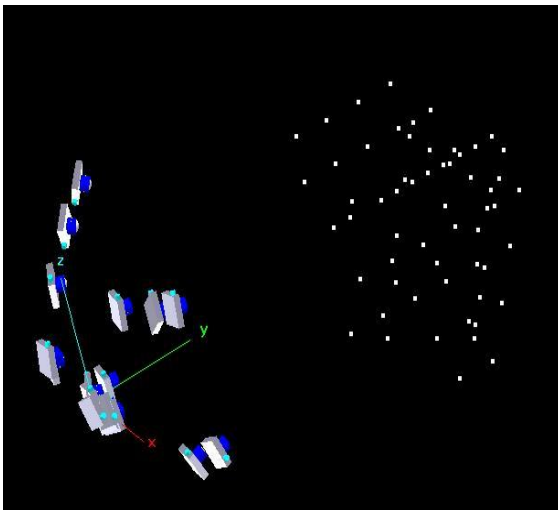
* کالیبراسیون ضمنی^۲: یافتن پارامترهای دوربین پس از تصویربرداری همزمان با سایر مجهولات.

در این مقاله ضمن ارائه نحوه فرایند کالیبراسیون دوربین دیجیتال غیرمتریک Olympus و برآورد پارامترهای توجیه داخلی این دوربین، به بررسی تغییرات دقت کالیبراسیون در اثر تغییر تعداد ایستگاه‌های تصویربرداری، تغییر تعداد تصویرها و بررسی وابستگی پارامترهای دوربین نسبت به یکدیگر پرداخته می‌شود. کلیه مراحل کالیبراسیون طی دو پروژه‌ی مستقل با شرایط یکسان، از دو فاصله مختلف دوربین تا عارضه انجام شده و نتایج مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- تجهیزات مورد استفاده در انجام کالیبراسیون

در این فرایند از یک تست فیلد ثابت که در یک گوشه سه بعدی طراحی گردیده است، استفاده شد. فواصل تارگت‌های تست فیلد از یکدیگر ۲۰ سانتیمتر است که در سه صفحه عمود بر هم قرار دارند. تارگت‌های نقاط از جنس بازتاباننده‌ها^۳ با قطر ۵ میلیمتری باشد و در بین این تارگت‌ها از تارگت‌های کاغذی دقیق هم استفاده شده است (شکل ۱). منظور از تارگت دقیق، تارگتی است که مرکز آن به راحتی و با دقت بالا تشخیص داده شود. دوربین مورد استفاده از نوع غیرمتریک دیجیتال، با سنسور از جنس CCD به ابعاد ۱۵۳۶×۲۰۴۸ پیکسل و سائز پیکسل‌های ۴ میکرومتر می‌باشد. فاصله دوربین تا تست فیلد مورد نظر ۱.۵ متر در پروژه‌ی اول و ۳ متر در پروژه‌ی دوم و بزرگنمایی دوربین در هر دو پروژه ۵ متر تنظیم گردید. سرعت شاتردوزبین نیز بر ۱/۱۰۰۰ ثانیه تنظیم گردید. همچنین طولهای اندازه‌گیری شده بین تارگت‌ها که به عنوان شاخص‌های مقیاسی^۴ مورد استفاده قرار می‌گیرد توسط یک کولیس دیجیتال با انحراف معیار اندازه‌گیری ۰.۰۱ میلیمتر اندازه‌گیری شدند.

وسایل و تجهیزات فوق‌الذکر به صورت یکسان و مشابه در دو پروژه مورد استفاده قرار گرفتند و شرایط یکسان بر محیط‌ها حاکم گردید (شکل ۲).



شکل ۲. موقعیت‌های تصویربرداری



شکل ۱. تست فیلد طراحی شده

۳- معادلات مورد استفاده در پردازش‌ها

در آنالیز تصاویر از معادلات شرط هم خطی و سرشکنی به روش باندل استفاده گردید و به منظور برآورد پارامترهای توجیه داخلی، این پارامترها نیز به عنوان مجهول وارد معادلات شدند. این معادلات دارای ۶ مجهول توجیه خارجی و ۱۰ مجهول توجیه داخلی می‌باشد. پارامترهای توجیه داخلی فاصله‌ی اصلی (C)، دو مختصات پای مرکز پرسپکتیو (Y_p, X_p)، سه پارامتر اعوجاج شعاعی لنز (K_1, K_2, K_3)، دو پارامتر اعوجاج خروج از مرکزیت لنز (P_1, P_2) و دو پارامتر افینیتی (B_1, B_2) می‌باشد که طی فرایند کالیبراسیون تعیین می‌شوند. بنابراین در هر تصویر جمعاً ۱۶ پارامتر مجهول وجود دارد. همچنین به ازای هر نقطه دو معادله شرط هم خطی تشکیل می‌شود، لذا در حل معادلات به حداقل ۸ نقطه‌ی معین نیاز داریم. افزایش تصاویر معادل افزایش تعداد معادلات در نقاط مشترک خواهد بود. به دلایل مختلف که عمده آن ضعیف بودن هندسه شبکه و نیز ضعف نشانه گذاری نقاط است، اشعه‌های متناظر در یک نقطه کاملاً منطبق برهم نیستند و اشعه‌های مختلف مختصات متفاوتی از یک نقطه در سیستم مختصات زمینی حاصل می‌کنند. بدین منظور جهت ارزیابی دقت از RMSE^۵ نقاط استفاده شد.

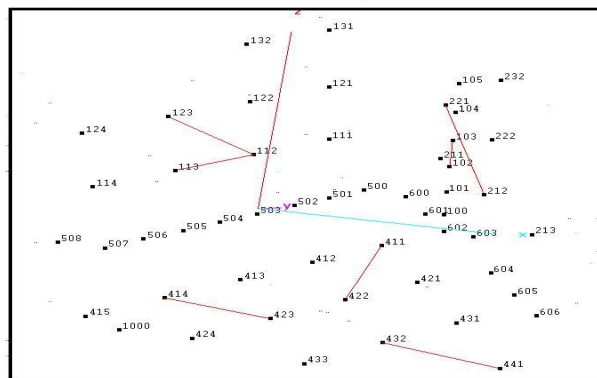
روش سرشکنی شبکه بصورت آزاد^۶ می‌باشد. در این روش سرشکنی کاستی^۷های مربوط به سیستم مختصات^۸ به مرکز ثقل شبکه انتقال می‌یابد. جوابی که با این روش سرشکنی حاصل می‌گردد دارای خصوصیات زیر است:

- جواب حاصل از روش سرشکنی آزاد با جواب مینیمم اندازه^۹ برابر است.
- جمع مقادیر قطر اصلی ماتریس وریانس-کوریانس مجهولات نسبت به دیگر سیستم مختصات‌هایی که به روش مینیمم قیود برای شبکه تعریف می‌شوند، مینیمم است.

استفاده از روش سرشکنی آزاد به علت عدم نیاز به مختصات مطلق نقاط در بسیاری از پروژه‌های برد کوتاه، بسیار مرسوم است و غالب نرم افزارهای مدل سازی برد کوتاه این روش سرشکنی را پشتیبانی می‌کنند.

۴- استفاده از شاخص‌های مقیاسی

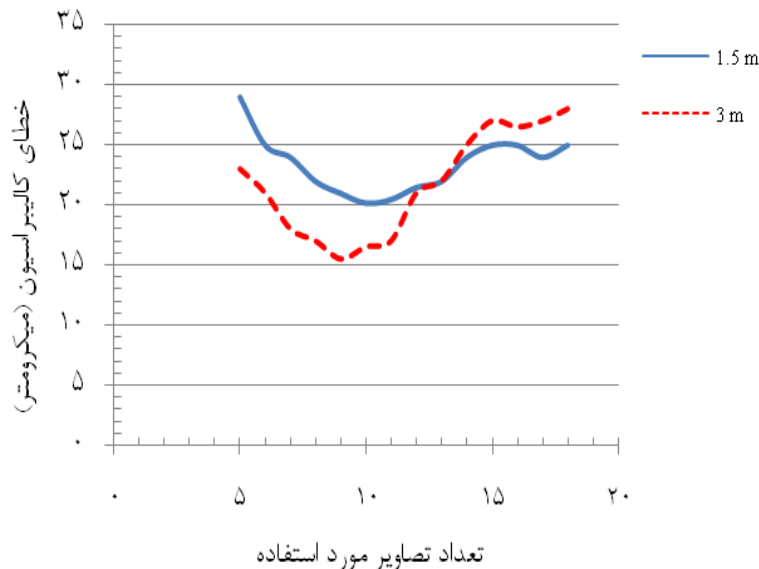
جهت ارزیابی دقت حل معادلات از تعدادی فواصل معین که توسط یک کولیس دیجیتال با انحراف معیار اندازه گیری ۰.۰۱ میلی‌متر اندازه گیری شده است استفاده گردید. نحوه توزیع این شاخص‌ها به گونه ایست که تقریباً تمام سطح تست فیلد و تصاویر را بپوشانند و در همه جهات مسطحاتی و ارتفاعی پراکندگی مناسبی داشته باشند (شکل ۳).



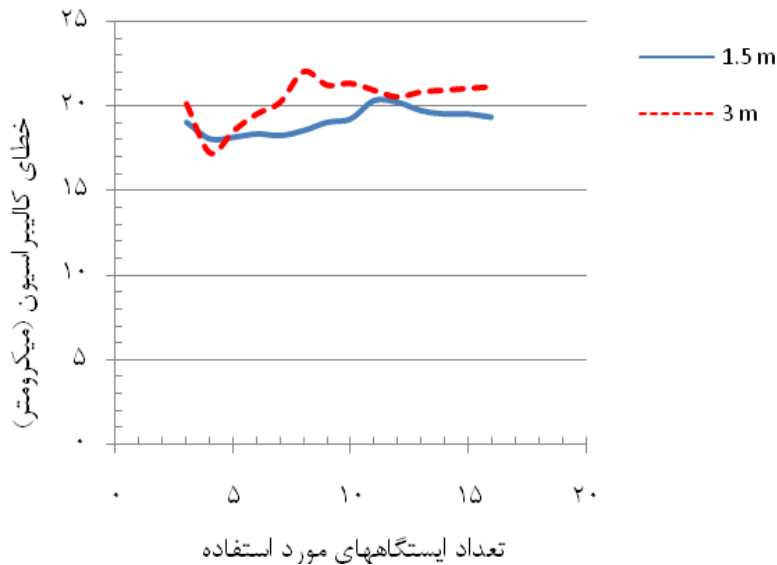
شکل ۳. نمایی از پراکندگی شاخص‌های مقیاسی

۵- کالیبراسیون دوربین و ارزیابی دقت آن

شکل ۴ نشانگر نحوه تغییرات دقت کالیبراسیون با افزایش تعداد تصاویر است. در این ارزیابی تمامی شرایط محیطی و کاری برای دو پروژه یکسان در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۴ با افزایش تعداد تصاویر میزان دقت کالیبراسیون در هر دو پروژه تا یک میزان بهبود می‌یابد و از یک حد آستانه‌ای بیشتر، دقت تغییر چندانی نمی‌کند. در واقع افزایش تعداد تصاویر همیشه باعث بهبود دقت کالیبراسیون نخواهد شد و بایستی تعداد بهینه تصاویر را در پردازش‌ها مورد استفاده قرار داد. بر اساس نتایج حاصله از دو پروژه با افزایش تعداد ایستگاه‌های تصویربرداری دقت افزایش پیدا می‌کند و افزایش دقت نیز با افزایش تعداد ایستگاه‌ها تغییرات کمتری پیدا می‌کند. به عبارت بهتر افزایش دقت در کالیبراسیون حالتی همگرا پیدا کرده و با افزایش بیش از حد تعداد ایستگاه‌های تصویربرداری افزایش دقت نخواهیم داشت (شکل ۵).



شکل ۴. نمودار ارزیابی دقت (به میکرومتر) بر اساس تعداد تصاویر. نمودار آبی رنگ (با نام 1.5 m) مربوط به پروژه اول (فاصله ایستگاه‌های تصویر برداری تا تست فیلد حدوداً ۱.۵ متر) و نمودار قرمز رنگ (با نام 3 m) مربوط به پروژه دوم (فاصله ایستگاه‌های تصویر برداری تا تست فیلد حدوداً ۳ متر) می‌باشد.



شکل ۵. نمودار ارزیابی دقت (به میکرومتر) بر اساس تعداد ایستگاههای تصویر برداری. نمودار آبی رنگ (با نام ۱.۵ m) مربوط به پروژه اول (فاصله ایستگاه های تصویر برداری تا تست فیلد حدودا ۱.۵ متر) و نمودار قرمز رنگ (با نام ۳ m) مربوط به پروژه دوم (فاصله ایستگاه های تصویر برداری تا تست فیلد حدودا ۳ متر) می باشد.

به غیر از فاصله ایستگاه های تصویر برداری و تعداد تصاویر، رفع وابستگی ها بین پارامترهای داخلی و اعوجاجات دوربین هم در میزان دقت کالیبراسیون موثر است بطوری که در نتایج نهایی المان های دوربین $B_2, B_1, P_2, P_1, K_3, K_2$ و وابستگی شدیدی در برخی از این المان ها دیده می شود. K_1, Y_p, X_p, C وابستگی بین المان ها به دو دلیل ایجاد می شود:

- وارد کردن یک المان در سرشکنی در حالی که در واقعیت آن المان تعبیر فیزیکی نداشته باشد. بطور مثال برای دوربین C_x و C_y را به طور مجزا وارد سرشکنی کنیم در حالی که دوربین واقعا یک فاصله اصلی ($C = C_y = C_x$) داشته باشد. در این صورت بین این دو المان وابستگی ایجاد می گردد و این وابستگی با ایجاد یک بایاس دقت را مخدوش می کند.
- نویز مشاهدات زیاد باشد. در واقع به علت اینکه خطای مشاهدات از مقدار یک المان (مثلا K_2 و K_3) بیشتر است هر چند این المانها واقعا وجود داشته باشند، این دو المان به هم وابسته می شوند دقت را مخدوش می شود.

لذا به منظور افزایش دقت المان هایی را که به هم وابستگی زیادی (از لحاظ عملی وابستگی بیشتر از ۰.۷) دارند از دور محاسبات خارج می کنیم. این عمل را اصطلاحا تثبیت المان می نامند، طبق نتایج حاصله از دو پروژه مشاهده شد المانهای K_1, K_2, K_3 و P_1, X_p و P_2, Y_p وابستگی زیاد به یکدیگر دارند (جدول ۱).

جدول ۱. وابستگی بین المان‌های دوربین و کشف وابستگی‌های بزرگ

	C	X _p	Y _p	K _۱	K _۲	K _۳	P _۱	P _۲	B _۱	B _۲
C	۱	۰.۱۹۳	۰.۰۶۲	۰.۰۵۲	۰.۱۴۲	۰.۱۶۹	۰.۱۰۶	۰.۰۶۷	۰.۱۴۶	۰.۰۸۲
X _p		۱	۰.۰۲۹	۰.۰۴	۰.۰۰۳	۰.۰۱۱	۰.۹۶۱	۰.۰۳۲	۰.۰۰۸	۰.۰۹۸
Y _p			۱	۰.۰۳۳	۰.۰۲۱	۰.۰۲۱	۰.۰۱۴	۰.۹۵۸	۰.۱۸۳	۰.۰۷۱
K _۱				۱	۰.۹۴۲	۰.۸۶۶	۰.۰۲۵	۰.۰۴۹	۰.۰۴۵	۰.۰۰۳
K _۲					۱	۰.۹۷۶	۰.۰۰۹	۰.۰۲۱	۰.۱۰۳	۰.۰۰۷
K _۳						۱	۰.۰۰۵	۰.۰۲۲	۰.۱۱	۰.۰۰۴
P _۱							۱	۰.۰۱۵	۰.۰۰۸	۰.۱۴۴
P _۲								۱	۰.۲۰۵	۰.۰۷۱
B _۱									۱	۰.۰۰۲
B _۲										۱

در نهایت در شرایط یکسان، تاثیر تثبیت هر یک از المان‌های دوربین به صورت جدول ۲ مشاهده شد.

جدول ۲. نتایج حاصله از تثبیت المان‌های مختلف دوربین

تعداد تصاویر	تعداد شاخص‌های مقیاسی	تعداد مشاهدات	درجه آزادی	تعداد تکرارهای سرشکنی	زمان پردازش (ثانیه)	خطا (میلیمتر)	المانهای تثبیت شده
۹	۸	۶۲۸	۳۷۱	۴	۰.۱۴	۰.۰۲۷۴	k ^۲ ,k ^۳ ,p ^۱ ,p ^۲
۹	۸	۶۲۸	۳۷۱	۴	۰.۱۴۱	۰.۰۲۷۵	k ^۱ ,k ^۳ ,p ^۱ ,p ^۲
۹	۸	۶۲۸	۳۷۱	۴	۰.۱۴	۰.۰۲۷۲	k ^۱ ,k ^۲ ,p ^۱ ,p ^۲
۹	۸	۶۲۸	۳۶۷	۵	۰.۱۵۶	۰.۰۲۷	-
۹	۸	۶۲۸	۳۷۱	۴	۰.۱۴	۰.۰۲۷۴	x _p ,y _p ,k ^۲ ,k ^۳
۶	۸	۴۰۰	۲۰۳	۴	۰.۰۷۸	۰.۰۱۵۶	k ^۲ ,k ^۳ ,p ^۱ ,p ^۲
۶	۸	۴۰۰	۲۰۳	۲	۰.۰۶۳	۰.۰۱۵۵	k ^۱ ,k ^۳ ,p ^۱ ,p ^۲
۶	۸	۴۰۰	۲۰۳	۲	۰.۰۴۷	۰.۰۱۴۶	k ^۱ ,k ^۲ ,p ^۱ ,p ^۲
۶	۸	۴۰۰	۱۹۹	۴	۰.۰۷۸	۰.۰۱۴۶	-
۶	۸	۴۰۰	۲۰۳	۲	۰.۰۶۳	۰.۰۱۵۱	x _p ,y _p ,k ^۲ ,k ^۳

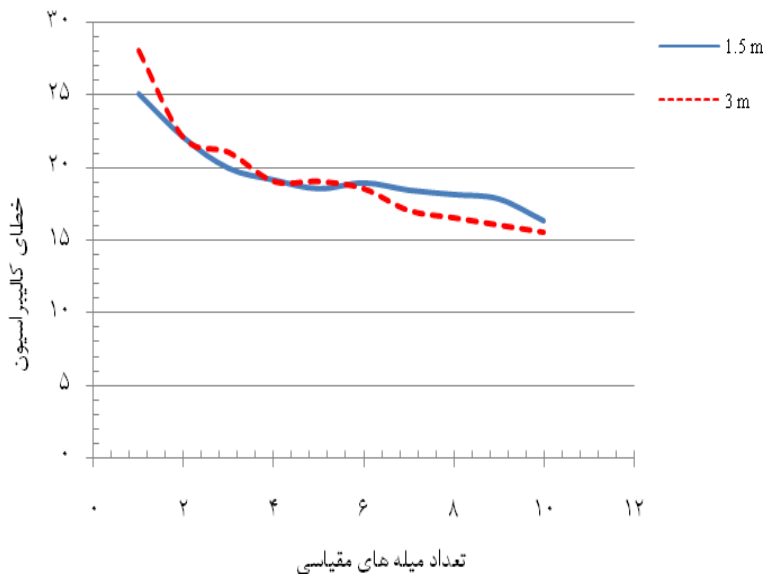
از لحاظ عملی تنها صحت و دقت در کالیبراسیون مد نظر نیست و در انجام پروژه‌ها همواره باید پارامتر مختلف دیگری از قبیل هزینه‌ها و زمان محاسبات را همزمان با صحت و دقت بهینه کنیم. از لحاظ هزینه با دو جنبه مواجه هستیم. هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر.

هزینه‌های ثابت هزینه‌هایی هستند که پروژه در حالت کلی به ما تحمیل می‌کند. هزینه خرید نرم افزار و هزینه تامین دوربین از این قبیلند. هزینه‌های ثابت اغلب مستقل از طراحی شبکه، نحوه تصویر برداری و شرایط کاری است. این قبیل هزینه‌ها قابل پیش بینی از قبل بوده و معمولاً هزینه‌های سنگینی هستند.

در مقابل هزینه های متغیری هستند که بسته به شرایط کاری و طراحی شبکه و نیز صحت و دقت مورد نیاز تعیین می شود. هزینه مربوط به تعداد تصاویر (با افزایش تصاویر هزینه های چاپ و ظهور، هزینه کارت حافظه دوربین، هزینه پردازش ها، زمان انجام پردازش ها و ... افزایش می یابند)، تعداد نقاط کنترل، و تعداد شاخص های مقیاسی از این قبیل هزینه ها هستند.

هزینه های ثابت اغلب در طی پروژه تغییری نمی کنند ولی بسته به اهداف با طراحی صحیح شبکه می توان هزینه های متغیر را کاهش داد. همان طوری که در شکل ۴ و ۵ دیده شد، همواره با افزایش تعداد تصاویر و یا افزایش تعداد ایستگاه های تصویر برداری دقت بهبود پیدا نمی کرد. بنا بر این بایستی بهینه تعداد تصاویر در انجام پروژه تعیین شود تا هزینه اضافی در پروژه ایجاد نگردد.

در دو پروژه انجام شده، که در آنها از ۹ تصویر یکسان با شاخص های مقیاسی متفاوت استفاده شد مشاهده گردید که با افزایش تعداد شاخص های مقیاسی خطاها کاهش می یابد. (سایر شرایط بر تمامی تصاویر در هر پروژه یکسان لحاظ شده بودند). نتیجه حاصله در شکل ۶ قابل مشاهده می باشد.

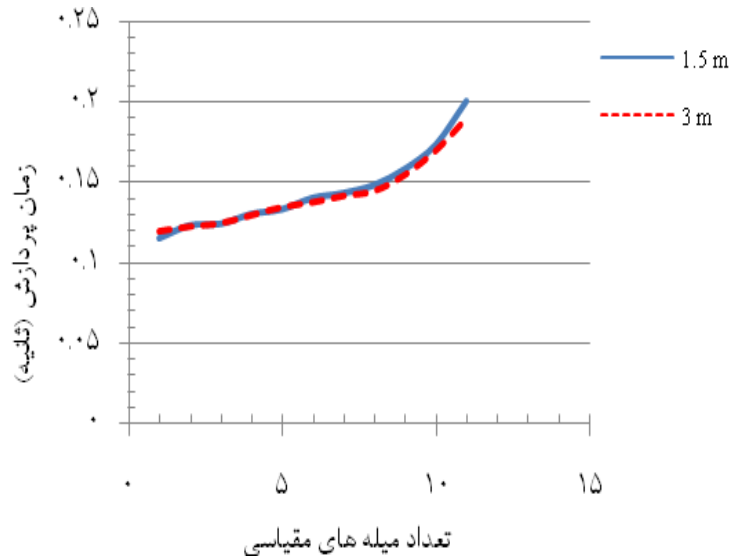


شکل ۶. دقت کالیبراسیون (میکرومتر) بر اساس تعداد شاخص های مقیاسی

همچنین نتایج در دو پروژه نشان داد که با افزایش شاخص های مقیاسی زمان مورد نیاز برای پردازش ها افزایش می یابد (شکل ۷). در نهایت پس از تعیین بهینه تعداد تصاویر و بهینه تعداد ایستگاه های تصویر برداری و پس از تثبیت المان های وابسته، مقادیر المان های دوربین به صورت جدول ۳ تعیین گردید.

جدول ۳. مقادیر کالیبراسیون دوربین (میلیمتر)

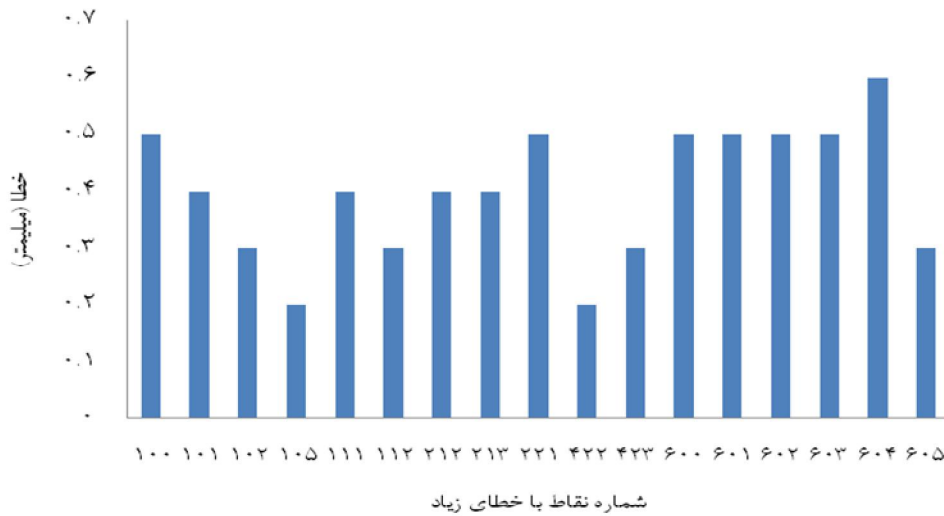
C	X_p	Y_p	K_1	K_2	K_3	P_1	P_2	B_1	B_2
۹.۱۱۳۱	۰.۱۷۹۷	۰.۳۴۳۱	۰.۰۰۲۱	۰.۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰	-۰.۰۰۰۱	-۰.۰۰۰۱



شکل ۷. زمان پردازش (ثانیه) بر اساس تعداد شاخص های مقیاسی

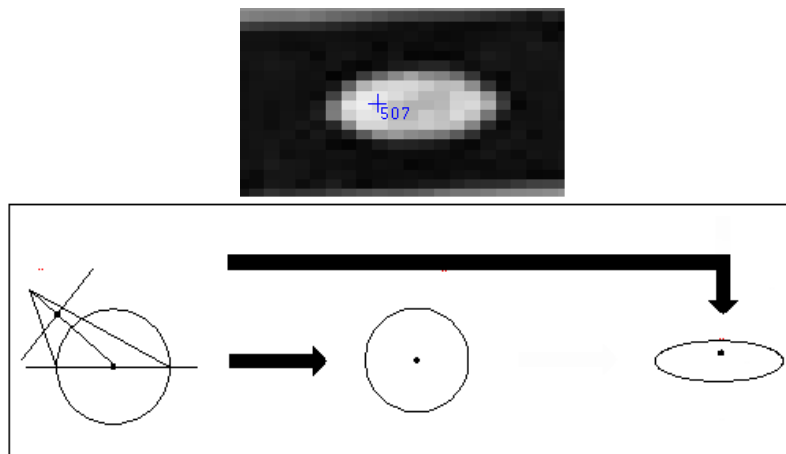
۶- نتایج و پیشنهادات

بر اساس نتایج ارائه شده در بخش های فوق با افزایش تعداد تصاویر و یا افزایش تعداد ایستگاه های تصویربرداری، میزان دقت کالیبراسیون از حد خاصی تجاوز نخواهد کرد و برای بهبود دقت به دنبال راهکارهای دیگری باید بود. از مهمترین علل کاهش دقت، تعیین غیر دقیق مرکز تارگت هاست. در شکل ۸ مقدار خطای برخی نقاط که دارای خطاهای بزرگ بوده اند نشان داده شده است.



شکل ۸. RMSE نقاط (محور افقی شماره نقاط و محور قائم میزان RMSE بر حسب میلیمتر)

با توجه به شکل ۸ و شماره نقاط مشاهده شد که RMSE مربوط به نقاطی که در تصاویر بیشترین تغییر شکل را دارند، بزرگتر از دیگر نقاط است. این نقص به نحوه‌ی یافتن مرکز تارگت توسط نرم افزار یا اپراتور بر می‌گردد. با توجه به شکل ۹ در صورتیکه تصویر با زاویه تیلت زیاد از یک تارگت دایروی اخذ شود، با در نظر گرفتن سیستم تصویر مرکزی، تشخیص صحیح مرکز تارگت دچار اختلال می‌شود. این امر سبب ضعف در تعیین مرکز تارگتهایی که در موقعیت با تیلت بالا قرار دارند خواهد شد. بخصوص زمانی که از فاصله نزدیک از تارگت‌ها تصویربرداری شود. به منظور کاهش یا حذف این خطا بایستی بعد از حل معادلات و بدست آوردن پارامترهای توجیه، میزان جابجایی مرکز تارگتها را بدست آورده، به مشاهدات اعمال نموده، معادلات را حل کرده و پارامترها را طی یک روند تکرار شونده برآورد نمود.



شکل ۹. خطای یافت شده در تشخیص مرکز تارگت (شکل بالا) و نحوه قرار گرفتن مرکز تارگت در تصویر تیلت دار (شکل پایین)

۷- نتیجه گیری

بر اساس تحقیقات انجام شده در دو پروژه مستقل که در شرایط یکسان انجام شد دقت کالیبراسیون دوربین تابعی از پارامترهای مختلف از قبیل تعداد تصاویر، تعداد ایستگاههای تصویربرداری، نوع تارگت ها، تعداد و پراکندگی شاخص‌های مقیاسی (از لحاظ مسطحاتی و ارتفاعی) و فاصله ایستگاه ها تا تست فیلد است. برای انجام یک کالیبراسیون بهینه لازم است پارامترهای فوق الذکر را با در نظر گرفتن زمان و هزینه ها، به صورت همزمان بهینه کرد.

نتایج حاصله نشان داد در صورت استفاده از دوربین های غیر متریک با ثبات بالا، در صورت طراحی مناسب شبکه و بهینه سازی پارامترهای تاثیرگذار میتوان به دقتی در حد ۱۵ میکرومتر در کالیبراسیون دوربین غیر متریک دست یافت. لذا با قرار دادن عوارض در محیط تست فیلد و یا ایجاد تست فیلد در محیط عارضه و انجام کالیبراسیون ضمنی، میتوان به مدلسازی‌های دقیقی از عارضه با استفاده از دوربین‌های غیر متریک پرداخت.

- ^۱ Pre-Calibration
- ^۲ Self-Calibration
- ^۳ Retro Reflective
- ^۴ Scale Bar
- ^۵ Root Mean Square of Errors
- ^۶ Free adjustment
- ^۷ Defect
- ^۸ Datum
- ^۹ Minimum Norm

مراجع

۱. Asrkv Murali Mohan and SS Solanki, *On-The-Job Calibration of a Digital Camera For Industrial Photogrammetry*, Advanced Data Processing Research Institute, Secunderabad, India.
۲. Werner Tecklenburg, Thomas Luhmann and Heidi Hastedy, *Camera Modelling with Image:variant Parameters and Finite Elements*, Institute for Applied Photogrammetry and Geoinformatics.
۳. *Australis Guide to Simulation*, Australis software.