

مقایسه رفتارنگاری سد طالقان با استفاده از ابزار دقیق و روش تداخل سنجی راداری

مهرنوش قدیمی^{۱*}، علی درخشان^۲

^۱ استادیار دانشکده جغرافیا - دانشگاه تهران
ghadimi@ut.ac.ir

^۲ کارشناس فنی ژئوتکنیک - شرکت آب منطقه‌ای تهران
aliderakhshan.c@gmail.com

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۸، تاریخ تصویب مرداد ۱۳۹۹)

چکیده

سدها یکی از سازه‌های مهم و زیربنایی هر کشور محسوب می‌شود. به دلیل حجم قابل توجه آب در مخزن سدها، بروز آسیب و خرابی در آنها خسارات مالی و جانی جبران ناپذیری به همراه دارد. لذا با نصب ابزار دقیق در بدنه سد و عملیات میکروژئودزی مساله پایداری و ایمنی سدها با حساسیت بالا پایش می‌شود. با این وجود گاه‌ها رفتارهای غیر طبیعی در بدنه و تکیه گاه‌های سدها رخ می‌دهد که با برداشت‌های حاصل از ابزار دقیق سد مطابقت ندارد. در سالهای اخیر با پیشرفت و توسعه‌ای که در تهیه تصاویر راداری و پردازش آنها ایجاد شده است زمینه پایش تغییر شکل‌های سازه‌های بزرگ نظیر سدها و پلها با دقت قابل قبول فراهم شده است. در این تحقیق جابجایی و تغییر شکل غیر متعارفی که در رویه پایین دست بدنه سد طالقان رخ داده است بوسیله تصاویر Sentinel-1A در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن 4mm/y نشان داد که با داده‌های حاصل از برداشت ابزار دقیق منصوبه در بدنه مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که جابجایی رخ داده مربوط به لایه بیرونی و حفاظتی بدنه سد (ریپ‌رپ) بوده و ارتباطی با رفتار بدنه سد ندارد.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی راداری، رفتارنگاری سد طالقان، Sentinel-1A، نشست سنج

۱- مقدمه

از آنجاکه سدها سازه‌های مهم و با هزینه ساخت زیاد می‌باشند، حوادث و آسیب در آنها منجر به وجود آمدن خسارات قابل توجهی می‌گردد. لذا حفاظت و نگهداری این سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. حفاظت، مراقبت و کنترل رفتار سدها نه تنها حفظ ثروت و سرمایه ملی و افزایش طول عمر را به همراه دارد بلکه از لحاظ ایمنی و حفظ جان انسانها و طبیعت مهم است. رفتارنگاری سدها از اهمیت ویژه‌ای در علم مهندسی سد و سازه‌های هیدرولیکی برخوردار می‌باشد [۱].

جهت پیشگیری از گسیختگی سد در اثر عوامل مختلف، رفتار سنجی مستمر از سد ضروری می‌باشد. به این منظور با استفاده از ابزار دقیق در محل‌های مناسب و تفسیر داده‌های رفتارسنجی می‌توان به یقین عامل ناپایداری را پیش بینی نموده و اقدامات لازم در جهت مقابله با آن را معمول داشت [۲].

رفتارنگاری یکی از مهم‌ترین فاکتورهای کنترل در تمام سازه‌های خاکی بوده است و برای کنترل امنیت سد و مقایسه عملکرد واقعی با طرح‌های پیش بینی شده بسیار مهم بوده و یک تجربه و فرصت خوبی برای طرح‌های آینده ارائه می‌دهد.

میرقاسمی و همکاران در سال ۱۳۸۳ به منظور ارزیابی سیستم ابزاربندی سد لار و پانزده خرداد به این نتیجه رسیدند که سیستم ابزاردقیق سد لار نیاز به بازبینی و در صورت لزوم اصلاح دارد و با انجام اصلاحات و تعمیرات لازم، سیستم ابزار دقیق حاضر برای تحلیل پایداری و کنترل ایمنی سد و تکیه‌گاههای آن با کیفیت نسبتاً مطلوب، قابل قبول خواهد بود. همچنین سیستم ابزاردقیق و تجهیزات اندازه‌گیری سدپانزده خرداد از نظر کمی و کیفی از سلامت کافی جهت ادامه رفتارنگاری سد و ثبت اطلاعات خام ابزار دقیق برخوردار است [۳].

مدل‌سازی و اسکن دقیق سدها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. اگر بتوان یک مدل رفتاری با پارامترهای واقع-بینانه پیدا کرد که با نتایج ابزار دقیق تطابق داشته باشد، از این مدل می‌توان جهت بررسی رفتار سد در مقاطعی که ابزاربندی نشده و یا اینکه ابزار دچار خرابی شده‌اند استفاده نمود. از طرفی ممکن است در طول دوره آگیری یا بهره‌برداری مشکلاتی پیش بیاید، بنابراین با داشتن

مدلی مناسب از طرح می‌توان از ایمن بودن سد در وقوع چنین رخدادهایی اطمینان حاصل کرده و در صورت لزوم تدابیر لازم را اندیشید [۴].

تکنیک سنجش از دور InSAR بعنوان یک روش سنجش کامل در مهندسی ژئودزی و زمین شناسی در دهه‌های گذشته بدلیل دسترسی بیشتر داده‌ها از ماهواره-های راداری و پیشرفت قابل توجه در پردازش داده‌ها تجزیه و تحلیل زمانی از داده‌های رادار با دقت میلیمتر را امکان پذیر کرده است.

فرکانس بالای مشاهدات مکانی و زمانی روش تداخل سنجی راداری در مقایسه با ترازبایی می‌تواند دید جامعی از فرایند تغییرشکل در اختیار ما قرار دهد. علاوه بر فراوانی مکانی و زمانی مشاهدات، استفاده از این روش باعث صرفه جویی در زمان و هزینه می‌گردد [۵].

از آنجاکه رفتارنگاری سدهای خاکی بخشی از برنامه جامع کنترل پایداری است. از طرفی ابزار دقیق سد هرگونه مشکل احتمالی سد را تشخیص می‌دهد. اما به دلیل اینکه تعداد نقاط ابزار دقیق بر روی بدنه سد محدود است و گاهی اوقات بدلیل مشکلاتی از قبیل خرابی ابزار دقیق‌ها و نشست در نقاطی که ابزار دقیق بر روی آنها قرار نگرفته است، روش تداخل‌سنجی راداری بعنوان یکی از روشهایی که اسکن کلی از بدنه و محدوده سد انجام می‌دهد بعنوان یک روش ادغامی جهت بررسی رفتار سد مفید به نظر می‌رسد. از آنجاکه نتایج ابزار دقیق کارگذاشته شده در سد رفتار منطقی و طبیعی از سد نشان می‌دهد ولی شکل ظاهری سد در قسمت پایین‌دست دچار تغییراتی شده است که بدین منظور پردازش تصاویر سنتینل به همراه رفتارنگاری سد جهت بررسی تغییرات سد طالقان مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش حاضر شامل آسیب‌شناسی و عملکرد ابزارهای منصوبه و رفتارنگاری سد جهت استفاده در ارزیابی و رفتارسنجی برای هر مقطع ابزارگذاری می‌باشد.

۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

سد طالقان در دامنه جنوبی رشته کوه البرز در شمال غرب استان البرز واقع شده است. سد طالقان، سدی خاکی-سنگریزه‌ای با هسته رسی است که طول تاج سد ۱۱۱۱ متر و ارتفاع تاج از کف رودخانه ۱۰۹ متر می‌باشد.



شکل ۳- نمایی از برآمدگی و تغییر شکل در پایین دست سد طالقان

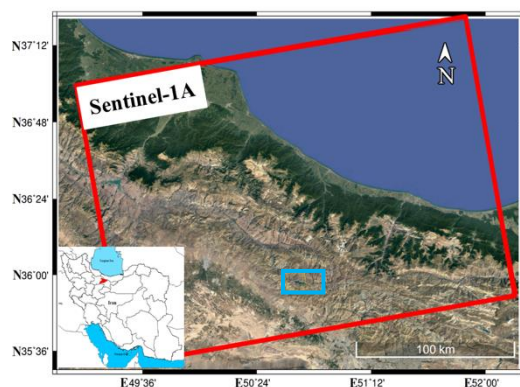
۳- روش شناسی

۳-۱- پردازش تصاویر راداری

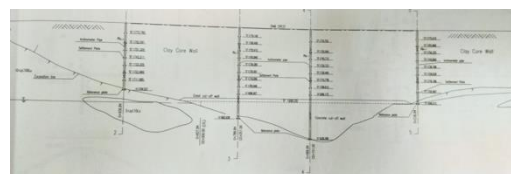
داده‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، تصاویر سنجنده Sentinel-1A به تعداد ۱۰۲ تصویر از ماهواره Soyuz سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV با اربیت ۲۸ می‌باشد، که از ۲۰۱۴ تا جولای ۲۰۱۹ تصویربرداری شده و از طریق سایت داده‌های ماهواره‌ای سازمان فضایی اروپا <https://scihub.copernicus.eu> اخذ شده است. ابتدا تصاویر موجود در مدار بالاگذر، تعیین شدند. مدل ارتفاع رقومی ۳۰ متر SRTM جهت پردازش در نرم افزار GMTSAR از طریق سایت <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen> تهیه و دانلود گردید. در روش تداخل‌سنجی 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^۱ 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 [۶]. 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.

^۱ Interferogram

متوسط بارش سالیانه حوضه ۴۷۸/۳۰ میلیمتر بوده و متوسط تبخیر سالانه از سطح دریاچه ۱۸۳۷/۲ میلیمتر برآورد گردیده است. بعد از اجرای طرح ساخت سد طالقان در سال ۱۳۸۰، در تابستان ۱۳۸۵ بهره‌برداری از سد و نیروگاه طالقان آغاز شد. نصب ابزار دقیق در سد طالقان در چهار قسمت بدنه سد، تخلیه تحتانی، سرریز و نیروگاه انجام شد. تعداد ۸۳ نشست سنج بر روی سد کارگذاری گردید [۶]. همچنین شکل ۲ موقعیت نقاط نشست‌سنج بر روی مقطع عرضی سد طالقان را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه. مستطیل ابی رنگ موقعیت سد طالقان. مستطیل قرمز سین تصویر Sentinel-1A



شکل ۲- مقطع عرضی سد طالقان و موقعیت نقاط نشست‌سنج

همچنین سد طالقان از نوع سدهای سنگریزه‌ای بوده که در سال ۱۳۸۵ مورد بهره‌برداری قرار گرفت که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. شکل ۳ تغییرات ظاهری بر روی سد نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات ساختمانی سد طالقان

ارتفاع از انتهای زیر پی/تراز پی	۱۶۴۰ از سطح دریا/۱۴۹ متر
ارتفاع از بستر/تراز بستر	۱۶۸۰ از سطح دریا/۱۰۹ متر
طول تاج	۱۱۱۱ متر
بیشترین عرض بدنه در پی	۶۳۶/۹ متر
تراز تاج سد	۱۷۸۹ از سطح دریا

باید در نظر داشت که جابجایی بدست آمده از یک اینترفروگرام در راستای خط دید سنجنده^۱ (LOS) بوده و تجزیه این بردار جابه‌جایی در جهات قائم و افقی نیازمند اینترفروگرام دیگر با هندسه تصویربرداری متفاوت و یا داده‌های زمینی اضافی است. برای بدست آوردن جابجایی سطح زمین در یک بازه زمانی، باید خطاهای مداری، اثرات توپوگرافی و اتمسفر از اینترفروگرام حذف شوند. برای 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^۲ از بین می‌رود. خطاهای مداری نیز برای هر اینترفروگرام با برازش یک روبه 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 [۷].

روش SBAS به کمک تکنیک تداخل‌سنجی 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 [۸ و ۹].

به کمک روش کمترین مربعات مقدار جابجایی در زمان‌های مختلف سری محاسبه می‌شود N. اینترفروگرام y (I1 I2 ... IN) = که حاصل تصویربرداری در M زمان A = (t1 t2 ... tM) می‌باشد به عنوان مشاهدات M مجهول x = (d1 d2 ... dM) 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 (۱ و ۱-و) پر می‌شود.

به کمک ماتریس A دستگاه معادلات برای بدست 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 شکل برای بدست آوردن تغییر شکل در زمان‌های مختلف است. در واقع نیاز به فرضی در مورد مدل تغییر شکل برای بدست آوردن سری‌های زمانی نیست. بعد از تشکیل ماتریس A به کمک جواب کمترین مربعات فوق جابجایی بدست می‌آید. بنابراین

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P y \quad [۹]:$$

۳-۲- ابزار دقیق نشست سنج^۳

جهت بررسی نشست یا تغییر شکل قائم در خاکریزها و پی از نشست سنجها استفاده می‌شود. این ابزارها شامل یکسری لوله هادی از جنس ABS بوده که از طریق تلسکوپ و چسب مخصوص به یکدیگر متصل می‌شوند [۱۰].

این ابزار در مقاطع مختلف سد نصب شده است و بصورت روزانه داده‌های آنها برداشت می‌شود. هدف از نصب آنها اندازه‌گیری تحکیم پی حین اجرا، اندازه‌گیری نشست پی و خاکریز در یک دوره طولانی مدت است.

۴- نتایج

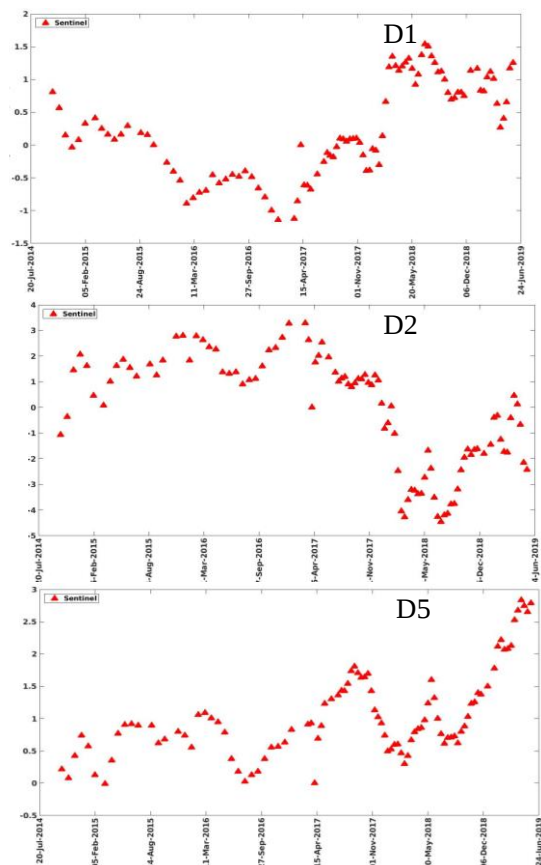
۴-۱- پردازش تصاویر راداری

برای بررسی سری زمانی جابجایی سد طالقان از ۱۰۲ تصویر Sentinel-1A در بازه زمانی اکتبر ۲۰۱۴ تا جولای ۲۰۱۹ 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 ۴ افزایش میزان جابجایی در جهت منفی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از پردازش تصاویر نشان می‌دهد که حداکثر میزان جابجایی بر روی سد ۴ mm/y می‌باشد.

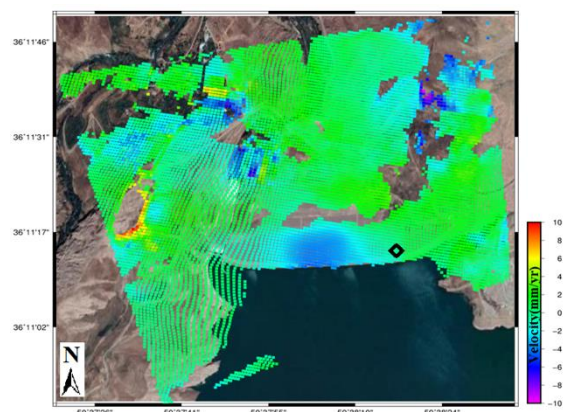
^۱ Line Of Sight
^۲ Ramp

^۳ settlement



شکل ۶- مقایسه تغییر نقاط پردازش راداری با انبساط سنج خاک (محورهای عمودی جابجایی بر حسب میلیمتر و محور افقی زمان می باشد)

شکل ۷ مقایسه حاصل از ابزار دقیق سد و نتایج حاصل از پردازش تصاویر Sentinel-1A نشان می دهد که ابزار دقیق هیچگونه تغییری را در بدنه سد نشان نمی دهد ولی نتایج تصاویر Sentinel-1A نشان می دهد سد در حال تغییر است که با نتایج مشاهدات زمین شناسی شکل (۳) مطابقت دارد.

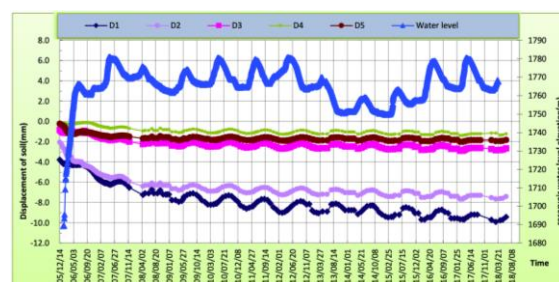


شکل ۴- پردازش حاصل از تصاویر Sentinel-1A در بازه زمانی (۲۰۱۴-۲۰۱۹)

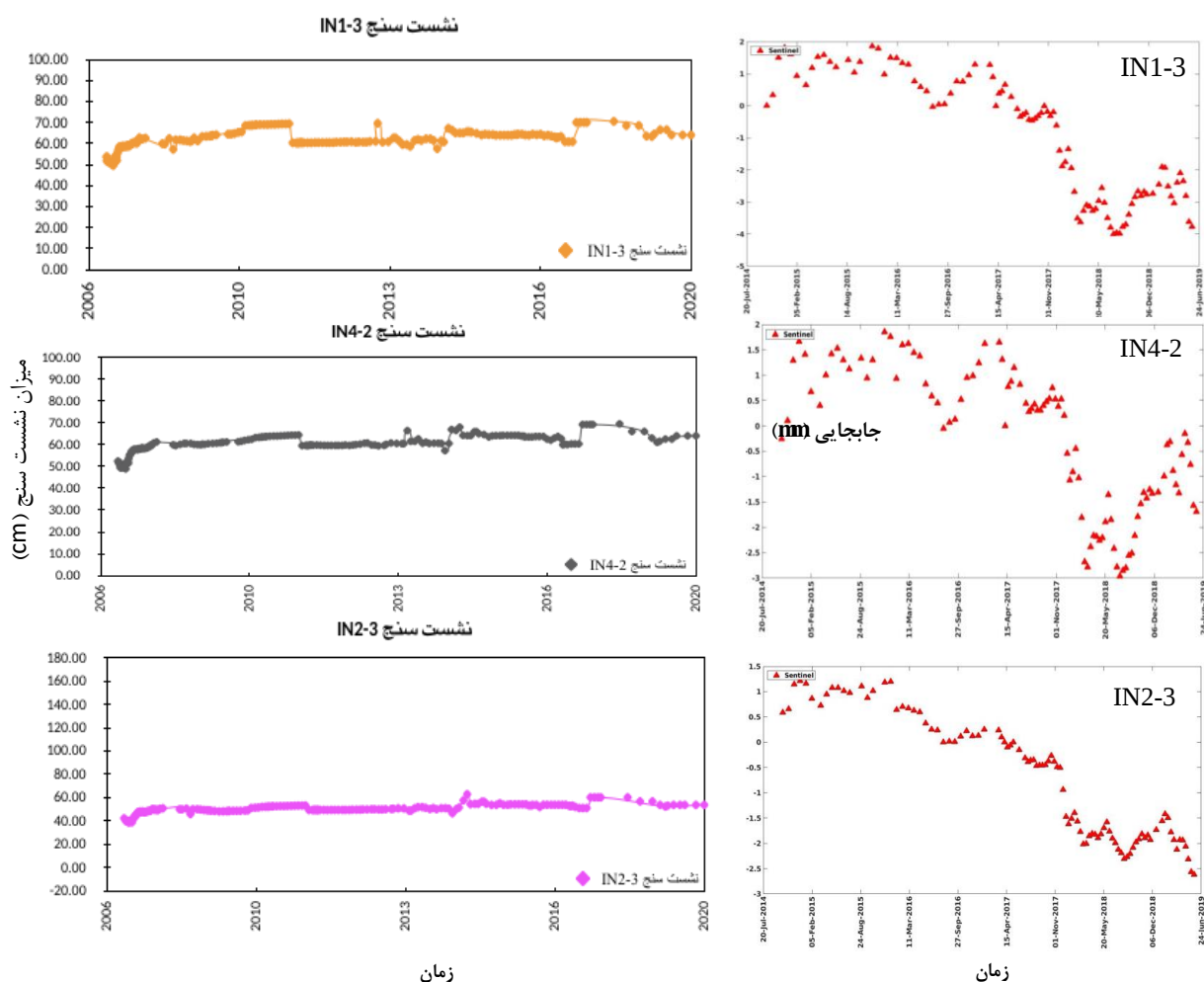
میزان جابجایی نقاطی که بر روی آنها نشست سنج واقع شده با استفاده از تصاویر Sentinel-1A بررسی شد.

۴-۲- نتایج ابزار دقیق

رفتار نشست سنج ها در بدنه سد در طی ۱۲ سال نشان می دهد که نشست تحکیمی زهکشی بدنه رو به پایان است و تغییرات نشست بسیار کم می باشد. همچنین نتایج انبساط سنج خاک در شکل ۵ نشان می دهد که چون موقعیت نصب این ابزار در محل اتصال دیواره بتنی سرریز و هسته رسی می باشد. نمودارهایی که اعداد منفی را نشان می دهند بیان می کند که هسته رسی و دیواره بتنی سرریز دارای اتصال و در وضعیت تماسی مناسبی می باشند و هیچگونه از هم گسستگی در سد مشاهده نمی شود. در صورتیکه هیستوگرام دو نقطه D1 و D2 نتایج معکوسی را نشان می دهد (شکل ۶) چون نزدیک تکیه گاه و جناحین بوده و کمترین ارتفاع خاکریزی را دارد در صورتیکه بقیه نقاط تکیه گاه روی آنها تاثیر ندارد و متاثر از رفتار سد است.



شکل ۵- نتایج انبساط سنج خاک در سد طالقان



شکل ۷- مقایسه نقاط نشست سنج با نتایج پردازش تصاویر Sentinel-1A

بحث و نتیجه‌گیری

به نظر می‌رسد. پایش بوسیله تصاویر بررسی نرخ نشست در تمام محدوده مورد بررسی را فراهم ساخته و امکان پایش آنرا برای کلیه نقاط در طی ادوار زمانی مختلف ایجاد می‌کند. در نهایت پایش مکرر تغییرات سطح زمین و مشخص کردن مناطق مستعد خطر نشست، مدیریت و کنترل مخاطرات را برای وزارت نیرو و شرکت آب منطقه-ای آسان می‌کند.

نتایج حاصل از ابزار دقیق کار گذاشته شده در سد و مقایسه آن با سطح تراز آب مخزن از زمان ابگیری تا کنون نشان می‌دهد که ابزارهای کار گذاشته شده در سد رفتار منطقی با تغییرات تراز آب سطح مخزن بیان می‌کنند. که این نتایج با نتایج حاصل از تحقیقات (۱۱) در سد سلماس مطابقت می‌کند. نتایج نشست سنج ها نشان می‌دهد هیچگونه قوس‌زدگی در سدها اتفاق نیافتاده است.

گزارش میکروژئودزی سد طالقان (۱۲) و نتایج ابزار دقیق بازگوکننده رفتار نرمال سد است. اما دفرمه شدن

نتایج سری زمانی حاصل از پردازش ۱۰۲ تصویر Sentinel-1A نشان می‌دهد که نرخ متوسط فرونشست سد از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ به طور متوسط ۴ میلیمتر در سال بوده است. همینطور الحسیناوی^۱ و همکاران [۱۱] در بررسی تغییرات سد (دربندیخان)^۲ 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 می‌رسند. همینطور ارمند^۳ و همکاران در بررسی سد وینولا^۴ در مالاگا اسپانیا به این نتیجه رسیدند که توانایی داده‌های باند C بخصوص داده های Sentinel-1A برای مطالعات سدهای خاکی مناسب

^۱ Al-Husseinawi

^۲ Darbandikhan

^۳ Armenteros

^۴ La Viñuela

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی ۴۴-۸۷-۳ مابین معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و شرکت آب منطقه‌ای تهران می‌باشد. از کلیه مهندسين و مشاورها در شرکت آب منطقه‌ای تشکر و قدردانی داریم.

ظاهری سد و نتایج حاصل از تصاویر Sentinel-1A محدوده کل سد را اسکن کرده است حاکی از تغییراتی بر روی بدنه سد است. نتایج آزمایشات زمین شناسی (۱۲) نشان داد که این تغییرات مربوط به هوازدهگی ریب رپ بدنه سد است.

مراجع

- [1] Szostak, A. & Massiera, M., 2004. Modeling of Deformations during Construction of a Large Earth Dam in the La Grande Complex, Canada, Technical Science, pp.7-13.
- [2] Najm, k. 2000. Monitoring and instrumentation in dams, Fourth Dam Construction Conference, Tehran, Iran.
- [3] Mirghasemi, E.A., Bagherzadehkhalkhali, A & Naghibi, H., 2004. Evaluation of instrumentation system in earth dams by case study of Lar and Panzdahkhordad dams. First National Congress of Civil Engineering, Sharif University of Technology.
- [4] Palasi, M., Salehi, B & Mirghaemi. A.2011. Investigation on the behavior of Maroon dam during second impoundment using instrumentation civil engineering infrastructures journal of faculty of engineering, Volum 44, 5. Page(s) 607 To 619
- [5] Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F., (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 39, 8-20.
- [6] Raucoules D, Maisons C, Carnec C, Le Mouelic 21. S, King C, Hosford S. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): Comparison with ground-based measurement. Remote sensing of environment. 2003; 88:468-478.
- [7] Hanssen RF. Radar interferometry: data 22. Interpretation and error analysis. Springer Science & Business Media; 2001
- [8] Lanari R, Mora O, Manunta M, Mallorquí JJ, Berardino P, Sansosti E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 42:1377-1386;2004
- [9] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent 24.2007. Scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis. J Geophys Res. 112:1-21.
- [10] Sadeghinezhad, S. R., Najjarchi, M., & Shahavand M. 2016. Providing appropriate solutions to reduce errors in precision instruments of earthen and pebble dams, Ninth National congress of Civil Engineering, Ferdosi University, Masshhad, Iran.
- [11] Cheraghi, A., Manafpour, M., & Mohammadi, M. A. 2014. Behavioral analysis of Dirik Chai Salmas soil dam using precision instrumnets (during exploitation). Eighth National Congress of Civil Engineering, Babol, Iran.
- [12] Behaviour report of Taleqan Dam, Regional water company of Tehran. 2016