

## مقایسه بهبود دقت مدلی پارامتریک جهت کالیبراسیون لیزراسکنر زمینی با مدل های موجود

الناز محمد زنجانی پور<sup>۱\*</sup>، مسعود ورشوساز<sup>۲</sup>، محمد سعادت سرشت<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>مربی گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
e.zanjanipour@gmail.com

<sup>۲</sup>استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
varshosazm@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup>استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران  
msaadat@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۲، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۳)

### چکیده

در طول دهه گذشته، مهندسی نقشه برداری در نقاط مختلف جهان، پیشرفت های گسترده ای را در تکنیک های جمع آوری داده های مکانی داشته است. از بین راه های مختلف پیشنهادی، یکی از این جدیدترین این توسعه ها به صورت استفاده از تکنولوژی لیزراسکنر ظاهر شده است. متد لیزراسکنر 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 اندازه گیری های لیزراسکنر به دلیل عوامل زیاد تأثیرگذار بسیار، سخت و پیچیده می باشد. بنابراین بدلیل وجود خطاهای مختلف آنچه در مورد این ابزار لازم به نظر می رسد، کالیبراسیون آن ها می باشد. تا کنون مدل های مختلفی جهت بهبود کیفیت داده های لیزر اسکنر ارائه شده است، اما از مشکلات اساسی در کالیبراسیون لیزراسکنر این است که، در مدل های ارائه شده توسط محققین مختلف، تنها پاره ای از خطاهای فیزیکی مدل می شوند و با مشاهده باقی مانده خطاهای تعدادی پارامتر به صورت تجربی به مدل اضافه می شود که تنها برای کالیبراسیون همان دستگاه مورد مطالعه و همان شرایط پروژه قابل استفاده می باشد. در این مقاله بر اساس ساختار داخلی دستگاه ریگل، مدلی پارامتریک شامل ۱۹ پارامتر صرفاً فیزیکی 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. اعمال پارامترهای محاسبه شده مدل بر مشاهدات مختلف و بهبود دقت به میزان ۲۶٪ و ۲۱٪ و ۲۰٪ در مختصات نقاط، نشان داد که این مدل قادر است نتایج قابل اعتمادی را در کالیبراسیون لیزراسکنر ارائه دهد. مقایسه این مدل با مدل های ارائه شده توسط دیگر محققین نشان دهنده این مطلب است که بدلیل اینکه تنها در بردارنده پارامترهای فیزیکی است و بر خلاف مدل های دیگر پارامتر تجربی را شامل نمی شود، برای انواع مختلفی از لیزراسکنرها قابل استفاده می باشد.

**واژگان کلیدی:** لیزر اسکنر زمینی، کالیبراسیون، ابر نقاط، مدل پارامتریک

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

کالیبره می‌گردند که این عمل با یک ترانسفورماسیون شش پارامتری شامل سه پارامتر دوران و سه پارامتر انتقال صورت می‌پذیرد.

کالیبراسیون سنسور خود به دو روش آزمایشگاهی و میدان آزمون تقسیم می‌گردد. در مورد اول مولفه‌های دستگاه مثل فاصله‌یاب و سیستم اندازه‌گیری زاویه جداگانه ارزیابی می‌شوند و این نوع کالیبراسیون به دلیل نیازمندی به ابزار دقیق و تجهیزات خاص اغلب بسیار سنگین و هزینه بر می‌باشد. در مورد دوم این روش از فتوگرامتری آمده است که بیان می‌کند کالیبراسیون، تشخیص پارامترهای توجیه خارجی و تمام خطاهای سیستماتیک از همه تصاویر گرفته شده در یک پروژه معین است.

از اولین فعالیت‌ها در خصوص کالیبراسیون میدان آزمون، استفاده از تشابه تفودولیت و لیزراسکنر زمینی بوده است که توسط Licht, Lichti در سال ۲۰۰۶ ارائه گردید. در تحقیق آن‌ها یک مدل ریاضی برای کالیبراسیون TLS<sup>۱</sup> ارائه شد. اگرچه تمرکز این روش روی یک مدل خاص از لیزراسکنر به نام FARO 880<sup>۲</sup> است، اما مدل‌های ریاضی به آسانی برای ابزار دیگر نیز قابل استفاده می‌باشد. در روش پیشنهادی ۱۰ کالیبراسیون لیزراسکنر در طول ۱۳ ماه و در شرایط مختلف (سرویس دستگاه قبل از کالیبراسیون شش، وارد نمودن ضربه به دستگاه قبل از کالیبراسیون ۱۰ و...) انجام گرفت و برای این منظور از تارگت‌های دایره‌ای به قطر هفت سانتیمتر که به دیوار و سقف و کف متصل می‌شدند، استفاده گردید [۱] و نهایتاً مدل‌های توسعه یافته بر اساس بیان شباهت لیزراسکنر با توتال استیشن برای کالیبراسیون سیستم ارائه شد.

مدل‌های پارامترهای اضافی در اینجا به دو طبقه گروه‌بندی می‌شوند، اولی مجموعه پارامترهای فیزیکی است که شامل ثابت تجمعی و خطاهای دوره‌ای و خطاهای محور افقی و کلیماتیون و شاخص لمب قائم است و گروه دوم شامل پارامترهای تجربی به دلیل خطای ساختاری وابسته به سیستم است. در ادامه مدل‌های AP<sup>۳</sup> فاصله‌یاب شامل پنج ضریب و جهت افقی شامل هفت

هدف از کالیبراسیون لیزراسکنر، مقایسه دقت واقعی دستگاه در عمل با روش دقیق‌تر نسبت به آن می‌باشد تا به این ترتیب با تشخیص انواع خطاهای محتمل در داده‌ها، روندی برای مدلسازی و خنثی کردن تأثیری که عوامل مختلف بر کیفیت هندسی این داده‌ها می‌گذارند، ارائه شود. تا کنون مدل‌های مختلفی جهت بهبود کیفیت داده‌های حاصل از لیزراسکنر ارائه شده است. هر یک از این مدل‌ها در بر گیرنده چند پارامتر فیزیکی هستند و تأکید آن‌ها در ادامه در خصوص پارامترهای تجربی است که بعد از مشاهده نمودار مقادیر باقی‌مانده به مدل‌های آن‌ها اضافه گردیده است. بررسی کلیه روابط ارائه شده توسط محققین مختلف 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 تأکید آن‌ها در ادامه در خصوص پارامترهای تجربی است که بعد از مشاهده نمودار مقادیر باقی‌مانده به مدل‌های آن‌ها اضافه گردیده است. 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 باید 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 لیزراسکنر 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، نتایج با مدل‌های دیگر مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## ۲- مروری بر فعالیت‌های صورت گرفته تا کنون

روش‌های کالیبراسیون به دو روش کلی sensor و platform تقسیم‌بندی می‌شوند. در حالت اول هر یک از بخش‌های سیستم یعنی دوربین و خود لیزراسکنر جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند و کالیبره می‌گردند و در حالت دوم در این حالت لیزراسکنر و دوربین نسبت به هم

۱ Terrestrial laser scanner

۲ Amplitude- modulation - continuous-wave

۳ Additional parameters

کلیه مدل‌های مربوط به محققین مختلف به همراه مشخصات اتاق آزمون آن‌ها در جدول ۳ آمده است و بنابراین از آوردن مجدد آن‌ها در این بخش خودداری نموده‌ایم.

ضریب و زاویه ارتفاعی شامل پنج ضریب ارائه شدند که هر یک خطاهای خاصی را مدل می‌کنند در جدول (۱) پارامترهای اضافی فیزیکی و تجربی و خطاهایی که هر یک مدل می‌کنند به تفکیک آمده است. لازم به ذکر است

جدول ۱- پارامترهای اضافی مدل پیشنهادی Licht , Lichti

پارامترهای اضافی	توضیحات
$a_0, a_1$	ثابت تجمعی فاصله یاب و خطای مقیاس
$a_2, a_3$	خطای دوره ای با پریود اسمی ۰/۶ متر
$a_4$	آفست قائم پرتو لیزر
$b_1$	خطای محور کلیمسیون
$b_2$	خطای محور قائم
$b_3, b_4$	عدم تعامد صفحه افقی و محور قائم
$b_5, b_6$	خطای سینوسی در جهت افقی به عنوان تابعی از زاویه قائم
$c_0$	خطای شاخص لمب قائم
$c_1$	خطای مقیاس در جهت قائم
$c_2$	خطای خروج از مرکزیت لمب قائم
$c_3, c_4$	خطای سینوسی در زاویه قائم به عنوان تابعی از جهت افقی

با مدل خطای دستگاه توتال استیشن قادر به مدوله شدن نبوده است.

۲- یک دریافت فاصله در حدود سه میلیمتر در ساعت‌های اولیه، در سه اسکنر یافت شد که علت احتمالی آن تغییرات درجه حرارت در نظر گرفته شد.  
 ۳- دقت مختصات تارگت برای Callidus 1.1 برابر چهار میلیمتر و برای Leica 3000 برابر پنج میلیمتر و برای Lieca 2500 برابر دو میلیمتر تعیین گردید و دقت زاویه قائم برای اسکنرهای Callidus 1.1 و Lieca3000 بهتر از افقی بود در حالیکه برای 2500 Lieca دقت‌ها مشابه بدست آمدند.

از دیگر فعالیت‌هایی که در زمینه کالیبراسیون نقطه-ای انجام پذیرفت و در همه آن‌ها به نوعی برخی پارامترهای فیزیکی ساختار داخلی لیزر اسکنر و همچنین پارامترهای تجربی بدست آمده از مشاهده روند تغییرات باقی‌مانده‌ها که خاص همان پروژه و همان مشاهدات هستند، مورد استفاده قرار گرفت، به ترتیب در زیر معرفی شده اند.

۱- D. Schneider در سال ۲۰۰۹ با سه استقرار لیزر-اسکنر در اتاق آزمون مورد نظرش، با ارائه مدل خود به بهبود دقتی برابر ۰/۱۲٪ و ۰/۲۰٪ و ۰/۲۵٪ به ترتیب در جهات

میزان بهبود هر یک از مشاهدات بعد از اعمال پارامترها به طرز قابل توجهی مشهود بود. [۷] درصد بهبود دقت با به کارگیری این روش به ترتیب چیزی در حدود ۰/۲۲٪ و ۰/۲۷٪ و ۰/۴۵٪ برای  $\rho$  و  $\theta$  و  $\phi$  بدست آمد.  
 Reshetyuk در سال ۲۰۰۶ نتایج کالیبراسیون را با مدل‌های خطای پنج ضریبه روی سه اسکنر (Lieca HDS 2500 , Callidus 1.1 , Leica HDS 3000) ارائه داد. برای این منظور نیز با در نظر گرفتن شباهت خطاهای سیستماتیک دستگاه لیزر اسکنر و توتال استیشن، عملیات کالیبراسیون انجام گرفت.

ضرایب پارامترهای مدل Reshetyuk همان خطاهایی که در جدول (۱) آمده است را مدل می‌نمایند. در طول فرایند، تعدادی اسکن با هر استقرار اسکنر در موقعیت-های متفاوت و با تعداد گوناگونی از تارگت‌ها در میدان کالیبراسیون انجام شد. محصولات کالیبراسیون این سه لیزر اسکنرنتایج زیر را به دنبال داشت:

۱- آنالیز خطاها در زوایای قائم اندازه‌گیری شده با Callidus 1.1 نشان داد که خطاها با افزایش زاویه قائم به صورت خطی افزایش می‌یابند. این خطا را می‌توان خطای مقیاس قائم<sup>۱</sup> نام‌گذاری کرد. این خطا

<sup>۱</sup> Vertical Scale Error

طول و زاویه افقی و زاویه قائم برای دستگاه RIEGL LMS-Z390i دست یافت.

در رابطه او  $c_0, b_2, b_1, a_1, a_0$  همان ضرایب معرفی شده در جدول (۱) هستند و خطاهای یکسانی را مدل می-نمایند و در ادامه  $b_4, b_3$  مدل کننده خروج از مرکزیت لمب افق و  $b_7, b_6$  مدل کننده خطای عدم تعامد لمب افق و محور قائم و  $c_2, c_1$  خروج از مرکزیت لمب قائم و  $c_4$  خطای wobble محور قائم را مدل می-نماید. یک پارامتر تجربی که خطایی در زاویه قائم را به صورت تابعی از فاصله مدل می کند  $\sin^{-1} \frac{c_3}{\rho}$  و همینطور پارامتر تجربی دیگری که خطایی در زاویه افق را باز به صورت تابعی از فاصله مدل می-نماید وجود دارد.  $(\sin^{-1} \frac{b_5}{\rho})$ .

۲- Teski, Lichti, Chow در سال ۲۰۰۹ دو آزمایش متفاوت برای کالیبراسیون دستگاه Trimble GX انجام دادند و با دستیابی به دو فرمول متفاوت، بهبود دقت را برای این دستگاه ایجاد نمودند. ابتدا با ارائه مدلی ۷ پارامتری و با دو استقرار لیزر اسکنر به بهبود دقتی برابر ۰٪ و ۳٪ و ۲٪ به ترتیب در جهات طول و زاویه افقی و زاویه قائم برای دستگاه Trimble GX دست یافتند.

در رابطه آن‌ها  $a_1$  آفست پرتوی لیزر را مدل می کند و  $b_1$  نیز خروج از مرکزیت لمب افق را بر طرف می کند. دو پارامتر تجربی نیز که خطایی در زاویه قائم را به صورت تابعی از زاویه افقی با روابط سینوسی و کسینوسی مدل می-نمایند در این روابط وجود دارد  $(c_1 \cos(2\theta) + c_2 \sin(2\theta))$ .

در مرحله بعد در اتاق آزمون دیگری و با تعداد متفاوتی از تارگت‌ها که اطلاعات آن در جدول ۳ وجود دارد، توسط چهار استقرار لیزر اسکنر و با ارائه مدلی ۴ پارامتری به بهبود دقتی برابر ۱۰٪ و ۷٪ و ۱٪ به ترتیب در جهات طول و زاویه افقی و زاویه قائم برای دستگاه Trimble GX دست یافتند. نتایج نشان دادند که فرمول دوم به بهبود بیشتری دست می-یابد.

۳- Teski, Lichti, Chow دو آزمایش متفاوت دیگر برای کالیبراسیون دستگاه Mensi(GS200) انجام دادند و با دستیابی به دو فرمول متفاوت بهبود دقت را برای این دستگاه ایجاد کردند. ابتدا توسط دو استقرار لیزراسکنر، با ارائه مدلی ۶ پارامتری به بهبود دقتی برابر ۱۷٪ و ۱۴٪

و ۱۴٪ به ترتیب در جهات طول و زاویه افقی و زاویه قائم برای دستگاه Mensi(GS200) دست یافتند.

که در رابطه آن‌ها  $b_0$  خطای مقیاس در جهت افقی و  $c_3$  خطای wobble محور قائم را مدل می نماید و دو پارامتر تجربی نیز که خطایی در زاویه قائم را به صورت تابعی از زاویه افقی با روابط سینوسی و کسینوسی مدل می-نمایند، در روابط فوق وجود دارد  $(c_1 \cos(2\theta) + c_2 \sin(2\theta))$ .

در مرحله بعد توسط چهار استقرار لیزراسکنر مشاهده گردیدند. با ارائه مدلی ۵ پارامتری به بهبود دقتی برابر ۱۲٪ و ۱۰٪ و ۵٪ به ترتیب در جهات طول و زاویه افقی و زاویه قائم برای دستگاه Trimble GX دست یافتند. نتایج نشان دادند که فرمول اول به بهبود بیشتری دست می-یابد. در آن رابطه  $c_3$  و  $c_2$  خطای wobble محور قائم را مدل می-نماید و دو پارامتر تجربی دیگری که خطا در زاویه قائم را مجدد به صورت تابعی از زاویه افقی با روابط کسینوسی مدل می-نمایند وجود دارد  $(c_1 \cos(2\theta) + c_4 \cos(4\theta))$ .

به گونه‌ای که بیان گردید کلیه مدل‌های ارائه شده شامل تعدادی پارامتر فیزیکی و همچنین پارامترهای تجربی هستند که صرفاً جهت بهبود مقادیر باقی‌مانده اضافه شده‌اند و توجیه فیزیکی ندارند و بنابراین در شرایط مختلف متفاوت خواهند بود.

در ادامه مدل پیشنهادی در این زمینه ارائه می‌گردد که در تنها بر گیرنده خطاهای ساختار داخلی لیزراسکنر می‌باشد و بنابراین برای انواع مختلفی از این نوع دستگاه‌ها قابل استفاده خواهد بود.

### ۳- توسعه یک مدل جدید

مشکل مدل کردن سنجنده شاید مهم‌ترین بخش در کالیبراسیون لیزر اسکنر باشد [۱] 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 TLS با تمرکز بر فرضیات ایجاد می‌شود.

از آنجا که لیزراسکنرها مشابه با توتال استیشن‌های بدون رفلکتور عمل میکنند، اغلب محققین مدل خطای

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

- خطای صفر (جدایی بین موقعیت صفر الکتریکی و مکانیکی اسکنر) و مقیاس فاصله یاب لیزر (برابر یک ضریب مقیاس در فاصله اندازه‌گیری شده)، خطای محورهای افقی (بدلیل عمود نبودن محور افقی بر محور قائم) و کلیماسیون (در صورت عمود نبودن محور کلیماسیون بر محور افقی)، خطای شاخص لمب قائم (زمانی که پرتو لیزر کاملاً افقی ارسال گردد این لمب زاویه صفر را نشان ندهد).

تجربه نشان داده است که این پارامترها مهم‌ترین پارامترهای کالیبراسیون هستند [۷] و بنابراین به عنوان 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. این خطاها عبارتند از:

الف) خطاهای موثر بر زاویه افقی:

۱. خروج از مرکزیت لمب افقی: در صورتی که لمب افق در مکان درست خود قرار نداشته باشد، بر زاویه افقی اندازه‌گیری شده اثر گذار خواهد بود و آن را خطادار خواهد نمود. این خطا پریودیک بوده و به صورت ترم‌های سینوسی و کسینوسی قابل مدل‌سازی می‌باشد [۱۲].

۲. عدم تعامد محور قائم بر لمب افق: این خطا نیز در صورتی که محور قائم بر لمب افق عمود نباشد به شکل اثر گذار بر زاویه افقی ایجاد خواهد شد که مجدداً پریودیک بوده و به صورت زیر قابل مدل‌سازی می‌باشد [۱۲]:

۳. خروج از مرکزیت افقی محور کلیماسیون: اثر این خطا متفاوت از اثر خطای محور کلیماسیون است زیرا خطای کلیماسیون زمانی است که این محور بر محور افقی عمود نباشد.

۴. تغییر مقیاس در جهت زاویه افقی نیز برابر یک ضریب مقیاس در زاویه افقی اندازه‌گیری شده می‌باشد.

ب) خطاهای موثر بر زاویه قائم:

۱. خطای مقیاس در زاویه قائم که همانند خطای مقیاس در جهت افقی از طریق اعمال یک ضریب در زاویه قائم اندازه‌گیری شده مدل می‌گردد.

۲. خروج از مرکزیت لمب قائم: که از آنجا که به صورت یک تابع پریودیک سینوسی است توسط ترم‌های سینوسی مدل‌سازی شده و اثر آن از زاویه قائم اندازه‌گیری شده مطابق رابطه زیر حذف می‌گردد. [۱۳]

۳. عدم تعامد لمب قائم و محور افقی (محور ترنیون): این خطا نیز در صورتی که محور افقی بر لمب قائم عمود نباشد به شکل اثر گذار بر زاویه قائم ایجاد خواهد شد که مجدداً پریودیک بوده و به صورت زیر قابل مدل‌سازی می‌باشد [۱۳]:

۴. خروج از مرکزیت قائم محور کلیماسیون: همانگونه که بیان گردید ممکن است محور کلیماسیون بر محور قائم عمود باشد ولی دارای خروج از مرکزیتی در راستای افق یا قائم باشد که در این صورت می‌بایست اثر آن در هر دو راستا شناسایی و از مشاهدات حذف گردد.

۵. خطای wobble محور قائم: که هنگام چرخش لیزر اسکنر حول محور قائم اتفاق می‌افتد. خطایی است پریودیک که بر زاویه قائم اندازه‌گیری شده اثر می‌گذارد و به صورت زیر مدل می‌شود [۱۳]:

ج) خطای موثر بر فاصله اندازه‌گیری شده:

۱. آفست قائم پرتو لیزر: چنانچه پرتوی لیزر نسبت به محور افق دارای آفست باشد، بر حسب تابعی از زاویه قائم اندازه‌گیری شده خطایی ایجاد خواهد نمود که سینوسی است و می‌بایست اثر آن به صورت زیر از مشاهده فاصله کسر گردد [۱۱].

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:

$$\Delta\rho = a_0 + a_1.p + a_2.\sin(\varphi) \quad (1)$$

$a_0$  خطای صفر فاصله یاب

$a_1.p$  خطای مقیاس

$a_2.\sin(\varphi)$  آفست پرتوی لیزر

شده است مقایسه گردیدند. به این ترتیب و از طریق این مقایسه تاثیر مدل پیشنهادی بر دقت مختصات نقاط مورد ارزیابی قرار می گیرد. 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.

#### ۴-۱- مشخصات اتاق آزمون و تارگت‌های مورد استفاده

اتاق آزمون، آزمایشگاه فتوگرامتری در دانشگاه تهران به ابعاد ۱۵\*۵ انتخاب گردید که در قسمت‌های 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 (۱) تصویر پنورامی اتاق آزمون نشان داده شده است.

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

#### ۴-۲- مشاهدات صورت گرفته توسط لیزراسکنر

در هر پروژه لیزراسکنر در استقرارهای مختلف 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 RIEGL 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 S1 و S5)

ب- دو آزیموت متفاوت صفر درجه و ۹۰ درجه، (ایستگاه S1 و S2)

ج- دو تغییر در لمب قائم در شیب (۲۰+ درجه، ۲۰- درجه)، (ایستگاه S3 و S4)

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

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

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

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 wobble 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.

#### ۴- محاسبه ضرایب پارامترهای مدل توسعه یافته

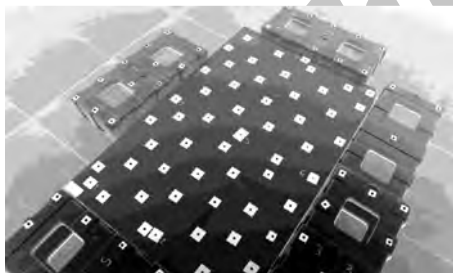
جهت محاسبه پارامترها لازم است مختصات نقاط علاوه بر لیزر اسکنر به روش دقیق دیگری نیز اندازه‌گیری شوند و با برقراری روابط ترانسفورماسیون سه بعدی کانفرمال بین دو سیستم مختصات لیزراسکنر و روش دقیق و انجام محاسبات سرشکنی، مقادیر آن‌ها بدست آیند. برای ارزیابی دقیق میزان بهبود دقت داده‌های لیزر-اسکنر نیاز است 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 مقاله روش فتوگرامتری در نظر گرفته

ارتفاع و لمبهای دستگاه در استقرارهای مختلف این بود که ارزیابی پایداری ضرائب مدل پیشنهادی در حالات مختلف صورت پذیرد. تصویر زیر (۱) محل قرارگیری لیزر-اسکندر را در سه موقعیت در اتاق آزمون در تصویر پنوراما نشان می‌دهد.

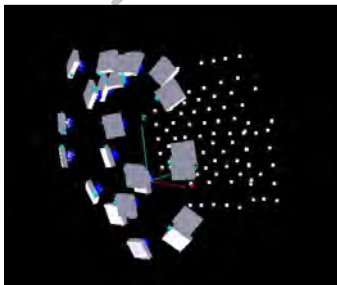


شکل ۱- تصویر پنورامای اتاق آزمون و محل قرارگیری لیزر اسکندر در سه ایستگاه

که در برخی از استقرارها نیز دوربین یک عکس می‌گرفت، ۹۰ درجه می‌چرخید و عکس دیگری گرفته می‌شد تا وابستگی پارامترهای دوربین از بین برود یا کاهش بیابد. گرفته شد. سپس عکس‌ها در نرم‌افزار وارد می‌شوند و پردازش می‌گردند. در این فرآیند شش scale bar نیز در تست‌فیلد در نظر گرفته شدند که طول آن‌ها به صورت دقیق از قبل اندازه‌گیری شده است. در شکل (۲) میدان آزمون مورد استفاده و نحوه قرارگیری دوربین جهت عکسبرداری نشان داده شده است. خطوط موجود در میدان آزمون نمایانگر scale bar ها می‌باشند.



(الف)



(ب)

شکل ۲- تصویر (الف): میدان آزمون مورد استفاده در پیش کالیبراسیون دوربین رقومی به همراه scale barها. تصویر (ب): نحوه قرارگیری دوربین جهت عکسبرداری

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

### ۳-۴- تعیین مختصات تارگت‌های اتاق آزمون به صورت دقیق

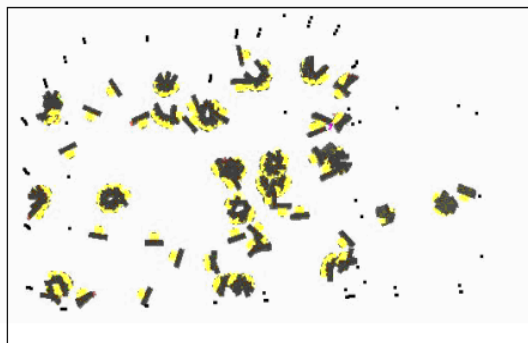
انجام این مرحله به دلیل داشتن مبنایی دقیق جهت ارزیابی دقت مشاهدات لیزراسکندر مورد نیاز می‌باشد. در این مرحله ابتدا توسط یک پیش کالیبراسیون پارامترهای توجیه داخلی دوربین (فاصله کانونی-موقعیت pp- پارامترهای مدل‌ساز اعوجاج شعاعی...) تعیین می‌گردند و بعد از آن با انجام عکسبرداری‌ها از اتاق آزمون مختصات تارگت‌ها در نرم‌افزار australis تعیین می‌شوند.

میدان آزمون موجود در آزمایشگاه جهت پیش-کالیبراسیون یک تخته mdf بود که 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. تارگت‌های مورد استفاده از نوع بازتابنده و ارزان و از برچسب‌هایی 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 بودند. جهت تهیه تارگت‌ها، هر دو برچسب به ابعاد ۲\*۲ سانتیمتر بریده شده اند 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 گونه‌ای

۱ Principal point



(الف)



(ب)

شکل ۳- تصویر (الف): نمونه ای تصاویر اخذ شده از اتاق آزمون. تصویر (ب): نحوه قرارگیری دوربین و جهت عکسبرداری

قبل از انجام روند سرشکنی در این مرحله، جهت محاسبه مختصات نقاط در مقیاس حقیقی، نیاز به داشتن اندازه‌های دقیق تعدادی scale bar 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 اندازه‌گیری‌های دقیقی نمی‌تواند به عنوان ابزار خیلی دقیق مورد استفاده قرار بگیرد و خود خطا دار می‌باشد. چگونگی قرارگیری آن به عنوان مثال کاملاً افقی و یا کاملاً عمودی و همین‌طور قرائت آن که جزء خطاهای انسانی محسوب می‌شود در نتیجه نهایی اثرگذار خواهد بود)، تصمیم بر آن شد که مختصات تعدادی از تارگت‌ها توسط توتال استیشن قرائت گردد و این نقاط به عنوان نقاط کنترل در سرشکنی وارد شوند. تا به این ترتیب مختصات نهایی تارگت‌ها در مقیاس حقیقی خود محاسبه گردند. برای این منظور مختصات ۱۷ تارگت از ۹۷ تارگت اتاق آزمون به صورت دلخواه و البته به نحوی که روی هر دیوار چند نقطه در نظر گرفته شده باشد تا کل اتاق آزمون پوشش داده شود، انتخاب گردیدند و از چهار ایستگاه توسط توتال استیشن برداشت شدند. نحوه

با نوشتن دو معادله شرط هم‌خطی به عنوان معادله مشاهده برای هر تارگت و یک معادله برای هر scale bar در نظر گرفتن پارامترهای توجیه داخلی دوربین، شش پارامتر توجیه خارجی هر عکس و سه پارامتر مختصات برای هر نقطه به عنوان مجهولات، نرم‌افزار سرشکنی را با ۸۶۱ درجه آزادی انجام داد.  $^2_{rmse}$  نهایی برای طول‌های مینا با قرار دادن پارامترهای محاسبه شده در معادلات شرط هم‌خطی و محاسبه مقادیر باقی مانده از طریق رابطه زیر برابر  $0/09$  میلی‌متر بدست آمد.

$$d = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)} \quad (۴)$$

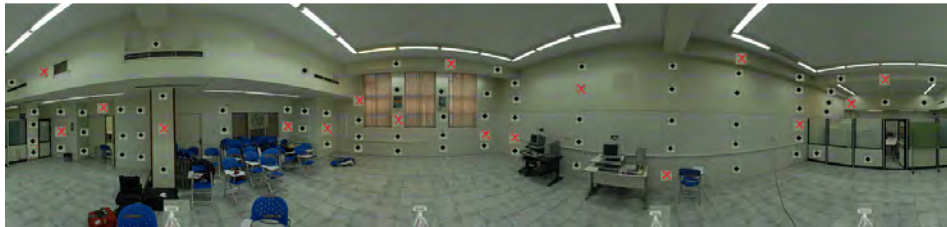
$$rmse = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\Delta d^2) / n} \quad (۵)$$

در روابط فوق  $d$  برابر طول هر scale bar بعد از جایگذاری پارامترهای محاسبه شده در معادلات شرط هم‌خطی،  $x$  و  $y$  و  $z$  مختصات جدید محاسبه شده برای هر تارگت و  $n$  برابر تعداد scale bar ها می‌باشد.

بعد از محاسبه پارامترهای توجیه داخلی دوربین، جهت محاسبه مختصات دقیق تارگت‌های اتاق آزمون، تعداد ۲۰۵ عکس از نقاط مختلف (۹۷ تارگت) اتاق توسط دوربین راقومی گرفته می‌شود. سپس عکس‌ها در 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. در (شکل ۳) نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده از تارگت‌ها و نحوه قرارگیری دوربین جهت عکسبرداری مشاهده می‌شوند. به طوریکه دیده می‌شود، 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 مجدد در تعدادی از ایستگاه‌ها چرخش ۹۰ درجه دوربین جهت کاهش وابستگی پارامترهای آن صورت پذیرفته است.



توتال استیشن را به همراه کل تارگت‌ها به صورت پانوراما نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است نقاطی که با ضربدر در تصویر مشخص شده‌اند تارگت‌هایی هستند که توسط توتال استیشن قرائت شده‌اند.



شکل ۴- تصویر اتاق آزمون و محل ایستگاه‌های توتال استیشن. نقاط ضربدر: تارگت‌هایی که با توتال قرائت شده‌اند.

استقرار  $i$ -ام در سیستم مختصات لیزر اسکنر نشان می‌دهد که در صورت اعمال رابطه تصحیح شده آن با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$x_{scan}^{(i)} = \begin{bmatrix} x_j^{(i)} \\ y_j^{(i)} \\ z_j^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_j^{(i)} - \Delta r) \cos(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \cos(\phi_j^{(i)} - \Delta\phi) \\ (r_j^{(i)} - \Delta r) \sin(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \cos(\phi_j^{(i)} - \Delta\phi) \\ (r_j^{(i)} - \Delta r) \sin(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, m$$

در رابطه بالا  $\tau$  و  $\phi$  و  $\theta$  به ترتیب فاصله و زاویه قائم و جهت افقی می‌باشند که همان مشاهدات خامی هستند توسط لیزراسکنر برداشت شده‌اند. 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. این مقادیر برابر مدل ارائه شده در روابط (۲۷-۲۸) می‌باشند. 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 quaternion<sup>۳</sup> استفاده گردید. مقادیر اولیه

<sup>۳</sup> چهارتایی‌ها (quaternion) یک سیستم عددی می‌باشند که سیستم اعداد مختلط را گسترش می‌دهند. اولین بار این دسته از اعداد توسط یک دانشمند ایرلندی بنام ویلیام روان همیلتون در سال ۱۸۴۳ توصیف شدند و در مکانیک و در فضای سه بعدی به کار گرفته شدند. فرم کلی کوآترنیون به صورت زیر بیان می‌گردد:  $q = q_0 + iq_1 + jq_2 + kq_3$ . با داشتن ماتریس quaternion و انتقال نقاط هر دو سیستم به مرکز ثقل آن‌ها، پارامترهای انتقال نیز محاسبه می‌گردند [۱۰].

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 (۴) تصویر محل ایستگاه‌های

بعد از بستن شبکه نقشه‌برداری، محاسبه مختصات نقاط کنترل توسط توتال استیشن انجام شد و دقت ۰/۶۷۸۹ و ۰/۷۴۴۲ و ۰/۴۶۲۶ در راستای  $x$  و  $y$  و  $z$  به دست آمد با قراردادن نتایج در روند سرشکنی مشاهدات فتوگرامتری، و با در نظر گرفتن تعداد معادلات (دو معادله برای هر نقطه کنترل+ دو معادله برای هر یک از 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 در نرم‌افزار صورت پذیرفت و rmse نهایی به میزان ۰/۸۶۶۱ ، ۰/۹۸۷۸ و ۰/۷۸۹۴ میلی‌متر برای مقادیر  $z, y, x$  بدست آمد.

#### ۴-۴- روند سرشکنی و محاسبه ضرایب

معادله مشاهده ترانسفورماسیون کانفرمال سه بعدی تارگت  $j$ -ام که از ایستگاه  $i$ -ام اسکنر اسکن شده است می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$f_j^i(L_j, \hat{X}_j^i) = X_j^{photo} - [R(\omega, \phi, \kappa^i) x_{scanj} + T^i] \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, p \quad j = 1, 2, \dots, m$$

جایی که 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 لیزراسکنر و فتوگرامتری در هر استقرار ( $i$ -ام) می‌باشند.  $X_j^{photo}$  بردار مختصات تارگت  $j$ -ام را در سیستم مختصات فتوگرامتری و  $x_{scanj}^i$  بردار مختصات تارگت  $j$ -ام را در

مقایسه وابستگی هر یک از آن‌ها با دیگر ضرایب و همچنین جابجا نمودن در حذف هر یک و مقایسه تغییر در بهبود دقت، پارامتر مورد نظر شناسایی و حذف گردید. در این ارزیابی سه پارامتر  $c_5$  و  $c_3$  و  $c_4$  از مدل حذف گردیدند و به این ترتیب مدل نهایی با ۱۶ ضریب مدل کننده خطای سیستماتیک لیزر اسکنر به صورت زیر در آمد:

$$\Delta \rho = a_0 + a_1 \cdot \rho + a_2 \cdot \sin \varphi \quad (8)$$

$$\Delta \theta = b_1 \cdot \sec \varphi + b_2 \cdot \tan \varphi + b_3 \cdot \sin \theta + b_4 \cdot \cos \theta + b_5 \cdot \sin 2\theta \quad (9)$$

$$+ b_6 \cdot \cos 2\theta + b_7 \cdot \rho^{-1} + b_8 \cdot \theta \quad (10)$$

$$\Delta \varphi = c_0 + c_1 \cdot \varphi + c_2 \cdot \sin \varphi + c_6 \cdot \sin 3\theta + c_7 \cdot \cos 3\theta$$

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 (۲) نمایش داده شده است.

$$(11) \quad \% \text{بهبود دقت} = \frac{\text{دقت اولیه} - \text{دقت اولیه بعد از حذف}}{\text{دقت اولیه}} \times 100$$

پارمترهای اضافه مدل کننده خطای سیستماتیک دستگاه نیز برابر صفر در نظر گرفته شدند، تا دقت اولیه مشاهدات بدون اعمال هیچ پارامتر اضافه‌ای قابل محاسبه باشد. بعد از تعیین مقادیر باقی‌مانده، جهت تشخیص باقی‌مانده‌های اشتباه که از مشاهدات اشتباه نتیجه می‌شوند و می‌بایست از مشاهدات حذف شوند، انحراف معیار در سه ستون dx و dy و dz محاسبه و با اجرای تست  $\chi^2$ ، باقی‌مانده‌های بیشتر از این مقادیر شناسایی و مشاهدات مربوطه آن‌ها حذف شوند.

در نهایت بعد از تعیین مقادیر اولیه مجهولات، محاسبات اصلی سرشکنی صورت می‌پذیرد و مقادیر دقیق مجهولات تعیین می‌گردد. بعد از تعیین پارامترهای مورد نظر از 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، 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 می‌گردند. لازم به ذکر است جهت تشخیص اینکه کدام یک از هر دو ضریب وابسته می‌بایست حذف گردند، با

جدول ۲- 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 $\rho$ (mm)	۴/۶۶۸	۳/۴۶۴	٪۲۶
rmse $\theta$ (rad)	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۵	٪۲۱
rmse $\varphi$ (rad)	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳	٪۲۰

که مشاهدات فتوگرامتری و کلاً روش فتوگرامتری در مقایسه با مشاهدات لیزراسکنر، روش دقیق محسوب می‌گردد، از خطای روش فتوگرامتری و همچنین خطای quaternion جهت محاسبه پارامترهای اولیه انتقال و همچنین خطای احتمالی موجود در نرم‌افزار Ri Scan Pro در تعیین مختصات مرکز تارگت‌ها، برای یافتن خطای سیستماتیک اسکنر چشم پوشی خواهد شد.

بعد از اعمال کل پارامترهای اضافه و بعد از حذف پارامترهای وابسته از مدل سرشکنی، به ترتیب بهبود دقت ٪۲۶، ٪۲۱، ٪۲۰ برای باقی‌مانده‌های  $\rho$  و  $\theta$  و  $\varphi$  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 لیزراسکنر تنها به منزله خطای سیستماتیک لیزراسکنر در نظر گرفته می‌شوند و از آنجا

مدلسازی شده است مدل نشده است، و مدل تنها برای همان دسته از مشاهدات و شرایط خاص پروژه مورد استفاده می-باشد. 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 لیزراسکنر 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 (۳) آمده است. لازم به ذکر است که این فرمول‌ها همه بر اساس انجام کالیبراسیون point based ایجاد و پارامترهای آن‌ها بدست آمده‌اند.


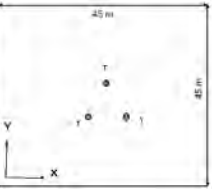

بعد از اعمال پارامترهای فیزیکی دستگاهی به نتایج و مشاهده نمودارهای باقی مانده، تاثیرات سیستماتیک دیگری جهت اضافه کردن پارامترهای تجربی به مدل کالیبراسیون در نتایج قابل مشاهده نبود که علت آن می-تواند وجود نویزها و یا خطاهای تصادفی دیگر باشد. تا این مرحله پارامترهای کالیبراسیون بدست آمده و میزان بهبود نتایج مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه صحت پارامترهای بدست آمده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۵- 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 بیان گردید افراد مختلفی در این زمینه فعالیت نموده‌اند و هر یک به نوعی فرمولی جهت کالیبراسیون لیزراسکنر 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

جدول ۳- خصوصیات مدل‌های 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 مورد نظر
, Lichti , Chow Teski (2010)	Mensi(GS200) 	در اتاقی به ابعاد ۵*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
, Lichti , Chow Teski (2010)	Mensi(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
, Lichti , Chow Teski (2009)	Trimble 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

Lichti, Chow Teski (2009)	Trimble GX 	در اتاقی به ابعاد ۵*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
D. Schneider (2009)	RIEGL 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
Lichti 2006	Faro 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

سعی بر آن شده که همه خطای ساختاری لیزراسکنر در آن مد نظر قرار داده باشد.

۶) در مدل اول برای دستگاه Mensi (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 Mensi (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 Trimble (چهار پارامتر)، تنها پارامترهای فیزیکی 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 Riegle (۱۴ پارامتر)، یک پارامتر تجربی که خطایی در زاویه قائم را به صورت تابعی از فاصله مدل می- کند  $\frac{c}{\rho} \sin^{-1}$  و همینطور پارامتر تجربی دیگری که خطایی در زاویه افق را باز به صورت تابعی از فاصله مدل می‌نماید وجود دارد  $(\frac{b}{\rho} \sin^{-1})$ . در مدل مربوط به Faro (۱۶ پارامتر)، دو پارامتر تجربی خطایی در فاصله را به صورت

با نگاهی به جدول فوق، در مقایسه با مدل پیشنهادی ۱۶ پارامتری معادل با روابط ۲۷ تا ۲۹ که بهبود دقتی برابر ۲۶٪، ۲۱٪ و ۲۰٪ را برای  $\rho$ ،  $\theta$  و  $\varphi$  را بدست آورد، نتایج زیر قابل حصول خواهد بود:

۱) هر یک از روابط فوق توانسته‌اند دقت داده‌های لیزراسکنر مورد تحقیق را نیز بهبود بخشند.

۲) با بررسی جدول فوق اینطور به نظر می‌رسد که با اینکه بهبود دقت برای مشاهدات تحقیق، 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

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

## ۶- نتایج و پیشنهادات

هدف اصلی در این تحقیق، کالیبراسیون لیزراسکندر زمینی با مدل پیشنهادی بود که به طور کامل ارزیابی و مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در ابتدا برای بررسی دقت لیزراسکندر نیاز به تعیین مختصات دقیق نقاط بود که برای این منظور روش فتوگرامتری به عنوان روش دقیق در تعیین مختصات در نظر گرفته شد و دقت نهایی تعیین مختصات در روش فتوگرامتری برابر  $0/8661$  و  $0/9878$  و  $0/7894$  برای  $x$  و  $y$  و  $z$  بدست آمد.

بعد از آن با انجام ترانسفورماسیون داده‌های لیزراسکندر 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  $26\%$  و  $21\%$  و  $20\%$  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 اسکندر می‌باشد و پارامتر تجربی را شامل نمی‌شود، می‌تواند برای انواع مختلف لیزراسکندرها به کار رود. زمانی که روابط مدل برای  $\Delta\theta$  یا  $\Delta\varphi$  وجود ندارد، از زمانی که برای هر سه دسته مشاهدات  $\rho$ ،  $\theta$  و  $\varphi$  روابط تصحیح خطا نوشته می شود، بهبود دقت کمتر خواهد بود. نهایتاً این که چون مدل‌های دیگران شامل پارامترهای تجربی خاص آن دستگاه و آن پروژه می‌باشند، هیچ‌کدام به دقت مدل پیشنهادی نرسیدند و مدل پیشنهادی قادر است نسبت به دیگر مدل‌های ارائه شده، دقیق‌ترین نتایج را ارائه کند.

مدل ارائه شده در این تحقیق جهت کالیبراسیون لیزر اسکندرهایی است که از نوع TOF<sup>۱</sup> می‌باشند. در خصوص دستگاه‌هایی که اندازه‌گیری فاصله را به طرق دیگر مانند مقایسه فازی و غیره انجام می‌دهند، ممکن است پارامترهای فیزیکی دیگری نیز به مدل اضافه گردد. تحقیق بیشتر در خصوص ساختار این نوع دستگاه‌ها و تفاوت‌های احتمالی می‌بایست انجام پذیرد. ارائه الگوریتم‌هایی جهت یافتن مناسب‌ترین مدل از بین مدل‌های ارائه شده توسط

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 Litchi و Teski، Chow و Mensi 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 Mensi پارامتر تجربی دیده شده است اما برای Trimble 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.

۸) در خصوص تحقیقی که Litchi و Teski، Chow انجام داده‌اند، مشاهده می‌شود که حتی در مورد 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).

۹) در تحقیق Chow، Teski و Litchi دیده می‌شود که زمانی که برای دستگاه Mensi دو استقرار وجود دارد (در آزمون دو استقرار) برای هم مشاهدات این تحقیق و هم مشاهدات محقق، دقت بهبود بیشتری می‌یابد اما برای trimble برای مشاهدات محقق زمانیکه آزمون چهار استقرار است بهبود بهتر خواهد بود. در حالی که با مشاهدات مورد نظر 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.

<sup>۱</sup> Time of flight

است. توصیه می شود که به منظور کشف ضعف‌های احتمالی و توسعه مدل، مدل در حالت‌های دیگر و توسط لیزر اسکنرهای با برند متفاوت نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

دیگر محققین و بررسی و مقایسه آن با مدل پیشنهادی، توصیه می‌گردد. علاوه بر این به عنوان case study مدل فقط توسط سیستم ریگل مورد راستی آزمایی قرار گرفته

## مراجع

- [1] Bae, K., Lichti, D.D., 2007, "On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanner", ISPRS Workshop on laser scanning conference, Berlin, September 12-16.
- [2] Boehler, W., Bording, 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](http://www.fig.net/pub/fig_2003/index.htm).
- [3] 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.
- [4] Gielsdorf, F., Rietdorf, A., Gruendig, G., 2004, "A concept for the calibration of laser scanner", In Optical 3-D Measurement Techniques VII, A. Gruen/H. Kahmen(Eds), Vol. II, pp.359-364.
- [5] 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.
- [6] Kaasalainen, S., Krooks, A., Kaartinen, A., 2009, "Radiometric calibration of tls with external reference targets", Proceeding of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 72(12), pp. 1671-1684.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Reshetyuk, Y., 2006, "calibration of tls for the purposes of geodetic engineering", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXV, Part B5, Proceedings of the ISPRS working group V/2, Istanbul, pp. 222-227.
- [11] 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.
- [12] Schulz, T., Ingensand, H., 2004, "Influencing variables, precision and accuracy of tls", INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying Bratislava, Slovakia, November 11-13.
- [13] 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.
- [14] Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Ree, J., Bucksch, A., 2005, "Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality", Journal of Photogrammetry and remote sensing, No. 55, pp. 415-433.