

## پایش تغییرات بدنه سد طالقان به روش تداخل سنجی راداری

❖ مهنوش قدیمی\*: استادیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

### چکیده

با توجه به اینکه پایش و ارزیابی تغییرات بدنه سدهای خاکی با استفاده از روش‌های نقشه برداری زمینی وقت‌گیر و پرهزینه است، لذا با بررسی‌های به عمل آمده در مشکلات مشابه در سطح دنیا روش تداخل سنجی راداری به عنوان یک روش نوین جهت بررسی جابجایی بدنه سد معرفی شده است. بدین منظور در این تحقیق با هدف بررسی تغییرات بدنه سد طالقان از ۶۸ تصویر *Sentinell-A* در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۱۴ از نرم افزار *GMTSAR* استفاده شد. همچنین تکنیک تداخل سنجی راداری به کمک روش طول باز کوتاه<sup>۱</sup> برای به دست آوردن سری زمانی به کار گرفته شد. نتایج سری زمانی نشان داد که حداکثر میزان نشست سد  $3 \text{ mm/y}$  در راستای دید سنجنده می‌باشد. به منظور توجیه تغییرات بدنه سد طالقان تحقیقاتی بر روی ریپ رپ<sup>۲</sup> بدنه سد انجام شد. این نتایج متأثر از فرسایش و هوازدگی می‌باشد که به دلیل ضریب نفوذ نامطلوب و مقاومت نامناسب در سنگ‌هایی که دارای ساختار آذرین بیرونی و ریولیتیکی می‌باشد، منجر شد تا این مصالح تحت اثرات جوی و دمای منطقه دچار وارفتگی و ریزش شوند که نتایج آن به صورت جابجایی در سطح پایین دست بروز نموده است. بررسی‌های به عمل آمده بیانگر توانایی روش تداخل سنجی راداری در پایش سدهای خاکی و سازه‌های با اهمیت می‌باشد که اطلاعات آن نقش به سزایی در تحلیل رفتار سدها و تکمیل اندازه‌گیری‌های ابزار دقیق خواهد داشت.

کلید واژگان: تداخل سنجی راداری، سد طالقان، *SBAS*، *GMTSAR*، *Sentinell-A*

## ۱. مقدمه

سدها یکی از سازه‌های مهندسی بزرگ می‌باشند که جهت بهره‌مندی از مزایای اجتماعی و اقتصادی آن‌ها مانند کنترل سیلاب، آبیاری، تولید انرژی، گرد شگری و تأمین آب شرب و صنعت احداث می‌شوند. هزینه بالای احداث و مخاطرات جانی و مالی جبران‌ناپذیر در صورت وجود مشکل پایداری در سدها منجر گردیده تا با یک نگاه ویژه، مسائل ایمنی و کنترل پایداری به‌وسیله سیستم‌های مونی‌تورینگ ابزار دقیق و میکروژئودزی در طول عمر سد، پایش و کنترل شوند [۲]. لذا برای جلوگیری از اثرات زیانبار در تخریب سازه‌ها و زیر ساخت‌های شهری نظیر سدها، ساختمان‌ها، پل‌ها و خطوط انتقال نیرو، نظارت و مدیریت لازم و ضروری است. بنابراین نظارت بر تغییر شکل بدنه سد برای ارزیابی تغییرات هندسی در زمان و مکان و ایجاد ارتباط بین عوامل ایجاد کننده و تغییر شکل مهم است [۳] که می‌تواند منجر به شکست سد و یا یک خطر بزرگ در مناطق پایین دست شود [۴]. تحقیقات نشان می‌دهد که به‌طور متوسط ده شکست قابل توجه سد در دنیا، در هر دهه اتفاق می‌افتد [۵]. یکی از بدترین سناریوهای شکست سد در سال ۱۷۸۶ در جنوب غربی چین رخ داد که ۱۰۰۰۰۰ نفر کشته شدند [۶]. توسعه سریع تکنولوژی فضایی طی ۲۰ سال گذشته، ما را قادر به استفاده از تکنیک‌های سنجش از دوری (*InSAR*)، به‌عنوان یک روش ژئودزیکی مؤثر برای تجزیه و تحلیل حرکات زمین‌شناسی در بیش از هزار کیلومتر در ارتباط با فرآیندهای ژئوفیزیکی و انسان ساخت کرده است [۷]. اهمیت (*InSAR*) به‌عنوان یک روش سنجش کامل در مهندسی ژئودزی و زمین‌شناسی در دهه گذشته به دلیل دسترسی بیشتر داده‌ها از ماهواره‌های رادار و پیشرفت‌های قابل توجه در پردازش داده‌ها، تجزیه و تحلیل زمانی از داده‌های رادار را با دقت میلی‌متر امکان‌پذیر کرده است [۸]. بنابراین با توجه به توانایی و قابلیت تصاویر رادار در تعیین میزان تغییرات و جابجایی‌های اتفاق افتاده بر روی سطح زمین در بازه زمانی خاص، می‌توان از این تصاویر به‌خوبی بهره برد [۹، ۱۰].

فرکانس بالای مشاهدات مکانی و زمانی روش تداخل سنجی راداری، در مقایسه با ترازیبی می‌تواند دید جامعی از فرایند تغییر شکل در اختیار ما قرار دهد. علاوه بر فراوانی مکانی و زمانی مشاهدات، استفاده از این روش باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه نیز می‌گردد [۸].

همچنین در چند سال اخیر مطالعات زیادی با استفاده از روش (*InSAR*) بر روی سدها با استفاده از تصاویر موجود در بازه‌های زمانی مختلف و دو روش (*PS*) و (*SBAS*) انجام شده است. از قبیل مطالعات سد (*la Pedrera*) [۱۱]، سد (*Conza della*) در ایتالیا [۱۲]، سد *Pertusillo* در ایتالیا [۱۳]، سد (*Mornos*) در یونان [۱۴]، سد (*Shuibuya*) در چین [۱۵]، سد (*Darbandikhan*) در عراق بعد از بررسی تصاویر *Sentinel-1A* در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۸ به این نتیجه رسیدند که این تصاویر برای بررسی جابجایی سد منع مناسبی به نظر می‌رسند و نتایج پردازش تصاویر نشان داد که تا قبل از نوامبر ۲۰۱۷ سد پایدار اما بعد از زلزله نوامبر سد جابجایی دارد [۱۶].

در پایش مستمر سد طالقان آثار بر آمدگی در امتداد خط افقی بر روی شیب پایین دست خاکریز بدنه سد طالقان در مهر ماه سال ۹۳ مشاهده گردید و از آنجایی که شبکه ابزار دقیق سد و به‌خصوص در بخش جابجایی بدنه (پیلارهای میکروژئودزی) محدوده مذکور را پوشش نمی‌دهد، ۶ عدد پیلار در این ناحیه نصب گردید و قرائت ۴ مرحله به صورت عملیات میکروژئودزی از اسفند ۹۳ تا آذر ۹۴ ثبات نسبی توده خاکریز در این فاصله زمانی را نشان می‌دهد. ولی بر اساس مشاهدات میدانی مشخص گردید جابجایی در ریب ریب پایین دست در طی زمان در حال گسترش و توسعه می‌باشد. با توجه به اهمیت پایداری بدنه سد و همچنین حصول اطمینان از رسیدن به ثبات در جابجایی و پایداری بدنه، مستلزم پایش و اطلاعات بلند مدت می‌باشد لذا با بررسی‌های به‌عمل آمده در مشکلات مشابه در سطح دنیا، روش تداخل سنجی راداری به‌عنوان یک روش نوین جهت بررسی جابجایی

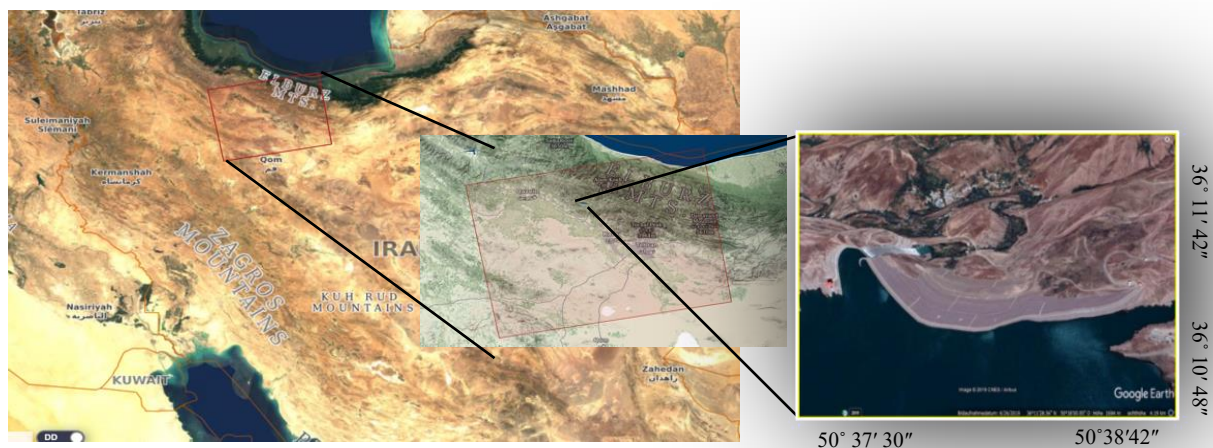
سفیدرود به شمار می‌رود، در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز و در بخش شمال غربی با فاصله ۱۳۰ کیلومتر از شهر تهران واقع شده است و از نظر موقعیت جغرافیایی این حوضه از شمال به بخشی از حوضه آبخیز الموت و از جنوب به زیاران و صمغ آباد و از شرق به بخشی از حوضه آبخیز کرج و از غرب به حوضه آبخیز شاهرود محدود می‌شود. ارتفاع حوضه از سطح دریا از ۱۱۰۰ تا ۴۴۰۰ متر متغیر است، رود طالقان در مرکز این حوضه از گردنه عسلک در غرب کندوان سرچشمه می‌گیرد و به سمت غرب در جریان است و راه دسترسی به سد از طریق راه آسفالت با فاصله ۱۳۰ کیلومتر از شهر تهران می‌باشد [۱].

روش تداخل سنجی راداری قادر است حرکات کوچک زمین در شرایط مطلوب را در حد میلیمتر اندازه‌گیری کند. کاربرد روش‌های *InSAR* به دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد [۱۷]. با افزایش تعداد ماهواره‌های راداری، (*InSAR*) در دو دهه اخیر به سرعت توسعه یافته است [۱۸] توسعه سریع الگوریتم‌های پردازش (*InSAR*) و خصوصیات تصویربرداری محققان را به استفاده از (*InSAR*) برای نظارت بر پایداری سدها ترغیب نموده است [۱۹، ۲۰، ۲۱].

بدنه سد معرفی شده است. علت این امر وجود اطلاعات جابجایی سطح زمین از چندین سال قبل به صورت ابری از نقاط که امکان اسکن و پایش پایین دست سد را مهیا می‌سازد. لذا با استفاده از روش مذکور ضمن بررسی تغییر شکل پوسته پایین دست سد از ادامه دار بودن و یا غیر فعال بودن جابجایی‌ها اطمینان حاصل می‌گردد. از آنجا که نتایج میکروژئودزی دو دوره در سد طالقان با تغییرات ظاهری سد مطابقت نداشت، لذا به منظور شناسایی و مطابقت با نتایج آزمایش‌های زمین‌شناسی ریب‌رپ بدنه سد در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۸ از تصاویر *Sentinel-1A* برای انجام پردازش تصاویر راداری استفاده شد.

## ۲. روش شناسی

سد طالقان در شمال غرب استان البرز در شهر ستان ساوجبلاغ و در بخش طالقان واقع شده است. شکل ۱ موقعیت سد طالقان به همراه تصویر ماهواره‌ای را نشان می‌دهد. سد طالقان از نوع سنگریزه‌ای<sup>۱</sup> با هسته رسی بوده و دارای یک سرریز اوجی با شوت آزاد در جناح چپ می‌باشد. تاریخ شروع پروژه سد طالقان بهار سال ۱۳۸۰ بوده است. حوضه آبخیز طالقان یکی از زیر حوضه‌های مهم آبخیز



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نمایش راستای دید سنجنده در سد طالقان

<sup>1</sup> Rockfill

حذف اثر توپوگرافی، از مدل ارتفاعی رقومی استفاده شده است. همان‌طور که اثرات اتمسفر با توپوگرافی همبستگی دارد که این اثر با تناسب خطی از بین می‌رود. همین‌طور اثرات باقیمانده با اطلاعات دقیق اربیت‌ها حذف می‌شود. همچنین اگر خطای اربیتی باقی مانده باشد اثر آن با رمپ<sup>۳</sup> از بین می‌رود. خطاهای مداری نیز برای هر اینترفروگرام با برازش یک رویه درجه یک به مناطقی که فاقد جابجایی هستند، مدل‌سازی می‌شود و از اینترفروگرام مورد نظر کم می‌شود. مرحله بعدی ایجاد سری زمانی تغییر شکل با استفاده از اینترفروگرام است [۲۲].

روش SBAS به کمک تکنیک تداخل سنجی تفاضلی امکان کشف تغییر شکل سطح زمین و همچنین بررسی این تغییرات در طول زمان را فراهم می‌کند. با ترکیب مجموعه‌ای از پیکسل‌های دو تصویر SAR، یک اینترفروگرام تشکیل می‌شود. به منظور بررسی زمانی تغییر شکل از ترکیب مناسبی از اینترفروگرام‌ها استفاده می‌شود که این مجموعه از اینترفروگرام‌ها باید دارای دو شرط اصلی طول باز کوتاه و اتصال از نظر زمانی باشند [۲۳، ۲۴].

به کمک روش کمترین مربعات مقدار جابجایی در زمان‌های مختلف سری محاسبه می‌شود.

$N$  اینترفروگرام  $y = (I_1 I_2 \dots I_N)$  که حاصل تصویربرداری در  $M$  زمان  $A = (t_1 t_2 \dots t_M)$  می‌باشد به عنوان مشاهدات  $M$  مجهول  $x = (d_1 d_2 \dots d_M)$  به عنوان مجهولات روش کمترین مربعات در نظر گرفته می‌شود. بنابراین می‌توان دستگاه معادلات را به صورت  $y = Ax$  نوشت. ماتریس  $A$  بسته به این که اینترفروگرام بین کدام دو زمان تشکیل شده است به صورت  $0$  و  $1$  پر می‌شود.

به کمک ماتریس  $A$  دستگاه معادلات برای به دست آوردن تغییر شکل در زمان‌های مختلف تهیه تصاویر تشکیل داده می‌شود. نکته‌هایی که در روش طول باز کوتاه اهمیت دارد مستقل بودن این روش از مدل تغییر

داده‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، تصاویر سنجنده Sentinel-1A به تعداد ۶۸ تصویر از ماهواره Soyuz سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV با اربیت ۲۸ می‌باشد، که از ۲۰۱۴ تصویربرداری شده و از طریق سایت داده‌های ماهواره‌ای سازمان فضایی اروپا <https://scihub.copernicus.eu> اخذ شده است. ابتدا تصاویر موجود در مدارهای یکسان، تعیین شدند. مدل ارتفاع رقومی ۳۰ متر SRTM جهت پردازش در نرم‌افزار GMTSAR از طریق سایت <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen> تهیه و دانلود گردید. در روش تداخل سنجی راداری، تصاویر مختلط راداری که دارای مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند با یکدیگر تلفیق شده و تصویری به نام اینترفروگرام<sup>۱</sup> تولید می‌شود. اینترفروگرام تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر به دست آمده در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به طور دقیق بر روی هم منطبق شده‌اند، حاصل می‌شود [۲۱]. لازم به بیان است که ثبت هندسی دو تصویر طی دو مرحله به صورت تقریبی و دقیق انجام می‌شود. در یک اینترفروگرام اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر که گویای اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویربرداری است، وجود دارد. به کمک مقدار اختلاف فاز می‌توان متغیرهای مختلف از جمله میزان جابجایی سطح زمین تا کسری از سانتی‌متر و اطلاعات توپوگرافی سطح زمین را با دقت ۱۰ متر استخراج کرد. باید در نظر داشت که جابجایی به دست آمده از یک اینترفروگرام در راستای خط دید سنجنده<sup>۲</sup> (LOS) بوده و تجزیه این بردار جابجایی در جهات قائم و افقی نیازمند اینترفروگرام دیگر با هندسه تصویربرداری متفاوت و یا داده‌های زمینی اضافی است. برای به دست آوردن جابجایی سطح زمین در یک بازه زمانی، باید خطاهای مداری، اثرات توپوگرافی و اتمسفر از اینترفروگرام حذف شوند. برای

<sup>۱</sup> Interferogram

<sup>۲</sup> Line Of Sight

<sup>۳</sup> Ramp

۲۰۱۸ استفاده شد. در بین اینترفروگرام‌های حاصل از زوج تصاویر، مواردی که دارای نویز بود حذف و سپس تعیین سری زمانی از بین اینترفروگرام‌هایی که کمترین میزان نویز و بیشترین میزان پیکسل وجود داشت برای ادامه کار استفاده گردید. سپس میزان جابجایی در بازه زمانی مورد نظر محاسبه گردید که شکل ۲ افزایش میزان جابجایی در جهت منفی را نشان می‌دهد. سپس میزان برآزش خطی سرعت نشست سد از روش طول بازه‌های کوتاه برآورد گردید. که شکل ۳ میزان سرعت نشست  $3\text{mm/y}$  را نشان می‌دهد. یک نقطه بر روی پایین دست سد انتخاب گردید و پروفیل جابجایی آن ترسیم گردید. جابجایی سد در ۲۰۱۸، ۲۰۱۹، ۲۰۲۰، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴ در سال ۲۰۱۸، ۰۲، ۲۴ به مقدار ۲۲،۵ میلیمتر در راستای منفی رسیده است.

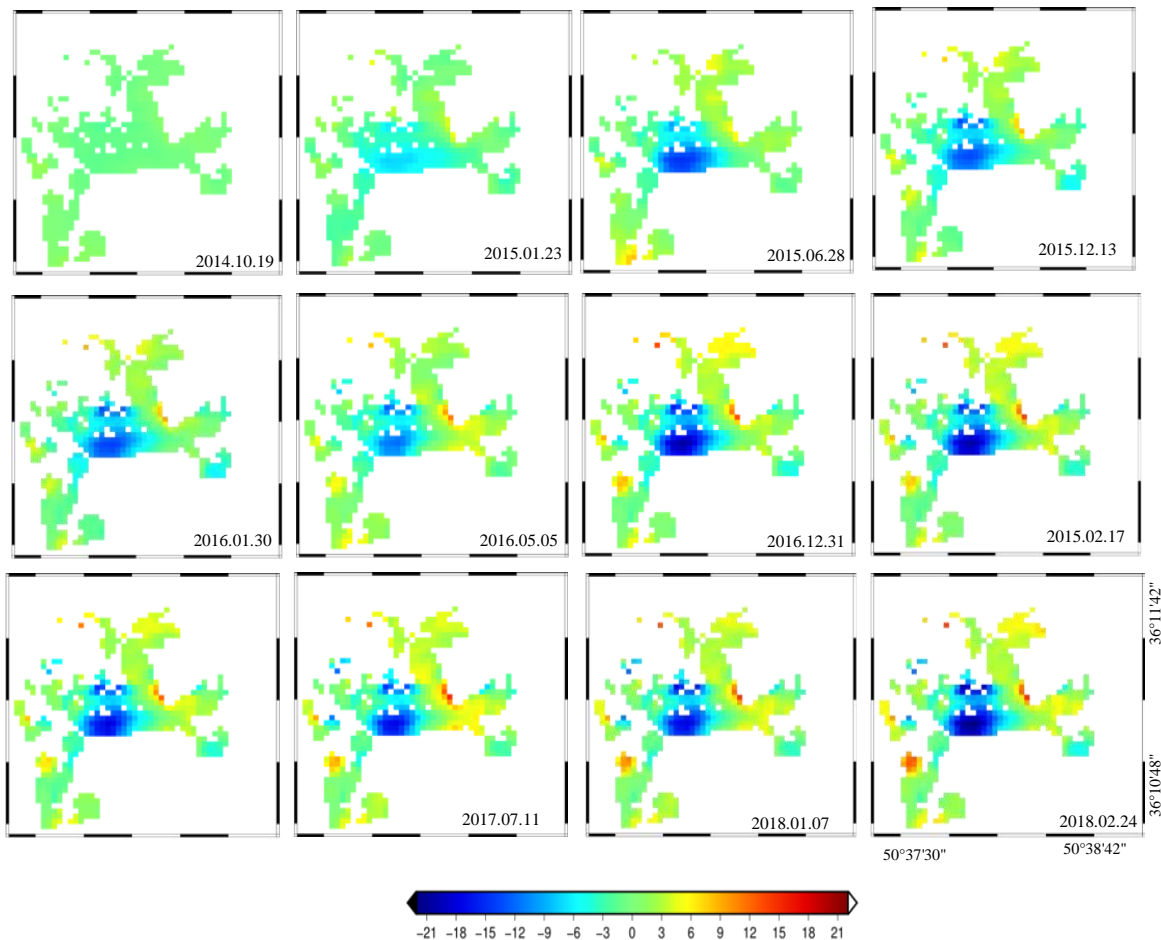
شکل برای به‌دست آوردن تغییر شکل در زمان‌های مختلف است. در واقع نیاز به فرضی در مورد مدل تغییر شکل برای به‌دست آوردن سری‌های زمانی نیست. بعد از تشکیل ماتریس  $A$  به کمک جواب کمترین مربعات فوق جابجایی به‌دست می‌آید. بنابراین  $x$  برابر است با: [۲۴]

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P y$$

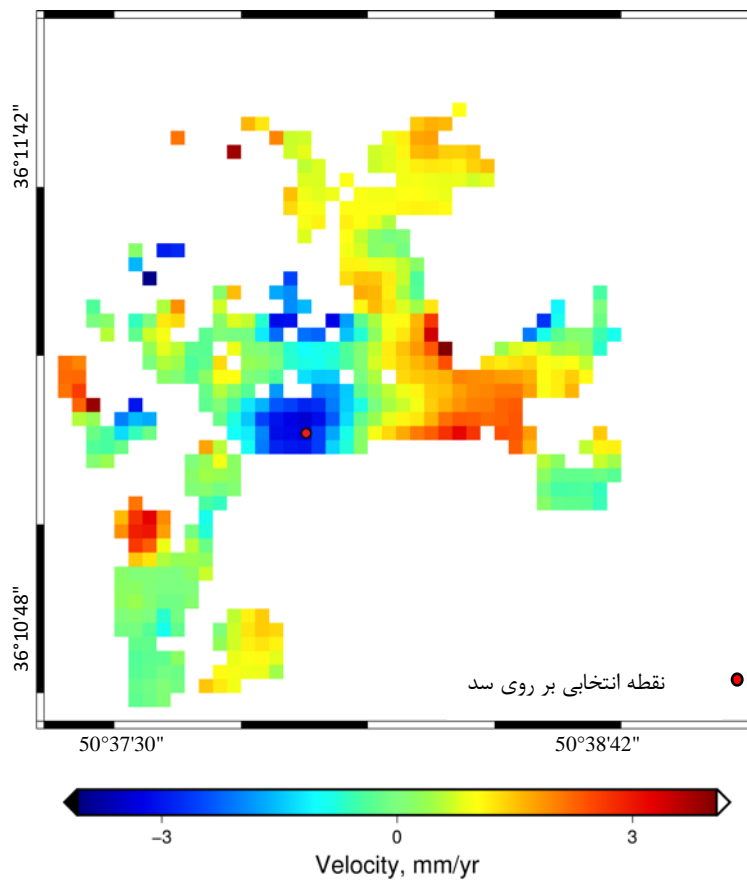
### ۳. نتایج

#### ۳.۱. پردازش تصاویر راداری

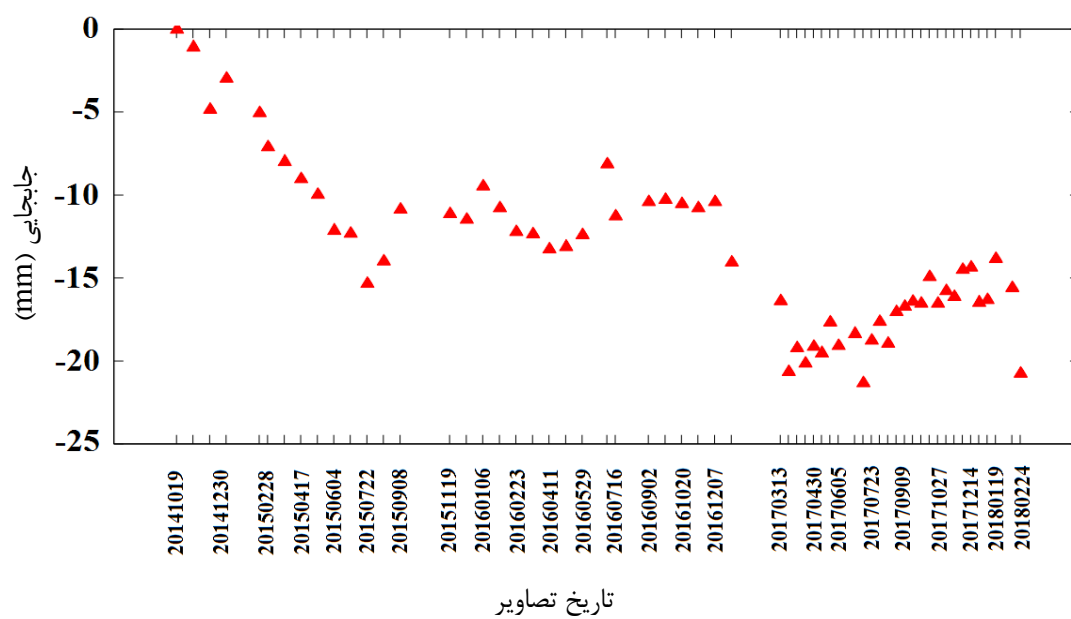
برای بررسی سری زمانی جابجایی سد طالقان از ۶۸ تصویر Sentinel-1A در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۴ تا فوریه



شکل ۲. تغییرات میزان جابجایی در محدوده سد طالقان بر حسب (mm) (جابجایی مثبت بالا آمدگی و جابجایی منفی فرونشست را نشان می‌دهد).



شکل ۳. تغییرات سرعت نشست در محدوده منطقه مورد مطالعه



شکل ۴. پروفیل میزان جابجایی نقطه انتخاب شده بر روی سد



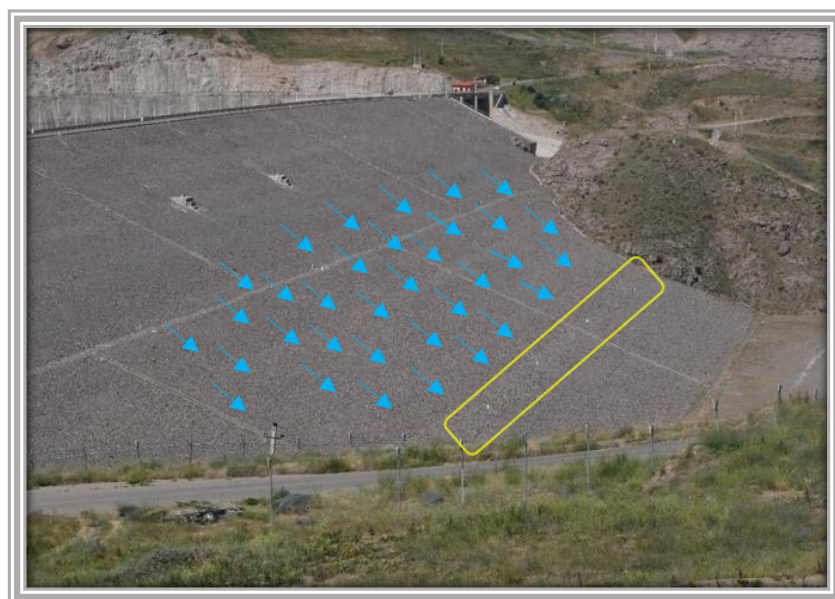
### ۳.۲. کار میدانی

فیزیکی خرد می‌شوند و در نهایت به ذراتی در حد ماسه تبدیل می‌شوند. میزان هوازدگی در قسمت‌های مختلف متفاوت می‌باشد و هر چه به سمت پایین دست نزدیک می‌شویم مقدار آن به صورت نسبی افزایش می‌یابد (شکل ۶). شکل ۷ سرعت نشست سد به همراه موقعیت مکانی نقاط کنترل سد را نشان می‌دهد. مثلث‌های سیاه‌رنگ، در محدوده سد طالقان نقاط نمونه‌برداری بازدید میدانی است که توسط *GPS* برداشت شده است. سپس شکل ۸ تغییرات زمین‌شناسی روی پله‌های سد را نشان می‌دهد.

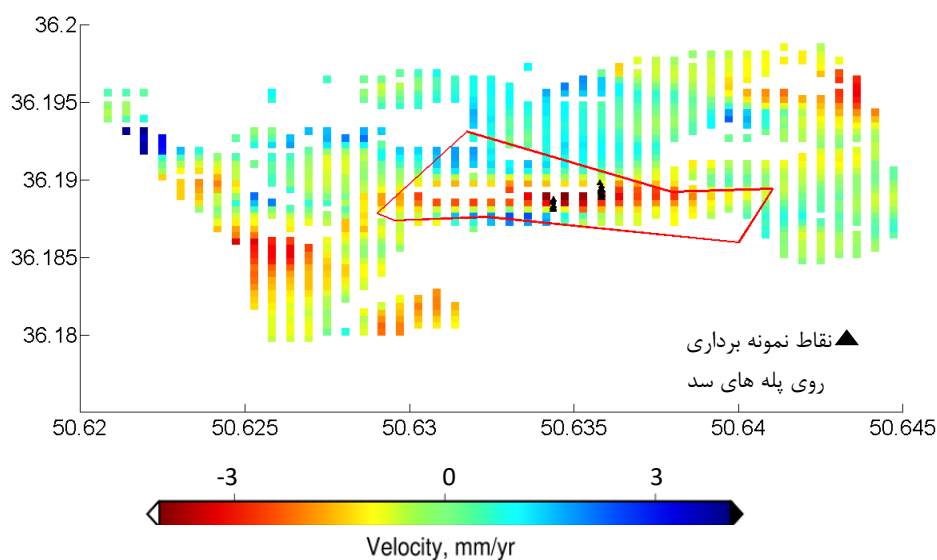
نتایج حاصل از آزمایشات سنگ‌شناسی بر روی ریپ‌رپ بدنه سد طالقان نشان می‌دهد که سنگ‌های تشکیل دهنده ریپ‌رپ عبارتند از سنگ‌های رسوبی با میزان هوازدگی ضعیف فیزیکی *WS* و سنگ‌های آذرین بیرونی (شکل ۵) با هوازدگی متوسط تا شدید *WM, WH* که با ایجاد درز و شکاف، قرار گرفتن در معرض آب و از همه مهم‌تر با پیشرفت هوازدگی، به شدت از استحکام این سنگ‌ها کاسته می‌شود. این سنگ‌ها بر اثر هوازدگی



شکل ۵. سنگ‌های آذرین بیرونی استفاده شده بر روی ریپ‌رپ بدنه سد طالقان



شکل ۶. مناطق تغییر شکل یافته بر روی ریپ‌رپ پایین دست سد طالقان



شکل ۷. نمایش نقاط بازدید میدانی بر روی بدنه سد و نرخ برآزش خطی سرعت نشست سد



شکل ۸. پله‌های تغییرشکل یافته بر روی سد طالقان

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

نتایج سری زمانی حاصل از پردازش ۶۸ تصویر Sentinel-1A نشان می‌دهد که نرخ متوسط فرونشست سد از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ به طور متوسط ۳ میلیمتر در سال

بوده است. همین‌طور [۱۶] در بررسی تغییرات سد (دریندیخان<sup>۱</sup>) در عراق بعد از پردازش تصاویر Sentinel-1A در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۸ به این نتیجه رسیدند که این تصاویر برای بررسی جابجایی سد منبع مناسبی به نظر

<sup>۱</sup> Darbandikhan



- عدم امکان بررسی تغییر شکل نقاط و محدوده‌های بین پیلارها
  - وجود خطا در قرائت و تحلیل‌ها و نیازمند تصحیح نتایج و سرشکنی خطا
  - عمده نتایج تغییر شکل‌ها معطوف به بدنه سد می‌باشد و در مورد محیط اطراف بدنه سد نتایج قابل توجهی ارائه نمی‌شود.
  - از آنجا که پیلارها یک مقدار واحد در هر نقطه ارائه می‌کند و با توجه به تعداد محدود پیلارها بر روی بدنه سد، تعمیم نتایج به رفتار کلی سد با تقریب و خطاها همراه است.
  - پیلارها تحت عوا مل جوی نظیر سیل ذوب و یخبندان ممکن است آسیب ببینند.
- در صورت وقوع جابجایی در فاصله زمانی بین عملیات میکروژئودزی شناسایی علت و زمان وقوع آن ممکن نمی‌باشد و صرفاً مقدار جابجایی به‌جا مانده را ارائه می‌دهد. لذا بررسی‌های به‌عمل آمده در این تحقیق بیانگر توانایی روش تداخل سنجی راداری در پایش سدهای خاکی و سازه‌های با اهمیت می‌باشد که اطلاعات آن نقش به‌سزایی در تحلیل رفتار سدها و تکمیلی اندازه‌گیری‌های ابزار دقیق خواهد داشت. همچنین دسترسی آسان به تصاویر Sentinel-1A با فاصله زمانی ۱۲ روز این امکان را میسر می‌کند که بتوان میزان جابجایی بر روی پوسته زمین را در حد میلی‌متر شناسایی کرد.

### سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی با شماره ۴۴-۸۷-۳ است که با همکاری شرکت آب منطقه‌ای تهران و دانشگاه تهران انجام شده است. از آژانس فضایی اروپا به خاطر دسترسی به تصاویر Sentinel-1A تشکر و قدردانی می‌کنیم.

می‌رسند. همینطور [۲۵] و همکاران در بررسی سد وینولا<sup>۱</sup> در مالاگا اسپانیا به این نتیجه رسیدند که توانایی داده‌های باند C به‌خصوص داده‌های Sentinel-1A برای مطالعات سدهای خاکی مناسب به نظر می‌رسد.

ما در این تحقیق به این نتیجه رسیدیم که با توجه به موجود بودن تصاویر Sentinel-1A هر ۱۲ روز یک‌بار می‌توان به‌صورت ابری از نقاط سد را اسکن کرد. نتایج پردازش نشان داد که بیشترین میزان نشست در قسمت پایین دست سد نشان داده شده است، این نتایج متأثر از فرسایش و هوازدگی می‌باشد که به دلیل ضریب نفوذ نامطلوب و مقاومت نامناسب در سنگ‌هایی که دارای ساختار آندزیت و ریولیتیکی می‌باشد منجر گردیده تا این مصالح تحت اثرات جوی و دمای منطقه دچار وارفتگی و ریزش بشوند که نتایج آن به‌صورت جابجایی در سطح پایین دست بروز نموده است. بررسی‌های به‌عمل آمده بیانگر توانایی روش تداخل سنجی راداری در پایش سدهای خاکی و سازه‌های با اهمیت می‌باشد که اطلاعات آن نقش به‌سزایی در تحلیل رفتار سدها و تکمیل اندازه‌گیری‌های ابزار دقیق خواهد داشت. در سال‌های اخیر تکنولوژی سنجش از راه دور برای اندازه‌گیری سدها به دلیل پیوسته بودن و پوشش محدوده وسیع در بررسی‌های ایمنی مورد توجه مهندسان سدسازی و کنترل پایداری قرار گرفته است.

ولی مشکلات و اتفاقاتی که در چندین دهه اخیر در اثر عوامل نشست در بدنه چند سد بزرگ خاکی اتفاق افتاده است اهمیت ابزار نشست سنج و اندازه‌گیری‌های مربوطه را در طول عمر سد، مهم و اساسی نمود. یکی از ساده‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری نشست و جابجایی بدنه سدهای خاکی نصب پیلارهای نقشه‌برداری بر روی بدنه و انجام عملیات میکروژئودزی در دوره‌های زمانی مشخص می‌باشد. با وجود سهولت اندازه‌گیری و متداول بودن عملیات میکروژئودزی این روش به دلیل محدودیت‌هایی از قبیل:

<sup>1</sup> La Viñuela

## References

- [1] Radjabi M., Report of Taleqan dam behaviour. Regional Water Company of Tehran.2017
- [2] Dascal., O. (1987). Postconstruction deformations of rockfill dams. *Journal of Geotechnical Engineering*. 113, 46-59.
- [3] Pytharouli, SI.,(2005). Stiros SC. Ladon dam (Greece) deformation and reservoir level fluctuations: evidence for a causative relationship from the spectral analysis of a geodetic monitoring record. *Engineering Structures*. 27, 361-370.
- [4] Kalkan, Y., (2014). Geodetic deformation monitoring of Ataturk Dam in Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*. 7, 397-405.
- [5] Jansen, RB., (2012) *Advanced dam engineering for design, construction, and rehabilitation*. Springer Science & Business Media.
- [6] Dai, FC., Lee, CF., Deng, JH., and Tham, LG., (2005). The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China. *Geomorphology*. 65, 205-221.
- [7] Colesanti, C., and Wasowski, J.,(2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering geology*. 88, 173-199.
- [8] Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 39, 8-20.
- [9] Du, Z., Ge, L., Ng, AH-M., Li, X., and Li, L., (2018). Monitoring of ground deformation in Liulin district, China using InSAR approaches. *International journal of digital earth*. 11, 264-283.
- [10] Colón, C., Webb, AAG., and Lasserre, C.,(2016). The variety of subaerial active salt deformations in the Kuqa fold-thrust belt (China) constrained by InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*. 450, 83-95.
- [11] Tomás, R., Cano, M., and Garcia-Barba, J., (2013). Monitoring an earthfill dam using differential SAR interferometry: La Pedrera dam, Alicante, Spain. *Engineering geology*. 157, 21-32.
- [12] Di, Martire., D, Iglesias., and R, Monells.,(2014). Comparison between differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza della Campania (Italy). *Remote sensing of environment*. 148, 58-69.
- [13] Milillo, P., Perissin, D., and Salzer, JT., (2016). 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, 221-229.
- [14] Neokosmidis, S., Elias, P., Parcharidis, I., and Briole, P., (2016). Deformation estimation of an earth dam and its relation with local earthquakes, by exploiting multitemporal synthetic aperture radar interferometry: Mornos dam case (Central Greece). *Journal of Applied Remote Sensing*. 10,(2), 6010.
- [15] Zhou, W., Li, S., Zhou, Z., and Chang, X., (2016). Insar observation and numerical modeling of the earth-dam displacement of shuibuya dam (China). *Remote Sensing*. 8, 877.
- [16] Al-Husseinawi, Y., Li, Z., and Clarke, P., (2018). Edwards S. Evaluation of the Stability of the Darbandikhan Dam after the 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran–Iraq Border) Earthquake. *Remote Sensing*. 10, 1426.
- [17] Gabriel, AK., Goldstein, RM., and Zebker, HA., (1989). Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 94,9183-9191.
- [18] Editors., (1997). Multibaseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction (DEM). *Third ERS Symposium on Space at the service of our Environment* 414.
- [19] Milillo, P., Perissin, D., and Salzer, JT.,(2016). 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, 221-229.
- [20] Wang, Z., and Perissin., D. (2012). Cosmo SkyMed AO projects-3D reconstruction and stability monitoring of the Three Gorges Dam. *2012 IEEE International Geoscience*.

- [21] Raucoules, D., Maisons, C., Carnec, C., Le Mouelic, S., King, C., Hosford, S., (2003). Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): Comparison with ground-based measurement. *Remote sensing of environment*. 88, 468-478.
- [22] Hanssen, RF., (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Springer Science & Business Media.
- [23] Lanari, R., Mora, O., and Manunta, M., Mallorquí, JJ., Berardino, P., Sansosti. (2004). E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 42, 1377-1386.
- [24] Hooper, A., Segall, P., and Zebker, H., (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis. *Journal of Geophysical Research*. 112, 1-21.
- [25] Ruiz-Armenteros, AM., Lazecky, M., Hlaváčová, I., Deformation monitoring of dam infrastructures via spaceborne MT-InSAR. The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain). *Procedia Computer Science*. 2018; 138:346-353.

