

ارائه مدلی پارامتریک و کامل جهت کالیبراسیون لیزراسکنرهای زمینی

الناز محمد زنجانی پور^{۱*}، مسعود ورشوساز^۲، محمد سعادت سرشت^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. استادیار گروه مهندسی نقشه برداری، پردیس دو دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۲۱

چکیده

در طول دهه گذشته، مهندسی نقشه برداری در نقاط مختلف جهان، پیشرفت‌های گسترده‌ای را در تکنیک‌های جمع‌آوری داده‌های مکانی داشته است. از بین راه‌های مختلف پیشنهادی، یکی از این جدیدترین این توسعه‌ها به صورت استفاده از تکنولوژی لیزر اسکنر ظاهر شده است. متد لیزر اسکنر به استفاده کننده اجازه جمع‌آوری اتوماتیک و مستقیم داده‌های سه بعدی را داده است. تحقیق در خصوص عوامل تأثیرگذار بر دقت و منابع آن‌ها، در اندازه‌گیری‌های لیزر اسکنر به دلیل عوامل زیاد تأثیرگذار بسیار، سخت و پیچیده می‌باشد. بنابراین بدلیل وجود خطاهای مختلف آنچه در مورد این ابزار لازم به نظر می‌رسد کالیبراسیون آنها می‌باشد. تا کنون مدل‌های مختلفی جهت بهبود کیفیت داده‌های لیزر اسکنر ارائه شده است. در این مقاله بر اساس ساختار داخلی این دستگاه، مدلی پارامتریک جهت کالیبراسیون ابر نقاط حاصل ارائه می‌شود که اثر آن بر کیفیت داده‌های حاصل از ایجاد یک میدان آزمون مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه این مدل با مدل‌های ارائه شده توسط دیگر محققین نشان دهنده این مطلب است که بدلیل اینکه تنها در بردارنده پارامترهای فیزیکی است و بر خلاف مدل‌های دیگر پارامتر تجربی را شامل نمی‌شود برای انواع مختلفی از لیزراسکنرها قابل استفاده می‌باشد. بعد از آن پایداری پارامترها و وابستگی آن‌ها با تغییر ساختار دستگاه به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. با محاسبه پارامترهای مدل و ارزیابی وابستگی آن‌ها و اعمال آن‌ها بر داده‌های ابر نقاط مشاهده می‌شود که این مدل با پایداری نسبی پارامترها، می‌تواند دقت داده‌های لیزر اسکنر زمینی را بهبود بخشد.

کلیدواژه‌ها: لیزر اسکنر زمینی، کالیبراسیون، ابر نقاط، مدل پارامتریک.

* نویسنده مکاتبه کننده: الناز محمد زنجانی پور: تهران، خیابان ولیعصر، روبروی ساختمان اسکان، دانشکده نقشه برداری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، آزمایشگاه فتوگرامتری

تحلیلی تلفن: ۸۸۸۷۷۰۷۳ داخلی ۱۱۶

Email: e.zanjanipour@gmail.com

۱- مقدمه

فناوری لیزر اسکنر به دلیل قابلیت‌هایی که در مقایسه با سایر روش‌های ژئودتیک دارد، روز به روز بیشتر مورد علاقه کاربران قرار می‌گیرد. در عین حال به دلیل وجود عوامل مختلف، نتایج حاصل از اندازه‌گیری دستگاه، تحت تاثیر اثرات گوناگون، خطا دار خواهد بود. آنچه در این راستا جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر مهم به نظر می‌رسد، کالیبراسیون می‌باشد که در واقع مجموعه‌ای از عملیات‌ها است که تحت شرایطی خاص صورت می‌پذیرد تا بین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و مقادیر مطابق با آن که از استانداردها (روش‌های دقیق‌تر) بدست آمده است ارتباط برقرار نماید. [۵].

روش کالیبراسیون معمول برای انواع وسایل و ابزار فتوگرامتریک و ژئودتیک وجود دارد. اما این موضوع در خصوص لیزر اسکنر زمینی کمی پیچیده‌تر می‌باشد، زیرا که این دستگاه به گونه‌ای ساختار دهی شده است که با دیگر تجهیزات نقشه‌برداری متفاوت است. دقت در لیزراسکنرها، دستگاه به دستگاه متغیر می‌باشد و به کالیبراسیون انفرادی و چگونگی نگهداری که از آن‌ها به عمل می‌آید، بستگی دارد. به دلیل رقابت بین سازنده‌های مختلف، طراحی لیزر اسکنر به صورت یک پدیده مبهم باقی مانده و هر سازنده یک روند کالیبراسیون خاص را طراحی کرده است. بنابراین دانش در مورد کالیبراسیون این دستگاه‌ها بسیار محدود است. علاوه بر آن پایداری پارامترهای کالیبراسیون بدست آمده نیز اغلب کوتاه مدت است و پارامترهای محاسبه شده در یک پروژه، فقط برای همان دستگاه و همان مشاهدات مناسب می‌باشند زیرا برای تمام لیزر اسکنرها رفتار خطا به دلیل ناپایداری دستگاه می‌تواند تحت تاثیر قرار بگیرد و همین امر موجب می‌شود که پارامترهای محاسبه شده نیز ناپایدار باشند و با تغییر رفتار خطا این پارامترها نیز متغیر خواهند بود.

تا کنون مدل‌های مختلفی جهت بهبود کیفیت

داده‌های لیزر اسکنر ارائه شده است. که هر یک در برگرفته چند پارامتر فیزیکی هستند و تاکید آن‌ها در ادامه در خصوص پارامترهای تجربی است که بعد از مشاهده نمودار مقادیر باقی مانده به مدل‌های آن‌ها اضافه گردیده است. بررسی کلیه روابط ارائه شده در فوق نشان می‌دهد در هیچ یک از این فرمول‌ها ساختار داخلی دستگاه به شکل کامل مدل نشده است، هر یک در بر گیرنده چند پارامتر فیزیکی هستند و تاکید آن‌ها در ادامه در خصوص پارامترهای تجربی است که بعد از مشاهده نمودار مقادیر باقی مانده به مدل‌های آن‌ها اضافه گردیده است. و این مسئله مدل را دارای این ضعف می‌کند که تنها برای همان دسته از مشاهدات قابل استفاده هستند چون در جای دیگری ممکن است این پارامترهای تجربی کارساز نباشند و می‌بایست پارامترهای دیگری را جایگزین آن‌ها نمود. به همین دلیل در ادامه بعد از مروری بر مدل‌های محققین دیگر، مدلی جدید در این زمینه ارائه می‌گردد که در برگرفته خطاهای ساختار داخلی لیزر اسکنر می‌باشد و بنابراین برای انواع مختلفی از این نوع دستگاه‌ها قابل استفاده خواهد بود، بعد از آن پارامترهای این مدل محاسبه می‌گردند و بعد از محاسبه دقت نهایی مدل و بررسی پایداری پارامترهای آن، نتایج با مدل‌های دیگر مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- ارائه مدل پیشنهادی

مشکل مدل کردن سنجنده شاید مهم‌ترین بخش در کالیبراسیون لیزر اسکنر باشد [۶]. از آنجایی که دانش در خصوص عملکرد داخلی لیزراسکنرهای زمینی به دلیل خصوصیات انحصاری در طراحی که سازنده ترجیحاً آن‌ها را بیان نمی‌کند، بسیار محدود می‌باشد و یا اصلاً وجود ندارد، بنابراین مدل خطای مناسب برای لیزر اسکنر زمینی با تمرکز بر فرضیات ایجاد می‌شود. از آنجا که لیزر اسکنرها مشابه با توتال استیشن‌های بدون رفلکتور عمل می‌کنند اغلب محققین مدل خطای

تجربه نشان داده است که این پارامترها مهم‌ترین پارامترهای کالیبراسیون هستند [۳] و بنابراین به‌عنوان مبنای مدل کالیبراسیون در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر پارامترهای مذکور، اگر چنانچه نگاهی دقیق‌تر به ساختار داخلی لیزر اسکنر انداخته شود، خطاهای دیگری را نیز که قابل مدلسازی و حذف از مشاهدات لیزر اسکنر می‌باشند می‌توان در این زمره قرار داد. محل قرارگیری محورها و لمب‌های لیزر اسکنر در شکل زیر (۱) قابل مشاهده است.

توتال استیشن را به‌عنوان مدل پایه برای کالیبراسیون انتخاب می‌کنند. بر حسب این مدل، پارامترهای کالیبراسیون به صورت زیر بیان می‌گردند:

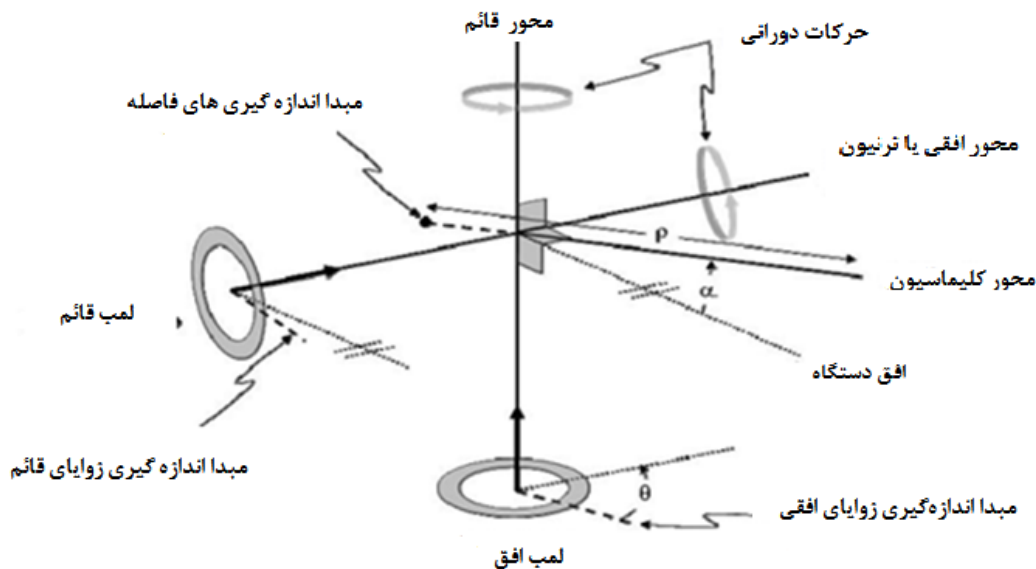
خطای صفر و مقیاس فاصله یاب لیزر، خطای محورهای افقی و کلیماسیون، خطای شاخص لمب قائم

مجموع چهار پارامتر فوق به صورت زیر به مشاهدات اعمال می‌گردند:

$$\Delta\rho = a_0 + a_1 \cdot \rho \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\Delta\theta = \frac{b_1}{\cos \varphi_j^{(i)}} + b_2 \tan \varphi_j^{(i)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\Delta\varphi = c_0 \quad \text{رابطه (۳)}$$



شکل ۱: محل قرارگیری محورها و لمب‌های لیزر اسکنر

خواهد بود و به صورت زیر ارائه می‌گردند:

به گونه‌ای که در تصویر ملاحظه می‌شود علاوه بر خطاهای فوق‌الذکر می‌توان خطاهای دیگری را برشمرد و بنابراین بر اساس تمامی مطالب بیان شده تا کنون، مدلی که جهت کالیبراسیون داده‌های لیزر اسکنر معرفی می‌شود، شامل همه پارامترهای فیزیکی مذکور

رابطه (۴)

$$\Delta\rho = a_0 + a_1 \cdot \rho + a_2 \cdot \sin \varphi$$

خطای صفر فاصله یاب
خطای مقیاس
انحراف پرتوی لیزر

$$\Delta\theta = b_1 \cdot \sec \varphi + b_2 \tan \varphi + b_3 \cdot \sin \theta + b_4 \cdot \cos \theta + b_5 \cdot \sin 2\theta + b_6 \cdot \cos 2\theta + b_7 \cdot \rho^{-1} + b_8 \cdot \theta$$

خطای محور کلیماسیون
خطای محور افقی
عدم تعادل لمب افق و محور قائم
خروج از مرکزیت لمب افق
خروج از مرکزیت افقی محور کلیماسیون
خطای مقیاس

رابطه (۵)

خطای وابل محور قائم عدم تعاد محور افقی و لمب قائم خطای شاخص لمب قائم

خطای مقیاس خروج از مرکزیت لمب قائم خروج از مرکزیت قائم محور کلیماسیون

رابطه (۶)

$$\Delta\varphi = c_0 + c_1 \cdot \varphi + c_2 \cdot \sin \varphi + c_3 \cdot \sin 2\varphi + c_4 \cdot \cos 2\varphi + c_5 \cdot \rho^{-1} + c_6 \cdot \sin 3\theta + c_7 \cdot \cos 3\theta$$

تا به این ترتیب و از طریق این مقایسه تاثیر مدل پیشنهادی بر دقت مختصات نقاط مورد ارزیابی قرار بگیرد. لازم به ذکر است کالیبراسیون صورت گرفته در این مرحله از نوع کالیبراسیون میدان آزمون است و نوع تارگت‌های به کار رفته از نوع نقطه‌ای می‌باشند. در ادامه بعد از بیان مشخصات اتاق آزمون به تشریح مراحل اجرایی پرداخته می‌شود.

۳- مشخصات اتاق آزمون و تارگت های مورد استفاده:

اتاق آزمون، آزمایشگاه فتوگرامتری در دانشگاه تهران به ابعاد ۱۵*۵ انتخاب گردید که در قسمت های مختلف آن ۹۷ تارگت دایره‌ای شکل از جنس شبرنگ نقره‌ای رنگ دارای بازتابندگی مناسب در محیط که به قطر پنج سانتیمتر برش لیزری داده شده‌اند و همچنین در مرکز آنها سوراخی توسط لیزر ایجاد شده بود به صورت ستون‌های نسبتاً منظم چسبانده شدند. در شکل زیر (۲) تصویر پنورامای اتاق آزمون نشان داده شده است.



شکل ۲: تصویر پنورامای اتاق آزمون

به این ترتیب سه معادله فوق با ۱۹ پارامتر فیزیکی (که همگی با توجه به ساختار داخلی لیزر اسکنر در نظر گرفته شده‌اند) جهت کالیبراسیون و بهبود دقت داده‌ها و مشاهدات حاصل از این دستگاه معرفی گردیدند.

جهت محاسبه پارامترها لازم است مختصات نقاط علاوه بر لیزر اسکنر به روش دقیق دیگری نیز اندازه‌گیری شوند و با برقراری روابط ترانسفورماسیون سه بعدی کانفرمال بین دو سیستم مختصات لیزر اسکنر و روش دقیق و انجام محاسبات سرشکنی، مقادیر آنها بدست آیند. برای ارزیابی دقیق میزان بهبود دقت داده‌های لیزراسکنر نیاز است که دقت مشاهدات لیزر اسکنر قبل و بعد از اعمال مدل مورد نظر با روشی دقیق که مبنای مقایسه قرار می‌گیرد محاسبه و با هم مقایسه گردد. به منظور ارزیابی مدل بدست آمده، مختصات تارگت‌ها در دو حالت با/بدون اعمال تصحیحات، با مختصات حاصل از روش مرجع که در این تحقیق روش فتوگرامتری در نظر گرفته شده است مقایسه گردیدند.

۴-۱- مشاهدات صورت گرفته توسط لیزر اسکنر در هر پروژه لیزر اسکنر در استقرارهای مختلف

۴- تشریح مراحل صورت گرفته در ادامه چگونگی انجام مشاهدات و آزمون‌های صورت گرفته به تفصیل بیان می‌گردد.

درجه)، (ایستگاه S3 و S4) و در دو مکان استقرار متفاوت دیگر در موقعیت‌های شماره دو و سه، (ایستگاه S6 و S7) مستقر گردید (در کل هفت استقرار) و ۹۷ تارگت نصب شده در اتاق آزمون را به صورت دقیق برداشت نمود. همان‌گونه که بیان شد، از دلایل اصلی این تنوع و تغییر ارتفاع و لمب‌های دستگاه در استقرارهای مختلف این بود که ارزیابی پایداری ضرائب مدل پیشنهادی در حالات مختلف صورت پذیرد. تصویر زیر (۳) محل قرار گیری لیزر اسکنر را در سه موقعیت در اتاق آزمون در تصویر پنوراما نشان می‌دهد.



شکل ۳: محل قرار گیری لیزر اسکنر در سه ایستگاه در تصویر پنوراما

در کنار هم به ابعاد 160×120 سانتیمتر در می‌آمدند و روی آن‌ها حدود ۹۳ تارگت چسبانده شده بود، برای این منظور انتخاب گردید. در این مرحله از نوع تارگت‌های بازتابنده و ارزان و از برجسب‌هایی برنگ سیاه و شبرنگ‌هایی برنگ نقره‌ای بود به شکلی که شبرنگ‌های سیاه از جنس مات بوده و شبرنگ‌های نقره‌ای دارای بازتابندگی در محیط نیمه تاریک با تابانیدن نور به آن‌ها می‌باشند. جهت تهیه هر دو برجسب به ابعاد 2×2 سانتیمتر بریده شده‌اند و مرکز برجسب سیاه رنگ با یک پانچ مناسب به اندازه پنج میلیمتر سوراخ گردیده است و سپس برجسب سیاه روی برجسب نقره‌ای چسبانیده شده است. پانچ مورد استفاده دارای لبه‌های مناسبی بوده تا سوراخ‌ها کاملاً به شکل دایره‌ای ایجاد گردند. در ادامه تعداد ۲۳ عکس (به گونه ای که

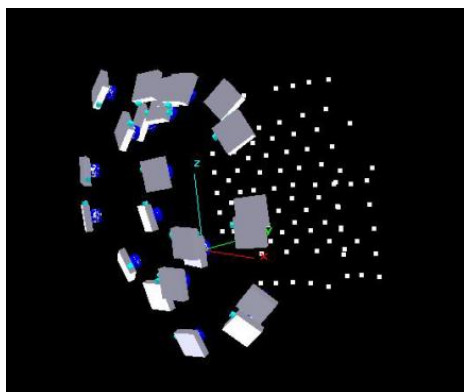
مشاهدات را برداشت می‌نماید. محل قرار گیری در این استقرارها و تعداد آن‌ها بسته به نوع پروژه و ابعاد عارضه مورد اسکن متفاوت می‌باشد. جهت برداشت مختصات تارگت‌ها، لیزر اسکنر در سه ایستگاه مستقر گردید. به شکلی که بیان شد مشاهدات توسط لیزر اسکنر ریگل LMSz420i انجام پذیرفت. با استقرار دستگاه در سه موقعیت، برداشت بر اساس مراحل زیر صورت گرفت:
الف- در دو ارتفاع متفاوت، (ایستگاه S1 و S5)
ب- دو آزمون متفاوت صفر درجه و ۹۰ درجه، (ایستگاه S1 و S2)
ج- دو تغییر در لمب قائم در شیب (20° درجه، -20°)

۲-۴- تعیین مختصات تارگت‌های اتاق آزمون به صورت دقیق

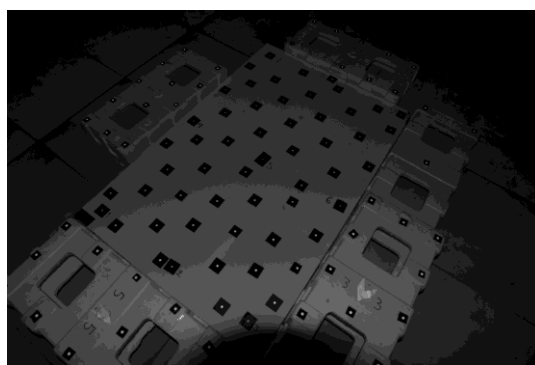
انجام این مرحله بدلیل داشتن مبنایی دقیق جهت ارزیابی دقت مشاهدات لیزر اسکنر مورد نیاز می‌باشد. به شکلی که بیان گردید در این بخش ابتدا توسط یک پیش کالیبراسیون پارامترهای توجیه داخلی دوربین (فاصله کانونی-موقعیت مرکز تصویر-پارامترهای مدل‌ساز اعوجاج شعاعی...) تعیین می‌گردند و بعد از آن با انجام عکسبرداری‌ها از اتاق آزمون مختصات تارگت‌ها در نرم‌افزار استرالیس تعیین می‌گردند.

در این مرحله ابتدا قبل از برداشت عکس‌های لازم جهت پروژه، برای بدست آوردن پارامترهای دوربین یک پیش کالیبراسیون صورت پذیرفت. میدان آزمون موجود در آزمایشگاه جهت پیش کالیبراسیون یک تخته ام دی اف به همراه چهار قطعه یونولیت که

طول آنها به صورت دقیق از قبل اندازه گیری شده است. در شکل (۴) زیر میدان آزمون مورد استفاده و نحوه قرارگیری دوربین جهت عکسبرداری نشان داده شده است. خطوط موجود در میدان آزمون نمایانگر اسکیل بارها می باشند.



در برخی از استقرارها نیز دوربین یک عکس می گیرد ۹۰ درجه می چرخد و عکس دیگری گرفته می شود تا وابستگی پارامترهای دوربین از بین برود یا کاهش بیابد. گرفته شد. سپس عکسها در نرم افزار وارد می شوند و پردازش می گردند. در این فرآیند شش اسکیل بار نیز در تست فیلد در نظر گرفته شدند که



شکل ۴: تصویر راست: میدان آزمون مورد استفاده در پیش کالیبراسیون دوربین رقومی به همراه scale bar.

تصویر چپ: نحوه قرارگیری دوربین جهت عکسبرداری

در این قسمت مقادیر پارامترهای دوربین محاسبه شده در مرحله پیش کالیبراسیون در نرم افزار وارد و در طول فرایند ثابت در نظر گرفته می شوند. سعی بر آن شده است که در هر ایستگاه از چندین زاویه عکسبرداری صورت بگیرد به گونه ای که در هر عکسبرداری بیشترین تعداد تارگت ها قابل مشاهده باشند و مجدداً در تعدادی از ایستگاهها چرخش ۹۰ درجه دوربین جهت کاهش وابستگی پارامترهای آن صورت پذیرفته است.

قبل از انجام روند سرشکنی در این مرحله، جهت محاسبه مختصات نقاط در مقیاس حقیقی، نیاز به داشتن اندازه های دقیق تعدادی اسکیل بار بود. این طولها می توانستند بین تعدادی از تارگت های موجود در اتاق آزمون اختیار گردند. اما از آنجا که ابزار بسیار دقیق برای اندازه گیری آنها در اختیار نبود (تنها وسیله در دسترس متر فلزی بود که در چنین اندازه گیری های دقیقی نمی تواند به عنوان ابزار خیلی دقیق مورد استفاده قرار بگیرد و خود خطا

به عنوان مجهولات با ۸۶۱ درجه آزادی و با انجام سرشکنی نرم افزار rmse نهایی را برای طولهای مینا به میزان ۰/۰۹۰ میلی متر با قرار دادن پارامترهای محاسبه شده در معادلات شرط هم خطی و محاسبه مقادیر باقی مانده از طریق رابطه زیر ارائه داد.

$$d = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$rmse = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta d^2) / n} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در روابط فوق d برابر طول هر اسکیل بار بعد از جایگذاری پارامترهای محاسبه شده در معادلات شرط هم خطی، x و y و z مختصات جدید محاسبه شده برای هر تارگت و n مختصات برابر تعداد اسکیل بارها می باشد.

بعد از محاسبه پارامترهای توجیه داخلی دوربین جهت محاسبه مختصات دقیق تارگت های اتاق آزمون تعداد ۲۰۵ عکس از نقاط مختلف (۹۷ تارگت) اتاق توسط دوربین رقومی گرفته می شود. سپس عکسها در نرم افزار وارد می شوند و پردازش می گردند.

آزمون پوشش داده شده باشد) انتخاب گردیدند و از چهار ایستگاه توسط توتال استیشن برداشت گردیدند. نحوه برداشت زوایا نیز برای هر تارگت به صورت کوپل صورت گرفت تا خطای کلیماسیون بر طرف شود و اطلاعات برداشتی دقیق باشند. بنابراین در هر ایستگاه برای هر تارگت دو طول و دو قرائت لمب افق و دو قرائت لمب قائم انجام پذیرفت. شکل زیر (۶) تصویر پانورامای اتاق آزمون و محل ایستگاه‌های توتال استیشن را به همراه کل تارگت‌ها نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است نقاطی که با ضربدر در تصویر مشخص شده‌اند تارگت‌هایی هستند که توسط توتال استیشن قرائت شده‌اند.

دار می‌باشد و چگونگی قرارگیری آن نیز به‌عنوان مثال کاملاً افقی و یا کاملاً عمودی و همینطور قرائت آن که جزء خطاهای انسانی محسوب می‌شود در نتیجه نهایی اثر گذار خواهد بود). بنابراین تصمیم بر آن شد که مختصات تعدادی از تارگت‌ها توسط توتال استیشن قرائت گردد و این نقاط به‌عنوان نقاط کنترل در سرشکنی وارد شوند. تا به این ترتیب مختصات نهایی تارگت‌ها در مقیاس حقیقی خود محاسبه گردند. برای این منظور مختصات تعدادی از تارگت‌ها به عنوان نقطه کنترل در سرشکنی مشاهدات فتوگرامتری حدود ۱۷ تارگت از ۹۷ تارگت اتاق آزمون به صورت دلخواه (البته به گونه‌ای که از هر دیوار چند تارگت در نظر گرفته شدند که کل اتاق



شکل ۶: تصویر اتاق آزمون و محل ایستگاه‌های توتال استیشن. نقاط ضربدر: تارگت‌هایی که با توتال قرائت شده‌اند.

در نرم‌افزار صورت پذیرفت و نرم‌افزار rmse نهایی را به صورت ۰/۱۸۶۶۱، ۰/۹۸۷۸ و ۰/۷۸۹۴ میلی‌متر برای مقادیر z, y, x ارائه داد.

۴-۳- مدل ریاضی مورد استفاده در سرشکنی

معادله مشاهده ترانسفورماسیون کانفرمال سه‌بعدی تارگت z - m که از ایستگاه i - m اسکنر اسکن شده‌است می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

بعد از بستن شبکه نقشه‌برداری و محاسبه مختصات نقاط کنترل توسط توتال استیشن با دقت ۰/۶۷۸۹ و ۰/۷۴۴۲ و ۰/۴۶۲۶ در راستای x و y و z ، و قراردادن آن‌ها در روند سرشکنی مشاهدات فتوگرامتری، و در نظر گرفتن تعداد معادلات (دو معادله برای هر نقطه کنترل + دو *تعداد نقاط دیده شده در هر عکس) و مجهولات (شش پارامتر توجیه خارجی هر عکس + (تعداد تارگت‌ها + تعداد نقاط کنترل) * سه) با درجه آزادی ۴۸۸۰ و به طریق سرشکنی محاسبات

$$f^i_j(L^i_j, \hat{X}^i_j) = X^i_{photo\ j} - [R(\omega^i, \phi^i, \kappa^i) \cdot X_{scan\ j} + T^i] \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, p \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

جهت ترانسفورماسیون بین مختصات لیزر اسکنر و فتوگرامتری در هر استقرار (i - m) می‌باشند. $X^i_{photo\ j}$

جایی که در آن p تعداد استقرارهای دستگاه و m تعداد تارگت‌های اسکن شده در هر استقرار می‌باشد. در رابطه فوق R و T به ترتیب شامل پارامترهای انتقال و دوران

می باشد که در صورت اعمال رابطه تصحیح شده آن رابطه زیر بدست می آید:

$$x^{(i)}_{scanj} = \begin{bmatrix} x_j^{(i)} \\ y_j^{(i)} \\ z_j^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_j^{(i)} - \Delta r) \cos(\phi_j^{(i)} - \Delta\phi) \cos(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \\ (r_j^{(i)} - \Delta r) \sin(\phi_j^{(i)} - \Delta\phi) \cos(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \\ (r_j^{(i)} - \Delta r) \sin(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

آنجا که ممکن است بین پارامترهای مدل پیشنهادی وابستگی وجود داشته باشد که این موضوع خود بر دقت نهایی اثرگذار خواهد بود، قبل از هر کار دیگری لازم است تا با تعیین میزان وابستگی موجود بین مجهولات بدست آمده و حذف پارامترهای وابسته که با کم کردن تعداد مجهولات باعث خواهد شد تا نتایج با دقت بهتری بدست آیند، اطمینان به نتایج بدست آمده بالا رود. سپس با جدا کردن ماتریس کواریانس پارامترهای مدل از پارامترهای توجیه خارجی و محاسبه وابستگی بین آن‌ها از طریق رابطه زیر، ضرایبی که وابستگی آن‌ها با یکدیگر از ۰/۷ بیشتر بوده به عنوان پارامترهای وابسته به هم شناسایی شده و یکی از آن‌ها را حذف می گردند. (لازم به ذکر است جهت تشخیص اینکه کدام یک از هر دو ضریب وابسته می بایست حذف گردند، با مقایسه وابستگی هر یک از آن‌ها با دیگر ضرایب و همچنین جایجا نمودن در حذف هر یک و مقایسه تغییر در بهبود دقت پارامتر مورد نظر شناسایی و حذف گردید). در این ارزیابی سه پارامتر c_4, c_3, c_5 از مدل حذف گردیدند و به این ترتیب مدل نهایی با ۱۶ ضریب مدل کننده خطای سیستماتیک لیزر اسکنر به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\Delta\rho = a_0 + a_1 \cdot \rho + a_2 \cdot \sin\phi \quad (11)$$

بردار مختصات تارگت ز-ام را در سیستم مختصات فتوگرامتری و x^{i}_{scanj} شامل بردار مختصات تارگت زام در استقرار i ام در سیستم مختصات لیزر اسکنر

در رابطه بالا r و ϕ و θ به ترتیب فاصله و زاویه قائم و جهت افقی می باشند که همان مشاهدات خامی هستند توسط لیزر اسکنر برداشت شده اند. مقادیر $\Delta\rho$ و $\Delta\theta$ و $\Delta\phi$ نیز به ترتیب مقادیر خطا در جهت فاصله و زاویه قائم و جهت افقی هستند که لازم است محاسبه شده و از مشاهدات خام کسر گردند تا مقادیر بهبود یافته مشاهدات بدست آیند. و این مقادیر برابر مدل ارائه شده در روابط (۴-۵-۶) می باشند. نکته بسیار مهم دیگر در این بخش در اجرای محاسبات سرشکنی داشتن مقادیر اولیه مجهولات است. برای این منظور و جهت تعیین پارامترهای اولیه انتقال کانفرمال از روابط کوآترینیون استفاده گردید. و مقادیر اولیه پارامترهای اضافه مدل کننده خطای سیستماتیک دستگاه نیز برابر صفر در نظر گرفته شدند، تا دقت اولیه مشاهدات بدون اعمال هیچ پارامتر اضافه ای قابل محاسبه باشد. بعد از تعیین مقادیر باقی مانده، جهت تشخیص باقی مانده های اشتباه که از مشاهدات اشتباه نتیجه می شوند و می بایست از مشاهدات حذف شوند، انحراف معیار در سه ستون dx و dy و dz محاسبه و با اجرای تست χ^2 ، باقی مانده های بیشتر از این مقادیر شناسایی و مشاهدات مربوطه آن‌ها حذف شوند.

در نهایت بعد از تعیین مقادیر اولیه مجهولات، محاسبات اصلی سرشکنی مطابق روابط زیر صورت می پذیرد و مقادیر دقیق مجهولات تعیین می گردد. بعد از تعیین پارامترهای مورد نظر از

$$\Delta\theta = b_1 \cdot \sec \varphi + b_2 \cdot \tan \varphi + b_3 \cdot \sin \theta + b_4 \cdot \cos \theta + b_5 \cdot \sin 2\theta + b_6 \cdot \cos 2\theta + b_7 \cdot \rho^{-1} + b_8 \cdot \theta \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\Delta\varphi = c_0 + c_1 \cdot \varphi + c_2 \cdot \sin \varphi + c_6 \cdot \sin 3\theta + c_7 \cdot \cos 3\theta \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در جدول زیر میزان rmse برای فاصله و جهت افقی و زاویه قائم قبل از استفاده از پارامترهای مدل کالیبراسیون و همین‌طور بعد از آن محاسبه و ارائه گردیده است. به گونه‌ای که مشاهده می‌شود علاوه بر مطالب فوق درصد بهبود دقت نتایج بعد از استفاده از مدل مورد نظر به کمک رابطه زیر محاسبه و در جدول (۱) نمایش داده شده است. (۳۶) درصد بهبود دقت = [دقت اولیه / (دقت اولیه - دقت ثانویه)] * ۱۰۰

جدول ۱: میزان rmse داده های لیزر اسکنر بعد از حذف پارامترهای وابسته مدل پیشنهادی و درصد بهبود

| Rmse | rmse اولیه بدون پارامترهای کالیبراسیون | rmse بعد از اعمال پارامترهای کالیبراسیون (بعد حذف ضرایب وابسته) | درصد بهبود دقت % |
|----------------------|--|---|------------------|
| rmse ρ (mm) | ۴/۶۶۸ | ۳/۴۴۶۴ | ٪۲۶ |
| rmse θ (rad) | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۵ | ٪۲۱ |
| rmse φ (rad) | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۳ | ٪۲۰ |

خطای کواترنیون جهت محاسبه پارامترهای اولیه انتقال و همچنین خطای موجود در نرم‌افزار ری اسکن پرو^۱ در تعیین مختصات مرکز تارگت‌ها، برای یافتن خطای سیستماتیک اسکنر چشم پوشی خواهد شد. بعد از اعمال پارامترهای فیزیکی دستگاهی به نتایج و مشاهده نمودارهای باقی مانده، تاثیرات سیستماتیک دیگری جهت اضافه کردن پارامترهای تجربی به مدل کالیبراسیون در نتایج قابل مشاهده نبود که علت آن می‌تواند وجود نویزها و یا خطاهای تصادفی دیگر باشد. تا این مرحله پارامترهای کالیبراسیون بدست آمده و میزان بهبود نتایج

۴-۴- بررسی میزان بهبود دقت پارامترهای مدل ارائه شده

به گونه‌ای که بیان شد بعد از انجام روند سرشکنی، محاسبه پارامترهای انتقال از سیستم مختصات لیزر اسکنر به فتوگرامتری و همین‌طور پارامترهای اضافه مدل کننده خطای سیستماتیک لیزر اسکنر صورت گرفت و بعد از آن با محاسبه ماتریس کواریانس پارامترهای بدست آمده و بررسی میزان وابستگی موجود بین ضرایب، ضرایب وابسته حذف گردیدند.

بعد از اعمال کل پارامترهای اضافه و بعد از حذف پارامترهای وابسته به مدل‌های سرشکنی به ترتیب بهبود دقت ٪۲۶، ٪۲۱، ٪۲۰، از باقی مانده‌های ρ و θ و φ و x و y و z نقاط چک مشاهده گردید که نشان می‌دهد استفاده از این پارامترها در بهبود دقت بسیار موثر می‌باشد. لازم به ذکر است که در اینجا اختلاف مختصات تبدیل یافته فتوگرامتری با مشاهدات لیزر اسکنر تنها به منزله خطای سیستماتیک لیزراسکنر در نظر گرفته می‌شوند و از آن جا که مشاهدات فتوگرامتری و کلاً روش فتوگرامتری در مقایسه با مشاهدات لیزراسکنر، روش دقیق محسوب می‌گردد، از خطای روش فتوگرامتری و همچنین

مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه پایداری پارامترهای بدست آمده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۵- ارزیابی پایداری ضرائب مدل پیشنهادی با تغییر وضعیت ساختار لیزراسکنر

در این بخش هدف این است که تعیین شود کدام دسته از مشاهدات (با موقعیت‌های مختلف- تغییر لمب قائم-تغییر لمب افق-تغییر ارتفاع) جهت کالیبراسیون و محاسبه پارامترها مناسب‌ترند به عبارت دیگر مدل پیشنهادی در استقرارهای مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا بررسی شود که در صورت داشتن مشاهدات در این استقرارهای مختلف، دقت چه تغییری می‌کند و در کدام حالت دقت بیشتر خواهد بود. برای این منظور کل مشاهدات لیزر اسکنر به پنج حالت تقسیم می‌شوند:

۱. استفاده از مشاهدات تنها یک استقرار جهت محاسبه پارامترهای مدل و بررسی دقت. (ایستگاه شماره S1).
۲. استفاده از تنها سه دسته مشاهدات مربوط به سه موقعیت مختلف. (ایستگاه‌های شماره S1، S6، S7).
۳. استفاده از تنها سه دسته مشاهدات با صفر لمب قائم متفاوت: $+20^\circ$ ، 0° ، -20° درجه (ایستگاه‌های شماره S1، S3، S4).
۴. استفاده از تنها مشاهدات با دو صفر لمب افق

متفاوت (ایستگاه‌های شماره S1، S2).

۵. استفاده از تنها مشاهدات با دو ارتفاع

مختلف (ایستگاه‌های شماره S1، S5).

جهت این ارزیابی، در هر یک از حالات فوق همانند آن چه در روند کلی مراحل قبل بیان گردید، ابتدا مقادیر اولیه پارامترهای ترنسفورماسیون محاسبه می‌شوند و در مرحله بعد در یک سرشکنی همزمان پارامترهای توجیه خارجی هر استقرار به همراه پارامترهای مدل مذکور به کمک نقاط کنترل بدست می‌آیند. تست اشتباهات در هر مرحله صورت می‌پذیرد تا در صورت وجود مشاهدات اشتباه به طریقی که گفته شد حذف و روند مجدد تکرار گردد. نهایتاً بعد از انجام سرشکنی در ادامه وابستگی بین پارامترهای بدست آمده بررسی می‌شود و پارامترهای وابسته حذف می‌گردند و دقت نیز به کمک نقاط چک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. توضیحات کامل در این خصوص در بخش‌های قبل به طور مفصل بیان شده است.

جدول زیر (۲) مقادیر $rmse$ اولیه (قبل از اعمال پارامترهای مدل کالیبراسیون) را برای مختصات x و y و z و همینطور xyz برای هر یک از حالات مختلف استقرار بر حسب میلیمتر ارائه می‌دهد.

جدول ۲: مقادیر $rmse$ اولیه (قبل از اعمال پارامترهای مدل کالیبراسیون) برای مختصات x و y و z و همینطور xyz برای هر یک از حالات مختلف استقرار

| نحوه استقرار | $rmse_x$ اولیه | $rmse_y$ اولیه | $rmse_z$ اولیه | $rmse_{xyz}$ اولیه |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| یک استقرار (A) | ۳/۵۹۴۷ | ۳/۶۹۶۱ | ۲/۳۹۶۱ | ۵/۶۸۵۴ |
| سه موقعیت (B) | ۳/۵۹۸۷ | ۳/۲۴۳۴ | ۲/۱۷۹۹ | ۵/۳۱۲۴ |
| سه زاویه قائم (C) | ۳/۶۴۳۵ | ۳/۲۵۲۸ | ۲/۴۹۸۲ | ۵/۴۸۶۰ |
| دو زاویه افقی (D) | ۳/۷۷۳۲ | ۳/۷۰۵۱ | ۲/۳۹۲۶ | ۲/۸۰۴۲ |
| دو ارتفاع (E) | ۳/۷۲۳۵ | ۳/۳۶۶۳ | ۲/۳۵۱۲ | ۵/۵۴۹۷ |
| همه حالات (F) | ۳/۵۸۹۹ | ۳/۲۲۷۰ | ۲/۱۸۷۹ | ۵/۲۹۹۸ |

با مختصات‌های فتوگرامتری، مجدداً $rmse$ ‌های x و y و z و xyz محاسبه می‌گردند. که در جدول زیر

بعد از محاسبه مقادیر پارامترهای کالیبراسیون و همینطور اعمال آن‌ها به مشاهدات و محاسبه اختلاف

حذف می‌گردند و مجدداً rmse ها محاسبه می‌گردند. مقادیر محاسبه شده در این حالت نیز در جدول زیر (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): مقادیر rmse بعد از اعمال پارامترهای مدل کالیبراسیون و قبل و بعد از حذف پارامترهای وابسته برای مختصات z و xy و همینطور xyz برای هر یک از حالات مختلف استقرار

| نحوه استقرار | Rmse _x | Rmse _y | Rmse _Z | Rmse _{xyz} | پارامتر حذفی | Rmse _x بعد حذف | Rmse _y بعد حذف | Rmse _Z بعد حذف | Rmse _{xyz} بعد حذف |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| A | ۲/۴۴ | ۲/۸۲ | ۱/۷۴ | ۴/۱۱۹ | $b_4 - C_3 - C_4 - C_5$ | ۲/۴۴ | ۲/۵۷ | ۱/۷۵ | ۴/۱۳ |
| B | ۲/۲۱ | ۲/۴۳ | ۱/۵۳ | ۳/۶۲ | $C_3 - C_4 - C_5$ | ۲/۲۱ | ۲/۴۳ | ۱/۵۳ | ۳/۶۱ |
| C | ۲/۲۲ | ۲/۴۴ | ۱/۵۳ | ۳/۶۴ | $b_4 - C_3 - C_4 - C_5$ | ۲/۲۲ | ۲/۴۵ | ۱/۵۳ | ۳/۶۳ |
| D | ۲/۳۲ | ۲/۶۲ | ۱/۶۳ | ۳/۸۷ | $C_3 - C_4 - C_5$ | ۲/۳۲ | ۲/۶۳ | ۱/۶۴ | ۳/۸۸ |
| E | ۲/۳۸ | ۲/۷۹ | ۱/۵۳ | ۳/۷۹ | $C_1 - b_4 - C_3 - C_4 - C_5$ | ۲/۳۸ | ۲/۸۰ | ۱/۵۳ | ۳/۹۸ |
| F | ۲/۲۳ | ۲/۴۵ | ۱/۵۳ | ۳/۶۵ | $C_3 - C_4 - C_5$ | ۲/۶۶ | ۲/۴۷ | ۱/۵۴ | ۳/۹۴ |

مقادیر آن‌ها برای حالات مختلف آمده است. بعد از آن بعد از محاسبه ماتریس کواریانس در هر حالت و بررسی میزان وابستگی‌ها، پارامترهای وابسته موثر

بهبود دقت اتفاق می‌افتد. بنابراین توصیه می‌شود که هیچ گاه داده‌های مورد نیاز جهت کالیبراسیون تنها از یک استقرار مورد استفاده قرار نگیرند و حتی اگر با یک استقرار نیز کل محدوده قابل برداشت بود، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر بسته به زمان و هزینه برداشت اسکنر از موقعیت‌های دیگری نیز انجام بگیرد.

۴. در حالت استقرار در سه موقعیت (B) متفاوت بهترین بهبود دقت اتفاق می‌افتد و بعد از آن استقرار در یک مکان و تغییر در زاویه قائم دستگاه (سه زاویه قائم C) دارای بهترین بهبود دقت می‌باشند و بنابراین توصیه می‌گردد که این دو حالت در هنگام برداشت داده توسط لیزر اسکنر جهت کالیبراسیون مورد استفاده قرار بگیرند.

بر اساس ارزیابی‌های فوق دیده می‌شود که

آنچه در تفسیر جداول فوق می‌توان بیان نمود به شرح زیر است:

۱. تقریباً در تمامی حالات پارامترهای حذف شده مشابه می‌باشند. در سه حالت A (یک استقرار)، C (سه زاویه قائم)، E (دو ارتفاع مختلف) پارامتر b_2 نیز که مدل‌کننده خطای محور افقی است و همچنین در حالت دو ارتفاع مختلف پارامتر C_1 که مربوط به فاکتور مقیاس در زاویه قائم هستند به پارامترهای حذف شده C_5, C_4, C_3 اضافه شدند. سه پارامتر C_5, C_4, C_3 در تمامی موارد حذف گردیدند، اما پایداری نسبی در خصوص دیگر پارامترهای مدل مذکور وجود دارد.

۲. در تمامی موارد حذف پارامترهای وابسته اگرچه ناپایداری سرشکنی را برطرف می‌کند اما خطاهای باقیمانده را بسیار کم افزایش می‌دهد.

۳. در حالت A (یک استقرار تنها) کم‌ترین میزان

چگونگی استقرار لیزر اسکنر در برداشت مشاهدات جهت کالیبراسیون مدل می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد و قادر است بر دقت نتایج نهایی اثر گذار باشد. همچنین مدل پیشنهادی ارائه شده و وابستگی ضرائب آن نیز بسته به وضعیت قرارگیری دستگاه می‌تواند تغییر کند. این مسئله اهمیت تعیین استقرارهای کافی و مناسب را در رسیدن به نتایج کالیبراسیون دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر نشان می‌دهد.

تا به این مرحله پارامترهای مدل پیشنهادی طی روند سرشکنی محاسبه شدند و بعد از حذف پارامترهای وابسته مورد ارزیابی قرار گرفتند. و نهایتاً مدل به گونه‌ای که بیان شد به بهبود دقتی برابر 0.37% ، 0.23% و 0.30% در برای مقادیر ρ و θ و φ رسید و این موضوع نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی تا حد مناسبی قادر است مشاهدات لیزر اسکنر را بهبود بخشد. بعد از آن با بررسی پایداری ضرائب مدل مذکور در تغییر وضعیت‌های گوناگون دستگاه، مشخص گردید که با حذف سه پارامتر C_3 ، C_4 ، C_5 ، پایداری نسبی در خصوص دیگر ضرائب برقرار می‌باشد. در ادامه دقت مدل پیشنهادی با دیگر مدل‌های ارائه شده مقایسه و ارزیابی می‌گردد.

۴-۶- مقایسه مدل پیشنهادی با مدل‌های موجود

در این مرحله بعد از انجام بررسی‌های مختلف، ارزیابی دیگری در خصوص مدل پیشنهادی صورت می‌پذیرد و آن عبارت است از بررسی دقت بدست آمده از این مدل با مدل‌های کالیبراسیون دیگری است که توسط محققین مختلف در خصوص کالیبراسیون لیزر اسکنر ارائه شده است. به شکلی که در بیان شد افراد مختلفی در این زمینه فعالیت نموده‌اند و هر یک به نوعی فرمولی جهت کالیبراسیون لیزر اسکنر مورد بررسی ارائه کرده‌اند. اما آنچه در مورد فرمول هر یک قابل ذکر است این است در هیچ یک از این فرمول‌ها ساختار داخلی دستگاه به شکل کاملی که

در فرمول پیشنهادی مدلسازی شده است مدل نشده است، هر یک در بر گیرنده چند پارامتر فیزیکی هستند و تاکید آن‌ها در ادامه در خصوص پارامترهای تجربی است که بعد از مشاهده نمودار مقادیر باقی مانده به مدل‌های آن‌ها اضافه گردیده است. و این مسئله مدل را دارای این ضعف می‌کند که تنها برای همان دسته از مشاهدات قابل استفاده هستند چون در جای دیگری ممکن است این پارامترهای تجربی کارساز نباشند و می‌بایست پارامترهای دیگری را جایگزین آن‌ها نمود. در همین راستا در ادامه مدل‌های مختلفی که توسط محققین مختلف در خصوص کالیبراسیون لیزر اسکنر زمینی، به همراه نام محقق و خصوصیات اتاق آزمون هر یک و تصویری از اتاق آزمون مربوطه به همراه بهبود دقتی که محقق بعد از اعمال این مدل بر مشاهدات مربوطه بدست آورده است ارائه شده است. علاوه بر این هر یک از مدل‌های کالیبراسیون بر مشاهداتی که توسط لیزر اسکنر موجود در این پروژه انجام شده‌اند اعمال گردیده است و درصد بهبود دقت در هر یک مطابق با آنچه در بخش‌های قبل بیان شد بدست آمده است. به عبارت دیگر همه آنچه برای محاسبه پارامترهای مدل پیشنهادی، محاسبه مقادیر اولیه و ثانویه دقت بعد از اعمال پارامترهای مدل در مباحث قبل به تفصیل بیان گردید برای هر یک از فرمول‌های محققین نیز صورت پذیرفته است و درصد بهبود دقت برای هر یک در جدول (۴) آمده است. لازم به ذکر است که این فرمول‌ها همه بر اساس انجام کالیبراسیون نقطه مبنا ایجاد و پارامترهای آن‌ها بدست آمده‌اند.

با نگاهی به جدول فوق، در مقایسه با مدل پیشنهادی ۱۶ پارامتری معادل با روابط ۱۱ تا ۱۳ که بهبود دقتی برابر 0.26% ، 0.21% و 0.20% را برای ρ ، θ و φ بدست آورد، نتایج زیر قابل حصول خواهد بود:

(۱) هر یک از روابط فوق توانسته‌اند دقت داده‌های لیزر اسکنر مورد تحقیق در این تز را

وجود دارند و پارامتر تجربی استفاده نشده است، در حالی که در مدل دوم این دستگاه (هفت پارامتر)، دو پارامتر تجربی که خطایی در زاویه قائم را به صورت تابعی از زاویه افقی با روابط سینوسی و کسینوسی مدل می‌نمایند وجود دارد ($c_1 \cos(2\theta) + c_2 \sin(2\theta)$). در مدل مربوط ریگل (۱۴ پارامتر)، یک پارامتر تجربی که خطایی در زاویه قائم را به صورت تابعی از فاصله مدلی می‌کند ρ و همینطور پارامتر تجربی دیگری که خطایی در زاویه افق را باز به صورت تابعی از فاصله مدلی می‌نماید وجود دارد ($\sin^{-1} \frac{b}{\rho}$). در مدل مربوط به فارو^۳ (۱۶ پارامتر)، دو پارامتر تجربی خطایی در فاصله را به صورت تابعی از زاویه افقی مدلی می‌نمایند ($\cos(4\theta) + \sin(4\theta)$) و همینطور دو پارامتر تجربی دیگر خطا در زاویه افقی را به صورت تابعی از زاویه قائم مدلی می‌نمایند ($\cos(3\varphi) + \sin(\varphi)$). پارامترهای فیزیکی مشابه با آنچه در مدل پیشنهادی ذکر شد می‌باشند و بنابراین در اینجا مجدد تفسیر نمی‌گردند.

(۷) در بررسی لیجتی، چو و تسکی که برای دو دستگاه منسی و تریمبل صورت گرفته است و هر یک در دو اتاق جداگانه و با شرایط استقرار مختلف قرار گرفته‌اند، دیده می‌شود که دو دستگاه در آزمون دو استقرار پارامترهای تجربی یکسانی دارند اما در آزمون چهار استقرار برای منسی پارامتر تجربی دیده شده است اما برای تریمبل پارامتر تجربی وجود ندارد. این موضوع در حالت کلی این نتیجه بدست می‌دهد که در صورتی که دستگاه‌ها در شرایط اتاق آزمون و استقرار یکسان قرار بگیرند، باز هم مدل پیشنهادی برای هر یک می‌تواند متفاوت می‌باشد.

3 Faro

نیز بهبود بخشند.

(۲) با بررسی جدول فوق اینطور به نظر می‌رسد که با اینکه بهبود دقت برای مشاهدات تز توسط هر یک از روابط فوق بدست آمده، اما هیچ یک از روابط نتوانسته‌اند به بهبود دقتی که مدل پیشنهادی رسید، برسند و بیشترین بهبود زمانی حاصل شد که از مدل کالیبراسیون پیشنهادی استفاده گردید.

(۳) هر فرمولی که پارامترهای غیر وابسته بیشتری در خصوص خطاهای داخلی دستگاه را مورد استفاده قرار داده است (پارامترهای فیزیکی) موجب بهبود دقت بیشتری شده است.

(۴) با توجه به اینکه هیچ یک از روابط فوق به دقت مدل پیشنهادی نرسیده‌اند می‌توان این نتیجه را گرفت که پارامترهای تجربی به کار رفته در خصوص دستگاه‌های مذکور هر یک در اکثر مواقع در خصوص همان دستگاه و مشاهدات صورت پذیرفته جوابگو می‌باشند.




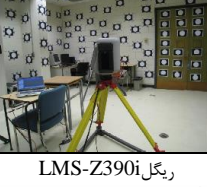
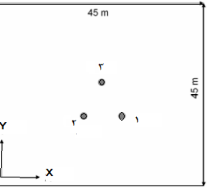

(۵) همان‌گونه که بیان شد پارامترهای مدل پیشنهادی بیش‌تر از همه مقادیر فوق موجب بهبود دقت شدند چون سعی بر آن شده که همه خطای ساختاری لیزر اسکندر در آن مد نظر قرار داده باشد.

(۶) در مدل اول برای دستگاه منسی^۱ (شش پارامتر)، دو پارامتر تجربی که خطایی در زاویه قائم را به صورت تابعی از زاویه افقی با روابط سینوسی و کسینوسی مدل می‌نمایند وجود دارد ($c_1 \cos(2\theta) + c_2 \sin(2\theta)$). در مدل دوم برای دستگاه منسی (پنج پارامتر)، دو پارامتر تجربی دیگری که خطا در زاویه قائم را مجدد به صورت تابعی از زاویه افقی با روابط کسینوسی و کسینوسی مدل می‌نمایند وجود دارد ($c_1 \cos(2\theta) + c_4 \cos(4\theta)$). در مدل اول برای تریمبل^۲ (چهار پارامتر)، تنها پارامترهای فیزیکی

1 Mensi

2 Trimble

جدول (۴): خصوصیات مدل های محققین و نتایج حاصل از اعمال آنها بر مشاهدات لیزر اسکنر

| محقق/تاریخ انجام تحقیق | لیزر اسکنر زمینی | فرایند کالیبراسیون | فرمول ارائه شده | درصد بهبود نتایج در تحقیق محقق | نتیجه اعمال مدل مورد نظر بر مشاهدات این تیز |
|---------------------------|---|---|--|-----------------------------------|---|
| چو، لیجتی، تسکی (۲۰۱۰) | منسی (GS200)  | در اتاقی به ابعاد ۵*۳ و استفاده از ۱۰۰ تارگت نقطه ای با شعاع پنج cm- اسکن با دو استقرار | $\Delta\rho = a_0$ $\Delta\theta = b_0\theta$ $\Delta\phi = c_0 + c_1 \cos(2\theta) + c_2 \sin(2\theta) + c_3 \sin(3\theta)$ | ٪۱۷ ٪۱۴ ٪۱۴ | ٪۲۰ ٪۳ ٪۲ |
| لیجتی، چو، تسکی (۲۰۱۰) | منسی (GS200)  | در اتاقی به ابعاد ۱۴*۱۱*۳ و استفاده از ۶۰ تارگت نقطه ای با شعاع پنج cm- اسکن با چهار استقرار | $\Delta\rho = a_0$ $\Delta\phi = c_1 \cos(2\theta) + c_2 \sin(3\theta) + c_3 \cos(3\theta) + c_4 \cos(4\theta)$ | ٪۱۲ ٪۱۰ ٪۵ | ٪۱۱ ٪۴ ٪۴ |
| لیجتی، چو، تسکی (۲۰۰۹) | تریمبل GX  | در اتاقی به ابعاد ۱۴*۱۱*۳ و استفاده از ۶۰ تارگت نقطه ای با شعاع پنج cm- اسکن با چهار استقرار | $\Delta\rho = a_0 + a_1 \sin(\varphi)$ $\Delta\theta = b_0 \tan(\alpha) + b_1 \cos \theta$ | ٪۱۰ ٪۷ ٪۱ | ٪۲۵ ٪۵ ٪۰ |
| لیجتی، چو، تسکی (۲۰۰۹) | تریمبل GX  | در اتاقی به ابعاد ۵*۳ و استفاده از ۱۰۰ تارگت نقطه ای با شعاع پنج cm- اسکن با دو استقرار | $\Delta\rho = a_0 + a_1 \sin(\varphi)$ $\Delta\theta = b_1 \cos(\theta) + b_2 \sin(2\theta) + b_3 \cos(2\theta)$ $\Delta\phi = c_1 \cos(2\theta) + c_2 \sin(2\theta)$ | ٪۰ ٪۳ ٪۲ | ٪۲۵ ٪۱۰ ٪۱ |
| سنایدر (۲۰۰۹) | ریگل LMS-Z390i  | در اتاقی به ابعاد ۱۰*۴*۷ و استفاده از ۱۰۰ تارگت نقطه ای با شعاع پنج cm- اسکن با سه استقرار | $\Delta\rho = a_0 + a_1\rho$ $\Delta\theta = b_1 \sec(\varphi) + b_2 \tan(\varphi) + b_3 \sin(\theta) + b_4 \cos(\theta)$ $+ \arcsin(b_5 / \rho) + b_6 \sin(2\theta) + b_7 \cos(2\theta)$ $\Delta\phi = c_0 + c_1 \cos \varphi + c_2 \sin \varphi + ar \sin(c_3 / \rho) + c_4 \cos(3\theta)$ | ٪۱۲ ٪۲۰ ٪۲۵ | ٪۲۵ ٪۲۳ ٪۴ |
| لیجتی ۲۰۰۶ | فارو 880  | فرایند ۱۳ ماهه و انجام ۱۰ کالیبراسیون مختلف با برقراری شرایط متفاوت تارگت هایی با قطر هفت cm و با استقرارهای متفاوت | $\Delta\rho = a_0 + a_1\rho + a_2 \sin(4\theta) + a_3 \cos(4\theta) + a_4 \sin(\varphi)$ $\Delta\theta = b_1 \sec(\varphi) + b_2 \tan(\varphi) + b_3 \sin(2\theta) + b_4 \cos(2\theta)$ $b_5 \sin(\varphi) + b_6 \cos(3\varphi)$ $\Delta\phi = c_0 + c_1\varphi + c_2 \sin \varphi + c_3 \sin(3\theta) + c_4 \cos(3\theta)$ | ٪۲۲ ٪۲۷ ٪۴۵ | ٪۲۸ ٪۵ ٪۷ |

انجام داده‌اند، مشاهده می‌شود که حتی در مورد

در خصوص تحقیقی که لیجتی، چو و تسکی

بعد از آن با انجام ترانسفورماسیون داده‌های لیزر اسکنر به مختصات‌های فتوگرامتری و محاسبه پارامترهای مدل پیشنهادی و بررسی دقت قبل و بعد از اعمال مدل به داده‌ها با دقت داده‌های فتوگرامتری، به میزان ۲۶٪ و ۲۱٪ و ۲۰٪ بهبود دقت در مختصات نقاط بعد از اعمال مدل دیده شد. در مقایسه با مدل‌های دیگر از آنجا که مدل مذکور تنها شامل پارامترهای فیزیکی و بر اساس ساختار داخلی لیزر اسکنر می‌باشد و پارامتر تجربی را شامل نمی‌شود، می‌تواند برای انواع مختلف لیزراسکنرها به کار رود.

در ادامه پایداری ضرائب و روند بهبود با تغییر وضعیت دستگاه مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد، با تغییرات ساختار دستگاه و برداشت مشاهدات مختلف برای این نوع لیزراسکنر وابستگی ضرائب تقریباً مشابه می‌باشد. در سه حالت A (یک استقرار)، C (سه زاویه قائم)، E (دو ارتفاع مختلف) پارامتر b_2 نیز که مدل‌کننده خطای محور افقی است و همچنین در حالت دو ارتفاع مختلف پارامتر c_1 که مربوط به فاکتور مقیاس در زاویه قائم هستند به پارامترهای حذف شده c_5, c_4, c_3 اضافه شدند. سه پارامتر c_5, c_4, c_3 (عدم تعامد محور افقی و لمب قائم و خروج از مرکزیت قائم محور کلیماسیون) در تمامی موارد حذف گردیدند، اما پایداری نسبی در خصوص دیگر پارامترهای مدل مذکور وجود دارد.

علاوه بر مطالب فوق دیده شده که در یک استقرار تنها کمترین میزان بهبود دقت اتفاق می‌افتد. بنابراین توصیه می‌شود که هیچ‌گاه داده‌ها تنها از یک استقرار مورد استفاده قرار نگیرند و حتی اگر با یک استقرار نیز کل محدوده قابل برداشت بود، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر بسته به زمان و هزینه برداشت اسکنر از موقعیت‌های دیگری نیز انجام بگیرد.

همچنین در حالت استقرار در سه موقعیت متفاوت بهترین بهبود دقت اتفاق می‌افتد و بعد از آن استقرار در یک مکان و تغییر در زاویه قائم دستگاه (سه زاویه قائم) دارای بهترین بهبود دقت می‌باشند و

یک دستگاه هم در صورتی که شرایط اتاق آزمون و همینطور شرایط استقرار (در کل شرایط پروژه) متفاوت باشند باز پارامترهای تجربی به کار رفته متفاوت خواهند بود. (پارامترهای فیزیکی را خود محقق به صورت مختلف در نظر گرفته است).

در تحقیق لیجیتی، چو و تسکی دیده می‌شود که زمانی که برای دستگاه منسی دو استقرار وجود دارد (در آزمون دو استقرار) برای هم مشاهدات این تز و هم مشاهدات محقق دقت بهبود بیشتری می‌یابد. اما برای تریمبل برای مشاهدات محقق زمانیکه آزمون چهار استقرار است بهبود بهتر خواهد بود.

در حالی که با مشاهدات تز زمانی که آزمون دو استقرار است (پارامترهای فیزیکی بیشترند) بهبود بیشتری بدست آمده است که این تأکیدی بر این موضوع است که مدل با پارامتر فیزیکی بیشتر، برای دستگاه‌های مختلف نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

۱۰) تنها پارامتر فیزیکی مشترک در تمام مدل‌ها، پارامتر a_0 (مدل‌کننده خطای صفر فاصله یاب) می‌باشد و در ادامه هر یک پارامترهای فیزیکی مختلفی استفاده نموده‌اند.

۱۱) زمانی که روابط مدل برای $\Delta\varphi$ یا $\Delta\theta$ وجود ندارد، از زمانی که برای هر سه دسته مشاهدات θ, ρ و θ روابط تصحیح خطا نوشته می‌شود، بهبود دقت کمتر خواهد بود.

۵- نتایج و پیشنهادها

هدف اصلی در این فصل کالیبراسیون لیزر اسکنر زمینی با مدل پیشنهادی بود که به طور کامل ارزیابی و مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در ابتدا برای بررسی دقت لیزر اسکنر نیاز به تعیین مختصات دقیق نقاط بود که برای این منظور روش فتوگرامتری به‌عنوان روش دقیق در تعیین مختصات در نظر گرفته شد و دقت نهایی تعیین مختصات در روش فتوگرامتری برابر $0/18661$ و $0/98778$ و $0/7894$ برای x, y, z بدست آمد.

دیگری نیز به مدل اضافه گردد. تحقیق بیشتر در خصوص ساختار این نوع دستگاه‌ها و تفاوت‌های احتمالی می‌بایست انجام پذیرد. و ارائه الگوریتم‌هایی جهت یافتن مناسب‌ترین مدل از بین مدل‌های ارائه شده توسط دیگر محققین و بررسی و مقایسه آن با مدل پیشنهادی، توصیه می‌گردد.

بنابراین توصیه می‌گردد که این دو حالت در هنگام برداشت داده توسط لیزر اسکنر مورد استفاده قرار بگیرند.

مدل ارائه شده در این تحقیق جهت کالیبراسیون لیزراسکنرهایی است که از نوع محاسبه زمان پرواز می‌باشند. در خصوص دستگاه‌هایی که اندازه‌گیری فاصله را به‌طور دیگر مانند مقایسه فازی و غیره انجام می‌دهند، ممکن است پارامترهای فیزیکی

۶- منابع

- [1] Boehler, W., Bbordasvicent, M., Marbs, A., 2003, "Investigating laser scanner accuracy", In Proceeding of FIG Working Week. Paris, France, April 13 - 17. URL: http://www.fig.net/pub/fig_2003/index.htm.
- [2] Neitzel, F., 2003, " investigation of axes errors of terrestrial laser scanners", Proceeding of the ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing V/5, Vol XXXVI-5/W8, ISSN 1682-1750.
- [3] Gielsdorf, F., Rietdorf, A., Gruendig, G., 2004, "A concept for the calibration of laser scanner", In Optical 3-D Measurment Techniques VII, A. Gruen/H. Kahmen(Eds), Vol. II, pp.359-364.
- [4] Santala, J., Joala, V., 2003, "on the calibration of a ground-based laser scanner", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 32, part 3-2 W5, pp. 193-199.
- [5] Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Gorte, B., 2008, "Reducing the error in terrestrial laser scanning by optimizing the measurement set-up", Journal of the Optical Society of America 4(4), pp. 629-642.
- [6] Lichti, D.D., 2008, "A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis", Photogrammetry and remote sensing, No.63, pp. 169-180.
- [7] Hofle, B., Pfeifer, N., 2007, "Correction of laser scanning intensity data:Data and model-driven approaches", Photogrammetry and remote sensing, No. 70, pp. 415-433.
- [8] Schulz, T, Ingensand, H., 2004, "Influencing variables, precision and accuracy of tls", INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying Bratislava, Slovakia, November 11-13.
- [9] Kaasalainen, S., Krooks, A., Kaartinen, A., 2009, "Radiometric calibration of tls with external refrence targets", Proceeding of the Institute of Electrical and Electronics Engineere (IEEE) 72(12), pp. 1671-1684.
- [10] Lichti, D.D., Licht, M., 2006, "Experiences with terrestrial laser scanner modeling and accuracy assessment, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume XXXVI, Part 5, pp. 25-27.
- [11] Bucksch, A., Lindenbergh, R., Ree, J., 2006, "Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the intensity remission on the scan quality", photogrammetry and remote sensing, No.63, pp. 169-180.
- [12] Bae, K., Lichti, D.D., 2007, "On-site selfcalibration using planar features for terrestrial laser scanner", ISPRS Workshop on laser scanning conference, berlin, September 12-16.
- [13] Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Ree, J., Bucksch, A., 2005, " Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality", Jurnal of Photogrammetry and remote sensing, No. 55, pp. 415-433..
- [14] Reshetyuk, Y., 2006, "calibration of tls for

the purposes of geodetic engineering",
International Archives of Photogrametry and
Remote Sensing, Vol.XXXV, Part B5,
Proceedings of the ISPRS working group
V/2, Istanbul, pp. 222-227

..



Representation a complete parametric model to calibrating TLS instruments

Elnaz mohammad zanjani pour^{1*}, Masood varshosaz², Mohammad saadat seresht³

1. Photogrammetry graduate student, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2. Assistant Professor of Surveying Engineering, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3. Assistant Professor of Surveying Engineering, Technical School Campus Two, Tehran University, Tehran,

Abstract

Surveying has great improvements in data collection techniques in last decade. one of these techniques is laser scanner. with that method we can collect 3D data automatically. investigating of the error sources in TLS measurements is rather complicated due to a large number of influencing factors that are quite interrelated. Thus calibration is an important issue in these devices. several models have been proposed to improve the accuracy of the laser scanner data until now. each of these models includes some physical parameters and some empirical parameters which have been produced by observation of residuals diagram, in this paper a parametric model based on the internal structure of laser scanner is presented for calibrating these devices. This model compared with another models shows that due to having just physical parameters and not empirical parameters it can be used for a variety of TLS instruments. because of the importance of stability of parameters in a model, stability of them and the correlation between them will be investigated precisely. the results show that this model with a relative stability can improve the accuracy of TLS data.

Key words: terrestrial Laser scanner, Calibration, point cloud, parametric model