



برای بهبود دقت نظارت بر جابجایی سدها InSAR و GPS تلفیق داده‌های

(منطقه مورد مطالعه: سد گیوی - ایران)

پیمان جوادی^{۱*}، زهرا قربانی^۲

^{۱*} کارشناس ارشد ژئودزی، گروه نقشه برداری، آموزشکده فنی و حرفه‌ای سماء، اردبیل، ایران.

(peymanjavadi@samaard.ac.ir)

^۲ کارشناس ارشد ژئودزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۵/۰۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۷/۱۸)

چکیده

یکی از شایع‌ترین پدیده‌های طبیعی که باعث فرونشست و نیز تغییر شکل و جابجایی می‌شود، زمین لغزش است. با توجه به این نکته اهمیت کشف جابجایی در مناطق حساسی مانند سد و منطقه اطراف آن، افزایش می‌یابد. در حال حاضر تداخل‌سنجی راداری یکی از بهترین تکنیک‌ها برای ارزیابی تغییر شکل زمین می‌باشد. اما این روش به تنهایی برای سازه‌هایی که تغییر شکل و جابجایی افقی دارند مناسب نیست. در این پژوهش به منظور افزایش دقت و کارایی بیشتر در کشف نقاط ناپایدار، از تلفیق تصاویر راداری و مشاهدات ماهواره‌ای GPS بر روی منطقه سد گیوی در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ استفاده کرده‌ایم. با استفاده از تحلیل سری زمانی خط مبنای کوتاه (SBAS)، انجام آنالیز پایداری نقاط به روش IWST و سرشکنی به روش کلاسیک مشخص شد که این دو روش می‌توانند مکمل بسیار خوبی برای کشف نقاط جابجا شده و نیز اعتبارسنجی نتایج باشند. بطوری که هر دو روش نقاط یکسانی را روی بدنه سد و نقاط خارج سد شناسایی کردند که میزان جابجایی ارتفاعی و مسطحاتی در نقاط مذکور گواهِ بر این نتیجه است. از میان این نقاط در منطقه اطراف سد GR4 دارای بیشترین جابجایی به اندازه ۵/۵۷ میلی‌متر و در راستای خط دید ماهواره حاصل از تداخل‌سنجی راداری ۱/۶۱- میلی‌متر در سال و نقطه P9 روی بدنه سد دارای بیشترین جابجایی به اندازه ۹/۰۶ میلی‌متر و در راستای خط دید ماهواره حاصل از تداخل‌سنجی راداری ۱/۹۶ میلی‌متر در سال می‌باشد. همچنین باید خاطر نشان کرد با کاهش فاصله بین ایستگاه‌های GPS و نقاط پیکسلی، دقت بطور چشمگیری افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی

آنالیز پایداری، کشف جابجایی، تصاویر راداری، مشاهدات ماهواره‌ای، SBAS، GPS.



Combining GPS and InSAR Data to Improve the Accuracy of Dams Displacement Monitoring (Case Study: Givi Dam - Iran)

Peyman Javadi ^{1*}, Zahra Ghorbani ²

^{1*} M.Sc. of Geodesy, Department of Geomatics, Sama Collage, Ardabil, Iran.

(peymanjavadi@samaard.ac.ir)

² M.Sc. of Geodesy, Faculty of Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

(Date of received: 26/07/2020, Date of accepted: 09/10/2020)

ABSTRACT

Landslides are one of the most common natural phenomena that cause subsidence as well as deformation and displacement. Due to this point, the importance of detecting displacement in sensitive areas such as the dam and the surrounding area increases. Radar interferometry is currently one of the best techniques for assessing ground deformation. But this method alone is not suitable for structures that have horizontal deformation and displacement. In this study, in order to increase the accuracy and efficiency in detecting unstable points, we have used a combination of radar images and GPS satellite observations on the Givi Dam area in the period 2017 to 2019. Using Small Baseline Subset (SBAS) analyses, point stability analysis by Iterative Weighted Similarity Transformation (IWST) method and classical adjustment method were found to be two excellent methods for detecting displaced points and validating the results. So that both methods identified the same points on the dam and the points outside the dam. Among these points in the area around dam GR4 has the highest displacement of 5.57 mm and in the direction of the satellite line of view obtained from radar interference -1.61 mm per year and point P9 on the dam has the highest displacement of 9.06 mm and in line with the line of sight of the satellite obtained from radar interferometry is 1.96 mm per year. Also, as the distance between GPS stations and pixel points decreases, accuracy increases dramatically.

Keywords:

Stability Analysis, Displacement, Radar Images, Satellite Observations, SBAS, GPS



۱- مقدمه

نظارت مداوم بر تغییرشکل سدها برای اطمینان از عملکرد ایمن و کارآمد آن‌ها بسیار مهم است. عوامل مختلفی می‌توانند در تغییرشکل سد مؤثر باشند، مانند بارگذاری هیدرواستاتیکی از ذخایر آبی، پارامترهای ساخت و ساز و زمین‌شناسی محلی. همچنین سدها به دو نوع تغییرشکل افقی ناشی از نگه داشتن آب در مخزن و تغییرشکل عمودی حاصل از وزن سد حساس هستند [۱]. از این‌رو محاسبه و تخمین درست میزان جابه‌جایی سدها نیازمند ایجاد یک سامانه پایش دائمی از جمله استفاده از تصاویر راداری با دقت قابل قبول و قدرت تفکیک بالا می‌باشد. از طرف دیگر، اضافه‌شدن فناوری تداخل‌سنجی راداری کاربردهای جدیدتری را فرا روی کاربران سنجش‌ازدور قرار داده است. این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه در دو زمان متفاوت اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین با دقت و توان تفکیک مکانی در حد سانتی‌متر و حتی میلی‌متر در آن بازه زمانی خواهد بود. تکنیک تداخل‌سنجی راداری کارایی بالایی در پایش و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های ناشی از حرکات تکتونیکی، زلزله، فعالیت‌های آتشفشانی، تغییرشکل یخچال‌ها و پدیده فرونشست ناشی از استخراج مواد زیرزمینی و همچنین جابه‌جایی‌های محلی بر روی سازه‌ها را از خود نشان داده است [۲]. به خصوص استفاده از سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری مانند روش پراکنشگرهای دائمی (PS) و الگوریتم خط مبنای کوتاه (SBAS)^۲، که می‌تواند محدودیت‌های تداخل‌سنجی راداری سنتی مانند خطاهای اتمسفری، خطاهای مداری و خطاهای زمینی را کاهش دهد [۳]. در سال ۲۰۱۸، آنتونیو و همکاران یک نظارت چند منظوره (MT-InSAR) از سد (مالاگا، اسپانیا) ارائه داده‌اند. نتایج به دست آمده تأیید کرد که سد مالاگا از زمان ساخت تاکنون به عنوان سدی پر از خاک تغییرشکل داده است. حداکثر نرخ تغییرشکل در دوره اولیه (۱۹۹۲-۲۰۰۰) اندازه‌گیری شد، که در حدود ۷- میلی‌متر در سال در بالای سد است [۴]. در سال ۲۰۱۹، عثمان و همکاران. استفاده بالقوه از تداخل‌سنجی راداری به روش پراکنشگر پایدار (PSI)^۳ از تصاویر سنتینل-۱ و مشاهدات GNSS^۴ برای توصیف تغییر شکل در سد موصل در شمال غربی عراق شرح داده شده است [۵]. حداکثر سرعت تغییرشکل در حدود ۷/۴ میلی‌متر در سال است که در امتداد محور سد گسترش یافته است. با توجه به نتایج آن‌ها میزان فرونشست رابطه معکوس با سطح آب مخزن را نشان می‌دهد. اطلاعات PSI به دست آمده از سنتینل-۱ بهبود یافته، عملکرد خوبی برای نظارت بر تغییرشکل با دقت خوب می‌باشد و در نتیجه می‌تواند در برنامه‌های کاربردی مهندسی و مدیریت خطر استفاده شود [۴]. از جمله روش‌های قراردادی آنالیز جابجایی (CDA)^۵، می‌توان به روش تست ثبات کلی شبکه و روش تبدیل همانندی وزن دار تکراری (IWST)^۶، برای یافتن نقاط پایدار در شبکه‌ها اشاره کرد که روش‌های قراردادی آنالیز جابجایی (CDA)، اختلاف مختصات در شبکه بین دو اپک مختلف را با استفاده از آزمون‌های آماری مقایسه می‌کند. اگر اختلاف مختصات از نظر آماری معنی دار باشد، آنگاه این اختلاف مختصات، عنوان جابجایی را نشان می‌دهد [۶،۷]. برای تعیین جابجایی‌ها، از شبکه‌های نظارت و کنترل استفاده می‌شوند. روش‌های ربوست عبارتند از IWST و LAS. این روش‌های برآورد جابجایی، زمانی استفاده می‌شوند که هیچ اطلاعات قبلی درباره حرکت نقاط در داخل شبکه وجود ندارد [۸-۹]. در این مقاله از روش تداخل‌سنجی راداری SBAS برای دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ که می‌تواند اندازه‌گیری‌های جابجایی را با دقت بالا برای فرونشست محلی سد ارائه دهد استفاده شده است. سپس برای اعتبارسنجی از مشاهدات ماهواره‌ای GPS^۷ در دو مرحله محاسبات سرشکنی شبکه‌های خارج و روی توده‌های مشکوک به لغزش سد گیوی،

- 1 Persistent (Permanent) Scatterers
- 2 Small Baseline Subset
- 3 Persistent Scatterer Interferometry
- 4 Global Navigation Satellite System
- 5 Conventional Deformation Analysis
- 6 Iterative Weighted Similarity Transformation
- 7 Global Positioning System



جابجایی نقاط با روش SBAS تلفیق شده است. این روش مقرون به صرفه مناسب برای اندازه‌گیری تغییرشکل سازه‌های بزرگ مهندسی عمران است که به مدیران سدها کمک می‌کند تا سلامت سازه‌های خود را پایش و تأیید کنند.

۲- داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

شهر گیوی از سمت شمال به اردبیل، جنوب با خلخال، شرق با هشتمپار استان گیلان و از سمت غرب نیز به میانه در استان آذربایجان شرقی متصل می‌شود. سد خاکی گیوی با طول تاج ۳۰۴ متر، عرض تاج ۱۲ متر و ارتفاع ۸۹ متر از بستر بر روی رودخانه گیوی واقع در ۲۰ کیلومتری شمالغرب شهرستان خلخال استان اردبیل احداث شده است. سد گیوی از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی و با ظرفیت آگیری ۸۷ میلیون متر مکعب و سطح دریاچه ۴۰ هکتاری با تراز تاج سد ۱۵۵۶ متر و تراز نرمال ۱۵۴۸ متر می‌باشد. به منظور محاسبه میدان جابجایی از ۲۸ تصویر راداری ماهواره سنتینل-۱ از مسیر ۶ پایین‌رو، در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ استفاده شده است. همچنین از داده‌های مشاهدات ماهواره‌ای GPS نیز به منظور محاسبه میدان جابجایی بر روی توده‌های مشکوک به لغزش سد در همین بازه زمانی استفاده شده است. شکل (۱) پوشش منطقه مورد مطالعه توسط تصاویر راداری سنتینل-۱ و پراکندگی نقاط هدف روی توده‌های مشکوک به لغزش را در محدوده مخزن و محور سد گیوی نشان می‌دهد.

۳- روش کار

۳-۱- تداخل‌سنجی راداری با استفاده از الگوریتم SBAS

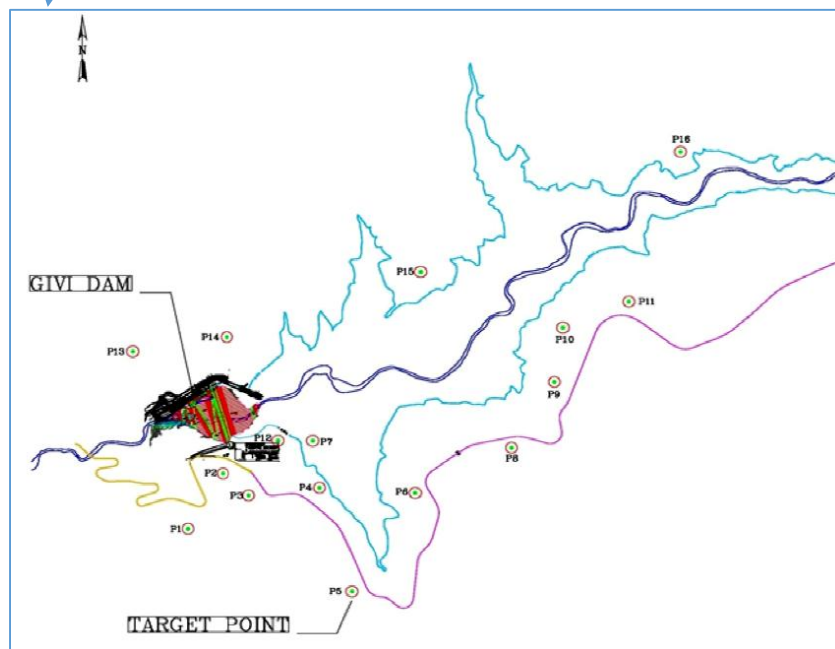
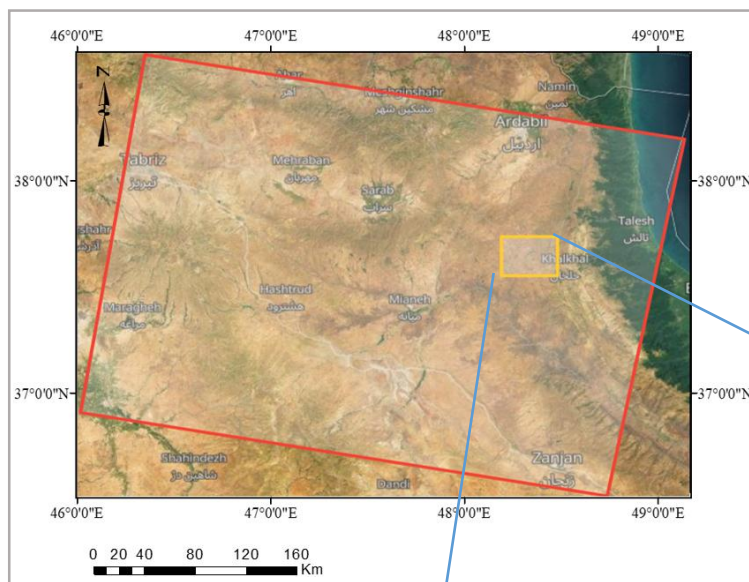
روش SBAS برای تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی توسط براردینو^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد شد. تکنیک SBAS در مکان‌هایی که امکان وجود پیکسل‌هایی با همدوسی بالا بسیار کم است مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰]. در این روش تداخل‌نگار تنها بین تصاویری با بازه زمانی کوتاه و تغییر اندک در زاویه دید تشکیل می‌شود که ضمن به حداقل رساندن ناهمبستگی زمانی و مکانی، امکان آشکارسازی سیگنال را با وجود نداشتن پراکنده‌سازهای پایدار در منطقه در برخی از سلول‌های حد تفکیک فراهم می‌آورد. در واقع در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد. همچنین خط مبنای زمانی^۹ آن‌ها نیز همزمان کمینه باشد [۱۱-۱۲].

۳-۲- مشاهدات ماهواره‌ای (GPS)

گزارش حاضر مربوط به مرحله مشاهدات و محاسبات شبکه‌های مسطحاتی ماهواره‌ای خارج و روی توده‌های مشکوک به لغزش سد گیوی می‌باشد.

⁸ Berardino

⁹ Temporal baseline



شکل ۱: منطقه مور مطالعه و پراکندگی نقاط هدف روی توده‌های مشکوک به لغزش در محدوده سد گیوی و مخزن آن.

۳-۲-۱- شبکه مسطحاتی ماهواره‌ای خارج توده‌های مشکوک به لغزش

این شبکه شامل ۴ پیلار مشاهداتی در منطقه خارج توده‌های مشکوک به لغزش مطابق شکل (۲) می‌باشد. محاسبات سرشکنی این شبکه ابتدا به روش آزاد (Free Network Adjustment) و پس از کشف نقاط پایدار به روش کلاسیک (Minimum Constraint) انجام شده است. بیشترین ابعاد بیضی خطا در این شبکه مربوط به پیلار GR4 و برابر ۱/۶۲ میلی‌متر در سطح اطمینان ۹۵٪ بوده است.



۳-۲-۳- شبکه مسطحاتی ماهواره‌ای روی توده‌های مشکوک به لغزش

این شبکه شامل ۲ پیلار از شبکه خارج توده و ۱۶ نقطه هدف روی توده‌های مشکوک به لغزش می‌باشد که مطابق شکل (۳) جانمایی شده‌اند. محاسبات سرشکنی این شبکه به روش کلاسیک (Minimum Constraint) انجام شده است و بزرگترین نیم قطر اطول بیضی خطا مربوط به نقطه هدف P4 به اندازه ۲/۴۵ میلی‌متر در سطح اطمینان ۹۵٪ بوده است.

۳-۲-۳- دستگاه‌های اندازه‌گیری

دستگاه‌ها و تجهیزات به کار رفته در انجام مشاهدات شبکه‌های مسطحاتی ماهواره‌ای بشرح جدول ۱ است. قابل ذکر است قبل از انجام مشاهدات کلیه دستگاه‌های مورد بررسی قرار گرفته و کالیبراسیون و تنظیمات مورد نیاز انجام گرفته است.

جدول ۱: تجهیزات مورد استفاده در مرحله انجام مشاهدات.

ردیف	نوع دستگاه	تعداد
۱	گیرنده ماهواره‌ای GPS دو فرکانسه سیستم ۵۰۰ لایکا	۴

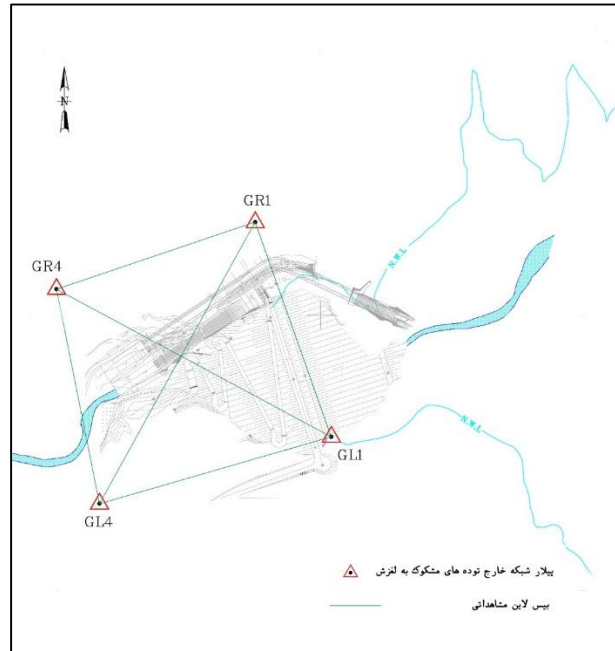
۳-۲-۴- انجام مشاهدات

الف- تنظیمات و پردازش مشاهدات ماهواره‌ای (GPS)

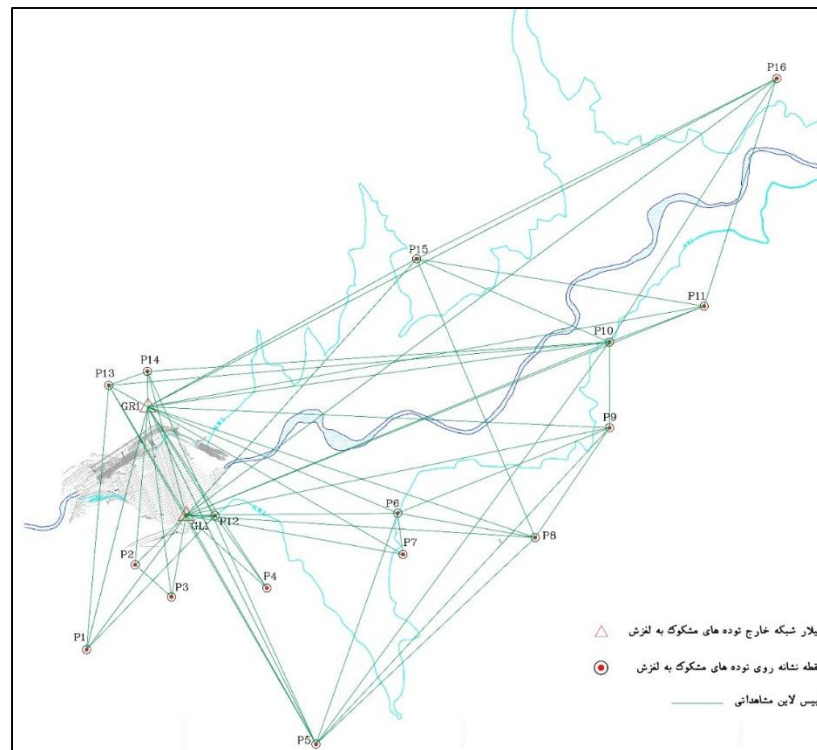
- نرخ ثبت مشاهدات (Rate): نرخ ثبت مشاهدات برای شبکه‌های مسطحاتی ماهواره‌ای سد گیوی ۱۰ ثانیه می‌باشد.
- مدت زمان مشاهدات: مدت زمان ثبت داده‌ها برای نقاط شبکه خارج توده‌ها حدود ۴ ساعت و برای نقاط روی توده‌ها حداقل ۲ ساعت می‌باشد. البته برای تعدادی از نقاط، مشاهدات با زمان بیشتر از مقادیر ذکر شده ثبت گردیده است.
- پارامترهای پردازش مشاهدات: با استفاده از نرم افزار LGO پردازش مشاهدات ماهواره‌ای انجام شده است.

ب- شبکه‌های ماهواره‌ای

شبکه مسطحاتی خارج توه‌های مشکوک به لغزش شامل ۴ پیلار از شبکه میکروژئودزی خارج سد به نام‌های GR1، GR4، GL1 و GL4 می‌باشد. همچنین شبکه مسطحاتی نقاط توه‌های مشکوک به لغزش شامل ۲ پیلار خارج از شبکه توده و ۱۶ نقطه روی توده‌های مشکوک به لغزش مخزن سد می‌باشد. شکل (۳) و (۴) موقعیت پیلارها و بیس‌لاین‌های ماهواره‌ای این شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۲: طرح مشاهدات شبکه خارج توده های مشکوک به لغزش.



شکل ۳: طرح مشاهدات شبکه نقاط روی توده های مشکوک به لغزش.



۴- محاسبات و نتایج آن

۴-۱- شبکه مسطحاتی خارج توده‌های مشکوک به لغزش

محاسبات سرشکنی شبکه مسطحاتی خارج توده‌های مشکوک به لغزش سد گیوی ابتدا به صورت آزاد انجام شده و پس از آنالیز پایداری نقاط نسبت به مرحله مبنا به روش IWST، انتخاب نقطه GR1 به عنوان پیلار ثابت، سرشکنی به روش کلاسیک انجام گرفته است. مشاهدات ماهوارای و نتایج پردازش و محاسبات سرشکنی مختصات UTM نقاط به همراه ابعاد بیضی خطای آنها در سطح اطمینان ۹۵٪ در جدول (۲) و (۳) ارائه شده است.

جدول ۲: مرحله اول) مختصات سرشکن شده پیلارهای شبکه مسطحاتی خارج از سد گیوی به همراه ابعاد بیضی خطا با سطح اطمینان ۹۵٪.

Point	E(m)	N(m)	A (mm)	B (mm)	Phi(deg)
GL1	270019.53791	4174279.29169	0.93	0.81	0°
GL4	269598.57014	4174157.62567	1.49	1.30	-10°
GR1	269881.36465	4174669.54957	0.00	0.00	90°
GR4	269520.29548	4174547.50134	1.86	1.71	-1°

جدول ۳: مرحله دوم) مختصات سرشکن شده پیلارهای شبکه مسطحاتی خارج از سد گیوی به همراه ابعاد بیضی خطا با سطح اطمینان ۹۵٪.

Point	E(m)	N(m)	A (mm)	B (mm)	Phi(deg)
GR1	269881.36465	4174669.54957	0.00	0.00	90°
GL1	270019.53731	4174279.29018	1.10	0.81	-12°
GL4	269598.56643	4174157.62179	1.52	1.15	-13°
GR4	269520.29689	4174547.49595	1.62	1.22	-13°

۴-۲- شبکه مسطحاتی روی توده‌های مشکوک به لغزش

محاسبات سرشکنی شبکه مسطحاتی روی توده‌های مشکوک به لغزش با انتخاب دو پیلار به نام‌های GL1 و GR1 از شبکه خارج توده‌ها به عنوان نقاط ثابت، به روش کلاسیک انجام گرفته است. مشاهدات ماهوارای و نتایج پردازش و محاسبات سرشکنی مختصات UTM نقاط به همراه ابعاد بیضی خطای آنها در سطح اطمینان ۹۵٪ در جدول (۴) و (۵) ارائه شده است.

جدول ۴: مرحله اول) مختصات سرشکن شده پیلارهای شبکه مسطحاتی روی سد گیوی به همراه ابعاد بیضی خطا با سطح اطمینان ۹۵٪.

Point	E(m)	N(m)	A (mm)	B (mm)	Phi(deg)
P1	269661.24906	4173796.70058	1.32	1.15	-9°
P2	269836.14816	4174101.85842	1.76	1.62	7°
P3	269966.60214	4173986.23495	2.47	2.25	4°
P4	270310.28657	4174018.05470	1.86	1.74	12°
P5	270487.17439	4173456.51934	1.37	1.20	4°
P6	270781.31664	4174287.10098	1.62	1.44	13°
P7	270800.64798	4174138.72311	2.57	2.15	35°
P8	271276.62713	4174199.45001	1.64	1.47	2°
P9	271544.15601	4174594.11030	2.40	2.18	9°
P10	271543.61150	4174902.05351	1.57	1.35	15°
P11	271884.94330	4175031.37254	1.81	1.52	30°
P12	270123.78578	4174278.03135	1.42	1.35	-3°
P13	269741.14300	4174746.56624	1.37	1.17	0°
P14	269880.26508	4174796.78439	1.54	1.35	-1°
P15	270849.90664	4175201.25599	1.64	1.30	34°
P16	272144.55878	4175848.48832	1.86	1.54	28°



جدول ۵: مرحله دوم) مختصات سرشکن شده پیلارهای شبکه مسطحاتی روی سد گیوی به همراه ابعاد بیضی خطا با سطح اطمینان ۹۵٪.

Point	E(m)	N(m)	A (mm)	B (mm)	Phi(deg)
P1	269661.24908	4173796.70239	2.20	1.49	-1°
P2	269836.14502	4174101.85962	2.35	1.71	1°
P3	269966.59933	4173986.23923	1.71	1.27	-5°
P4	270310.28376	4174018.05614	2.45	1.88	11°
P5	270487.17210	4173456.51975	1.49	1.13	-12°
P6	270781.31619	4174287.10089	1.54	1.08	-11°
P7	270800.64717	4174138.72524	2.03	1.30	-12°
P8	271276.62456	4174199.45224	1.59	1.13	-18°
P9	271544.15058	4174594.11755	1.69	1.40	-12°
P10	271543.60929	4174902.05401	1.47	1.13	-6°
P11	271884.94598	4175031.37052	1.57	1.08	-15°
P12	270123.78270	4174278.03568	2.18	1.71	9°
P13	269741.14418	4174746.56979	1.57	1.13	-2°
P14	269880.26305	4174796.78635	1.76	1.27	-12°
P15	270849.90690	4175201.25770	1.59	1.17	-7°
P16	272144.56129	4175848.48989	1.59	1.17	-8°

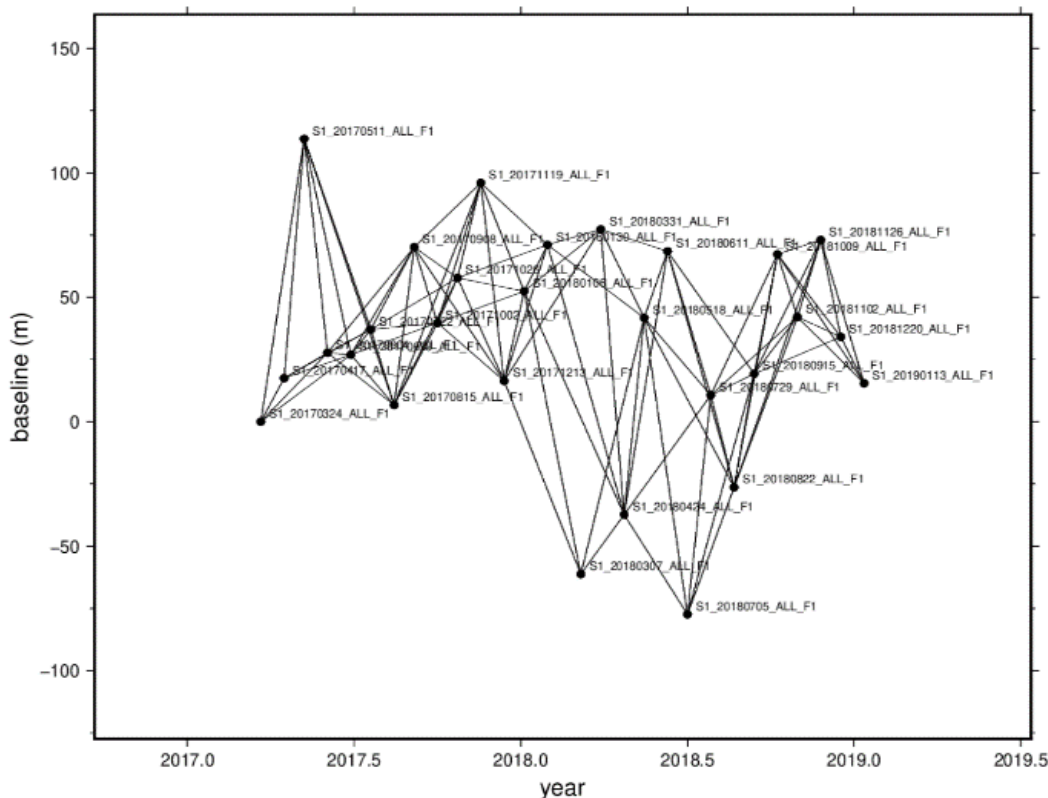
۴-۳- پردازش و تحلیل سری زمانی مجموعه تصاویر ماهواره سنتینل-۱

در پردازش و تحلیل سری زمانی به روش SBAS از یک شبکه تداخل نگار استفاده می‌شود به طوری که برای تشکیل هر تداخل نگار از جفت تصویری استفاده می‌شود که دارای کمترین خط مینا از نظر زمانی و مکانی باشند. برای داشتن یک نمای کلی از رابطه زمانی و مکانی تصاویر و ایجاد تداخل نگارها، گراف شبکه زمانی-مکانی برای ۲۸ تصویر سنتینل-۱ ارائه شده است که در آن یک محور، خط مبنای مکانی (متر) و دیگری زمان (سال) اخذ تصویر را نشان می‌دهد. این تصاویر به صورت شکل (۱)، پردازش می‌شوند در مجموع تعداد تداخل نگارهای تشکیل شده به منظور تحلیل سری زمانی به روش SBAS برای مسیر ۶ پایین‌رو سنتینل-۱ برابر با ۹۵ در بازه زمانی مارس ۲۰۱۷ تا ژانویه ۲۰۱۹ با استفاده از نرم افزار GMTSAR ایجاد شده است. در این پژوهش به منظور آن که از ایجاد خط مبنای مکانی بلند که موجب بروز خطای توپوگرافی بیشتر در فازها می‌شود جلوگیری شود و به دلیل وجود پوشش گیاهی در منطقه که منجر به کاهش همدوسی می‌شود، بایستی تداخل نگارها قبل از ورود به تحلیل سری زمانی اصلاح شوند. مؤلفه فاز توپوگرافی از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری حاصل از ماهواره راداری ناسا^{۱۰} (SRTM1) با استفاده از داده های سنجنش زمین شناسی ایالات متحده^{۱۱} (USGS) حذف می‌شود در ادامه پس از مرحله بازیابی فاز، برای حذف خطای رمپ مداری نیز از برازش یک رویه درجه یک و دیگر نویزهای باقیمانده از فیلترهای پایین‌گذر^{۱۲} استفاده شده است. در نهایت با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود [۱۳-۱۴-۱۵].

¹⁰ Shuttle Radar Topography Mission

¹¹ United States Geological Survey

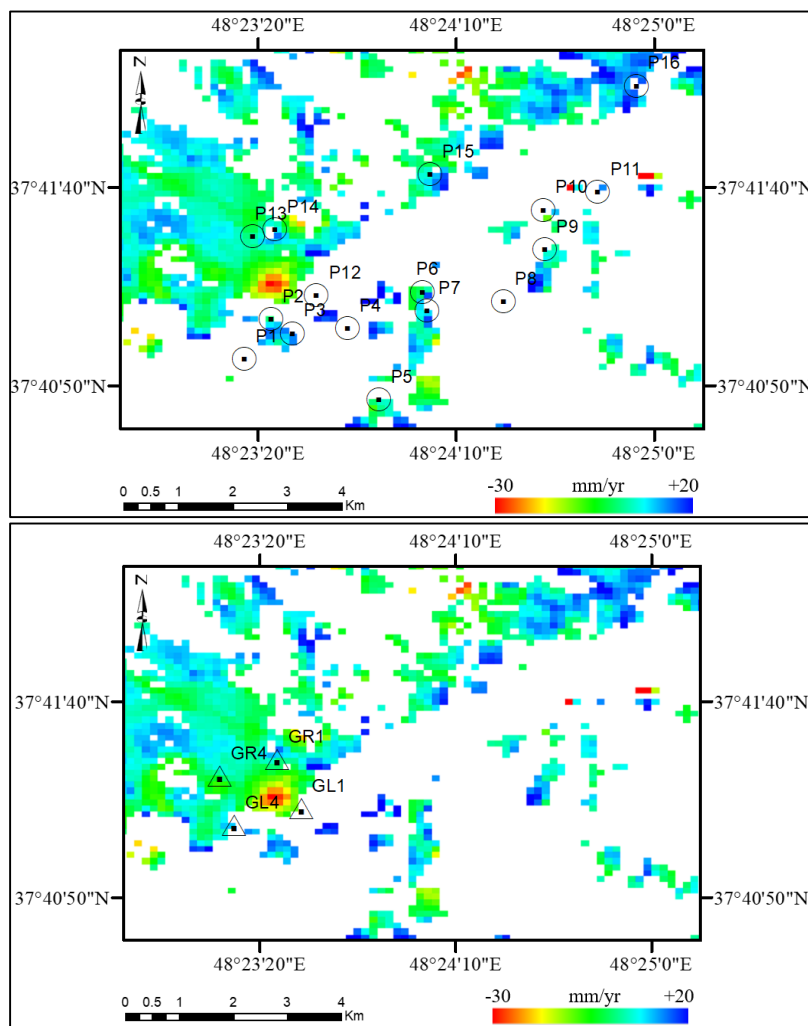
¹² Low-Pass



شکل ۴: شبکه مکانی-زمانی تصاویر راداری. هر نقطه نشان‌دهنده یک تصویر و هر سطر نشان‌دهنده فاصله میان دو تصویر است.

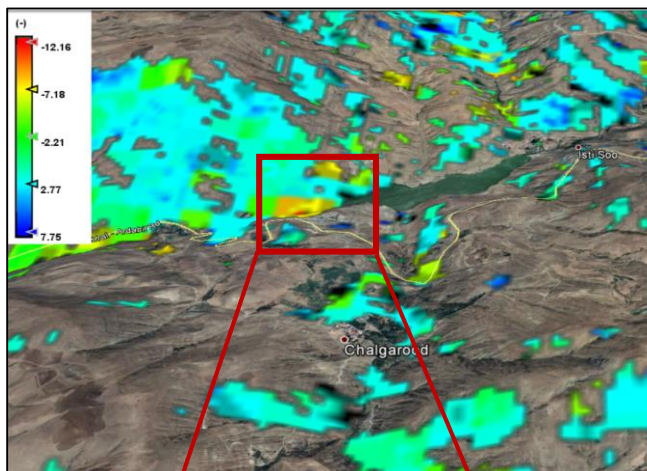
۴-۴- محاسبه میدان جابه‌جایی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری

پس از پردازش تصاویر راداری نقشه‌های میدان جابجایی به دست آمد. شکل (۵) نقشه نرخ جابه‌جایی حاصل از روش SBAS را به همراه موقعیت مکانی توده‌های مشکوک به لغزش سدگیوی که توسط مشاهدات GPS برداشت شده است را نشان می‌دهد. ماکزیمم میزان نشست در سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ در سطح سد گیوی حدود ۳۰- میلی‌متر در سال و حداکثر بالا آمدگی (در راستای نزدیک شدن به ماهواره)، در حدود ۲۰+ میلی‌متر می‌باشد. از آنجایی‌که، وجود پوشش گیاهی و غیره در منطقه موجب کاهش هم‌دوسی بین زوج تصاویر راداری می‌شود، با در نظر گرفتن آستانه هم‌دوسی در حد ۰/۱، برخی از مناطق موجود در نقشه به صورت پیکسل‌های سفید و ماسک شده در پس‌زمینه نقشه دیده می‌شوند.

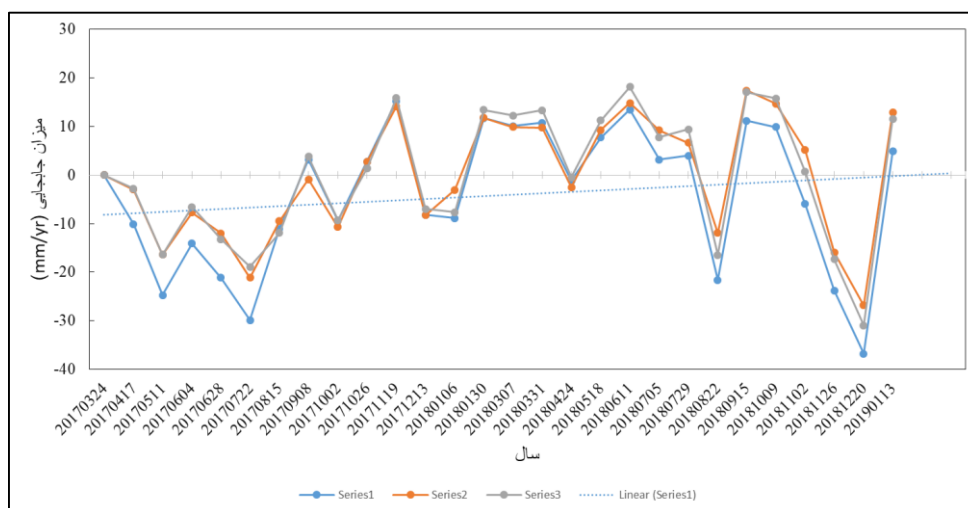


شکل ۵: نقشه جابجایی در امتداد خط دید ماهواره بر الف) شبکه خارج توده‌های مشکوک به لغزش و ب) شبکه روی توده‌های مشکوک به لغزش.

در ادامه طبق شکل (۶)، میزان نشست نقاط پیکسلی پراکنشگرهای ثابت در مسیر کانال رودخانه گیوی ارائه شده است. ماکزیمم میزان پایین‌رفتگی (کادر قرمز) در سد گیوی با مقدار منفی ۱۲ میلی‌متر در سال می‌باشد. به نظر می‌رسد بردار جابجایی به‌طور مکانی بیشتر در مرکز سد گیوی متمرکز شده است. برای تحلیل بیشتر از سری‌های زمانی فرونشست زمین در نقاط مستعد سد گیوی استفاده شده است. شکل (۷)، نیز تغییرشکل سالیانه زمین را در سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ در سطح سد گیوی نشان می‌دهد. حداکثر میزان تغییرات به ۳۷ میلی‌متر در سال می‌رسد. در واقع، میزان نشست در سد گیوی از مارس ۲۰۱۷ تا جولای ۲۰۱۷ افزایش و از آگوست ۲۰۱۷ تا جولای ۲۰۱۸ کاهش یافته است. بیشترین تغییرشکل در اواخر ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ بوده است. همچنین این سد تحت تأثیر تغییرات جوی، فرونشست غیرخطی همراه با تغییرات فصلی را نشان می‌دهد. همچنین با وقوع زلزله در سال ۲۰۱۷ میزان فشار آب حفره ای به میزان زیادی افزایش یافته است. در نتیجه میزان تنش مؤثر نیز کاهش خواهد یافت. حداکثر جابجایی‌ها در لحظه وقوع حداکثر شتاب زلزله در تاج سد و هسته رسی ایجاد شده‌اند. از طرفی باید خاطر نشان کردن در چهار ماهه اول سال ۲۰۱۷ آبیگری پشت سد در بیشترین حالت خود بود که همین امر باعث افزایش فشار به بدنه و منطقه اطراف سد و ایجاد جابجایی‌ها می‌کند.



شکل ۶: محاسبه میدان جابه‌جایی سد گویو حاصل از الگوریتم SBAS.



شکل ۷: سری زمانی تغییر شکل سالیانه در منطقه سد گویو شامل نقاط ۱ و ۲ و ۳.



۵- بحث و نتایج

۵-۱- جابجایی مسطحاتی و ارتفاعی شبکه خارج توده‌های مشکوک به لغزش

با مقایسه مختصات حاصل از محاسبات سرشکنی شبکه‌های خارج و روی توده‌های مشکوک به لغزش سد گیوی در مرحله اول و دوم، جابجایی نقاط محاسبه شده است. فقط چند ایستگاه نزدیک به نقاط پراکنشگرهای ثابت منطقه موجود است. علاوه بر این، کارهای میدانی در سد به دلایل امنیتی آسان نیست. از اینرو، ما از ۱۶ ایستگاه برای اعتبارسنجی نقاط اندازه‌گیری پراکنشگرهای ثابت با استفاده از تکنیک خط مینای کوتاه برای دوره ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ استفاده کردیم. این ایستگاه‌ها قابل مقایسه هستند زیرا نزدیک به نقاط اندازه‌گیری پراکنشگرهای ثابت هستند. سپس در قالب یک جدول، میدان جابه‌جایی با استفاده از تلفیق نتایج حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در بعد ارتفاعی و مشاهدات ماهواره‌ای (GPS) به دست آمد. میزان جابجایی مسطحاتی نقاط شبکه خارج توده‌ها نسبت به مرحله اول محاسبه شده و نتایج حاصل به همراه ابعاد بیضی خطای جابجایی نقاط در سطح اطمینان ۹۹٪ در جدول (۶) نمایش داده شده است. در نهایت با نتایج حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی راداری تلفیق شده است. شکل (۵) یک پراکندگی جابجایی را نشان می‌دهد که با مشاهدات GPS و روش SBAS حاصل از داده‌های راداری سنتینل-۱ اندازه‌گیری شده است. با توجه به مندرجات جدول (۶) و نیز روش‌های آزمون فرض و مقدار بحرانی آماره بین دو مرحله مشاهدات، می‌توان نتیجه گرفت برخی پیلاهای شبکه مسطحاتی خارج توده‌های مشکوک به لغزش، جابجایی مسطحاتی معنادار داشته‌اند. از میان این نقاط پیلا GR4 دارای بیشترین جابجایی به اندازه ۵/۵۷ میلی‌متر و در راستای خط دید ماهواره حاصل از تداخل‌سنجی راداری ۱/۶۱- میلی‌متر در سال می‌باشد. حداکثر اختلاف در سرعت تغییر شکل ۳/۹۶ میلی‌متر در سال است، در حالی که میانگین و حداقل اختلاف به ترتیب ۲/۳۸ و ۱/۵۴ میلی‌متر در سال است (شکل ۶). مشخص شده است که حداکثر جابجایی بین نقاط GR4 و GL1 است که در اطراف مرکز سد واقع شده‌اند و پایین‌تر از مسیر کانال رودخانه گیوی رخ داده است. با فاصله گرفتن از GL1، سرعت جابجایی کاهش می‌یابد.

جدول ۶: جابجایی نقاط شبکه مسطحاتی خارج سد گیوی به همراه ابعاد بیضی خطای جابجایی با سطح اطمینان ۹۹٪ (۱پک دوم نسبت به ۱پک اول)

Point	dx(mm)	dy(mm)	d(mm)	A(mm)	B(mm)	phi(deg)	dz(mm)
GL1	-0.60	-1.51	1.62	1.79	1.46	99.99	-4.00
GL4	-3.71	-3.88	5.37	2.64	2.12	103.28	3.83
GR4	1.41	-5.39	5.57	3.03	2.58	98.25	-1.61

۵-۲- جابجایی مسطحاتی و ارتفاعی شبکه روی توده‌های مشکوک به لغزش

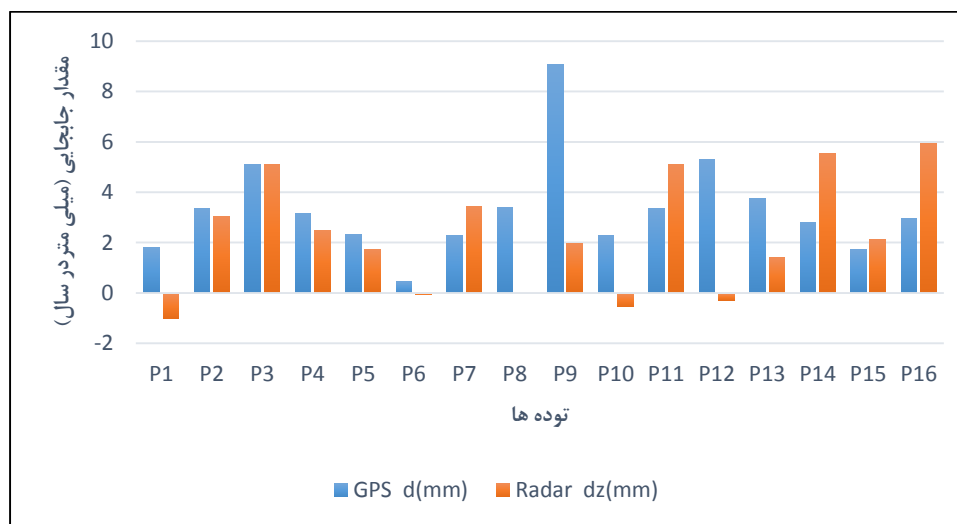
میزان جابجایی مسطحاتی نقاط هدف روی توده‌های مشکوک به لغزش نسبت به مرحله اول محاسبه شده و نتایج حاصل به همراه ابعاد بیضی خطای جابجایی نقاط در سطح اطمینان ۹۹٪ در جدول (۷) نمایش داده شده است. همچنین، شکل (۷) یک پراکندگی جابجایی و فاصله بین نقاط پیکسلی حاصل از روش SBAS و ۱۶ ایستگاه GPS را برای اعتبارسنجی نقاط اندازه‌گیری پیکسلی پراکنشگرهای ثابت نشان می‌دهد. در شکل (۸) با مقایسه تفاوت سرعت از میان نقاط با جابجایی مسطحاتی معنادار نقطه P9 دارای بیشترین جابجایی به اندازه ۹/۰۶ میلی‌متر و در راستای خط دید ماهواره حاصل از تداخل‌سنجی راداری ۱/۹۶ میلی‌متر در سال می‌باشد. با توجه به مندرجات جدول (۷) و نیز روش‌های آزمون فرض و مقدار بحرانی آماره بین دو مرحله مشاهدات، می‌توان نتیجه گرفت اکثر نقاط هدف شبکه مسطحاتی روی سد، جابجایی اندکی داشته‌اند در نهایت با نتایج حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی راداری تلفیق شده است. به طور کلی، می‌توان گفت با افزایش فاصله بین ایستگاه GPS و نقاط پیکسلی، خطا افزایش می‌یابد.



بنابراین، عدم وجود ایستگاه‌های GPS در همان مکان دقیق نقاط پیکسل‌ها یکی از دلایل عمده تفاوت در مقادیر سرعت بین ایستگاه‌های نقاط پیکسلی و GPS است.

جدول ۷: جابجایی نقاط شبکه مسطحاتی روی سد گیوی به‌مراه ابعاد بیضی خطای جابجایی با سطح اطمینان ۹۹٪ (اپک دوم نسبت به اپک اول)

Point	dx(mm)	dy(mm)	d(mm)	A(mm)	B(mm)	phi(deg)	dz(mm)
P1	0.02	1.81	1.81	2.73	2.49	98.55	-1.01
P2	-3.14	1.2	3.36	3.85	3.13	87.88	3.05
P3	-2.81	4.28	5.12	4.13	3.64	90.00	5.10
P4	-2.81	1.44	3.16	4.04	3.43	79.10	2.50
P5	-2.29	0.41	2.33	2.70	2.22	94.55	1.72
P6	-0.45	-0.09	0.46	4.01	1.31	83.74	-0.08
P7	-0.81	2.13	2.28	3.00	2.52	96.05	3.44
P8	-2.57	2.23	3.40	3.40	2.64	97.97	0.00
P9	-5.43	7.25	9.06	3.55	3.10	88.15	1.96
P10	-2.21	0.5	2.27	2.79	2.34	87.80	-0.55
P11	2.68	-2.02	3.36	3.13	2.64	80.49	5.11
P12	-3.08	4.33	5.31	3.40	2.85	82.03	-0.28
P13	1.18	3.55	3.74	2.79	2.22	91.85	1.4
P14	-2.03	1.96	2.82	3.10	2.49	97.76	5.53
P15	0.26	1.71	1.73	2.97	2.46	72.65	2.11
P16	2.51	1.57	2.96	3.10	2.55	71.22	5.93



شکل ۸: مقایسه نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری (dz) و مشاهدات ماهواره‌ای (d).



۶- جمع بندی و نتیجه گیری

با توجه به اهمیت کشف نقاط پایدار و ناپایدار در شبکه‌های ژئودتیکی و میکروژئودزی که عموماً برای بررسی و شناسایی جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها در سازه‌های عظیم یا مناطق حساس و پُر لغزش ایجاد می‌شوند، استفاده از روش‌های دقیق و کارآمد در این موضوع همیشه بحث برانگیز و چالشی بوده است. در این پژوهش سعی بر این بود از دو روشی که بسیار پُرکاربر و دقیق هستند بصورت تلفیقی برای افزایش دقت و قابل اعتمادتر بودن نتایج استفاده شود. بت توجه منطقه مورد مطالعه ما، روش SBAS برای تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی در مکان‌هایی که امکان وجود پیکسل‌هایی با همدوسی بالا بسیار کم است مورد استفاده قرار گرفت که از تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ استفاده کردیم. افزون بر آن از شبکه ژئودتیکی که برای روی بدنه سد و همچنین خارج سد ایجاد شده بود برای مشاهدات ماهواره‌ای GPS در همان بازه زمانی یاد شده استفاده گردید. با توجه به نرخ جابه‌جایی حاصل از روش SBAS به همراه موقعیت مکانی توده‌های مشکوک به لغزش سد گیوی که توسط مشاهدات GPS اندازه‌گیری شده است، ماکزیمم میزان نشست در سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ در سطح سد گیوی حدود ۳۰- میلی‌متر در سال و حداکثر بالآمدگی (در راستای نزدیک‌شدن به ماهواره)، در حدود ۲۰+ میلی‌متر می‌باشد. همچنین ماکزیمم میزان پایین‌رفتگی در سد گیوی با مقدار منفی ۱۲ میلی‌متر در سال می‌باشد. به نظر می‌رسد بردار جابجایی به‌طور مکانی بیشتر در مرکز سد گیوی متمرکز شده است. با بررسی دو مرحله از مشاهدات، می‌توان نتیجه گرفت برخی پیلارهای شبکه مسطحاتی خارج توده‌های مشکوک به لغزش، جابجایی مسطحاتی معنادار داشته‌اند. از میان این نقاط پیلار GR4 دارای بیشترین جابجایی به اندازه ۵/۵۷ میلی‌متر و در راستای خط دید ماهواره حاصل از تداخل‌سنجی راداری ۱/۶۱- میلی‌متر در سال می‌باشد. حداکثر اختلاف در سرعت تغییر شکل ۳/۹۶ میلی‌متر در سال است، در حالی که میانگین و حداقل اختلاف به ترتیب ۲/۳۸ و ۱/۵۴ میلی‌متر در سال است. در ضمن حداکثر جابجایی بین نقاط GR4 و GL1 است که در اطراف مرکز سد واقع شده اند و پایین‌تر از مسیر کانال رودخانه گیوی رخ داده است. با فاصله گرفتن از GL1، سرعت جابجایی کاهش می‌یابد. با مقایسه تفاوت سرعت از میان نقاط روی توده مشکوک به لغزش، نقطه P9 دارای بیشترین جابجایی به اندازه ۹/۰۶ میلی‌متر و در راستای خط دید ماهواره حاصل از تداخل‌سنجی راداری ۱/۹۶ میلی‌متر در سال می‌باشد. به طور کلی، می‌توان گفت با افزایش فاصله بین ایستگاه GPS و نقاط پیکسلی، خطا افزایش می‌یابد. بنابراین، عدم وجود ایستگاه‌های GPS در همان مکان دقیق نقاط پیکسلی‌ها یکی از دلایل عمده تفاوت در مقادیر سرعت بین ایستگاه‌های نقاط پیکسلی و GPS است.

۷- مراجع

- [1]- Scaioni, M., Marsella, M., Crosetto, M., Tornatore, V., and Wang, J., 2018, **Geodetic and remote-sensing sensors for dam**, Deformation monitoring sensors, 18, 3682.
- [2]- Massonnet, D., and Feigl, K. L., 1998, **Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface**, Reviews of geophysics, 36, 4, 441-500.
- [3]- Luo, Q., Perissin, D., Lin, H., Zhang, Y., and Wang, W., 2014, **Subsidence monitoring of tianjin suburbs by TerraSAR-X persistent scatterers interferometry**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7, 5, 1642-1650.
- [4]- Ruiz-Armenteros, A. M., Lazecky, M., Hlaváčová, I., Bakoň, M., Delgado, J. M., Sousa, J. J., and Perissin, D., 2018, **Deformation monitoring of dam infrastructures via spaceborne MT-InSAR, The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain)**, Procedia Computer Science, 138, 346-353.



- [5]- Othman, A. A., Al-Maamar, A. F., Al-Manmi, D. A. M., Liesenberg, V., Hasan, S. E., Al-Saady, Y. I., and Khwedim, K., 2019, **Application of DInSAR-PSI Technology for Deformation Monitoring of the Mosul Dam, Iraq**, Remote Sensing, 11, 22, 26-32.
- [6]- Javadi, P., and Vosoghi, B., 2016, **Stability Analysis of Deformation Monitoring Network Points Using Sub network Analysis**, Geospatial Engineering Journal. 7, 2, 25-38.
- [7]- Javadi, P., 2017, **Detecting the Unstable Points in Deformation Monitoring Geodetic Networks in Analysis Method of Sub network**, Modern Applied Science, 11, 3, 61-75.
- [8]- Javadi, P., 2016, **Measurement and Monitoring of Structures Deformation with Geodetic Methods**, 1st National Conference of Geospatial Information Technology, Tehran, Iran.
- [9]- Kreemer, C., Hammond, W. C., and Blewitt, G., 2018, **A robust estimation of the 3D interpolate deformation of the North American plate from GPS**, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 4388– 4412. <https://doi.org/10.1029/2017JB015257>
- [10]- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E., 2002, **A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms**, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 40, 11, 2375-2383.
- [11]- Lee, C. W., Lu, Z., Jung, H. S., Won, J. S., and Dzurisin, D., 2006, **Surface deformation of Augustine Volcano, 1992–2005, from multiple-interferogram processing using a refined small baseline subset (SBAS) interferometric synthetic aperture radar (InSAR) approach**, 453-465.
- [12]- Jung, H. S., Lee, C. W., Park, J. W., Kim, K. D., and Won, J. S., 2008, **Improvement of small baseline subset (SBAS) algorithm for measuring time-series surface deformations from differential SAR interferograms**, Korean Journal of Remote Sensing, 24, 2, 165-177.
- [13]- Xie, H., and Zhong L., 2018, **Combining InSAR and GPS to Determine Transient Movement and Thickness of a Seasonally Active Low- Gradient Translational Landslide**, Geophysical Research Letters, 45, 3, 1453-1462.
- [14]- Simonetto, E., and Durand, S., 2014, **Combination of INSAR and GNSS Measurements for Ground Displacement Monitoring**, journal of Procedia Technology, 16, 192-198.
- [15]- Dogan, A. H., Tunalioglu, N., and Erdogan, B., 2018, **Evaluation of the GPS Precise Point Positioning technique during the 21 July 2017 Kos-Bodrum (East Aegean Sea) Mw 6.6 earthquake**, Arabian Journal of Geoscience, 11, 775. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4140-z>