

ارزیابی رویکردهای ترکیبی برای تعریف دیتوم در پایش شبکه‌های ژئودتیکی کلاسیک

زهرا بنی مصطفوی^۱

سعید فرزانه^۲

محمدعلی شریفی^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۴/۰۲

چکیده

تجزیه و تحلیل رفتار سازه‌های مهندسی از جمله فعالیت‌های مهم در ژئودزی است چرا که هرگونه ارزیابی نادرست از جابجایی‌ها، می‌تواند تأثیرات مرگباری داشته باشد. برای یافتن میزان تغییر شکل ایجاد شده در یک سازه بر اثر عوامل مختلف، ابتدا باید به برآورد جابجایی نقاط آن سازه پرداخت. بدین منظور از دو روش مقاوم^۴ و غیرمقاوم^۵ که بر نتایج سرشکنی مشاهدات اپک‌ها استوار هستند، استفاده می‌شود. روش حداقل سازی نرم L1^۶ و سرشکنی تکراری وزن‌دار دو اپک زمانی^۷، از جمله روش‌های مقاوم هستند که با حداقل سازی نرم اول و دوم، بردار جابجایی را محاسبه می‌کنند. تجزیه و تحلیل جابجایی‌ها بر حسب میزان دخالت نقاط در محاسبات، به دو گروه تک نقطه‌ای و ترکیبی^۸ تقسیم می‌شوند. در روش‌های تک نقطه‌ای تعیین دیتوم در پایش شبکه‌های ژئودتیک کلاسیک، روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی^۹، به عنوان روش بهینه در نظر گرفته می‌شود. یکی از مشکلات اساسی این روش‌ها وابستگی شدید آن‌ها به هندسه شبکه است که مانع از کشف همه‌ی نقاط ناپایدار و افزایش میزان خطا در محاسبات خواهد شد. در این تحقیق، استفاده از روش‌های ترکیبی به عنوان جایگزین مناسبی برای این روش‌ها معرفی می‌گردد. تفاوت این روش‌ها با روش‌های تک نقطه‌ای، در بررسی تمامی نقاط شبکه‌ی ژئودتیک به شکل یک‌جا و کشف نقاط ناپایدار در بین آن‌ها است. هدف این تحقیق بررسی موفقیت روش‌های ترکیبی در جهت کشف نقاط ناپایدار و مقایسه‌ی موفقیت آن‌ها با روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی و انتخاب روش بهینه می‌باشد. در این راستا بر مبنای مشاهدات یک شبکه شبیه‌سازی شده و ایجاد حالت‌های مختلف جابجایی، بهترین روش انتخاب گردید. سپس روش پیشنهادی بر روی مشاهدات واقعی سد جامیشان، واقع در جنوب غرب شهرستان سقز، واقع در کرمانشاه، پیاده‌سازی شد. با وجود توانایی روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی در کشف نقاط ناپایدار، این روش برخلاف روش زیرنمونه چندگانه تفاضلات طولی^{۱۰}، نتوانسته است همواره تمامی نقاط ناپایدار را تشخیص دهد. روش زیرنمونه چندگانه با تفاضلات داده‌های طولی، با درصد ۱۰۰ به ۷۰، ۱۰۰ به ۸۷٫۵ و ۱۰۰ به ۸۷٫۵، در مقابل روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی، توانست موفقیت بهتری را بدست آورد. بنابراین روش زیرنمونه چندگانه تفاضلات طولی به عنوان بهترین روش انتخاب شده است. واژه‌های کلیدی: روش زیر نمونه چندگانه، M-split، روش‌های ترکیبی، سرشکنی همزمان دو اپک زمانی، نقاط ناپایدار، کنترل شبکه‌های ژئودتیک

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران z.banimostafavi@ut.ac.ir

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) farzaneh@ut.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران sharifi@ut.ac.ir

4- Robust

5- Non-robust

6- Minimum norm L1

7- Iterative Weighted Simultaneous of Two Epochs (IWST)

8- Combinatorial methods

9- Simultaneous Adjustment of Two Epochs (SATE)

10- Multiple Sub Sample distance difference

۱- مقدمه

ناپایدار در یک شبکه‌ی نظارت، مسئله‌ی مهم در تجزیه و

تحلیل تغییر شکل است (Cooper, 1987).

در شبکه‌ی مطلق، برخی از نقاط یا ایستگاه‌ها پایدار و بدون جابجایی در نظر گرفته می‌شوند که به کمک آن‌ها جابجایی محاسبه می‌شود. برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل در این شبکه‌ها، ابتدا باید یک شبکه‌ی کنترل طراحی نمود. این شبکه شامل چندین نقطه‌ی مرجع یا ثابت و چندین نقطه‌ی دیگر در منطقه مورد نظر است. موقعیت دقیق نقاط شبکه باید در چندین دوره توسط تکنیک‌های نقشه‌برداری زمینی، فضایی یا ترکیبی از هر دو اندازه‌گیری شود. در این شبکه‌ها سیستم مختصات باید بر روی نقاط مرجع تعریف گردد. از این رو باید در طول مدت زمان اندازه‌گیری پایدار باشند. ولی در یک شبکه نسبی تمام نقاط مورد نظر، ناپایدار در نظر گرفته می‌شوند. در این مورد جابجایی نسبی یا اعوجاجات سازه محاسبه می‌شوند. تجزیه و تحلیل ثابت نقاط مرجع مسئله مهمی در ارزیابی تغییر شکل است (Amiri-Simkooei, Alaei-Tabatabaei, Zangeneh-Nejad, & Voosoghi, 2016)

سدها، همانند سایر سازه‌های ساختمانی در معرض خطر هستند. ارزیابی خطر در سدها امری اجباری، مکرر و در عین حال کاری پیچیده و چالش برانگیز است. ارزیابی ایمنی سدها شامل بازرسی، کنترل ایمنی دوره‌ای، نگهداری برنامه‌ریزی شده و آماده سازی برای شرایط اضطراری است. برای ارزیابی ایمنی سدها روش‌های سنتی را با روش‌های نوین ادغام می‌کنند. بدین ترتیب با ادغام دانش مهندسی و ارزیابی اطلاعات محیطی، اطلاعات کنترل سازه حاصل می‌شود. این اطلاعات عبارتند از: حرکت آب در پشت سد، فشار آب، نفوذ مخزن، فعالیت لرزه‌ای محلی، فشار کلی، استرس، فشار داخلی و خارجی وارد بر دیواره‌ها، بتن داخلی و دمای محیط و میزان بارش (Jansen, 1980). این داده‌های فیزیکی به طور مرتب اندازه‌گیری و نظارت می‌شوند تا اطلاعات مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل رفتار سد و بررسی جابجایی‌ها حاصل شود. به عنوان مثال، با تحلیل حرکت پایین دست یک سد، می‌توان دریافت که آیا

برای کاهش تأثیر خطرات ناشی از عوامل طبیعی و انسانی مختلف بر سازه‌های مهندسی، نظارت و بازرسی دقیق و مداوم مورد نیاز است. رفتار سازه‌ها، تنش‌های وارد بر سازه و جابجایی نقاط مختلف آن باید به طور مداوم بررسی شوند. به این ترتیب می‌توان گفت، هدف از اندازه‌گیری‌ها در میکروژئودزی، بررسی تغییرات قابل اندازه‌گیری سازه‌ها است. در اندازه‌گیری سازه‌ها، تغییرات بسیار کوچک نیز حائز اهمیت هستند تا از پیامدهای اقتصادی فاجعه بار که ناشی از انباشت تغییرات کوچک جابجایی در بدنه‌ی سد است، اجتناب شود. هم‌چنین هرگونه هشدار اشتباه نیز باید به حداقل ممکن برسد. بنابراین تشخیص به موقع هر نوع فرآیند تأثیرگذار بر سلامت سد با قابلیت اطمینان بالا بسیار حائز اهمیت است.

محاسبه‌ی تغییرات در ساختار بدنه‌ی سازه، مثل فروپاشی غیرقابل پیش‌بینی سازه‌ها، لغزش و تنش از اهمیت بالایی برخوردار است. این اطلاعات معمولاً توسط مشاهدات به نقاط تعیین شده در بدنه سازه ارائه می‌شوند. با توجه به آن که رفتار یک شیء را می‌توان با تجزیه و تحلیل حرکت در طول زمان اندازه‌گیری کرد، با تحلیل رفتار این نقاط می‌توان رفتار سازه‌ها را در طی زمان پیش‌بینی نمود (Li, 2011).

یکی از کارکردهای مهم نقشه برداری و ژئودزی، نظارت بر تغییر شکل ساختارهای مهندسی و سطح پوسته زمین است. منطقه‌ی تحت بررسی معمولاً توسط یک شبکه کنترل ژئودزیکی نمایش داده می‌شود که در دو یا چند اپک زمانی اندازه‌گیری می‌شود و نتایج آن‌ها، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند (Nowel (2018), Pelzer (1971), W Niemeier (1981), Y.-q. Chen (1984), Caspary (1987)).

تغییر شکل را می‌توان از طریق شبکه‌ای از نقاط با استفاده از اندازه‌گیری‌های مکرر، در دو یا چند دوره زمانی به دست آورد. در این راستا این شبکه‌ها را می‌توان به دو نوع اصلی از شبکه‌های نظارتی تقسیم نمود: شبکه‌های مرجع (مطلق) و شبکه‌های نسبی. شناسایی نقاط پایدار و

سوم به پیاده سازی و ارزیابی نتایج حاصل از مشاهدات واقعی در سد جامیشان که بعنوان مورد مطالعه انتخاب شده است، پرداخته خواهد شد. همچنین روش بهینه برای یافتن جابجایی‌ها و نقاط ناپایدار در شبکه ژئودتیکی معرفی شده و در بخش پایانی، خلاصه و نتیجه‌گیری دستاوردهای این پژوهش بیان خواهد شد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق، در ابتدا با انجام سرشکنی قیود داخلی^۱، با فرض نسبی بودن شبکه‌ی ژئودتیکی مورد مطالعه، مختصات سرشکن شده در هر اپک زمانی، حاصل می‌شود. برای کشف نقاط ناپایدار در شبکه‌ی ژئودتیکی مورد مطالعه، ابتدا آزمون ثبات کلی، بر مختصات سرشکن شده، اعمال می‌شود که در صورت رد شدن آن وجود جابجایی در نقاط شبکه فرض می‌شود (Welsch, Heunecke, & Kuhlmann, 2000). برای یافتن نقاط ناپایدار در شبکه‌های ژئودتیکی از روش‌های تک نقطه‌ای و ترکیبی استفاده می‌شود. در روش‌های تک نقطه‌ای، روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی به عنوان روش بهینه در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق، روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی نیز بر روی داده‌های طول، زاویه و طول و زاویه در داده‌های شبیه سازی شده آزمایش شد تا در نهایت بین روش‌های تک نقطه و ترکیبی، روش بهینه بتواند انتخاب شود.

۲-۱- روش زیر نمونه چندگانه^۲

این روش نخستین بار توسط نیتزل ارائه شد (Neitzel, 2004). روش تحلیل کلاسیک حداقل مربعات مبتنی بر تک نقطه^۳ و تکنیک‌های برآورد پایدار^۴ به دلیل وابستگی بسیار به هندسه‌ی شبکه، نمی‌توانند جواب قابل اعتمادی داشته باشند. یکی از روش‌های برآورد مقاوم که از سایرین

به دلیل فشار بالای آب مخزن، حرکت یکنواخت در امتداد یا در جهت سد، توزیع شده است یا خیر. همچنین می‌توان افزایش، کاهش یا پایدار بودن این حرکت را ارزیابی نمود. (B. Chen, Gu, Bao, Wu, & Su, 2016; Kan & Taiebat, 2015; Manake & Kulkarni, 2002; Yavaşoğlu et al., 2018)

روند تجزیه و تحلیل تغییر شکل را می‌توان به سه مرحله تقسیم نمود: ۱. تست ثبات کلی برای تعیین جابجایی در اپک‌های زمانی که در آن تغییر شکل رخ می‌دهد ۲. یکسان سازی دیتوم دو اپک زمانی با استفاده از تبدیل S در صورت تفاوت بین سیستم مختصات دو اپک زمانی ۳. استفاده از روش‌های تک نقطه‌ای و ترکیبی برای یافتن نقاط پایدار و ناپایدار (Ebeling, 2014). در روش‌های تک نقطه‌ای، هر نقطه به تنهایی جهت کشف نقاط ناپایدار و جابجایی آن‌ها بررسی می‌شود که فرآیندی زمان‌بر بوده و به هندسه‌ی شبکه وابستگی زیادی دارد، در مقابل، روش‌های ترکیبی، به هندسه‌ی شبکه وابستگی کمتری دارند و نقاط را به شکل گروهی بررسی می‌کنند به این ترتیب روش‌هایی مثل روش حداکثر زیرنمونه، برای کشف نقاط ناپایدار پیشنهاد شدند (Neitzel, 2004).

تجزیه و تحلیل جابجایی‌ها به دو دسته‌ی روش‌های مقاوم و غیر مقاوم در برابر خطای مشاهدات تقسیم می‌شوند. این روش‌ها بر مبنای نتایج سرشکنی جداگانه در دو اپک زمانی استوار هستند (Baarda, 1981), (Nowel, 2015). از جمله‌ی روش‌های پایدار می‌توان به روش حداقل سازی نرم L1 و روش سرشکنی تکراری وزن‌دار دو اپک زمانی اشاره کرد که به ترتیب با حداقل سازی نرم اول و دوم بردار جابجایی بین دو اپک زمانی را محاسبه می‌کنند (Y.-q. Chen, 1984; Y. Chen, Chrzanowski, & Secord, 1990). در روش‌های غیر مقاوم، با استفاده از آزمون‌های آماری، نقاط ناپایدار در شبکه‌های ژئودتیکی تعیین می‌شوند، که شاخص‌ترین آن‌ها روش تست ثبات کلی است (Amiri-Simkooei et al., 2016; Fraser, 1985; Wolfgang Niemeier, 1979; Van Mierlo, 1978)

در بخش دوم این تحقیق، به ارائه‌ی جزئیات روش‌های مختلف در کشف نقاط ناپایدار، پرداخته می‌شود. در بخش

1- Inner-constraint

2- Multiple Sub Sample (MSS)

3- Classical least-squares-based single point analysis

4- Robust estimation techniques

در رابطه (۶)، $\bar{\sigma}_{dl_k}$ ماتریس انحراف معیار مجهولات، T متغیری که مقادیر آن از ۳ تا ۵ انتخاب می‌شود. اگر مقادیر T بسیار کوچک باشد، بعضی از زوایا در شرط معادله (۶)، بدلیل فرض $E\{dl_k\} = 0$ رد می‌شود و اگر مقادیر آن عدد بزرگی انتخاب شود، تعداد کمی از زوایا حذف می‌شوند. پس مقادیر فرضی برای T ، انتخاب می‌شود. هر مشاهده‌ای که در آزمون فوق رد شد به عنوان مشاهده ناپایدار در نظر گرفته می‌شود. در مرحله‌ی بعد، برای مشاهدات در حالت اولیه، قبل اعمال آزمون، و ثانویه، پس از حذف مشاهدات طولی رد شده، هیستوگرام با توجه به نقطه‌ی مبدا آن‌ها، تعیین می‌شود و می‌توان نقاط پایدار را بدون انجام مجدد سرشکنی بدست آورد. به این صورت که نقاطی که دارای مشاهده‌ی صفر هستند، یعنی مشاهدات آن‌ها در آزمون فوق رد شده‌اند، ناپایدار در نظر گرفته می‌شوند (Ebeling, 2014). پس از تعیین نقاط ناپایدار، سرشکنی با استفاده از حذف نقاط پایدار و تعیین جابجایی نقاط ناپایدار تکرار می‌شود. برای این منظور، ابتدا توسط روابط (۷) تا (۱۲)، تست ثبات کلی بر روی داده‌ها اعمال می‌شود تا وجود جابجایی در شبکه‌ی نقاط، بررسی شود. روند این تست، تا رد شدن آماره χ^2 (رابطه ۱۲) که از تابع توزیع فیشر پیروی می‌کند ادامه می‌یابد. نقاط پایدار و ناپایدار کشف و با سرشکنی مجدد نقاط، بدون در نظر گرفتن نقاط پایدار، مختصات ثانویه به دست آمده و جابجایی‌ها تعیین می‌شوند.

$$df = df_1 + df_2 \quad (7)$$

$$\hat{d} = \hat{x}_2 - \hat{x}_1 \quad Q_{\hat{d}} = Q_{\hat{x}_1} + Q_{\hat{x}_2} \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_1^2 = \frac{\hat{V}_1^T P_1 \hat{V}_1}{df_1} \quad \hat{\sigma}_2^2 = \frac{\hat{V}_2^T P_2 \hat{V}_2}{df_2} \quad (9)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(df_1 * \hat{\sigma}_1 + df_2 * \hat{\sigma}_2)}{df} \quad (10)$$

$$h = \text{rank}(Q_{\hat{d}}) \quad (11)$$

$$\omega = \frac{\hat{d}^T Q_{\hat{d}}^{-1} \hat{d}}{h * \hat{\sigma}^2} \quad (12)$$

در رابطه فوق df_1 درجه آزادی یک اول، df_2 درجه

برجسته است، روش جستجوی ترکیبی است که تمام مسائل مربوط به هندسه شبکه را حذف می‌کند (Wisniewski, 2009) در این روش از ماتریس طرح، مجهولات، مشاهدات و ماتریس واریانس کوواریانس مجهولات برای یافتن نقاط ناپایدار استفاده می‌شود (Liu, Wang, Wang, & Bauer, 2016).

۲-۱-۱- روش زیر نمونه چندگانه تفاضلات طولی

در این روش، با استفاده از ارزیابی تمامی طول‌های احتمالی موجود بین نقاط در دو اپک زمانی و مختصات سرشکن شده‌ی آن‌ها، نقاط ناپایدار کشف می‌شوند. برای مشاهدات هر یک از اپک‌ها، با استفاده از قانون انتشار خطاها در رابطه‌های (۲) و (۳)، ماتریس واریانس کوواریانس n_2 مشاهدات اپک اول محاسبه می‌شود سپس به کمک رابطه‌های (۴) و (۵)، تفاضل طول‌ها و ماتریس واریانس کوواریانس اپک دوم، محاسبه می‌شوند.

$$y = A_1 x \quad (1)$$

$$Q_{ll_1} = A_1^T Q_{xx_1} A_1 \quad (2)$$

$$Q_{ll_2} = A_2^T Q_{xx_2} A_2 \quad (3)$$

$$dl = l_2 - l_1 \quad (4)$$

$$Q_{ll} = Q_{ll_1} + Q_{ll_2} \quad (5)$$

در روابط بالا، u_1 تعداد مجهولات در اپک اول، n_1 تعداد مشاهدات در اپک اول، u_2 تعداد مجهولات در اپک دوم، n_2 تعداد مشاهدات در اپک دوم، A_1 ماتریس طرح در اپک اول با ابعاد $n_1 \times u_1$ ، A_2 ماتریس طرح در اپک دوم با ابعاد $n_2 \times u_2$ ، Q_{ll_1} ماتریس واریانس کوواریانس در اپک اول با ابعاد $u_1 \times u_1$ ، Q_{ll_2} ماتریس واریانس کوواریانس در اپک دوم با ابعاد $u_2 \times u_2$ ، l_1 ماتریس مشاهدات در اپک اول، l_2 ماتریس مشاهدات در اپک دوم، dl بردار تفاوت مشاهدات و Q_{ll} ماتریس واریانس کوواریانس مجموع خواهد بود. در این روش آزمون ارائه شده در رابطه (۶) جهت ارزیابی مشاهدات طولی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$|d_{l_k}| > T \cdot \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{Q_{dl_{kk}}} \quad (6)$$

می‌شوند. پس از سرشکنی نقاط با استفاده از روابط زیر مقادیر ماتریس F که ماتریس طرح در این روش است، محاسبه می‌شود. در عبارات زیر، برای محاسبه F_1 ، از مشاهدات نسبت به مجهولات مشتق گرفته می‌شود، رابطه (۱۳) و برای محاسبه F_2 ، از زوایای محاسباتی نسبت به مشاهدات مشتق گرفته می‌شود، رابطه (۱۴)، گرفته می‌شود. با ضرب این دو متغیر در هم، ماتریس طرح اصلی، F رابطه‌ی (۱۵) و ماتریس واریانس کوواریانس آن، رابطه (۱۶)، محاسبه می‌شوند.

$$y = F_1^T x \quad (13)$$

$$F_1 = \frac{\partial y}{\partial x}$$

$$F_2 = \frac{\partial \alpha}{\partial y} \quad \alpha = F_2^T y \quad (14)$$

$$F_{2p \times n} = F_{1_{2p \times 6n}} * F_{2_{6n \times n}} \quad (15)$$

$$Q_{\alpha \alpha_{n \times n}} = F_{n \times 2p}^T Q_{xx_{2p \times 2p}} F_{n \times 2p} \quad (16)$$

در روابط بالا، p مجموعه‌ی نقاط، y ماتریس مشاهدات با ابعاد $n \times 1$ ، x ماتریس مجهولات با ابعاد $2 \times p$ ، F ماتریس طرح، α زوایای محاسباتی، Q_{xx} ماتریس فاکتور واریانس مجهولات و $Q_{\alpha \alpha}$ ماتریس فاکتور واریانس زوایا هستند. مقادیر α و $Q_{\alpha \alpha}$ برای داده‌های هر یک زمانی محاسبه شده و تفاوت مقادیر آن‌ها با استفاده از آزمون زیر ارزیابی می‌شود. در این روابط، $Q_{\alpha \alpha}$ ماتریس واریانس کوواریانس مجموع مشاهدات با ابعاد $n \times n$ ، T متغیر که مقادیر آن از ۳ تا ۵ انتخاب می‌شود.

رابطه (۱۹)، آزمون این روش است که مقادیر هر یک از مشاهدات در آن مقایسه می‌شود و در نهایت مقادیر رد شده به عنوان مشاهده‌ی ناپایدار معرفی می‌شوند. بدین ترتیب همانند روش زیر نمونه چندگانه با تفاضل داده‌های طولی، در مرحله‌ی بعد، برای مشاهدات اولیه و مشاهدات ثانویه هیستوگرام تعیین می‌شود. در این حالت، نقاطی که مشاهده‌ی آن‌ها، صفر شده است یا درصد آنها نسبت به حالت قبل از ۵٪ تا ۱۰٪ کمتر باشند به عنوان نقاط ناپایدار در نظر گرفته

آزادی ایک دوم، df درجه آزادی مجموع، \bar{x}_1 مجهولات برآورد شده‌ی ایک اول، \bar{x}_2 مجهولات برآورد شده‌ی ایک دوم، \bar{d} جابجایی بین دو ایک، $Q_{\bar{x}_1}$ ماتریس واریانس کوواریانس مجهولات ایک اول با ابعاد $u_1 \times u_1$ ، $Q_{\bar{x}_2}$ ماتریس واریانس کوواریانس مجهولات ایک دوم با ابعاد $u_2 \times u_2$ ، $Q_{\bar{d}}$ ماتریس واریانس کوواریانس مجهولات مجموع (جابجایی)، \bar{V}_1 ماتریس باقی‌مانده‌ها در ایک اول با ابعاد $1 \times n_1$ ، P_1 ماتریس وزن ایک اول به ابعاد $n_1 \times n_1$ ، $\bar{\sigma}_1$ انحراف معیار ایک اول، \bar{V}_2 ماتریس باقی‌مانده‌های ایک دوم به ابعاد $1 \times n_2$ ، P_2 ماتریس وزن ایک دوم به ابعاد $n_2 \times n_2$ ، $\bar{\sigma}_2$ انحراف معیار ایک دوم، $\bar{\sigma}$ انحراف معیار مجموع، h رنک ماتریس واریانس کوواریانس مجموع و ω معیار برای تست ثبات کلی برای مقایسه با توزیع فیشر هستند.

۲-۱-۲- روش زیر نمونه چندگانه با داده‌های زاویه‌ی

حتی اگر درصد زیادی از نقاط در معرض تغییر شکل باشند، روش زیر نمونه چندگانه با داده‌های زاویه قابل اجرا است. از آنجایی که ضریب مقیاس مجهول است و فقط یک برآورد خطای تقریبی در دسترس است، تعداد نقاطی که امکان ناپایداری آن‌ها وجود دارد، زیاد است به گونه‌ای که ممکن است نقاط پایدار هم در میان آن‌ها موجود باشند. بنابراین به دلیل مجهول بودن ضریب مقیاس، لازم است که برای هر نقطه سرشکنی انجام شود تا با در اختیار داشتن ضریب مقیاس نتایج بهینه حاصل شوند. این امر سبب بالا رفتن حجم محاسبات نسبت به روش زیر نمونه چندگانه با نسبت داده‌های طولی می‌شود. اما اگر از زاویه به جای نسبت فاصله استفاده شود، در عین حال می‌توان به بررسی مستقیم تفاوت‌های زاویه‌ای بین اپک‌های زمانی پرداخت و هم از ضریب مقیاس استفاده نکرد که سبب کاهش حجم محاسبات و کارآمدی بیشتر آن خواهد شد. در این روش با استفاده از داده‌های زاویه یا امتداد، نقاط ناپایدار کشف

کشف نقاط ناپایدار تأثیر زیادی بگذارد. بنابراین، تخمین دقیق جابجایی‌های نقاط PRPs، کار بسیار دشواری است. بدین ترتیب، رویکرد جدیدی برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل از جمله شناسایی PRP های پایدار ارائه شد. بعلاوه، روش S-transformation در هنگامی که تعداد PRP های ناپایدار از تعداد نقاط پایدار بیشتر باشد، نتیجه‌ی مناسبی را ارائه نمی‌دهد. در این روش، پس از انجام سرشکنی اولیه، مختصات برآورد شده مجهولات در دو اپک به دست می‌آیند و با تفاضل آنها از هم، جابجایی بین دو اپک محاسبه می‌شود. با استفاده از مقادیر جابجایی بدست آمده، در نهایت مقادیر با یک آزمون کلی ارزیابی می‌شوند. بدین ترتیب، با استفاده از مقادیر جابجایی و روابط (۲۰) تا (۲۳)، ماتریس‌های وزن محاسبه می‌شوند و در رابطه‌ی (۲۶) وجود جابجایی در کل شبکه بررسی می‌شود که در صورت رد آن از آزمون (۲۷) که پایداری هر یک از نقاط را بررسی می‌کند، استفاده می‌شود. در صورت رد معادله‌ی (۲۷) در هر یک از نقاط، آن نقطه به عنوان ناپایدار در نظر گرفته می‌شود و مقادیر آن در سرشکنی ثانویه حذف می‌شود. این روند تا زمان قبول شدن آزمون یا کشف تمام نقاط ناپایدار ادامه می‌یابد.

$$W_k^1 = \text{diag}((\hat{d}_{1(2)}^{k-1})^2 \dots (\hat{d}_{u(2)}^{k-1})^2) \quad (20)$$

$$\hat{d}_1^k = (I - H(H^T W_{(1)}^k H)^{-1} H^T W_{(1)}^k) \Delta \hat{x} \quad (21)$$

$$W_k^2 = \text{diag}((\hat{d}_{1(1)}^k)^2 \dots (\hat{d}_{u(1)}^k)^2) \quad (22)$$

$$\hat{d}_2^k = (I - H(H^T W_{(2)}^k H)^{-1} H^T W_{(2)}^k) \Delta \hat{x} \quad (23)$$

$$r = \text{rank}(Q_{\hat{d}}) \quad (24)$$

$$Q_{\hat{d}}^+ = (Q_{\hat{d}} + HH^T)^{-1} Q_{\hat{d}} (Q_{\hat{d}} + HH^T)^{-1} \quad (25)$$

$$T = \frac{\hat{d}^T Q_{\hat{d}}^+ \hat{d}}{r \sigma_0^2} < F(r, df) \quad (26)$$

$$T_{i(j)} = \frac{\hat{d}_{i(j)}^T Q_{\hat{d}_{i(j)}}^{-1} \hat{d}_{i(j)}}{r_i \sigma_0^2} < F(r_i, df) \quad (27)$$

در معادلات ۲۰ تا ۲۷، \hat{d} جابجایی ثانویه با ابعاد مجهولات $u \times u$ ، $Q_{\hat{d}}$ ماتریس واریانس کواریانس جابجایی‌های ثانویه، W ماتریس وزن با ابعاد مشاهدات

می‌شوند و پس از آن سرشکنی ثانویه با حذف آن‌ها ادامه می‌یابد روند این تست، تا رد شدن آماره χ^2 (رابطه ۱۲) که از تابع توزیع فیشر پیروی می‌کند ادامه می‌یابد (Ebeling, 2014).

$$d\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (17)$$

$$Q_{d\alpha} = Q_{\alpha\alpha_1} + Q_{\alpha\alpha_2} \quad (18)$$

$$|d_{\alpha_k}| > T \cdot \bar{\sigma}_0 \cdot \sqrt{Q_{d\alpha_{kk}}} \quad (19)$$

۲-۲- روش M-split

نخستین بار ویسنویکی این روش را مبنی بر روش M-estimation ارائه کرد (Wisniewski, 2009, 2010). این روش بر اساس M-estimation که می‌تواند به عنوان یک تعمیم حداکثر برآورد باشد، استوار است. این روش پس از چند سال، به سرعت توسعه یافت (Huber). با این حال، مشخص شده است که اگر وزن مشاهدات متفاوت باشند، روش مقاوم، کارایی خود را از دست می‌دهد (Hampel, Ronchetti, Rousseeuw, & Stahel, 2011).

(Hampel et al., 2011) بر اساس آن، یک نمونه‌ی تصادفی، می‌تواند مخلوط ناپایداری از مشاهدات باشد. برای مثال، بهینه‌ترین مقدار بین مشاهدات اندازه‌گیری شده از یک طول مشخص، میانگین این مشاهدات است. ولی اگر این مشاهدات حاوی مقادیری با تفاوت‌های فراوان باشند، میانگین نمی‌تواند نتیجه‌ی مطلوبی را ارائه دهد. برآورد M-estimation مقاوم، با تقسیم داده‌ها، با هر کدام مطابق با میزان فراوانی و وزنشان برخورد می‌کند. در یک برآورد همزمان، هر مشاهده‌ای، از وزن خودش استفاده می‌کند و این سبب افزایش کارایی و عدم تأثیر مشاهدات بر جواب نهایی می‌شود (Hampel et al., 2011; Huber).

شناسایی نقاط مرجع پتانسیل پایدار، مهمترین مرحله محاسبات در تجزیه و تحلیل تغییر شکل، در شبکه‌های کنترل ژئودتیکی است. تطابق مناسب دو شبکه سرشکنی شده در نقاط مرجع پایدار، نقش اساسی را در این کار دارد. متأسفانه، شبکه‌های کنترل ژئودزیک همواره از تعیین دیتوم بین اپک‌های مشاهداتی، رنج می‌برند و این می‌تواند در

1- Maximum likelihood estimation

2- Potential Reference Points (PRPs)

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{e}_A^T Q_y^{-1} e_A}{df_A} \quad (34)$$

$$T_y = \frac{\hat{e}_0^2 Q_y^{-1} \hat{e}_0^2 - \hat{e}_a^2 Q_y^{-1} \hat{e}_a^2}{r_A \hat{\sigma}_0^2} \leq F(r_A, df_A) \quad (35)$$

در روابط فوق، y_1 مشاهدات اپیک اول، y_2 مشاهدات اپیک دوم، A_1 ماتریس طرح اپیک اول، A_2 ماتریس طرح اپیک دوم، $A_{2,0}$ ماتریس طرح اپیک دوم در فرض H_0 با استفاده از مشاهدات پایدار، $A_{2,a}$ ماتریس طرح اپیک دوم در فرض H_a با استفاده از مشاهدات ناپایدار، x بردار مجهولات، d_0 جابجایی‌های نقاط پایدار، d_a جابجایی‌های نقاط ناپایدار، e_0 ماتریس خطاها در فرض H_0 ، e_a ماتریس خطاها در فرض H_a و B ماتریس طرح در فرض H_a هستند. روش M-split در سه حالت با داده‌های زاویه، طول به صورت جداگانه و طول و زاویه به شکل همزمان بررسی می‌شود (Nowel 2018).

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از روش‌های مختلف پرداخته می‌شود، بدین منظور از دو دسته داده شامل داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده مربوط به سد جامیشان، استفاده می‌شود.

۳-۱- داده‌های شبیه‌سازی

به منظور بررسی عملکرد روش‌های پیشنهادی، ابتدا از داده‌های شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود. شبکه‌ی نقاط شامل ۱۳ ایستگاه به شکل زیر است. مشاهدات در اپیک دوم به صورت شبیه‌سازی جابجا شده‌اند تا جابجایی معناداری بین دو اپیک مشاهده شود. در نهایت برای پیدا کردن مختصات نقاط در دو اپیک، سرشکنی توسط روش قیود داخلی صورت گرفت و نتایج در سطح معنی‌دار ۰،۰۵، در آزمون فاکتور واریانس ثانویه قبول شدند. در این مرحله برای یافتن روش بهینه بین روش‌های تک نقطه‌ای و ترکیبی، روش سرشکنی همزمان دو اپیک زمانی با روش‌های ترکیبی، مقایسه شده است.

$n \times n$ ، H ماتریس دیتوم، $\Delta \hat{x}$ بردار جابجایی با ابعاد u ، I ماتریس همبستگی به ابعاد مجهولات، T آزمون کلی، $T_{i(j)}$ آزمون برای تک تک نقاط و F توزیع فیشر هستند. در این روش دو فرض حذف مطرح است:

در فرض صفر (H_0)، فرض بر آن است که نقاطی که در آزمون قبول می‌شوند، پایدارند. در فرض H_a ، علاوه بر نقاطی که قبول نمی‌شوند، در میان نقاطی که در آزمون قبول می‌شوند نیز احتمال وجود نقاط ناپایداری هست. در نهایت، با استفاده از رابطه‌ی (۳۵)، وجود جابجایی بررسی می‌شود. در صورت بزرگتر بودن T_y از تابع توزیع فیشر، روند روابط (۲۰) تا (۳۵) تکرار می‌شود. در این روش، مشاهدات دو اپیک زمانی در یک ماتریس طرح مطابق رابطه‌ی (۲۸) و (۲۹) قرار می‌گیرند. با استفاده از فرض‌های H_0 و H_a ، ماتریس طرح محاسبه خواهد شد. با استفاده از روابط (۳۱) و (۳۲)، پایداری نقاط در رابطه (۳۵) بررسی می‌شود که در صورت رد آن، روابط (۲۸) تا (۳۵)، تا زمان قبول رابطه‌ی (۳۵)، تکرار خواهد شد.

$$H_0: E\left(\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ A_2 & A_{2,0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ d_0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$H_a: E\left(\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ A_2 & A_{2,0} & A_{2,a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ d_0 \\ d_a \end{bmatrix} \quad (29)$$

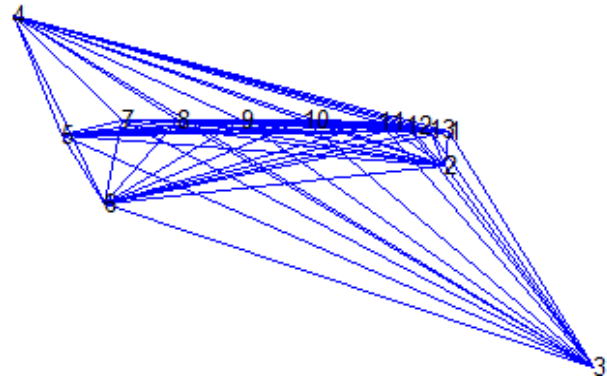
$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$e_0 = y - \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ A_2 & A_{2,0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ d_0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$e_a = y - \underbrace{\begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ A_2 & A_{2,0} & A_{2,a} \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} x \\ d_0 \\ d_a \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$r_A = n - \text{rank}(B) \quad (33)$$

۳-۱-۱- مرحله‌ی اول: جابجایی شبیه‌سازی شده در حد میلیمتر به نقاط ۷ تا ۱۳، اعمال می‌شود. در این مرحله، جابجایی مفروض بر نقاط شبکه‌ی ژئودتیک به شکل جدول ۲ است. نتایج کشف نقاط ناپایدار در حالت اول به شرح ذیل است. جدول ۲: تغییرات شبیه‌سازی مختصات نقاط در مرحله‌ی اول

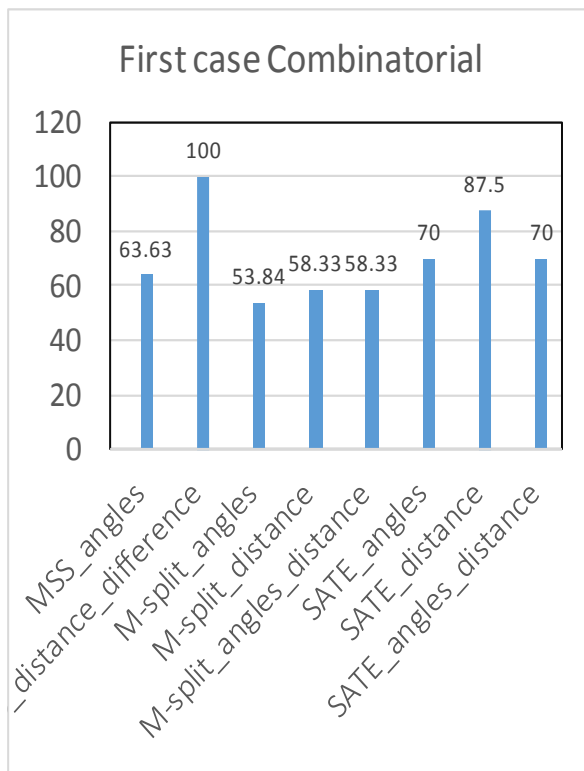


نگاره ۱: شبکه‌ی نقاط داده‌های شبیه‌سازی شده مختصات UTM در زون ۳۹، نقاط شبکه شبیه‌سازی شده در جدول (۱) ارائه شده است.

شماره نقطه	Direction (degree)	$\Delta N(m)$	$\Delta E(m)$
B1(7)	0.38051	0.004	0.01
B2(8)	1.0122	0.008	0.005
B3(9)	1.893	0.012	-0.004
B4(10)	-0.7854	-0.01	0.01
S1(11)	-1.0308	-0.005	0.003
S2(12)	-0.9273	-0.008	0.006
S3(13)	2.4981	0.003	-0.004

جدول ۱: مختصات نقاط شبیه‌سازی شده

شماره نقطه	E(m)	N(m)
1	724964.242	3843981.783
2	724961.699	3843942.883
3	725079.925	3843712.792
4	724615.597	3844116.288
5	724654.827	3843977.579
6	724688.462	3843899.777
7	724703.033	3843994.819
8	724748.234	3843995.133
9	724798.204	3843995.587
10	724848.678	3843995.956
11	724909.593	3843993.592
12	724929.737	3843989.761
13	724949.792	3843985.623



نگاره ۲: بررسی درصد موفقیت روش‌های مختلف در مرحله‌ی اول

کارآیی روش‌های مختلف در کشف نقاط پایدار در شبکه شبیه‌سازی شده، در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای تغییر نقاط به شکل شبیه‌سازی، به هر یک از آنها مقادیر شبیه‌سازی شده‌ای جابجایی طی سه مرحله اعمال می‌شود. روشی که بر روی این داده‌ها به عنوان روش بهینه حاصل خواهد شد، بر روی داده‌های واقعی ارزیابی خواهد شد.

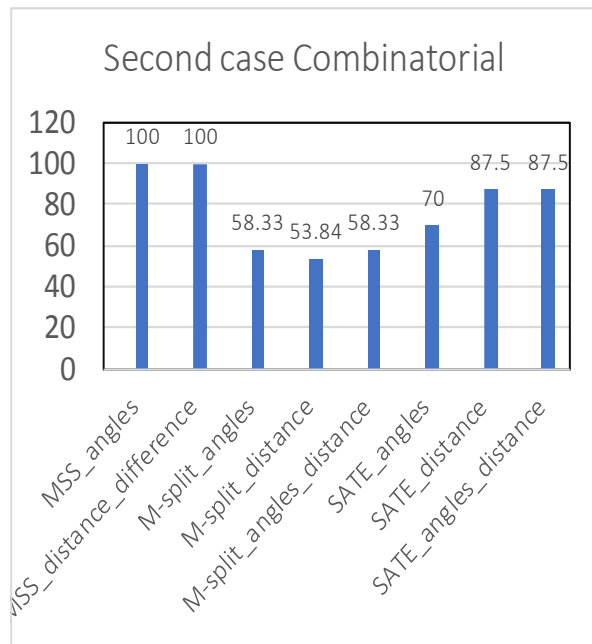
جدول ۳: نتایج حالت اول

7, 8, 9, 10	7, 8, 9	7, 8	7	نقاط جایجا شده روش
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	7, 8, 9, 10	3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	MSS_angle
10, 9, 8, 7	9, 8, 7	8, 7	7	MSS_distance_difference
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	4, 5, 6, 7, 8, 9	7	M_split_angles
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	7	M_split_distance
4, 5, 7, 8, 9, 10	4, 7, 8, 9, 10, 11	7, 8	7	M_split
7, 8, 9, 10	7, 8, 9	7, 8	7	SATE_distance
7, 8, 9, 10	7, 8, 9	7, 8	7	SATE_angle
7, 8, 9, 10	7, 8, 9	7, 8	7	SATE
7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	7, 8, 9, 10, 11, 12	7, 8, 9, 10, 11		نقاط جایجا شده روش
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13		MSS_angle
7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	7, 8, 9, 10, 11, 12	7, 8, 9, 10, 11		MSS_distance_difference
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13		M_split_angles
10, 12, 13, 9, 8, 11, 7, 4	10, 12, 9, 8, 11, 7	10, 9, 8, 11, 7		M_split_distance
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13		M_split
7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	7, 8, 9, 10, 12	7, 8, 9, 10, 11		SATE_distance
7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	7, 8, 9, 10, 11, 12	7, 8, 9, 10, 11		SATE_angle
7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	7, 8, 9, 10, 11, 12	7, 8, 9, 10, 11		SATE

همانطور که مشاهده می‌شود، روش زیر نمونه چندگانه با تفاضل داده‌های طولی، به دلیل وابستگی حداقلی به هندسه‌ی شبکه، دارای بالاترین درصد کشف نقاط ناپایدار است.

نقاط ناپایدار استفاده می‌کند. سرشکنی همزمان دو اپک زمانی، که جزء روش‌های تک نقطه‌ای است، در رده‌ی دوم قرار می‌گیرد. سرشکنی نهایی نقاط با فرض ناپایداری نقاط ۷ تا ۱۳، در جدول ۴ قابل مشاهده است.

این روش، از تفاوت مقادیر مشاهدات طولی، در تعیین



نگاره ۳: بررسی درصد موفقیت روش‌های مختلف در مرحله دوم

جدول ۶: نتایج سرشکنی همزمان نقاط در حالت دوم

سرشکنی همزمان			
ΔE(m)	ΔN(m)	Azimuth(degree)	شماره نقطه
0.0069	0.002	0.278	7
0.0049	0.001	0.1974	8
-0.0039	0.001	2.897	9
0.009	-0.0049	-0.5071	10
0.0009	-0.005	-1.376	11
0.0059	-0.001	-0.1652	12
-0.004	0.0029	2.4981	13

۳-۱-۳- مرحله سوم: جابجایی شبیه سازی شده در حد دهم میلیمتر به نقاط ۷ تا ۱۳، اعمال می‌شود. در مرحله بعد، جابجایی نقاط کوچک‌تر و در حد میلی‌متر، در نظر گرفته می‌شود تا مشخص شود که کدام روش با دقت بالاتری، نقاط ناپایدار را کشف می‌کند.

جدول ۴: نتایج سرشکنی همزمان در مرحله اول

سرشکنی همزمان			
ΔE(m)	ΔN(m)	Azimuth(degree)	Point
0.01	0.004	0.380506	7
0.0049	0.008	1.012197	8
-0.0039	0.012	1.8925	9
0.01	-0.010	-0.78539	10
0.0029	-0.005	-1.030376	11
0.0059	-0.008	-0.927295	12
-0.004	0.0029	2.498091	13

۳-۱-۲- مرحله دوم: جابجایی شبیه‌سازی شده در حد دهم میلیمتر به نقاط ۷ تا ۱۳، اعمال می‌شود. در این مرحله با کوچکتر کردن جابجایی نقاط، مطابق با جدول ۵، با استفاده از مرحله اول، روش بهینه انتخاب می‌شود.

جدول ۵: تغییرات شبیه‌سازی مختصات نقاط در مرحله دوم

ΔE(m)	ΔN(m)	Azimuth (degree)	شماره نقطه
0.007	0.002	0.278	B1(7)
0.005	0.01	0.1974	B2(8)
-0.004	0.01	2.897	B3(9)
0.009	-0.005	-0.5071	B4(10)
0.01	-0.005	-1.373	S1(11)
0.006	-0.001	-0.165	S2(12)
-0.004	0.003	2.4981	S3(13)

با کوچکتر کردن مقادیر اختیاری جابجایی در مراحل دو و سه، درصد موفقیت روش M-split در کشف نقاط ناپایدار افزایش می‌یابد. روش زیرنمونه چندگانه دارای بهترین عملکرد بوده و توانسته است تمامی نقاط ناپایدار را تشخیص دهد. هم‌چنین، روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی با وجود آنکه یک روش تک نقطه‌ای است، کارایی بالایی در کشف نقاط ناپایدار تا آخرین مرحله داشت.

جدول ۸: نتایج سرشکنی همزمان در مرحله سوم

سرشکنی همزمان			
شماره نقطه	Azimuth (degree)	$\Delta N(m)$	$\Delta E(m)$
7	0.1419	9.9e-05	0.0007
8	1.012	0.0008	0.00049
9	3.116	0.00012	-0.0039
10	-0.785	-9.9e-05	0.0001
11	-0.6202	-0.00049	0.00069
12	-0.1326	-0.0008	0.0059
13	2.92	0.00089	-0.004

با توجه به نمودارهای فوق می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های تک نقطه‌ای مانند سرشکنی همزمان دو اپک زمانی، همواره دارای درصد بالایی در کشف نقاط ناپایدار هستند. روش زیر نمونه چندگانه با تفاضل داده‌های طولی، می‌تواند تمامی نقاط ناپایدار را شناسایی کند، به همین دلیل به عنوان روش بهینه بین روش‌های چندنقطه‌ای، انتخاب می‌شود.

۲-۳- پیاده‌سازی نتایج با استفاده از داده‌های واقعی

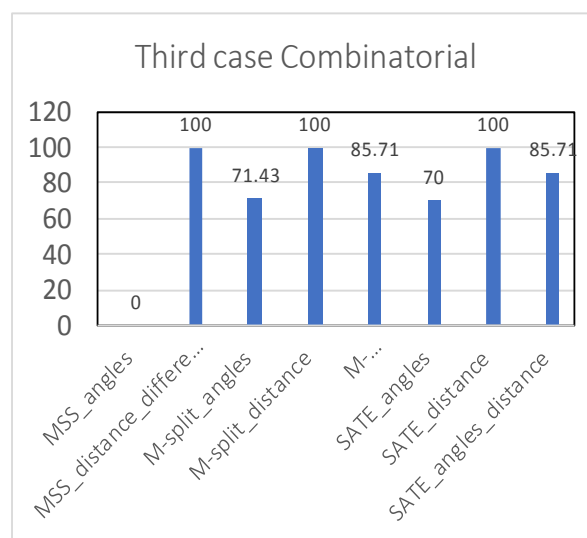
پس از انتخاب روش بهینه با استفاده از مشاهدات شبیه‌سازی شده، از روش زیرنمونه چندگانه با داده‌های طولی که دارای بیشترین درصد موفقیت در کشف نقاط ناپایدار است استفاده می‌شود و بر روی مشاهدات واقعی مورد ارزیابی و پیاده‌سازی قرار می‌گیرد. نگاره (۵) شبکه نقاط بر روی سد را نشان می‌دهد.

۲-۳-۱- نتایج حاصل از شبکه‌ی خارجی بین نقاط

ابتدا شبکه‌ی خارجی بین نقاط، شامل ۸ نقطه، در نظر گرفته می‌شود، روش‌های مختلف جهت کشف نقاط ناپایدار، بر روی مشاهدات اعمال می‌شود. با مقایسه‌ی روش‌های مختلف در کشف نقاط ناپایدار، روش بهینه مشخص می‌شود. داده‌ی مختصات نقاط در شبکه‌ی ژئودتیکی سد به شرح ذیل است. این شبکه شامل ۸ نقطه می‌باشد.

جدول ۷: تغییرات مختصات شبیه‌سازی نقاط در مرحله سوم

شماره نقطه	Azimuth(degree)	$\Delta N(m)$	$\Delta E(m)$
B1(7)	0.1419	-0.001	0.007
B2(8)	1.012	0.008	0.005
B3(9)	3.1116	0.001	-0.004
B4(10)	-0.785	-0.001	0.001
S1(11)	-0.6203	-0.0005	0.0007
S2(12)	-0.1326	-0.0008	0.006
S3(13)	2.920	0.0009	-0.004



نگاره ۴: بررسی درصد موفقیت روش‌های مختلف در

حالت سوم

در آخرین مرحله، مشاهده می‌شود که روش زیر نمونه چندگانه با داده‌های طولی، همواره توانسته است تمامی نقاط ناپایدار را شناسایی کند. درصد موفقیت روش M-split در کشف نقاط ناپایدار، با کاهش مقادیر جابجایی، بهبود می‌یابد. زیرا این روش از بردار جابجایی برای محاسبه‌ی ماتریس وزن مجهولات استفاده می‌کند و با کوچکتر شده مقادیر جابجایی، کارایی آن افزایش می‌یابد. روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی، در رده‌ی دوم قرار می‌گیرد. این روش، از روش M-split کاراتر عمل کرده است.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر)
 ارزیابی رویکردهای ترکیبی برای تعریف دیتوم ... / ۳۳

۳-۲-۲-۲- روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی

جدول ۱۶: جدول نهایی نقاط پایدار و ناپایدار با استفاده از روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی

stable	unstable
1,2,3	4,5,6,7,8,9,10,11,12,13

نتایج مشاهدات فوق با استفاده از دو روش بهینه تک نقطه‌ای و ترکیبی را نشان می‌دهد. با انجام سرشکنی همزمان بر روی نتایج دو اپک زمانی، جابجایی، قابل محاسبه خواهد بود.

در جداول ذیل، جابجایی هر یک از نقاط در راستای N (شمال)، E (شرق) و آزیموت آن‌ها، قابل مشاهده است. همچنین مشاهده می‌شود که روش بهینه‌ی حداقل زیرنمونه تفاضلات طولی، توانست درصد بیشتری از نقاط ناپایدار را کشف کند.

جدول ۱۷: جدول نهایی روش زیرنمونه‌ی چندگانه با داده‌های طولی

سرشکنی همزمان روش زیرنمونه چندگانه با داده‌های طولی			
شماره نقطه	Azimuth (degree)	$\Delta N(m)$	$\Delta E(m)$
1	0.467	0.0002	0.0004
2	-2.897	-9.9e-05	-0.0004
3	-2.467	-0.0004	-0.00049
4	-2.554	-0.0002	-0.00029
5	-1.0304	-0.00049	0.0003
6	-2.159	-0.00029	-0.0002
7	-1.777	-0.00026	-5.42e-05
8	-2.975	-0.00059	-0.00349
9	2.426	0.00657	-0.00756
10	1.962	0.01057	-0.0044
11	1.323	0.0122	0.0031
12	1.0561	0.00554	0.00314
13	-0.678	-0.0002	0.000259

جدول ۱۳: مختصات نقاط اپک اول در شبکه‌ی داخلی سد

جامیشان

شماره نقطه	E(m)	N(m)
1	724964.239	3843981.780
2	724961.697	3843942.880
3	725079.924	3843712.794
4	724615.600	3844116.288
5	724654.828	3843977.581
6	724688.462	3843899.777
7	724703.033	3843994.819
8	724748.234	3843995.133
9	724798.204	3843995.587
10	724848.678	3843995.956
11	724909.593	3843993.592
12	724929.737	3843989.761
13	724949.792	3843985.623

جدول ۱۴: مختصات نقاط اپک دوم در شبکه‌ی داخلی سد

جامیشان

شماره نقطه	E(m)	N(m)
1	724964.2394	3843981.7802
2	724961.6966	3843942.8799
3	725079.9235	3843712.7936
4	724615.5997	3844116.2878
5	724654.8283	3843977.5805
6	724688.4618	3843899.7767
7	724703.0330	3843994.8190
8	724748.2340	3843995.1330
9	724798.2040	3843995.5870
10	724848.6780	3843995.9560
11	724909.5930	3843993.5920
12	724929.7370	3843989.7610
13	724949.7920	3843985.6230

۳-۲-۲-۱- روش زیرنمونه چندگانه تفاضلات طولی

جدول ۱۵: جدول نهایی نقاط پایدار و ناپایدار با استفاده از روش ماکزیمم زیرنمونه با داده‌های طولی

stable	unstable
1,2,3,4,5,6	7,8,9,10,11,12,13

جدول ۱۸: جدول نهایی روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی

سرشکنی همزمان روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی			
شماره نقطه	Azimuth (degree)	$\Delta N(m)$	$\Delta E(m)$
1	0.464	0.0002	0.0004
2	-2.897	-9.99e-05	-0.0004
3	-2.467	-0.0004	-0.00049
4	2.962	0.0023	-0.0126
5	-2.951	-0.001	-0.0074
6	-2.801	-0.002	-0.0068
7	-1.659	-0.0052	-0.00046
8	-2.1092	-0.007	-0.0042
9	-2.447	-0.00685	-0.0082
10	-2.665	-0.002796	-0.0054
11	0.943	0.00122	0.00088
12	1.539	0.0023	8.48e-05
13	1.673	0.0046	-0.00043

تجزیه و تحلیل جابجایی‌ها در ژئودزی با کمک روش‌های مقاوم و غیرمقاوم انجام می‌شود (Y.-q. Chen, 1984). از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به روش حداقل سازی نرم L1 و آزمون همزمان تکرار وزنی اشاره کرد که با حداقل سازی نرم اول و دوم ماتریس جابجایی بین دو اپک زمانی را محاسبه می‌کند. همچنین بسیاری از روش‌های جدید دیگر مثل روش M-split وجود دارد که بر این اساس روش پایدار هستند.

در روش‌های غیرمقاوم، با استفاده از آزمون‌های آماری، نقاط ناپایدار در شبکه‌های ژئودتیکی تعیین می‌شوند که شاخص‌ترین آن‌ها روش تست ثبات کلی است (Amiri-Simkooei et al., 2016; Fraser, 1985; Wolfgang Niemeier, 1979)

با توجه به نتایج بخش سوم، روش زیرنمونه چندگانه تفاضلات طولی که از جمله روش‌های ترکیبی است، دارای بیشترین درصد موفقیت است و در زمانی که داده‌ها دارای جابجایی بسیار کوچک هستند، توانایی کشف نقاط ناپایدار را در مشاهدات طولی داراست. بدین سبب، اگر نقاط ۷ تا ۱۳ را در بین نقاط شبیه‌سازی شده، بعنوان نقاط ناپایدار فرضی در نظر بگیریم، طبق نمودارهای ۲، ۳ و ۴، روش زیرنمونه چندگانه با تفاضلات داده‌های طولی، با درصد ۱۰۰ به ۷۰، ۱۰۰ به ۸۷،۵ و ۱۰۰ به ۸۷،۵ در مقابل روش سرشکنی همزمان دو اپک زمانی، توانست موفقیت بهتری را بدست آورد و به عنوان روش بهینه انتخاب شد. همچنین مشاهده می‌شود که روش بهینه‌ی حداقل زیرنمونه تفاضلات طولی، توانست درصد بیشتری از نقاط ناپایدار را در داده‌های واقعی سد، کشف کند.

منابع و مأخذ

- Amiri-Simkooei, A., Alaei-Tabatabaei, S., Zangeneh-Nejad, F., & Voosoghi, B. (2016). Stability analysis of deformation-monitoring network points using simultaneous observation adjustment of two epochs. *Journal of Surveying Engineering*, 143(1), 04016020.
- Baarda, W. (1981). S-Transformations and criterion matrices, vol 5 of Publications on Geodesy, New Series. Netherlands Geodetic Commission, Delft, 2.

۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

مراحل کشف جابجایی را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد: ۱. آزمون ثبات کلی، ۲. محلی سازی جابه‌جایی نقاط و تبدیل دیتوم و ۳. کشف جابجایی.

مشکل اصلی روش‌های تک نقطه‌ای آن است که تنها یک نقطه را در محاسبات ناپایدار در نظر گرفته، درحالی که سایر نقاط را پایدار فرض می‌کنند. این امر می‌تواند در تعیین درست تمامی نقاط ناپایدار مؤثر باشد. برای جلوگیری از اشتباهات، از روش‌های ترکیبی که به هندسه‌ی شبکه وابسته نبوده و همه‌ی نقاط را به شکل همزمان برآورد می‌کنند، استفاده می‌شود (Kan & Taiebat, 2015). از جمله این روش‌ها می‌توان به روش زیر نمونه چندگانه با داده‌های زاویه‌ای و روش زیر نمونه چندگانه با داده‌های طولی اشاره کرد. سپس با استفاده از روابط توپولوژیکی بین فاصله‌های باقی‌مانده به راحتی و به سرعت می‌توان نقاط ناپایدار در شبکه را یافت. معیار تشخیص جابجایی نقاط، تست ثبات کلی است

(Ebeling, 2014)

Vermessungswesen d. Univ.

19. Niemeier, W. (1981). Statistical tests for detecting movements in repeatedly measured geodetic networks. *Developments in Geotectonics* (Vol. 16, pp. 335-351): Elsevier.

20. Nowel, K. (2015). Robust M-estimation in analysis of control network deformations: Classical and new method. *Journal of Surveying Engineering*, 141(4), 04015002.

21. Nowel, K. (2018). Squared M split (q) S-transformation of control network deformations. *Journal of geodesy*, 1-20.

22. Nowel, K., & Kamiński, W. (2014). Robust estimation of deformation from observation differences for free control networks. *Journal of geodesy*, 88(8), 749-764.

23. Pelzer, H. (1971). *Zur Analyse geodätischer Deformations-messungen*. Munchen, Verlag der Bayer. Akad. d. Wiss; Munchen, Beck [in Komm.] 1971., 164.

24. Teunissen, P. (1985). Zero order design: generalized inverses, adjustment, the datum problem and S-transformations Optimization and design of geodetic networks (pp. 11-55): Springer.

25. Van Mierlo, J. (1978). A testing procedure for analysing geodetic deformation measurements. Paper presented at the Proceedings of the 2nd FIG Symposium on Deformation Measurements by Geodetic Methods. Bonn, Germany.

26. Welsch, W., Heunecke, O., & Kuhlmann, H. (2000). *Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Grundlagen, Methoden, Modelle*. Ein Band der Reihe: Möser, Müller, Schlemmer, Werner (Hrsg.): *Handbuch Ingenieurgeodäsie*, H: Wichmann Verlag, Heidelberg.

27. Wiśniewski, Z. (2009). Estimation of parameters in a split functional model of geodetic observations (M split estimation). *Journal of geodesy*, 83(2), 105-120.

28. Wiśniewski, Z. (2010). M split (q) estimation: estimation of parameters in a multi split functional model of geodetic observations. *Journal of geodesy*, 84(6), 355-372.

29. Xu, P. (2005). Sign-constrained robust least squares, subjective breakdown point and the effect of weights of observations on robustness. *Journal of geodesy*, 79(1-3), 146-159.

30. Yavaşoğlu, H., Kalkan, Y., Tiryakioğlu, İ., Yigit, C., Özbey, V., Alkan, M., . . . Alkan, R. (2018). Monitoring the deformation and strain analysis on the Ataturk Dam, Turkey. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 94-107.

3. Caspary, W. (1987). *Concepts of network and deformation analysis*: [sn].

4. Chen, B., Gu, C., Bao, T., Wu, B., & Su, H. (2016). Failure analysis method of concrete arch dam based on elastic strain energy criterion. *Engineering failure analysis*, 60, 363-373.

5. Chen, Y.-q. (1984). *ANALYSIS OF DEFORMATION SURVEYS-A GENERALIZED METHOD*.

6. Chen, Y., Chrzanowski, A., & Secord, J. (1990). A strategy for the analysis of the stability of reference points in deformation surveys. *CISM Journal*, 44(2), 39-46.

7. Cooper, M. A. R. (1987). *Control surveys in civil engineering*: Nichols Pub Co.

8. Ebeling, A. (2014). *Ground-Based Deformation Monitoring*. University of Calgary.

9. Fraser, C. (1985). The analysis of photogrammetric deformation measurements on Turtle Mountain. *PE&RS*, 51(2), 207-216.

10. Hampel, F. R., Ronchetti, E. M., Rousseeuw, P. J., & Stahel, W. A. (2011). *Robust statistics: the approach based on influence functions* (Vol. 196): John Wiley & Sons.

11. Huber, P. J. *Robust statistics*. 1981: Wiley, New York.

12. Jansen, R. B. (1980). *Dams and public safety*. Available from U. S. Government Printing Office, Washington D. C. 20402 Stock(024-003).

13. Kan, M. E., & Taiebat, H. A. (2015). Application of advanced bounding surface plasticity model in static and seismic analyses of Zipingpu Dam. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(3), 455-471.

14. Li, L. (2011). Separability of deformations and measurement noises of gps time series with modified kalman filter for landslide monitoring in real-time. *Universitäts-und Landesbibliothek Bonn*.

15. Liu, S.-h., Wang, L.-j., Wang, Z.-j., & Bauer, E. (2016). Numerical stress-deformation analysis of cut-off wall in clay-core rockfill dam on thick overburden. *Water Science and Engineering*, 9(3), 219-226.

16. Manake, A., & Kulkarni, M. N. (2002). Study of the deformation of Koyna dam using the Global Positioning System. *Survey Review*, 36(285), 497-507.

17. Neitzel, F. (2004). *Identifizierung konsistenter Datengruppen am Beispiel der Kongruenzuntersuchung geodätischer Netze*: Verlag d. Bayer. Akademie der Wiss.

18. Niemeier, W. (1979). *Zur Kongruenz mehrfach beobachteter geodätischer Netze: Fachrichtung*

