



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Monitoring landslide areas in the Siah Bisheh Dam Project using Surveying and radar interferometry

A. Bayat¹, M.R. Seif², B.A. Beirami^{*2}¹ Department of Civil and Surveying Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran² Department of Surveying Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 08 February 2025

Reviewed: 31 March 2025

Revised: 04 May 2025

Accepted: 02 June 2025

KEYWORDS:

Interferometry

Radar

landslide

Mapping

Siah Bisheh Dam

* Corresponding author

✉ b_asghari@ihu.ac.ir

☎ (+9821) 77105776

Background and Objectives: Landslides, as one of the most destructive natural phenomena, pose a serious threat to engineering and environmental structures. The Siah Bisheh Pumped Storage Dam, the first concrete-faced pumped storage dam in Iran, is at risk of geological displacements due to its geographical location in the Alborz Mountains and complex geological conditions (including active faults, unstable rock masses, and steep slopes). This study aimed to monitor land surface changes and manage landslide hazards within the dam area, using ground surveying and interferometric radar (InSAR) methods. The main focus was on analyzing the impact of key factors such as rapid drawdown, water level fluctuations, and construction activities on the instability of the area.

Methods: In this study, two main methods were used. In the first method, called Ground surveying, changes in critical points such as Gully 5 and areas adjacent to Chalus Road have been monitored by installing concrete targets (small benchmarks) and periodically measuring planar and elevation displacements since 2011. In the second method, changes in the land surface were examined with millimeter accuracy using Sentinel-1 satellite data from 2015 to 2022 and image processing in SNAP software. The processing steps included image alignment, removal of topographic effects with a digital elevation model, Goldstein phase filtering, and phase-to-displacement conversion.

Findings: The results showed significant agreement between the two methods. The highest displacements occurred in areas close to dam basins (such as Gully 5 with more than 60 cm of elevation displacement) and areas adjacent to Chalus Road. Rapid reservoir subsidence was identified as the main cause of instability, as sudden changes in water level accelerate the saturation and rapid depletion of soil and rock masses. The InSAR method was confirmed as a low-cost and faster tool compared to traditional land surveying methods, with displacement estimates of 0.13 to 0.5 meters in identifying changes over large areas.

Conclusion: The combination of ground and satellite methods allows for more comprehensive and continuous monitoring of unstable areas. It is suggested that radar interferometry be used for periodic monitoring and crisis management in similar projects. Also, creating a satellite database and integrating the results with dam behavior models will help reduce landslide risk. This study emphasizes the role of modern technologies in increasing the accuracy and reducing the costs of monitoring sensitive structures.



NUMBER OF REFERENCES

31



NUMBER OF FIGURES

11



NUMBER OF TABLES

10

مقاله پژوهشی

پایش محدوده‌های لغزشی در پروژه سدهای سیاه‌بیشه با استفاده از روش نقشه‌برداری زمینی و تداخل‌سنجی راداری

علی بیات^۱، محمد رضا سیف^۲، بهنام اصغری بیرامی^{۲*}^۱ گروه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد واحد تهران شمال، تهران/ایران^۲ گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی، تهدیدی جدی برای سازه‌های مهندسی و محیط‌زیست محسوب می‌شوند. سد تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه نخستین سد خاکی تلمبه ذخیره‌ای ایران با رویه بتنی، به دلیل موقعیت جغرافیایی در رشته کوه البرز و شرایط زمین‌شناسی پیچیده (شامل گسل‌های فعال، توده‌های سنگی ناپایدار، و شیب‌های تند)، در معرض خطر جابجایی‌های زمین‌شناختی قرار دارد. این پژوهش با هدف پایش تغییرات سطح زمین و مدیریت خطرات ناشی از زمین‌لغزش در محدوده این سد، با استفاده از روش‌های نقشه‌برداری زمینی و تداخل‌سنجی راداری (InSAR) انجام شد. تمرکز اصلی بر تحلیل تأثیر عوامل کلیدی مانند افت سریع مخزن (Rapid Drawdown)، نوسانات سطح آب، و فعالیت‌های عمرانی بر ناپایداری منطقه بود.

روش‌ها: در این مطالعه، دو روش اصلی به کار گرفته شده است. در روش اول که نقشه‌برداری زمینی نام دارد، با نصب تارگت‌ها بتنی (بنچمارک‌های کوچک) و اندازه‌گیری دوره‌ای جابجایی‌های مسطحانی و ارتفاعی از سال ۱۳۹۰ تاکنون، تغییرات در نقاط بحرانی مانند گالی ۵ و مناطق مجاور جاده چالوس پایش شده است. در روش دوم با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ و پردازش تصاویر در نرم‌افزار SNAP، تغییرات سطح زمین با دقت میلیمتری بررسی شد. مراحل پردازش شامل هم‌ترازی تصاویر، حذف اثرات توپوگرافی با مدل رقومی ارتفاعی، فیلترگذاری فاز گلدشتاین، و تبدیل فاز به جابجایی بود.

یافته‌ها: نتایج نشان‌دهنده همخوانی قابل توجه بین دو روش بود. بیشترین جابجایی‌ها در مناطق نزدیک به حوضچه‌های سد (مانند گالی ۵ با بیش از ۶۰ سانتیمتر جابجایی ارتفاعی) و نواحی مجاور جاده چالوس رخ داده است. افت سریع مخزن به عنوان عامل اصلی ناپایداری شناسایی شد، به طوری که تغییرات ناگهانی سطح آب، اشباع و تخلیه سریع توده‌های خاکی و سنگی را تسریع می‌کند. روش تداخل‌سنجی راداری با تخمین جابجایی ۰.۱۳ تا ۰.۵ متر در شناسایی تغییرات پهنه‌های وسیع، به عنوان ابزاری کم هزینه و سریع نسبت به روش‌های سنتی نقشه‌برداری زمینی تأیید شد.

نتیجه‌گیری: ترکیب روش‌های زمینی و ماهواره‌ای امکان پایش جامع‌تر و مداوم مناطق ناپایدار را فراهم می‌کند. پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های مشابه، از تداخل‌سنجی راداری برای پایش ادواری و مدیریت بحران استفاده شود. همچنین، ایجاد پایگاه داده ماهواره‌ای و یکپارچه‌سازی نتایج با مدل‌های رفتاری سد، به کاهش ریسک زمین‌لغزش کمک خواهد کرد. این مطالعه بر نقش فناوری‌های نوین در افزایش دقت و کاهش هزینه‌های پایش سازه‌های حساس تأکید دارد.

واژگان کلیدی:

تداخل‌سنجی

رادار

زمین‌لغزش

نقشه‌برداری

سد سیاه‌بیشه

* نویسنده مسئول

b_asghari@ihu.ac.ir

۰۲۱-۷۷۱۰۵۷۷۶ ①

مقدمه

به دلیل ساختار خاص خود و تغییرات مداوم در تراز آب مخازن، از جمله سازه‌هایی هستند که پایش مداوم رفتار آن‌ها ضروری است [۱]. سد تلمبه‌ذخیره‌ای سیاه‌بیشه، اولین سد خاکی تلمبه‌ذخیره‌ای با رویه بتنی در ایران، در رشته‌کوه البرز و در محدوده‌ای با زمین‌شناسی پیچیده و مستعد زمین‌لغزش قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های زمین‌شناسی این منطقه، از جمله گسل‌های فعال و توده‌های ناپایدار سنگی و خاکی، این سد را در برابر مخاطرات زمین‌شناختی حساس

کنترل و مدیریت مناطق ناپایدار به‌ویژه در مناطق کوهستانی و پرجمعیت یکی از ضرورت‌های کلیدی برای کاهش خسارات ناشی از بلایای طبیعی و حفاظت از زیرساخت‌ها به شمار می‌رود. زمین‌لغزش‌ها که عمدتاً تحت تأثیر عواملی نظیر بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی، تغییرات سطح آب‌های ذخیره‌شده در سدها، و شرایط زمین‌شناسی ناپایدار رخ می‌دهند، می‌توانند تأثیرات مخربی بر سازه‌های عمرانی و محیط‌زیست داشته باشند. در این میان، سدهای تلمبه‌ذخیره‌ای

آب ذخیره‌شده به تأمین آب شرب تهران اختصاص یافته و در نتیجه، تغذیه سفره‌های زیرزمینی در دشت کاهش یافته است [۱۷]. نتایج بررسی تغییرات سطح ایستایی، داده‌های پیژومتری و نقشه‌های راداری نشان داد که این کاهش به‌ویژه در نواحی شمالی دشت ورامین منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی و افزایش نرخ فرونشست زمین شده است. در پژوهشی که بر روی سد گیوی طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ انجام شد، برای شناسایی جابجایی‌ها و ناپایداری‌های زمین، از ترکیب تکنیک تداخل‌سنجی راداری (SBAS-InSAR) و داده‌های GPS استفاده گردید [۱۸]. نتایج نشان داد که این دو روش می‌توانند مکمل مؤثری در کشف دقیق نقاط جابجا شده باشند و تطابق خوبی در شناسایی جابجایی‌های ارتفاعی و افقی روی بدنه سد و اطراف آن ارائه دهند.

در پژوهش که بر روی سد Upper Atbara در کشور سودان از تصاویر سری زمانی سنتینل-۱ و فن تداخل‌سنجی راداری به منظور پایش جابجایی و تغییر شکل بدنه سد استفاده شد [۱۹]، نتایج نهایی نشان داد که بیشینه جابجایی در تاج سد تا ۱۹۰ میلی‌متر بوده و دقت نتایج با اندازه‌گیری‌های میدانی تطابق بالایی داشته، که کارایی بالای روش تداخل‌سنجی راداری را در پایش تغییرشکل سدها تأیید می‌کند. در پژوهش دیگری در کشور ترکیه، جابجایی بلندمدت سد آتاتورک با استفاده از تحلیل چندزمانه InSAR و تصاویر ماهواره‌ای ERS، انویست و سنتینل-۱ مورد بررسی قرار گرفت [۲۰]. نتایج نشان داد که پس از ۲۸ سال از ساخت سد، جابجایی تدریجی تا ۱۱ سانتی‌متر، به‌ویژه در تاج سد، رخ داده و جابجایی در راستای شرق-غرب بیشتر از جابجایی عمودی بوده است.

علی‌رغم مقالات موجود، مطالعات محدودی به‌طور خاص بر پایش ناپایداری‌های زمین در سدهای تلمبه‌ذخیره‌ای مانند سد سیاه‌بیشه و تأثیر عوامل خاصی چون افت سریع مخزن تمرکز کرده‌اند. در این پژوهش، از روش‌های نقشه‌برداری زمینی در کنار داده‌های ماهواره سنتینل-۱ و نرم‌افزار SNAP برای پایش جابجایی‌های محدوده سد سیاه‌بیشه استفاده شده است. داده‌های مذکور امکان بررسی تغییرات سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ را فراهم کرده‌اند. نتایج این تحقیق به‌طور خاص بر تحلیل جابجایی‌های رخ داده در مناطقی مانند گالی ۵ و دیگر نواحی بحرانی سد متمرکز است. این پژوهش همچنین به مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش تداخل‌سنجی راداری با روش‌های نقشه‌برداری زمینی پرداخته و نشان می‌دهد که این تکنیک نه تنها دقت بالایی دارد، بلکه از نظر هزینه و زمان نیز بسیار کارآمد است. هدف اصلی این مطالعه، درک الگوی رفتاری برای جابجایی‌های محدوده سد سیاه‌بیشه و شناسایی عوامل مؤثر بر این تغییرات است. به‌طور خاص، اهداف این پژوهش شامل تعیین مقادیر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی، بررسی تأثیر افت سریع مخزن، و ارائه روشی کارآمد برای مدیریت بحران و رفتارشناسی نواحی ناپایدار است. نوآوری اصلی این تحقیق در بهره‌گیری از روش‌های نقشه‌برداری زمینی و تکنیک تداخل‌سنجی راداری برای پایش مداوم محدوده سد و تحلیل دقیق

ساخته است [۲]. افت سریع مخزن، نوسانات روزانه تراز آب، و حرکت گسل‌ها بروی یکدیگر از مهم‌ترین عواملی هستند که باعث ایجاد جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی در محدوده این سازه می‌شوند. این شرایط خاص، نیازمند مطالعه و پایشی دقیق برای جلوگیری از خسارات احتمالی و مدیریت بهتر مخاطرات است.

روش‌های سنتی برای پایش تغییرات زمین نظیر میکروژئودزی و روش قرائت زمینی مستقیم [۳، ۴]، به دلیل هزینه بالا، محدودیت زمانی و نیاز به نیروی انسانی، توانایی لازم برای پایش مداوم و گسترده را ندارند. از این‌رو، تکنیک‌های نوین سنجش از دور، به‌ویژه تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، به‌عنوان ابزارهایی مؤثر و مقرون‌به‌صرفه مطرح شده‌اند [۵، ۶]. این تکنیک، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، قادر است جابجایی‌های سطح زمین را در مقیاس میلی‌متری پایش کرده و بدون نیاز به حضور فیزیکی، اطلاعاتی گسترده و دقیق فراهم کند [۷، ۸].

تداخل‌سنجی راداری از دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان یکی از روش‌های پیشرفته در مطالعات زمین‌شناسی معرفی شد و تاکنون کاربردهای متعددی در زمینه پایش زمین‌لغزش‌ها و فرونشست‌ها داشته است [۹، ۱۰]. برای مثال، در منطقه ماسوله از این تکنیک برای بررسی زمین‌لغزش استفاده کردند و توانایی آن در شناسایی تغییرات جزئی سطح زمین را نشان دادند [۱۱]. همچنین، به منظور رفتارنگاری سد طالقان پژوهشگران از این روش بر مبنای تصاویر تصاویر سنتینل-۱ با استفاده از نرم افزار GMTSAR بهره بردند و ضمن برجسته‌سازی مزایای آن نسبت به ابزارهای دقیق سنتی حداکثر فرونشست را ۳ میلی‌متر در سال برآورد کردند [۱۲].

همچنین گروهی دیگر از پژوهشگران از این تکنیک برای پایش تغییرات در محدوده سد گتوند علیا استفاده کردند و میزان فرونشست منطقه را حدود ۵ سانتی‌متر محاسبه کردند [۱۳]. همچنین در شهر اراک، نرخ فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری حدود یک سانتی‌متر در سال را تعیین شده است و این نتایج نهایی بیانگر تأثیر عوامل زمین‌شناسی و تغییر در منابع آب زیرزمینی بر این پدیده است [۱۴]. در تحقیقات مختلفی از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری به‌عنوان یک روش مؤثر برای اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین که امکان پایش حرکات کوچک را با دقت بالا فراهم می‌کند، یاد شده است [۱۵].

در پژوهش دیگری به بررسی ناپایداری دامنه‌ای در حوزه آبخیز گرم‌چای با استفاده از تصاویر راداری ماهواره ALOS پرداخته شده است و نشان داده شده است که فعالیت‌های زمین‌لغزش، به‌ویژه در نزدیکی شبکه هیدرولوژیکی، می‌تواند به‌عنوان منبع مهم رسوب‌زایی در منطقه محسوب شود [۱۵]. در تحقیق دیگری به بررسی جابجایی سطحی ناشی از زمین‌لغزش نقل در شهرستان سمیرم پرداخته شده است و نتایج نهایی نشان‌دهنده فعال بودن این توده لغزشی با جابجایی حداکثر ۸ سانتی‌متر در یک دوره ۱۵۰ روزه است [۱۶].

در پژوهش دیگری درباره تأثیر سد ماملو بر دشت ورامین، مشخص شد که با وجود هدف اولیه سد برای تأمین آب کشاورزی، بخش عمده‌ای از

این سد متشکل از یک مخزن اصلی و یک مخزن ذخیره است که از طریق تونل‌های آب‌رسان به یکدیگر متصل شده‌اند. مخزن بالایی در ارتفاعات بالاتر قرار دارد و آب را برای تولید برق به مخزن پایینی انتقال می‌دهد. سپس، در زمان کاهش تقاضای مصرف برق، آب به مخزن بالایی پمپاژ می‌شود. طراحی سد مذکور در سال ۱۳۴۹، مطالعات زمین‌شناسی سال ۱۳۵۷، طراحی فاز ۲ در سال ۱۳۶۲ شروع شد و تا سال ۱۳۷۱ به طول انجامید و نهایتاً بهار ۱۳۹۲ به صورت برخط راه اندازی شد و در شهریور ۱۳۹۴ به بهره‌برداری رسید.

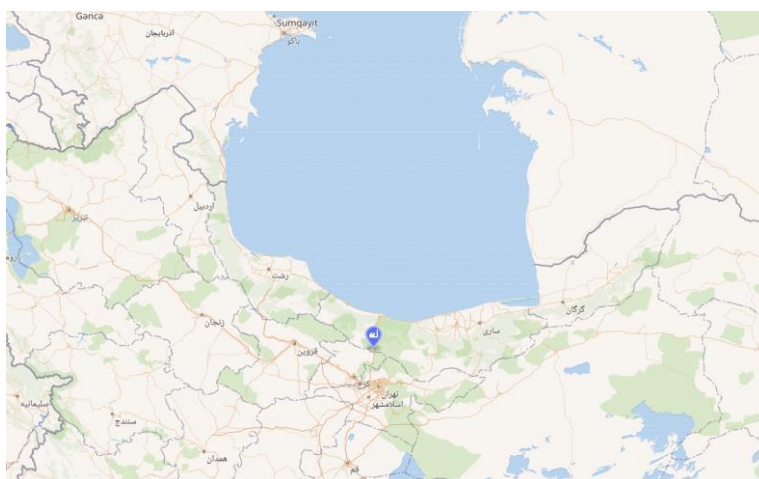
شرایط زمین‌شناسی منطقه شامل گسل‌های فعال، توده‌های خاکی و سنگی ناپایدار، و شیب‌های تند است که این منطقه را مستعد وقوع زمین‌لغزش و جابجایی‌های زمین‌شناختی کرده است. فرایندهای هیدرولوژیکی و مکانیکی، از جمله افت سریع مخزن (Rapid Drawdown)، نوسانات مداوم تراز آب، و تغییرات در توزیع بار بر روی مخازن، موجب ناپایداری‌های قابل توجه در این منطقه می‌شوند. از این رو، پایش مداوم تغییرات زمین در محدوده سد و تحلیل رفتار سازه و محیط پیرامون آن امری ضروری است.

تأثیرات زمین‌شناختی است. مقایسه این دو تکنیک در ارزیابی پدیده زمین‌لغزش با تمرکز بر مناطق بحرانی سد سیاه‌بیشه، این مطالعه را از تحقیقات پیشین متمایز کرده و الگویی برای مدیریت پایدار سدهای مشابه ارائه می‌دهد.

ساختار این مقاله به این صورت است: در بخش دوم منطقه مطالعاتی و داده‌ها معرفی می‌شود. در بخش سوم روش تحقیق معرفی می‌شود. در بخش چهارم نتایج تحلیل و آنالیز می‌شود. در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری انجام شده است.

منطقه مطالعاتی و داده‌ها

سد سیاه‌بیشه یک نیروگاه برق‌آبی در دامنه‌های رشته کوه البرز در مجاورت روستای سیاه‌بیشه در فاصله ۴۸ کیلومتری شهر چالوس و ۱۲۵ کیلومتری شمال شهر تهران قرار دارد (شکل-۱)، که با ظرفیت تولید ۱۰۴۰ مگاوات جزو نخستین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای و همچنین اولین سد خاکی تلمبه‌ذخیره‌ای با رویه بتنی در ایران است و نقش مهمی در تأمین انرژی برق‌آبی کشور در ساعات پیک مصرف ایفا می‌کند. سازه



(الف)



(ب)

شکل ۱: (الف) موقعیت مکانی سد تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه در نقشه ایران، (ب) تصویر گوگل ارث
Fig. 1: (a) Location of the Siah Bisheh Pumped Storage Dam on the map of Iran, (b) Google Earth image

میان، و پس از تثبیت اولیه شرایط به صورت هفتگی انجام گرفت. در نهایت، در فاز پایدار، پایش ماهیانه در تاریخ‌های مشخص با انعطاف چندروزه (با توجه به شرایط دمایی شدید منطقه) ادامه یافت. این رویکرد انعطاف‌پذیر، سازگاری بالایی با تغییرات محیطی داشت. نتایج این پایش جامع که ترکیبی از نقشه‌برداری زمینی و داده‌های ابزار دقیق بود، به اجرای تمهیدات ایمنی مؤثر برای جاده چالوس منجر شد. به عنوان مثال، شناسایی نقاط مستعد نشست خاک، اصلاح مسیر تردد و نصب علائم هشداردهنده به کاهش ۴۰ درصدی حوادث ناگوار در این جاده انجامید. افزون بر این، روش پیشنهادی با بهینه‌سازی هزینه و زمان، دقت پیش‌بینی رخدادهای غیرمترقبه (مانند رانش زمین) را بهبود بخشید. این موفقیت‌ها نشان می‌دهد که ادغام داده‌های زمین‌شناسی، مکانیک خاک و پایش هوشمند می‌تواند به مدلی استاندارد برای پروژه‌های عمرانی مشتق تبدیل شود.

تداخل‌سنجی راداری

تصاویر راداری حاصل از رادارهای روزنه مجازی سار با دارا بودن قابلیت اندازه‌گیری طول بردار از سنجنده تا سطح زمین در اندازه‌گیری‌های مربوط به تهیه نقشه رقومی ارتفاعی به طور گسترده به کار می‌روند [۲۴]. تکنیک مورد استفاده در این روش به تکنیک تداخل‌سنجی راداری ملقب است. در تداخل‌سنجی راداری فاز حاصل از دو تصویر گرفته شده از یک منطقه معین جهت تولید تداخل نگار ضرب می‌شود. در واقع تداخل‌نگار حاصل ضرب مختلط دو تصویر راداری است که این دو تصویر با هم ممکن است توسط یک سکوی فضایی یا هوایی که دارای دو آنتن با فاصله معین باشد، اخذ شده باشد یا دو تصویر با فواصل زمانی مختلف و از یک سکوی مشابه گرفته شوند. اختلاف فاز موجود در دو تصویر به صورت لبه یا حاشیه در تداخل نگار نمایش داده می‌شود که هر زوج از آنها به میزان 2π با یکدیگر اختلاف فاز دارند. تداخل‌نگار فراهم شده به روش تداخل‌سنجی راداری قابلیت نمایش تغییرات ارتفاعی و ناهمواری‌ها را دارد. دقت تغییرات مقادیر ارتفاعی dz قابل محاسبه از هر حاشیه تابع ویژگی‌های ماهواره مانند طول خط‌مبنا $B^\perp$ طول موج یا باند مورد استفاده λ زاویه برخورد θ و طول بردار مایل ارتفاع ماهواره تا زمین P است [۲۵]:

$$dz = (\lambda P \sin \theta) / 2 B^\perp \quad (1)$$

در مبحث هندسه تداخل‌سنجی تفاضلی، به طور کلی اطلاعاتی که ماهواره از زمین دریافت می‌کند، همان اطلاعات فاز موج دریافتی توسط گیرنده می‌باشد. از طرف دیگر فاصله ماهواره تا زمین تحت تأثیر پدیده Deformation دچار تغییر شده است که در واقع همان سیگنالی است که ما به دنبال آشکارسازی آن هستیم. در شکل ۲ که نشان‌دهنده هندسه تداخل‌سنجی تفاضلی می‌باشد، h فاصله سطح زمین تا سطح بیضوی یا همان ارتفاع ژئودتیک، زاویه θ زاویه راستای ماهواره با راستای

در این پژوهش، داده‌های ماهواره سنتینل-۱ برای پایش تغییرات سطح زمین در محدوده سد سیاه‌پیشه استفاده شده است. این داده‌ها شامل تصاویر با فرمت SLC (Single Look Complex) هستند که در حالت پلاریزاسیون VV و مد IW (Interferometric Wide Swath) تهیه شده‌اند [۲۱]. این تصاویر به دلیل رزولوشن مناسب (20×5 متر) و پوشش وسیع، برای مطالعات تغییرات سطح زمین و پایش زمین‌لغزش بسیار مناسب هستند [۲۲، ۲۳].

برای این مطالعه، داده‌های ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ از آرشیو Copernicus SciHub دانلود شد. این داده‌ها با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و نرم‌افزار SNAP مورد پردازش قرار گرفتند. انتخاب داده‌ها بر اساس معیارهایی نظیر زمان اخذ تصاویر، مسیر ماهواره (Track 35)، و میزان همبستگی فاز (Coherence) انجام شده است. داده‌های انتخابی شامل تصاویر صعودی (Ascending) هستند که بهترین پوشش و دقت را برای منطقه مطالعه فراهم می‌کنند.

روش تحقیق

روش ارائه شده در این پژوهش شامل دو تکنیک نقشه‌برداری زمینی و تداخل‌سنجی راداری است که در ادامه توضیحاتی در رابطه با آنها ارائه می‌شود.

نقشه‌برداری زمینی

جمع‌آوری داده‌های این پروژه از سال ۱۳۹۰ به صورت دوره‌ای و مبتنی بر پروتکل اجرایی مشخص آغاز شد. پیش از آگیری نهایی حوضچه سد، تارگت‌هایی با ارتفاع تعیین شده در نقاط زمینی نصب گردیدند. این فرایند با توجه به پیش‌بینی بارش سنگین برف و نیاز به سهولت قرائت داده‌ها، همراه با نشانگرهای موقعیت‌یاب پیشرفته انجام شد. طراحی فونداسیون تارگت‌ها نیز با در نظر گرفتن طبقه‌بندی خاک منطقه و جلوگیری از تداخل لایه‌های زیرسطحی، زیر نظر زمین‌شناسان پروژه اجرا گردید. تفاوت چشمگیر در ویژگی‌های مکانیک خاک سبب شد این مرحله از اهمیت فنی بالایی برخوردار باشد.

پیلارهای ثابت یا «نقاط مادر» به عنوان مبنای مرجع، با ترازبایی دقیق و تعیین مختصات ماهواره‌ای (هم‌سو با نقاط معتبر سازمان نقشه‌برداری) در سایت مستقر شدند. خطاهای اندازه‌گیری در این مرحله با روش‌های علمی سرشکن شدند تا مختصات تارگت‌ها با حداکثر دقت تعیین گردد. جانمایی تارگت‌ها در قالب شبکه‌ای از مثلث‌های مجاور در راستای طولی و عرضی انجام شد که منطبق بر نقاط شکست لایه‌های زمین‌شناسی، جنس خاک و نقاط بحرانی مانند مناطق مستعد «افت سریع مخزن سد» بود. این الگو به گونه‌ای طراحی شد که حتی در صورت تخریب برخی تارگت‌ها بر اثر عوامل طبیعی یا انسانی، تداوم پایش بلندمدت مختل نشود.

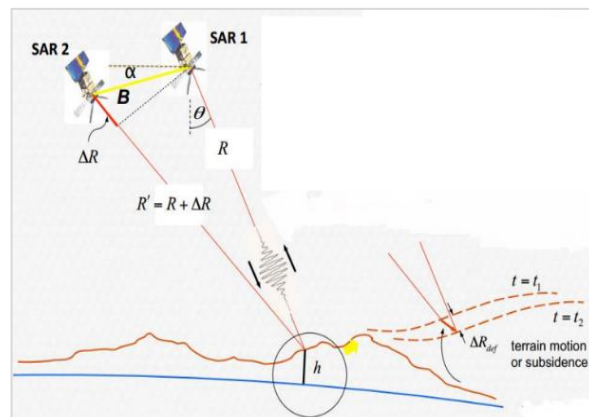
برنامه پایش داده‌ها در چهار فاز اجرا شد: در ۳۰ روز نخست پس از آگیری، قرائت‌ها به صورت روزانه، سپس تا ۲ ماه به صورت یک روز در

فیلتراسیون برداشته می‌شود که منجر به تولید تصویری می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات فاز ناشی از Deformation می‌باشد (شکل ۳).

در این پژوهش، برای پایش تغییرات زمین و تحلیل جابجایی‌های سطحی در محدوده سد تلمبه‌ذخیره‌ای سیاه‌پیشه، از روش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱ و نرم‌افزار SNAP استفاده شده است [۲۸]. این بخش شامل جزئیات مربوط به مراحل جمع‌آوری داده‌ها، پردازش تصاویر، تحلیل نتایج، و ابزارها و الگوریتم‌های استفاده‌شده در تحقیق است.

برای انتخاب زوج تصاویر مناسب، با در نظر گرفتن حجم بالای داده‌های ماهواره‌ای موجود، تصاویر را دانلود و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت دو سری داده سنتینل-۱ که از نظر بازه زمانی و ویژگی‌های فنی مناسب بودند انتخاب شدند: تصویر اول در تاریخ ۲۰۱۵/۰۲/۱۲ و تصویر دوم در تاریخ ۲۰۲۲/۰۶/۰۴. هر ۲ تصویر از یک track یکسان که track شماره ۳۵ می‌باشد، اخذ شده‌اند. لازم به ذکر است با توجه به بازه زمانی طولانی بین ۲ تصویر اخذ شده مقادیر Coherence آنها خیلی نزدیک به هم نمی‌باشد. بعد از وارد کردن داده‌های ماهواره‌ای در نرم‌افزار از قسمت Stack Overview داده‌ها را مورد بررسی قرار داده که نرم‌افزار تصاویر قدیمی‌تر را به عنوان تصویر مبنا و دیگری را به عنوان تصویر پیرو می‌شناسد و اطلاعاتی از قبیل زمان اخذ داده شماره orbit و track و همچنین فاصله زمانی بین دو تصویر که حدوداً ۷ سال می‌باشد را استخراج می‌کند. چهار مرحله اصلی پردازش داده‌ی راداری برای تولید مقادیر جابه‌جایی شامل مراحل زیر است:

شاغولی یا همان راستای نادیر و زاویه α زاویه‌ای است که بردار خط واصل دو ماهواره با راستای افق می‌سازد.



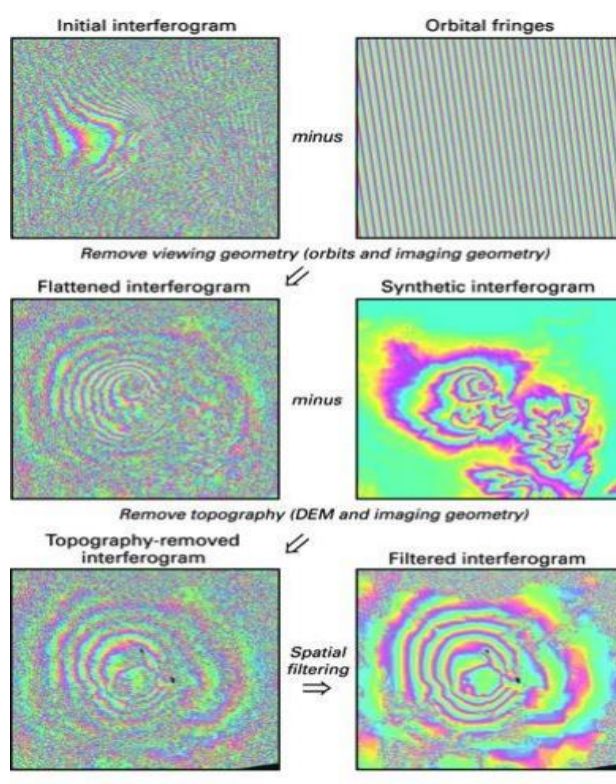
شکل ۲: هندسه تداخل‌سنجی راداری تفاضلی [۲۶]

Fig. 2: Geometry of differential radar interferometry [26]

در نهایت اختلاف فاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = (4\pi/\lambda) ((B \sin(\theta - \alpha)) + (B \cos(\theta - \alpha) / R \sin(\theta)) h + \Delta R_{\text{def}}) \quad (2)$$

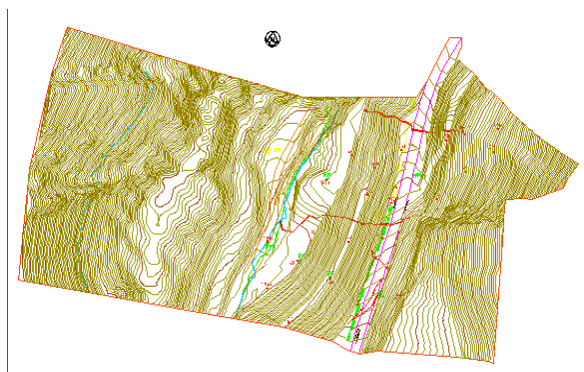
در رابطه فوق تمامی پارامترها جزء ورودی مسئله می‌باشد به جز ΔR_{def} که در واقع ما در روابط به دنبال آن هستیم. برای محاسبه میزان تغییر شکل، از تصویر اولیه ابتدا خطای مداری و سپس خطای توپوگرافی حذف می‌شود. در نهایت نیز خطای نویز و خطای اتمسفری به وسیله



شکل ۳: مراحل تداخل‌سنجی راداری [۲۷]

Fig. 3: Steps of radar interferometry [27]

بالایی برخوردار است. سد سیاه‌بیشه در ۲ بخش به فاصله تقریبی ۵ کیلومتر که توسط تونل‌های آبرسان آب را از سد بالا به سد پایین انتقال داده و پس از تولید برق مجدداً توسط همین تونل‌ها آب به سد بالا بازمی‌گردد که در حدود ۵۰۰ متر اختلاف ارتفاع دارند. محدوده رانشی مورد مطالعه در طرفین رودخانه چالوس که ساختگاه سد مورد نظر در آنجا قرار گرفته و در حال حاضر حوضچه سد سیاه‌بیشه می‌باشد، قرار گرفته است. با توجه به آبرگیری دریاچه سد و تخلیه و شارژ شدن مجدد حوضچه در طول شبانه روز شاهد نشست و جابجایی توده‌های خاکی و سنگی در منطقه مذکور هستیم که تاکنون از طریق نسب تارگت‌های ارتفاعی و قرلئت ادواری این تارگت‌ها و همچنین عملیات میکروژئودزی (بر مبنای دستورالعمل‌های همسان نقشه برداری) میزان جابجایی‌ها اعم از مسطحاتی و ارتفاعی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۴ نحوه قرارگیری بخشی از این تارگت‌ها به همراه ابزار نصب شده برای اندازه‌گیری مقدار جابجایی و همچنین تراز آب نمایش داده شده است.



شکل ۴: توپوگرافی محدوده سد بالا که به عنوان یکی از نقاط بحرانی شناخته می‌شود.

Fig. 4: Topography of the upper dam area, which is known as one of the critical areas

همچنین شکل ۵ مقدار جابجایی انجام شده از طریق داده‌های زمینی از سال ۲۰۱۴ تا کنون بدست آمده را نمایش می‌دهد. بر مبنای آن بیشترین جابجایی ارتفاعی چیزی در حدود ۶۰ سانتی‌متر است. جدول ۱ مربوط به جابجایی پیلارهای میکروژئودزی در نقاط مختلف سد اعم از توده‌های سنگی اطراف بدنه سد و سازه سرریز احداث شده است که مقدار جابجایی مسطحاتی و ارتفاعی را در برخی از نقاط نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در محدوده فوق علاوه بر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی (فرونشست) پدیده بالآمدگی نیز مشاهده می‌شود که بسیار خطرناک بوده از این رو پایش منطقه در بازه‌های زمانی مختلف در سطح وسیعی از منطقه مورد نظر را ایجاب می‌کند.

- پیش‌پردازش داده‌ها

○ هم‌مرجع‌سازی تصاویر (Coregistration)

برای هم‌تراز کردن پیکسل‌های تصاویر اولیه و ثانویه، هم‌مرجع‌سازی انجام شد. این مرحله برای اطمینان از اینکه هر پیکسل در هر دو تصویر موقعیت یکسانی را نشان دهد، ضروری است.

○ تشکیل تداخل‌نما (Interferogram Generation)

اختلاف فاز بین دو تصویر با استفاده از تداخل‌سنجی محاسبه شد و یک تداخل‌نما (Interferogram) ایجاد می‌گردد.

- حذف اثرات نامطلوب

○ حذف اثرات توپوگرافی (Topographic Phase Removal)

اثرات ارتفاعی با استفاده از مدل رقومی زمین حذف شد تا فاز تداخل‌نما تنها به جابجایی‌های سطحی مربوط باشد [۲۹].

○ اعمال فیلتر گلداشتاین (Goldstein Phase Filtering)

برای بهبود کیفیت تصویر و کاهش نویز، فیلتر گلداشتاین بر روی فاز تصاویر اعمال شد [۳۰].

- رفع گسستگی فاز (Unwrapping)

فاز تداخل‌نما به دلیل طبیعت داده‌های راداری گسسته است. با استفاده از نرم‌افزار Snaphu و روش mcf (که روش پیش‌فرض نرم‌افزار است) فاز گسسته به فاز پیوسته تبدیل شد تا بتوان جابجایی‌های سطحی را به‌صورت دقیق محاسبه کرد [۳۱].

- محاسبه جابجایی و تحلیل داده‌ها

○ محاسبه جابجایی‌ها

با استفاده از ابزار Phase to Displacement در نرم‌افزار SNAP، تغییرات فاز به جابجایی‌های سطحی تبدیل شد. این جابجایی‌ها نشان‌دهنده میزان تغییرات مسطحاتی و ارتفاعی در منطقه بودند.

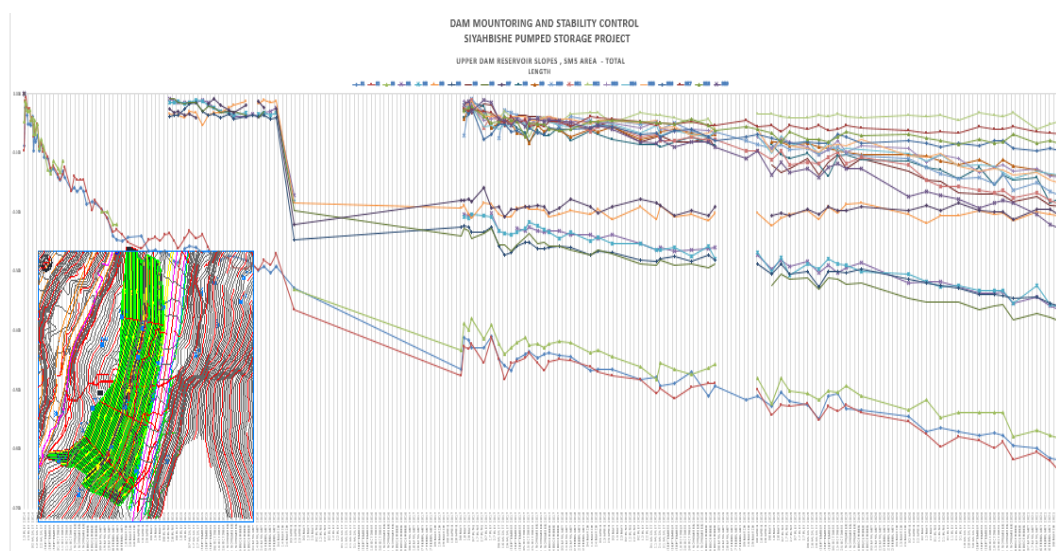
○ تصحیح هندسی (Geocoding)

تصاویر پردازش‌شده برای تطبیق دقیق با موقعیت‌های زمینی به مختصات جغرافیایی واقعی انتقال داده شدند. این مرحله امکان تحلیل دقیق تغییرات در محیط واقعی را فراهم کرد.

در نهایت پس از طی مراحل فوق نقشه جابه‌جایی در محیط نرم‌افزار SNAP تولید می‌شود.

آنالیز نتایج

منطقه مورد مطالعه در محدوده سد تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه واقع شده است که به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی و پتانسیل بالای منطقه در وقوع زمین‌لغزش و فرونشست از اهمیت



شکل ۵: نمودار مقادیر جابجایی تارگت‌های نصب شده در محدوده سد بالا که برای نمایش بهتر با علامت منفی اعمال شده است.

Fig. 5: Diagram of the displacement values of the targets installed within the upper dam area, which has been applied with a negative sign for better display

جدول ۱: نتایج عملیات میکروژئودزی در سال ۱۳۹۶

Table 1: Results of microgeodesy operations in 2017

حداکثر جابجایی مسطحانی (mm) (Maximum planer displacement)		حداکثر جابجایی ارتفاعی (mm) (Maximum height displacement)		شبکه Network
D(mm)	نام نقاط (Point Names)	ΔZ	نام نقاط (Point Names)	
65.54	UPR3	-27.73	UPR3	سه بعدی خارج سد 3D outside the dam
13.83	UT11	-42.37	UT14	سه بعدی بدنه سد 3D dam body
48.44	UTR11	14.49	UTL2	سه بعدی زمین لغزشی 3D Landslide
....		-33.27	UT22	شبکه تراز یابی خارج و بدنه سد External and body leveling network of the dam

طراحی شده ایجاد کنند تا آب‌های سطحی رو منحرف کرده و از فرسایش خاک و ناپایداری ترانشه‌ها جلوگیری کنند که البته مورد آخر در سد سیاه‌بیشه اجرا نشده است و عمدتاً با استفاده از خاکریزی در پای ترانشه‌ها و احداث چک دم سعی در پایداری ترانشه‌ها شده است. با تمام این تفاسیر با توجه به کوهستانی بودن منطقه و تلمبه ذخیره‌ای بودن سد مذکور لغزش و نشست امری کاملاً طبیعی است. از زمان آب‌گیری میزان تغییرات احتمالی حوضچه سد از طریق هیدروگرافی مورد پایش و بررسی قرار گرفته است. همچنین پایش محدوده‌های بیرونی حوضچه سدها با عملیات میکروژئودزی که یکی از روش‌های قابل اطمینان در رفتارسنجی هر سازه‌ای با ایجاد شبکه ژئودتیک کنترلی دقیق در اطراف و روی سازه‌ها و اندازه‌گیری پریودیک آنها جهت تعیین مقادیر جابجایی می‌باشد، صورت گرفته است (اشکال ۶ و ۷). که از سال ۱۳۹۰ تا سال ۱۴۰۰ در ۷ مرحله عملیات فوق انجام شده که حداکثر جابجایی مسطحانی و ارتفاعی را در سد بالا و پایین نشان می‌دهد (جداول ۲ و ۳).

با توجه به موقعیت ساختگاه سد برای پایداری این سازه عظیم مهندسی در قسمت‌های مختلف سد بر اساس نیاز و میزان جابجایی محیط پیرامون آن با استفاده از محاسبات زمین‌شناسی مناطق مستعد لغزش و مناطقی که نیازمند پایداری بوده شناسایی شده و با توجه به شرایط هر یک تمحیداتی در نظر گرفته شده، مانند تحکیم ترانشه‌ها با استفاده از عملیاتی چون شات‌کریت، نصب تاندون‌ها و همچنین برای جلوگیری از جابجایی ترانشه‌های مجاور حوضچه با احداث گالی در مناطق مختلف سعی در رسیدن به این مهم داشته‌اند. گالی (Gully) یک شیار یا آبراه طبیعی یا مصنوعی نسبتاً عمیق در خاک یا زمین است که توسط جریان آب‌های سطحی دوره‌ای و یا دائمی (به‌ویژه در اثر رواناب باران یا ذوب برف که در سد سیاه‌بیشه با توجه به جغرافیای منطقه امری همیشگی است) به وجود می‌آید. اگر اندازه این شیار به قدری بزرگ باشد که نتوان آن را با عملیات خاکی عادی از بین برد، به آن گالی گفته می‌شود. در سد سیاه‌بیشه، از خاک‌ریزها یا سازه‌هایی به نام "Gully plugs" یا "Check dams" برای مهار گالی‌ها استفاده شده و حتی ممکن است برای کاهش فشار رانش در کنار ترانشه‌ها، یک گالی

جدول ۲: حداکثر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی در سد پایین (از سال خرداد ۱۳۹۰ تا تیر ۱۴۰۰)

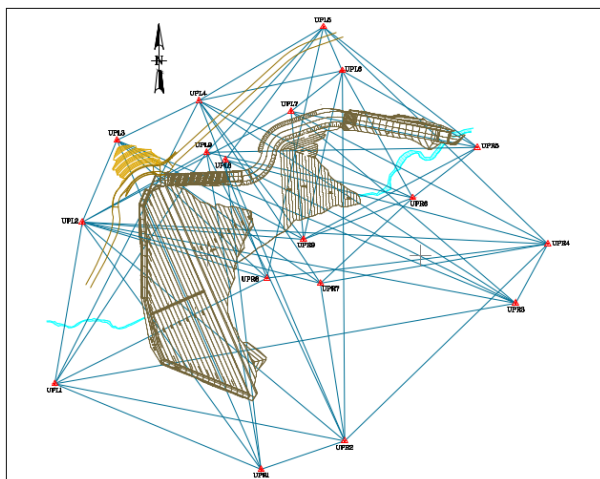
Table 2: Maximum planar and elevation displacements at the lower dam (From June 1390 to July 1400)

حداکثر جابجایی ارتفاعی (mm) (Maximum height displacement)		حداکثر جابجایی مسطحاتی (mm) (Maximum planer displacement)		شبکه
نام نقاط (Point Names)	ΔZ	نام نقاط (Point Names)	D(mm)	Network
LPL3	-32.77	LPL8	71.49	سه بعدی خارج سد 3D outside the dam
LPL7	-411.82	LPL7	479.36	
LT19	-89.54	LT14	63.09	روی بدنه سد dam body
LT38	+26.71	LT38	38.78	روی سرریز On the spillway of the dam
LTL17	-280.46	LTL16	821.48	سه بعدی زمین لغزشی 3D Landslide
BM1-2	-95.55	****	****	شبکه ترازبایی خارج و بدنه سد
LT19	-88.04	****	****	External and body leveling network of the dam

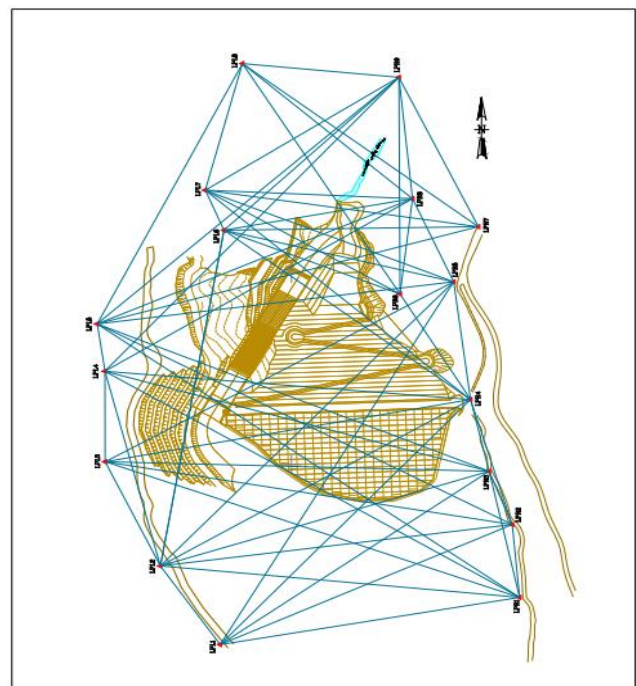
جدول ۳: حداکثر جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی در سد بالا (از سال خرداد ۱۳۹۰ تا تیر ۱۴۰۰)

Table 3: Maximum planar and elevation displacements at the upper dam (From June 1390 to July 1400)

حداکثر جابجایی ارتفاعی (mm) (Maximum height displacement)		حداکثر جابجایی مسطحاتی (mm) (Maximum planer displacement)		شبکه
نام نقاط (Point Names)	ΔZ	نام نقاط (Point Names)	D(mm)	Network
UPR3	-59.77	UPR3	128.59	سه بعدی خارج سد 3D outside the dam
UT14	-55.57	UT11	15.12	سه بعدی بدنه سد 3D dam body
UTR9	-154.33	UTR9	8080.59	سه بعدی زمین لغزشی 3D Landslide
UT22	-43.00	****	****	شبکه ترازبایی خارج و بدنه سد External and body leveling network of the dam



شکل ۷: نحوه قرارگیری پیلارهای میکروژئودزی و طراحی قرائت پیلارها در سد بالا
Fig. 7: How to place microgeodetic pillars and design pillar readings in the upper dam



شکل ۶: نحوه قرارگیری پیلارهای میکروژئودزی و طراحی قرائت پیلارها در سد پایین
Fig. 6: How to place microgeodetic pillars and design pillar readings in the lower dam

با توجه به نتایج به دست آمده به خوبی می‌توان رفتار سازه‌ها و محدوده‌های لغزشی که در مجاورت نقاط مشخص شده قرار گرفته‌اند را مورد بررسی قرار داد که البته با توجه به محدود بودن تعداد نقاط، هزینه بالا و دفعات اندازه‌گیری که بعضاً با اختلاف یک یا چند سال انجام

جدول ۴: مقادیر جابجایی نقاط بحرانی در محدوده گالی ۵

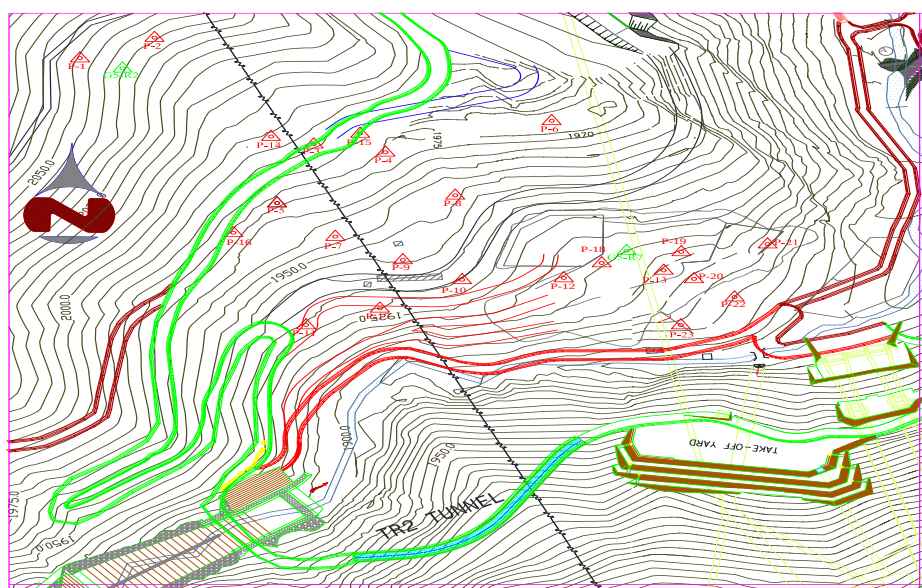
Table 4: Displacement values of critical points in the Galley 5 range

P.ID	ΔX	ΔY	ΔZ
P1	-1280.2	129.2	-1080.8
P2	-1390.6	742.2	-1148.7
P3	-1428.9	1840.4	-1140
P4	-1754.4	1965.2	-1254
P5	-1189.3	1320.4	-1046.4
P6	-30.1	42.4	-10.5
P7	-1176.1	1481.6	-975
P8	-1025	1582.9	-749.3
P9	-815	1615	-548
P10	-979.4	2012.7	-1001.5
P11	-468.9	662	-453.9
P12	-384	663	-170
P13	-299.1	331	-164
P14	-531.7	602.3	-411.7
P15	-521.6	663.3	-386.4
P16	-293.7	366.8	-404.1
P17	-174.9	350.6	-175.5
P18	-223.5	214.6	-122.7
P19	-33.8	31.9	-109.6
P20	-53.6	80.4	-68.2
P21	-2	-18	3
P22	-46.1	48.6	-67.1
P23	-92.4	65.6	-61.9

 مقادیر جابجایی نقاط بحرانی در محدوده گالی ۵
 Obtained coordinates points of land slide in lower dam on Gully 5 area in millimeters

می‌شود، نمی‌توان از آن به عنوان ابزاری برای مدیریت بحران استفاده نمود. بعد از آب‌گیری سد سیاه‌بیشه با مشاهده جابجایی در بعضی از مناطق سد که بیشتر معطوف به توده‌های سنگی و خاکی اطراف حوضچه سدها می‌باشد با احداث تارگت‌های بتنی در این مناطق که مستعد لغزش بودند، قرائت‌های ادواری به صورت ماهیانه به روش زمینی با استفاده از دوربین نقشه‌برداری از سال ۱۳۹۱ تا کنون انجام گرفته است که نتایج بدست آمده از آنها نشان‌دهنده جابجایی‌های چشمگیری در مناطق فوق‌الذکر بوده است. یکی از محدوده‌ها که به نام گالی ۵ نام‌گذاری شده است (شکل ۸)، دارای بیشترین مقدار جابجایی می‌باشد. گالی مورد نظر در انتهای مسیر رودخانه گرم رودبار می‌باشد که حاصل آب‌های زیرزمینی و بارش‌های فصلی است که در محدوده سد پایین و مجاور خروجی نیروگاه قرار گرفته است. گالی مدنظر با استفاده از ۲۳ تارگت قرائت شده است که البته با گذر زمان تعدادی از آنها از بین رفته است و با توجه به قرائت‌های انجام گرفته مقادیر جابجایی به شرح زیر می‌باشد (جدول ۴).

در محدوده سد بالا، تارگت‌های مورد مطالعه به دو ناحیه در سمت راست رودخانه (بین حوضچه سد و ارتفاعات مجاور جاده چالوس) معطوف شده است که با عناوین SM5 و SM6 شناخته می‌شوند. اهمیت این نواحی عمدتاً به دلیل عبور جاده چالوس از این منطقه است (نقشه‌های ۸ و ۹). هر دو اصطلاح SM5 و SM6 (مخفف Soil Mechanics به محدوده‌های خاصی اشاره دارند که بر اساس ویژگی‌های مکانیک خاک، از جمله تغییرات لایه‌بندی و جنس زمین، طبقه‌بندی شده‌اند. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر بخشی از سمت راست حوضچه سد بالا (محدوده‌های SM5 و SM6) بوده است که بیشترین میزان جابه‌جایی خاک را نشان می‌دهد

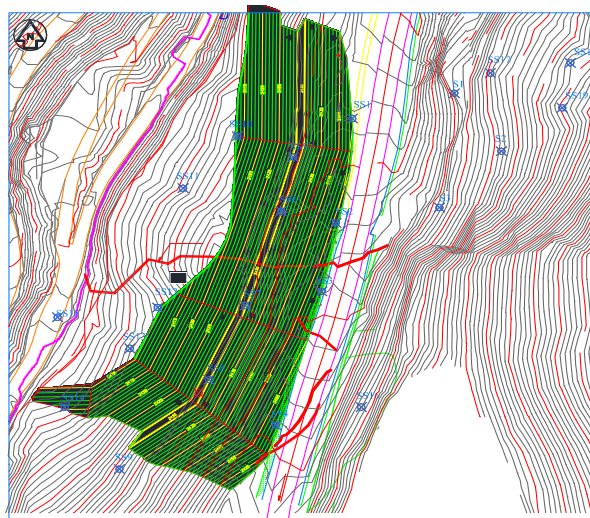


شکل ۸: نمایش محدوده گالی ۵ و چیدمان نقاط مشاهداتی

Fig. 8: Display of the Galley 5 area and the arrangement of observation points

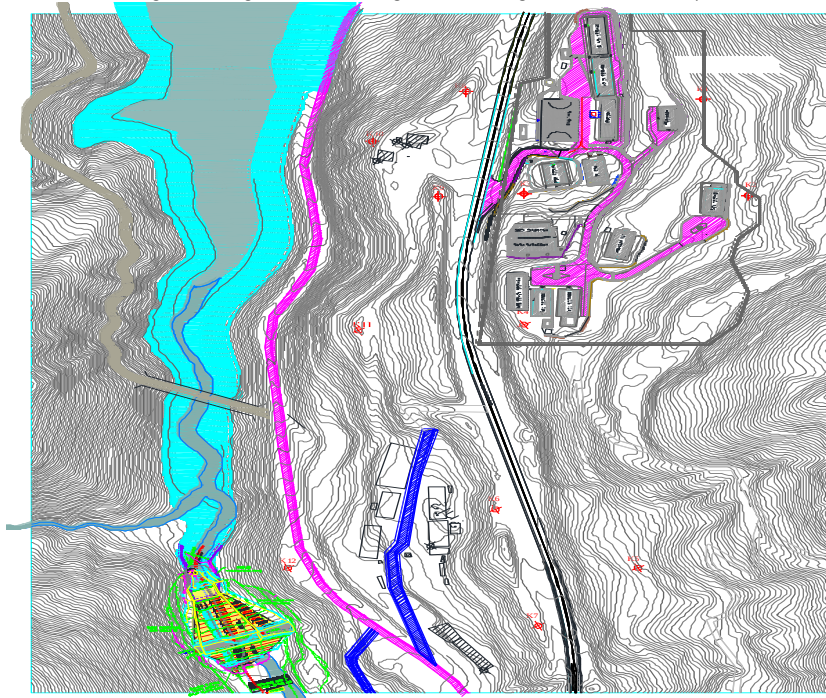
شده در محدوده و همچنین برداشت‌های زمین‌شناسی بدست آمده است. مشاهده می‌شود که زون SM5 نسبت به زون SM6 دارای تغییرات بیشتری بوده که به خاطر رانشی بودن زون SM5 می‌باشد (جدول ۵ و ۶). لازم به ذکر است در دوران ساخت در حین انتقال جاده به مسیر جدید (مسیر قدیم جاده در محدوده حوضچه سد قرار داشته است) توسط شرکت کیسون محدوده جاده جدید به دلیل رانشی بودن به روش عملیات پایدارسازی (شمع‌کوبی و تزریق) برای تحکیم و زیر سازی مسیر یاد شده و جلوگیری از رانش احتمالی صورت گرفته است. لازم به ذکر است عملیات انجام شده باعث کند شدن روند جابجایی زون یاد شده گشته لیکن عملیات صورت گرفته مشکل رانشی بودن منطقه یاد شده را به طور کامل مرتفع نمی‌کند.

هر ساله مقدار قابل توجهی از جاده آسفالت که در امتداد مناطق ذکر شده قرار دارد آسیب جدی دیده که به صورت ترک‌خوردگی‌های عرضی در سطح مسیر و همچنین نشست قابل مشاهده می‌باشد. از جمله تمهیداتی که برای مرتفع کردن مشکل فوق می‌توان نام برد، احداث شناژ با سطح مقطع بالا و عمق زیاد برای جلوگیری از حرکت توده‌های سنگی و همچنین خاکریزی از پاشنه دیواره تا تراز جاده که در حال حاضر به مرحله اجرایی نرسیده است. در ادامه توپوگرافی زون‌های یاد شده به همراه جدول مقادیر جابجایی و نحوه چینش تارگت‌های مورد نظر برای درک بهتر وضعیت موجود آورده شده است (شکل ۹ و ۱۰). همانطور که در شکل دیده می‌شود خطوط تقریباً عمودی قرمز رنگی که سطح جاده را قطع کرده است نشان‌دهنده خط شکست در محدوده مورد نظر می‌باش که از طریق قرائت ابزار نصب



شکل ۹: نمایش محدوده SM5, SM6 و چیدمان نقاط مشاهداتی

Fig. 9: Showing the SM5, SM6 range and the arrangement of observation points



شکل ۱۰: نمایش محدوده خاکک و چیدمان نقاط مشاهداتی

Fig. 10: Display of the Khakhak area and arrangement of observation points

در به وجود آمدن این جابجایی‌ها را Rapid Draw Down یا همان افت سریع مخزن عنوان نمود. توده‌های سنگی و خاکی اطراف حوضچه سد بالا و پایین زمانی که آب مخزن در تراز ماکزیمم خود قرار گرفته است چه در زمان تولید و چه در زمان پمپاژ آب در مدت زمان حدود ۴ ساعت (که البته بستگی به میزان تولید و فعال بودن هر یک از ۴ واحد نیروگاه دارد) منتقل می‌شود ولی توده‌های سنگی و خاکی زمان خیلی بیشتری نیاز دارند تا از حالت اشباع خارج شوند که همین مهم باعث سنگین شدن توده‌های فوق و در نتیجه خارج شدن از حالت پایدار شده و به نقطه بحرانی می‌رسند که با توجه به فرومولوژیک منطقه بعضاً ما شاهد جابجایی در این مناطق هستیم.

در تحقیق پیش‌رو سعی شده تا با بررسی تصاویر ماهواره‌ای مقدار جابجایی‌های صورت گرفته را اندازه‌گیری کرد تا بتوان در رفتارشناسی مناطق مورد نظر از آن به عنوان روش کارآمد و جایگزینی مناسب برای روش نقشه‌برداری زمینی استفاده کرد. لازم به ذکر است که تمامی روش‌ها و نتایج بدست آمده همگی در تأیید یکدیگر بوده و یک بینش کامل از شرایط موجود را به وجود می‌آورد. یک نکته حائز اهمیت در رابطه با تحقیق حاضر کوچک بودن منطقه‌ای است که مورد مطالعه قرار گرفته است. روش مورد استفاده برای تعیین میزان جابجایی‌ها همانطور که پیش‌تر به آن اشاره کردیم روش تداخل سنجی راداری است که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱ با فرمت SLC و مد IW مورد استفاده قرار می‌گیرد (جدول ۷). فرمت SLC یا همان Single look complex می‌باشد که دارای رزولوشن متفاوت در راستای رنج و آزیموت می‌باشد و برای هر پیکسل مقادیر مختلط را اندازه‌گیری می‌کند، همچنین مد IW معرف Interferometric wide Swath می‌باشد که به خاطر بهره‌گیری از تکنیک TOPSAR در اخذ داده و همچنین امکان اخذ داده در هر دو حالت پلاریزاسیون تک و دوگانه مد بسیار کاربردی برای مطالعات سطح زمین می‌باشد. مد فوق دارای رزولوشن مکانی ۵×۲۰ متر می‌باشد و متشکل از ۳ عرض پوشش برابر با ۲۵۰ کیلومتر است. داده‌های موجود قدیمی از سال ۱۳۹۱ جمع‌آوری شده‌اند بنابراین در تحقیق پیش‌رو از داده‌های ماهواره‌ای موجود و نزدیک به سال ۹۱ استفاده شده است. با توجه به متفاوت بودن شاخصه‌های خاص داده‌های ماهواره‌ای مثل شماره TRACK ماهواره که در هر دو عکس باید یکی باشد، تعیین مقادیر جابجایی به روش تداخل سنجی و همچنین مقادیر مناسب کوهرنسی تصاویر باید تعداد زیادی از داده‌های ماهواره‌ای چه در حالت صعودی و نزولی در تواریخ مختلف را تهیه کرد تا به زوج عکسی که مناسب می‌باشد دست پیدا کنیم.

جدول ۵: مقادیر جابجایی نقاط بحرانی در محدوده گالی SM5, SM6
Table 5: Displacement values of critical points in the SM5, SM6 Galley range

P.ID	ΔX	ΔY	ΔZ
S1	645.9	38.8	-259.3
S2	665.1	10.5	-270.1
S3	615.7	-16.9	-273.2
SS1	424.4	-39.4	99.9
SS2	427.2	-59.4	74.6
SS3	156.7	-57.8	-110.3
SS4	372.0	-174.5	110.1
SS5	250.5	-26.7	-121.9
SS6	457.1	-55.2	13.0
SS7	142.3	-60.4	-115.0
SS8	131.0	-94.3	-113.8
SS9	108.2	-135.9	-71.0
SS10	207.2	-38.9	-121.2
SS11	246.1	-29.0	-120.4
SS12	4.5	-35.4	-18.1
SS13	184.2	-86.2	-39.8
SS14	153.6	-116.2	-31.3
SS15	195.5	-86.5	-83.4
SS16	77.1	-58.2	-52.6
SS17	37.0	-59.3	-29.5
SS18	51.2	-61.2	-40.3
SS19	286.9	52.7	-137.3

جدول ۶: حداکثر جابجایی‌های مسطحانی و ارتفاعی در سد بالا محدوده خاکک
Table 6: Maximum surface and elevation displacements at the upper dam in the Khakak area

P.ID	ΔX	ΔY	ΔZ
K1	63.8	-66.0	-3.5
K2	79.7	-59.5	-14.9
K3	69.3	-60.1	11.8
K4	55.1	48.7	-64.8
K5	566.3	506.2	-313.5
K6	50.9	19.4	-84.2
K7	47.2	111.9	-102.3
K8	108.4	-94.9	86.8
K9	85.9	-48.5	10.5
K10	62.6	-54.4	6.1
K11	60.7	52.0	-51.2
K12	75.4	29.5	-96.0

با توجه به تلمبه ذخیره‌ای بودن سد سیاه‌بیشه که در ساعات اوج مصرف به تولید برق می‌پردازد و در ساعات کاهش مصرف با پمپاژ نمودن آب به سد بالا و ذخیره آن برای تولید مجدد می‌توان تأثیرگذارترین عامل

جدول ۷: مشخصات ماهواره و داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

Table 7: Satellite specifications and satellite data used

نام ماهواره Satellite name	فرمت Format	مد و تکنیک بهره‌برداری از داده‌ها Mode	رزولوشن مکانی Spatial resolution	تعداد عرض پوششی Number of cover widths	طول هر عرض Length of each width
سنتینل-۱	SLC	IW و تکنیک TOPSAR	۵×۲۰	۳	۲۵۰ کیلومتر

جدول ۹: مقایسه مقادیر جابجایی نقطه‌ای و پهنه‌ای نقاط بحرانی در محدوده گالی سد بالا به میلیمتر

Table 8: Comparison of point and area displacement values of critical points in the upper dam's Gully area in millimeters

حدود Region	شماره نقاط Point number	تغییرات نقطه‌ای Point changes	تغییرات پهنه‌ای Zonal changes
بالای جاده چالوس Above Chalus Road	SS19	0.20	0.06 - 0.14
	SS18	0.06	
	SS17	0.05	
	SS16	0.07	
	S1	0.19	
کنار جاده چالوس Chalus Roadside	S2	0.14	0.13 - 0.17
	S3	0.14	
	SS1	0.30	
	SS2	0.27	
	SS3	0.05	
پایین جاده روی برم و ترانشه Down the road on the edge and the trench	SS4	0.15	0.08 - 0.14
	SS5	0.11	
	SS6	0.12	
	SS7	0.05	
	SS8	0.13	
جنب حوضچه سد Next to the dam pond	SS9	0.18	0.06 - 0.14
	SS10	0.09	
	SS11	0.12	
	SS12	0.04	
	SS13	0.19	
	SS14	0.17	
	SS15	0.07	

جدول ۱۰: مقایسه مقادیر جابجایی نقطه‌ای و پهنه‌ای نقاط بحرانی در محدوده خاکک به میلیمتر

Table 9: Comparison of point and area displacement values of critical points in the Khakak area in millimeters

حدود Region	شماره نقاط Point number	تغییرات نقطه‌ای Point changes	تغییرات پهنه‌ای Zonal changes
بالای جاده چالوس Above Chalus Road	K1	0.06	0.09 - 0.14
	K2	0.07	
	K3	0.09	
	K4	0.07	
	K5	0.50	
کنار جاده چالوس Chalus Roadside	K8	0.12	0.11 - 0.15
	K9	0.09	
	K6	0.03	
	K7	0.11	
	K10	0.07	
جنب حوضچه سد Next to the dam pond	K11	0.07	0.08 - 0.15
	K12	0.08	

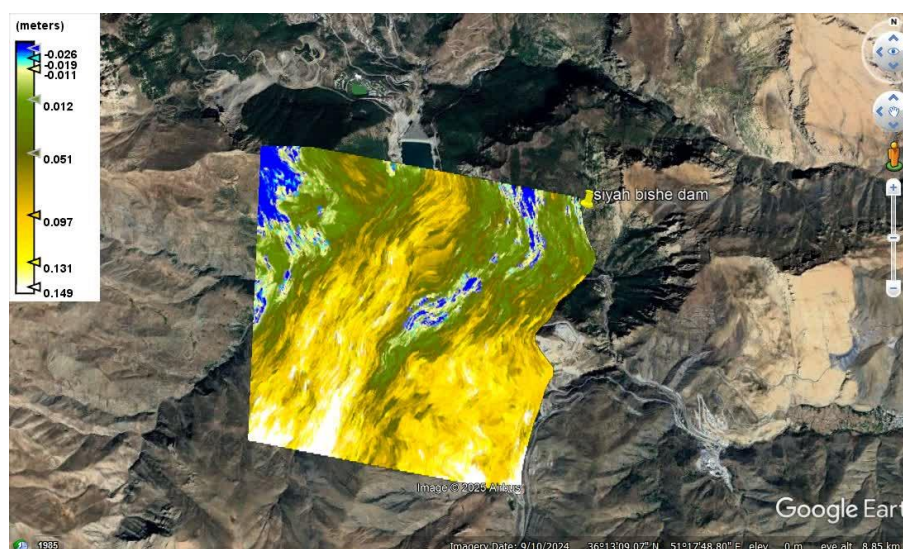
لازم به ذکر است یکی از مشکلات اساسی در انجام این روش در دسترس نبودن داده‌های ماهواره‌ای برای هر زمان دلخواه با توجه به محدودیت‌های زمانی برای دسترسی به داده‌های قدیمی می‌باشد. با توجه به این مهم که داده‌های قرائت شده در محدوده سد سیاه‌بیشه از تیر ماه سال ۱۳۹۱ در دسترس می‌باشد، داده‌های ماهواره‌ای موجود از سال ۲۰۱۵ در دسترس بوده به همین دلیل در تحقیق حاضر داده‌های موجود برای بررسی و مقایسه نیز از سال ۱۳۹۴ مورد استفاده قرار گرفته تا بتوان نتیجه‌گیری همسان‌تری نسبت به نتایج حاصله بدست آورد. داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق از سایت <https://scihub.copernicus.eu/> دانلود و ذخیره‌سازی داده‌های ماهواره سنتینل-۱ می‌باشد. برای تحلیل داده‌های ماهواره‌ای از نرم‌افزار SNAP استفاده شده که مخفف Sentinel application platform می‌باشد. نقشه جابه‌جایی تولید شده در محدوده سد شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

در ادامه نتایج محاسبه جابه‌جایی با روش تداخل‌سنجی راداری (تغییرات پهنه‌ای) و روش نقطه در نواحی مختلف سد آورده شده است:

جدول ۸: مقایسه مقادیر جابجایی نقطه‌ای و پهنه‌ای نقاط بحرانی در محدوده گالی ۵ به میلیمتر

Table 7: Comparison of point displacement and area values of critical points in the Gully 5 range in millimeters

حدود Region	شماره نقاط Point number	تغییرات نقطه‌ای Point changes	تغییرات پهنه‌ای Zonal changes
بالای جاده Above the road	P1	0.37	0.097 - 0.15
	P2	0.16	
	P14	0.41	
طول جاده دسترسی نیروگاه Length of power plant access road	P15	0.44	0.052 - 0.09
	P3	0.39	
	P5	0.31	
پایین جاده دسترسی نیروگاه Length of power plant access road	P16	0.25	0.065 - 0.09
	P7	0.05	
	P8	0.26	
محدوده گالی جنب مسیر رودخانه گرم رودبار Gully area next to the Garm Rudbar River route	P6	0.03	0.093 - 0.13
	P11	0.16	
	P9	تخریب شده	
روی گالی ۵ On Gully 5	P17	تخریب شده	0.035 - 0.07
	P10	0.25	
	P12	تخریب شده	
روی گالی ۵ جنب حوضچه سد On Gully 5 next to the dam pond	P18	0.21	0.07 - 0.12
	P19	0.03	
	P21	تخریب شده	
	P20	0.07	
	P22	0.05	
	P23	0.09	
	P13	0.30	



شکل ۱۱: نمایش میزان جابجایی نقاط با روش تداخل سنجی راداری در محیط گوگل ارث
Fig. 11: Displaying the amount of point displacement using radar interferometry in Google Earth

تدقیق شده با نزدیک ترین تقریب به واقعیت را برای بررسی تغییرات بوجود آمده برای مدیریت بحران و جلوگیری از اتفاقات آتی ارائه دهد. به صورت کلی مزایا و معایب روش تداخل سنجی راداری را می توان به صورت زیر جمع بندی کرد:

مزایا: تداخل سنجی راداری به عنوان یک روش پیشرفته در سنجش از دور، از پوشش گسترده و یکپارچه (حتی در مناطق صعب العبور یا فاقد دسترسی مستقیم) بهره می برد و امکان اندازه گیری جابه جایی های میلی متری سطح زمین را با دقت بالا فراهم می کند. این روش به دلیل استفاده از امواج راداری، مستقل از نور خورشید است و در شرایط ابری، شب یا حتی زیر پوشش گیاهی محدود نیز قابل اجراست. داده های ماهواره ای رایگان مانند سنیتل-۱ و امکان پایش بلندمدت تغییرات زمین، آن را به ابزاری مقرون به صرفه برای مطالعات فرونشست، زمین لرزه و فعالیت های آتشفشانی تبدیل کرده است. افزون بر این، ادغام روش تداخل سنجی راداری با فناوری هایی مانند GPS یا لیدار می تواند دقت نتایج را بهبود بخشد و محدودیت های آن را جبران کند.

معایب و چالش ها: از جمله محدودیت های اصلی روش تداخل سنجی راداری، خطای بازیافتی فاز در مناطق با توپوگرافی پیچیده (مانند کوهستان ها) است که ناشی از تغییرات ناگهانی ارتفاع و پدیده های «سایه راداری» یا «برهم نهی» می باشد. همچنین، دسترسی محدود به داده های تاریخی هماهنگ (به ویژه از ماهواره های قدیمی) و ناتوانی در رصد تغییرات سریع (کمتر از یک سال) مانند رانش های ناگهانی، از چالش های کلیدی هستند. در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، حرکت برگ ها یا تاج درختان موجب کاهش همدوسی و خطا در اندازه گیری می شود. علاوه بر این، بررسی محدوده های بسیار کوچک به دلیل رزولوشن فضایی محدود تصاویر راداری و اثرات مخرب تغییرات رطوبت اتمسفر (به ویژه در مناطق مرطوب) بر دقت نتایج، از دیگر نقاط ضعف این روش محسوب می گردد.

با توجه به خروجی داده های ماهواره ای پردازش شده و نتایج بدست آمده و مقایسه آنها با نتایج روش های قدیمی که تا کنون برای رفتارنگاری مناطق بحرانی در سد سیاه بیشه انجام گرفته است، بدیهی است که می توان از روش تداخل سنجی راداری برای نمایش و بررسی میزان تغییرات جابجایی و تا حدی ارتفاعی در هر منطقه بسته به نوع عواملی که در بوجود آمدن این تغییرات تأثیرگذار است اعم از تغییر در شکل طبیعی زمین و خارج نمودن آن از حالت پایدار اولیه، بهره برداری از سدها و یا هر گونه سازه، حرکت گسل ها بر روی یکدیگر و همچنین عواملی مانند زلزله، تغییرات مسطحاتی و ارتفاعی به دلیل رانش زمین، هر نوع بهره برداری از منطقه برای مقاصد خاص استفاده نمود. تحقیق حاضر نمایانگر این مهم است که می توان در بازه های زمانی مختلف در صورت وجود زوج تصویر مناسب مناطق مختلف را رفتارسنجی نموده و میزان تغییرات بوجود آمده را با دقت مناسبی بدست آورد. لازم به ذکر است که به دلیل ماهیت تصاویر ماهواره ای هر چقدر تصاویر از مناطق همجوار تهیه شود نسبت به مناطق کوهستانی نتایج بدست آمده دقیق تر می بایم باشد؛ زیرا در کوهستانی به دلیل وجود اختلاف ارتفاع زیاد در فواصل کم، اختلاف ارتفاع بدست آمده ناشی از خطای بازیافتی فاز می باشد. همچنین نتایج بدست آمده نمایانگر این است که محدوده های که با فاصله بیشتری از حوضچه سدها قرار دارند. همچنین محدوده های که در تردد روزانه مسیر اصلی جاده چالوس نیستند مخاطره و تهدید اندک تری شامل حالشان می شو و به سبب تداوم شرایط فوق در سد تلمبه ذخیره ای سیاه بیشه برای تداوم پایش و رفتارنگاری منطقه می توان از روش تداخل سنجی راداری استفاده نمود، و امکان مناسبی برای سنجش دقت نتایج حاصله از این روش و بهینه سازی آن در عرصه سدسازی فراهم آورد. روش تداخل سنجی راداری در مدت زمان کم و کمترین هزینه نسبت به روش های دیگر قادر است به بهترین شکل ممکن و دقت کافی نمایشی از میزان تغییرات بوجود آمده در هر منطقه را ارائه دهد و یک بینش کلی

نتیجه‌گیری

Measurements: Applications to "La Cohilla" Dam (Cantabria, Spain). In *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles*: IAG Symposium Jaén, Spain March 17–19, 2005 2006 (pp. 270-276). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-38596-7_34.

[4] Aldin Sadrnejad A, Nikkhah M, Aghdam MM, Tehrani ZS. Internal damage assessment of concrete arch dam by multi-laminate model upon recorded micro-geodesy data. presented at 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Prague, Czech Republic, 2017.

[5] Maltese A, Pipitone C, Dardanelli G, Capodici F, Muller JP. Toward a comprehensive dam monitoring: On-site and remote-retrieved forcing factors and resulting displacements (GNSS and PS-InSAR). *Remote Sensing*. 2021 Apr 16;13(8):1543. <https://doi.org/10.3390/rs13081543>.

[6] Aswathi J, Kumar RB, Oommen T, Bouali E, Sajinkumar K. InSAR as a tool for monitoring hydropower projects: A review. *Energy Geoscience*. 2022;3(2):160-71. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.12.007>.

[7] Yang K, Yan L, Huang G, Chen C, Wu Z. Monitoring building deformation with InSAR: Experiments and validation. *Sensors*. 2016;16(12):2182. <https://doi.org/10.3390/s16122182>.

[8] Cigna F, Esquivel Ramírez R, Tapete D. Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR displacement velocities against GNSS and geodetic leveling monitoring data. *Remote Sensing*. 2021;13(23):4800. <https://doi.org/10.3390/rs13234800>.

[9] Frattini P, Crosta GB, Rossini M, Allievi J. Activity and kinematic behaviour of deep-seated landslides from PS-InSAR displacement rate measurements. *Landslides*. 2018;15:1053-70. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0940-6>.

[10] Bozzano F, Cipriani I, Mazzanti P, Prestininzi A. Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground-based InSAR monitoring. *Natural hazards*. 2011;59(3):1377-96. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9840-6>.

[11] Sabeti H, Motagh M, Sharifi M A, Akbari B, Akbarimehr M, Fard D. Determination of the displacement rate of the Masouleh landslide for management of landslide risk by Radar Interferometry. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 2019; 13 (44) :103-113. [In persian]

[12] M. Ghadimi, "Monitoring of the changes in the Taleqan dam's body by using InSAR," *Journal of Range and Watershed Management*, 72 3 (2019): 819-829, doi: 10.22059/jrwm.2019.287262.1409. In persian.

[13] Hashemi Fard, A., kardavani, P., Asadian, F. Investigating the Amount of Ground Surface Displacement in the Gotvand Olya Dam Using Differential Radar Interference Technique. *Hydrogeomorphology*, 2018; 5(15): 37-53. [In persian]

[14] Akbari M. Monitoring land subsidence due to geological and water resources factors using Differential Radar Interferometry method (Case Study: Arak city). *Journal of Water*

بررسی جابجایی‌های مسطحاتی و ارتفاعی در سد تلمبه ذخیره‌های سیاه‌بیشه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و روش‌های نقشه‌برداری زمینی نشان داد که ناپایداری‌های قابل توجهی در مناطق مختلف سد، از جمله گالی ۵ (با فرونشست تا ۶۰ سانتیمتر) و سد بالا (با جابجایی‌های بیش از ۳۱۳.۵- میلیمتر در ارتفاع) وجود دارد. این جابجایی‌ها ناشی از عوامل طبیعی مثل حرکت گسل‌ها و همچنین نحوه بهره‌برداری از سد (که باعث اشباع‌شدگی و تخلیه سریع توده‌های خاکی و سنگی می‌شود) و فعالیت‌های عمرانی و راه‌سازی در محدوده حوضچه‌های سد می‌باشد. روش تداخل‌سنجی راداری با شناسایی تغییرات پهنه‌ای تا ۰.۱۳- متر در گالی ۵، به عنوان ابزاری کم هزینه و کارآمد در این حوزه تأیید شد، هرچند چالش‌هایی مانند توپوگرافی کوهستانی و محدودیت داده‌های قدیمی دقت آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیشنهادات کلیدی شامل ترکیب تداخل‌سنجی راداری با روش‌های پیشرفته نقشه‌برداری زمینی، ایجاد آرشیو داده‌های ماهواره‌ای، و پایش ادواری مناطق بحرانی برای مدیریت ریسک است. این مطالعه نقش حیاتی تداخل‌سنجی راداری را در پایش مستمر و کاهش خسارات ناشی از زمین‌لغزش‌ها در پروژه‌های مشابه را برجسته می‌کند.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش مقاله برابر می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از آژانس فضایی اروپا به منظور در دسترس قرار دادن رایگان تصاویر سنجنده سنیتل-۱ و کلیه اعضای تیم اجرایی عملیات نقشه‌برداری سد سیاه‌بیشه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Moeini, H., Katibeh, H., Golaabatoonch, I. Upper Reservoir Seepage Analysis of Azad Dam Pumped Storage Power Station and Selecting the Best Sealing Method. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2012; 43(2): 35-41. [In persian] doi: 10.22060/ceej.2012.138.

[2] Entezari Amir, Urmiaei Ali, Qayyoumian Jafar, Bagheri Hamid, Haji Hassani Hamidreza. Landslide hazard zoning in the upper Siah Bisheh dam catchment area. Presented at the 2005 Iranian Geological Society Conference. Available from: [In persian]

[3] Ferrer Torío R, Piña Patón B, De Luis Ruiz JM, Ruiz Bedia ML, Castillo López E. Geodetic Inspections Using Distance

[26] Yang J, Li C. Assimilation of D-InSAR snow depth data by an ensemble Kalman filter. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06699-y>.

[27] Nobile A. Volcano deformation in different tectonic settings using InSAR and modeling. Ph.D thesis, Università degli Studi Roma Tre Dipartimento di scienze, 2013.

[28] Fomelis M, Blasco JMD, Desnos Y-L, Engdahl M, Fernández D, Veci L, et al., editors. ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium; 2018. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519545>.

[29] Das A, Agrawal R, Mohan S. Topographic correction of ALOS-PALSAR images using InSAR-derived DEM. *Geocarto International*. 2015;30(2):145-53. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.883436>.

[30] Pu L, Zhang X, Zhou Z, Shi J, Wei S, Zhou Y. A phase filtering method with scale recurrent networks for InSAR. *Remote Sensing*. 2020;12(20):3453. <https://doi.org/10.3390/rs12203453>.

[31] Yu H, Lan Y, Yuan Z, Xu J, Lee H. Phase unwrapping in InSAR: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2019;7(1):40-58. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2018.2873644>.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



علی بیات دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی نقشهبرداری (گرایش ژئودزی) از دانشگاه تهران شمال، ایران است. وی از سال ۱۴۰۳ به عنوان سرپرست نقشهبرداری در تصفیه خانه ششم آب تهران مشغول به کار است. وی

۱۴ سال سابقه کار در پروژه های سدسازی از جمله سد گتوند علیا، سد رودبار لرستان و سد تلمیه ذخیره ای سیاهپیشه را در کارنامه خود دارد.

Bayat, A. Master of Geodesy, Department of Civil and Surveying Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, 1651153311, Iran

✉ ali.bayat.799@gmail.com



محمد رضا سیف دارای مدرک دکتری مهندسی نقشهبرداری (گرایش ژئودزی) از دانشگاه تهران است. وی هم اکنون استادیار گروه نقشهبرداری دانشگاه جامع امام حسین (ع) در تهران است. ایشان تا کنون موفق به چاپ بیش از ۲۰ مقاله

علمی در مجلات و همایش های معتبر شده است و زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان ژئودزی، سامانه های GNSS، تعیین مدار ماهواره، سنجش از دور راداری و مباحث تداخل سنجی است.

and Soil Resources Conservation. 2021;10(3):115-32. [In persian]

[15] Roustaei, S., Roustaei, M., Sharifikia, M., Yarahmadi, J. Application of differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) for detection and monitoring of landslides, Case study: Garm Chay Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 2013; 5(3): 190-198. doi: 10.22092/ijwmse.2013.101841. In persian.

[16] Shirani, K., Khosh Baten, M. The study and monitoring of an active landslide using differential interferometry synthetic aperture RADAR (Case study: Noghol landslide, Semirom). *Quaternary Journal of Iran*, 2016; 2(1): 53-65. doi: 10.22034/irqua.2016.701900. In persian.

[17] Jamal SG, Gholami H, Rajabi M, Mobini MH. Effect of the Construction of Mamloo Dam on Land Subsidence in Varamin Plain. *Human & Environment*. 2022;20(2):171-85. [In persian]

[18] Javadi, P., Ghorbani, Z. Combining GPS and InSAR Data to Improve the Accuracy of Dams Displacement Monitoring (Case Study: Givi Dam - Iran). *New Approaches in Civil Engineering*, 2020; 4(3): 42-57. [In persian] doi: 10.30469/jnace.2020.128663.

[19] Wang Q, Huang Q, He N, He B, Wang Z, Wang Y. Displacement monitoring of upper Atbara dam based on time series InSAR. *Survey Review*. 2020;52(375):485-96. <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1643529>.

[20] Bayik C, Abdikan S, Arıkan M. Long term displacement observation of the Atatürk Dam, Turkey by multi-temporal InSAR analysis. *Acta Astronautica*. 2021;189:483-91. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.09.022>.

[21] Lazecký M, Hlaváčová I, Martinovič J, Ruiz-Armenteros AM. Accuracy of Sentinel-1 interferometry monitoring system based on topography-free phase images. *Procedia computer science*. 2018;138:310-7. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.044>.

[22] Tzouvaras M, Danezis C, Hadjimitsis DG. Small scale landslide detection using Sentinel-1 interferometric SAR coherence. *Remote Sensing*. 2020;12(10):1560. <https://doi.org/10.3390/rs12101560>.

[23] Mantovani M, Bossi G, Marcato G, Schenato L, Tedesco G, Titti G, et al. New perspectives in landslide displacement detection using sentinel-1 datasets. *Remote sensing*. 2019;11(18):2135. <https://doi.org/10.3390/rs11182135>.

[24] Yagüe-Martínez N, Prats-Iraola P, Gonzalez FR, Brcic R, Shau R, Geudtner D, et al. Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2016;54(4):2220-34. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2497902>.

[25] Keshavarz, S. R., Bayati Eshkaftaki, J., Almodaresi, S. A. Spatial analysis of the amount of landslides using radar interferometric technique in order to reduce hazards (Study area: Sarbaz area in Isfahan province). *Environmental Management Hazards*, 2022; 9(3): 271-288. [In persian] doi: 10.22059/jhsci.2023.347893.741.

کنون موفق به چاپ بیش از ۵۰ مقاله علمی در مجلات و همایش‌های معتبر داخلی و بین‌المللی شده است و زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان سنجش از دور، پردازش تصویر، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، مطالعات محیط زیست و تغییر اقلیم است.

Ph.D of Remote sensing engineering, Researcher, Imam Hossein University, Tehran, 1698715461, Iran

✉ b_asghari@ihu.ac.ir

Ph.D of Geodesy, Assistant professor, Imam Hossein University, Tehran, 1698715461, Iran

✉ mrseyf@ihu.ac.ir



بهنام اصغری بیرامی دارای مدرک دکتری مهندسی نقشه‌برداری (گرایش سنجش از دور) از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی است. وی هم‌اکنون پژوهشگر خبره گروه نقشه‌برداری دانشگاه جامع امام حسین (ع) در تهران است. ایشان تا

Citation (Vancouver): Bayat A, Seif M.R, Beirami B.A. [Monitoring landslide areas in the Siah Bisheh Dam Project using Surveying and radar interferometry]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2025; 3(1): 85-101

 <https://10.22061/jrsgr.2025.11937.1098>



COPYRIGHTS

© 2025 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)