



ارزیابی پایداری پارامترهای مدلی پارامتریک در کالیبراسیون لیزراسکنر زمینی

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

۱. مربی گروه مهندسی نقشه برداری، 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 پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۸/۱۶

چکیده

عوامل گوناگونی بر کیفیت نتایج حاصل از لیزراسکنر زمینی اثرگذارند و از آنجا که دقت اسکنر تا حد زیادی با خطاهای دستگاهی سیستماتیک محدود می شود، باید کالیبره شود. کالیبراسیون در عمل پیش نیازی است برای استخراج اطلاعات دقیق و قابل اعتماد سه بعدی از ابرنقاط. تاکنون مدل های مختلفی که هر یک چند پارامتر فیزیکی را در بر می گیرند برای بهبود کیفیت داده های لیزر اسکنر ارائه شده است. در ادامه بعد از مشاهده نمودار مقادیر باقی مانده، پارامترهای تجربی به مدل های آنها اضافه شده است. این مسئله سبب ایجاد این ضعف در مدل می شود که فقط برای همان دسته از مشاهده ها قابل استفاده اند، چون ممکن است این پارامترهای تجربی در جای دیگری کارساز و پایدار نباشند و می بایست پارامترهای دیگری را جایگزین آنها کرد. در مطالعات گذشته نویسندگان مدل جدیدی ارائه شد که به صورت پارامتریک است و با استفاده از آن امکان کالیبراسیون لیزراسکنر به طور عام وجود دارد. از آنجا که پایداری پارامترهای مدل ها اهمیت زیادی دارد، در نوشتار حاضر براساس ساختار داخلی دستگاه، پایداری پارامترهای یک مدل پارامتریک که برای کالیبراسیون ابرنقاط به دست آمده ارائه شده است و وابستگی آنها با تغییر ساختار دستگاه به طور دقیق و از طریق آزمایش های متعدد در این مقاله بررسی شده است. با محاسبه پارامترهای مدل و ارزیابی وابستگی آنها و اعمال آنها بر داده های ابرنقاط مشاهده می شود که این مدل با پایداری نسبی پارامترها، می تواند دقت داده های لیزراسکنر زمینی را بهبود بخشد.

کلیدواژه ها: لیزراسکنر زمینی، کالیبراسیون، ابرنقاط، مدل پارامتریک.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولی عصر، تقاطع خیابان میرداماد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه برداری، آزمایشگاه فتوگرامتری تحلیلی

تلفن: ۰۹۱۲۳۵۴۹۵۳۸

۱- مقدمه

هدف از انجام کالیبراسیون لیزراسکنر، مقایسه دقت واقعی دستگاه در عمل با روش‌های دقیق است تا 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. تشکیل میدان کالیبراسیون در حالت کلی موضوع پیچیده‌ای نیست و می‌توان آن را از طریق بسیاری از استفاده‌کننده‌های TLS یا همان Terrestrial laser scanner انجام داد. از نخستین فعالیت‌ها در خصوص کالیبراسیون از نوع میدان آزمون، استفاده از تشابه تئودولیت و لیزراسکنر زمینی است که لیجتی و لیجت (۲۰۰۶) آن را ارائه کردند. در تحقیق آنها مدل ریاضی برای کالیبراسیون TLS ارائه شد و معادلات مشاهده‌ها در سیستم مختصات قطبی و مشاهده‌های دستگاه انحراف‌سنج به‌کار گرفته شدند. میزان بهبود هر یک از مشاهده‌ها بعد از اعمال پارامترها کاملاً مشهود بود. بهبود دقت با به‌کارگیری این روش در حدود ۲۲ و ۲۷ درصد به ترتیب برای ρ و θ و φ به دست آمد (Lichti & Licht, 2006). رشتیوک^۱ (۲۰۰۶) نتایج کالیبراسیون را با مدل‌های خطای پنج‌ضریبه روی سه اسکنر Leica HDS 3000، Callidus 1.1، Leica HDS 2500 ارائه کرد. برای این منظور نیز با در نظر گرفتن شباهت خطاهای سیستماتیک دستگاه لیزراسکنر و توتال استیشن، عملیات کالیبراسیون انجام گرفت. در نهایت 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، دقت زاویه قائم برای اسکنرهای Callidus 1.1 و Lieca 3000 بهتر از افقی بود، در حالی که برای Lieca 2500 دقت‌ها مشابه به‌دست آمدند (Reshetyuk, 2006). از فعالیت‌های دیگری که در زمینه کالیبراسیون نقطه‌ای انجام شد و در همه آنها به نوعی برخی پارامترهای فیزیکی ساختار داخلی لیزراسکنر و همچنین پارامترهای تجربی به‌دست آمده از مشاهده روند

تغییرات باقی‌مانده‌ها که خاص همان پروژه و همان مشاهده‌ها هستند، استفاده شد، پژوهش‌اشناپدر (۲۰۰۹) بود که در مدل خود به بهبود دقت ۱۲ و ۲۰ و ۲۵ درصد به ترتیب در جهت‌های طول و زاویه افقی و زاویه قائم برای دستگاه Riegl LMS-Z390i رسید (Schneider, 2009). چو و همکاران (۲۰۰۹) دو آزمایش متفاوت در اتاق‌هایی با ابعاد مختلف و با دو مدل برای کالیبراسیون دستگاه Mensi (GS200) و Trimble GX انجام دادند و در هر دو حالت به این نتیجه رسیدند که مدلی که پارامترهای فیزیکی بیشتری دارد، به نتایج بهتری رسیده است (Chow et al., 2009). از دیگر فعالیت‌ها می‌توان به پژوهش گیلزدورف و ریتدورف (۲۰۰۴) اشاره کرد که روشی را برای کالیبراسیون لیزراسکنر زمینی به کمک تارگت‌های صفحه‌ای ارائه کردند و مجموعه پارامترهای اضافی آنها شامل ترم‌هایی برای مدل کردن خطای محور افقی یا تیلت و خطای شاخص قائم و کلیماسیون و خطای صفر فاصله‌یاب بود. آنها مزیت استفاده از تارگت‌های صفحه‌ای را افزونگی بیشتر داده‌ها برشمردند (Gielsdorf & Rietdorf, 2004).

نحوه تشکیل میدان آزمون به فرمول‌های استفاده‌شده برای کالیبراسیون ارتباطی ندارد و مدل‌های مورد استفاده همواره یکسان هستند و می‌توان از هر یک استفاده کرد. هر کدام از مدل‌هایی که برای بهبود کیفیت داده‌های لیزراسکنر ارائه شده‌اند، دربرگیرنده چند پارامتر فیزیکی هستند و بعد از مشاهده نمودار مقادیر باقی‌مانده، پارامترهای تجربی به مدل‌های آنها اضافه شده است. بنابراین فقط برای همان دسته از مشاهدات می‌توان از آنها استفاده کرد، چون ممکن است این پارامترهای تجربی در جای دیگری کارساز نباشند و پایداری نداشته باشند و ضرورت یابد پارامترهای دیگری جایگزین آنها شود. در همین زمینه در پژوهش حاضر مدلی که ارزیابی پارامترهای آن

1. Reshetyuk

ارزیابی پایداری پارامترهای مدلی پارامتریک در کالیبراسیون لیزراسکنر زمینی

تارگت‌ها به قطر پنج‌سانتی‌متر برش لیزری داده شده بودند و در مرکز آنها سوراخی با لیزر ایجاد شده بود. شکل ۱ تصویر پانورامای اتاق آزمون را نشان می‌دهد. با توجه به دسترس بودن لیزراسکنر ریگل مدل LMS Z420i، این دستگاه برای اجرای آزمون انتخاب شد. از مزایای این دستگاه توانایی دوران ۳۶۰ درجه حول محور قائم خود و ۸۰ درجه در جهت قائم آن است، که امکان برداشت ابرنقطه‌ای از مناطق شیب‌دار را نیز فراهم می‌کند. دوربین رقومی غیرمتریک مورد استفاده نیز Nikon D200 است. از خصوصیات مهم این دوربین، ابعاد کوچک آرایه‌های آن است که قدرت تفکیک مناسبی را به دست می‌دهد. شکل ۲ نوع دوربین و لیزراسکنر استفاده شده را نشان می‌دهد. جدول‌های ۱ و ۲، مشخصات فنی دوربین رقومی و لیزراسکنر زمینی را نشان می‌دهند.

مدنظر است ارائه و پارامترهای آن محاسبه می‌شوند. بعد از ارزیابی میزان وابستگی پارامترها و حذف پارامترهای وابسته، میزان بهبود دقت نتایج پس از اعمال مدل ارزیابی می‌شود و در نهایت پایداری پارامترها با تغییر ساختار لیزراسکنر بررسی خواهد شد.

۲- مواد و روش تحقیق

به منظور ارائه مدل پیشنهادی و روش انجام تحقیق آن ابتدا محل مطالعه و ابزار مورد استفاده معرفی می‌شوند.

۲-۱- مشخصات اتاق آزمون و ابزار مورد استفاده

اتاق آزمون استفاده شده، آزمایشگاه فتوگرامتری در دانشگاه تهران به ابعاد ۵×۱۵ مترمربع انتخاب شد که در قسمت‌های مختلف آن ۹۷ تارگت دایره‌ای شکل از جنس شبرنگ نقره‌ای و دارای بازتابندگی مناسب به صورت ستون‌های نسبتاً منظم چسبانده شدند. این



شکل ۱. تصویر پانورامای اتاق آزمون



شکل ۲. دوربین رقومی Nikon D200، لیزراسکنر ریگل مدل LMS Z420i

جدول ۱. خصوصیات دوربین رقومی غیرمتریک Nikon D200 (www.dpreview.com)

فاصله کانونی	۱۴ میلی‌متر
تعداد پیکسل‌های ثبت شده	۳۸۷۲×۲۵۹۲
ابعاد دوربین	۱۴۷×۱۱۳×۷۴ میلی‌متر
وزن دوربین	۸۳۰ گرم بدون باتری
سرعت شاتر	۳۰-۱/۸۰۰۰ ثانیه

جدول ۲. خصوصیات لیزراسکتر زمینی ریگل مدل LMS Z420i

نام سری و دستگاه	لیزر اسکنر سه بعدی سری lms Z 420i
شرکت سازنده	Riegl
کلاس ایمنی لیزر	کلاس ۱ (ایمن برای چشم)
دقت اندازه گیری طول	۱۰ میلی متر
حداقل برد	دو متر
برد فاصله یابی بدون استفاده از رفلکتور	۸۰۰ متر
زاویه میدان دید در صفحه افق حول محور قائم	۳۶۰ درجه
زاویه میدان دید در صفحه قائم	۸۰ درجه
حد تفکیک زاویه ای قائم	۰/۰۰۲ درجه
حد تفکیک زاویه ای افق	۰/۰۰۲۵ درجه
طول موج لیزر	مادون قرمز نزدیک (Near IR)
سرعت اندازه گیری نقاط	۱۲۰۰۰ نقطه در ثانیه

روند اجرایی دنبال شده برای کالیبراسیون لیزراسکتر در ادامه شرح داده می شود.

۲-۲- تعیین دقیق مختصات تارگت های اتاق آزمون

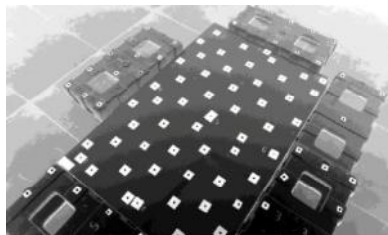
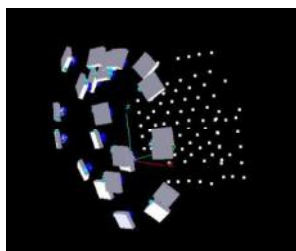
از آنجاکه این مرحله مبنایی دقیق برای ارزیابی دقت مشاهدات لیزراسکتر دارد، انجام آن به شدت مورد نیاز است. در این بخش ابتدا از طریق پیش کالیبراسیون، پارامترهای توجیه داخلی دوربین شامل فاصله کانونی - موقعیت pp یا همان Principal point - پارامترهای مدل ساز اعوجاج شعاعی تعیین می شوند و سپس با عکسبرداری از اتاق آزمون، مختصات تارگت ها در نرم افزار australis تعیین می شوند.

۲-۲-۱- پیش کالیبراسیون دوربین رقومی

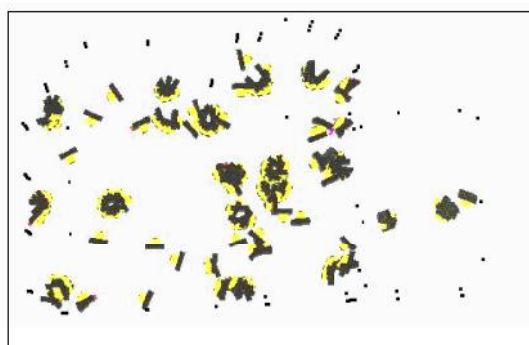
در این مرحله ابتدا پیش از برداشت عکس های لازم برای پروژه، به منظور به دست آوردن پارامترهای دوربین، پیش کالیبراسیون صورت پذیرفت. میدان آزمون موجود در آزمایشگاه برای پیش کالیبراسیون، یک تخته mdf یا Medium Dencity Fibernation به همراه چهار قطعه یونولیت که در کنار هم به ابعاد ۱۶۰×۱۲۰

سانتی متر مربع درمی آمدند و روی آنها حدود ۹۳ تارگت چسبانده شده بود، انتخاب شد. تارگت های استفاده شده در این مرحله از نوع تارگت های بازتابنده و ارزان قیمت و از برچسب هایی به رنگ سیاه مات و شبرنگ هایی به رنگ نقره ای و دارای بازتابندگی بود. به منظور تهیه تارگت ها هر دو برچسب سیاه و نقره ای به ابعاد ۲×۲ سانتی متر مربع بریده شدند و مرکز برچسب سیاه رنگ با یک پانچ مناسب به اندازه پنج میلی متر سوراخ گردید و سپس برچسب سیاه روی برچسب نقره ای چسبانده شد. لبه های پانچ استفاده شده نیز به گونه ای بودند که سوراخ ها کاملاً به شکل دایره ای ایجاد شوند. در ادامه، ۲۳ عکس گرفته شد، به گونه ای که در برخی از استقرارها 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. سپس عکس ها در نرم افزار وارد و پردازش می شوند. در این فرایند، شش scale bar نیز که طول آنها از قبل به دقت اندازه گیری شده است، در تست فیلد در نظر گرفته شدند. شکل ۳ میدان آزمون استفاده شده و نحوه قرارگیری دوربین را برای عکسبرداری نشان می دهد. خطوط موجود در میدان آزمون نمایانگر scale barها هستند.

ارزیابی پایداری پارامترهای مدلی پارامتریک در کالیبراسیون لیزراسکنر زمینی



شکل ۳. تصویر راست: میدان آزمون استفاده شده در پیش کالیبراسیون دوربین رقومی به همراه scale bar. تصویر چپ: نحوه قرارگیری دوربین برای عکسبرداری



شکل ۴. تصویر راست: نمونه‌ای از تصاویر دریافت شده از اتاق آزمون. تصویر چپ: نحوه قرارگیری دوربین و جهت عکسبرداری

می‌شود. کوشش شده است در هر ایستگاه از چندین زاویه عکسبرداری شود، به گونه‌ای که در هر عکسبرداری بیشترین تعداد تارگت‌ها قابل مشاهده باشند و مجدداً در تعدادی از ایستگاه‌ها چرخش ۹۰ درجه دوربین به منظور کاهش وابستگی پارامترهای آن صورت پذیرفته است.

پیش از انجام روند سرشکنی در این مرحله، به منظور 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 شوند. از آنجاکه ابزار دقیقی برای اندازه‌گیری آنها در اختیار نبود و تنها وسیله در دسترس متر فلزی بود که در چنین اندازه‌گیری‌هایی نمی‌تواند ابزار دقیقی به‌شمار آید و قرارگیری کاملاً افقی یا کاملاً عمودی و خواندن آن از خطاهای انسانی محسوب می‌شود، در نتیجه نهایی اثرگذار خواهد بود. بنابراین تصمیم گرفته شد که مختصات تعدادی از تارگت‌ها به وسیله توتال استیشن

با نوشتن دو معادله شرط هم‌خطی به‌عنوان معادله مشاهده برای هر تارگت و یک معادله برای هر scale bar و در نظر گرفتن پارامترهای توجیه داخلی دوربین، شش پارامتر توجیه خارجی هر عکس و سه پارامتر مختصات برای هر نقطه به‌عنوان مجهولات با ۸۶۱ درجه آزادی و با انجام سرشکنی، نرم‌افزار RMSE یا Root Mean Square Error نهایی را برای طول‌های مبنا به میزان ۰/۰۹۰ میلی‌متر ارائه کرد.

بعد از محاسبه پارامترهای توجیه داخلی دوربین به منظور محاسبه مختصات دقیق تارگت‌های اتاق آزمون، ۲۰۵ عکس از نقاط مختلف یعنی ۹۷ تارگت اتاق به وسیله 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. در شکل ۴ نمونه‌ای از تصاویر دریافتی از تارگت‌ها و نحوه قرارگیری دوربین و جهت عکسبرداری مشاهده

نیاز است که در محاسبه‌ها شرکت نکرده‌اند. برای این منظور لازم است داده‌ها از استقرارهای دیگری نیز برداشت شوند. (۲) روند معمول در هر پروژه لیزراسکنر این است که دستگاه در چند ایستگاه و بیش از یک ایستگاه، مستقر شود و برداشت را انجام دهد. (۳) یکی از تحقیقات صورت‌گرفته در ادامه محاسبه مجدد پارامترهای مدل در تغییر وضعیت اجزای مختلف دستگاه، به منظور ارزیابی پایداری ضرایب است که برای انجام آن می‌بایست در حالت‌های مختلف برداشت صورت پذیرد. براساس مطالب گفته‌شده، لیزراسکنر به منظور برداشت مختصات تارگت‌ها در سه ایستگاه مستقر شد و مشاهده‌ها به وسیله لیزراسکنر LMSz420i RIEGL انجام پذیرفت. با استقرار دستگاه در سه موقعیت، برداشت براساس 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؛ و
 ج) دو تغییر در لمب قائم در شیب ۲۰+ درجه و ۲۰- درجه، ایستگاه S3 و S4؛

و در دو مکان استقرار متفاوت دیگر در موقعیت‌های شماره دو و سه، ایستگاه S6 و S7 مستقر شد. بنابراین در کل هفت استقرار و ۹۷ تارگت نصب‌شده در اتاق آزمون به صورت دقیق برداشت شد. از دلایل اصلی این تنوع و تغییر ارتفاع و لمب‌های دستگاه در استقرارهای مختلف این بود که ارزیابی پایداری ضرایب مدل پیشنهادی در حالت‌های مختلف صورت پذیرد. شکل ۵ محل قرارگیری لیزراسکنر را در سه موقعیت در اتاق آزمون در تصویر پانوراما نشان می‌دهد.



شکل ۵. محل قرارگیری لیزراسکنر در سه ایستگاه در تصویر پانوراما

قرائت شود و این نقاط به‌عنوان نقاط کنترل در سرشکنی وارد شوند، تا به این ترتیب مختصات نهایی تارگت‌ها در مقیاس حقیقی خود محاسبه گردند. در ادامه، نحوه محاسبه مختصات نقاط کنترل بیان می‌شود.

۲-۲-۲- انجام مشاهده‌های توتال استیشن و محاسبه مختصات

بعد از بستن شبکه نقشه‌برداری و محاسبه مختصات نقاط کنترل به وسیله توتال استیشن با دقت ۰/۶۷۸۹ میلی‌متر و ۰/۷۴۴۲ میلی‌متر و ۰/۴۶۲۶ میلی‌متر در راستای x و y و z، و قراردادن آنها در روند سرشکنی مشاهده‌های فتوگرامتری، و در نظر گرفتن تعداد معادلات (یعنی دو معادله برای هر نقطه کنترل + ۲ × تعداد نقاط دیده‌شده در هر عکس) و مجهولات (یعنی شش پارامتر توجیه خارجی هر عکس + تعداد تارگت‌ها + تعداد نقاط کنترل × ۳ با درجه آزادی ۴۸۸۰) و به طریق سرشکنی محاسبات در نرم‌افزار انجام شد. RMSE نهایی به صورت ۰/۸۶۶۱، ۰/۹۸۷۸ و ۰/۷۸۹۴ میلی‌متر برای مقادیر x، y، z به دست آمد.

۲-۳- مشاهده‌های انجام‌شده با لیزراسکنر

در هر پروژه لیزراسکنر در استقرارهای مختلف مشاهده‌ها را برداشت می‌کند. محل قرارگیری در این استقرارها و تعداد آنها برحسب نوع پروژه و ابعاد عارضه اسکن شده متفاوت است. در پروژه حاضر با یک استقرار دستگاه در مرکز اتاق، تمام تارگت‌ها برداشت می‌شدند و همین تک‌ایستگاه برای محاسبه پارامترهای مدل کافی بود. به سه دلیل عمده در استقرارهای دیگری نیز مشاهده‌ها برداشت شدند: (۱) بعد از محاسبه پارامترهای مدل، برای ارزیابی دقت و میزان بهبود آن به داده‌هایی

۲-۴- محاسبه پارامترهای مدل پیشنهادی و

بررسی میزان بهبود دقت بعد از اعمال مدل

مدلی که برای کالیبراسیون پیشنهاد می‌شود شامل ۱۹ پارامتر فیزیکی است که براساس ساختار داخلی لیزراسکنر به دست آمده است و پارامتر تجربی در این خصوص وجود ندارد. این مدل به صورت زیر معرفی می‌شود:

از آنجاکه لیزراسکنرها مشابه با توتال استیشن‌های بدون رفلکتور عمل می‌کنند، اغلب پژوهشگران مدل خطای توتال استیشن را به عنوان مدل پایه برای کالیبراسیون انتخاب می‌کنند. در این مدل، پارامترهای کالیبراسیون چنین است: خطای صفر و مقیاس فاصله یاب لیزر، خطای محورهای افقی و کلیماسیون، خطای شاخص لمب قائم.

خطای صفر فاصله یاب دستگاه، جدایی بین موقعیت صفر الکترونیکی و مکانیکی اسکنر است. خطای مقیاس نیز معادل یک مؤلفه مقیاس در فاصله اندازه گیری شده است. خطای کلیماسیون در صورت عمودنبودن محور کلیماسیون بر محور افقی ایجاد می‌شود. خطای محور افقی به دلیل عمودنبودن محور افقی بر محور قائم ایجاد می‌شود و خطای شاخص لمب قائم نیز در صورتی وجود دارد که وقتی پرتو لیزر کاملاً افقی ارسال شود، این لمب زاویه صفر را نشان ندهد. زمانی که خط دید افقی است، در توتال لمب قائم صفر مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است که زاویه قائم، زاویه بین صفحه افق و پرتو لیزر است که زمانی که پرتو افقی است این زاویه باید صفر باشد اما مقداری را به عنوان زاویه قائم نشان می‌دهد که همان vertical circle index error است و با مقدار ثابت c به زاویه قائم خوانده شده اعمال می‌شود. افزون بر پارامترهای مذکور، نگاهی دقیق تر به ساختار داخلی لیزراسکنر نشان می‌دهد که خطاهای دیگری را نیز که امکان مدل سازی و حذف از مشاهده های لیزراسکنر را دارند می‌توان در این زمره قرار داد.

مدلی که برای کالیبراسیون داده های لیزراسکنر معرفی می‌شود، شامل همه پارامترهای فیزیکی مذکور

خواهد بود و به صورت روابط (۱)، (۲) و (۳) نشان داده می‌شود.

$$\Delta\rho = a_0 + a_1.p + a_2.\sin(\varphi) \quad (۱)$$

رابطه (۲)

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

رابطه (۳)

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

در روابط مذکور، $\Delta\rho$ و $\Delta\theta$ و $\Delta\phi$ میزان تصحیحاتی هستند که در نهایت به میزان مشاهدات طول و زاویه قائم و زاویه افقی اعمال می‌گردد. جدول ۳ تفسیر روابط مربوط به هر پارامتر را نشان می‌دهد:

به این ترتیب در سه رابطه (۱)، (۲) و (۳)، ۱۹ پارامتر فیزیکی که همگی با توجه به ساختار داخلی لیزراسکنر در نظر گرفته شده‌اند، به منظور کالیبراسیون و بهبود دقت داده‌ها و مشاهده‌های حاصل از این دستگاه معرفی شدند. در ادامه سعی بر آن خواهد بود که این پارامترها با توجه به مشاهدات انجام شده به وسیله دستگاه و به کمک روند سرشکنی محاسبه شوند و پس از آن وابستگی پارامترها در تغییر ساختار لیزراسکنر مورد ارزیابی قرار گیرد. هدف پژوهش حاضر، ارائه مدلی است که بتوان از آن برای دستگاه‌های لیزراسکنر استفاده کرد. بنابراین کوشش شده است که تمامی پارامترهای فیزیکی که مدل کننده خطاهای داخلی لیزراسکنر هستند در این مدل ارائه و معرفی شوند. پارامترهای تجربی‌ای که ممکن است در هر دسته از مشاهدات و برای هر دستگاه مشخص با مشاهده نحوه تغییر باقی مانده‌ها تعیین گردند، در مدل مذکور جایی ندارند.

روندی که برای تعیین پارامترهای مدل پیشنهادی کالیبراسیون دنبال می‌شود، سرشکنی است که با نوشتن معادلات مشاهده‌های لیزراسکنر و نوشتن روابط ترانسفورماسیون کانفورمال سه بعدی بین مختصات در دو سیستم فتوگرامتری و لیزراسکنر صورت می‌پذیرد.

جدول ۳. روابط مدل کننده خطاهای سیستماتیک لیزراسکنر زمینی در مدل پیشنهادی

خطای موجود	رابطه مدل کننده خطا
خطای صفر فاصله یاب	a_0
خطای مقیاس در فاصله	$a_1 \cdot p$
آفست پرتوی لیزر	$a_2 \cdot \sin(\varphi)$
خطای محور کلیماسیون	$b_1 \cdot \sec \varphi$
خطای محور افقی	$b_2 \cdot \tan \varphi$
خطای خروج از مرکزیت لمب افق	$b_3 \cdot \sin \theta + b_4 \cdot \cos \theta$
خطای عدم تعامد لمب افق و محور قائم	$b_5 \cdot \sin 2\theta + b_6 \cdot \cos 2\theta$
خطای خروج از مرکزیت افقی محور کلیماسیون	$b_7 \cdot \rho^{-1}$
خطای مقیاس در زاویه افقی	$b_8 \cdot \theta$
خطای شاخص لمب قائم	c_0
خطای مقیاس در زاویه قائم	$c_3 \cdot \sin 2\varphi$
خطای عدم تعامد محور افقی و لمب قائم	$c_3 \cdot \sin 2\varphi + c_4 \cdot \cos 2\varphi$
خطای خروج از مرکزیت قائم محور کلیماسیون	$c_5 \cdot \rho^{-1}$
خطای wobble محور قائم	$c_6 \cdot \sin 3\theta + c_7 \cdot \cos 3\theta$

رابطه (۶)

$$x_{scanj}^{(i)} = \begin{bmatrix} x_j^{(i)} \\ y_j^{(i)} \\ z_j^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_j^{(i)} - \Delta r) \cos(\varphi_j^{(i)} - \Delta\varphi) \cos(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \\ (r_j^{(i)} - \Delta r) \sin(\varphi_j^{(i)} - \Delta\varphi) \cos(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \\ (r_j^{(i)} - \Delta r) \sin(\theta_j^{(i)} - \Delta\theta) \end{bmatrix}$$

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

در رابطه (۶)، r و φ و θ به ترتیب فاصله و زاویه قائم و جهت افقی و همان مشاهدات خامی هستند که لیزراسکنر برداشت شده اند. مقادیر $\Delta\rho$ و $\Delta\varphi$ و $\Delta\theta$ نیز به ترتیب مقادیر خطا در جهت فاصله و زاویه قائم و جهت افقی هستند که لازم است محاسبه و از مشاهده های خام کسر شوند تا مقادیر مشاهده های بهبود یافته به دست آیند. این مقادیر در مدل ارائه شده در روابط (۴)، (۵) و (۶) محاسبه می شوند. نکته مهم دیگر در این بخش در اجرای محاسبات سرشکنی، داشتن مقادیر اولیه مجهولات است. برای این منظور و تعیین پارامترهای اولیه انتقال کانفورمال، از روابط Gielsdorf & Rietdor, (2004).

معادله مشاهده ترانسفورماسیون کانفورمال سه بعدی تارگت z - ام را که از ایستگاه i - ام اسکنر اسکن شده است می توان به صورت رابطه (۴) نشان داد. رابطه (۴)

$$f_j^i(L_j^i, \hat{X}_j^i) = X_{photo j}^i - [R(\omega^i, \varphi^i, \kappa^i) \cdot X_{scan j} + T^i]$$

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

که در آن، p تعداد استقرارهای دستگاه و m تعداد تارگت های اسکن شده در هر استقرار است. در رابطه (۴)، T و R به ترتیب شامل پارامترهای انتقال و دوران جهت ترانسفورماسیون بین مختصات لیزراسکنر و فتوگرامتری در هر استقرار i - ام است. $X_{photo j}^i$ بردار مختصات تارگت z - ام را در سیستم مختصات فتوگرامتری به صورت رابطه (۵) بیان می کند.

$$X_{photo j} = (X_j \ Y_j \ Z_j) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$X_{scan j}^i$ شامل بردار مختصات تارگت z - ام در استقرار i - ام در سیستم مختصات لیزراسکنر است، که در صورت اعمال رابطه تصحیح شده آن بر اساس رابطه (۶) به دست می آید.

۲-۵- تعیین مقادیر اولیه مجهولات

با روند Quaternion، مقادیر اولیه سه پارامتر انتقال و سه پارامتر دوران محاسبه می‌شود. Quaternion یا چهارتایی‌ها، سیستمی عددی است که سیستم اعداد مختلط را گسترش می‌دهد. نخستین بار دانشمندی ایرلندی به نام ویلیام روان همیلتون در سال ۱۸۴۳ این دسته اعداد را توصیف کرد و در مکانیک و در فضای سه‌بعدی آنها را به کار گرفت. فرم کلی کواترنیون به این صورت است: $q = q_0 + iq_1 + jq_2 + kq_3$. با داشتن ماتریس چهارتایی و انتقال نقاط هر دو سیستم به مرکز ثقل آنها، پارامترهای انتقال نیز محاسبه می‌شوند. در ادامه، پارامتر مقیاس در این مرحله اعمال نشد، چون مدل پیشنهادی پارامتر مقیاس را در خود جای داده‌اند. مقادیر اولیه برای پارامترهای اضافه مدل‌کننده خطای سیستماتیک دستگاه، برابر صفر در نظر گرفته شدند، تا محاسبه دقت اولیه مشاهده‌ها بدون اعمال هیچ پارامتر اضافه‌ای امکان‌پذیر باشد. پس از محاسبه سه پارامتر انتقال و سه پارامتر دوران هر استقرار به‌منظور محاسبه دقت، ابتدا با اعمال پارامترهای انتقال روی ۵۰ نقطه چک، مختصات جدید آنها مطابق آنچه پیش‌تر گفته شد، به کمک رابطه (۷) محاسبه و اختلاف آن با مختصات نقاط موجود در سیستم فتوگرامتری که روش دقیق در نظر گرفته شده است و دارای خطای ۰/۸۶۶۱، ۰/۹۸۷۸ و ۰/۷۸۹۴ در جهات x و y و z است، به‌دست آمد.

رابطه (۷)

$$X^i \text{ phototransfer} = [R(\omega^j, \phi^j, \kappa^j) \cdot X_{scanj}^i + T^j] \\ i = 1, 2, \dots, p \quad j = 1, 2, \dots, m$$

در رابطه (۷)، R ماتریس دوران، و T ماتریس انتقال از سیستم مختصات لیزر به فتوگرامتری برای هر نقطه i در هر استقرار j است.

۲-۶- آشکارسازی مشاهده‌ها با خطای بزرگ

(بلاندر)

بعد از تعیین مقادیر باقی‌مانده، به‌منظور تشخیص

باقی‌مانده‌های اشتباهی که از مشاهده‌های اشتباه نتیجه می‌شوند و باید از مشاهده‌ها حذف شوند، انحراف معیار در سه ستون dx و dy و dz محاسبه و با اجرای تست ۳σ، باقی‌مانده‌های بیشتر از این مقادیر شناسایی و مشاهده‌های مربوط به آنها حذف می‌شوند. در این مرحله یک مشاهده اشتباه یافت شد که دلیل آن سایه‌ای بود که روی آن ایجاد و باعث شده بود که دستگاه برداشت را به‌درستی انجام ندهد. در نهایت، با استفاده از اختلاف مختصات مشاهده‌های لیزراسکنر با داده‌های تبدیل‌شده فتوگرامتری، دقت اولیه مشاهده‌ها برحسب روابط به دست آمد.

رابطه (۸) و رابطه (۹)

دقت موقعیتی نقاط

$$RMS_{xyz} = \sqrt{\sum(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2) / n}$$

دقت نقاط در فاصله

$$RMS\rho = \sqrt{\sum(\Delta\rho)^2 / n}$$

رابطه (۱۰) و رابطه (۱۱)

دقت نقاط در جهت افقی

$$RMS\theta = \sqrt{\sum(\Delta\theta)^2 / n}$$

دقت نقاط در زاویه قائم

$$RMS\alpha = \sqrt{\sum(\Delta\alpha)^2 / n}$$

در رابطه‌های (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱)، n تعداد کل تارگت‌های مشاهده‌شده و شامل ۱۳۲ عدد برای نقاط چک است. در نهایت، پس از تعیین مقادیر اولیه مجهولات، محاسبات اصلی سرشکنی صورت می‌پذیرد و مقادیر دقیق مجهولات تعیین می‌شود.

پس از تعیین پارامترهای مورد نظر، از آنجاکه ممکن است بین پارامترهای مدل پیشنهادی وابستگی وجود داشته باشد - که این موضوع بر دقت نهایی اثرگذار خواهد بود - پیش از هر کار دیگری لازم است با تعیین میزان وابستگی موجود بین مجهولات به‌دست‌آمده و

پارامترهای c_5 و c_3 و c_4 بر دقت نتایج تأثیر کمتری از سایر پارامترها می‌گذارند و باقی‌مانده را به میزان کمتری افزایش می‌دهند. درحالی‌که حذف پارامترهای a_2 و c_1 باعث افزایش شدید خطا و ایجاد خطای سیستماتیک می‌شود. بنابراین وجود دو ضریب a_2 و c_1 که مدل‌کننده آفست پرتوی لیزر و مقیاس زاویه قائم هستند، برای کاهش خطا و مدل‌سازی با دقت مناسب‌تر ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل با حفظ این دو پارامتر، در مدل نهایی فقط ضرایب c_5 و c_3 از مدل حذف شدند.

به این ترتیب مدل نهایی با ۱۶ ضریب مدل‌کننده خطای سیستماتیک لیزراسکنر به صورت روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) درخواهد آمد.

$$\Delta\rho = a_0 + a_1 \cdot \rho + a_2 \cdot \sin\phi \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\text{رابطه (۱۴)}$$

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

$$\text{رابطه (۱۵)}$$

$$\Delta\phi = c_0 + c_1 \cdot \phi + c_2 \cdot \sin\phi + c_3 \cdot \sin 3\theta + c_7 \cdot \cos 3\theta$$

که در آنها، ضرایب دقیقاً همان ضرایب و روابط توضیح داده‌شده در جدول ۳ هستند.

۳- نتایج

پس از انجام محاسبات سرشکنی، نتایج به‌دست‌آمده به‌صورتی که در پی‌می‌آیند، مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۳-۱- بررسی میزان بهبود دقت پارامترهای مدل ارائه‌شده

پس از انجام روند سرشکنی، محاسبه پارامترهای انتقال از سیستم مختصات لیزراسکنر به فتوگرامتری و محاسبه پارامترهای اضافه مدل‌کننده خطای سیستماتیک لیزراسکنر صورت گرفت. پس از آن با محاسبه ماتریس کوواریانس پارامترهای به‌دست‌آمده و بررسی میزان وابستگی موجود بین ضرایب، ضرایب

حذف پارامترهای وابسته که با کم‌کردن تعداد مجهولات باعث خواهد شد نتایج با دقت بهتری به‌دست آیند و اطمینان به نتایج به‌دست آمده بالا رود.

۲-۷- حذف پارامترهای وابسته

پیش از بررسی میزان بهبود دقت نتایج، به‌منظور حذف پارامترهای وابسته، بعد از محاسبه مجهولات، ماتریس کوواریانس پارامترهای مجهول محاسبه می‌شود. سپس با جداکردن ماتریس کوواریانس پارامترهای مدل از پارامترهای توجیه خارجی و محاسبه وابستگی بین آنها از طریق رابطه (۱۳)، ضرایبی که وابستگی آنها با یکدیگر بیش از ۰/۷ است، به‌عنوان پارامترهای وابسته به هم شناسایی و یکی از آنها حذف می‌شود. برای تشخیص اینکه کدام‌یک از هر دو ضریب وابسته باید حذف شوند، با مقایسه وابستگی هریک از آنها با دیگر ضرایب و جابه‌جایی در حذف هریک و مقایسه تغییر در بهبود دقت، پارامتر مورد نظر شناسایی و حذف شد.

$$\text{رابطه (۱۲)}$$

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}_{ij}}{\sqrt{\text{var}_i \cdot \text{var}_j}}$$

در رابطه (۱۲)، cov نشان‌دهنده کوواریانس بین هر دو ضریب i و j است و var ، واریانس هر ضریب را در ماتریس واریانس - کوواریانس محاسبه‌شده نشان می‌دهد. طبق بررسی‌های انجام‌شده، وابستگی بین ضرایب a_2 - c_4 و a_2 - c_5 و c_1 - c_3 و c_4 - c_5 وجود دارد. در اینجا a_2 آفست پرتوی لیزر، c_4 ، c_3 عدم‌تعامل محور افقی و لمب قائم، c_5 خروج از مرکزیت قائم محور کلیماسیون و c_1 خطای مقیاس زاویه قائم را مدل می‌کنند. به‌منظور حذف پارامترهای وابسته، به‌ترتیب هریک حذف شدند و دقت نتایج و وابستگی پارامترهای باقی‌مانده از نو ارزیابی شد.

حذف هر یک از پارامترها باعث می‌شود که خطا مقداری افزایش یابد و هرچه تعداد پارامترها بیشتر باشد، خطا کمتر خواهد بود. اما با وجود وابستگی‌ها اطمینان به نتایج بسیار کم خواهد بود. حذف

ارزیابی پایداری پارامترهای مدلی پارامتریک در کالیبراسیون لیزراسکنر زمینی

دقت کاسته شد، ولی از آنجاکه پارامترهای وابسته حذف شده‌اند، نتایج قابل اعتمادتر خواهند بود. در اینجا اختلاف مختصات تبدیل‌یافته فتوگرامتری با مشاهده‌های لیزراسکنر فقط به‌منزله خطای سیستماتیک لیزراسکنر در نظر گرفته می‌شوند. از آنجاکه مشاهده‌های فتوگرامتری و کلاً روش فتوگرامتری در مقایسه با مشاهده‌های لیزراسکنر، روش دقیقی به‌شمار می‌آید، از خطای روش فتوگرامتری و همچنین خطای Quaternion برای محاسبه پارامترهای اولیه انتقال و خطای موجود در نرم‌افزار Ri Scan Pro در تعیین مختصات مرکز تارگت‌ها، برای یافتن خطای سیستماتیک اسکنر چشم‌پوشی خواهد شد.

پس از اعمال پارامترهای فیزیکی دستگامی به نتایج و مشاهده نمودارهای باقی‌مانده، تأثیرات سیستماتیک دیگری برای اضافه‌کردن پارامترهای تجربی به مدل کالیبراسیون درنتایج مشاهده نشد، که علت آن می‌تواند وجود نویزها یا خطاهای تصادفی دیگر باشد. تا این مرحله، پارامترهای کالیبراسیون به‌دست‌آمده و میزان بهبود نتایج ارزیابی شدند. در ادامه، صحت پارامترهای به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

وابسته حذف شدند. در جدول ۳ میزان RMSE برای فاصله و جهت افقی و زاویه قائم و همین‌طور x و y و z پیش از استفاده از پارامترهای مدل کالیبراسیون و پس بعد از آن محاسبه و ارائه شده است. به‌گونه‌ای که مشاهده می‌شود علاوه بر مطالب ذکرشده، درصد بهبود دقت نتایج پس از استفاده از مدل مورد نظر به‌کمک رابطه (۱۶) محاسبه و در جدول ۴ نمایش داده شده است.

رابطه (۱۶)

درصد بهبود دقت = [دقت اولیه / (دقت اولیه - دقت ثانویه)] * ۱۰۰

پس از اعمال کل پارامترهای اضافه و بدون حذف پارامترهای وابسته به مدل‌های سرشکنی، به‌ترتیب بهبود دقت ۲۶، ۲۳، ۲۳، ۳۸، ۲۴ و ۳۰ درصد در باقی‌مانده‌های ρ و θ و ϕ و x و y و z نقاط چک مشاهده شد، که نشان می‌دهد استفاده از این پارامترها در بهبود دقت بسیار مؤثر است. پس از حذف پارامترهای وابسته به هم، ناپایداری در روند سرشکنی از بین رفت ولی به‌طوری‌که در جدول دیده می‌شود، از میزان بهبود دقت اندکی کاسته شد و به مقادیر ۲۶، ۲۱، ۲۰، ۳۷، ۲۳ و ۳۰ درصد در باقی‌مانده‌های ρ و θ و ϕ و x و y و z رسید. با وجود آنکه اندکی از بهبود

جدول ۴. میزان RMSE داده‌های لیزراسکنر پس از حذف پارامترهای وابسته مدل پیشنهادی و میزان بهبود

RMSE	RMSE اولیه بدون	RMSE بعد از اعمال پارامترهای کالیبراسیون	بهبود دقت (درصد)
	پارامترهای کالیبراسیون	(پس از حذف ضرایب وابسته)	
RMSE ρ (mm)	۴/۶۶۸	۳/۴۴۶۴	۲۶
RMSE θ (rad)	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۵	۲۱
RMSE ϕ (rad)	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳	۲۰
RMSE x(mm)	۳/۵۸۹۹	۲/۲۶۶۸	۳۷
RMSE y(mm)	۳/۲۲۷۰	۲/۴۷۰۶	۲۳
RMSE z(mm)	۲/۱۸۷۹	۱/۵۴۲۲	۳۰

۳-۲- ارزیابی پایداری ضرایب مدل پیشنهادی با

تغییر وضعیت ساختار لیزراسکنر

هدف بخش حاضر این است که تعیین شود کدام دسته از مشاهده‌ها شامل موقعیت‌های مختلف تغییر لمب قائم، تغییر لمب افق، و تغییر ارتفاع، برای کالیبراسیون و محاسبه پارامترها مناسب‌ترند. به عبارت دیگر مدل پیشنهادی در استقرارهای مختلف ارزیابی می‌شوند تا بررسی شود که در صورت داشتن مشاهدات در این استقرارها، دقت چه تغییری می‌کنند و در کدام حالت دقت بیشتر خواهد بود. برای این منظور کل مشاهده‌های لیزر اسکنر به پنج حالت تقسیم می‌شوند:

۱. استفاده از مشاهده‌های فقط با یک استقرار به منظور محاسبه پارامترهای مدل و بررسی دقت. ایستگاه شماره S1.
۲. استفاده از فقط سه دسته مشاهده‌های مربوط به سه موقعیت مختلف. ایستگاه‌های شماره S1، S6، S7.
۳. استفاده از فقط سه دسته مشاهده‌ها با صفر لمب قائم متفاوت: +۲۰ درجه، صفر درجه، -۲۰ درجه، ایستگاه‌های شماره S1، S3، S4.

۴. استفاده از فقط مشاهده‌های با دو صفر لمب

افق متفاوت، ایستگاه‌های شماره S1، S2.

۵. استفاده از فقط مشاهده‌های با دو ارتفاع

مختلف، ایستگاه‌های شماره S1، S5.

به منظور این ارزیابی، در هر یک از حالت‌های گفته شده، ابتدا مقادیر اولیه پارامترهای ترانسفورماسیون محاسبه می‌شوند و در مرحله بعد در یک سرشکنی هم‌زمان پارامترهای توجیه خارجی هر استقرار به همراه پارامترهای مدل مذکور به کمک نقاط کنترل به دست می‌آیند. تست اشتباهات در هر مرحله صورت می‌پذیرد تا در صورت وجود مشاهده‌های اشتباه به طریقی که گفته شد حذف و روند مجدد تکرار شود. در نهایت، پس از انجام سرشکنی در ادامه وابستگی بین پارامترهای به دست آمده بررسی می‌شود و پارامترهای وابسته حذف می‌شوند و دقت نیز به کمک نقاط چک ارزیابی می‌شود. در جدول ۵ مقادیر RMSE اولیه یعنی پیش از اعمال پارامترهای مدل کالیبراسیون برای مختصات x و y و z و نیز xyz برای هر یک از حالت‌های مختلف استقرار برحسب میلی‌متر ارائه شده است.

جدول ۵. مقادیر RMSE پیش از اعمال پارامترهای مدل کالیبراسیون برای مختصات x و y و z و نیز xyz برای هر یک از استقرارها

نحوه استقرار	RMSE _x اولیه	RMSE _y اولیه	RMSE 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	۵/۸۰۴۲
دو ارتفاع (E)	۳/۷۳۳۵	۳/۳۶۶۳	۲/۳۵۱۲	۵/۵۴۹۷
همه حالت‌ها (F)	۳/۵۸۹۹	۳/۲۲۷۰	۲/۱۸۷۹	۵/۲۹۹۸

ارزیابی پایداری پارامترهای مدلی پارامتریک در کالیبراسیون لیزراسکنر زمینی

جدول ۶. مقادیر RMSE پس از اعمال پارامترهای مدل کالیبراسیون و قبل و بعد از حذف پارامترهای وابسته برای مختصات x و y و z

نحوه استقرار	RMSE _x	RMSE _y	RMSE _z	RMSE _{xyz}	پارامتر حذفی	RMSE _x پس از حذف	RMSE _y پس از حذف	RMSE _z پس از حذف	RMSE _{xyz} پس از حذف
A	۲/۴۴۲۵	۲/۸۲۳۱	۱/۷۴۱۵	۴/۱۱۹۳	b ₄ - C ₃ -C ₄ -C ₅	۲/۴۴۶۷	۲/۸۲۵۷	۱/۷۵۹۵	۴/۱۳۱۱
B	۲/۲۱۲۰	۲/۴۳۰۴	۱/۵۳۰۰	۳/۶۲۵۰	C ₃ -C ₄ -C ₅	۲/۲۱۸۷	۲/۴۳۷۶	۱/۵۳۲۷	۳/۶۳۵۱
C	۲/۲۲۱۳	۲/۴۴۹۸	۱/۵۳۲۰	۳/۶۴۴۵	b ₄ - C ₃ -C ₄ -C ₅	۲/۲۲۶۵	۲/۴۵۰۱	۱/۵۳۲۹	۳/۶۴۸۳
D	۲/۳۲۱	۲/۶۳۲۱	۱/۶۳۸	۳/۸۷۲۷	C ₃ -C ₄ -C ₅	۲/۳۲۷۷	۲/۶۳۵۳	۱/۶۴۲۱	۳/۸۸۰۶
E	۲/۳۸۱۳	۲/۷۹۳۳	۱/۵۳۶۷	۳/۷۹۹۳	b ₄ - C ₃ -C ₄ - C ₁ -C ₅	۲/۳۸۷۷	۲/۸۰۱۱	۱/۵۳۹۸	۳/۹۸۹۸
F	۲/۲۳۷۷	۲/۴۵۴۰	۱/۵۳۳۳	۳/۶۵۷۹	C ₃ -C ₄ -C ₅	۲/۶۶۶۸	۲/۴۷۰۶	۱/۵۴۲۲	۳/۹۴۸۹

فتوگرامتری اعمال شد. دقت نهایی تعیین مختصات در روش فتوگرامتری برابر ۰/۸۶۶۱ و ۰/۹۸۷۸ و ۰/۷۸۹۴ برای x و y و z به دست آمد.

پس از آن با انجام ترانسفورماسیون داده‌های لیزراسکنر 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 ۳۷ و ۲۳ و ۳۰ درصد بهبود دقت در مختصات نقاط پس از اعمال مدل دیده شد. از آنجاکه مدل مذکور فقط شامل پارامترهای فیزیکی و براساس ساختار داخلی لیزراسکنر است و پارامتر تجربی را شامل نمی‌شود، می‌تواند برای انواع مختلف لیزراسکنرها به کار رود. در ادامه پایداری ضرایب و روند بهبود با تغییر وضعیت دستگاه بررسی شد و نشان داد که با تغییرات ساختار دستگاه و برداشت مشاهده‌های مختلف برای این نوع لیزراسکنر، وابستگی ضرایب تقریباً مشابه است. در سه حالت مشاهده شده، A یعنی یک استقرار، C یعنی سه زاویه قائم، و E یعنی دو ارتفاع مختلف. پارامتر b₂ نیز مدل‌کننده خطای محور افقی است و در حالت دو ارتفاع مختلف، پارامتر C₁ که مربوط به فاکتور مقیاس در زاویه قائم هستند، به پارامترهای حذف‌شده

پس از محاسبه مقادیر پارامترهای کالیبراسیون و اعمال آنها به مشاهدات و محاسبه اختلاف با مختصات فتوگرامتری، مجدداً RMSE‌های x و y و z و xyz محاسبه می‌شوند - که در جدول ۵ مقادیر آنها برای حالت‌های مختلف آمده است. پس از آن، بعد از محاسبه ماتریس کوواریانس در هر حالت و بررسی میزان وابستگی‌ها، پارامترهای وابسته مؤثر حذف و مجدداً RMSE‌ها محاسبه می‌شوند. جدول ۶ مقادیر محاسبه‌شده در این حالت را نشان می‌دهد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این مقاله کالیبراسیون لیزراسکنر زمینی با مدل پیشنهادی بود که به طور کامل مورد ارزیابی و بحث و بررسی قرار گرفت. ابتدا برای بررسی دقت لیزراسکنر نیاز به تعیین مختصات دقیق نقاط بود که روش فتوگرامتری به عنوان روش دقیق در تعیین مختصات برای آن در نظر گرفته شد. به منظور تعیین مختصات دقیق تارگت‌ها در مقیاس واقعی، مختصات تعدادی از تارگت‌ها از طریق توتال استیشن محاسبه و به صورت نقاط کنترل در محاسبات سرشکنی روش

به اینکه هیچ‌یک از روش‌های دیگر پژوهشگران به دقت مدل پیشنهادی نرسیده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای تجربی به کاررفته در خصوص دستگاه‌های مذکور در اکثر مواقع در خصوص همان دستگاه و مشاهدات صورت پذیرفته جوابگو هستند.

مدل ارائه شده در این پژوهش برای کالیبراسیون لیزراسکنرهایی است که از نوع TOF یا همان Time of Flight هستند. در خصوص دستگاه‌هایی که اندازه‌گیری فاصله را به روش‌های دیگری مانند مقایسه فازی انجام می‌دهند، ممکن است پارامترهای فیزیکی دیگری نیز به مدل اضافه شوند. لازم است پژوهش‌های بیشتری در خصوص ساختار این نوع دستگاه‌ها و تفاوت‌های احتمالی انجام پذیرد. افزون بر آن، در پژوهش حاضر پایداری پارامترهای مدل پیشنهادی در بازه زمانی به دلیل محدودیت زمانی صورت نگرفت. پیشنهاد می‌شود در بازه زمانی مشخصی پروژه تکرار و نتایج ارزیابی شوند تا به این ترتیب پارامترهای ناپایدار از مدل حذف شوند.

۵- منابع

- Chow et al., 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.
- 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.
- Hofle, B. et al., 2007, **Correction of Laser Scanning Intensity Data: Data and Model-driven Approaches**, Photogrammetry and Remote Sensing, No. 70, PP. 415-433.

C_3 ، C_4 و C_5 اضافه شدند. سه پارامتر C_3 ، C_4 و C_5 که مدل‌کننده عدم تعامد محور افقی و لمب قائم و خروج از مرکزیت قائم محور کلیماسیون هستند، در تمامی موارد حذف شدند. اما پایداری نسبی در خصوص دیگر پارامترهای مدل مذکور وجود دارد.

علاوه بر اینها، دیده شده است که در یک استقرار فقط کمترین میزان بهبود دقت اتفاق می‌افتد. بنابراین توصیه می‌شود که هیچ‌گاه داده‌ها فقط از یک استقرار برداشت نشوند و حتی اگر با یک استقرار نیز کل محدوده قابل برداشت باشد، برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، برحسب زمان و هزینه برداشت اسکنر از موقعیت‌های دیگری نیز انجام گیرد.

در حالت استقرار در سه موقعیت متفاوت، بهترین بهبود دقت اتفاق می‌افتد و پس از آن استقرار در یک مکان و تغییر در زاویه قائم دستگاه شامل سه زاویه قائم، بهترین بهبود دقت را دارد. بنابراین توصیه می‌شود که از این دو حالت در هنگام برداشت داده به وسیله لیزراسکنر استفاده شود.

در مقایسه با مدل‌های دیگر، از آنجاکه مدل مذکور فقط پارامترهای فیزیکی و براساس ساختار داخلی لیزراسکنر را دربرمی‌گیرد و شامل پارامتر تجربی نمی‌شود، می‌تواند برای انواع مختلف لیزراسکنرها به کار رود. زمانی که روابط مدل برای $\Delta\varphi$ یا $\Delta\theta$ وجود ندارد، در مقایسه با زمانی که برای هر سه دسته مشاهدات ρ ، θ و φ روابط تصحیح خطا نوشته می‌شود، بهبود دقت کمتر خواهد بود.

در مقایسه با مدل‌های دیگر به نظر می‌رسد با اینکه بهبود دقت در تمام مدل‌های ذکر شده وجود دارد اما هیچ‌یک از روابط نتوانستند به بهبود دقت مدل پیشنهادی برسند و بیشترین بهبود زمانی حاصل شد که از مدل کالیبراسیون پیشنهادی استفاده شد. افزون بر این، هر فرمولی که از پارامترهای فیزیکی غیروابسته بیشتری در خصوص خطاهای داخلی دستگاه استفاده کرده، موجب بهبود دقت بیشتری شده است. با توجه

- Kaasalainen, S. et al., Kaartinen, A., 2009, **Radiometric Calibration of tIs with External Reference Targets**, Proceeding of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 72 (12), PP. 1671-1684.
- Lichti, D.D. et al., 2006, **Experiences with Terrestrial Laser Scanner Modeling and Accuracy Assessment**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXVI, Part 5, PP. 25-27.
- 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.
- 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.
- Reshetyuk, Y., 2006, **Calibration of tIs 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.