

شناسایی تغییرات هندسی در شرایط حفظ محتوای رادیومتریکی از طریق روشی مبتنی بر مثلث‌بندی همزمان دسته‌اشعه

بهنام قاسم‌زاده قورمیک^۱

علیرضا صفدری‌نژاد^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۱۶

چکیده

جابه‌جایی اندک پدیده‌ها در محیط مصداقی از تغییرات سه‌بعدی تلقی شده که احتمالاً شباهت رادیومتریکی عوارض متناظر را بر هم نمی‌زند. جابه‌جایی اندک عوارض در صحنه، فرونشست یا برآمدگی سطح زمین، اثرات مربوط به اعمال فشار و کشش محلی به مواد در صنعت و مواردی از این دست را می‌توان در زمره تغییرات هندسی قلمداد کرد که نمود رادیومتریکی محسوسی در تصاویر ندارند. در چنین شرایطی، شناسایی خودکار نقاط متناظر در تصاویر اخذ شده قبل و بعد از تغییرات هندسی، منجر به تشخیص نقاط تغییر یافته به عنوان عوارض مشابه در دو مقطع زمانی می‌شود. مثلث‌بندی همزمان نقاط متناظر شناسایی شده در بلوک‌های عکسی قبل و بعد از تغییرات هندسی، مستلزم تفکیک مختصات سه‌بعدی مجهول برای نقاط تغییر یافته در دو مقطع است. عدم لحاظ شدن این موضوع، نقص در طراحی مدل ریاضی قلمداد شده که اصلاح آن نیازمند شناسایی نقاط متناظر تغییر یافته است. در این مقاله، روشی تکراری مبتنی بر پایش بردار باقیمانده‌های مربوط به مشاهدات تصویری هر نقطه‌ی سه‌بعدی در روند مثلث‌بندی پیشنهاد شده که قادر به شناسایی نقاط تغییر یافته است. سازوکار این روش پیشنهادی بر پایه مقایسه‌ی نسبی شاخص‌های آماری مستخرج از بردار خطا در دو حالت مثلث‌بندی همزمان و مستقل تصاویر اخذ شده در بلوک‌های عکسی قبل و بعد از تغییرات هندسی است. در این روش پس از شناسایی نقاط تغییر یافته، مدل ریاضی مربوطه در روند مثلث‌بندی اصلاح و برای هر نقطه‌ی تغییر یافته دو مختصات سه‌بعدی برآورد می‌شود. نتایج اجرای روش پیشنهادی در بیش از یازده آزمایش مختلف به‌طور متوسط حاکی از موفقیت ۸۵/۸ درصدی در شناسایی نقاط تغییر یافته با بزرگی‌ها و راستای‌های متفاوت بوده که در مقایسه با روش‌های مرسوم هندسی مبتنی بر تخمین پایدار هندسه‌ی اپی‌پلار بهبود ۳۴/۵ درصدی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شناسایی تغییرات هندسی، مثلث‌بندی دسته‌اشعه، تناظریابی خودکار، تست باردا، بردار باقیمانده‌ها

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه تفرش geo97.ghasemzadeh@tafreshu.ac.ir

۲- استادیار گروه ژئودزی و مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه تفرش (نویسنده مسئول) safdarinezhad@tafreshu.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه جایگاه فتوگرامتری و کاربردهای آن با سرعت بیشتری در عرصه‌های عمرانی، صنعتی و باستان‌شناسی در حال تثبیت است. ساخت دوربین‌های عکس‌برداری نوظهور، ارتقاء زیرساخت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری و همچنین توسعه‌ی روز افزون تکنیک‌های پردازشی، زمینه ارتقاء جایگاه فتوگرامتری را فراهم آورده است (Kot et al., 2020; Kurniawan et al., 2021; Ba and Mohammad, 2021). انتظار می‌رود در آینده، تکنیک‌های فتوگرامتری برای حل مسائل مرتبط با تعیین موقعیت و مدل‌سازی سه‌بعدی به شکل فراگیرتری در اختیار عموم قرار گیرد. پیش‌شرط دستیابی به چنین هدفی توسعه‌ی راهکارهای خودکار و قابل تعمیم بوده که توسط متخصصین این حوزه در قالب بسته‌های نرم‌افزاری تجاری قابل ارائه باشند.

تغییر، به هرگونه تمایزی اطلاق می‌شود که در فاصله دو مقطع زمانی اتفاق افتاده باشد. تغییرات رادیومتریکی و هندسی مهم‌ترین اشکال بروز تمایز در پدیده‌ها در هنگام ثبت داده‌های تصویری محسوب می‌شوند (Ba and Mohammad, 2021; Esmaili et al., 2019). بر این اساس، انتظار می‌رود که بتوان آن دسته از تغییراتی که منجر به ایجاد تمایز در محتوای رادیومتریکی و یا موقعیت هندسی ثبت عوارض در فضای تصویر می‌شود را به کمک تکنیک‌های پردازش تصویری و فتوگرامتری شناسایی نمود. در روش‌های شناسایی تغییرات رادیومتریکی، هم‌مرجع‌سازی تصاویر یکی از پیش‌پردازش‌های مهم تلقی شده که چالش‌های تأمین آن با افزایش توان تفکیک مکانی تشدید می‌گردد (Peppas et al., 2019). تفکیک تغییرات رادیومتریکی ناشی از عوامل ماهوی و محیطی نیز یکی دیگر از جنبه‌های چالش‌برانگیز در این حوزه قلمداد می‌شود که نیازمند به‌کارگیری اقدامات پالایشی و پردازشی مختلف در شناسایی تغییرات ماهوی خواهد بود (De Jong and Bosman, 2019; Saha et al., 2019). در مقابل، تغییرات هندسی نیز به اشکال مختلفی شناسایی می‌شوند. تغییرات هندسی سه‌بعدی از طریق تولید

و مقایسه‌ی مدل‌های سه‌بعدی به کمک تصاویر همپوشان در دو مقطع زمانی به اجرا رسیده و تغییرات دوبعدی نیز به کمک تناظریابی در تصاویر هم‌مرجع شده دنبال می‌شود (Fauzan et al., 2021).

هم‌مرجع‌سازی تصاویر و یا مدل‌های سه‌بعدی بکمک عوارض تغییرنیافته پیش‌شرط آشکارسازی تغییرات در این حوزه محسوب می‌شود (Ochoa-Arias and Delgado-Pinos, 2020). در ادامه برخی از تحقیقات مرتبط با آشکارسازی تغییرات هندسی به کمک تکنیک‌های فتوگرامتری مرور شده است. رفیعی و سعادت سرشت در سال ۲۰۱۴ با تولید نقاط سه‌بعدی از طریق مثلث‌بندی دسته‌اشعه برای دو مقطع زمانی قبل و بعد از تغییرات هندسی و هم‌مرجع‌سازی آن‌ها از طریق عوارض متناظر به شناسایی تغییرات سه‌بعدی پرداختند (Rafiee and Saadateseresh, 2014).

اسماعیلی و عبادی در سال ۲۰۱۸ به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات سه‌بعدی بدنه‌ی اتومبیل پس از برخورد از تکنیک CPDA^۱ مبتنی بر فتوگرامتری برد کوتاه استفاده نموده‌اند. در این روش با به‌کارگیری همزمان تصاویر اخذ شده قبل و بعد از تغییر شکل بدنه‌ی خودرو یک مثلث‌بندی دسته‌اشعه همزمان انجام می‌شود. در این روند نقاط تارگت‌گذاری شده که در دو مقطع زمانی بدون تغییر مانده‌اند با یک مختصات سه‌بعدی در فضای شئی و تارگت‌های موجود در مناطق تغییریافته هر یک با دو مختصات سه‌بعدی (یک مختصات برای قبل و یک مختصات برای بعد از تغییر شکل) به‌عنوان مجهول در فرایند مثلث‌بندی حضور دارند. اینکار با کاهش عدم قطعیت‌های مرتبط با هم‌مرجع‌سازی مدل‌های سه‌بعدی در دو مقطع زمانی توانسته دقت برآورد تغییر شکل سه‌بعدی را به شکل محسوسی ارتقاء بخشد (Esmaili and Ebadi, 2018). گودا^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ نیز از تکنیک فتوگرامتری برای اندازه‌گیری تغییر شکل سه‌بعدی مخازن کامپوزیتی تقویت‌شده با فیبر کربن در هنگام بارگذاری استفاده نمودند. عدم امکان به‌کارگیری حس‌گرهای

1- Combined Photogrammetry Displacement Adjustment (CPDA)

2- Goda

کنترلی در مناطق دارای صعوبت مورد استفاده قرار گیرد (Cook and Dietze, 2019).

بروز تغییرات سه بعدی در موقعیت عوارض بدون اثرات محسوس رادیومتریکی نوع خاصی از تغییرات تلقی شده که می تواند مصداق های متنوعی در دنیای واقعی داشته باشد. مصداقی همچون: ۱- فرونشست یا برآمدگی سطح زمین و سازه های عمرانی، ۲- تغییر شکل یا جابه جایی اجسام تحت تأثیر تنش های داخلی و یا نیروهای خارجی، ۳- شناسایی تغییرات سه بعدی استتار شده و ۴- تغییر جزئی در چیدمان اشیاء را می توان در زمره ی تغییرات سه بعدی تلقی نمود که محتوای رادیومتریکی عوارض را به شکل محسوسی تغییر نداده و صرفاً اختلافات هندسی را بوجود می آورند. ثبت تصویر/تصاویر از مواضع ثابت می تواند تشخیص چنین تغییراتی را با سهولت بیشتری همراه سازد (Cardenal et al., 2019; Cook and Dietze, 2019). در این شرایط مقایسه ی پیکسل به پیکسل تصاویر اخذ شده می تواند راهگشا باشد. اما اخذ تصاویر همپوشان از مواضع متفاوت در دو مقطع زمانی، آشکارسازی چنین تغییراتی را پیچیده تر می سازد. تولید مدل های سه بعدی سطح به صورت هم مرجع شده در دو مقطع زمانی می تواند در آشکارسازی این تغییرات مؤثر باشد (Goda et al., 2019). هر چند، عدم وجود مؤلفه ی عمق در تغییرات رخ داده و همچنین عدم قطعیت های مرتبط با هم مرجع سازی مدل های سه بعدی در زمان بروز چنین تغییراتی، چالش های این حوزه قلمداد می شوند.

در این مقاله روشی برای شناسایی تغییرات هندسی عوارض در زمان حفظ محتوای رادیومتریکی از طریق اخذ بلوک های عکسی در دو مقطع زمانی، پیشنهاد شده است. در این راهکار، بعد از تناظرابی خودکار میان تمامی تصاویر اخذ شده در دو مقطع زمانی، با اجرای مثلث بندی دسته اشعه به صورت یک شبکه ی آزاد، موقعیت های سه بعدی نقاط متناظر و پارامترهای خارجی تصاویر برآورد می شود. در این مثلث بندی، تصاویر هر دو مقطع زمانی به صورت همزمان مشارکت دارند. محتمل است که برخی از نقاط

جابه جایی و کرنش سنج های تماسی، مشوق اصلی محققین در به کارگیری تکنیک های فتوگرامتری بوده است. در روش به کاررفته تارگت ها قبل از بارگیری بر روی بدنه مخازن نصب شده و روند تغییرات سه بعدی موقعیت تارگت ها در روند بارگذاری مورد پایش قرار گرفته است (Goda et al., 2019). همچنین تئو^۱ در سال ۲۰۲۰ برای اندازه گیری تغییر شکل سه بعدی دیوارهای بتنی در آزمایش های تخریبی، عملکرد سنسورهای تماسی اندازه گیری جابه جایی خطی (LVDT)^۲ را با تکنیک های بازسازی سه بعدی مبتنی بر SfM^۳ مقایسه نموده است. در این فرایند پس از تولید ابر نقاط متراکم در دو مقطع زمانی و هم مرجع سازی آنها، موقعیت های جابه جا شده از طریق فیلترگذاری شناسایی شده اند. نتایج به دست آمده از روش فتوگرامتری در موقعیت های نصب LVDT در بدنه ی دیوارهای بتنی همبستگی بالای ۹۸ درصدی را با اندازه گیری های نقطه ای نشان داده است. با توجه به امکان اندازه گیری پیوسته تغییر شکل در روش های بینایی مبنای این راهکار به عنوان جایگزین مناسبی برای روش های نقطه ای اندازه گیری تغییر شکل معرفی شده است (Teo, 2020). کوک و دیتز^۴ در سال ۲۰۱۹ با هدف تولید نقشه ی تغییرات سه بعدی سطح ابتدا از طریق تصاویر اخذ شده توسط پهپاد مجهز به سامانه ی GNSS دو ابر نقاط مجزا در دو مقطع زمانی را تولید نمودند. سپس هم مرجع سازی دو ابر نقطه از طریق شناسایی عوارض مشترک در مناطق بدون تغییر به اجرا رسیده است. به این شکل نیاز به نقاط کنترل زمینی برای زمین مرجع سازی ابر نقاط از فرایند تولید نقشه ی تغییرات سه بعدی حذف شده است. نتایج نشان داد که در صورت وجود همپوشانی بالابین ابرهای نقطه در مناطق بدون تغییر و دقت ۱-۲ سانتی متری در تعیین موقعیت مراکز تصویر توسط GPS حداکثر دقت تا دو برابر بیشتر از توان تفکیک مکانی تصاویر اخذ شده قابل تأمین خواهد بود. چنین راهکاری می تواند جمع آوری نقاط

1- Teo

2- Linear Variable Differential Transformer

3- Structure from Motions

4- Cook and Dietze

مدل سه بعدی هم مرجع شده گردد.

مقاله حاضر مشتمل بر پنج بخش بوده که بعد از بخش حاضر به عنوان مقدمه، روش پیشنهادی تشریح شده است. داده‌های آزمون و مراحل آماده‌سازی آن در بخش سوم تشریح شده و بخش چهارم به نتایج روش پیشنهادی و تحلیل آن اختصاص دارد. بخش آخر از این مقاله نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهادات اختصاص دارد.

۲- روش شناسی

روش پیشنهادی در این تحقیق مبتنی بر مثلث‌بندی همزمان دسته‌اشعه بر پایه‌ی معادله مشهور شرط هم‌خطی (رابطه‌ی ۱) برای بلوک‌های عکسی اخذ شده قبل و بعد از تغییرات هندسی است.

$$\begin{bmatrix} x + \Delta x \\ y + \Delta y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \times \mathbf{M} \times \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه‌ی (۱)، $[x, y]^T$ بردار موقعیت متریک یک نقطه در فضای تصویر پرسپکتیو، $[\Delta x, \Delta y]^T$ بردار اصلاح اعوجاجات هندسی دوربین در ثبت موقعیت‌های تصویری، $[X, Y, Z]^T$ بردار موقعیت سه‌بعدی متناظر در فضای شی، $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ موقعیت مرکز تصویر در سیستم مختصات زمینی، $\mathbf{M}$ ماتریس دوران سه‌بعدی، λ ضریب مقیاس و f فاصله کانونی دوربین عکس‌برداری می‌باشند.

این روش برای شرایطی توسعه یافته که دو بلوک عکس‌برداری در دو مقطع زمانی از یک منطقه توأم با تغییرات هندسی اخذ شده باشند. تغییرات هندسی در دو مقطع زمانی به نحوی بوده که محتوای رادیومتریکی مخدوش نشده و این موضوع منجر به اختلال در فرایند تناظریابی خودکار شده است. این شباهت حتی ممکن است موجب اشتباه در انتخاب نقاط متناظر به صورت دستی نیز گردد. در این شرایط نقاط متناظری در مناطق تغییر یافته به عنوان پدیده‌های مشابه در دو مقطع زمانی شناسایی می‌شوند. به‌طور پیش‌فرض، در هنگام تشکیل دستگاه

متناظر شناسایی شده، در مناطق توأم با تغییرات هندسی واقع شده باشند. به عبارت بهتر، به کارگیری تناظریابی خودکار مبتنی بر محتوای رادیومتریکی تصاویر می‌تواند منجر به شناسایی نقاط متناظری در دو مقطع زمانی شود که از نظر رادیومتریکی مشابه اما در دو مقطع زمانی دچار جابه‌جایی‌های هندسی شده باشند. به کارگیری این نقاط در روند مثلث‌بندی می‌تواند بزرگی مقادیر باقیمانده‌های به دست آمده از روند تعدیل کمترین مربعات را تحت تأثیر قرار داده و دقت مثلث‌بندی را بکاهد. چالش اصلی در مثلث‌بندی همزمان، شناسایی نقاط متناظر عکسی در مناطق تغییر یافته بوده که در مثلث‌بندی به شکل نادرست برای برآورد یک موقعیت سه‌بعدی واحد در فضای شیء مشارکت دارند. روند پیشنهادی با اجرای آزمون‌های آماری نسبی بر روی بردار باقیمانده‌های مربوط به مشاهدات عکسی نقاط متناظر مشترک در دو مقطع زمانی، تلاش می‌کند که با شناسایی و تفکیک مختصات سه‌بعدی مجهول برای نقاط مشکوک (یک نقطه سه‌بعدی برای هر مقطع زمانی) توازن و تعادل را به فرایند سرشکنی خطای مشاهدات در مثلث‌بندی دسته اشعه باز گرداند. ایده‌ی اصلی این روش از یک رویکرد آماری در شناسایی مشاهدات نادرست در شبکه‌های ژئودتیکی (مشهور به روش باردا) الهام گرفته شده است (Baarda, 1968). در این روش مشاهدات توأم با اشتباهات فاحش در یک روند تکراری به کمک تست‌های آماری بر روی بردار باقیمانده‌های سرشکنی شناسایی و حذف می‌شوند (Teo, 2020).

از مزایا و جنبه‌های نوآورانه‌ی راهکار پیشنهاد شده در این مقاله می‌توان به موارد ارائه شده در ادامه، اشاره داشت:

- ۱- عدم نیاز به هم‌مرجع‌سازی دستی مدل‌های سه‌بعدی تولید شده در دو مقطع زمانی،
- ۲- حساسیت روش به تغییرات هندسی در هر سه مولفه‌ی مختصاتی فضای شی و
- ۳- تعیین پارامترهای خارجی تصاویر دو مقطع زمانی در یک سیستم مختصات واحد که می‌تواند در صورت به کارگیری تکنیک‌های تناظریابی متراکم منجر به تولید دو



نگاره ۱: فلوچارت کلی روش پیشنهادی در شناسایی نقاط تغییر یافته هندسی از طریق مثلبندی همزمان دسته اشعه

باشد. ایده‌ی اصلی روش پیشنهادی بر پایه ارزیابی بردار باقیمانده نتایج مثلبندی دسته اشعه بنا شده است. در این روند، معادله‌ی شرط هم‌خطی به‌عنوان یک مدل صلب هندسی تصور شده که اثرات عدم انطباق و ناهمگونی مشاهدات به‌کاررفته در فرایند مثلبندی دسته‌اشعه را در بردار باقیمانده‌ی مشاهدات نمایان می‌سازد. برای این منظور، پارامترهای داخلی دوربین‌های عکس‌برداری به‌کاررفته در اخذ بلوک‌های عکسی از قبل معلوم بوده و در خلال اجرای روش پیشنهادی این مقادیر به‌عنوان پارامترهای مجهول به مثلبندی دسته‌اشعه تحمیل نمی‌شوند. این اقدام از ایجاد انعطاف در معادله‌ی شرط هم‌خطی جلوگیری می‌کند. انتظار می‌رود که این موضوع امکان پوشش اثرات نقص در طراحی مدل ریاضی را کاسته و حساسیت بردار باقیمانده‌ی مشاهدات را نسبت به این نقص افزایش دهد.

روش پیشنهادی با این فرض طراحی شده که نقاط تصویری به‌کار گرفته شده در روند مثلبندی دسته اشعه عاری از خطا در تشخیص موقعیت‌های متناظر از نظر رادیومتریکی هستند. به همین دلیل روند شناسایی خودکار نقاط متناظر در تصاویر اخذ شده با حساسیت بیشتری به اجرا رسیده است. برای این کار، ابتدا از طریق تکنیک‌های شناسایی عوارض کاندید تناظریابی مرسوم (Bay et al., 2008; Beaudet, 1978; Harris and Stephens, 1988; Lowe, 2004; Mikolajczyk and Schmid, 2004; Remondino et al., 2013) مجموعه‌ای از عوارض در تمامی تصاویر اخذ شده در هر دو مقطع زمانی شناسایی می‌شوند. سپس بین عوارض

معادلات مرتبط با مثلبندی دسته اشعه برای تمامی نقاط متناظر شناسایی شده مرتبط به یک نقطه واحد در فضای زمین، یک مختصات سه‌بعدی مجهول در فضای زمین در نظر گرفته می‌شود. این اقدام هنگام جابه‌جایی هندسی آن نقطه در دو مقطع زمانی، نقص در طراحی مدل ریاضی قلمداد شده که برای اصلاح آن می‌بایست دو مختصات سه‌بعدی مجهول (یک موقعیت در هر مقطع زمانی) در فضای زمین لحاظ گردد. فلوچارت کلی روش پیشنهادی در نگاره (۱) ارائه شده و در ادامه جزئیات مرتبط با آن به تفصیل تشریح شده است.

از منظر تئوری، در صورت وجود درجه‌ی آزادی، به‌کارگیری مدل ریاضی نامناسب و یا مشاهدات توأم با خطای فاحش می‌توانند منجر به بروز باقیمانده‌های بزرگ و یا سیستماتیک در نتایج تعدیل کمترین مربعات شوند (Teunissen et al., 2005). خطای فاحش در مشاهدات صرفاً باقیمانده‌های مرتبط با آن‌ها را تحت‌تأثیر قرار نداده و باقیمانده‌های سایر مشاهدات نیز در چنین شرایطی مخدوش خواهند شد (Mikhail and Ackermann, 1982). نقص در ساختار مدل ریاضی نیز طیفی از عواقب را به‌دنبال خواهد داشت. عدم همگرایی دستگاه معادلات یا بروز خطای سیستماتیک در بردار باقیمانده‌ها نمونه‌ای از این عواقب قلمداد می‌شوند. در مورد مسئله‌ی این تحقیق، تشخیص نادرست در تعداد نقاط زمینی مجهول هنگام مثلبندی دسته اشعه به‌عنوان عامل نقص در ساختار معادلات تلقی شده که انتظار می‌رود نشانه‌هایی را در بردار باقیمانده‌های سرشکنی به‌دنبال داشته

تکراری طراحی شده، شناسایی این نقاط و به تبع آن اصلاح تعداد نقاط زمینی مجهول در روند مثلث بندی دسته اشعه هدف گذاری است. بعبارت بهتر، در آغاز تعداد نقاط زمینی متناظر با دسته اول K_1 و تعداد نقاط زمینی متناظر با دسته دوم K_2 نقطه است. در بین K_2 نقطه‌ی زمینی دسته دوم، تعداد K_{chg} نقطه ($K_{chg} < K_2$) به عنوان نقاط تغییر یافته وجود داشته که انتظار می رود پس از شناسایی و اصلاح، تعداد نقاط زمینی دسته اول به $K_1 + 2 \times K_{chg}$ و تعداد نقاط زمینی دسته دوم به $K_2 - K_{chg}$ تغییر یابند.

روند پیشنهادی یک فرایند تکراری بوده که ابتدا با محاسبه بردار باقیمانده‌های نرمال شده از نتایج تخمین کمترین مربعات مثلث بندی دسته اشعه ($\vec{V} = [\vec{V}_1^T \ \vec{V}_2^T]^T$) آغاز می شود. مقادیر باقیمانده‌های نرمال شده از تقسیم هر باقیمانده به انحراف استاندارد تخمین زده شده برای آن باقیمانده محاسبه می شود. انحراف استاندارد مقادیر باقیمانده‌ها از ماتریس کواریانس آن‌ها به عنوان یک محصول از روند تخمین کمترین مربعات به دست می آیند. انتظار می رود که مقادیر باقیمانده‌های نرمال شده از تابع توزیع نرمال تبعیت کنند (Baarda, 1968). در ادامه، مقادیر باقیمانده برآورد شده مربوط به مشاهدات تصویری نقاط سه بعدی دسته دوم ($\vec{V}_2$) از بردار باقیمانده‌ها جدا شده و به زیربردارهای مرتبط با هر نقطه‌ی سه بعدی تفکیک می شود (رابطه‌ی ۲).

$$\vec{V}_2 = [\vec{v}_1^T, \vec{v}_2^T, \dots, \vec{v}_{K_2}^T]^T \quad \text{رابطه (۲)}$$

هر یک از بردارهای $\vec{v}_i$ ($i = 1, 2, \dots, K_2$) شامل باقیمانده‌های مشاهدات تصویری مربوط به یک نقطه‌ی سه بعدی در فضای شیء است. تعداد عناصر هر بردار (n_i) متناسب با تعداد تصاویری است که آن نقطه‌ی سه بعدی در آن‌ها مشاهده شده است. در ادامه، برای هر یک از بردارهای $\vec{v}_i$ شاخصی به صورت رابطه‌ی (۳) محاسبه می شود. این شاخص مجذور میانگین مربعات باقیمانده برای مشاهدات مرتبط با هر نقطه‌ی سه بعدی می باشد.

$$r_i = \sqrt{\frac{\vec{v}_i^T \vec{v}_i}{n_i}} \quad i = 1, 2, \dots, K_2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

کандید از طریق شباهت سنجی میان توصیف گرهای SIFT، نقاط متناظر شناسایی می شوند. در شباهت سنجی همزمان از قیود قرابت و تمایز توصیف گرها استفاده می شود (Sedaghat et al. 2011). در ادامه به منظور تدقیق مکانی نقاط متناظر از روش تناظریابی ناحیه مبنای کمترین مربعات با تابع تبدیل هندسی پروجکتیو دوبعدی استفاده شده است (Bethmann and Luhmann, 2010; Rosenholm, 1987). این اقدام با هدف کنترل مضاعف در تطابق محتوای رادیومتریکی و همچنین بهبود موقعیت مکانی نقاط متناظر به اجرا رسیده است. نتایج واگرا شده در روند تناظریابی کمترین مربعات و یا عوارضی که در این روند اصلاحات مکانی زیادی داشته باشند با ظن نادرست بودن از لیست نقاط متناظر خارج می شوند. نتیجه این مرحله، لیستی از موقعیت دقیق مکانی نقاط متناظری بوده که از نظر رؤیت پذیری در چهار دسته قرار خواهند داشت.

۱- نقاط متناظری که صرفاً در تصاویر یک مقطع زمانی شناسایی شده‌اند (حداقل دو تصویر)،

۲- نقاط متناظری که در هر مقطع زمانی حداقل در دو تصویر شناسایی شده‌اند،

۳- نقاط متناظری که در یک مقطع زمانی در حداقل دو تصویر و در مقطع زمانی دیگر صرفاً در یک تصویر شناسایی شده‌اند و

۴- نقاط متناظری که در هر مقطع زمانی صرفاً در یک تصویر رویت شده‌اند.

در ادامه‌ی متن مقاله از شماره دسته‌ها جهت اشاره به آن‌ها استفاده شده است.

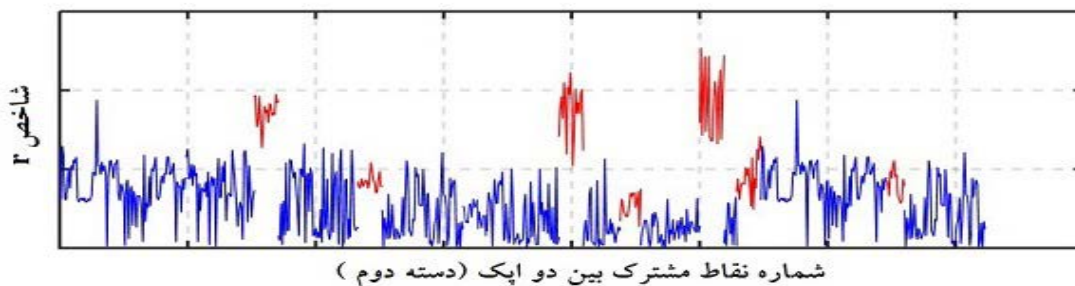
روش پیشنهادی صرفاً در مورد دو دسته‌ی اول قابل اجرا بوده و تمامی نقاط متناظر دسته‌های سوم و چهارم از روند اجرای روش پیشنهادی حذف می شوند. پیش بینی می شود که در بین نقاط متناظر دسته‌های دوم نقاطی در مناطق تغییر یافته قرار داشته باشند که در مثلث بندی اولیه تعداد صحیحی مجهول برای آن‌ها تخصیص نیافته باشد. این نقاط علیرغم تغییرات هندسی در دو مقطع زمانی از نظر رادیومتریکی مشابه تشخیص داده شده‌اند. در سازوکار

انتخاب می‌شود. ایده این انتخاب، تأمین شرایط مقایسه‌ی نسبی بین مثلث‌بندی همزمان بلوک‌های عکسی با نتایج مثلث‌بندی منفرد هر بلوک است. با فرض اینکه عامل بروز خطا در نتایج مثلث‌بندی صرفاً متأثر از تعیین تعداد صحیح نقاط زمینی مجهول باشد؛ مثلث‌بندی‌های منفرد، عاری از این خطا تلقی شده و می‌توان بردارهای باقیمانده در نتایج مثلث‌بندی منفرد را به‌عنوان سنگ محکی در ارزیابی نتایج مثلث‌بندی همزمان در نظر گرفت. این اقدام ماهیتی نسبی را به روند پیشنهادی بخشیده که می‌توان از آن در شرایط تغییر در توان تفکیک مکانی تصاویر و یا تمایز در نحوی طراحی شبکه‌ی فتوگرامتری به کار بست. البته این موضوع به تمایز در طراحی شبکه برای بلوک‌های عکسی در دو مقطع زمانی مربوط نبوده و انتظار می‌رود که نحوه‌ی تولید بلوک‌های عکسی در دو مقطع زمانی از منظر توان تفکیک مکانی تصاویر و نحوه‌ی طراحی شبکه تصویربرداری مشابه باشند.

پیشتر باردا با استفاده مستقیم از مقادیر باقیمانده‌های نرمال شده سعی بر شناسایی مشاهدات اندک توأم با خطای فاحش در شبکه‌های ژئودتیکی نموده بود (Baarda, 1968). وجه تمایز رویکرد پیشنهاد شده در این مقاله با روش باردا را می‌توان در موارد مطرح شده در ادامه خلاصه نمود:

- ۱- عامل بروز خطا (مشاهدات غلط در مقابل ساختار مدل ریاضی نامناسب)،
- ۲- روند کاهش اثر خطا (حذف مشاهدات در مقابل اصلاح مدل ریاضی)،
- ۳- مشاهدات درگیر در روند ارزیابی (تمامی مشاهدات در

نمودار نگاره (۲) مقادیر r را در یک مثلث‌بندی دسته اشعه توأم با نقاط تغییر یافته نشان می‌دهد. در این نمودار محور افق شماره مربوط به نقاط سه‌بعدی دسته دوم را نشان داده که در آن نقاط تغییر یافته با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. همانطور که در این نمودار مشهود است بخشی از نقاط تغییر یافته مقادیر متمایز و بزرگ‌تری را در شاخص r در مقایسه با نقاط بدون تغییر ایجاد نموده‌اند. آزمون‌های بیشتر مرتبط با کفایت این شاخص در بخش نتایج و بحث دنبال شده است. با توجه به ویژگی نسبی شاخص r در ایجاد تمایز میان نقاط تغییر یافته، روند تکراری ارائه شده در شبه‌کد (۱) به‌منظور شناسایی و تفکیک این نقاط طراحی شده است. مطابق با شبه‌کد (۱) سازوکار پیشنهادی از دو چرخه تشکیل شده است. در چرخه‌ی نخست نقاط مشکوک به تغییر شناسایی شده و در آزمون چرخه‌ی دوم، نقاط شناسایی شده در چرخه‌ی اول برچسب‌دهی نهایی می‌شوند. چرخه‌ی اول در حذف فاصل خطوط دوم تا نهم شبه‌کد به اجرا رسیده و حذف فاصل خطوط یازده تا بیست به چرخه‌ی دوم اختصاص دارد. حد آستانه‌ی Th_{Stop} کنترل‌کننده‌ی تعداد تکرارها در چرخه‌ی اول بوده و در چرخه‌ی دوم، تعداد تکرارها با تکرارهای چرخه‌ی اول برابر خواهد بود. مقدار حد آستانه‌ی Th_{Stop} از نتایج مثلث‌بندی منفرد بلوک‌های عکسی هر یک از مقاطع زمانی به‌دست می‌آید. در مثلث‌بندی تصاویر هر یک از مقاطع زمانی، مقدار شاخص r برای تمامی نقاطی سه بعدی محاسبه شده و بیشینه‌ی میانگین مقادیر r در نتایج مثلث‌بندی دو مقطع زمانی به‌عنوان حد آستانه‌ی Th_{Stop}



نگاره ۲: مثالی از نمودار شاخص r به‌دست آمده برای نقاط سه‌بعدی دسته‌ی دوم در روند مثلث‌بندی (نقاط بدون تغییر با رنگ آبی و نقاط تغییر یافته با رنگ قرمز نمایش یافته‌اند)

شبه کد (۱): سازوکار پیشنهادی به منظور شناسایی و تفکیک نقاط تغییر یافته

ورودی‌ها:	
مشاهدات تصویری مرتبط با نقاط متناظر دسته‌ی اول	
مشاهدات تصویری مرتبط با نقاط متناظر دسته‌ی دوم	
حدآستانه توقف (Th_{Stop})	
خروجی:	
نقاط سه‌بعدی تغییر یافته	
۱	شمارنده تکرار = صفر
۲	مثلث‌بندی دسته اشعه به صورت شبکه‌ی آزاد به کمک نقاط متناظر دسته‌های اول و دوم
۳	برآورد بردار باقیمانده‌های نرمال شده برای نقاط دسته‌ی دوم
۴	محاسبه‌ی شاخص r برای نقاط سه‌بعدی در فضای شئی مرتبط با دسته‌ی دوم
۵	اگر بیشینه مقدار r بزرگ‌تر از Th_{Stop} بود آنگاه:
۶	افزودن یک واحد به شمارنده تکرار
۷	شناسایی نقاط سه بعدی متناظر با بزرگترین مقدار r
۸	انتقال مشاهدات تصویری مرتبط با نقطه شناسایی شده به دسته‌ی اول و تفکیک مجهولات نقاط زمینی
۹	بازگشت به خط ۲
۱۰	در غیر این صورت:
۱۱	تکرار متغیر i از یک تا شمارنده تکرار
۱۲	باز گرداندن نقطه‌ی تفکیک شده در تکرار i ام به دسته‌ی دوم و تخصیص یک نقطه‌ی مجهول در فضای شئی
۱۳	مثلث‌بندی دسته اشعه به صورت شبکه‌ی آزاد به کمک نقاط متناظر دسته‌های اول و دوم
۱۴	برآورد بردار باقیمانده‌های نرمال شده برای نقاط دسته‌ی دوم
۱۵	محاسبه‌ی شاخص r برای نقاط سه‌بعدی در فضای شئی مرتبط با دسته‌ی دوم
۱۶	تعیین مقدار حدآستانه خودکار به روش اوتسو (T_{Otsu}) برای مقادیر r
۱۷	اگر مقدار r مربوط به نقطه‌ی تفکیک شده در مرحله‌ی i بیشتر از T_{Otsu} بود آنگاه:
۱۸	شناسایی آن نقطه به عنوان نقطه‌ی تغییر یافته
۱۹	پایان
۲۰	بازگشت به خط ۱۱
۲۱	پایان

و مقادیر اولیه مجهولات مثلث‌بندی در محیط نرم‌افزار استرالیس^۱ نسخه ۶/۰۶ برآورد شده و نقاط متناظر اولیه از طریق نرم‌افزار متاشیپ پرو^۲ نسخه ۱/۸ شناسایی شده‌اند. سایر اقدامات پردازشی اعم از دسته‌بندی و تدقیق موقعیت مکانی نقاط متناظر و الگوریتم (۱) در محیط نرم‌افزار متلب^۳ نسخه‌ی سال ۲۰۱۹ برنامه‌نویسی شده است.

مقابل مشاهدات مرتبط با نقاط دسته‌ی دوم)،
 ۴- شاخص تفکیک‌کننده (باقیمانده‌های نرمال شده هر یک از مشاهدات به صورت منفرد در مقابل RMSE نرمال شده از مقادیر باقیمانده‌های مرتبط با هر نقطه‌ی سه‌بعدی) و
 ۵- سازوکار توقف تکرارها (آزمون آماری مشهور 3σ بر روی باقیمانده‌ها در مقابل مقایسه نسبی با مثلث‌بندی‌های مستقل بلوک‌های هر مقطع زمانی).

در پیاده‌سازی روش پیشنهادی، کالیبراسیون داخلی دوربین‌ها

1- Australis

2- Metashape pro

3- MATLAB

اخذ شده توسط آن، پارامترهای کالیبراسیون داخلی دوربین در جدول (۱) گزارش شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی و پارامترهای کالیبراسیون داخلی دوربین به کارگرفته شده در آزمون‌های این تحقیق

SAMSUNG SM-A217F/DS	برند و مدل
4000×3000	ابعاد ماتریس تصویر (h×w)
$4.69 \pm 3 \times 10$	فاصله اصلی (mm)
2×2	ابعاد پیکسل‌ها ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)
$X_p = -0.004180$ $Y_p = -0.028170$	مختصات مرکز تصویر (mm)
$K_1 = -4.8202\text{e-}003$ $K_2 = 7.1550\text{e-}004$ $K_3 = -4.5433\text{e-}005$	اعوجاج شعاعی
$P_1 = 2.1160\text{e-}004$ $P_2 = 1.2309\text{e-}004$	اعوجاج مماسی
$b_1 = -1.0126\text{e-}004$ $b_2 = -3.0900\text{e-}004$	افابیتی

متوسط توان تفکیک مکانی تصاویر اخذ شده در مجموعه‌های داده نیم میلی‌متر است. در هر مجموعه‌ای داده، دو بلوک عکسی قبل و بعد از تغییرات هندسی اخذ شده که بزرگی و وسعت تغییرات در آن‌ها متفاوت است. هر یک از بلوک‌های عکسی از ده تصویر با طراحی شبکه نسبتاً مشابه تشکیل شده‌اند. نگاره (۴) نمایی از شبکه‌ی تصاویر یکی از بلوک‌های عکسی را نشان می‌دهد. در این طراحی شبکه تلاش شده تا با اخذ تصاویر متقارب، زوایای تقاطع متنوع از جهات مختلف برای بازسازی موقعیت‌های سه‌بعدی تأمین گردد. این اقدام با هدف کاهش اثرات مربوط به هندسه‌ی تقاطع در بخش‌های مختلف از مدل سه‌بعدی صورت گرفته است. به عبارت بهتر، روش پیشنهادی بر پایه‌ی تحلیل بردار باقیمانده‌های مرتبط با مشاهدات تصویری در روند مثلث‌بندی دسته‌اشعه استوار است. یکنواختی در واکنش بردارهای باقیمانده در مواجهه با بروز خطا در طراحی مدل ریاضی، پیش‌شرط موفقیت این روش است. بدیهی است که در صورت تمایز در دقت بازسازی نقاط سه‌بعدی در بخش‌های مختلف از مدل سه‌بعدی، نمی‌توان انتظار رفتار

۳- داده‌های آزمون و پیش‌پردازش‌ها

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی یک میدان آزمون مطابق با نگاره (۳) ایجاد شد. این میدان آزمون از هجده ناحیه مجزا تشکیل شده که پنج ناحیه از آن در تمامی آزمایش‌های این تحقیق ثابت و بدون تغییر مانده‌اند. سایر نواحی در آزمایشات مختلف دچار تغییرات هندسی شده که شماره ناحیه، راستا و بزرگی تغییرات هندسی هر یک در ذیل کادر هر ناحیه ذکر شده است. به‌عنوان مثال (3-V&H-9) به معنی ناحیه‌ی سوم بوده که در هنگام تغییر هندسی به آن جابه‌جایی همزمان ارتفاعی و مسطحاتی به اندازه‌ی ۹ میلی‌متر اعمال شده است.



نگاره ۳: میدان آزمون طراحی شده به‌منظور ارزیابی روش

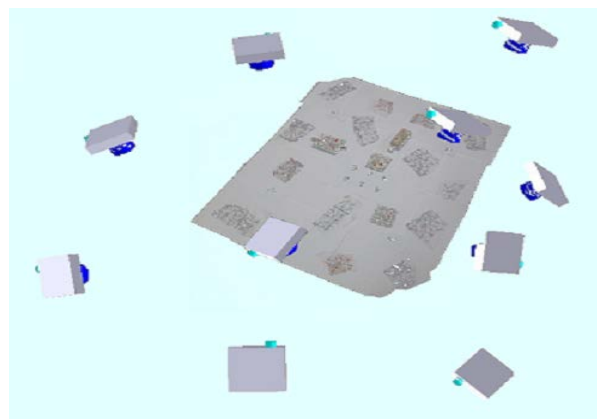
پیشنهادی

از میدان آزمون نگاره (۳)، سیزده (۱۳) مجموعه‌ی داده توسط یک دوربین رقومی اخذ شده است. دوربین به‌کارگرفته شده مربوط به یک گوشی تلفن همراه هوشمند بوده که پارامترهای کالیبراسیون داخلی آن در زمان غیرفعال بودن وضوح خودکار و از طریق اخذ تصاویر متعدد از یک میدان آزمون متشکل از صفحات شطرنجی به‌دست آمده است. مدل گوشی همراه هوشمند، ابعاد ماتریس تصویر

جدول (۲) مناطق تغییر یافته و بزرگی تغییرات را برای هر یک از یازده مجموعه‌ی داده نشان می‌دهد. مطابق با جدول (۲)، نواحی درگیر تغییر در هر مجموعه‌ی داده از نظر تعداد و اندازه متفاوت انتخاب شده است. این تغییرات هر دو وجه مسطحاتی و ارتفاعی را برخوردار بوده‌اند. به‌عنوان مثال در مجموعه‌ی داده‌ی شماره ۳، نواحی اول و دوم هر کدام به ترتیب ۴ و ۵ میلی‌متر جابه‌جا شده‌اند. جابه‌جایی در ناحیه‌ی اول افقی و در ناحیه‌ی دوم عمودی بوده است. با این حساب در مجموعه‌های داده شرایط تنوع در بزرگی، وسعت و توزیع تغییرات هندسی به‌خوبی تأمین شده است.

پس از اخذ دو بلوک عکسی (قبل و بعد از تغییرات هندسی) برای هر مجموعه‌ی داده، نقاط متناظر مطابق با روند ذکر شده در بخش سوم شناسایی، پالایش و تدقیق شده‌اند. نقاط متناظر دسته‌های سوم با حذف مشاهدات

یکنواخت در بردار باقیمانده‌های مثلث‌بندی دسته اشعه را داشت. از این‌رو، تلاش شده تا با رعایت اصول مرتبط با طراحی شبکه در بلوک‌های فتوگرامتری برد کوتاه، یکنواختی اثرات هندسی در بازسازی سه‌بعدی در سراسر مدل سه‌بعدی تأمین شود.

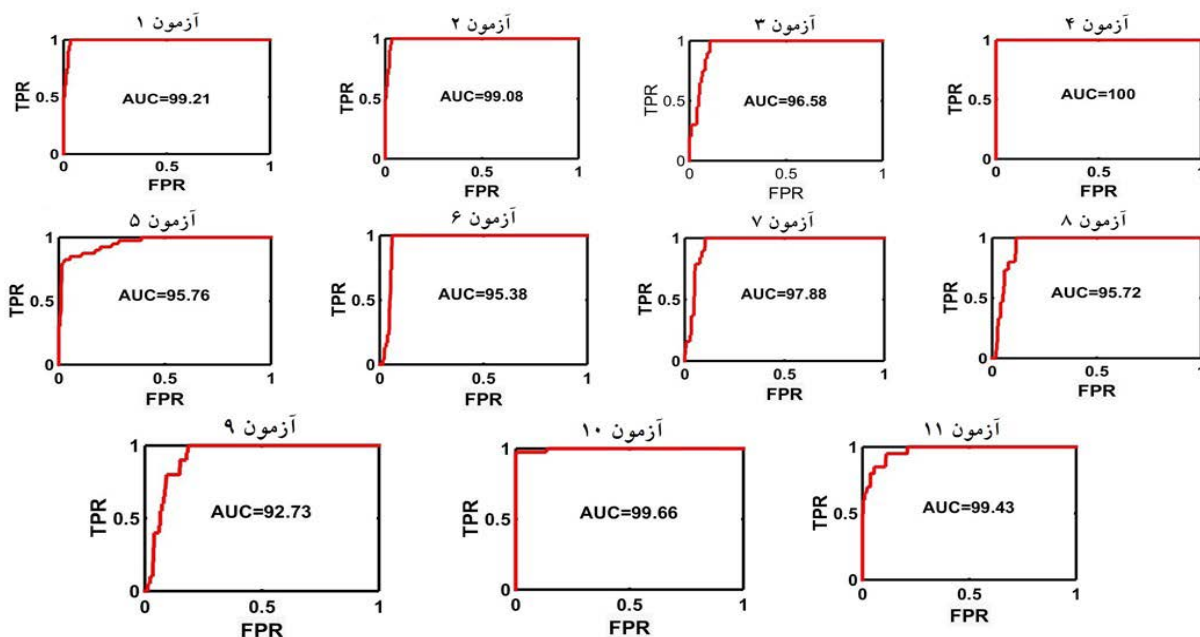


نگاره ۴: شبکه فتوگرامتری طراحی شده برای اخذ بلوک‌ها عکسی

جدول ۲: نمایش تغییرات هندسی اعمال شده در هر ناحیه برای مجموعه‌های داده

مجموعه‌های داده											جابه‌جایی (mm)	ناحیه
۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
											۴	۱
											۵	۲
											۹	۳
											۳۶	۴
											۱۰	۵
											۳۰	۶
											۲۴	۷
											۴۲	۸
											۵۱	۹
											۲۴	۱۰
											۵۷	۱۱
											۵۷	۱۲
											۴۲	۱۳
۳۰/۵	۱۵/۸	۴۸/۹	۳۷/۳	۳۶/۰	۴۹/۷	۳۲/۱	۲۰/۱	۱۷/۶	۹/۳	۹/۳	درصد نقاط سه‌بعدی تغییر یافته	

مسطحاتی	ارتفاعی	مسطحاتی و ارتفاعی



نگاره ۵: نمودارهای ROC مربوط به شاخص r برای هریک از مجموعه‌های داده

منفرد در اپوک‌ها به دسته‌ی اول انتقال یافته و نقاط متناظر دسته‌ی چهارم نیز حذف شده‌اند. در ادامه، تعداد نقاط متناظر در مناطق تغییر یافته شناسایی و برجسب‌گذاری شده تا در روند ارزیابی دقت به‌عنوان واقعیت‌زمینی مورد استفاده قرار گیرند. درصد نقاط تغییر یافته در سطر آخر از جدول (۲) گزارش شده است. لازم به ذکر است که بخش‌هایی از میدان آزمون (نواحی ثابت) در هیچ‌یک از آزمون‌ها دچار تغییرات هندسی نشده و این بدان معنا است که نقاط متناظر شناسایی شده در این نواحی در دسته‌ی اول و یا به‌عنوان نقاط بدون تغییر در دسته‌ی دوم قرار گرفته‌اند.

۴- آزمون‌ها و نتایج

روش پیشنهادی با فرض توانایی شاخص r (رابطه‌ی ۳) در ایجاد تمایز بین نقاط تغییر یافته و بدون تغییر بنا شده است. در اولین آزمون طراحی شده، کارآمدی شاخص r مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمون، تفکیک‌پذیری شاخص r برای نقاط دسته‌ی دوم از طریق ترسیم منحنی‌های شاخص عملکرد (ROC)^۱ ارزیابی شده است.

ترسیم نمودار ROC یک راهکار شناخته شده به‌منظور سنجش میزان تفکیک‌پذیری یک شاخص در ایجاد جدایی بین دو دسته داده (نقاط تغییر یافته در مقابل نقاط بدون تغییر) قلمداد می‌شود. این نمودار از ترسیم درصد شناسایی نقاط بدون تغییر اشتباه (FPR)^۲ در مقابل درصد شناسایی نقاط تغییر یافته صحیح (TPR)^۳ به ازای تغییر در حد آستانه جداکننده شاخص به‌دست می‌آید (Fawcett, 2006). نمودارهای ارائه شده در نگاره (۵) منحنی‌های ROC هر یک از مجموعه‌های داده را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها از مقادیر به‌دست آمده در اولین تکرار از روش پیشنهادی تولید شده‌اند. در تکرار اول از روش پیشنهادی هیچ‌یک از نقاط تغییر یافته شناسایی نشده و برای هر یک از نقاط تغییر یافته صرفاً یک مختصات مجهول در روند مثلث‌بندی لحاظ شده است. در نمودارهای نگاره (۵)، مساحت زیر نمودار ROC (AUC)^۴ نیز به عنوان شاخصی از تفکیک‌پذیری شاخص r برای هریک از مجموعه‌های داده گزارش شده است.

2- False Positive Rate

3- True Positive Rate

4- Area Under Curve

1- Receiver Operating Characteristics

در پالایش نقاط متناظر، پیاده‌سازی و نتایج آن با روش پیشنهادی مقایسه شده است (Liang et al., 2021). در این رویکرد مقایسه‌ای، عناصر ماتریس اساسی^۴ از طریق تخمین پایدار RANSAC^۵ و با استفاده از نقاط متناظر شناسایی شده در هر زوج تصویر برآورد می‌گردد (Varshosaz et al. 2019). بهترین ماتریس اساسی شناسایی شده برای هر زوج تصویر مبنای ارزیابی نقاط متناظر آن دو تصویر از نظر تطابق با هندسه‌ی اپی‌پلار قرار می‌گیرد. با توجه به وابستگی شدت انحراف قائم از خط اپی‌پلار برای نقاط متناظر نادرست به هندسه‌ی نسبی تصاویر استریو، مقادیر آستانه تفکیک نقاط پذیرفته شده^۶ و رد شده^۷ در هر تکرار از روند تخمین پایدار ماتریس اساسی، به‌صورت تطبیقی و معادل با ۲/۵ برابر انحراف استاندارد خطای تمامی نقاط متناظر لحاظ شده است. به عبارت بهتر، فاصله قائم هر نقطه‌ی متناظر از خط اپی‌پلار شاخص تشخیص آن نقطه از منظر تطابق با هندسه‌ی اپی‌پلار تلقی شده و نقاط متناظری که فاصله‌ی نامتعارفی از این خط داشته باشند به‌عنوان نقاط مشکوک به تغییر شناسایی می‌شوند. برای پیاده‌سازی این رویکرد مقایسه‌ای، تمامی ترکیبات ممکن از تصاویر استریو (هر تصویر از آن مربوط به یک مقطع زمانی از اخذ داده هستند) جهت شناسایی نقاط مشکوک به تغییر انتخاب می‌شوند. در ادامه فهرستی از نقاط متناظر که در هر زوج تصویر به‌عنوان نقاط مشکوک شناسایی شده‌اند تولید شده و اگر نقطه‌ای (در فضای شیء) در بیش از پنجاه درصد از موارد شناسایی شده به‌عنوان نقطه‌ی مشکوک شناسایی شده باشد؛ آن نقطه به‌عنوان نقطه تغییر یافته برچسب‌گذاری می‌شود. بدین ترتیب حدنصاب بیش از پنجاه درصدی از آراء کسب شده معیار برچسب‌دهی به یک نقطه‌ی سه‌بعدی به‌عنوان نقطه‌ی تغییر یافته خواهد بود. این رویکرد یک تکنیک پالایش به کمک قیود هندسی در تناظریابی‌های عارضه مبنا بوده که در این

همانطور که در نتایج گزارش شده از منحنی‌های ROC در نگاره (۵) مشاهده می‌شود، شاخص r حتی در زمان عدم به‌کارگیری روند تکراری پیشنهاد شده در الگوریتم (۱) از نظر ایجاد تمایز برای نقاط تغییر یافته عملکرد مطلوبی را از خود نشان می‌دهد. هرچند که طبیعی به نظر می‌رسد در زمان تشدید تغییرات هندسی عملکرد آن با انتظارات ایده‌آل متمایز باشد. به‌عنوان مثال مساحت زیر نمودار در مجموعه‌ی داده‌ی شماره ۹ به دلیل برخورداری از بیشترین سطح تغییرات هندسی، نسبت به سایر نمودارها کمتر برآورد شده است. با این حال در صورت بروز تغییرات محدود هندسی (مسطحاتی یا ارتفاعی)، قابلیت اعتماد بالایی در شاخص r به‌منظور ایجاد تمایز برای نقاط تغییر یافته وجود داشته که حتی می‌توان از آن بدون به‌کارگیری روند تکراری الگوریتم (۱) برای شناسایی تغییرات استفاده نمود. این اقدام را می‌توان یا به‌صورت دستی از طریق انتخاب حد آستانه‌ی مناسب و یا به وسیله‌ی به‌کارگیری راهکارهای انتخاب حد آستانه خودکار به اجرا رساند. با این حال، عدم اطمینان در شناسایی حد آستانه‌ی مناسب برای جداسازی نقاط تغییر یافته و همچنین احتمال قرارگیری برخی از نقاط بدون تغییر در دسته‌ی مناطق تغییر یافته دلایل اصلی طراحی روند تکراری الگوریتم (۱) به‌منظور بهبود نتایج آشکارسازی بوده است.

در آزمون دوم از این بخش، دقت روش پیشنهادی (الگوریتم ۱) برای تمامی مجموعه‌های داده از طریق عناصر ماتریس ابهام دوکلاسه و شاخص‌های آماری مستخرج از آن برآورد شده‌اند (Fawcett, 2006). شاخص‌های آماری مستخرج از ماتریس ابهام شامل صحت کلی (OA)، ضریب کاپا (K)، درصد صحت برچسب‌گذاری برای نقاط تغییر یافته (PPV)^۲ و درصد صحت برچسب‌گذاری برای نقاط بدون تغییر (NPV)^۳ بوده که در جدول (۳) گزارش شده است.

در این آزمون، روش حذف نقاط متناظر نادرست مبتنی بر هندسه‌ی اپی‌پلار به‌عنوان یک رویکرد مرسوم هندسی

4- Fundamental Matrix

5- RANdom SAMple Consensus

6- Inliers

7- Outliers

1- Overall Accuracy

2- eulaV evitciderP evitisoP

3- eulaV evitciderP evitageN

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (زمین)

شناسایی تغییرات هندسی در شرایط حفظ محتوای رادئومتریکی از طریق روشی مبتنی بر ... / ۳۷

پیشنهادی شناسایی نشده‌اند. با مقایسه نتایج کسب شده از روش پیشنهادی در دو آزمون نخست، به نظر می‌رسد این راهکار توانایی شناسایی تغییرات هندسی اندک در هر دو بعد مسطحاتی و ارتفاعی را برخوردار بوده به نحوی که دقت‌های بیش از ۹۵ درصد در آشکارسازی نقاط تغییر یافته برای این دو آزمون کسب شده است. این در حالی است که روش مقایسه‌ای توانایی کافی در شناسایی نقاط تغییر یافته در این دو آزمون را نداشته که نشان از ضعف رویکرد مبتنی بر هندسه اپی‌پلار در مواجهه با تغییرات هندسی اندک است.

تحقیق از آن به عنوان یک روش مقایسه‌ای استفاده شده است (Ma et al., 2021).

در جدول (۳)، TP تعداد نقاط سه‌بعدی تغییر یافته‌ای است که به درستی توسط روش پیشنهادی شناسایی شده‌اند؛ TN تعداد نقاط سه‌بعدی بدون تغییری هستند که بعد از اجرای روش پیشنهادی کماکان به عنوان نقاط بدون تغییر شناسایی شده‌اند؛ FP تعداد نقاط بدون تغییری بوده که به اشتباه در روند پیشنهادی به عنوان نقاط تغییر یافته شناسایی شده‌اند و FN تعداد نقاط تغییر یافته‌ای بوده که در روش

جدول ۳: عناصر ماتریس ابهام و شاخص‌های آماری مستخرج از آن در تمامی مجموعه‌های داده

مجموعه داده	روش	TP ¹	TN ²	FP ³	FN ⁴	OA	K	PPV	NPV
۱	پیشنهادی	۱۹	۱۹۴	۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۹
	مقایسه‌ای	۱۳	۱۳۵	۶۶	۷	۰/۶۷	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۹۵
۲	پیشنهادی	۱۴	۱۸۳	۱	۶	۰/۹۷	۰/۷۸	۰/۹۳	۰/۹۷
	مقایسه‌ای	۶	۹۴	۹۳	۱۴	۰/۴۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۸۷
۳	پیشنهادی	۳۸	۱۸۵	۲	۲	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۹
	مقایسه‌ای	۲۴	۱۳۳	۵۸	۱۶	۰/۶۸	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۸۹
۴	پیشنهادی	۲۸	۱۷۹	۰	۱۷	۰/۹۲	۰/۷۲	۱/۰۰	۰/۹۱
	مقایسه‌ای	۲۱	۱۳۲	۴۹	۲۵	۰/۶۷	۰/۱۶	۰/۳۰	۰/۸۴
۵	پیشنهادی	۱۱۲	۲۷۵	۰	۱۸	۰/۹۶	۰/۸۹	۱/۰۰	۰/۹۴
	مقایسه‌ای	۷۹	۲۸۰	۲	۵۵	۰/۸۶	۰/۶۵	۰/۹۸	۰/۸۴
۶	پیشنهادی	۲۲۸	۲۲۹	۱۵	۱۳	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۹۵
	مقایسه‌ای	۱۱۴	۲۶۶	۱	۱۱۷	۰/۷۶	۰/۵۱	۰/۹۹	۰/۶۹
۷	پیشنهادی	۱۰۱	۲۰۶	۰	۱۵	۰/۹۵	۰/۹۰	۱/۰۰	۰/۹۳
	مقایسه‌ای	۴۰	۲۰۷	۲	۸۰	۰/۷۵	۰/۳۸	۰/۹۵	۰/۷۲
۸	پیشنهادی	۹۵	۱۸۰	۰	۱۲	۰/۹۵	۰/۹۱	۱/۰۰	۰/۹۴
	مقایسه‌ای	۴۴	۱۸۰	۲	۶۶	۰/۷۷	۰/۴۴	۰/۹۶	۰/۷۳
۹	پیشنهادی	۱۹۵	۲۲۰	۰	۱۶	۰/۹۶	۰/۹۳	۱/۰۰	۰/۹۳
	مقایسه‌ای	۷۴	۲۱۰	۱۰	۱۴۶	۰/۶۵	۰/۲۹	۰/۸۸	۰/۵۹
۱۰	پیشنهادی	۳۷	۲۱۶	۱	۳	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۹
	مقایسه‌ای	۱۴	۲۱۹	۶	۲۶	۰/۸۸	۰/۴۱	۰/۷۰	۰/۸۹
۱۱	پیشنهادی	۸۴	۲۱۹	۰	۱۲	۰/۹۶	۰/۹۱	۱/۰۰	۰/۹۵
	مقایسه‌ای	۳۰	۲۱۹	۱	۶۶	۰/۷۹	۰/۳۸	۰/۹۷	۰/۷۷

1- evitisoP eurT

2- evitageN eurT

3- evitisoP eslaF

4- evitageN eslaF

موازی) تمامی تصاویر اخذ شده در دو مقطع زمانی به منظور آشکارسازی نقاط تغییر یافته هندسی، دلایلی بوده که زعم نویسندگان این تحقیق منجر به کاهش کارایی روش مبتنی بر هندسه‌ی اپی‌پلار در شناسایی نقاط متناظر نادرست شده است. به نظر می‌رسد که در روش پیشنهادی مشارکت هم‌زمان تمامی مشاهدات تصویری به‌صورت موازی و در قالب یک فرایند مثلث‌بندی هم‌زمان منجر به ارتقاء کارآمدی نسبت به روش متوالی (متشکل از چندگام غیرهم‌زمان) مبتنی بر هندسه‌ی اپی‌پلار شده است.

در آخرین آزمون از روند ارزیابی روش پیشنهادی، دقت آشکارسازی نقاط تغییر یافته برای هر ناحیه در هر یک از مجموعه‌های داده از طریق روش پیشنهادی و نتایج به‌دست آمده از روش مقایسه‌ای برآورد و در جدول (۴) ارائه شده است. مطابق با نتایج گزارش شده در جدول (۴)، کماکان موفقیت روش پیشنهادی در شناسایی مناطق تغییر یافته به تفکیک ناحیه مشهود است. در ۳۲ مورد از نواحی-داده‌های این بررسی، آشکارسازی صد درصدی کسب شده و در ۷۸ درصد نواحی-داده‌ها، شناسایی با دقت بالای ۹۰ درصد به‌دست آمده است. ناحیه اول و دوم به دلیل جابه‌جایی‌های اندک، بیشترین تأثیر منفی را در کاهش دقت به دنبال داشته که این موضوع در مورد جابه‌جایی‌های اندک ارتفاعی شدیدتر بوده است. ضعف ذاتی تکنیک‌های فتوگرامتری در بازیابی عمق هنگام به‌کارگیری تصاویر با نسبت باز به عمق کمتر از یک را می‌توان از دلایل این موضوع برشمرد. با اینحال در صورت رخداد یکنواخت تغییرات هندسی اندک، اقبال بیشتری در موفقیت روش پیشنهادی مورد انتظار بوده و در صورت وجود تنوع در بزرگی تغییرات هندسی، احتمال شناسایی نشدن تغییرات هندسی کوچک‌تر، کمتر از تغییرات هندسی بزرگ‌تر خواهد بود.

از سوی دیگر نتایج جدول (۴) حاکی از آن است که روش پیشنهادی به‌طور متوسط بهبود دقت ۳۴/۵ درصدی را نسبت به روش مقایسه‌ای در تمامی آزمون‌های این تحقیق داشته است.

البته در تمامی آزمون‌های صورت گرفته روش پیشنهادی با اختلاف معناداری نتایج بهتری را نسبت به روش مقایسه‌ای کسب نموده است. علاوه بر این، روش پیشنهادی توانایی کسب دقت‌های نسبتاً پایداری را در تمامی آزمون‌های طراحی شده صرف‌نظر از وسعت، تنوع و شدت تغییرات هندسی نشان داده که یک ویژگی مثبت برای آن قلمداد می‌شود. از دیگر نتایج قابل استنباط از جدول (۳)، احتمال اندک و نزدیک به صفر در تشخیص نادرست نقاط تغییر یافته است. این موضوع نشان از قابلیت اعتماد بالای روش پیشنهادی در برچسب‌دهی به نقاط تغییر یافته دارد. به عبارت بهتر، در صورت تشخیص یک نقطه به‌عنوان نقطه‌ی تغییر یافته، احتمال نادرستی آن اندک و نزدیک به صفر است. از دیگر جنبه‌های تمایز و ضعف روش مقایسه‌ای نسبت به روش پیشنهادی، وجود نقاط ثابت متعددی بوده که به اشتباه به‌عنوان نقاط تغییر یافته شناسایی شده‌اند. این اتفاق در آزمون‌هایی که در آن پهنه‌ی تغییرات هندسی محدود بوده (آزمون‌های اول تا چهارم) شدت بیشتری را داشته است. از سوی دیگر، امکان رخداد FN در مقایسه با FP بیشتر بوده و این موضوع می‌تواند احتمال کامل بودن روند برچسب‌دهی به نقاط تغییر یافته را کاهش دهد. البته در مقایسه با روش مبتنی بر هندسه‌ی اپی‌پلار، عملکرد روش پیشنهادی از منظر کامل بودن شناسایی مناطق تغییر یافته به مراتب بهتر بوده است. در تحلیل اختلاف محسوس روش مرسوم مبتنی بر هندسه‌ی اپی‌پلار با روش پیشنهادی می‌توان به عوامل مختلفی اشاره داشت که در ادامه ارائه شده‌اند.

- ۱- اثرپذیری بالای میزان انحراف قائم نقاط متناظر نادرست از خط اپی‌پلار نسبت به هندسه‌ی نسبی تصاویر استریو،
- ۲- عدم قطعیت‌های مرتبط با برآورد عناصر ماتریس اساسی هنگام وجود درصد بالایی از مشاهدات نادرست،
- ۳- یکسان بودن اهمیت هر زوج تصویر در فرایند رأی‌گیری مربوط به برچسب‌دهی نقاط متناظر نادرست بدون در نظر گرفتن تمایز در هندسه‌ی نسبی تصاویر و
- ۴- عدم مشارکت هم‌زمان (در یک فرایند محاسباتی

جدول ۴: نتایج دقت شناسایی نقاط تغییر یافته در هر یک از نواحی سیزده گانه در مجموعه های داده

میانگین	مجموعه داده											روش ها	ناحیه تغییر یافته
	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۹۰/۱۳	-	-	۹۰	۶۰	۹۵	۹۱/۱۱	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	-	۹۵	پیشنهادی	۱
۴۲/۴۸	-	-	۰	۰	۰	۴۶/۵۱	۶۳/۳۳	۶۰	۹۵	-	۷۵	مقایسه ای	
۴۶/۱۴	۶۵	۱۰۰	۳۰	۲۰	۴۰	۹۳/۱۱	۴۳/۳۳	۰	۱۰۰	۷۰	-	پیشنهادی	۲
۲۶/۹۹	۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۴۲/۱۰	۵۶/۶۷	۵۶/۶۷	۲۰	۵۰	-	مقایسه ای	
۸۹/۳۳	۹۰	-	۱۰۰	-	-	۱۰۰	۹۶/۶۶	۶۰	-	-	-	پیشنهادی	۳
۳۰/۷۶	۱۵	-	۴۰	-	-	۱۷/۱۴	۵۶/۶۷	۲۵	-	-	-	مقایسه ای	
۱۰۰	-	-	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-	-	پیشنهادی	۴
۴۲/۱۹	-	-	۱۵	۰	۴۵	۶۴/۲۸	۸۶/۶۷					مقایسه ای	
۱۰۰	-	-	-	-	-	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-	-	پیشنهادی	۵
۶۵/۱۶	-	-	-	-	-	۶۴/۸۱	۶۵/۵۱					مقایسه ای	
۱۰۰	-	-	-	-	-	۱۰۰	-	-	-	-	-	پیشنهادی	۶
۲۶/۶۶	-	-	-	-	-	۲۶/۶۶	-	-	-	-	-	مقایسه ای	
۱۰۰	۱۰۰	-	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	پیشنهادی	۷
۳۷/۵	۳۵	-	۴۰	-	-	-	-	-	-	-	-	مقایسه ای	
۹۰	۶۰	۸۵	۱۰۰	۱۰۰	-	۱۰۰	-	-	-	-	-	پیشنهادی	۸
۴۸,۱۸	۵۶/۲۵	۷۵	۴۰	۳۳/۳۳	-	۳۶/۳۶	-	-	-	-	-	مقایسه ای	
۹۷/۵۰	-	-	۹۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-	-	-	پیشنهادی	۹
۶۲/۴۸	-	-	۷۵	۶۶/۶۶	۸۰	۲۸/۲۶	-	-	-	-	-	مقایسه ای	
۱۰۰	۱۰۰	-	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	پیشنهادی	۱۰
۶۱/۲۵	۷۰	-	۲۵	۱۰۰	۵۰	-	-	-	-	-	-	مقایسه ای	
۱۰۰	-	-	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	پیشنهادی	۱۱
۲۶/۱۱	-	-	۵	۷۳/۳۳	۰	-	-	-	-	-	-	مقایسه ای	
۱۰۰	-	-	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-	پیشنهادی	۱۲
۸۰	-	-	۱۰۰	۶۰	-	-	-	-	-	-	-	مقایسه ای	
۱۰۰	-	-	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-	پیشنهادی	۱۳
۴۰	-	-	۴۰	-	-	-	-	-	-	-	-	مقایسه ای	
	۸۳	۹۲/۵۰	۹۱/۸۱	۸۵	۹۰/۷۱	۹۸/۰۲	۸۹/۹۳	۵۳/۳۳	۹۵	۷۰	۹۵	پیشنهادی	میانگین
	۳۵/۲۵	۸۷/۵۰	۳۴/۵۴	۴۱/۶۶	۲۹/۱۶	۴۰/۷۵	۶۵/۷۷	۴۷/۲۲	۵۷/۵	۵۰	۷۵	مقایسه ای	

۵- نتیجه گیری

صحنه تغییر محسوسی نداشته و این موضوع باعث تشخیص اشتباه برخی از نقاط متناظر در مناطق تغییر یافته شده است. عدم آگاهی از تغییرات هندسی این نقاط موجب تعیین نادرست تعداد مجهولات مربوط به نقاط زمینی برای آن ها در روند مثلث بندی می شود. کشف و آشکارسازی

در این مقاله راهکاری تکراری مبتنی بر مثلث بندی همزمان بلوک های عکسی اخذ شده قبل و بعد از تغییرات هندسی به منظور شناسایی خودکار مناطق تغییر یافته پیشنهاد شد. تغییرات رخ داده به نحوی بوده که محتوای رادیومتریکی

۷- منابع و مآخذ

- 1- Ba. Z., Mohammed. A. 2021. Photogrammetry-based reverse engineering method for aircraft airfoils prediction. *Advances in aircraft and spacecraft science*, 8(4), 331-344. DOI: 10.12989/aas.2021.8.4.331
- 2- Baarda, W., 1968. A Testing Procedure For Use in Geodetic Networks, 2(5). Netherlands Geodetic Commission, Delft. 97 p.
- 3- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. 2008. Speeded-up robust features (SURF). *Computer vision and image understanding*, 110(3), 346-359. DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014
- 4- Beaudet, P. R. 1978. Rotationally invariant image operators. In *Proc. 4th Int. Joint Conf. Pattern Recog.*, Tokyo, Japan, 1978.
- 5- Bethmann, F., & Luhmann, T. 2010. Least-squares matching with advanced geometric transformation models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 5), 86-91.
- 6- Cardenal, J., Fernández, T., Pérez-García, J. L., & Gómez-López, J. M. 2019. Measurement of road surface deformation using images captured from UAVs. *Remote Sensing*, 11(12), 1507. DOI: 10.3390/rs11121507
- 7- Cook, K. L., & Dietze, M. 2019. A simple workflow for robust low-cost UAV-derived change detection without ground control points. *Earth Surface Dynamics*, 7(4), 1009-1017. DOI: 10.5194/esurf-7-1009-2019.
- 8- de Jong, K. L., & Bosman, A. S. 2019. Unsupervised change detection in satellite images using convolutional neural networks. In *IEEE International joint conference on neural networks (IJCNN)* (pp. 1-8). DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8851762.
- 9- Esmaeili, F., Ebadi, H., Mohammadzade, A., & Saadatseresht, M. 2019. Evaluation of close-range photogrammetric technique for deformation monitoring of large-scale structures: a review. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 8(4), 41-55.
- 10- Esmaeili F, Ebadi H. 2018. Determination of Car Body Deformation due to Collision Using Close-Range Photogrammetry. *Journal of Geospatial Information*

اثرات مربوط به نقص در طراحی مدل ریاضی از طریق بردار باقیمانده‌های سرشکنی، ایده‌ی اصلی طراحی راهکار پیشنهادی در این تحقیق بوده است. در روش پیشنهادی، طی روندی تکراری و دومرحله‌ای از طریق مقایسه‌ی نسبی بردار باقیمانده‌های مربوط به هر نقطه‌ی گرهی با نتایج مثلث‌بندی‌های منفرد مقاطع قبل و بعد از تغییرات هندسی، نقاط تغییر یافته به تدریج شناسایی می‌شوند. در هر تکرار از این روش، ساختار مدل ریاضی در روند مثلث‌بندی از طریق اصلاح تعداد مجهولات نقاط گرهی اصلاح می‌شود. نتایج این روش حاکی از موفقیت بالا در آشکارسازی تغییرات هندسی متنوع بوده بنحوی که بیش از ۸۵ درصد نقاط تغییر یافته در یازده آزمون این تحقیق شناسایی شده‌اند. عملکرد موفق روش پیشنهادی در زمان رخداد تغییرات هندسی یکنواخت و هم‌اندازه و تضعیف عملکرد این راهکار در شناسایی تغییرات هندسی اندک هنگام وجود تنوع در بزرگی تغییرات هندسی از ویژگی‌های مثبت و منفی روش پیشنهادی محسوب می‌شود.

۶- پیشنهادها

مواردی که می‌توان در ادامه‌ی تحقیق حاضر مورد بررسی بیشتر قرار داد عبارتند از:

- ۱- ایده به‌کارگیری رویکردهای وزن‌دهی به مشاهدات مشکوک از طریق تکنیک‌های تخمین مؤلفه‌های واریانس و حذف تدریجی مشاهدت با وزن پایین به‌عنوان رویکرد جایگزین در حذف تدریجی نقاط سه‌بعدی،
- ۲- بررسی اثر تضعیف یا ایجاد ناهمگونی در دقت بازسازی مدل سه‌بعدی در عملکرد روش پیشنهادی از طریق تغییر در طراحی شبکه‌ی فتوگرامتری، و
- ۳- بررسی اثرات مربوط به به‌کارگیری دوربین‌های نیمه‌متری با پایداری هندسی بالاتر در افزایش کیفیت نتایج.

/10.1080/0143116031000139863.

20- Ma, S., Guo, P., You, H., He, P., Li, G., & Li, H. 2021. An image matching optimization algorithm based on pixel shift clustering RANSAC. *Information Sciences*, 562, 452-474. DOI: 10.1016/j.ins.2021.03.023

21- Mikhail, E. M. 1982. *Observations and least squares*. University Press of Amer.

22- Mikolajczyk, K., & Schmid, C. 2004. Scale & affine invariant interest point detectors. *International journal of computer vision*, 60(1), 63-86. DOI: 10.1023/B:VISI.0000027790.02288.f2

23- Mohamad, N., Ahmad, A., & Din, A. H. M. 2022. A Review Of Uav Photogrammetry Application In Assessing Surface Elevation Changes, *Journal Of Information System And Technology Management*. 7 (25), 195-204, DOI: 10.35631/JISTM.725016

24- Ochoa-Arias, P., & Delgado-Pinos, O. A. 2020. 2D and 3D Photogrammetric Registration Model of the Built Heritage of Cuenca. *Universitas-XXI, Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, (33), 163-180. Doi: 10.17163/uni.n33.2020.08.

25- Peppas, M. V., Mills, J. P., Moore, P., Miller, P. E., & Chambers, J. E. 2019. Automated co-registration and calibration in SfM photogrammetry for landslide change detection. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 287-303. DOI: 10.1002/esp.4502.

26- Rafiee, M., Saadatseresht, M. 2014, Target Free Distortion Measurement Using Close Range Photogrammetry. *Geospatial Engineering Journal*. 5 (2), 97-116.

27- Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F., & Gonizzi-Barsanti, S. 2013. Dense image matching: Comparisons and analyses. In 2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage) 1, 47-54. DOI: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743712

28- Rosenholm, D. 1987. Least squares matching method: some experimental results. *The Photogrammetric Record*, 12(70), 493-512. Doi: 10.1111/j.1477-9730.1987.tb00598.x.

29- Saha, S., Bovolo, F., & Bruzzone, L. 2019. Unsupervised deep change vector analysis for multiple-change detection in VHR images. *IEEE Transactions*

Technology. 6 (1), 117-129, DOI: 10.29252/jgit.6.1.117

11- Fauzan, K. N., Suwardhi, D., Murtiyoso, A., Gumilar, I., & Sidiq, T. P. 2021. Close-range photogrammetry method for SF6 Gas Insulated Line (GIL) deformation monitoring. In XXIV ISPRS Congress (2021 edition), 5-9 juillet 2021, Nice (en ligne) (Vol. 43). DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-503-2021.

12- Fawcett, T. 2006. Introduction to receiver operator curves. *Pattern Recognit. Lett*, 27, 861-874.

13- Goda, I., l'Hostis, G., & Guerlain, P. 2019. In-situ non-contact 3D optical deformation measurement of large capacity composite tank based on close-range photogrammetry. *Optics and Lasers in Engineering*, 119, 37-55. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.02.006.

14- Harris, C., & Stephens, M. 1988. A combined corner and edge detector. In *Alvey vision conference* (15(50), pp. 10-5244).

15- Kot, B. C., Tsui, H. C., Chung, T. Y., Cheng, W. W., Mui, T., Lo, M. Y., ... & Brown, R. A. 2020. Photogrammetric Three-dimensional Modeling and Printing of Cetacean Skeleton using an Omura's Whale Stranded in Hong Kong Waters as an Example. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (163), e61700. DOI : 10.3791/61700.

16- Kurniawan, W. C., Wibowo, F. S., Lin, H. I., Handayani, A. N., & Sendari, S. 2021. Development of Photogrammetry Application for 3D Surface Reconstruction. In 2021 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE) (pp. 478-482). DOI: 10.1109/ICEEIE52663.2021.9616728.

17- Liang, A., Li, Q., Chen, Z., Zhang, D., Zhu, J., Yu, J., & Fang, X. 2021. Spherically Optimized RANSAC Aided by an IMU for Fisheye Image Matching. *Remote Sensing*, 13(10), 2017. DOI: 10.3390/rs13102017

18- Lowe, D. G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant key points. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

19- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. 2004. Change detection techniques. *International journal of remote sensing*, 25(12), 2365-2401. DOI:

- on Geoscience and Remote Sensing, 57(6), 3677-3693.
DOI: 10.1109/TGRS.2018.2886643
- 30- Sedaghat, A., Mokhtarzade, M., & Ebadi, H. 2011. Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(11), 4516-4527. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2144607.
- 31- Teo, T. A. 2020. 3d deformation measurement of concrete wall using close-range photogrammetry. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 1175-1179. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1175-2020
- 32- Teunissen, P., Simons, D. J., & Tiberius, C. C. J. M. 2004. Probability and Observation Theory.
- 33- Varshosaz, M., Afary, A., Saadatseresht, M., Mojaradi, B. 2019. A Novel Approach in Computer Vision and Photogrammetry to Recover the Relative Position and Orientation of Cameras in Stereo Images Using the SVD Decomposition of the Essential Matrix. Journal of Soft Computing and Information Technology, 8(2), 76-88.