

استفاده از داده‌های سری زمانی راداری در تعیین جابجایی سدهای خاکی

الناز علی‌اصل‌خیابانی^۱، محمدجواد ولدان‌زوج^۲، یاسر مقصودی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی

elnaz.khiabani073@gmail.com

^۲ استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

valadanzouj@kntu.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ymaghsoudi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت اسفند ۱۳۹۸، تاریخ تصویب خرداد ۱۴۰۰)

چکیده

شهرهای امروزی مملو از سازه‌های بزرگ‌اند که پایش آن‌ها به روش‌های سنتی نیازمند هزینه و زمان بسیار بالایی است. سازه‌های مهندسی موجود بدلیل عوامل مختلف از جمله بارگذاری‌های پیش‌بینی نشده و نشست زمین دچار تغییر شکل شده و مشکلاتی را به وجود می‌آورند. این مشکلات با بارگذاری اضافی حاصل از خطرات طبیعی یا مصنوعی مانند زلزله، سیل و انفجار تشدید می‌گردند. مهندسان سال‌هاست به تلاش برای دستیابی به روشی بهینه برای پایش سازه‌ها به منظور جلوگیری از وقوع فاجعه‌های جبران‌ناپذیر پرداخته‌اند. یکی از این سازه‌های مهم که نیازمند پایش مداوم است، سد می‌باشد؛ چراکه ناپایداری سدهای بزرگ و گسیختگی آن‌ها عاملی تهدیدکننده برای جان و مال انسان‌ها به حساب می‌آید و اثرات زیست محیطی قابل ملاحظه‌ای به دنبال خواهد داشت. مسئله اصلی در این تحقیق، ارائه روشی کم-هزینه، سریع و دقیق برای محاسبه جابجایی و تغییرشکل بدنه سدهای خاکی می‌باشد. روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری جابجایی بدنه سازه سد وجود دارد که در میان آن‌ها استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدوری از جمله تداخل‌سنجی راداری به دلیل فراهم نمودن مشاهدات گسترده و منظم از سطح زمین می‌تواند در امر اندازه‌گیری جابجایی و نشست سازه سد مفید واقع شود. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، سد خاکی داریان واقع در استان کرمانشاه می‌باشد. روش استفاده شده برای برآورد جابجایی بدنه این سد، تکنیک پراکنشگر دائمی (PSI) می‌باشد، داده‌های مورد نیاز در این تحقیق، داده‌های باندهای C و X سنجنده‌های Sentinel-1A و CosmoSkyMed-X می‌باشد. در پردازش سری زمانی این تصاویر از گراف ستاره‌ای و مثلث‌بندی دلونی استفاده شده و دو مدل خطی و غیرپارامتریک برای برآورد جابجایی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل با اعمال دو مدل مختلف جابجایی بررسی گردیده و در نهایت مدلی که دارای هم‌دوسی زمانی بالاتری بود، به عنوان مدل مناسب انتخاب گردید و مدل دیگر کنار گذاشته شد. در پردازش داده‌های سنجنده S-1A سد داریان مدل مناسب برای جابجایی‌ها مدل غیرپارامتریک و برای داده‌های سنجنده CSK همین سد مدل خطی به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب گردید. نتایج حاصل از ارزیابی دقت خاکی از آن بود که استفاده از دو دسته داده راداری C باندهای X باندهای به ترتیب با دقت‌های کمتر از ۴ و ۲ میلیمتر، قابلیت برآورد جابجایی‌های سازه‌های عظیم از جمله سدهای خاکی را دارا بوده و نتایج دارای دقت‌های قابل قبول و استاندارد می‌باشند. ذکر این نکته ضروری است که نتایج داده‌های X باندهای به دلیل رزولوشن بالاتر این تصاویر نسبت به تصاویر C باندهای، دارای تراکم بالاتری از نقاط PS بوده و همچنین هم‌خوانی بالاتری با داده‌های زمینی داشته و در نهایت با استفاده از این نوع داده، دقت بالاتری حاصل خواهد شد. اما دقت حاصل از داده‌های سنجنده S-1A برای محاسبه جابجایی سازه سد به حدی مطلوب است که برای پایش این نوع سازه‌ها کفایت می‌کند.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، تکنیک پراکنشگر دائم، سد خاکی، Sentinel-1A، CosmoSkyMed_X

۱- مقدمه

پدیده‌ها و رویدادهای طبیعی و غیر طبیعی براساس نوع واکنش و تأثیرگذاری می‌توانند برای جامعه بشری و محیط زیست مخرب یا مفید باشند. پدیده‌ها و حوادث مخرب مانند فرونشست زمین، زمین‌لغزش (رانس زمین)، زلزله، سیل، آتشفشان، تخریب سازه‌هایی مثل برج‌ها، سدها، پل‌ها و ... که می‌توانند قابل پیش‌بینی و یا غیرقابل پیش‌بینی باشند، سالانه خسارت‌های جانی و مالی بسیاری را به بشر و همچنین محیط زیست تحمیل می‌کنند. بررسی این پدیده‌ها، شناسایی الگوی رفتاری آن‌ها و پی‌بردن به چگونگی جلوگیری از آسیب‌های احتمالی ناشی از آن‌ها امری مهم در تأمین آسایش و زندگی بهتر به‌منظور افزایش کیفیت زندگانی بشری می‌باشد [۱]. یکی از پدیده‌هایی که در صورت به وقوع پیوستن، خسارت‌های مالی و جانی بسیاری را به‌بار خواهد آورد، تخریب سازه‌ها و ابرسازه‌هایست که از جمله زیرساخت‌های مهم هر کشور محسوب می‌گردند. از اینرو پایش مداوم و مطالعه رفتار جابجایی و تغییر شکل در این سازه‌ها امری ضروری به‌شمار می‌آید. یکی از مهم‌ترین سازه‌های عظیم در هر کشوری، سد می‌باشد. سدها علاوه بر تأمین آب آشامیدنی و آب مورد نیاز کشاورزان از بروز سیل‌های ویرانگر جلوگیری کرده و با مدیریت درست، قادر به تولید انرژی بزرگ برق‌آبی هستند. یکی از بزرگ‌ترین مزایای سدها، ذخیره آب مازاد در طول دوره مرطوب و بارندگی است که با ذخیره این آب مازاد می‌توان سبب رونق بخش کشاورزی و جلوگیری از بروز خشکسالی هنگام خشکی و کمبود بارندگی شد. با توجه به مزایای بسیار این سازه و به علت بالا بودن هزینه ساختمان سدها و نیز شدت وخامت عواقب ناشی از خرابی آن‌ها، مسئله حفاظت، نگهداری و ارزیابی مستمر پایداری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با ساخت و شروع بهره‌برداری از ابر سازه‌ای چون سد، برای جامعه پایین‌دست شرایط بالقوه مخاطره‌آمیزی ایجاد می‌شود، زیرا در صورت شکستن این سازه، جان و مال افراد ساکن در مناطق پایین دست از بین خواهد رفت. دامنه این خسارت‌ها، چه در بعد زمان و چه در بعد مکان بسیار گسترده بوده و حتی می‌تواند موجب کاهش اعتبار ملی یک کشور گردد. از اینرو اهمیت پایش سلامت سازه سد به‌منظور تشخیص خرابی، ترمیم و تعمیر به موقع و

پیشگیری از حوادث ناگوار ناشی از تخریب آن امری ضروری محسوب می‌گردد.

تکنیک‌های متفاوتی از گذشته تا امروز به منظور پایش و اندازه‌گیری جابجایی و تغییر شکل سطح زمین و پدیده‌های موجود بر روی آن معرفی و به‌کارگرفته شده‌اند. تکنیک نقشه‌برداری زمینی و ترازیابی^۱ به واسطه جمع‌آوری مشاهدات زمینی به عنوان قابل اطمینان‌ترین روش‌ها در اندازه‌گیری جابجایی‌های قائم و افقی در سطح زمین شناخته شده‌اند. این درحالی است که مشاهده حجم وسیعی از نقاط روی سطح زمین یا بر روی سازه‌های عظیم، به جهت داشتن پوشش مکانی بهتر از میدان جابجایی سطح زمین و تکرار این مشاهدات در زمان‌های متفاوت به جهت پوشش زمانی بهتر، بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشد. تکنیک مکان‌یابی جهانی یا GPS^۲ توسط اطلاعات ماهواره‌ای قادر به جمع‌آوری اطلاعات جابجایی سطح زمین به صورت پیوسته در زمان می‌باشد، اما همانند تکنیک ترازیابی و نقشه‌برداری زمینی تنها قادر به پایش جابجایی در تعداد محدودی نقاط بر روی سطح زمین می‌باشد. از جمله روش‌های دیگری که برای پایش جابجایی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، استفاده از ابزار دقیق و حسگرهای تغییر شکل می‌باشند که این دو روش نیز هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و علاوه بر این، استفاده و پیاده‌سازی الگوریتم آن‌ها پیچیدگی بسیار زیادی دارا می‌باشد [۲]. در میان این روش‌ها، استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدوری از جمله تداخل‌سنجی راداری^۳ به دلیل فراهم نمودن مشاهدات گسترده و منظم از سطح زمین، هزینه پایین و صرف زمان کوتاه می‌تواند در امر اندازه‌گیری جابجایی و نشست سازه‌ها مفید واقع شوند. با ورود ماهواره‌های راداری از دهه ۱۹۷۰، تکنیک تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای به عنوان ابزاری مفید در پایش جابجایی‌های سطح زمین معرفی شد. دقت مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها نیز در این روش قابل مقایسه با دقت اندازه‌گیری سیستم مکان‌یابی جهانی و ترازیابی می‌باشد. این روش اولین بار به‌منظور مطالعه‌ی حرکات سطح زمین در سال ۱۹۷۴ ابداع شد [۳]. اساس این روش، اندازه‌گیری تفاضلی فازهای تصاویر رادار اخذشده از یک منطقه در یک

^۱ Levelling

^۲ Global Positioning System

^۳ Radar Interferometry

بازه‌ی زمانی می‌باشد. به طور کلی خصوصیتی چون برداشت پیوسته در سطح وسیع، دقت بالا، مقرون به صرفه بودن و امکان اخذ اطلاعات تحت هر شرایط آب و هوایی دلایل عمده استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در پایش جابجایی است. هم‌چنین فراوانی مکانی بالا در پهنه-ای با ابعاد وسیع و فراوانی نسبتاً خوب زمانی مشاهدات رادار در مقایسه با ترازبایی و سیستم مکان‌یابی جهانی در سال‌های اخیر دیدگاهی گسترده را برای پایش تغییرات سطح زمین با استفاده از این تکنیک فراهم کرده‌است [۴].

با توجه به مزایای عمده ذکر شده برای تکنیک‌های راداری، هدف اصلی این مقاله محاسبه نرخ جابجایی‌های بدنه سد خاکی داریان با به کارگیری داده‌های راداری سری زمانی^۱ و استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائم^۲ می‌باشد. ساختار کلی تحقیق بدین گونه است که در بخش اول، مقدمه کوتاهی در مورد ضرورت انجام تحقیق و روش مورد استفاده برای دستیابی به هدف ذکر شد. در بخش دوم اشاره کوتاهی به تحقیقات انجام شده خواهیم داشت. بخش سوم معرفی منطقه مطالعاتی، بخش چهارم داده‌های مورد استفاده در تحقیق و بخش پنجم شامل ارائه مبانی و روند انجام تحقیق می‌باشد. بخش نهایی نیز شامل ارائه نتایج و خروجی‌های حاصل از انجام پروژه، بحث و نتیجه‌گیری خواهد بود.

۲- پیشینه تحقیق

با توجه به استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به منظور محاسبه جابجایی سدهای خاکی در این تحقیق، بررسی تاریخچه‌ی تکنیک تداخل‌سنجی راداری در خصوص این موضوع، ضروری به نظر می‌رسد. در این بخش تحقیقات انجام‌گرفته به همراه اهداف موردنظر، روش‌های به‌کار رفته و نرم‌افزارهای استفاده شده در هریک عنوان می‌گردند. لازم به ذکر است که به دلیل استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائم در این تحقیق، تمرکز اصلی این بخش در رابطه با تاریخچه‌ی مطالعات صورت گرفته با بکارگیری روش PSI در خصوص پایش سد می‌باشد.

سوسا و همکاران در تحقیق خود تحت عنوان "پتانسیل داده‌های راداری C باند برای پایش تغییر شکل سدها" بر روی محاسبه میزان آسیب‌پذیری سدها که ناشی از حرکت پوسته زمین می‌باشد تمرکز کردند. آن‌ها در تحقیق خود از سه داده راداری C باند (ERS, Envisat و Sentinel-1A) برای مطالعه بر روی پایش سدها استفاده کردند. در این پژوهش از نرم‌افزار SARPROZ و StaMPS برای انجام پردازش‌ها استفاده گردید. روش استفاده شده در هر یک از این دو نرم‌افزار، روش مبتنی بر PS می‌باشد، اما دارای تفاوت‌های جزئی در نحوه انتخاب نقاط PS هستند. از جمله تفاوت‌های اصلی روش StaMPS و PS^۳ در نحوه‌ی انتخاب نقاط PS می‌باشد. در روش StaMPS برای انتخاب نقاط PS علاوه بر استفاده از ویژگی دامنه، از ویژگی‌های فاز نیز استفاده می‌کنند. نقاط PS نقاطی هستند که دامنه آن‌ها کم و دارای ثبات فاز در طول زمان باشند. به عبارت دیگر از هم‌بستگی مکانی فاز برای انتخاب نقاط PS استفاده می‌شود. در این تحقیق ۶ سد La Beninar (Almeria)، El Limonero (Malaga)، Paradela، Arenoso (Cordoba)، Vinuela (Malaga) و Raiva (Coimbra) مورد بررسی قرار گرفت که ۴ سد اول در کشور اسپانیا و ۲ سد دیگر در کشور پرتغال قرار دارند [۵].

سعید امین جعفری در تحقیق خود به بررسی سد خاکی مسجد سلیمان که یکی از سدهای با هسته‌ی رسی موجود در ایران می‌باشد، پرداخت. این سد در جنوب غرب ایران و در مختصات ۳۲،۰۲۵ درجه شمالی و ۴۹،۴۱ درجه شرقی قرار دارد. در این تحقیق از ترکیب روش InSAR و FEM^۴ استفاده شده است. روش FEM روشی به‌منظور برآورد میزان جابجایی‌های سد بر اساس رفتار الاستیک خطی مواد و مصالح بکار رفته در هر قسمت از بدنه سد می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا مقادیر جابجایی با کمک روش تداخل‌سنجی برای نقاط بدنه سد محاسبه می‌گردد و در مرحله بعد، اطلاعات بدست آمده از جابجایی‌های نقاط بدنه سد، به‌عنوان مقادیر اولیه وارد مدل FEM شده و مقادیر جدید جابجایی محاسبه می‌گردد، به منظور پیاده‌سازی روش FEM از نرم‌افزار

^۳ Persistent Scatterer
^۴ Finite Element Modeling

^۱ Time Series
^۲ Persistent Scatterer

PLAXIS استفاده گردید. در این مقاله، ۱۹ تصویر سنجنده ENVISAT که در بازه زمانی ۲۰۰۳/۸/۲۲ تا ۲۰۱۰/۵/۷ اخذ شده بودند، استفاده شد. روش پردازش داده‌ها در این تحقیق، SBAS و نرم‌افزار مورد استفاده، StaMPS می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از پردازش داده‌های ENV، بیشینه مقدار جابجایی سد برابر با ۱۱ میلی‌متر در سال در جهت LOS محاسبه شد. مقایسه نتایج حاصل از داده‌های ENV با داده‌های نقشه‌برداری زمینی، حاکی از تطابق ۷۷ درصدی داده‌ها می‌باشد. حال که دقت داده‌های ENV مناسب است، به‌عنوان مقادیر اولیه در روش FEM مورد استفاده قرار گرفت [۶].

در تحقیق دیگری که توسط وانگ‌تنگ و همکاران به منظور پایش سد TGD^۱ انجام شد، از ترکیب دو روش QPSI^۲ و PSI استفاده کردند. QPSI روشی است که با هدف افزایش تعداد نقاط PS در مناطق غیر شهری که تعداد نقاط ثابت و پایدار در طول زمان کم است ایجاد شد. لازم به ذکر است که بزرگ‌ترین نقص این روش، دقت پایین نقاط استخراج شده می‌باشد. در مقابل روش PSI مناطق شهری که تعداد نقاط PS بالا می‌باشد مناسب است. در خصوص سد مورد نظر در این تحقیق، تعداد نقاط PS بر روی بدنه سد کم ولی تعداد همین نقاط بر روی مسیر آن (تاج سد) زیاد است. این نحوه توزیع نقاط، استفاده از روش PS را محدود می‌کرد، به همین دلیل استفاده از روش QPSI باعث افزایش تعداد نقاط PS می‌گردد اما با توجه به مطالب ذکر شده، دقت حاصل از روش QPSI مناسب نخواهد بود و برای پایش سد و سازه‌های از این دست، پاسخگو نیست. به همین دلیل در این تحقیق از ترکیب دو روش PSI و QPSI به نحوی استفاده گردید که ابتدا ارتفاع و سپس میزان نشست و تغییر شکل نقاطی که در روش QPSI استخراج گردید محاسبه شد، سپس در مرحله بعد، نتایج حاصل از این مرحله (روش QPSI) به صورت مقادیر اولیه برای روش PSI مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق نه تنها تغییر شکل‌های سد مورد بررسی قرار گرفت بلکه تغییر شکل‌های زمین-شناختی مربوط به مناطق حوزه سد نیز مورد بررسی و پایش قرار گرفت. سد TGD، سدی بتنی واقع در کشور

چین می‌باشد که طول آن ۲۳۵۵ متر و ارتفاع آن ۱۸۵ متر می‌باشد. به‌منظور پایش جابجایی‌های این سد در این پژوهش از ۴۰ تصویر ENVISAT که از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ اخذ شده بودند استفاده شد. برای استخراج اطلاعات با کمک روش QPS از گراف درخت پوشای کمینه و برای روش PS از گراف ستاره‌ای استفاده شد [۷].

عمادعلی و همکاران طی تحقیقی به بررسی پتانسیل تصاویر راداری برای پایش سد مسجد سلیمان پرداختند. هدف از این تحقیق، نشان دادن توانایی بالای تصاویر X باند راداری در پایش سد می‌باشد. در این مقاله با استفاده از داده‌های رزولوشن بالای X باند راداری، اطلاعات و جزئیات بیشتری از تغییر شکل در قسمت تاج و بدنه سد فراهم گردید که با روش‌های کلاسیک قابل تشخیص نبودند. در این تحقیق از ۳۷ تصویر TerraSAR-X که ۲۴ تصویر آن Descending و ۱۳ تصویر آن Ascending بود استفاده گردید. به منظور پردازش داده‌های مذکور، روش SBAS مورد استفاده قرار گرفت. برای آنالیز به این روش، اینترفروگرام‌های تفاصلی با رزولوشن حداکثر برای مناطق سد و اطراف آن تولید شد. پس از اعمال تمامی پردازش‌ها به روش SBAS، دو نرخ جابجایی محاسبه گردید؛ یکی مربوط به قسمت تاج سد و بخش‌هایی از شیب بدنه سد که در همسایگی نزدیک به تاج سد واقع شده بودند و دیگری مربوط به بخش‌هایی از شیب بدنه سد که دور از تاج واقع بوده و بخش‌های پایینی بدنه را شامل می‌شدند. نرخ جابجایی در این دو قسمت به ترتیب برابر با ۱۳ و ۷ سانتی-متر در سال در راستای LOS برآورد گردید. هم‌چنین برای ارزیابی دقت این روش از داده‌های حاصل از نقشه‌برداری زمینی مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ استفاده شد که RMSE بدست آمده در جهت افقی و عمودی به ترتیب برابر با ۰،۲۲ و ۰،۳۵ محاسبه گردید که این نتایج حاکی از دقت بسیار بالای داده‌های مورد استفاده می‌باشد [۸].

لازکی و همکاران جهت استفاده از داده‌های فضایی برای بررسی و مشاهده تغییرات سدها، سه سد TGD واقع در چین، Charvak (واقع در ازبکستان) و Plover Cove (واقع در هنگ‌کنگ) را مورد بررسی قرار دادند. جهت برآورد جابجایی‌های سد TGD از تصاویر دو سنجنده ENVISAT در بازه ۲۰۰۳-۲۰۰۸ و COSMO-SkyMED در بازه ۲۰۱۱/۲ تا ۲۰۱۱/۸ استفاده شد. به‌منظور پردازش جداگانه‌ی هر دسته داده، از ترکیب روش PSI و QPSI

^۱ Tree Gorges Dam

^۲ Quasi Persistent Scatterer In-SAR

استفاده شد. در خصوص سد خاکی Charvak از ۴۵ تصویر ماهواره Envisat که در بازه ۲۰۰۳-۲۰۱۰ اخذ گردید، استفاده شد. به منظور پردازش این داده‌ها، از تکنیک PS-InSAR با دو پیاده‌سازی مختلف استفاده گردید، یکی در نرم‌افزار SARPROZ و دیگری نرم‌افزار StaMPS. با مقایسه نتایج حاصل از این دو نرم‌افزار، هم‌خوانی و مطابقت بالایی بین نقاط آن‌ها ملاحظه گردید. میزان جابجایی این سد کمتر از ۵ میلی‌متر در سال برآورد شد. برای محاسبه میزان جابجایی سد بتنی Clover Cove از داده‌های TerraSAR-X و TanDEM-X در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ استفاده گردید. روش مورد استفاده PSI و نرم‌افزار بکار گرفته شده SARPROZ بود. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که جابجایی‌های این سد در جهت LOS از ۴ میلی‌متر در سال تجاوز نمی‌کند [۹].

پیترو میلیلو و همکاران در تحقیق خود تحت عنوان "پایش سلامت سازه سد با استفاده از داده‌های SAR و روش‌های مولتی پارامتریک" به مطالعه در خصوص جابجایی‌های سد بتنی قوسی Pertusillo پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود از سه تصویر CSK، TSX و ALOS استفاده کردند. هر یک از این داده‌ها بصورت جداگانه در نرم‌افزار SARPROZ پردازش شده و نقشه جابجایی با استفاده از هر یک از این داده‌ها تولید گردید. پراکندگی و تراکم پایین نقاط استخراج شده از داده‌های ALOS و هم-چنین رزولوشن پایین این تصاویر، سبب مشکل بودن تفسیر نتایج این نوع داده شد. به منظور افزایش رزولوشن زمانی یا به عبارتی کاهش فواصل نمونه‌برداری تصاویر، از ترکیب داده‌های TSX و CSK استفاده گردید. برای دستیابی به این هدف، ۱۱۲ تصویر X باند (۵۲ تصویر CSK و ۶۰ تصویر TSX) که در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۱۵ می‌باشند بر اساس هم‌پوشانی در مرحله ژئوکدینگ^۱ با یکدیگر تلفیق می‌شوند. با استفاده از ترکیب این دو داده، خط‌مبنای زمانی کاهش یافته و سبب افزایش دقت و سهولت در تفسیر نتایج خواهد شد. دقت نتایج حاصل از ترکیب تصاویر، از دقت هر یک از نقشه‌ها بصورت جداگانه بیشتر بود. با انجام این تحقیق مشخص شد که بیشترین دلیل وقوع جابجایی‌های این سد شکاف فصلی حرارتی و فشار هیدرواستاتیکی می‌باشد [۱۰].

لازکی و همکاران در تحقیق خود تحت عنوان "پایش سد Plover Cove با استفاده از داده‌های فضایی SAR در کشور هنگ‌کنگ" به مطالعه جابجایی‌های این سد در بازه‌ای ۳٫۵ ساله پرداختند. این سد یکی از سدهای بتنی در کشور هنگ‌کنگ می‌باشد. به منظور تهیه نقشه جابجایی برای این سد، ۶۲ تصویر TerraSAR-X و ۱۱ تصویر TanDEM-X در حالت Ascending اخذ گردید. بازه زمانی اخذ این داده‌ها ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت، ۷۳ تصویر X باند با رزولوشن بالا به-منظور انجام پردازش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نرم‌افزار استفاده شده SARPROZ و روش حل PS-InSAR می-باشد. بیشینه مقدار جابجایی سد در نقشه جابجایی استخراج شده از نرم‌افزار SARPROZ برابر با ۱۶ میلی‌متر محاسبه گردید [۱۱].

تصاویر راداری علاوه بر توانایی پایش سازه سد، قادر به برآورد جابجایی انواع سازه‌ها از جمله برج‌ها، پل‌ها، نیروگاه‌ها و ... می‌باشند. در مقاله‌ای که Matus Bakon و همکاران در سال ۲۰۱۴ منتشر کردند، بر روی سه سازه پل، ساختمان و سد مطالعه کردند. در این مقاله با استفاده از داده‌های ENVISAT، بکارگیری روش PSI و نرم‌افزار SARPROZ، مقادیر جابجایی هر سه مورد محاسبه شد. دقت نتایج استخراج شده در هر سه مورد، مناسب و در حد استاندارد اما تراکم نقاط PS استخراج شده پایین بود [۱۲].

باتوجه به پیشینه تحقیق ذکر شده و از آنجا که می-دایم روش‌های سنتی برای پایش سد، هزینه و زمان بسیار بالایی را صرف می‌کنند، نیازمند بکارگیری روشی کم هزینه، دقیق و نسبتاً سریع می‌باشیم. استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدوری از جمله تداخل‌سنجی راداری^۲ به دلیل فراهم نمودن مشاهدات گسترده و منظم از سطح زمین، هزینه پایین و صرف زمان کوتاه می‌تواند در امر اندازه‌گیری جابجایی و نشست سازه‌هایی همچون سدها مفید واقع شوند. پس هدف اصلی این تحقیق محاسبه جابجایی‌های بدنه سدهای خاکی در دو راستای قائم و افق با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری می‌باشد. به عنوان اهداف فرعی این مقاله نیز می‌توان خاطرنشان کرد که با توجه به مطالعات صورت گرفته در حوزه پایش جابجایی سدها با استفاده از داده‌های راداری سری زمانی،

^۲ Radar Interferometry

^۱ Geocoding stage covering



شکل ۱- تصویر سد داریان

این منطقه در یکی از زیر پهنه‌های زاگرس به نام زاگرس مرتفع واقع شده است. ساختمان‌های زمین‌شناسی در این محدوده همگی روند شمال غرب- جنوب شرق را دارند و گسل‌های بزرگ و سراسری منطقه نیز در همین راستا شکل گرفته‌اند. ساختگاه سد داریان در بالادست گسل داریان واقع شده است که علاوه بر این گسل، ۲۲ گسل دیگر در اطراف این منطقه موجود است. عملکرد گسل بزرگ داریان در فرسایش‌پذیری توده سنگ‌ها، تغییر شیب لایه‌ها و همچنین لغزش دیواره‌های سد تأثیرگذار است. سنگ‌های تشکیل دهنده ساختگاه سد از نوع رسوبی تخریبی و عمدتاً از جنس برش‌های آهکی با دانه‌های رادیولاریت و سنگ‌های مارنی می‌باشد. در صورت در تماس بودن سنگ‌های مارنی با آب، این سنگ‌ها اشباع شده و سبب ضعیف شدن مقاومت آن‌ها می‌گردد، همچنین با توجه به قرار گیری آهک‌ها بر روی سنگ‌های شکل‌پذیر رادیولاریتی و قرار داشتن ساختگاه سد در نزدیکی گسل داریان بطور کلی می‌توان گفت که پتانسیل چرخش بلوک‌های سنگی و لغزش لایه‌های سنگی به سمت پایین وجود دارد. همچنین وقوع زمین لغزش‌های متعدد در مجاورت ساختگاه سد، عامل تهدیدکننده دیگری برای سلامت سازه محسوب می‌گردد. همچنین به دلیل تفاوت در مصالح بکاررفته در بدنه این سد و اکثر سدهای خاکی، وقوع پدیده قوس‌زدگی پس از آبگیری سد نیز قابل انتظار است. همین پدیده سبب جابجایی‌های افقی در سازه سد شده و پایداری این سازه را تهدید خواهد کرد. وجود پدیده شکاف حرارتی^۱ از دیگر عوامل تأثیرگذار در جابجایی‌های افقی و عمودی سد داریان می-

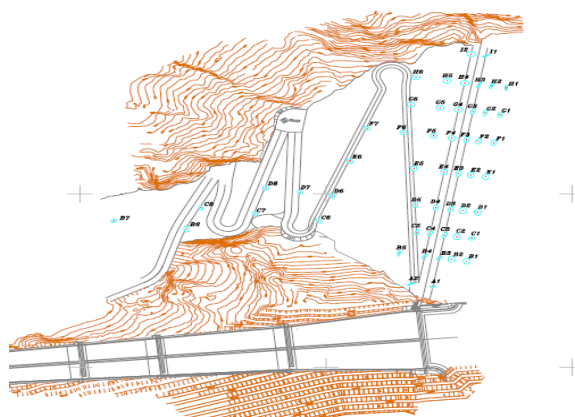
همانطور که در مطالب بالا ذکر شد، در اغلب مطالعات از داده‌های Out of date سنجنده‌های ENVISAT و ERS یا داده‌های High-resolution سنجنده‌های Xباند استفاده شده است. از اینرو حضور کم‌رنگ داده‌های رایگان و به روز Sentinel-1A به چشم می‌خورد. همچنین در مقالات محدودی که از داده‌های S-1A استفاده شده‌است، مقایسه نتایج با داده‌های زمینی و داده‌های راداری High-resolution به منظور مقایسه دقت نتایج داده‌های Cباند و Xباند صورت نگرفته است. به همین دلیل در این تحقیق به دنبال ارائه نتایج دو دسته داده باند C و X به همراه دقت‌های آن‌ها هستیم تا ثابت کنیم اختلاف بین دقت‌های بدست آمده از داده‌های سنجنده سنتینل که سنجنده‌ای Cباند بوده نسبت به سنجنده Xباند CSK، در مطالعات در مقیاس سازه سد ناچیز بوده و می‌توان با داده‌های سنجنده سنتینل نیز به دقت‌های بسیار مناسبی رسید. به همین دلیل هدف اصلی این تحقیق استفاده از داده‌های رایگان سنجنده Sentinel و بررسی دقت نتایج استخراج شده از داده‌های مورد استفاده خواهد بود. همچنین به منظور مقایسه نتایج حاصل از داده‌های C باند نسبت به داده‌های Xباند، از داده‌های سنجنده Cosmo استفاده شد.

۳- منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق سد خاکی داریان می‌باشد. سد داریان، سدی سنگریزه‌ای با هسته رسی است. طول تاج سد ۳۶۸ متر، عرض تاج ۱۵ متر، ارتفاع از پی ۱۷۹ متر، ارتفاع از بستر ۱۴۶ متر، حجم بدنه سد ۹,۷۰ میلیون متر مکعب و حجم مخزن در نرمال ۳۱۶,۳۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. تاج این سد در استان کرمانشاه و مخزن آن در استان کردستان قرار دارد و بر روی رودخانه سیروان احداث گردیده است. تاج این سد در مختصات ۳۵,۱۵۲۱ درجه شمالی و ۴۶,۳۰۷۰ درجه شرقی قرار دارد. ساخت این سد از سال ۱۳۸۶ آغاز و در سال ۹۴ خاتمه یافت. اولین آبگیری سد در آذر سال ۹۴ صورت گرفت.

^۱ Thermal delation

زمینی می‌باشد. بدین منظور از داده‌های میکروژئودزی مربوط به شرکت مه‌باب قدس استفاده گردید.



شکل ۲- شبکه نقاط نقشه‌برداری تاج و بدنه سد داریان (اقتباس از مه‌باب قدس)

۵- مبانی و روند انجام پروژه

تکنیک تداخل‌سنجی راداری به موازات توانایی‌های بالا دارای محدودیت‌هایی است که استفاده از آن را در برخی موارد ناممکن می‌سازد. ازجمله عوامل محدودکننده تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی، کمبود همدوسی ناشی از عدم همبستگی زمانی و مکانی است. جهت رفع این مشکل، در دو دهه‌ی اخیر روش‌های خاصی براساس تکنیک تداخل‌سنجی راداری ارائه شده‌اند که تنها از نقاطی که در طول زمان دارای ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً ثابتی هستند با عنوان پراکنشگرهای دائم برای پایش جابجایی استفاده می‌کنند [۱۵]. پیکسل‌های پراکنشگر دائمی با وجود خط‌مبناهای زمانی و مکانی بلند نیز همدوسی بالایی را موجب می‌شوند و از عدم همبستگی تصاویر راداری کمتر تأثیر می‌پذیرند. در این روش، یک مجموعه از پیکسل‌های پراکنشگر دائمی از طریق آنالیز رفتار دامنه آن‌ها در یک سری از تداخل‌نماها شناسایی می‌شوند و سپس بر اساس تطبیق فاز آن‌ها با یک مدل جابجایی از پیش تعیین‌شده تصفیه می‌گردند. بنابراین فقط پراکنشگرهای روشن با یک رفتار فاز جابجایی نزدیک به مدل از پیش تعریف شده به عنوان پیکسل‌های پراکنشگر دائم شناسایی می‌شوند. روش‌های موجود تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش-کننده‌های دائمی یک تکنیک مؤثر در افزایش تعداد و کیفیت فاز پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی می‌باشند. در این تکنیک سری زمانی از تصاویر SAR در بازه زمانی بلند

باشد. با توجه به وجود سیکل‌های متناوب سرما و گرما در فصول مختلف و تغییرات حجمی ناشی از این تغییرات دما و همچنین باتوجه به شرایط آب و هوایی منطقه و تداوم فصل سرما، شکاف حرارتی سبب تغییر رفتار و بروز تغییر شکل در سد خواهد شد. با توجه به مسائل ذکر شده و تعدد پارامترها و منابع ایجاد ناپایداری در سد داریان، مطالعه رفتار این سد و اطمینان از پایداری آن به‌دلیل جلوگیری از وقوع بحران ضروری به‌نظر می‌رسد. بر همین مبنا، هدف اصلی این پایان‌نامه، محاسبه نرخ جابجایی‌های افقی و عمودی سازه سد داریان با به‌کارگیری داده‌های راداری سری زمانی با استفاده از تکنیک مبتنی بر پراکنشگرهای دائم می‌باشد.

۴- داده‌های مورد استفاده

با توجه به مقالات ذکر شده در بخش پیشینه تحقیق و داده‌های استفاده شده در آن‌ها، این نکته قابل ذکر است که در غالب این تحقیقات، داده‌های تجاری و High Resolution راداری که X باند بوده و به سادگی در دسترس نیستند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند و پتانسیل استفاده از داده‌های C باند راداری از جمله Sentinel-1A که بصورت رایگان در دسترس عموم قرار دارند، مغفول مانده‌است. بنابراین هدف اصلی این تحقیق پایش بدنه سازه سد با استفاده از داده‌های راداری سنجنده Sentinel می‌باشد و به‌منظور ارزیابی دقت و مقایسه نتایج داده‌های C باند و X باند راداری، از داده‌های X باند سنجنده CSK نیز استفاده گردید. به‌منظور انجام پردازش‌ها در این تحقیق از ۳۲ تصویر S-1A در حالت Ascending با شماره گذر ۱۷۴ و همچنین ۳۲ تصویر در حالت Descending با شماره گذر ۶ و در بازه زمانی ۲۰۱۷/۲ تا ۲۰۱۸/۲ استفاده گردید. از آنجا که تصاویر اخذ شده از سد داریان توسط سنجنده CSK، تنها در حالت پایین‌گذر موجود بوده و هیچ تصویری در حالت بالاگذر از این منطقه توسط سنجنده COSMO اخذ نگردیده بود، مجبور به اخذ و پردازش داده‌های X باند این سنجنده تنها در یک گذر شدید. تصاویر سری زمانی این سنجنده در مسیر پایین-گذر و به تعداد ۲۱ تصویر در بازه زمانی ۲۰۱۷/۱۱ تا ۲۰۱۸/۱۲ می‌باشد. همچنین به‌منظور ارزیابی دقت نتایج حاصل از داده‌های S-1A، نیاز به داده‌های نقشه‌برداری

مدت با استفاده از پراکنشگرهای دائمی پردازش شده و جابجایی زمین با دقت‌های میلی‌متری برآورد می‌گردد. با توجه به مزایای یاد شده در مورد داده‌های راداری، صرف زمان و هزینه کم‌تر و از طرفی توجه به این امر که سازه‌های دست‌ساز بشر به‌عنوان پراکنش‌گر دائمی شناسایی می‌گردند، استفاده از روش‌های تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان روشی مناسب و دقیق برای مطالعه سلامت سازه‌ها پیشنهاد می‌گردد، از اینرو روش مورد استفاده در این تحقیق نیز روش PSI در نظر گرفته شد که در ادامه به معرفی دقیق آن خواهیم پرداخت.

۵-۱- پردازش سری زمانی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی

می‌توان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی و یا پراکنش‌کننده‌های دائمی رفتار تغییرشکل یک پدیده را در زمان بررسی نمود که به آن تحلیل سری زمانی می‌گوییم. در این صورت می‌بایست چندین تصویر در بازه‌های زمانی متفاوت از منطقه در دسترس باشد و چندین تداخل‌نما^۱ بین بازه‌های زمانی متفاوت جهت محاسبه‌ی نرخ تغییرشکل وارد محاسبات گردد. هدف اصلی در تحلیل سری زمانی، معکوس نمودن فاز تداخل‌نماها برای دستیابی به میزان تغییر شکل در زمان‌های اخذ تصویر با استفاده از روش کمترین مربعات می‌باشد. اگر تعداد تداخل‌نماها حداقل به تعداد تصاویر راداری باشد و زنجیره‌ی آن‌ها درجایی گسسته نشده باشد، می‌توان با استفاده از تحلیل سری زمانی مقادیر جابجایی را در زمان‌های مربوط به اخذ تصاویر برآورد کرد. در برخی مناطق به دلیل تغییرات سریع ویژگی پراکنشی عوارض در فاصله‌ی زمانی بین برداشت دو تصویر و یا بلند بودن طول خط‌مبنای مکانی میان تصاویر نمی‌توان تداخل‌نمای همبسته ایجاد نمود. همچنین فاز تداخل‌نماهایی که درجه‌ی همبستگی پایینی دارند را نمی‌توان به‌درستی بازیابی کرد. در نتیجه، عدم همبستگی مکانی و زمانی حاصل می‌گردد و نمی‌توان شبکه‌ای پیوسته از تداخل‌نماها تولید نمود که از جمله نقاط ضعف تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی محسوب می‌گردد. محدودیت‌های تکنیک تداخل‌سنجی راداری سنتی، موجب توسعه‌ی تکنیکی با عنوان پراکنشگرهای دائمی در تداخل‌سنجی

راداری شد. پیکسل‌های پراکنشگر دائم حتی در حدود بحرانی خطوط مبنای زمانی و مکانی نیز دارای همدوسی بالایی هستند.

پراکنشگرهای دائمی بر پایه آنالیز دامنه تصاویر SAR در کل سری زمانی و از طریق محاسبه شاخص پراکندگی دامنه^۲ (ADI) انتخاب می‌شوند. شاخص پراکندگی دامنه برای پیکسل n با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$D_n = \frac{\sigma_n}{m_n} \quad (1)$$

در این رابطه σ_n و m_n به ترتیب انحراف معیار و میانگین مقادیر دامنه برای پیکسل n در تمام تصاویر هستند. با انتخاب پراکنشگرهای دائمی تداخل‌نماهای تمام تصاویر SAR نسبت به یک تصویر (تصویر پایه) در نقاط PS محاسبه می‌گردد، لذا برای یک سری زمانی متشکل از $N+1$ تصویر، N تداخل‌نما تولید می‌شود. تصویر پایه تصویری خواهد بود که همدوسی تجمعی کل تداخل‌نماها نسبت به آن تصویر بیشترین مقدار باشد [۱۳]. همدوسی تجمعی تابعی از خط مبنای مکانی قائم، خط مبنای زمانی و فرکانس مرکز داپلر^۳ می‌باشد و از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد [۱۴].

$$\gamma^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(B_{\perp}^{i,k}, B_{\perp}^{max}) g(T_{dc}^{i,k}, T_{max}) g(f_{dc}^{i,k}, f_{dc}^{max}) \quad (2)$$

$$g(x, c) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{c} & \text{for } |x| \leq c \\ 0 & \text{for } |x| > c \end{cases}$$

در رابطه بالا، γ^k همدوسی تجمعی برای تصویر پایه k ام و $B_{\perp}^{max}$ ، T_{max} ، f_{dc}^{max} به ترتیب مقادیر بیشینه برای خط مبنای مکانی قائم، خط مبنای زمانی و فرکانس مرکزی داپلر می‌باشند. پس از انتخاب تصویر پایه و تشکیل تداخل‌نماها، فاز تداخل‌نما برای هر PS در تداخل‌نمای تشکیل شده از تصویر پیرو i ام و تصویر پایه k بصورت رابطه ۳ خواهد بود.

$$\Delta\Phi_{i,k} = \Delta\Phi_{i,k}^{flat}(p) + \Delta\Phi_{i,k}^{height}(p) + \Delta\Phi_{i,k}^{disp}(p) + \Delta\Phi_{i,k}^{atmo}(p) + \Delta\eta_{i,k}(p) \quad (3)$$

^۲ Amplitude Dispersion Index

^۳ Doppler Centroid Frequency

^۱ Interferogram

کوچکتر از یک کیلومتر مربع باشد، چون اتمسفر در مکان همبسته است می‌توان از اثر اتمسفر صرف نظر کرد، لذا در رابطه ۱۱، مجهولات مسئله $\Delta h(p)$ و $\Delta V(P)$ خواهند بود. باتوجه به این نکته که سمت چپ معادله ۶ بین π و $-\pi$ مدوله (اصطلاحاً Wrap) می‌باشد ولی سمت راست این رابطه شامل فازهای Unwrap است، لذا سیستم غیر خطی خواهد بود. برای حل مسئله از جست و جو در فضای فرکانسی دو بعدی (که بعدها این فضا $\Delta h(p)$ و $\Delta V(p)$ هستند) و تابع پریودوگرام^۲ (رابطه ۷) استفاده می‌شود. [۱۵]

$$\xi[\Delta V(P), \Delta h(p)] = \frac{1}{N_I} \sum_{i=1}^{N_I} e^{j[\Delta \Phi_{i,k}(p) - C_v \Delta V(p) B_{t,i} - C_h \Delta h(p) B_{n,i}]} \quad (7)$$

که در معادله ۷، $C_v = \frac{4\pi}{\lambda}$ و $C_h = \frac{4\pi}{\lambda R_k \sin \theta}$ می‌باشد. جواب مسئله $\Delta h(p)$ ، $\Delta V(p)$ خواهد بود که به ازای آن‌ها مقدار مطلق پریودوگرام بیشینه شود:

$$\Delta V(P), \Delta h(p) = \operatorname{argmax}\{\xi[\Delta V(P), \Delta h(p)]\} \quad (8)$$

اما در صورتی که منطقه مورد پردازش از یک کیلومتر مربع بزرگتر باشد نمی‌توان از فاز اتمسفر صرف نظر کرد، لذا برای حل مسئله از یک شبکه مکانی بین نقاط پراکنشگرهای دائم و محاسبه اختلاف فاز بین PS‌های مجاور استفاده می‌شود [۱۴].

با محاسبه اختلاف فاز بین PS‌های دو سر هر یال شبکه در هر تداخلنما، فاز یال‌های شبکه مکانی برآورد می‌گردد که مشابه رابطه ۹ فاز هر یال شبکه، بین دو پراکنشگر دائمی P_1 و P_2 برابر خواهد بود با:

$$\Delta \Phi_{i,k}^{p_1.p_2} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{n,i}}{R_k} \frac{\Delta h(p_1.p_2)}{\sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta V(P_1.p_2) B_{t,i} + \Delta \Phi_{i,k}^{atmo}(p_1.p_2) + \Delta \eta_{i,k}(p_1.p_2) \quad (9)$$

در رابطه ۹، $\Delta h(p_1.p_2)$ ، $\Delta V(p_1.p_2)$ و $\Delta \Phi_{i,k}^{atmo}(p_1.p_2)$ به ترتیب باقیمانده توپوگرافی، سرعت جابجایی و فاز اتمسفر بین دو پراکنشگر P_1 و P_2 خواهد بود. در این حالت با توجه به اینکه فاصله PS‌ها کمتر از یک کیلومتر است، لذا می‌توان از ترم دوم $\Delta \Phi_{i,k}^{atmo}(p_1.p_2)$

رابطه ۳ به ترتیب شامل فازهای زمین مسطح، توپوگرافی، جابجایی در راستای خط دید سنجنده (LOS)^۱، اثر اتمسفر و نویز می‌باشد. ترم اول (فاز زمین مسطح) با استفاده از اطلاعات دقیق مداری قابل حذف است. ترم دوم رابطه ۳ فاز ناشی از توپوگرافی می‌باشد که با استفاده از رابطه ۴ و یک مدل رقومی ارتفاعی قابل محاسبه و حذف می‌باشد؛ باید توجه داشت که چون مدل رقومی مورد استفاده دارای خطاست لذا پس از حذف ترم توپوگرافی، باقی‌مانده فاز توپوگرافی بر روی تداخلنماها خواهد ماند که به عنوان یکی از مجهولات بایستی برآورد گردد.

$$\Delta \Phi_{i,k}^{height}(p) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{n,i}}{R_k} \frac{h(p)}{\sin \theta} \quad (4)$$

که در رابطه ۴، $B_{n,i}$ خط مبنای مکانی قائم، Δh ارتفاع هدف مورد نظر نسبت به یک نقطه مرجع، θ زاویه فرودی و R_k فاصله سنسور تا هدف در تصویر پایه می‌باشند. ترم سوم رابطه ۳ جابجایی در راستای خط دید سنجنده است، روش رایج به منظور مدل کردن جابجایی، خطی فرض کردن این ترم در زمان می‌باشد که می‌توان به صورت رابطه ۵ نوشت:

$$\Delta \Phi_{i,k}^{disp}(p) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta V(P) B_{t,i} \quad (5)$$

در رابطه ۵، $\Delta V(p)$ سرعت هدف مورد نظر نسبت به نقطه مرجع، $B_{t,i}$ خط مبنای زمانی می‌باشد [۱۵]. ترم چهارم رابطه ۳، فاز ناشی از اتمسفر است که پارامتری همبسته در مکان برای فواصل کمتر از یک کیلومتر و ناهمبسته در زمان می‌باشد و براساس همین ویژگی برآورد می‌گردد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

با توجه به مطالب بیان شده فاز زمین مسطح و توپوگرافی برآورد گردیده و از روی تمامی تداخلنماها حذف می‌شوند. پس از حذف دو ترم مذکور رابطه ۳ به صورت رابطه ۶ قابل بازنویسی می‌باشد:

$$\Delta \Phi_{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{n,i}}{R_k} \frac{\Delta h(p)}{\sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta V(P) B_{t,i} + \Delta \Phi_{i,k}^{atmo}(p) + \Delta \eta_{i,k}(p) \quad (6)$$

در رابطه ۶، $B_{t,i}$ مقدار باقی‌مانده توپوگرافی است. به منظور حل معادله در صورتی که ابعاد منطقه مورد مطالعه

^۲ Periodogram

^۱ Line of Sight

بر روی هر یال شبکه صرف نظر کرد، در نتیجه مجهولات مسئله باقیمانده توپوگرافی $(\Delta h(p1,p2))$ و سرعت جابجایی $(\Delta V(p1,p2))$ برای یال بین دو پراکنشگر دائمی خواهند بود؛ که با همان روش پریودوگرام برآورد می‌گردند. پس از برآورد سرعت جابجایی و باقیمانده توپوگرافی برای یال‌های شبکه مکانی، با استفاده از یک فرآیند تجمیع^۱ دو پارامتر سرعت جابجایی و باقی‌مانده توپوگرافی در نقاط PS محاسبه می‌گردند.

با کسر فاز دو پارامتر محاسبه شده، از تداخلنماها، فاز باقیمانده شامل اتمسفر و نویز در نقاط پراکنشگر دائمی خواهد بود. با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر مکانی و بالاگذر زمانی سهم فاز اتمسفر نیز جدا می‌شود به این ترتیب پس از جداسازی سهم اتمسفر، فاز باقی‌مانده فقط شامل نویز خواهد بود که به منظور ارزیابی صحت مدل مورد استفاده برای برآورد پارامترهای مجهول از رابطه ۱۰ که معروف به همدوسی زمانی است، استفاده می‌شود و هرچه مقدار این کمیت به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده انطباق مدل با داده‌های مورد استفاده خواهد بود.

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{i\phi} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰ فاز تداخلنماها پس از کسر سهم فاز پارامترهای جابجایی، باقی‌مانده توپوگرافی و اتمسفر می‌باشد. در نهایت واریانس جابجایی و باقیمانده توپوگرافی برآورد شده به پراکندگی باقی‌مانده فاز (یا همان فاز نویز) و پراکندگی خطوط مبنای مکانی و زمانی در مجموعه تداخلنماها بستگی دارد [۱۶] که بصورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

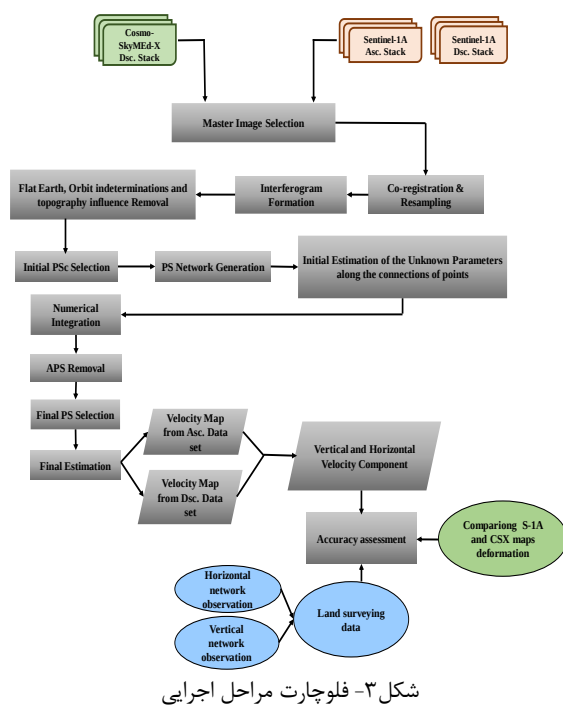
$$\sigma_{\Delta h}^2 = \left(\frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi} \right)^2 \frac{\sigma_{\phi}^2}{M \sigma_{B_n}^2} \quad (11)$$

$$\sigma_{\Delta v}^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{\sigma_{\phi}^2}{M \sigma_{B_t}^2}$$

در رابطه (۱۱)، $\sigma_{\Delta h}^2$ ، واریانس باقیمانده توپوگرافی برآورد شده $\sigma_{\Delta v}^2$ واریانس جابجایی برآورد شده و M ، $\sigma_{B_n}^2$ ، $\sigma_{B_t}^2$ به ترتیب تعداد تداخلنماها، واریانس نویز، واریانس خطوط مبنای مکانی قائم و واریانس خطوط مبنای زمانی می‌باشند که می‌تواند به عنوان دقتی از برآوردهای انجام شده در نظر گرفته شود.

^۱ Integration

بر اساس مطالب ذکر شده در بخش قبل، فرآیند تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی به منظور پردازش سری زمانی تصاویر و برآورد جابجایی نقاط PS که روش مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد، به صورت کامل تشریح شد. فلوچارت شکل ۳ مراحل انجام شده در این تحقیق از آغاز تا پایان را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که نرم‌افزار استفاده شده در این پژوهش برای پردازش داده‌های راداری S-1A نرم‌افزار SARPROZ می‌باشد.

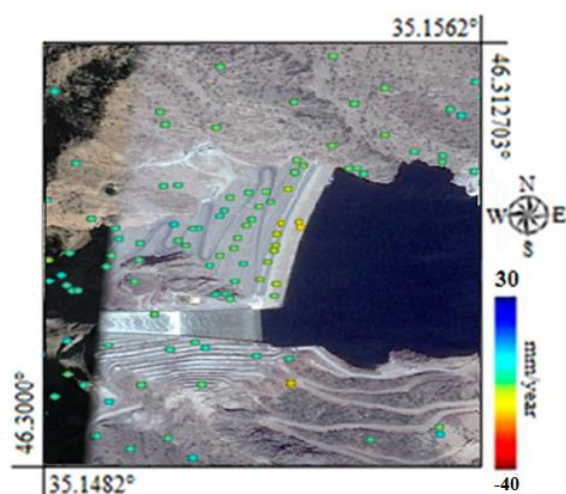


شکل ۳- فلوچارت مراحل اجرایی

۵-۲- نتایج حاصل از پردازش داده‌های S-1A

با توجه به پردازش‌های مختلف صورت گرفته بر روی تصاویر راداری Sentinel-1A در حالت ASC و DSC مربوط به سد داریان، مشخص شد که بخش عمده‌ی سیگنال جابجایی را سیگنال با رفتار غیرخطی در طول زمان تشکیل می‌دهد؛ از اینرو در این مطالعه از سهم فاز خطی صرف‌نظر شده و در هر دو حالت بالاگذر و پایین‌گذر، رفتار جابجایی سد با فرض غیر خطی بودن جابجایی، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور اثبات درستی مدل استفاده شده، شبکه‌ی مکانی نقاط پس از حل مسئله روی یال‌ها و همدوسی زمانی نقاط پس از حذف اثر اتمسفر برای منطقه سد داریان با استفاده از حل مدل غیرخطی در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است.

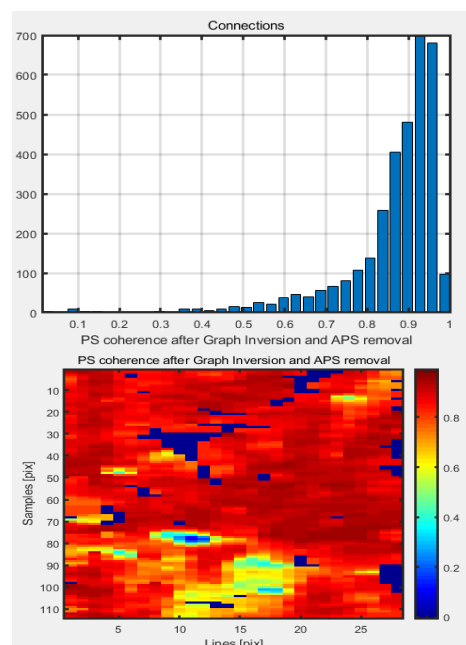
ابتدا پردازش داده‌های سری زمانی Sentinel-1A مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائم در حالت ASC برای گذر ۱۷۴ و در بازه زمانی یکساله (۲۰۱۷/۲ تا ۲۰۱۸/۲) برای سد داریان انجام شد. در تمامی پردازش‌ها ثبت هندسی تصاویر نسبت به یک تصویر (تصویر پایه) انجام گرفت. تصویر پایه همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد براساس بیشینه نمودن هم‌دوسی تجمعی با در نظر گرفتن تمامی تصاویر انتخاب می‌گردد. از این رو تصویر ۲۰۱۷/۷/۲۱ به عنوان تصویر پایه انتخاب گردید و تصاویر پیرو نسبت به آن ثبت هندسی و نمونه‌برداری شدند. پس از ثبت هندسی، تداخل‌نماها براساس گراف ستاره‌ای تشکیل شدند. فاز زمین مسطح با استفاده از اطلاعات دقیق مداری تصاویر اخذ شده از روی تداخل‌نماها حذف گردید. همچنین به منظور حذف فاز توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاعی SRTM استفاده گردید و سایر پردازش‌ها همانطور که در بخش قبل آورده شد، انجام گرفت. نتایج حاصل از پردازش این سری داده در شکل ۶ موجود است.



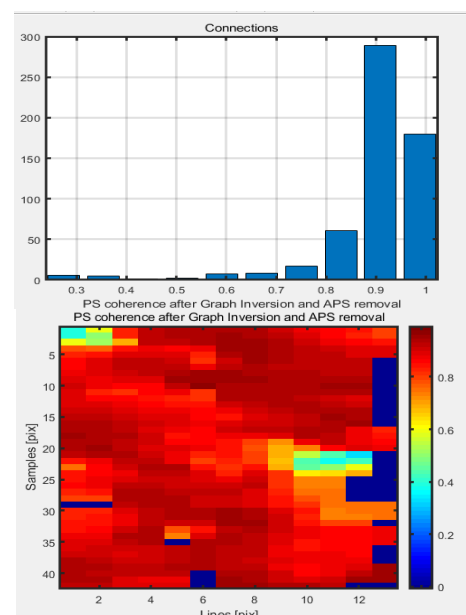
شکل ۶- جابجایی نقاط PS مربوط به سد در راستای LOS برای تصاویر سنجنده S-1A

در مرحله بعد داده‌های سری زمانی همین منطقه اما در حالت DSC با شماره گذر ۶ و در همان بازه زمانی (۲۰۱۷/۲ تا ۲۰۱۸/۲) مورد پردازش قرار گرفتند که خروجی حاصل از این مرحله نیز در شکل ۷ نمایش داده شده است.

دو شکل ۴ و ۵ نشان می‌دهند که فرض غیرخطی بودن مدل جابجایی درست می‌باشد، چراکه مدل استفاده شده باعث کاهش هم‌دوسی زمانی نقاط در نواحی دارای جابجایی یا فرونشست نشده و مقادیر هم‌دوسی زمانی به سمت مقدار بیشینه خود که برابر با یک است میل کرده که این خود نشان دهنده درستی مدل استفاده شده می‌باشد.

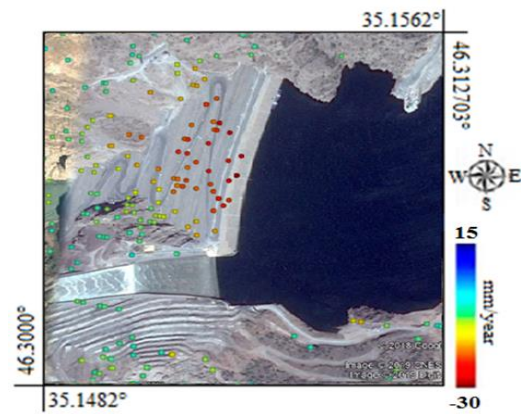


شکل ۴- هم‌دوسی نقاط PS پس از حذف اثر اتمسفر مربوط به تصاویر DSC



شکل ۵- هم‌دوسی نقاط PS پس از حذف اثر اتمسفر مربوط به تصاویر S-1A سنجنده

حال که درستی مدل استفاده شده اثبات گردید، به ارائه نتایج حاصل از پردازش‌ها خواهیم پرداخت.



شکل ۷- جابجایی نقاط PS مربوط به سد در راستای LOS برای تصاویر DSC سنجنده S-1A

دو نقشه جابجایی شکل ۶ و ۷، میزان جابجایی سد داریان در بازه یکساله در جهت LOS را نمایش می‌دهند اما هدف ما برآورد جابجایی‌های افقی و عمودی این سد می‌باشد. با توجه به در دسترس بودن هر دو مسیر بالا و پایین- گذر از سنجنده S-1A قادر به برآورد مؤلفه‌های قائم و افقی از روی مؤلفه LOS خواهیم بود. از آنجایی که مدار ماهواره‌های راداری مدار نزدیک قطبی است، جابجایی‌های موجود در راستای شمال، مؤلفه‌ی قابل توجهی بر روی راستای خط دیدار رادار نخواهد داشت. در نتیجه از برآورد این مؤلفه صرف‌نظر می‌گردد و تنها مؤلفه‌های شرقی- غربی و ارتفاعی محاسبه می‌شوند. بدین منظور نتایج هر دو گذر با هم از نقطه نظر زمانی و مکانی تلفیق می‌شوند. نتایج حاصل از دو گذر به‌طور جداگانه در سیستم مختصات راداری تصاویر پایه‌ی مربوط به همان گذر به‌دست آمده‌اند. برای برقراری ارتباط بین این دو سطح مبنا از پیکسل‌های پراکنشگر دائم استفاده شده است. از آنجاییکه این نقاط در طول زمان کمتر دچار عدم همبستگی زمانی می‌شوند، دارای موقعیت ثابتی هستند و چون پیکسل‌های پراکنشگر دائم یکسانی در هر دو گذر وجود دارند می‌توان از طریق مشاهدات مختصات آن‌ها، سیستم مختصات دو گذر را به هم مرتبط کرد [۱۷].

به کمک رابطه ۱۲ دو مؤلفه‌ی قائم و افق از جابجایی با صرف‌نظر از مؤلفه‌ی جابجایی در راستای شمال بدست می‌آیند.

$$d_r = d_u \cos(\theta) - \sin(\theta) [d_n \cos\left(a_n - 3\frac{\pi}{2}\right) + d_e \sin\left(a_n - 3\frac{\pi}{2}\right)] \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، d_r ، میزان جابجایی اندازه‌گیری شده در راستای LOS، d_u مؤلفه‌ی جابجایی در راستای قائم، d_n و

de به ترتیب مؤلفه‌های جابجایی در راستای شمال-جنوب و شرقی-غربی، θ زاویه فرودی و a_n زاویه‌ی آزمون مدار ماهواره می‌باشند.

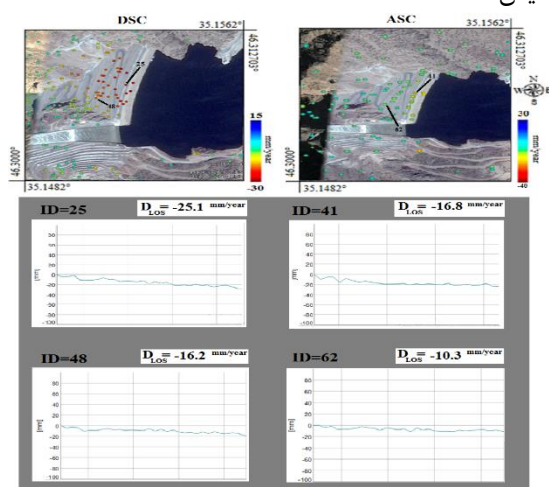
از آنجا که فرمول ۱۲ یک معادله با دو مجهول خواهد بود، با استفاده از دو فرمول ۱۳ و ۱۴ می‌توان به سادگی با استفاده از مقدار جابجایی محاسبه شده برای هر نقطه PS در راستای LOS برای هر دو گذر Ascending و Descending، به مقدار جابجایی در راستای قائم و شرقی- غربی دست یافت [۱۸].

$$d_{east-west} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{DSC}}{\sin \theta_{DSC}} - \frac{d_{ASC}}{\sin \theta_{ASC}} \right) \quad (12)$$

$$d_{up-down} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{DSC}}{\cos \theta_{DSC}} + \frac{d_{ASC}}{\cos \theta_{ASC}} \right) \quad (13)$$

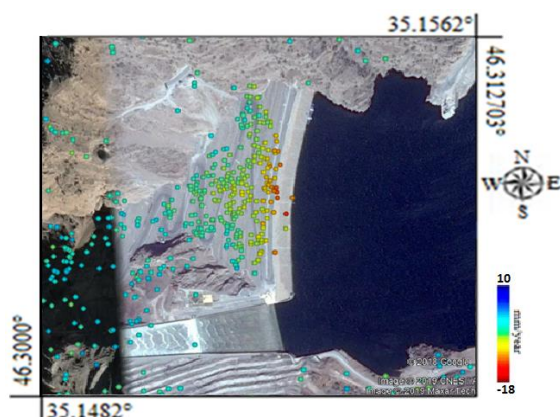
برای محاسبه مقدار جابجایی نقاط در دو راستای east-west و Vertical می‌بایست نقاط PS‌ای که در هر گذر DSC و ASC دارای مختصات برابر یا نزدیک به هم می‌باشند را پیدا کرده و در فرمول ۱۳ و ۱۴ جایگذاری کرد.

قبل از تجزیه بردارهای جابجایی، برای تعیین درستی نتایج بدست آمده از داده‌های سنجنده S-1A، ابتدا رفتار کلی تعدادی از نقاط PS بدست آمده از داده‌های ASC و DSC را با یکدیگر مقایسه کرده و در صورت همخوانی رفتار کلی نقاط متناظر، به تجزیه بردارهای جابجایی و ارزیابی دقت خواهیم پرداخت. در شکل ۸، دو نقطه متناظر که دارای مختصات‌های تقریباً برابر در تصاویر DSC و ASC بودند انتخاب گردید و نمودار رفتار جابجایی برای این نقاط ترسیم شده و نرخ جابجایی برای این نقاط نمایش داده شده است.



شکل ۸- ترسیم رفتار کلی دو نقطه متناظر در نتایج تصاویر ASC و DSC سنجنده S-1A برای سد داریان

باشد. در پردازش این سری داده‌ها، تصویر مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۲۱/۰۶ به عنوان تصویر پایه انتخاب گردید و ۲۰ تصویر پیرو نسبت به آن ثبت هندسی و نمونه‌برداری شدند. با توجه به پردازش‌های مختلف صورت گرفته بر روی تصاویر راداری DSC سنجنده CSK سد داریان، مشخص شد که بخش عمده‌ی سیگنال جابجایی در این تصاویر را سیگنال با رفتار خطی در طول زمان تشکیل می‌دهد، بدین ترتیب با در نظر گرفتن رفتار خطی جابجایی در طول زمان، پردازش-های تصاویر سنجنده CSK نیز انجام شد و نتیجه حاصل در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



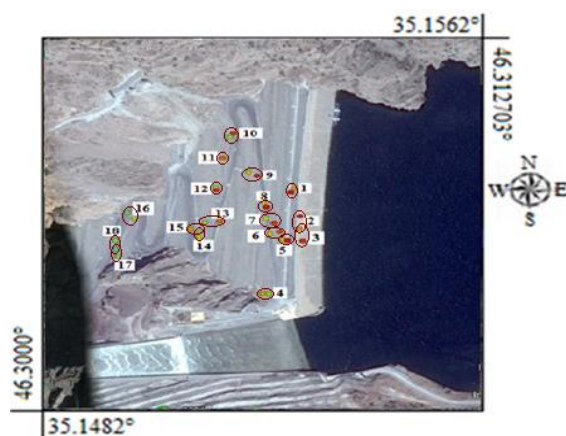
شکل ۱۰- نقشه جابجایی بدست‌آمده برای سد داریان با استفاده از تصاویر سنجنده CSK در حالت Descending

از آنجا که تصاویر موجود از سد داریان در آرشیو سنجنده CSK، تنها در یک گذر (Descending) موجود بود، نمی‌توان جابجایی در راستای LOS حاصل از پردازش این تصاویر را به جابجایی در راستای افق و قائم تجزیه نمود، از اینرو به منظور ارزیابی دقت نتایج حاصل از پردازش داده‌های این سنجنده و از آنجا که داده‌های میکروژئودزی این سد در بازه‌ی هم‌زمان با تصاویر COSMO موجود است، به صورت زیر عمل می‌کنیم.

داده‌های میکروژئودزی سد داریان، جابجایی این سد در سه راستای شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و قائم را دارا می‌باشد، با در دست داشتن این مقادیر جابجایی و مقادیر مربوط به زاویه فرود و آزمون سنجنده CSK، می‌توان جابجایی در سه راستای ذکر شده را به جابجایی در راستای LOS تبدیل کرده و با نتایج حاصل از پردازش تصاویر COSMO مقایسه نمود، بدین منظور و برای دستیابی به مقدار جابجایی در راستای LOS، از رابطه زیر استفاده شد [۱۷].

باتوجه به شکل ۸، مشخص است که رفتار کلی جابجایی نقاط متناظر در هر دو حالت ASC و DSC با یکدیگر مشابه بوده و هم‌خوانی بالایی دارند. بر این اساس مشخص است که نتایج استخراج شده صحیح بوده و می‌توان وارد مرحله بعد و تجزیه بردارهای جابجایی و در نهایت ارزیابی دقت شد. همچنین ذکر این نکته ضروری است که تفاوت در مقادیر جابجایی محاسبه شده در تصاویر ASC و DSC، ناشی از تفاوت در زاویه دید سنجنده نسبت به منطقه در این دو حالت بوده که امری طبیعی می‌باشد. حال وارد مرحله تجزیه بردارهای جابجایی خواهیم شد.

به‌منظور تجزیه بردار جابجایی در دو راستای افقی و عمودی، بایستی نقاطی که در هر دو تصویر دارای مختصات نزدیک و یا برابر هستند را مشخص نماییم. شکل ۹ نقاطی را که در هر دو گذر دارای مختصات نزدیک به هم می‌باشند، نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز مقادیر جابجایی محاسبه شده در راستای افقی و عمودی را برای نقاط شکل ۹ بر اساس فرمول‌های ذکر شده را نمایش می‌دهد. همچنین نقاط میکروژئودزی که جابجایی آن‌ها توسط شرکت مهتاب قدس برآورد شده بود و دارای مختصاتی نزدیک به مختصات نقاط PS شکل ۹ بودند، در این جدول آورده شده است.



شکل ۹- نقاط دارای مختصات برابر یا نزدیک به هم در هر دو گذر Ascending و Descending سنجنده S-1A سد داریان

۵-۳- نتایج حاصل از پردازش داده‌های CSK

تصاویر اخذ شده از سنجنده CSK برای سد داریان، شامل ۲۱ تصویر در بازه زمانی ۲۰۱۷/۱۱ تا ۲۰۱۸/۱۲ می‌باشد. تمامی مراحل پردازشی همانند پردازش تصاویر S-1A می‌-

ID	جابجایی محاسبه شده در راستای east-west (PSI method) (mm)	جابجایی محاسبه شده در راستای east-west (داده‌های میکروژئودزی) (mm)	جابجایی محاسبه شده در راستای vertical (PSI method) (mm)	جابجایی محاسبه شده در راستای vertical (داده‌های میکروژئودزی) (mm)
۱	-۶,۶۳۷۷۸	-	-۲۴,۵۵۴۳	-
۲	-۵,۸۶۰۸۳	-۸,۷۵	-۲۶,۹۶۲۸	-۲۳,۵۸
۳	-۵,۹۶۳۴۷	-	-۲۴,۱۵۸۶	-
۴	-۳,۰۹۵۶	-۰,۸۶	-۱۰,۰۸۶۸	-۶,۲۸
۵	-۲,۶۶۷۹۱	-۵,۱۶	-۲۰,۸۶۷۳	-۱۶,۳۳
۶	-۸,۹۱۶۲۸	-۶,۸۴	-۱۷,۶۱۱۴	-۱۴,۰۸
۷	-۱۰,۷۷۹۱۵	-۸,۳۲	-۱۷,۳۷۳۴	-۱۶,۱۸
۸	-۹,۳۸۲۳۸	-	-۲۰,۷۵۲۶	-
۹	-۱۲,۱۹۸۹	-۹,۹	-۱۸,۹۰۶۹	-۱۳,۰۶
۱۰	-۱۰,۰۴۲۳	-	-۱۴,۶۶۱۶	-
۱۱	-۸,۸۳۹۲	-۵,۸۶	-۱۲,۶۰۵۲	-۸,۱۴
۱۲	-۷,۸۲۳۶	-۵,۹۷	-۱۵,۰۷۹۸	-۱۰
۱۳	-۶,۰۰۱۳	-۴,۹۷	-۱۱,۷۷۷۲	-۸,۶
۱۴	-۵,۳۸۲۲۲	-	-۶,۵۱۰۴۵	-
۱۵	-۴,۵۰۳۸	-۱,۱۶	-۸,۶۶۰۵۸	-۶,۸۳
۱۶	-۲,۹۶۳۷۸	-	-۳,۴۶۴۵۱	-
۱۷	-۲,۳۰۰۷۱	-	-۰,۳۳۷۸۵	-
۱۸	-۲,۰۴۰۱۶	-	-۰,۹۱۶۱۸	-

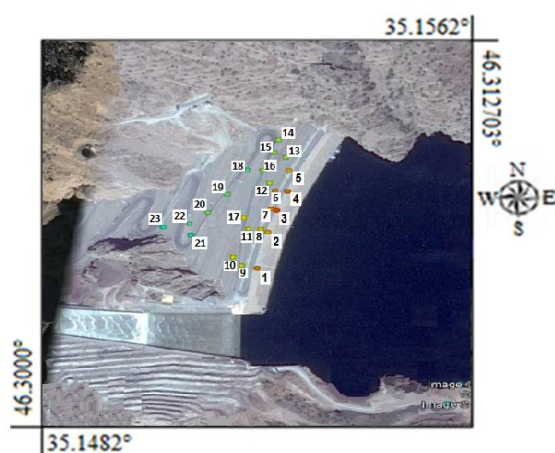
جدول ۱- مقایسه نتایج حاصل از تبدیل جابجایی محاسبه شده توسط سنجنده S-1A در راستای LOS به جابجایی در دو راستای افقی و عمودی با استفاده از داده‌های پایشی میکروژئودزی و ترازایی دقیق (سد داریان)

ارزیابی دقت برای تمامی این نقاط صورت گرفته است که نتایج حاصل در جدول ۲ آورده شده است.

$$d_r = d_u \cos(\theta) - \sin(\theta) \left[d_n \cos\left(a_h - 3\frac{\pi}{2}\right) + d_e \sin\left(a_h - 3\frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (15)$$

در این فرمول d_r میزان جابجایی اندازه‌گیری شده در راستای LOS، d_u مؤلفه‌ی جابجایی در راستای قائم، d_n و d_e به ترتیب مؤلفه‌های جابجایی در راستای شمال-جنوب و شرقی-غربی، θ زاویه فرودی و a_h زاویه‌ی آزیموت مدار ماهواره می‌باشند. لازم به ذکر است که مقادیر زاویه فرود و آزیموت تصاویر Descending سنجنده CSK به ترتیب برابر با $۲۳,۹۱۶۲^\circ$ و $۳۴۸,۶۳۸۶^\circ$ می‌باشند. مقادیر مربوط به جابجایی در سه راستای شمال-جنوب، شرقی-غربی و قائم، توسط داده‌های میکروژئودزی که از شرکت مهتاب قدس اخذ شده است، در اختیار ما قرار دارند. هم-چنین زاویه مربوط به آزیموت و زاویه فرود سنجنده نیز موجود است. با داشتن این ۵ پارامتر می‌توان مقادیر را در رابطه ۱۵ قرار داده و مقدار جابجایی نقاط در راستای خط دید سنجنده CosmoSkyMed-X را بدست آورد.

در شکل ۱۱، نقاط IPS ای که با نقاط میکروژئودزی از نظر مختصات، برابر یا نزدیک به هم بودند مشخص شده و



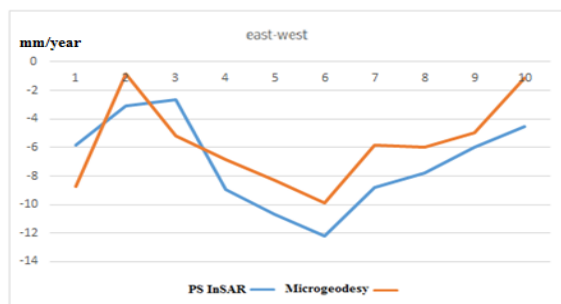
شکل ۱۱- نقاط IPS ای که دارای مختصات برابر یا نزدیک با نقاط میکروژئودزی هستند

برای محاسبه RMSE مربوط به داده‌های سنجنده S-1A از آنجا که طبق جدول ۱، مقادیر جابجایی در دو راستای افق و قائم را برای هر دو داده‌ی میکروژئودزی و نتایج سنجنده S-1A داریم، می‌توان مقدار دقت را برای هر دو راستا بصورت جداگانه محاسبه نمود. همچنین برای محاسبه دقت داده‌های سنجنده CSK نیز طبق جدول ۲، با داشتن جابجایی در راستای LOS برای دو داده میکروژئودزی و نتایج سنجنده CSK، می‌توان مقدار RMSE را در راستای LOS محاسبه نمود. پس از جایگذاری مقادیر جدول ۱ در فرمول RMSE، مقادیر محاسبه شده برای دقت جابجایی در راستای east-west و Vertical برای داده‌های سنجنده S-1A و با جایگذاری مقادیر جدول ۲ در فرمول RMSE، مقادیر محاسبه شده برای دقت جابجایی در راستای LOS برای سنجنده CSK محاسبه شد.

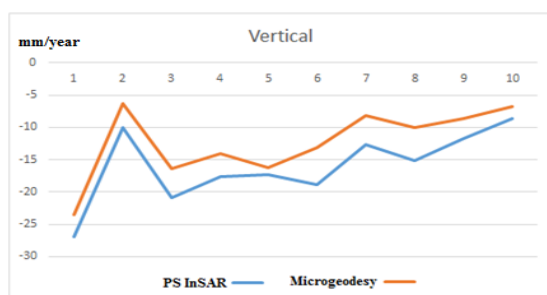
$$\text{RMSE Horizontal (S-1A)} = 2.43 \text{ mm}$$

$$\text{RMSE Vertical (S-1A)} = 3.9012 \text{ mm}$$

در ادامه به منظور مقایسه نتایج بدست آمده، نمودار هر یک از نتایج در راستای ASC، DSC برای سنجنده S-1A و در راستای LOS برای سنجنده CSK ترسیم شده است که می‌توان میزان همخوانی نتایج میکروژئودزی با نتایج داده‌های راداری را مقایسه نمود.



شکل ۱۲- مقایسه نتایج داده‌های راداری و میکروژئودزی سد داریان در راستای افقی با استفاده از نتایج سنجنده S-1A



شکل ۱۳- مقایسه نتایج داده‌های راداری و میکروژئودزی سد داریان در راستای قائم با استفاده از نتایج سنجنده S-1A

جدول ۲- مقایسه نتایج حاصل از تبدیل جابجایی در راستای افق و قائم به جابجایی در راستای LOS (با استفاده از داده‌های میکروژئودزی) با جابجایی محاسبه شده توسط سنجنده CSK در راستای LOS (سد داریان)

ID	جابجایی محاسبه شده در راستای LOS (PSI) (mm)(method)	جابجایی محاسبه شده در راستای vertical (داده‌های میکروژئودزی)(mm)
۱	-۱۰,۹	-۱۰,۰۳
۲	-۱۱,۸	-۱۰,۷۲
۳	-۱۳,۶	-۱۳,۰۲
۴	-۱۲,۷۴	-۱۱,۸۱
۵	-۱۰,۲	-۹,۵
۶	-۱۱,۸	-۱۱,۱۴
۷	-۱۱,۷	-۱۱,۰۹
۸	-۸,۵	-۷,۲۱
۹	-۷,۶	-۶,۷۶
۱۰	-۷,۳	-۶,۴۲
۱۱	-۷,۱	-۶,۵۱
۱۲	-۶,۸	-۶,۰۲
۱۳	-۶,۴	-۵,۷۴
۱۴	-۵,۹	-۵,۱۶
۱۵	-۵,۲	-۴,۳۷
۱۶	-۴,۱	-۳,۱۴
۱۷	-۷,۱	-۷,۹۵
۱۸	-۴	-۲,۲۴
۱۹	-۶,۱	-۵,۵۷
۲۰	-۵	-۴,۰۹
۲۱	-۱,۳	-۰,۴
۲۲	-۱	-۰,۲
۲۳	-۰,۰۹	۰,۰۱

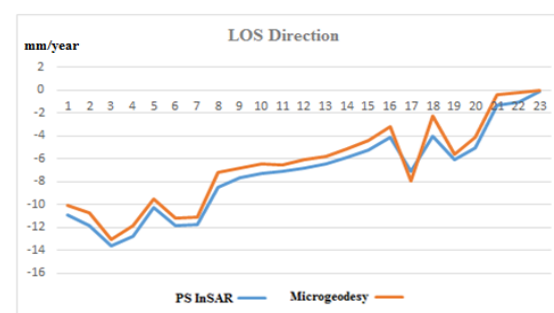
۶- ارزیابی دقت

به منظور ارزیابی دقت و صحت نتایج بدست آمده از پردازش تصاویر S-1A با استفاده از روش PSI، نیاز به داده‌های GPS یا نقشه‌برداری زمینی داریم. همانطور که پیشتر ذکر شد، در این پژوهش از داده‌های میکروژئودزی و ترازیبی دقیق شرکت مه‌اب قدس استفاده گردید. در جدول ۱ و ۲، نتایج حاصل از روش PSI و داده‌های میکروژئودزی که دارای مختصات نزدیک و یا برابر بودند، موجود است. با استفاده از فرمول RMSE، می‌توان میانگین مربع خطاها را محاسبه کرده و دقت را برآورد نمود.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_j)^2}{N}} \quad (16)$$

از آنجا که بیشینه مقدار جابجایی بر اساس نتایج داده‌های S-1A در راستای افق و قائم به ترتیب برابر با ۹- و ۲۴- میلیمتر بوده و مقدار محاسبه شده RMSE در راستای افق و قائم به ترتیب مقادیر ۲,۴۳ و ۳,۹ میلیمتر بدست آمد، مشخص است که نتایج در راستای قائم دارای دقت بالاتری نسبت به نتایج در راستای افق می‌باشند؛ چراکه مقادیر RMSE محاسبه شده در راستای قائم نسبت به بیشینه مقدار جابجایی عددی کمتر از این مقدار در راستای افق می‌باشد. همچنین همانطور که در دو شکل ۱۲ و ۱۳ نیز مشخص است، همخوانی نتایج بدست آمده در راستای قائم نسبت به راستای افق بالاتر می‌باشد. اما به‌صورت کلی دقت نتایج بدست آمده در هر دو راستا قابل قبول بوده و قابلیت استفاده از این نتایج به‌منظور پایش سدهای خاکی وجود دارد.

RMSE_LOS Direction (CSK)= 1.3231 mm



شکل ۱۴- مقایسه نتایج داده‌های راداری سنجنده CSK برای سد داریان در حالت Descending با داده‌های میکروژئودزی که به جابجایی در راستای LOS تبدیل شدند

باتوجه به مقدار محاسبه شده RMSE بر اساس نتایج داده‌های CSK که برابر با ۱,۳ میلیمتر می‌باشد و از آنجا که در شکل ۱۴ مطابقت و همخوانی بالای داده‌های میکروژئودزی با داده‌های راداری مشخص است، می‌توان گفت که استفاده از داده‌های راداری Xباند، علاوه بر افزایش تعداد نقاط PS، دقت نتایج را به‌میزان چشمگیری افزایش می‌دهد که انطباق داده‌های زمینی و راداری همانطور که در شکل مشخص است، دلیلی بر اثبات این ادعاست.

باتوجه به داده‌های میکروژئودزی شرکت مه‌اب قدس و گزارش‌های ارائه شده در آن، ملاحظه شد که ماکزیمم خطا در نتایج میزان جابجایی نقاط روی بدنه سد در سطح اطمینان ۹۵٪ برابر با ۳,۵۸ میلیمتر می‌باشد. همانطور که پیش‌تر گفته شد، مقدار خطای بدست آمده برای داده‌های سنتینل در راستای افق و قائم نیز به ترتیب برابر با ۲,۴ و

۳,۹ میلیمتر محاسبه شدند. با توجه به اینکه روش نقشه-برداری زمینی، یکی از دقیق‌ترین روش‌های محاسبه میزان جابجایی بدنه سد می‌باشد و ماکزیموم خطای محاسبه شده در این روش ۳,۵۸ میلیمتر است، مشخص است که دقت نتایج داده‌های سنتینل در راستای افق که برابر با ۲,۴ میلیمتر می‌باشد، به مراتب دقیق‌تر از دقت در روش میکروژئودزی می‌باشد. اما از آنجا که دقت داده‌های سنتینل در راستای قائم ۳,۹ میلیمتر می‌باشد و مشخص است که اختلاف دقت این دو روش در حد کمتر از ۱ میلیمتر و تقریباً برابر با ۰,۳ میلیمتر است، این اختلاف قابل اغماض می‌باشد. به‌علاوه دقت حاصل از نتایج داده‌های Cosmo نیز که برابر با ۱,۳ میلیمتر است و مسلماً مشخص است که بسیار دقیق‌تر از داده‌های زمینی می‌باشد. پس با توجه به آنچه که پیش‌تر گفته شد، دقت نتایج بدست آمده در حد قابل قبول و مناسب بوده و توانایی جایگزین شدن با روش‌های سنتی و زمان‌بر را دارد.

نکته قابل اشاره در این بخش این است که، از آنجا که می‌دانیم با توجه به ماهیت ماهواره‌های راداری، امکان برآورد جابجایی در راستای شمالی جنوبی امکان‌پذیر نیست، بخشی از خطای بدست آمده می‌تواند ناشی از این امر باشد. چراکه بخشی از عدم تطابق داده‌های زمینی و با داده‌های راداری ناشی از عدم مدل شدن جابجایی در روش راداری در راستای شمالی جنوبی می‌باشد. همچنین با توجه به نحوه قرارگیری سد مورد مطالعه، نسبت به راستای شمالی جنوبی، مشخص است که میزان این جابجایی در سد، بسیار کم می‌باشد. چرا که فشار ناشی از وزن آب پشت سد، در راستای شرقی غربی به سد وارد شده و بیشترین جابجایی در بدنه سد، در راستای شرقی غربی می‌باشد. اما ذکر این نکته نیز لازم است که به دلیل عدم برآورد جابجایی بدنه سد در راستای شمالی جنوبی به روش تداخل‌سنجی راداری، ممکن است خطایی وارد محاسبات گردد، اما به دلیل نوع و جهت قرارگیری بدنه سد نسبت به راستای شمالی جنوبی، این خطا قابل اغماض و چشم‌پوشی می‌باشد، چراکه در مقایسه نتایج داده‌های راداری و داده‌های میکروژئودزی نیز دقت‌های قابل اعتمادی بدست آمد که این خود دلیلی بر چشم‌پوشی از جابجایی در راستای شمالی جنوبی می‌باشد.

۷- نتیجه گیری

مطالعه‌ای بایستی از وجود داده‌های زمینی در بازه زمانی مشترک با داده‌های راداری مورد نظر، مطمئن شویم. ارزیابی دقت یکبار برای داده‌های تبدیل شده به جابجایی در راستای افق و قائم صورت گرفت و بار دیگر برای داده‌های زمینی که به جابجایی در راستای LOS تبدیل شده بودند.

در نهایت نتایج حاصل از ارزیابی دقت حاکی از آن بود که استفاده از دو دسته داده راداری C باند و X باند، قابلیت برآورد جابجایی‌های سازه‌های عظیم از جمله سدهای خاکی را دارا بوده و نتایج دارای دقت‌های قابل قبولی می‌باشند. ذکر این نکته ضروری است که نتایج داده‌های X باند به دلیل رزولوشن بالاتر این تصاویر نسبت به تصاویر C باند، دارای تراکم بالاتری از نقاط PS بوده و همچنین هم‌خوانی بالاتری با داده‌های زمینی داشته و در نهایت با استفاده از این نوع داده، دقت بالاتری حاصل خواهد شد. همچنین هرچه ابعاد بدنه سد بزرگتر باشد یا به عبارتی مساحت بدنه سد بیشتر باشد، تراکم نقاط PS بیشتر بوده و مختصات بدست آمده برای این نقاط صحیح‌تر خواهد بود. به‌طور کلی می‌توان گفت که استفاده از هر دو دسته داده راداری X باند و C باند، پتانسیل محاسبه جابجایی دیواره سدهای خاکی را دارا بوده و این تکنیک که تحت عنوان تداخلسنجی راداری شناخته شده‌است، قابلیت جایگزینی به‌جای روش‌های سنتی و هزینه‌بر را دارا بوده و نتایجی با دقت‌های میلیمتری حاصل خواهد کرد که از نظر دقت توانایی رقابت با روش‌های متداول و سنتی را دارا می‌باشند.

با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی و صرف هزینه و زمان بالا در این روش‌ها، در این تحقیق به کمک روش تداخلسنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائم، جابجایی‌های سد خاکی داریان (واقع در استان کرمانشاه) اندازه‌گیری شد. در این مطالعه از دو مجموعه داده‌ی متفاوت جهت آنالیز سری زمانی استفاده شد که یکی از این مجموعه داده‌ها متعلق سنجنده X باند Cosmo-SkyMed و دیگری مربوط به سنجنده C باند Sentinel-1A می‌باشد. با بکارگیری تکنیک PSI، بر روی داده‌های سنجنده S-1A و CSK که عبارتند از ۳۲ تصویر از مسیر ۱۷۴ و ۳۲ تصویر از مسیر ۶ سنجنده S-1A و ۲۱ تصویر در حالت DSC از سنجنده CSK مربوط به سد داریان جابجایی‌های این سد خاکی محاسبه و استخراج شد.

برای مقایسه و ارزیابی نتایج حاصل از بکارگیری روش PSI بر روی داده‌های راداری ذکرشده، از داده‌های نقشه-برداري زمینی و ترازایی دقیق که همزمان با داده‌های راداری مورد نظر ما بودند، استفاده گردید. لازم به ذکر است که برای ارزیابی دقت نتایج بدست آمده برای نقاط PS، از بین نقاط مربوط به داده‌های میکروژئودزی بایستی نقاطی انتخاب گردند که هم از نظر مکانی به نقاط PS استخراج شده نزدیک باشند و هم از نظر زمانی در بازه زمانی اخذ داده‌های راداری باشند، در غیر این‌صورت ارزیابی دقت ما صحیح نخواهد بود. پس قبل از انجام هر

مراجع

- [1] Poland, J. F., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal.
- [2] Taherinejad M, Vosoghi B, Haji Aghajany S. Monitoring and Predicting of Dam 3D Deformations By PS-InSAR Method and Geodetic Data . GEJ. 2018; 9 (2) :1-10.
- [3] Graham, L. C., Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, Proceedings of the IEEE, Vol. 62, No. 6, pp. 763-768, 1974.
- [4] Foroughnia M. Radar interferometry time series analysis based on PS-InSAR by using ENVISAT and Sentinel-1A data to monitoring the subsidence of Tehran. Master thesis, Remote sensing group, Khajeh Nasir Toosi university of technology.
- [5] Joaquim J. Sousa, Antonio M. Ruiz, Matus Bakon, Milan Lazecky, Ivana Hlavacova, Gloria Patricio, Manuel Delgado, Daniele Perissin. "Potential of C-Band SAR Interferometry for Dam Monitoring". Conference ENTERprise Information Systems. October, 5-7, 2016.
- [6] Aminjafari, Saeed. "Monitoring of Masjed-Soleiman embankment dam's deformation using a combination of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and finite element modeling." Geodesy and Cartography 43.1 (2017): 14-21.
- [7] Wang, Teng, Daniele Perissin, Fabio Rocca, and Ming-Sheng Liao. "Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis." Science China Earth Sciences 54, no. 5 (2011): 720-732.

- [8] Emadali, Lotfollah, Mahdi Motagh, and Mahmud Haghshenas Haghighi. "Characterizing post-construction settlement of the Masjed-Soleyman embankment dam, Southwest Iran, using TerraSAR-X SpotLight radar imagery." *Engineering Structures* 143 (2017): 261-273.
- [9] Lazecký, Milan, Daniele Perissin, Wang Zhiying, Lei Ling, and Qin Yuxiao. "Observing dam's movements with spaceborne SAR interferometry." In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5*, pp. 131-136. Springer, Cham, 2015.
- [10] Milillo, Pietro, Daniele Perissin, Jacqueline T. Salzer, Paul Lundgren, Giusy Lacava, Giovanni Milillo, and Carmine Serio. "Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52 (2016): 221-229.
- [11] Lazecky, Milan, Daniele Perissin, Ling Lei, Yuxiao Qin, and Marco Scaioni. "Plover Cove dam monitoring with spaceborne InSAR technique in Hong Kong." In *Proc. 2nd Joint Int. Symp. on Deformation Monitoring*, pp. 9-11. 2013.
- [12] Bakon, Matus; Daniele Perissin, Milan Lazecky, and Juraj Papco. "Infrastructure non-linear deformation monitoring via satellite radar interferometry." *Procedia Technology* 16 (2014): 294-300.
- [13] Maghsoudi, Y &, Mahdavi, S. (2015). *The Principles of Radar Remote Sensing*: K. N. Toosi University of Technology
- [14] Kampes, B. M. (2006). *Radar interferometry*: Springer.
- [15] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20
- [16] Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., & Rocca, F. (2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), 1685-1701 .
- [17] Ketelaar, V. G., 2009. *Satellite radar interferometry: Subsidence monitoring techniques*, Springer Science & Business Media.
- [18] Borghero, C. 2017. Feasibility study of dam deformation monitoring in northern Sweden using Sentinel1 SAR interferometry. Student thesis, Advanced level (Master degree), Department of Industrial Development, IT and Land Management.