نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۳

Vol.2, No.1, Spring 2014

۸۹-۱۰۵

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 گسترده ای را در تکنیک های جمع‌آوری داده‌های مکانی داشته است. از بین راه های مختلف پیشنهادی، یکی از این جدیدترین این توسعه ها به صورت استفاده از تکنولوژی لیزر اسکنر ظاهر شده است. متد لیزر اسکنر به استفاده کننده اجازه جمع آوری اتوماتیک و مستقیم داده های سه بعدی را داده است. تحقیق در خصوص عوامل تأثیرگذار بر دقت و منابع آن ها، در اندازه‌گیری‌های لیزر اسکنر به دلیل عوامل زیاد تأثیرگذار بسیار، سخت و پیچیده می‌باشد. بنابراین بدلیل وجو خطاهای مختلف آنچه در مورد این ابزار لازم به نظر می‌رسد کالیبراسیون آنها می باشد. تا کنون مدل های مختلفی جهت بهبود کیفیت داده های لیزر اسکنر ارائه شده است. در این مقاله بر اساس ساختار داخلی این دستگاه، مدلی پارامتریک جهت کالیبراسیون ابر نقاط حاصل ارائه می شود که اثر آن بر کیفیت داده های 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 وابستگی‌آن‌ها 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 مکاتبه‌کننده: الناز محمد زنجانی‌پور: تهران،خیابان ولیعصر،روبروی ساختمان اسکان،دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی،آزمایشگاه فتوگرامتری تحلیلی تلفن: ۸۸۸۷۷۰۷۳ داخلی ۱۱۶

Email: e.zanjanipour@gmail.com

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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 اندازه گیری 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 دقیق تر) بدست آمده است ارتباط بر قرار 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 برگیرنده 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 مدل های 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 برگیرنده 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 آنجایی‌که دانش درخصوص عملکرد داخلی لیزراسکنرهای زمینی به‌دلیل 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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

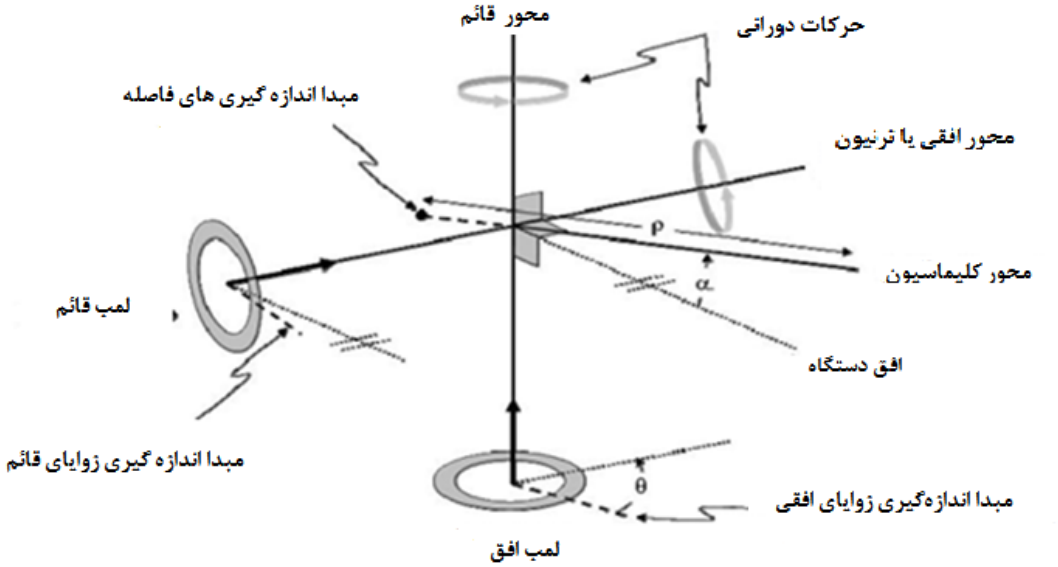
مجموع چهار پارامتر فوق به صورت زیر به مشاهدات اعمال می‌گردند:

رابطه (۱) $$\Delta\rho = a_0 + a_1.\rho$$

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

رابطه (۳) $$\Delta\varphi = c_0$$

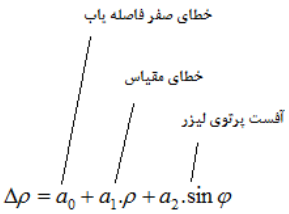
تجربه نشان داده است که این پارامترها مهم‌ترین پارامترهای کالیبراسیون هستند [۳] و بنابراین به‌عنوان مبنای مدل کالیبراسیون در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر پارامترهای مذکور، اگر چنانچه نگاهی دقیق‌تر به ساختار داخلی لیزر اسکنر انداخته شود، خطاهای دیگری را نیز که قابل مدلسازی و حذف از مشاهدات لیزر اسکنر می‌باشند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



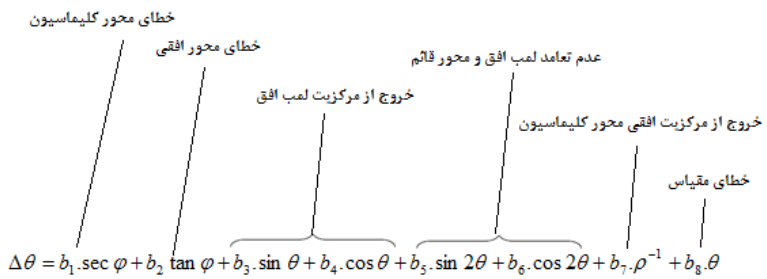
شکل ۱: محل قرار گیری محور ها و لمب های لیزر اسکنر

به گونه‌ای که در تصویر ملاحظه می‌شود علاوه بر خطاهای فوق الذکر 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 خواهد بود و به صورت زیر ارائه می‌گردد:

رابطه (۴)



رابطه (۵)



[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

رابطه (۶)

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

خطای شاخص لمب قائم — خطای مقیاس — خروج از مرکزیت لمب قائم — عدم تعامد محور افقی و لمب قائم — خروج از مرکزیت قائم محور کلیماسیون — خطای وابل محور قائم

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. به‌منظور 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.

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 به‌صورت ستون‌های نسبتاً منظم چسبانده شدند. در شکل زیر(۲) تصویر پنوراما‌ی اتاق آزمون نشان داده شده است.



شکل۲: تصویر پنوراما‌ی اتاق آزمون

۴- تشریح مراحل صورت گرفته

در ادامه چگونگی انجام مشاهدات و آزمون‌های صورت گرفته به تفصیل بیان می‌گردد.

۴-۱- مشاهدات صورت گرفته توسط لیزر اسکنر

در هر پروژه لیزر اسکنر در استقرارهای مختلف

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

مشاهدات را برداشت می‌نماید. محل قرارگیری 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:

در موقعیت شماره یک که تقریباً وسط اتاق قرار داشت:

الف- در دو ارتفاع متفاوت، (ایستگاه S1وS5)

ب-دو آزیموت متفاوت صفر درجه و ۹۰ درجه،(ایستگاه S1وS2)

ج-دو تغییر در لمب قائم در شیب(۲۰+ درجه، ۲۰- درجه)،(ایستگاهS3وS4)

و در دو مکان استقرار متفاوت دیگر در موقعیت‌های شماره دو و سه، (ایستگاه S6وS7)

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.



شکل۳:محل قرار گیری لیزر اسکنر در سه ایستگاه در تصویر پنوراما

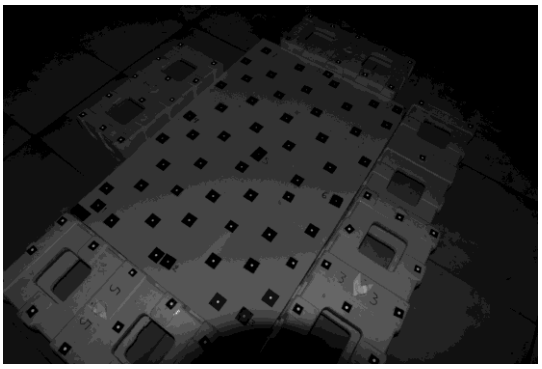
۴-۲- تعیین مختصات تار گت‌های اتاق آزمون به‌صورت دقیق

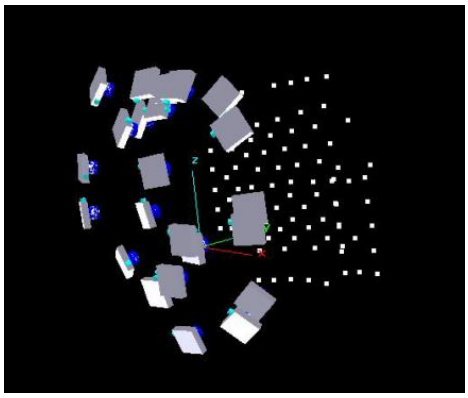
انجام این مرحله بدلیل داشتن مبنایی دقیق جهت ارزیابی دقت مشاهدات لیزر اسکنر مورد نیاز می‌باشد. به شکلی که بیان گردید در این بخش ابتدا توسط یک پیش کالیبراسیون پارامترهای توجیه داخلی دوربین(فاصله کانونی-موقعیت مرکز تصویر-پارامترهای مدلساز اعوجاج شعاعی...)تعیین میگردند و بعد از آن با انجام عکسبرداری‌ها از 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 پیش‌کالیبراسیون صورت پذیرفت. میدان آزمون موجود در آزمایشگاه جهت پیش کالیبراسیون یک تخته ام دی اف به همراه چهار قطعه یونولیت که در کنار هم به ابعاد ۱۶۰*۱۲۰ 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 برچسب‌هایی برنگ سیاه و شبرنگ‌هایی برنگ نقره‌ای بود به شکلی که شبرنگ‌های سیاه از جنس مات بوده و شبرنگ‌های نقره ای دارای بازتابندگی در محیط نیمه تاریک با تابانیدن نور به آن‌ها می باشند. جهت تهیه هر دو برچسب به ابعاد ۲*۲ سانتیمتر بریده شده‌اند و مرکز برچسب سیاه رنگ با یک پانچ مناسب به اندازه پنج میلیمتر سوراخ گردیده است و سپس برچسب سیاه روی برچسب 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

در برخی از استقرارها نیز دوربین یک عکس می‌گیرد ۹۰ درجه می‌چرخد و عکس دیگری گرفته می‌شود تا وابستگی پارامترهای دوربین از بین برود یا کاهش بیابد.) گرفته شد. سپس عکس‌ها در در نرم افزار وارد می‌شوند و پردازش می‌گردند. در این فرآیند شش اسکیل بار نیز در تست فیلد در نظر گرفته شدند که طول آن‌ها به‌صورت دقیق از قبل اندازه‌گیری 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 می‌باشند.





شکل ۴: تصویر راست:میدان آزمون مورد استفاده در پیش کالیبراسیون دوربین رقومی به همراه scale barها.
تصویر چپ: نحوه قرارگیری دوربین جهت عکسبرداری

به‌عنوان مجهولات با ۸۶۱ درجه آزادی و با انجام سرشکنی نرم‌افزار rmse نهایی را برای طول‌های مبنا به میزان ۰/۰۹۰ میلیمتر با قرار دادن پارامترهای محاسبه شده در معادلات شرط هم خطی و محاسبه مقادیر باقی مانده از طریق رابطه زیر ارائه داد.

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

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

در روابط فوق d برابر طول هر اسکیل بار بعد از جایگذاری پارامترهای محاسبه شده در معادلات شرط هم‌خطی، x وy وz مختصات جدید محاسبه شده برای هر تارگت و n مختصات برابر تعداد اسکیل بار ها می‌باشد.

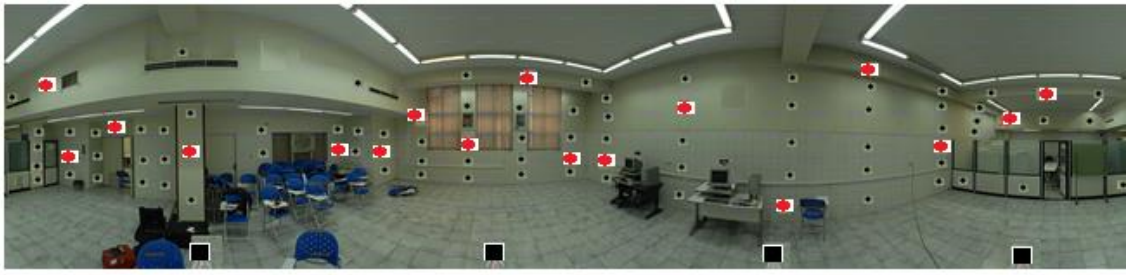
بعد از محاسبه پارامتر های توجیه داخلی دوربین جهت محاسبه مختصات دقیق تار گت‌های اتاق آزمون تعداد ۲۰۵ عکس از نقاط مختلف(۹۷ تارگت) اتاق توسط دوربین رقومی گرفته می‌شود. سپس عکس‌ها در نرم‌افزار وارد می‌شوند و پردازش می‌گردند.

در این قسمت مقادیر پارامترهای دوربین محاسبه شده در مرحله پیش کالیبراسیون در نرم‌افزار وارد و در طول فرایند ثابت در نظر گرفته می‌شوند. سعی بر آن شده است که در هر ایستگاه از چندین زاویه عکسبرداری صورت بگیرد به گونه‌ای که در هر عکسبرداری بیشترین تعداد تارگت‌ها 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 اندازه‌های دقیق تعدادی اسکیل بار بود. این طول‌ها می‌توانستند بین تعدادی از تارگت‌های موجود در اتاق آزمون اختیار گردند. اما از آنجا که ابزار بسیار دقیق برای اندازه‌گیری آن‌ها در اختیار نبود (تنها وسیله در دسترس متر فلزی بود که در چنین اندازه گیری‌های دقیقی نمی‌تواند به‌عنوان ابزار خیلی دقیق مورد استفاده قرار بگیرد و خود خطا

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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 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.



شکل۶: تصویر اتاق آزمون و محل ایستگاه های توتال استیشن.نقاط ضربدر:تارگت هایی که با توتال قرائت شده اند.

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 تارگت ها+تعداد نقاط کنترل)*سه) با درجه آزادی ۴۸۸۰ و به طریق سرشکنی محاسبات در نرم‌افزار صورت پذیرفت و نرم‌افزار rmse نهایی را به‌صورت ۰/۸۶۶۱، ۰/۹۸۷۸ و۰/۷۸۹۴ میلیمتر برای مقادیر z،y،x ارائه داد.

۴-۳- مدل ریاضی مورد استفاده در سرشکنی

معادله مشاهده ترانسفورماسیون کانفرمال سه‌بعدی تارگت j–ام که از ایستگاه i–ام اسکنر اسکن شده‌است می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$f^{i}{}_{j}(L^{i}{}_{j}, \hat{X}^{i}{}_{j}) = X^{i}{}_{photo\ j} - [R(\omega^{i}, \phi^{i}, \kappa^{i}).x_{scan\ j} + T^{i}] \quad ; \quad i = 1,2,...p \qquad j = 1,2,...m$$ رابطه (۹)

جائی‌که در آن p تعداد استقرارهای دستگاه و m تعداد تارگت‌های اسکن شده در هر استقرار می‌باشد. در رابطه فوق T و R به ترتیب شامل پارامترهای انتقال و دوران جهت ترانسفورماسیون بین مختصات لیزر اسکنر و فتوگرامتری در هر استقرار(i–ام) می‌باشند. $X^{i}{}_{photo\ j}$

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

بـردار مختصـات تارگـت j-ام را در سیسـتم مختصـات فتوگرامتری و $x^{i}{}_{scan\ j}$ شامل بـردار مختصـات تارگـت j ام در استقرار i ام در سیستم مختصـات لیـزر اسـکنر می‌باشد که در صورت اعمـال رابطـه تصـحیح شـده آن رابطه زیر بدست می‌آید:

رابطه (۱۰)

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

در رابطه بالا r و φ و θ به ترتیب فاصله و زاویه قائم و جهت افقی می‌باشند که همان مشاهدات خامی هستند توسـط لیـزر اسـکنر برداشـت شـده‌انـد. مقـادیر $\Delta\rho$ و $\Delta\varphi$ و $\Delta\theta$ نیز به ترتیب مقادیر خطا در جهت فاصـله و زاویـه قـائم و جهـت افقـی هسـتند کـه لازم اسـت محاسـبه شـده و از مشـاهدات خـام کسـر گردنـد تـا مقادیر بهبود یافته مشاهدات بدست آیند. و این مقـادیر برابـر مـدل ارائـه شـده در روابـط(۴-۵-۶)مـی‌باشـند. نکتـه بسـیار مهـم دیگـر در ایـن بخـش در اجـرای محاسبات سرشـکنی داشـتن مقـادیر اولیـه مجهـولات است. برای این منظور و جهت تعیین پارامترهای اولیـه انتقال کانفرمـال از روابـط کواترنیـون اسـتفاده گردیـد. و مقـادیر اولیـه پارمترهـای اضـافه مـدل کننـده خطـای سیسـتماتیک دسـتگاه نیـز برابـر صـفر در نظـر گرفتـه شـدند، تـا دقـت اولیـه مشـاهدات بدون اعمال هیچ پارامتر اضافه‌ای قابـل محاسـبه باشـد. بعـد از تعیـین مقـادیر بـاقی مانـده، جهـت تشـخیص بـاقی مانـده‌هـای اشـتباه کـه از مشـاهدات اشـتباه نتیجه می‌شوند و می‌بایست از مشاهدات حـذف شـوند، انحراف معیار در سه ستون dx و dy وdz محاسـبه و بـا اجرای تست 3σ، باقی‌مانده‌های بیشـتر از ایـن مقـادیر شناسایی و مشاهدات مربوطه آن‌ها حذف شوند.

در نهایـت بعـد از تعیـین مقـادیر اولیـه مجهـولات، محاسـبات اصـلی سرشـکنی مطـابق روابـط زیـر صـورت مـی‌پـذیرد و مقـادیر دقیـق مجهـولات تعیین می‌گردد. بعد از تعیین پارامترهای مـورد نظـر از آنجا که ممکن است بین پارامترهـای مـدل پیشـنهادی وابستگی وجود داشته باشد که این موضوع خود بر دقت نهـایی اثرگـذار خواهـد بـود، قبـل از هـر کـار دیگـری لازم اسـت تـا بـا تعیـین میـزان وابسـتگی موجـود بین مجهولات بدست آمده و حذف پارامترهـای وابسـته که با کم کردن تعداد مجهولات باعـث خواهـد شـد تـا نتایج با دقت بهتری بدسـت آینـد، اطمینـان بـه نتـایج بدست آمده بـالا رود. سـپس بـا جـدا کـردن مـاتریس کواریانس پارامترهای مدل از پارامترهای توجیه خارجی و محاسبه وابسـتگی بـین آن‌هـا از طریـق رابطـه زیـر، ضرایبی که وابستگی آن‌ها با یکدیگر از ۰/۷ بیشتر بوده به‌عنوان پارامترهای وابسـته بـه هـم شناسـایی شـده و یکی از آن‌ها را حذف مـی‌گردنـد. (لازم بـه ذکـر اسـت جهـت تشـخیص اینکـه کـدام یـک از هـر دو ضـریب وابسته می‌بایست حـذف گردنـد، بـا مقایسـه وابسـتگی هـر یـک از آن‌هـا بـا دیگـر ضـرایب و همچنـین جابجـا نمـودن در حـذف هـر یـک و مقایسـه تغییـر در بهبود دقـت پـارامتر مـورد نظـر شناسـایی و حـذف گردید). در ایـن ارزیـابی سـه پـارامتر c_5وc_3وc_4 از مـدل حذف گردیدند و به این ترتیب مدل نهایی با ۱۶ ضریب مـدل کننـده خطـای سیسـتماتیک لیـزر اسـکنر به صورت زیر در خواهد آمد:

رابطه (۱۱)

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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

رابطه (۱۳)
$$\Delta\varphi = c_0 + c_1.\varphi + c_2.\sin\varphi + c_6.\sin 3\theta + c_7.\cos 3\theta$$

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 پارارمترهای بدست آمده و بررسی میزان وابستگی موجود بین ضرایب، ضرایب وابسته حذف گردیدند.

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

جدول۱: میزان rmse داده های لیزر اسکنر بعد از حذف پارامتر های 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

بعد از اعمال کل پارامترهای اضافه و بعد از حذف پارامترهای وابسته به مدل‌های سرشکنی به ترتیب بهبود دقت ٪۲۶،٪۲۱،٪۲۰ر باقی‌مانده‌های ρ و θ و φ و $x_0y_0z_0$ 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 آن‌جا که مشاهدات فتوگرامتری و کلاً روش فتوگرامتری در مقایسه با مشاهدات لیزراسکنر، روش دقیق محسوب می‌گردد، از خطای روش فتوگرامتری و همچنین خطای کواترنیون جهت محاسبه پارامترهای اولیه انتقال و همچنین خطای موجود در نرم‌افزار ری اسکن پرو[1] 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

1 Ri scan pro

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

مـــورد ارزیـــابی قـــرار گرفتنـــد. در ادامـــه پایـــداری پارامترهای بدست آمده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

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

در ایـن بخـش هـدف ایـن اسـت کـه تعیـین شـود کـدام دسـته از مشـاهدات(با موقعیـت‌هـای مختلـف-تغییـر لمـب قـائم-تغییـر لمـب افـق-تغییـر ارتفـاع) جهت کالیبراسیون و محاسبه پارامترها مناسب‌ترنـد بـه عبارت دیگر مدل پیشـنهادی در اسـتقرارهای مختلـف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا بررسی شود که در صـورت داشتن مشاهدات در این استقرارهـای مختلـف، دقـت چه تغییـری مـی‌کنـد و در کـدام حالـت دقـت بیشـتر خواهد بود. برای این منظور کل مشاهدات لیـزر اسـکنر به پنج حالت تقسیم می‌شوند:

۱.استفاده از مشاهدات تنها یک استقرارجهت محاسـبه پارامترهای مدل و بررسی دقت.(ایستگاه شماره S1).

۲.استفاده از تنها سه دسته مشـاهدات مربـوط بـه سـه موقعیت مختلف.(ایستگاه‌های شماره S1، S6، S7).

۳.استفاده از تنها سه دسته مشاهدات با صفر لمب قـائم متفاوت: ۲۰+ درجه، درجه ۰، ۲۰- درجه (ایسـتگاه‌هـای شماره S1، S3، S4).

۴.اسـتفاده از تنهـا مشـاهدات بـا دو صـفر لمـب افـق متفاوت(ایستگاه‌های شماره S1، S2).

۵.اســـتفاده از تنهـــا مشـــاهدات بـــا دو ارتفـــاع مختلف(ایستگاه‌های شماره S1، S5).

جهت این ارزیابی، در هر یـک از حـالات فـوق هماننـد آن چه در روند کلـی مراحـل قبـل بیـان گردیـد، ابتـدا مقـــادیر اولیـــه پـــارامترهـــای ترنسفورماســـیون محاســـبه مـــی‌شـــوند ودر مرحلـــه بعـــد در یـــک سرشـــکنی همزمـــان پارامترهـــای توجیـــه خـــارجی هر استقرار به همراه پارامترهای مدل مذکور بـه کمـک نقـاط کنتـرل بدسـت مـی‌آینـد. تسـت اشـتباهات در هـر مرحلـه صـورت مـی‌پـذیرد تـا در صـورت وجـود مشاهدات اشتباه به طریقی که گفته شد حـذف و رونـد 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 کمـک نقاط چک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. توضـیحات کامـل در این خصـوص در بخـش‌هـای قبـل بـه طـور مفصـل بیان شده است.

جـدول زیـر(۲) مقـادیر rmse اولیـه(قبل از اعمـال پارامترهای مدل کالیبراسیون)را برای مختصـات z_0y_0x و همینطور xyz برای هر یک از حالات مختلف اسـتقرار بر حسب میلیمتر ارائه می‌دهد.

جدول۲: مقادیر rmse اولیه(قبل از اعمال پارامترهای مدل کالیبراسیون) برای مختصات z_0y_0x 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)	۳/۷۳۳۵	۳/۳۶۶۳	۲/۳۵۱۲	۵/۵۴۹۷
همه حالات(F)	۳/۵۸۹۹	۳/۲۲۷۰	۲/۱۸۷۹	۵/۲۹۹۸

بعـد از محاسـبه مقـادیر پـارامترهـای کالیبراسـیون و همینطور اعمال آن‌ها به مشاهدات و محاسـبه اخـتلاف بـا مختصـات‌هـای فتـوگرامتری، مجـدداً rmseهـای $xyz_0z_0y_0x$ محاسـبه مـی‌گردند.کـه در جـدول زیـر

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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 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 پارامتر های وابسته برای مختصات xyzو همینطور xyz برای هر یک از حالات مختلف استقرار

نحوه استقرار	Rmsex	Rmsey	Rmse Z	Rmsexyz	پارامتر حذفی	Rmsex بعد حذف	Rmsey بعد حذف	RmseZ بعد حذف	Rmsexyz 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

آنچه در تفسیر جداول فوق می توان 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 پارامتر های حذف شده c_3،c_4وc_5 اضافه شدند. سه پارامتر c_3،c_4وc_5 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 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 قائمC)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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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 ۳۷٪،۲۳٪ و ۳۰٪ در برای مقادیر ρ و θ و φ و $z_g y_g x_g$ 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_4وc_5 ، پایداری نسبی در خصوص دیگر ضرائب برقرار می‌باشد. در ادامه دقت مدل پیشنهادی با دیگر مدل های ارائه شده مقایسه و ارزیابی می گردد.

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 کرده اند. 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 ۲۶٪،۲۱٪و ۲۰٪ را برای ρ، θ و φ را 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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 می توان 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 اسکنر در آن مد نظر قرار داده باشد.

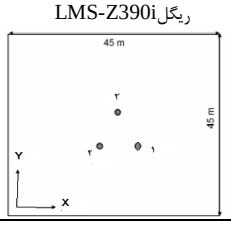
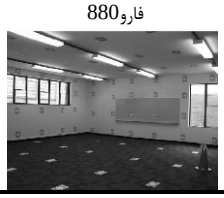
۶)در مدل اول برای دستگاه منسی[1] (شش پارامتر))، دو پارامتر تجربی که خطایی در زاویه قائم را به صورت تابعی از زاویه افقی با روابط سینوسی و کسینوسی مدل می‌نمایند وجود دارد($c_1\cos(2\theta)+c_2\sin(2\theta)$).در مدل دوم برای دستگاه منسی(پنج پارامتر)، دو پارامتر تجربی دیگری که خطا در زاویه قائم را مجدد به صورت تابعی از زاویه افقی با روابط کسینوسی مدل می‌نمایند وجود دارد($c_1\cos(2\theta)+c_4\cos(4\theta)$).در مدل اول برای تریمبل[2](چهار پارامتر)، تنها پارامترهای فیزیکی وجود دارند و پارامتر تجربی استفاده نشده است، در حالی‌که 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 مدل می‌کند $\sin^{-1}\frac{c}{\rho}$ و همینطور پارامتر تجربی دیگری که خطایی در زاویه افق را باز به صورت تابعی از فاصله مدل می‌نماید وجود دارد.($\sin^{-1}\frac{b}{\rho}$). در مدل مربوط به فارو[3] (۱۶ پارامتر)، دو پارامتر تجربی خطایی در فاصله را به صورت تابعی از زاویه افقی مدل می‌نمایند ($\cos(4\theta)+\sin(4\theta)$) و همینطور دو پارامتر تجربی دیگر خطا در زاویه افقی را به صورت تابعی از زاویه قائم مدل 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 لیچتی،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.

1 Mensi
2 Trimble
3 Faro

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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 تز
چو , لیچتی , تسکی (۲۰۱۰)	منسی(GS200) 	در اتاقی به ابعاد۵*۵*۳ و استفاده از۱۰۰تارگت 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
لیچتی،چو،تسکی (۲۰۱۰)	منسی(GS200) 	در اتاقی به ابعاد۱۴*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
لیچتی،چو،تسکی (۲۰۰۹)	تریمبلGX 	در اتاقی به ابعاد۱۴*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
لیچتی،چو،تسکی (۲۰۰۹)	تریمبلGX 	در اتاقی به ابعاد۵*۵*۳ و استفاده از۱۰۰تارگت 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)	ریگلLMS-Z390i 	در اتاقی به ابعاد۱۰*۴*۷ و استفاده از۱۰۰تارگت 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
لیچتی ۲۰۰۶	فارو880 	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

۸)در خصوص تحقیقی که لیچتی،چو و تسکی انجام داده‌اند، مشاهده می‌شود که حتی در مورد

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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

۹)در تحقیق لیچتی،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 حالی‌که با مشاهدات تز زمانی‌که آزمون دو استقرار است(پارامتر های فیزیکی بیشترند) بهبود بیشتری بدست آمده است که این تاکیدی 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 a0 (مدل‌کننده خطای صفر فاصله یاب) می‌باشد و در ادامه هر یک پارامترهای فیزیکی مختلفی استفاده نموده‌اند.

۱۱) زمانی‌که روابط مدل برای $\Delta\varphi$ یا $\Delta\theta$ وجود ندارد، از زمانی‌که برای هر سه دسته مشاهدات ρ ،θ و θ روابط تصحیح خطا نوشته می شود، 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 ۰/۸۶۶۱ و ۰/۹۸۷۸ و ۰/۷۸۹۴ برای $x_g y_g z_g$ بدست آمد.

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، می تواند 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 پارامتر های حذف شده c_3،c_4وc_5 اضافه شدند. سه پارامتر c_3،c_4وc_5(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 می باشند و

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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 به‌طرق دیگر مانند مقایسه فازی و غیره انجام می‌دهند، ممکن است پارامتر های فیزیکی 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.

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-calibaration 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

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

..

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.1, No.4, Spring 2014

Representation a complete parametric model to calibrating TLS instruments

Elnaz mohammad zanjanipour[1]*, Masood varshosaz[2], Mohammad saadat seresht[3]

1. Photogrammetry graduate student, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Techcnology,Tehran,iran
2. Assistant Professor of Surveying Engineering, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Techcnology,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 datas automaticly.investigating of the error sources in TLS measurments is rather complicated due to a large number of influencing factors that are quite interrelatred. Thus calibration is an important issue in these devices. several models have been proposed to improve the accuracy of the laser scanners datas until now.each of these models includes some physically parameters and some empirically parameters which have been produced by observation of residuals diagram,in this paper a parametric model based on the internal structure of laser scaner 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

Correspondence Address: Elnaz mohammad zanjanipour:Tehran,valiasr ave,khaje nasir toosi university,geodesy and geomatic college,analytical photogrammetry lab.Tel:88877073-116
Email: e.zanjanipour@gmail.com

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.29252/jgit.2.1.89]