

تحلیل تغییرات رفتاری بدنه سد لار و مخاطرات آن با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و بررسی‌های میدانی

مه‌رنوش قدیمی*

استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۸/۱۵ تاریخ پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۱

چکیده

در طی دهه گذشته، شکست فاجعه‌بار چندین سد در جهان در نتیجه عواملی همچون جنبه‌های ساختاری، ژئوتکنیکی، هیدرولیکی، عملیاتی و محیطی روی داده است. استفاده از روش‌های پایش برای جلوگیری از این مخاطره، مقرون به صرفه است؛ همچنین کاربرد روش‌هایی به منظور ارزیابی خطرهای ایجادشده برای جوامع ساکن پایین‌دست این ساختارها ضرورت دارد. در سال‌های اخیر به‌علت در دسترس بودن روش سنجش از دور و کاهش هزینه‌های آن، استفاده از آن افزایش یافته است. در این پژوهش در محدوده سد لار پس از مشاهده نقاط خردشدگی و فرونشست روی سنگ‌چین سد لار که حاصل فرار آب و فرسایش داخلی خاکریز است، از روش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر Sentinel-1A در دامنه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ بهره گرفته شد. نتایج پردازش نشان داد که جابه‌جایی سد در جناح چپ به‌صورت فرونشست، ۸ میلی‌متر بوده است، ولی از سال ۲۰۱۸ تا اواخر ۲۰۱۹ این روند تغییر کرده و نقاط نزدیک به تکیه‌گاه چپ و نزدیک تاج، بالازدگی بدنه سد را نشان می‌دهند. همچنین نتایج این تحقیقات تأکید می‌کند که پایش مداوم سد لار با استفاده از تصاویر راداری به‌همراه مشاهدات میدانی برای جلوگیری از مخاطرات جدی سد ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات رفتاری بدنه سد، روش تداخل‌سنجی راداری، سد لار، Sentinel-1A.

مقدمه

حفاظت از جان و مال مردم در برابر عواقب شکست سدها از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا جمعیت و زیرساخت‌های عظیم در برابر خطر شکست سد آسیب‌پذیرند. تجزیه و تحلیل برای تعیین زمان هشدار و شدت طغیان در زمان حادثه بسیار دشوار است [۱۹].

سدها و مخازن، سازه‌هایی مصنوعی هستند که برای بهره‌برداری و مدیریت منابع آب ساخته می‌شوند [۲۳]. سدها از نظر توسعه اقتصادی-اجتماعی ارزش چشمگیری دارند؛ زیرا هم از اراضی پایین‌دست در برابر خرابی سیل محافظت کرده و هم آب را برای اهداف چندمنظوره مانند آبیاری، آب آشامیدنی و انرژی آبی تأمین می‌کنند. امروزه، مخاطرات ناشی از سیل و خشکسالی به دلیل تأثیر تغییر اقلیم و بهره‌برداری یا مدیریت ناپایدار منابع آب در حال تبدیل شدن به مشکلی جهانی است [۱۶].

خرابی سدها و مخازن به فاجعه‌هایی منجر می‌شود که زندگی بشر و همه فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی را تهدید می‌کند [۱۱]. تغییر شکل برای هر سدی اجتناب‌ناپذیر است. تغییر شکل‌های کوچک پذیرفتنی است، اما اگر تخریب به سطح معینی برسد، خطر زیادی برای سد و مناطق پایین‌دست وجود دارد [۲۵].

در دهه اخیر از روش InSAR برای نظارت فرونشست در ساختمان‌ها، سدها، پل‌ها و معادن روباز استفاده شده است [۱۳].

بنابراین رفتار سدهای خاکی در جلوگیری از مخاطرات جدی باید بررسی شود. در این میان روش‌های PSI و DInSAR از روش‌های کاربردی در سنجش از دور هستند که برای شناسایی جابه‌جایی‌های عمودی به کار می‌روند [۱۰].

به گفته ژو و همکاران [۲۴]، نتایج روش InSAR بررسی مداوم تغییر شکل سد در منطقه وسیعی شامل کل سطح سد و منطقه اطراف آن را امکان‌پذیر می‌کند و نیز به طور مداوم تصویر واضحی از تغییر شکل سد ارائه می‌دهد.

به تازگی ریکاردی و همکاران در تجزیه و تحلیل یک سد با استفاده از داده‌های باندهای C از تصاویر Sentinel-1 استفاده کردند و نتیجه گرفتند که این داده‌ها با رزولوشن ۲۰ متر دقت در حد میلی‌متر را فراهم می‌کنند [۲۲].

دی‌پاسکل نشان داد که روش تداخل‌سنجی راداری می‌تواند اندازه‌گیری تغییر مکان سطوح سدهای خاکی و فرکانس ارتعاشات زیرساخت‌های اصلی بتنی آنها را فراهم کند [۹].

در تحقیق قدیمی در سد طالقان با استفاده از تصاویر Sentinel-1A در دوره زمانی ۲۰۱۸-

۲۰۱۴ نتیجه گرفته شد که حداکثر نشست سد طالقان ۳ میلی‌متر در راستای دید سنجنده است. برپایه این تحقیق، روش تداخل‌سنجی راداری در پایش سدهای خاکی و سازه‌ها برای جلوگیری از مخاطرات بااهمیت است و خروجی‌های حاصل از این روش اهمیت بسزایی در تحلیل رفتار سدها و تکمیل اندازه‌گیری‌های ابزار دقیق خواهد داشت [۲].

پس از اولین آبیگری سد لار، تراز سد به حدود ۲۴۵۸ متر رسید و سپس فروچاله‌ای به قطر ۱۰ متر در جناح چپ مجاور برم^۱ در همان حدود تراز آب دریاچه شکل گرفت [۱۷]. همچنین در حاشیه ساحل راست دریاچه از مجاور بدنه سد تا بالادست دره امامانک که طولی بیش از ۶ کیلومتر را شامل می‌شود، دهانه‌های متعدد مجاری فرار آب مشاهده شده است.

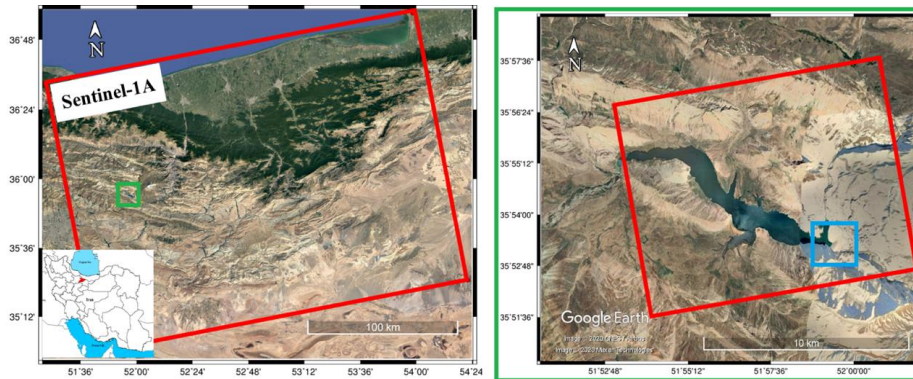
بعد از افت شدید تراز آب دریاچه در سال ۱۳۷۹، برای اولین بار برم خاکریز بدنه سد از زیر آب بیرون آمد. در سطح این برم یک شکاف طولی و چند فروچاله مشاهده شد. همچنین به‌تازگی روی ریپ‌رپ^۲، به‌هم‌ریختگی‌ای به‌شکل فرونشست و خردشدگی موضعی سنگ‌چین به چشم می‌خورد. این وضعیت حاصل تداوم فرار آب از این نقاط و فرسایش داخلی خاکریز است [۳].

این پژوهش با هدف شناسایی و بررسی جابه‌جایی نقاطی از سد لار که در معرض مخاطره جدی قرار دارند انجام گرفته است. بدین منظور از روش تداخل‌سنجی راداری در دامنه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ به‌منظور اسکن کلی وضعیت سد لار و شناسایی نقاط بحرانی استفاده شده است.

منطقه تحقیق

سد خاکی لار در ۸۵ کیلومتری شمال شرقی تهران واقع است. متوسط بارندگی در محل سد لار حدود ۶۰۰ میلی‌متر در سال است که بیش از ۶۰ درصد آن به‌صورت برف است. درحالی که فصل تابستان خشک است و تنها ۶ درصد از بارش‌ها را در بر دارد، نزدیک به ۷۰ درصد بارش‌های منطقه در زمستان و بهار رخ می‌دهد [۱].

1. Berm
2. Riprap



شکل ۱. نقشه منطقه تحقیق، چارچوب قرمز تصویر Sentinel-1A، چارچوب آبی محدوده سد لار، چارچوب سبز محدوده منطقه تحقیق در تصویر Sentinel-1A

رودخانه لار درون ناودیس تیزکوه جریان دارد و سد لار روی آن احداث شده است. این ناودیس دارای گسل‌های متعددی همچون گسل‌های دره لار، دمبک کوه و بیابانک است. در یال شمالی ناودیس تیزکوه، سازندهای کم‌تراوای شمشک و دلیچای با ضخامت بیش از ۱۱۰۰ متر توسط لاوهای آتشفشان دماوند پوشیده شده است. در هسته و یال جنوبی، سازند شمشک توسط حدود ۳۵۰ متر آهک کارستی لار پوشیده شده است. آهک کارستی تیزکوه با ضخامتی حدود ۲۰۰ متر روی آهک لار قرار دارد [۶].

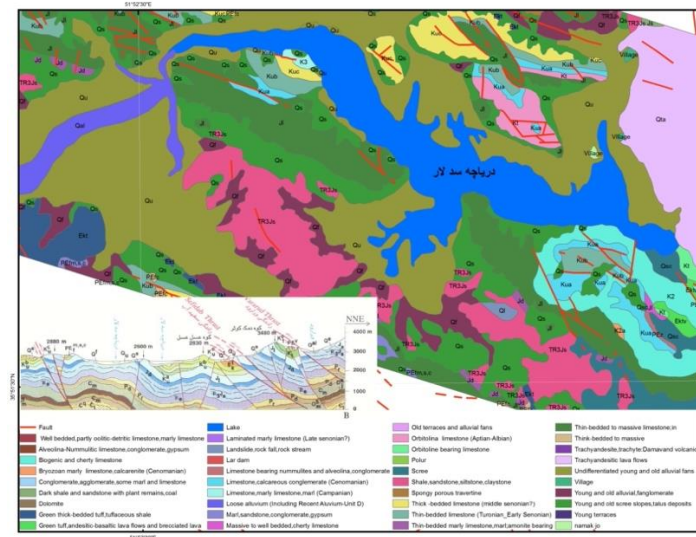
سد خاکی لار با هدف اولیه کمک سالانه ۱۷۸ میلیون متر مکعب به حوزه جاجرود و تأمین آب آشامیدنی تهران و تنظیم سالانه ۲۴۰ میلیون متر مکعب آب کشاورزی مازندران با ارتفاع بدنه ۱۰۵ متر و حجم مخزن ۹۶۰ میلیون متر مکعب در ۸۵ کیلومتری شمال شرق تهران توسط مهندس مشاور الکساندر گیپ روی رودخانه لار طراحی شد. تولید انرژی برقی از اهداف جنبی آن است [۱۸].

جناح راست سد روی سازندهای آهکی و جناح چپ روی رسوبات آبرفتی واقع بر لایه‌های لاوا حاصل از فوران دماوند قرار گرفته است (شکل ۲). مجاری کارستی توسعه‌یافته در سازندهای آهکی عامل نشت آب از دریاچه است (شکل ۳).

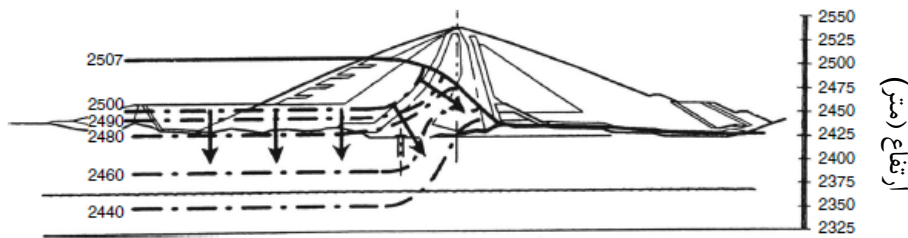
سازند لار، سازندی است که از آهک و آهک دولومیتی تشکیل شده است و بر اثر چین‌خوردگی و تکتونیک به شدت درزه و شکاف دارد. درزه‌ها اغلب باز و ممتدند و تا عمق به نسبت زیادی ادامه دارند. نفوذ آب از این درزه‌ها، حل شدن لایه‌های آهکی در عمق (بیش از

تحلیل تغییرات رفتاری بدنه سد لار و مخاطرات آن با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و ... ۳۵۷

۳۰۰ متر) و خاصیت کارستی، حفره‌ها و غارهای کارستی در سطح وسیعی تشکیل و سبب آبگذری و فرار آب از این سد شده‌اند [۷].



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی لار به همراه نیمرخ زمین‌شناسی منطقه



شکل ۳. نمایش شبکه جریان در خاکریز و پی سد لار [۱۸]

روش تحقیق

داده‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر، تصاویر سنجنده Sentinel-1A از ماهواره Soyuz سازمان فضایی اروپا، با فرمت SLC از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV با اربیت ۲۸ است که

از ۲۰۱۴ تصویربرداری شده و از طریق سایت داده‌های ماهواره‌ای سازمان فضایی اروپا^۱ اخذ شده است. ابتدا تصاویر موجود در مدارهای یکسان، تعیین و مدل ارتفاع رقومی ۳۰ متر SRTM fvhd پردازش در نرم‌افزار GMTSAR از سایت <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen> تهیه و دانلود شد. 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^۲ تولید می‌شود. اینترفروگرام تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به‌طور دقیق روی هم منطبق شده‌اند، حاصل می‌شود [۲۱].

شایان ذکر است که ثبت هندسی دو تصویر طی دو مرحله به‌صورت تقریبی و دقیق انجام می‌گیرد. در یک اینترفروگرام اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر گویای اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویربرداری است. به کمک مقدار اختلاف فاز می‌توان متغیرهای مختلف از جمله میزان جابه‌جایی سطح زمین تا کسری از سانتی‌متر و اطلاعات توپوگرافی سطح زمین را با دقت ۱۰ متر استخراج کرد [۱۲]. باید در نظر داشت که جابه‌جایی به‌دست‌آمده از یک اینترفروگرام در راستای خط دید سنجنده^۳ (LOS) است و تجزیه این بردار جابه‌جایی در جهات قائم و افقی نیازمند اینترفروگرام دیگر با هندسه تصویربرداری متفاوت یا داده‌های زمینی اضافی است. برای به‌دست آوردن جابه‌جایی سطح زمین در یک دوره زمانی، باید خطاهای مداری، اثرهای توپوگرافی و اتمسفر از اینترفروگرام حذف شوند [۲۰]. برای حذف اثر توپوگرافی، از مدل ارتفاعی رقومی استفاده شده است. همان‌طور که تأثیرات اتمسفر با توپوگرافی همبستگی دارد که این اثر با تناسب خطی از بین می‌رود، اثرهای باقی‌مانده با اطلاعات دقیق اربیت‌ها حذف می‌شود. همچنین اگر خطای اربیتی باقی مانده باشد اثر آن با رمپ^۴ از بین می‌رود. خطاهای مداری نیز برای هر اینترفروگرام با برازش یک رویه درجه یک به مناطق فاقد جابه‌جایی مدلسازی می‌شود و از اینترفروگرام مورد نظر کم می‌شود. مرحله بعدی ایجاد سری زمانی تغییر شکل با استفاده از اینترفروگرام است [۱۲].

روش SBAS به کمک تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی امکان کشف تغییر شکل سطح زمین و همچنین بررسی این تغییرات در طول زمان را فراهم می‌کند. به‌منظور 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 [۱۴].

1. <https://scihub.copernicus.eu>

2. Interferogram

3. Line Of Sight

4. Ramp

به کمک روش کمترین مربعات مقدار جابه‌جایی در زمان‌های مختلف سری محاسبه می‌شود. N اینترفروگرام $y = (I_1 I_2 \dots I_N)$ که حاصل تصویربرداری در M زمان $A = (t_1 t_2 \dots t_M)$ است، به‌عنوان مشاهدات M مجهول $x = (d_1 d_2 \dots d_M)$ به‌عنوان مجهولات روش کمترین مربعات در نظر گرفته می‌شود. بنابراین می‌توان دستگاه معادلات را به‌صورت $y = Ax$ نوشت. ماتریس A بسته به اینکه اینترفروگرام بین کدام دو زمان تشکیل شده است به‌صورت 1×1 و 1×1 پر می‌شود.

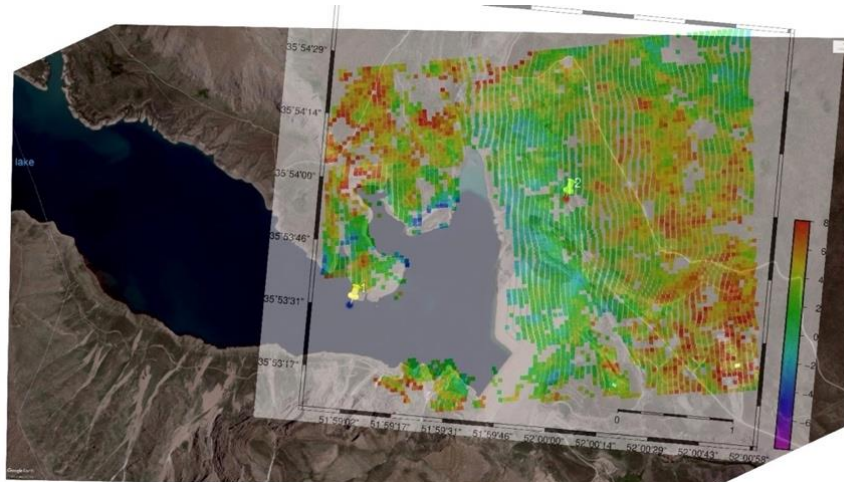
به کمک ماتریس A دستگاه معادلات برای به‌دست آوردن تغییر شکل در زمان‌های مختلف تهیه تصاویر تشکیل داده می‌شود. نکته‌هایی که در روش طول باز کوتاه اهمیت دارد، مستقل بودن این روش از مدل تغییر شکل برای به‌دست آوردن تغییر شکل در زمان‌های مختلف است. در واقع نیاز به فرضی در مورد مدل تغییر شکل برای به‌دست آوردن سری‌های زمانی نیست. بعد از تشکیل ماتریس A به کمک جواب کمترین مربعات فوق جابه‌جایی به‌دست می‌آید. بنابراین x برابر است با [۱۲].

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

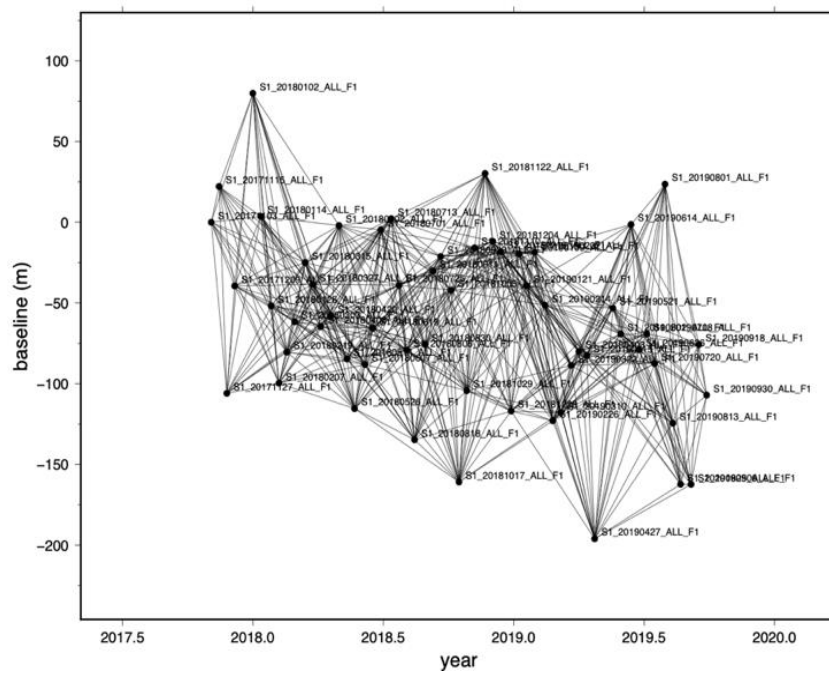
بحث

نتایج حاصل از پردازش تصاویر Sentinel-1A نشان می‌دهد که از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ روند تغییرات نقاط فرونشست روی بدنۀ سد در بعضی نقاط افزایش داشته است. 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 شد. همان‌طور که در شکل ۴ که بیانگر میزان تغییر شکل قائم در دامنه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ است، مشاهده می‌شود: عمده تغییر شکل قائم به‌صورت نشست در جناح چپ بدنه و تکیه‌گاه چپ تا محدوده رودخانه دلیچای بوده است و از سال ۲۰۱۸ سد رفتار معکوسی در تکیه‌گاه داشته و به‌صورت بالازدگی و تورم تغییر شکل‌ها رخ داده است. همچنین در شکل ۵ شبکه بیس‌لاین‌های مربوط به تصاویر دیده می‌شود.

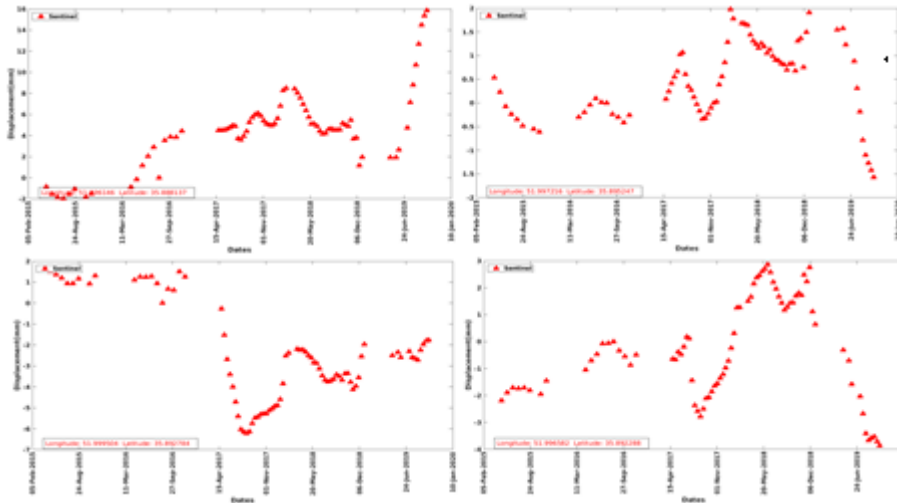
پروفیل تغییرات نقاط موجود روی بدنۀ سد لار در شکل ۶ نشان داده شده است. نقاط d , f , b فرونشست و نقطه a بالآمدگی را نشان می‌دهند. شکل ۷ نیز موقعیت نقاط را روی تصویر گوگل ارث نشان می‌دهد.



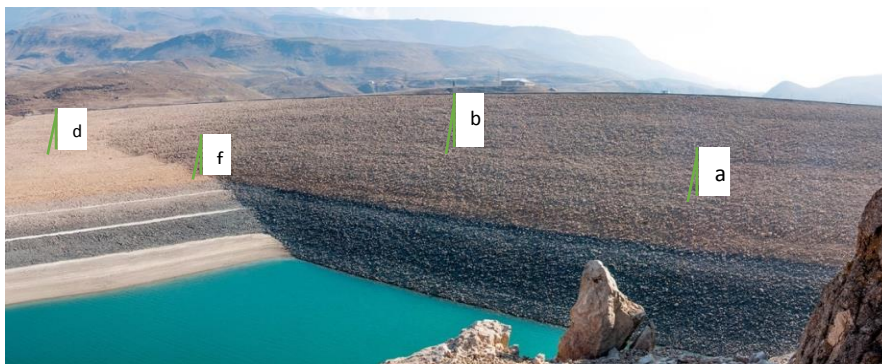
شکل ۴. پردازش تصاویر Sentinel-1A محدوده سد لار از سال ۲۰۱۵-۲۰۱۹



شکل ۵. شبکه هندسی بیس لاین‌ها بر حسب متر



شکل ۶. پروفیل تغییرات نقاط روی بدنه سد لار از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰



شکل ۷. موقعیت نقاط انتخاب‌شده روی بدنه سد لار

همچنین اختلاف ارتفاع روی بدنه سد لار در شکل ۸ نشان‌دهنده تغییرات ایجادشده در بدنه سد لار است. براساس تحلیل‌های تداخل‌سنجی راداری محدوده‌های تغییر شکل از لحاظ نشست و تورم به سه محدوده مطابق شکل ۹ تقسیم شده است. بخش میانی تکیه‌گاه راست که تغییر شکل‌های قائم به صورت نشست در پایین‌دست و بالادست بدنه است.



شکل ۸. اختلاف ارتفاع سنگ چین سد لار



شکل ۹. موقعیت تغییر شکل های قائم رخ داده در بدنه و تکیه گاه سد لار براساس نتایج تداخل سنجی راداری با استفاده از تصاویر Sentinel-1A

براساس تحقیقات انجام گرفته در سد موصل که در عراق روی سازندهایی از جنس سنگ آهک، گچ و نمک انیدریت ساخته شده، وسعت حفره های شکل گرفته در زیر پایه سد افزایش پیدا کرده است. توسعه یافتگی کارست و تشکیل فروچاله های کارستی از خطرناک ترین ویژگی های تهدیدکننده ایمنی این سد است. وضعیت سد در معرض خطر نسبی شدید است و در صورت شکسته شدن ۶ میلیون نفر تحت تأثیر قرار می گیرند و ۷۲۰۲ کیلومترمربع مساحت

منطقه تحت تأثیر سیلاب قرار خواهد گرفت. سد موصل از سال ۱۹۸۶ دارای مشکل تراوش است. از این‌رو این تمهیدات در نظر گرفته شد که عملیات تزریق و ارزیابی پایش با سیستم ابزارهای جدید برای تعیین دقیق رفتار نقاط مختلف سد بسیار مهم است [۵]. همچنین مرکز تحقیقات مهندسی و زیست‌محیطی آمریکا [۸] برای ارزیابی وضعیت زمین‌شناسی در منطقه سد از تعیین کیفیت توده سنگ به‌عنوان شاخصی برای توصیف وضعیت شکستگی توده سنگ استفاده می‌کند [۱۵]. از این‌رو با توجه به شباهت خطر سد لار با سد موصل، پایش مداوم سد لار همراه با تطبیق داده‌های زمین‌شناسی توصیه می‌شود. بدین جهت ایمن‌سازی و سیستم هشدار برای کاهش مخاطرات، ضروری و واجب به نظر می‌رسد [۴].

نتیجه

نتایج تحقیقات نشان داد که بیشترین نشست در محدوده منطقه تحقیق، ۲۰ میلی‌متر در مدت ۵ سال گذشته بوده و از سال ۲۰۱۸ نرخ تغییر شکل قائم به‌صورت ناگهانی افزایش یافته است. بخش میانی سد تا تکیه‌گاه چپ (رنگ سبز) تغییر شکل‌ها در این محدوده طی ۵ سال گذشته به‌صورت نوسانی بوده و از نشست به بالازدگی تبدیل شده است. در دامنه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ نشست رخ داده (شکل ۶)، ولی از سال ۲۰۱۸ تاکنون بالازدگی اتفاق افتاده و بیشترین جابه‌جایی مثبت ۷ میلی‌متر به‌صورت بالازدگی بوده است. با توجه به افزایش نرخ جابه‌جایی از اواسط سال ۲۰۱۸ در بدنه و تکیه‌گاه چپ با توجه به اطلاعات گذشته سد باید نتایج از لحاظ پایداری و ایمنی سد کنترل شود. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که علت تغییر شکل روی بدنه و تکیه‌گاه چپ، نشست آب از مجاری آهکی و کارستیک داخل مخزن و عبوری از زیر بدنه است. با توجه به افزایش فشار، آب منفذی در لایه آبرفت روی آهک قرار می‌گیرد و بخش‌های پرشده درزه‌های آهک به‌وسیله مصالح ریزدانه آبرفتی سبب می‌شود مقاومت برشی خاک کاهش یابد و با جریان هیدرولیکی آب نشستی مصالح حمل شده و به‌مرور آبرفت‌های زیر بدنه و پی سد شسته می‌شود و در نهایت فرسایش داخلی رخ می‌دهد. با استمرار این وضعیت در سال‌های متمادی بهره‌برداری این محدوده‌ها گسترش پیدا می‌کند و مصالح، بدنه سد را تحت تأثیر فرونشست قرار می‌دهد. همچنین احتمال فروریزش ناگهانی در بدنه و تشکیل سینک‌هول بزرگ وجود دارد. نقاط فرار آب‌دیده‌شده، مشکل خاصی جز هدر رفتن آب ایجاد نمی‌کنند.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی با شماره ۳-۶۳-۸۵ است که با همکاری معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و گروه تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای تهران انجام گرفته است. همچنین از همه مهندسان و مشاورها در طرح علاج بخشی سد لار در شرکت آب منطقه‌ای استان تهران تقدیر و تشکر می‌کنیم.

منابع

- [۱]. گزارش جامع آب‌بندی سد لار (۱۳۷۰)، جلد‌های ۱ تا ۵، مهندسين مشاور لار.
- [۲]. قدیمی، مهرنوش (۱۳۹۸). «پایش تغییرات بدنه سد طالقان به روش تداخل‌سنجی راداری»، منابع طبیعی، مرتع و آبخیزداری، دوره ۷۲، شماره ۳، ص ۸۲۹-۸۱۹.
- [۳]. مهندسين مشاور لار (۱۳۸۳). «مطالعات بازنگری کنترل و کاهش فرار آب از سد لار»، ۱۱ جلد.
- [۴]. مقیمی، ابراهیم (1395). «چرا دانش مخاطرات (دیدگاهی جدید برای درک مخاطرات)»، مدیریت مخاطرات محیطی، دوره ۳، شماره ۳، ص ۱۹۷-۱۹۱.
- [5]. Al-Ansari, N.; Adamo, N.; Knutsson, S.; Laue, J.; & Sissakian, V. (2020). "Mosoul Dam: Is it the most dangerous Dam in the World?", *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, pp:5179-5199.
- [6]. Allenbach, P. (1966). "Geologie und Petrographie des Damavand und seiner Umgebung (Zentral Elburz)", Iran. Mitteilungen aus dem Geologischen Institute der Eidgenoessischen Technischen Hochschule und der Universitaet Zurich, Neu Folge, 63, 144.
- [7]. Bailey, E. B.; Jones, R. C. B.; & Asfia, S. (1948). "Notes on the geology of the Elburz Mountains, north-east of Tehran, Iran", *The quarterly Journal of the Geological Society of London*, 413, 1-42.
- [8]. Deere, D.U.; & Deere, D.W. (1989). "Rock quality designation (RQD) after twenty years contract Report GL-89-1. U. S. Army Engineer Water ways Experiment station, Vicksburg, MS.
- [9]. Di Pasquale, A. (2018). "Monitoring Strategies of Earth Dams by Ground-Based Radar Interferometry: How to Extract Useful Information for Seismic Risk Assessment", *Sensors*, v. 18, pp: 1-25.
- [10]. Farova, K.; Jelenek, J.; Kopackova-Strnadova, V.; & Kycl, P. (2019). "Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovicky Landslide, Czech Republic", *Remote Sensing*, v. 11, p: 1-23.
- [11]. Fu, X.; Gu, CS.; Su, HZ.; & Qin, XN. (2018). "Risk analysis of earth-rock dam failures based on fuzzy event tree method", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15: 886.
- [12]. Hanssen, RF. (2001). "Radar interferometry: data interpretation and error analysis", *Springer Science & Business Media*.
- [13]. Herrera, G.; Tomás, R.; Lopez-Sanchez, J.M.; Delgado, J.; Mallorqui, J.J.; Duque, S.; & Mulas, J. (2007). "Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain)", *Engineering Geology*. 90 (3-4): 148-159.
- [14]. Hooper, A.; Segall, P.; & Zebker, H. (2007). "Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis", *J Geophys Res*. 112, pp:1-21.

- [15]. Kelly, J.; Wakeley, L.D.; Broadfoot, S.W.; Pearson, M.L.; McGill, T.E.; Jorgeson, J.D.; Talbot, C.A.; & McGrath, C.J. (2007). Geologic setting of Mosul Dam and its engineering implications, final report, U.S. Army Engineer District, Gulf Region, Baghdad, Iraq.
- [16]. Lanari, R.; Mora, O.; Manunta, M.; Mallorquí, J.J.; Berardino, P.; Sansosti, E. (2004). "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, pp:1377-1386.
- [17]. Lar Dam and Mazandaran irrigation project- final report. (1972). Volume 1 to 4, March, Sir Alexander Gibb.
- [18]. Lar Dam rehabilitation studies. (1994). "Stage I- evaluation and identification", Volume 1 to 7, March, *SETEC consultant engineers*.
- [19]. Mani, P.; Kumar, R.; & Patara, J. P. (2020) "Dam break flood hazard assessment: A case study for a small dam at source stream of river Ganga in Uttarakhand", *India. Roorkee WaterConclave*.
- [20]. Piao, S.; Ciais, P.; Huang, Y.; Shen, Z.; Peng, S.; Li, J.; Zhou, L.; Liu, H.; Ma, Y.; & Ding, Y. (2010) "The impacts of climate change on water resources and agriculture in China", *Nature*, 467: 43–51.
- [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, pp: 468-478.
- [22]. Riccardi, P.; Tessari, G.; Lecci, D.; Floris, M.; & Pasquali. (2017). "Use of Sentinel-1 SAR data to monitor Mosul dam vulnerability", 19th EGU General Assembly. In: *EGU GENERAL ASSEMBLY*, 19, pp: 23-28, Vienna.
- [23]. Stematiu, D. (2006) *Dam engineering*, Bucuresti Conspress.
- [24]. Zhou, W.; Li, S.; Zhou, Z.; & Chang, X. (2016). "Remote Sensing of Deformation of a High Concrete-Faced Rockfill Dam Using InSAR: A Study of the Shuibuya Dam", *China. Remote Sensing*, v. 8, n. 255, p. 1-15.
- [25]. Yang, J.; & Wu, Z. (2002). "Present conditions and development of dam safety monitoring and control researches home and abroad (in Chinese)", *J Xi'an Univ Technol*, 18, pp: 26–30.