

Early Warning Protocol for Shiadeh Earth Dam Failures

Seyed Razi Anisheh¹, Mohammad Sharifipour^{2*}, Arash Azari³

1- PhD student, Civil Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

Robust early warning protocols are essential for the timely detection and mitigation of potential risks to critical infrastructures. This study proposes a comprehensive framework for monitoring and evaluating the performance of the Shiadeh earth dam. Following the initial reservoir impoundment in 1999 and the failure of the entire installed instrumentation system in 2013, settlement prediction was carried out using a radial basis function (RBF) neural network based on 530 recorded data points. Satellite image processing over the period 2014 to 2024 using SNAP software indicated a settlement of 87 cm along the dam crest, emphasizing the role of the secondary fault in the reservoir and the left abutment of the dam. In addition, a three-dimensional numerical analysis of the earth dam under static and dynamic conditions using PLAXIS software estimated a crest settlement of 78.09 cm during all reservoir impoundment seasons, which shows a remarkable agreement with the satellite-derived results. Ground surveying of micro-geodetic points revealed swelling of the downstream slope and settlement along the dam crest. The assessment results indicate that the dam is currently at alert level 2 (caution status). By integrating satellite monitoring, numerical modeling, radial basis function algorithms, and ground surveying of micro-geodetic points and the crest, this study provides an innovative and reliable protocol for monitoring the Shiadeh earth dam. This approach can play a significant role in enhancing safety and reducing the risk of dam failure. Moreover, it can be applied to monitor all operational earth and concrete dams across the country.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 May 2025

Revise Date: 18 July 2025

Accept Date: 20 August 2025

Keywords:

Early Warning
Monitoring instruments
Radial Basis Function
Ground survey
Controlling settlement
Dynamic state

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.519799.3712

*Corresponding author: Mohammad Sharifipour.

Email address: sharifipour@razi.ac.ir

پروتکل هشدار اولیه در خصوص خرابی های سد خاکی شیاده

سید رضی انیشه^۱، محمد شریفی پور^{۲*}، آرش آذری^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده

پروتکل های هشدار اولیه^۱ی قوی، برای شناسایی به موقع و کاهش ریسک های احتمالی زیرساخت های حیاتی، امری ضروری است. این پژوهش یک چارچوب جامع برای پایش و ارزیابی عملکرد سد خاکی شیاده را پیشنهاد می کند. پس از نخستین آنگیری سد در سال ۱۹۹۹ و خرابی تمام سیستم ابزار دقیق منصوبه در سال ۲۰۱۳، پایش بینی نشست با استفاده از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی^۲ (RBF) بر مبنای ۵۳۰ دیتای ثبت شده انجام شد. پردازش تصاویر ماهواره ای طی بازه ی زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ با نرم افزار SNAP^۳، نشست در امتداد تاج سد معادل ۱۷ سانتی متر را نشان داد که بر نقش گسل ثانویه در مخزن و تکیه گاه چپ سد تأکید دارد. علاوه بر این، تحلیل عددی سه بعدی سد خاکی، در حالت های استاتیکی و دینامیکی با استفاده از نرم افزار PLAXIS، نشست امتداد تاج معادل ۷۸/۰۹ سانتی متر را در تمام فصول آنگیری مخزن برآورد شد که تطابق قابل توجهی با نتایج حاصل از تصاویر ماهواره ای دارد. نقشه برداری زمینی از نقاط میکروژئودزی نشان داد که شیب خارجی سد متورم شده و نشست در امتداد تاج سد اتفاق افتاده است. نتایج بررسی وضعیت سد موجود را در سطح هشدار ۲ (وضعیت احتیاط) نشان می دهد. با تلفیق پایش ماهواره ای، مدل سازی عددی، الگوریتم های تابع پایه شعاعی و انجام نقشه برداری از نقاط میکروژئودزی و امتداد تاج سد، این پژوهش یک پروتکل نوآورانه و قابل اعتماد برای پایش سد خاکی شیاده را ارائه می دهد که می تواند نقش مهمی در ارتقای ایمنی و کاهش خطر خرابی سدها ایفا کند. این روش می تواند برای پایش تمام سدهای خاکی و بتونی در حال بهره برداری سراسر کشور نیز بکارگیری شود.

کلمات کلیدی: هشدار اولیه، تصاویر ماهواره ای، کنترل نشست، تابع پایه شعاعی، ابزارهای پایش، حالت دینامیکی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.519799.3712	۱۴۰۵/۰۱/۳۱	۱۴۰۴/۰۵/۲۹	۱۴۰۴/۰۵/۲۹	۱۴۰۴/۰۴/۲۷	۱۴۰۴/۰۲/۲۸
10.22065/jsce.2025.519799.3712	محمد شریفی پور sharifipour@razi.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:

^۱ Early Warning Protocol

^۲ Radial Basis Function

^۳ Sentinel platform application

۱- مقدمه

سدهای خاکی نقش حیاتی در تأمین منابع آبی، کنترل سیلاب و توسعه کشاورزی دارند. وقوع هرگونه خرابی در این سازه‌ها می‌تواند پیامدهای فاجعه‌باری در پی داشته باشد. از این‌رو، توسعه سیستم‌های هوشمند هشدار اولیه که قادر به پایش و پیش‌بینی رفتار سدها باشند، ضرورتی انکارناپذیر در مدیریت بحران و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی است. هدف این مطالعه ارائه پروتکل‌های هشدار اولیه برای جلوگیری از شکست سد شیاده با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، از جمله تصاویر ماهواره‌ای است. برای افزایش دقت در پایش و کنترل نشست تاج سد، از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار سه بعدی PLAXIS نیز استفاده شد. جهت پیش‌بینی نشست در شیب پایین دست سد، از الگوریتم شبکه عصبی تابع پایه شعاعی RBF استفاده گردید. یافته‌ها اثربخشی روش الگوریتم برای پیش‌بینی دقیق سد را تأیید می‌نمایند. برای صحت‌سنجی دقیق تر، نقشه برداری زمینی از نقاط میکروژئودزی شیب خارجی سد و پروفیل طولی در امتداد تاج سد، با نتایج مدل سه بعدی PLAXIS و تصاویر ماهواره‌ای تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهند.

از آنجائیکه سد خاکی شیاده جز سازه‌های حیاتی و با اهمیت است. لذا نیاز به تعریف پرتکل هشدار حتی با تعداد حداقل داده و اطلاعات موجود می‌باشد. برای دستیابی به پروتکل هشدار اولیه (EWP) نیاز به بکارگیری دانش مهندسی، برای تعیین وضعیت پایداری سد خاکی، در زمان بهره برداری از آن می‌باشد. تهیه طرح پرتکل برای جلوگیری از هرگونه خسارات جانی و مالی نیازمند چندین تخصص در رشته مهندسی نقشه برداری و زمین‌شناسی و دیگر رشته‌های مرتبط می‌باشد. در این پژوهش پروتکل هشدار اولیه (EWP) برای سد خاکی شیاده، با انجام مراحل زیر پیشنهاد می‌گردد.

۱) انجام تحقیقات میدانی و انتخاب محدوده ساختگاه برای مطالعه سد شیاده.

۲) جمع‌آوری نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی در محدوده مطالعه.

۳) گردآوری دیتای ابزار دقیق منصوبه در ترازهای مختلف شیب بیرونی که تا سال ۲۰۱۳ اطلاعات را ثبت نموده اند.

۴) استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای محاسبه نشست در محدوده وسیعی از ساختگاه سد به کمک نرم افزار SNAP.

۵) تحلیل سد خاکی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D برای محاسبه نشست و تغییر شکل‌های بدنه سد.

۶) استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته RBF برای پیش‌بینی روند نشست در سال جاری با استفاده از داده‌های ثبت شده قبلی.

۷) انجام نقشه برداری زمینی از نقاط میکروژئودزی شیب خارجی سد و تهیه پروفیل‌های عرضی و طولی در امتداد تاج سد.

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

نوبهار و همکاران [۱] عقیده دارند که تغییرات اقلیمی یک چالش جهانی است که بر زیرساخت‌های ژئوتکنیکی و سیستم‌های حمل‌ونقل در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. یکی از حوزه‌های نگران‌کننده، تأثیر آن بر شیب‌ها و خاکریزهای بزرگراهی^۴ (HWE) است. نوبهار و همکاران [۲-۶] با انجام مطالعه بر خاکریزهای بزرگراهی در مناطقی با بارندگی زیاد و خاک‌های مسئله دار مانند رس‌های متورم‌شونده، دریافتند که تغییرات در الگوهای بارندگی و میزان رطوبت می‌تواند تأثیرات چشمگیری در پایداری این سازه‌ها داشته باشد. خان و همکاران [۷] با مطالعه خطرانش زمین و ناپایداری شیب‌ها دریافتند که افزایش شدت و تعداد دفعات بارش در اثر تغییرات اقلیمی می‌تواند مقاومت خاک را کاهش داده و خطر رانش زمین و ناپایداری شیب‌ها را افزایش دهد. ایوک [۸] نشان داد که تغییرات در میزان رطوبت، همراه با سیکل‌های مکرر تر و خشک‌شدگی و سایر عوامل هیدرومکانیکی، می‌تواند باعث انقباض و انبساط رس‌های متورم شده و در نتیجه، ناپایداری بیشتری در خاکریزهای بزرگراهی گردد. تحقیقات کندالی و همکاران [۹] نشان داد که توسعه راهبردهای پیشگیرانه با استفاده از روش‌های مؤثر و کاربردی ضروری است تا ایمنی و پایداری بلند مدت سازه‌های ژئوتکنیکی تضمین شود. در این راستا، مطالعات متعددی تأثیر تغییرات اقلیمی بر اجزای زیرساخت‌های ژئوتکنیکی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰-۱۷]. ایکس یو و همکاران [۱۸] به بررسی تعامل بین خاک و اقلیم در پایداری سازه‌های خاکی زیرساختی، به‌ویژه در ارتباط با رویدادهای خرابی شیب‌ها و خاکریزهای بزرگراهی پرداختند. آنها دریافتند که عوامل اقلیمی مانند بارندگی و دما، در ترکیب با خاک‌های رسی بسیار متورم‌شونده، می‌تواند اثرات منفی بر خاکریزها داشته باشند. به

^۴ Highway Embankment

دلیل تغییرات زیست محیطی ناشی از رویدادهای شدید، عواملی مانند نرخ نفوذ آب، فشار منفذی، تنش مؤثر، پتانسیل مکش خاک، تورم و انقباض در خاک‌های ریزدانه، سیکل‌های تر و خشک شدگی، تخریب پوشش گیاهی و ترک‌های ناشی از خشک شدن، همگی رفتار فیزیکی و هیدرومکانیکی خاک را در کوتاه مدت و بلندمدت تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۹-۲۲].

تحقیقات ابرام و رایت [۲۳] نشان داد بارش بیش از حد منجر به اشباع شدن خاک می‌شود که این امر موجب کاهش مقاومت خاک و افزایش خطر رانش زمین خواهد شد. در دهه ۱۹۷۰، رایت [۲۴] تحقیقات پیشگامانه‌ای در زمینه علل ناپایداری شیب‌ها در خاک‌های تگزاس انجام داد و عوامل متعددی را که به این پدیده منجر می‌شوند، مورد بررسی قرار داد. لی [۲۵] به‌طور گسترده‌ای به بررسی علل ناپایداری شیب‌ها در خاک رس "یازو" (یک نوع رس بسیار متورم‌شونده در میسی‌سی‌پی) پرداخت. این مطالعه مدرن بر تأثیرات بارندگی و تغییرات سطح آب زیرزمینی تمرکز دارد و دیدگاه جدیدی را در درک ناپایداری شیب‌ها ارائه می‌دهد. نلسون و میلر [۲۶] ابراز نمودند که بیش از ۲۵ درصد مساحت ایالات متحده پوشیده از خاک‌های رسی متورم‌شونده است که با تغییرات فصلی رطوبت، منقبض و منبسط می‌شوند. به عقیده کنگای [۲۷]، پایش و نگهداری منظم خاکریزها، به شناسایی و برطرف نمودن مشکلات احتمالی قبل از وقوع خرابی‌های جدی، از اهمیت بالایی برخوردار است. این اقدامات می‌توانند خطر خرابی‌های فاجعه‌بار را کاهش داده و ایمنی کاربران جاده را تضمین کنند. با توجه به موارد ذکر شده و پر اهمیت مطالعات گذشته و وجود پارامترهای متعدد و پیچیده در بررسی پایداری شیب‌ها و سازه‌های حیاتی نظیر سدها، تهیه و تنظیم پروتکل هشدار اولیه (EWP) می‌تواند عملکرد زیرساخت‌های ژئوتکنیکی را افزایش داده و با ارائه اقدامات مناسب و به‌موقع، احتمال وقوع خرابی‌ها را کاهش دهد. پروتکل هشدار اولیه به روش‌های مختلفی تعریف و دسته‌بندی شده و توسط پژوهشگران متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۸-۲۹]. تحقیقات پتلی [۳۰] بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰، نشان داد که خرابی‌های غیرزلزله‌ای در خاکریزهای بزرگراهی، منجر به بیش از ۳۲,۰۰۰ مرگ در سراسر جهان شد که بسیاری از این خرابی‌ها در آسیا، آمریکای مرکزی و آمریکای جنوبی رخ داده و اغلب کشورهای با درآمد پایین و متوسط تحت تأثیر قرار گرفتند. کیکستاد و هایلند [۳۱] پیش‌بینی نمودند که تغییرات اقلیمی، از طریق تشدید ناپایداری زمین، منجر به افزایش خسارات انسانی و مالی، به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم، خواهد شد.

هدف این مطالعه ارائه پروتکل‌های هشدار اولیه برای جلوگیری از شکست سد با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، از جمله تصاویر ماهواره‌ای است. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای برای محاسبه نشست در امتداد تاج و اثر گسل فرعی در تکیه گاه چپ سد خاکی شیاده که باعث افزایش نشست شده است استفاده می‌شود. برای افزایش دقت در پایش و کنترل نشست تاج سد، مدل‌سازی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D نیز انجام شد.

معرفی محل مورد مطالعه

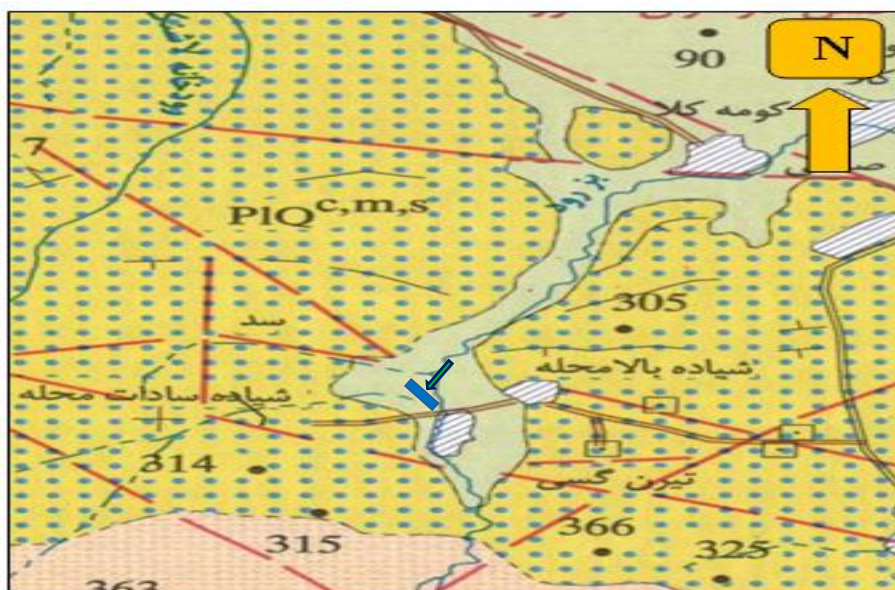
در این تحقیق سد خاکی شیاده در ۳۵ کیلومتری جنوب غربی شهر بابل در استان مازندران با مختصات $utm (x=636028)$ و $y=4021865$ مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس طبقه‌بندی ICOLD^۵، سد سنگریزه‌ای شیاده با هسته رسی در دسته سدهای بلند و به‌عنوان یک سازه مهم طبقه‌بندی می‌شود. طول تاج سد ۴۵۰ متر و ارتفاع آن از بستر رودخانه ۳۳ متر است. این سد در سال ۱۹۹۹ برای تأمین آب آبیاری ۲۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی پایین دست احداث شده است. شکل ۱ ناحیه رانشی در پایین دست تکیه گاه چپ و پنجه شیب پائین دست سد خاکی که در سال ۲۰۰۴ رخ داده است را نشان می‌دهد.

^۵ International Commission on Large Dams



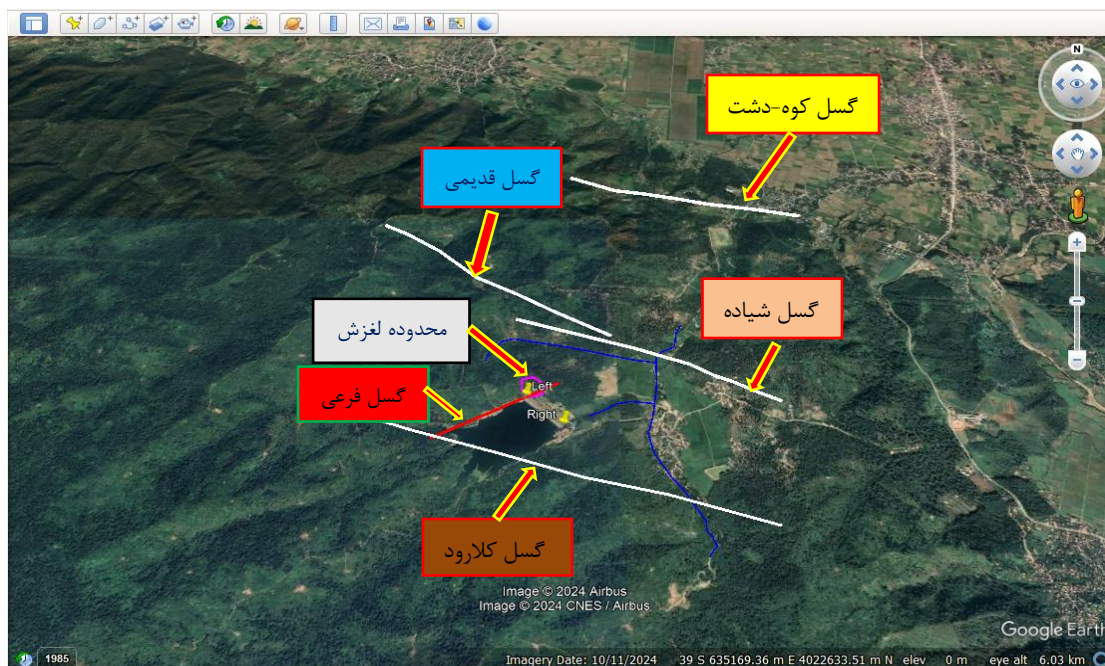
شکل ۱: رانش زمین در پایین دست تکیه گاه چپ و لغزش سطحی در پنجه سد

شکل ۲، نقشه زمین شناسی ایران (برگه قائمشهر)، نشان می دهد که محل سد بر روی سازندهای مربوط به دوران پلیوسن قرار دارد. این سازندها شامل لایه های متناوبی از کنگلومرا، مارن با سیلت، ماسه سنگ و سیلت سنگ هستند. ویژگی های زمین شناسی نشان می دهند که محل سد در منطقه ای با ساختار پیچیده قرار دارد و به دلیل نزدیکی به گسل های فعال، ممکن است تحت تأثیر عوامل زمین ساختی فعال باشد. انجام تحقیقات دقیق ژئوتکنیکی و ارزیابی فعالیت گسل ها برای تضمین پایداری و ایمنی سازه سد ضروری است.



شکل ۲: نقشه زمین شناسی محل سد شیاده (برگه قائمشهر)

شکل ۳ موقعیت گسل کوه-دشت، گسل شیاده، و گسل کلارود را نشان می دهد. رانش سال ۲۰۰۴ به عنوان هشدار از عوامل بالقوه تهدیدکننده آینده سد تلقی می شود. فعال بودن گسل یا فعال شدن گسل ثانویه به واسطه قرارگیری در محیط اشباع مخزن منجر به نشست و زمین لغزش در ساحل چپ شده است. قهرمانی [۳۲] ابراز نمودند که یکی از دلایلی که گسل های ثانویه مورد توجه هستند این است که انرژی را از گسل های اولیه یا قدیمی دریافت کرده و می توانند لغزش هایی در منطقه ایجاد کنند. این لغزش ها ممکن است خطرات ژئوتکنیکی را افزایش داده و بر پایداری سازه ها و زیرساخت های مناطق اطراف تأثیر بگذارند. بنابراین، بررسی دقیق گسل های ثانویه و تأثیرات آن ها در تحلیل خطرات لرزه ای ضروری است.



شکل ۳: ساختگاه سد خاکی شیباده و گسل های موجود

۳- روش تحقیق

برای دستیابی به پروتکل هشدار اولیه (EWP)، از چهار روش استفاده شده است. روش اول با استفاده از اطلاعات ثبت شده ابزار دقیق منصوبه در بدنه سد در دوره زمانی که بطور پیوسته اطلاعات را ثبت نمودند. در این روش، برای پیش بینی نشست در دراز مدت، علی الخصوص در شرایط فعلی که ابزار منصوبه از کار افتاده اند، از الگوریتم‌های پیشرفته RBF با تقریب مناسب و خطای حداقل استفاده شد. روش دوم با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری که بر مبنای تغییرات سطح زمین می باشد، در این روش، برای پایش گسترده و مستمر از سد و محدوده مخزن با دقت نشست در حد سانتی متر، از تصاویر ثبت شده از سال ۲۰۱۴ به بعد (بدون پرداخت هزینه و بصورت رایگان) قابل استفاده است. روش سوم به منظور بررسی دقیق تر تغییر شکل سد با سناریوهای مختلف آبرگیری از مخزن در فصول مختلف سال، با استفاده از نرم افزار PLAXIS3D در شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی استفاده شد. روش چهارم بر مبنای نقشه برداری زمینی از نقاط میکروژئودزی شیب پایین دست سد و تهیه پروفیل های عرضی و طولی تاج سد با دقت در حد میلی متر برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی سایر روش ها استفاده شده است.

۳-۱- پیش بینی نشست با استفاده از الگوریتم های پیشرفته RBF

در این مرحله، الگوریتم تابع پایه شعاعی (RBF) برای پیش بینی میزان نشست، بر اساس داده های ثبت شده از ابزارهای منصوبه در شیب پایین دست سد، مورد استفاده قرار گرفت. ابزارهای اندازه گیری در زمانی که سالم و بی عیب بوده اند، در مجموع ۵۳۰ داده ثبت و اندازه گیری شد. این داده ها مبنای و پایه برای تحلیل رفتار و پیش بینی تغییرات نشست سد در الگوریتم مورد استفاده هستند. روش تقریب RBF بر اساس ضرایب لاگرانژ، توسط فاسهاور و همکاران [۳۳] ارائه شده است. این روش، مسئله را به عنوان یک بهینه سازی درجه دوم محدود با هدف یافتن یک تابع مناسب برای تقریب داده های موجود فرموله می کند. تابع مورد نظر با استفاده از ضرایب لاگرانژ بهترین تطابق ممکن با داده ها را داشته و از دقت بالایی در تقریب برخوردار است.

$$f(X) = \sum_{j=1}^M R_j \beta(\|X - Y_j\|) \quad (1)$$

در این روش، تابع $f(X)$ مورد نظر به صورت مجموع وزنی M از توابع پایه شعاعی (RBF) تعریف می شود بطوریکه هر یک از آن ها به یک نقطه مرجع خاص Y_j مرتبط هستند و یک ضریب R_j به آن اختصاص داده می شود. هدف، تعیین وزن بردار

$$R = (R_1, \dots, R_N)^W \text{ با کمینه سازی بصورت درجه دوم است که در آن:} \\ R^W QR, \quad (2)$$

Q یک ماتریس متقارن مثبت معین $M \times M$ است و کمینه سازی تابع محدود خطی به صورت $SR = t$ تعریف می شود که S یک ماتریس با مرتبه کامل $N \times M$ و $t = (t_1, \dots, t_N)^W$ یک بردار است. این مسئله بهینه سازی را می توان بصورت تخمینی با حداقل مربعات⁶ (LSE) فرموله نمود:

$$f(R, U) = \frac{1}{2} R^W QR - U^W (SR - t) \quad (3)$$

در اینجا $U = (U_1, \dots, U_N)^W$ نشانده ضریب لاگرانژ است. هدف کمینه کردن معادله (3) با توجه به مقادیر R و U می باشد و در نهایت، حل سیستم معادله زیر، منجر می شود:

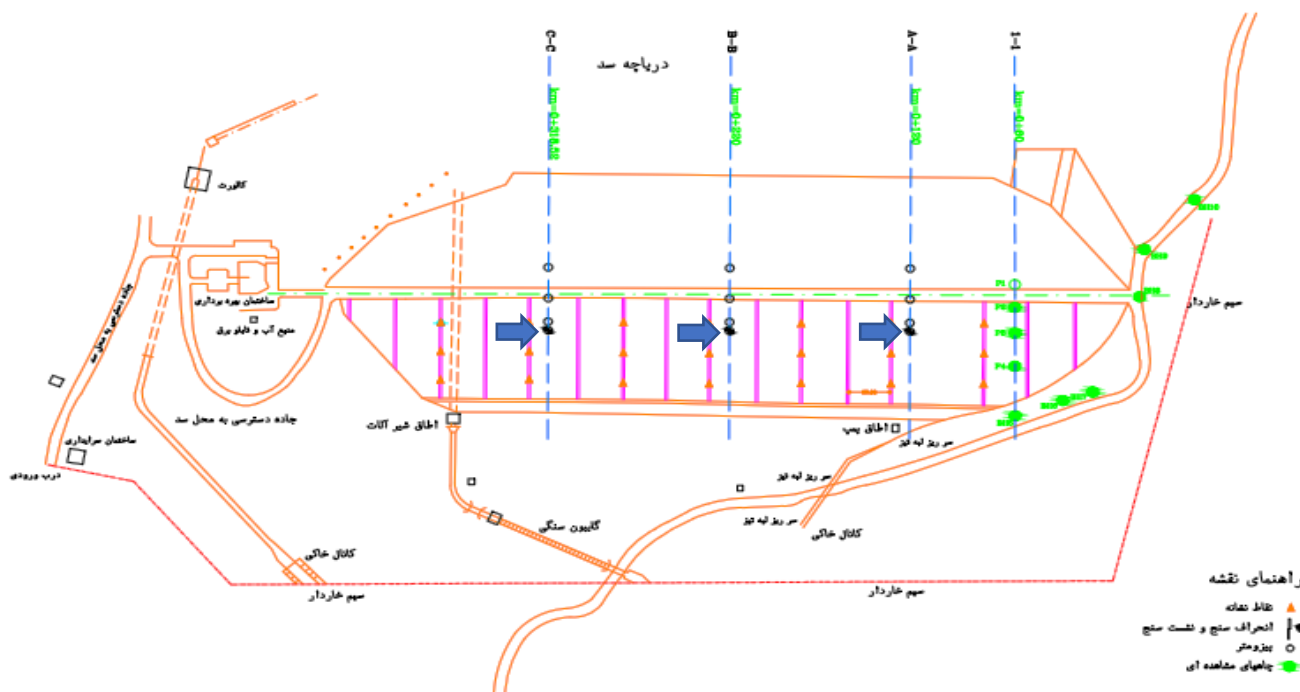
$$\frac{\partial F(R, U)}{\partial R} = QR - S^W U = 0$$

$$\frac{\partial F(R, U)}{\partial U} = SR - t = 0 \quad (4)$$

نتیجه معادله ماتریسی به شکل زیر حاصل می گردد:

$$\begin{pmatrix} Q & -S^W \\ S & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} \quad (5)$$

در شکل 4 پلان جانمایی نشست سنج و نشست سنج در شیب پائین دست سد خاکی شیاده با دایره توپرنشان داده شده است:



شکل 4: پلان جانمایی نشست سنج در شیب پائین دست

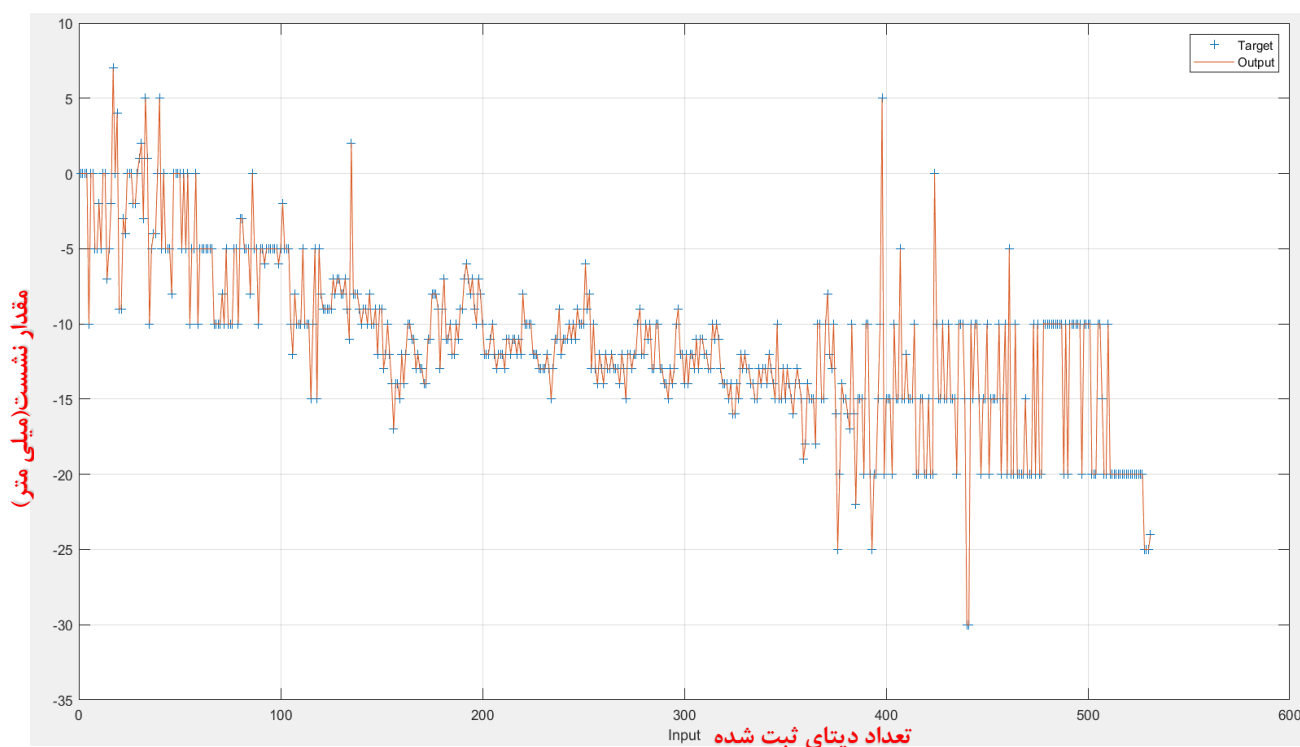
⁶ Least Squares Estimates

در جدول ۱ کد ارتفاعی تجهیزات نشست سنج نصب شده در شیب پایین دست سد خاکی شیاده در مقاطع A و B و C به تفکیک برای انجام پیش بینی نشست ارائه شده است.

جدول ۱. کد ارتفاعی تجهیزات (متر)

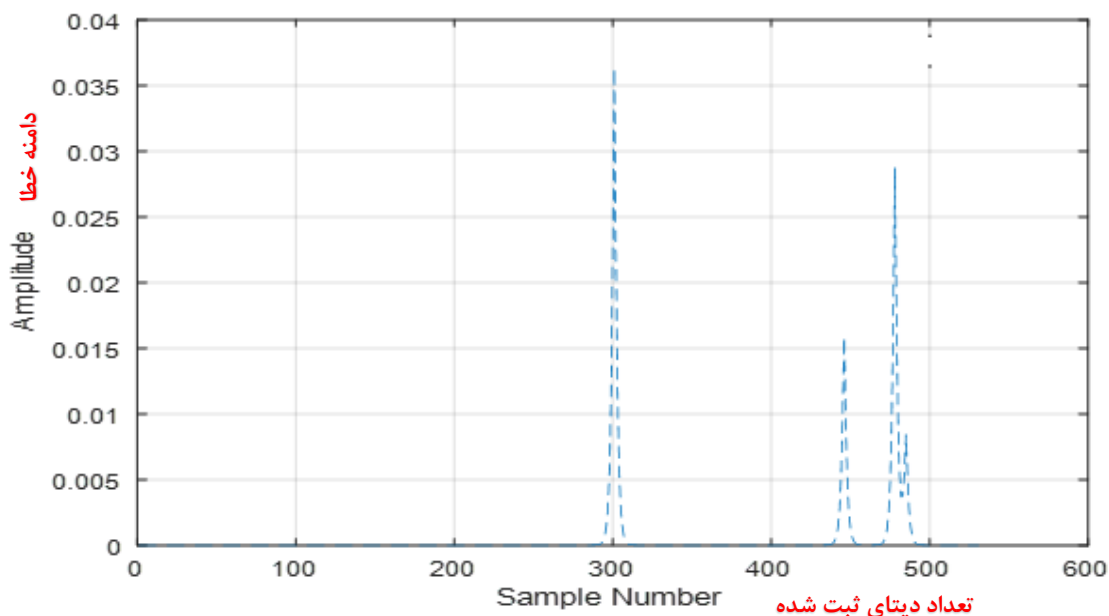
تراز نصب	ابزار دقیق محور C	تراز نصب	ابزار دقیق محور B	تراز نصب	ابزار دقیق محور A
176.25	C1	178	B1	179.6	A1
178.9	C2	178.51	B2	180.11	A2
182.51	C3	181.27	B3	182.75	A3
186.19	C4	185.07	B4	186.42	A4
189.84	C5	188.83	B5	190.19	A5
-	C6	196.38	B6	193.98	A6

ابتدا پیش بینی نشست برای دستگاه C5 در سطح ۱۸۹/۸۴ متر با استفاده از ۵۳۰ داده ثبت شده در نرم افزار MATLAB R2019a انجام شد و پس از تحلیل، در شکل ۵ پیش بینی نشست بر مبنای روند تغییراتی که ابزار دقیق ها در سالهائی که سالم و بی عیب بوده اند، با استفاده از شبکه عصبی RBF با رنگ قرمز مشخص شده است را نشان می دهد.



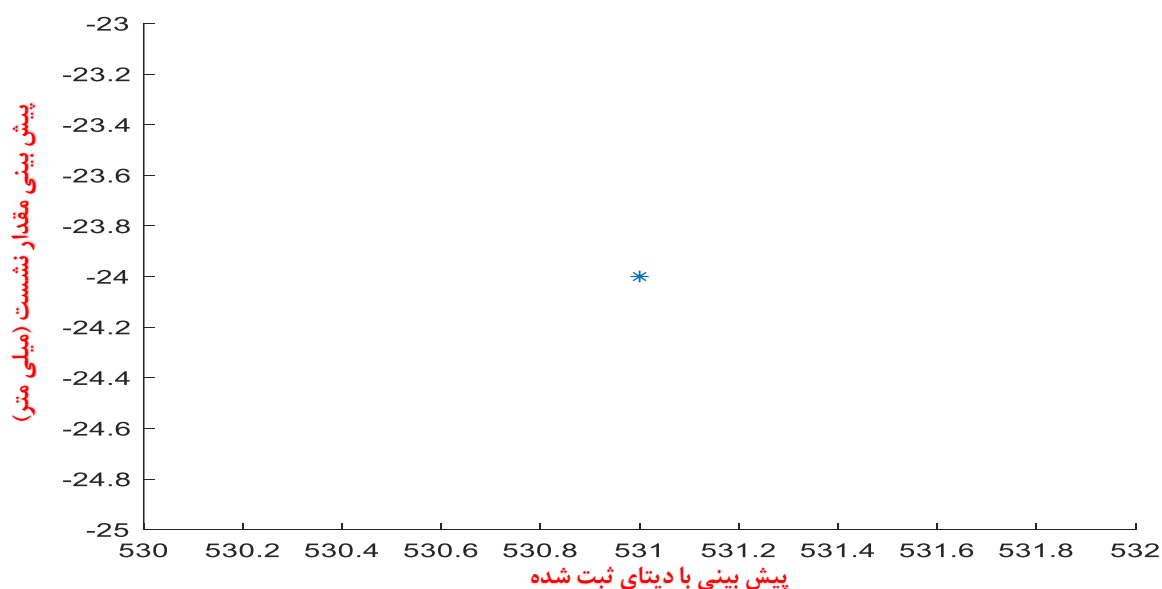
شکل ۵: پیش بینی داده های نشست با شبکه عصبی RBF به رنگ قرمز

بر مبنای ۵۰۰ دیتای موجود، دامنه خطا وارد شده در شکل ۶ نشان داده شده که با اجرای تحلیل در نرم افزار متلب، شبکه شروع به آموزش داده‌ها برای تطبیق با داده‌های موجود می‌نماید. با اتمام فرایند آموزش، شبکه می‌تواند به سطح خطای حداقل برای دستیابی به دقت بالا برسد.



شکل ۶: تابع خطا

بر اساس خروجی‌ها و نتایج به دست آمده از سیستم شبکه عصبی در شکل ۷ نشان داده شده است، پیش‌بینی مقدار ۲۴ - میلی‌متر را بصورت ستاره (*) ارائه شده است.



شکل ۷: نتایج پیش‌بینی از سیستم شبکه عصبی

در جدول ۲، نتایج مقادیر پیش‌بینی شده نشست (بر حسب میلی‌متر) با استفاده از شبکه عصبی برای یکایک ابزار دقیق منصوبه در سه مقاطع A-A، B-B و C-C در شیب پایین دست که به فاصله‌های ۱۲۰، ۲۲۰ و ۳۱۸/۵۲ متر از تکیه گاه چپ سد قرار دارند، ارائه شده است.

جدول ۲: نتایج پیش‌بینی نشست ابزار دقیق با استفاده از شبکه عصبی RBF

کد ارتفاعی ابزار دقیق منصوبه	پیش‌بینی نشست با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی RBF (میلی متر)
A1 (179.60)	۱۰
A2 (180.11)	-۱۳
A3 (182.75)	-۱۸
A4 (186.42)	-۱۹
A5 (190.19)	-۱۵
A6 (193.98)	-۵
B1 (178.0)	۸
B2 (178.51)	-۸
B3 (181.27)	-۱۸
B4 (185.04)	-۳۷
B5 (188.83)	-۳۵
B6 (196.33)	-۲
C1 (176.24)	۱۵
C2 (178.9)	-۸
C3 (182.53)	-۲۷
C4 (186.19)	-۳۱
C5 (189.84)	-۲۴

در این مطالعه، عملکرد دو مدل یادگیری ماشین شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) با کرنل RBF بر روی یک مجموعه داده خاص مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که شبکه RBF دقت بالاتری به دست آورد، به طوری که مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر با ۰/۰۱، خطای میانگین مطلق (MAE) برابر با ۰/۰۲۲۵، و ضریب تعیین (R^2) برابر با ۱/۰۰ بود که نشان‌دهنده برازش تقریباً کامل به داده‌های هدف است. در مقابل، مدل SVM دارای RMSE برابر با ۲/۲۶۱۲، MAE برابر با ۱/۳۲۸۷ و R^2 برابر با ۰/۹۲۸۹ بود که نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی کمتر آن نسبت به شبکه RBF است (همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است).

جدول ۳: مقایسه عملکرد نتایج الگوریتم شبکه RBF با ماشین بردار پشتیبان (SVM) با کرنل RBF

معیار عملکرد	شبکه RBF	ماشین بردار پشتیبان (SVM) با کرنل RBF
مقدار خطای جذر میانگین مربعات	۰/۰۱۰۰	۲/۲۶۱۲
خطای میانگین مطلق	۰/۰۰۲۵	۱/۳۲۸۷
ضریب تعیین (R^2)	۱/۰۰۰۰	۰/۹۲۸۹

این تفاوت چشمگیر در عملکرد را می‌توان به چندین عامل نسبت داد. در درجه اول، ماهیت مجموعه داده مورد استفاده هموار، پیوسته و دارای نویز بسیار کم است. شبکه RBF با بهره‌گیری از توابع پایه شعاعی، ذاتاً برای تقریب توابع هموار و پیوسته بسیار مناسب است و می‌تواند الگوهای زیرین داده را با خطای بسیار کم مدل‌سازی کند.

در مقابل، مدل SVM با کرنل RBF وابستگی زیادی به تنظیم دقیق آبرمؤلفه‌هایی مانند پارامتر منظم‌کننده (C) و پارامتر پهنای کرنل (γ) دارد. در صورت عدم بهینه‌سازی دقیق این پارامترها، توانایی SVM در تعمیم‌دهی کاهش می‌یابد و این موضوع احتمالاً دلیل افت عملکرد مشاهده شده است. علاوه بر این، SVM‌ها معمولاً در داده‌های پرنویز یا زمانی که مرز تصمیم‌گیری پیچیده است، عملکرد مقاوم‌تری از خود نشان می‌دهند. اما در این مورد خاص، که داده‌ها ساختار ساده و همواری دارند، توانایی تقریب شبکه RBF موثرتر ظاهر شده است. همچنین اندازه و ابعاد مجموعه داده در انتخاب مدل نقش کلیدی دارند. معماری ساده‌تر و زمان آموزش سریع‌تر شبکه RBF، آن را به گزینه‌ای مناسب برای مجموعه داده‌های کوچک تا متوسط با ویژگی‌های ورودی کم بعد تبدیل می‌کند. در مقابل، SVM‌ها با وجود پیچیدگی

محاسباتی بیشتر، در مسائل بزرگ مقیاس و با ابعاد بالا، در صورت بهینه‌سازی دقیق آبرمؤلفه‌ها، می‌توانند تعمیم‌دهی بهتری ارائه دهند. در نهایت، این یافته‌ها اهمیت توجه به ویژگی‌های داده و تنظیم مدل در انتخاب الگوریتم یادگیری مناسب را برجسته می‌کند. شبکه RBF به دلیل سادگی و دقت بالا در تقریب داده‌های هموار و کم‌نویز، به‌عنوان مدل برتر برای این وظیفه انتخاب شد. با این حال، در داده‌های پیچیده‌تر و پرنویز، بهینه‌سازی دقیق آبرمؤلفه‌های SVM می‌تواند عملکرد بهتری ارائه دهد.

۳-۲- استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری

برای محاسبه نشست سد دو تصویر راداری^۷ (SAR) که از مدارهای متفاوت گرفته شده‌اند، با استفاده از روش باز-ژئوکدینگ^۸ به گونه‌ای هم‌تراز می‌شوند که تصویر دوم (slave) با تصویر اول (master) تطابق پیدا کرده و یک مجموعه‌ی تک‌مرجع ایجاد شود. برای این کار از مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۹ خارجی مانند SRTM استفاده شد، تا اعوجاج‌های هندسی تصاویر اصلاح شوند. بخشی کوچک از مرکز تصویر برای محاسبه جابه‌جایی در راستای برد استفاده می‌شود و روش^{۱۰} ESD برای برآورد جابه‌جایی در راستای آزیموت به کار می‌رود. سپس تداخل‌سنجی انجام می‌شود تا جابه‌جایی‌های زمینی، هندسه برداشت و شرایط جوی را در نظر بگیرد. فاز تداخل‌سنجی شامل اجزایی مانند جابه‌جایی، توپوگرافی، سطح زمین مسطح، جو و خطای مدار است. خطوط سیاه در تصاویر با روش De burst حذف شدند تا پیوستگی داده‌ها حفظ شود [۳۵].

تصاویر SAR با پیکسل‌های مربعی نمایش داده می‌شوند و مقدار دامنه (amplitude) و فاز (phase) هر پیکسل برای ساخت تصویر دوبعدی مختلط (complex) استفاده می‌شود. پس از هم‌ترازی تصاویر، تصاویر مختلط SAR با یکدیگر ضرب شده و فاز اینترفروگرام با استفاده از معادله (۶) استخراج می‌گردد.

$$S = Be^{-j\phi} = Be^{-j\frac{4\pi}{\gamma}d} \quad (6)$$

در این زمینه، S سیگنال مختلط اندازه‌گیری‌شده‌ی تصویر SAR را نشان می‌دهد، B دامنه، $j\phi$ فاز ثبت‌شده، و d فاصله در جهت مورب بین سنسور و یک پخش‌کننده می‌باشد [۳۶]. فرض کنید S1 و S2 سیگنال‌های دریافتی از دو موقعیت ماهواره‌ای باشند. تصویر اول (S1) به‌عنوان تصویر مرجع یا قبل از رویداد در نظر گرفته می‌شود و تصویر دوم (S2) به‌عنوان تصویر فرعی یا پس از رویداد شناخته می‌شود. در نتیجه، S1 و S2 با استفاده از معادلات (۷) و (۸) بیان می‌شوند. پس از هم‌ترازی، این دو تصویر مختلط با هم ضرب می‌شوند و فاز اینترفروگرام با استفاده از معادله (۹) استخراج می‌شود.

$$S_1 = B_1 e^{-j\phi} = B_1 e^{-j\frac{4\pi}{\gamma}d_1}, \quad (7)$$

$$S_2 = B_2 e^{-j\phi} = B_2 e^{-j\frac{4\pi}{\gamma}d_2} \quad (8)$$

$$S_1 S_2 = B_1 B_2 e^{-j\phi} = B_1 B_2 e^{-j\frac{4\pi}{\gamma}(d_1 - d_2)} \quad (9)$$

برای ساخت یک اینترفروگرام معادله (۱۰)، حداقل دو تصویر نیاز است که اجزایی مانند، جابجایی، زمین مسطح، توپوگرافی، اثرات جوی، خطای مداری و نویز را شامل می‌شود [۳۷-۳۹].

$$\Psi = \Psi_{\text{disp}} + \Psi_{\text{flat}} + \Psi_{\text{topo}} + \Psi_{\text{atm}} + \Psi_{\text{orbit}} + \Psi_{\text{noise}} \quad (10)$$

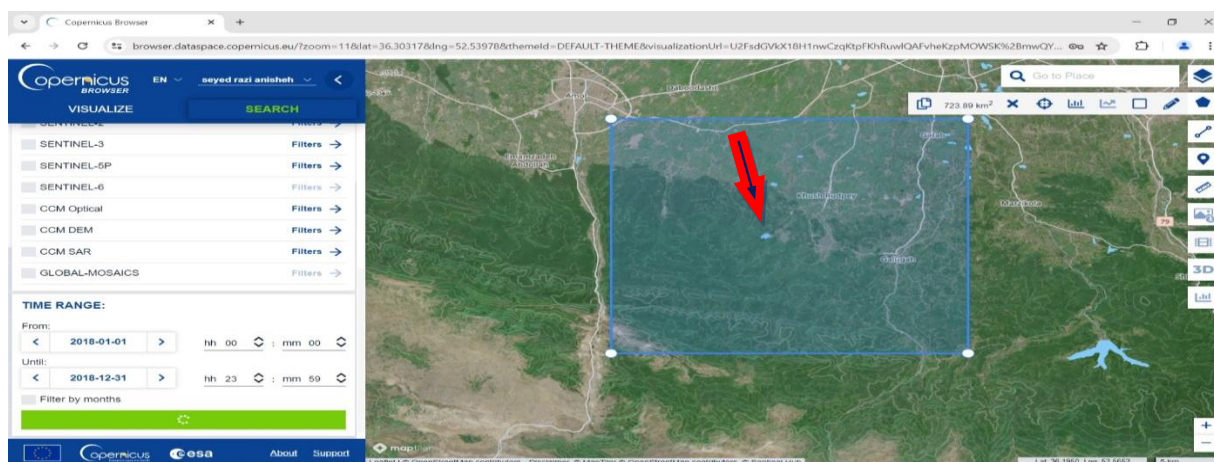
^۷ Synthetic Aperture Radar

^۸ Geocoding

^۹ Digital Elevation Model

^{۱۰} Enhanced spectral diversity

موندینی و همکاران [۴۰] برای مطالعه، نشست و عوامل تخریب مانند گسل‌های نزدیک محل ساخت سد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 از طریق سایت کوپرنیکوس آژانس فضایی اروپا^{۱۱} (ESA) خدمات و داده‌های ماهواره‌ای رایگان از طریق پایگاه داده‌های کوپرنیکوس^{۱۲} که برای همه کاربران در دسترس می‌باشد، استفاده نمودند. این سایت به کاربران اجازه می‌دهد تصاویر ماهواره‌ای را دریافت کرده و نرم‌افزارهای پیش‌پردازش در نسخه‌های مختلف را دانلود کنند. در این مطالعه، نسخه ۷/۰ نرم‌افزار SNAP برای پیش‌پردازش مورد استفاده قرار گرفته است. حالت IW Mode (Interferometric Wide Swath Mode) یکی از حالت‌های تصویربرداری ماهواره Sentinel-1 تحت برنامه کوپرنیکوس است. این حالت به‌طور خاص برای کاربردهایی نظیر نقشه‌برداری از تغییرات زمینی و تحلیل تداخل‌سنجی راداری^{۱۳} (InSAR) طراحی شده است. یکی از ویژگی‌های کلیدی این حالت، پوشش وسیع آن به میزان تقریباً ۲۵۰ کیلومتر در هر عبور ماهواره است. رزولوشن مکانی این حالت حدود ۵ × ۲۰ متر (در جهت‌های فاصله و آزیموت) است و از پلاریزاسیون‌های مختلفی مانند VV، VH، HH، HV پشتیبانی می‌کند که بسته به کاربرد قابل تنظیم هستند. از پلاریزاسیون VV برای محاسبه نشست سد و محدوده مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۸ تنظیمات دانلود تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 را نشان می‌دهد. سد خاکی شیاده که در سال ۱۹۹۹ در بابل، استان مازندران، احداث شده است، به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است. با کادر آبی شکل به ابعاد دلخواه ۲۶.۹ × ۲۶.۹ کیلومتر و مساحت کل ۷۲۴ کیلومترمربع که سد مورد مطالعه را شامل شود ترسیم می‌شود. تنظیمات پلاریزاسیون بر روی VV تنظیم شده که برای تحلیل نشست یا تورم در سد خاکی بسیار مناسب و دقیق است. شایان ذکر است که ماهواره Sentinel-1A در تاریخ ۳ آوریل ۲۰۱۴ و ماهواره Sentinel-1B در تاریخ ۲۵ آوریل ۲۰۱۶ پرتاب شده‌اند. بنابراین، اولین تصاویر ماهواره Sentinel-1 قابل دانلود مربوط به سال ۲۰۱۴ به بعد هستند.



شکل ۸: تنظیمات دانلود تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1

مشخصات تصاویر ماهواره‌ای تحلیل شده در این مطالعه در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۴ مشخصات تصاویر ماهواره‌ای

Temporal coverage	Mission	Product type	Acquisition mode	Pass direction	polarization
S1A-IW-SLC-2014-12-25	sentinel-1	SLC	IW	Ascending	VV
S1A-IW-SLC-2015-11-28	sentinel-1	SLC	IW	Ascending	VV
S1A-IW-SLC-2016-7-23	sentinel-1	SLC	IW	Ascending	VV
S1A-IW-SLC-2024-01-07	sentinel-1	SLC	IW	Ascending	VV

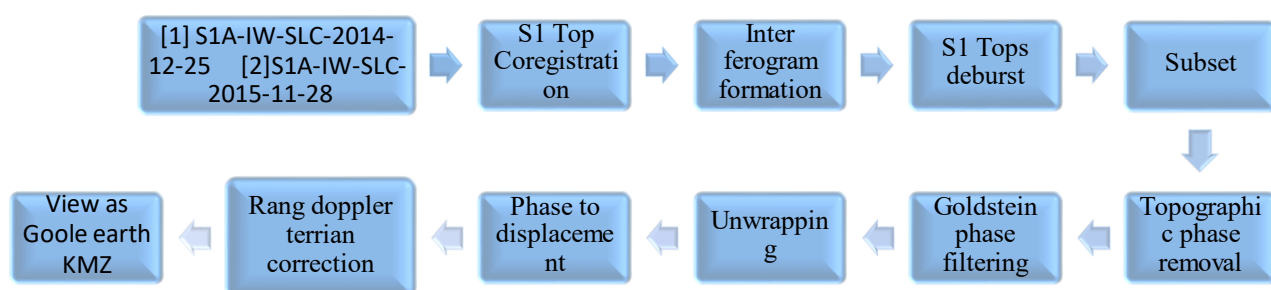
^{۱۱} European Space Agency

^{۱۲} Copernicus Open Access Hub

^{۱۳} Interferometric synthetic aperture radar

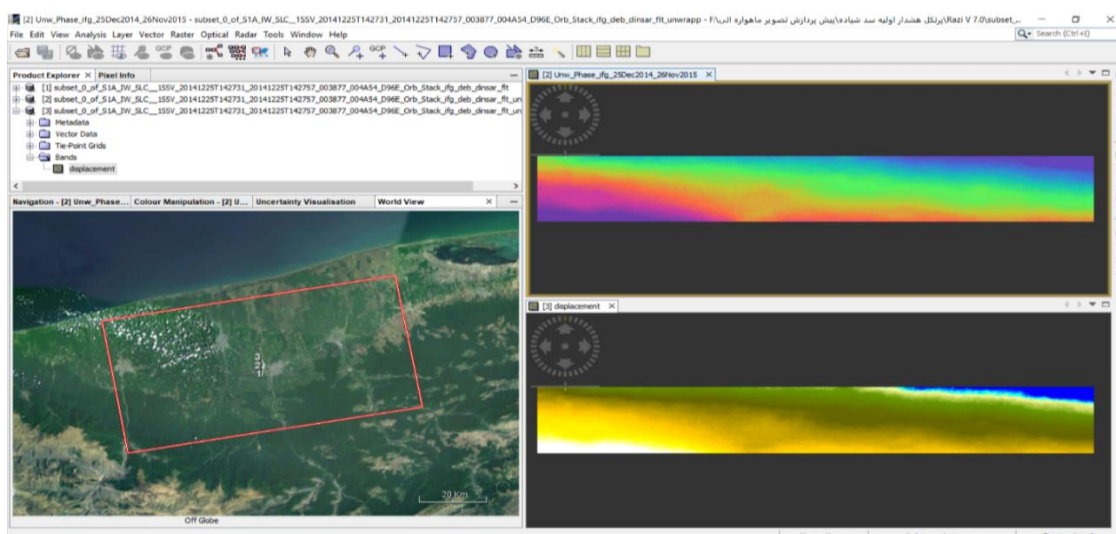
طبق مطالعات امتی [۴۱] سیستم Topsar-Split سه نوع تقسیم بندی (swath) وجود دارد IW1، IW2، IW3 زمانی که ماهواره در حالت Ascending (حرکت ماهواره از قطب شمال به قطب جنوب) تصویر ثبت می نماید، ترتیب پوشش ها در تصویر ماهواره ای IW1 در سمت چپ تصویر و IW2 در مرکز تصویر و IW3 در سمت راست تصویر قرار می گیرد. هر تصویر ماهواره ای از ۹ بخش افقی به نام burst تشکیل شده است. پایین ترین بخش افقی (burst 1) در پایین تصویر و بالاترین بخش (burst 9) در بالای تصویر قرار دارد. با آگاهی از موقعیت پروژه مورد مطالعه، ترتیب پوشش های IW و بخش های burst می توانند برای تسریع فرآیند تحلیل در نرم افزار SNAP تنظیم شوند. پلاریزاسیون VV به این معناست که رادار ارسالی و دریافتی از سوی ماهواره بصورت عمودی انجام می شود. در این مطالعه، پلاریزاسیون VV برای محاسبه نشست استفاده شده است.

پیش از آغاز پردازش، لازم است تصاویر از نظر (coherence) و Track بررسی شوند. پردازش داده های SAR مربوط به Sentinel-1 با استفاده از نرم افزار Sentinel Applications Platform (SNAP) نسخه ۷/۰ (ESA, 2014) انجام شد. در محیط SNAP، ابزار Toolbox برای انجام مراحل پردازش Sentinel-1 در شکل ۹ ارائه شده است.

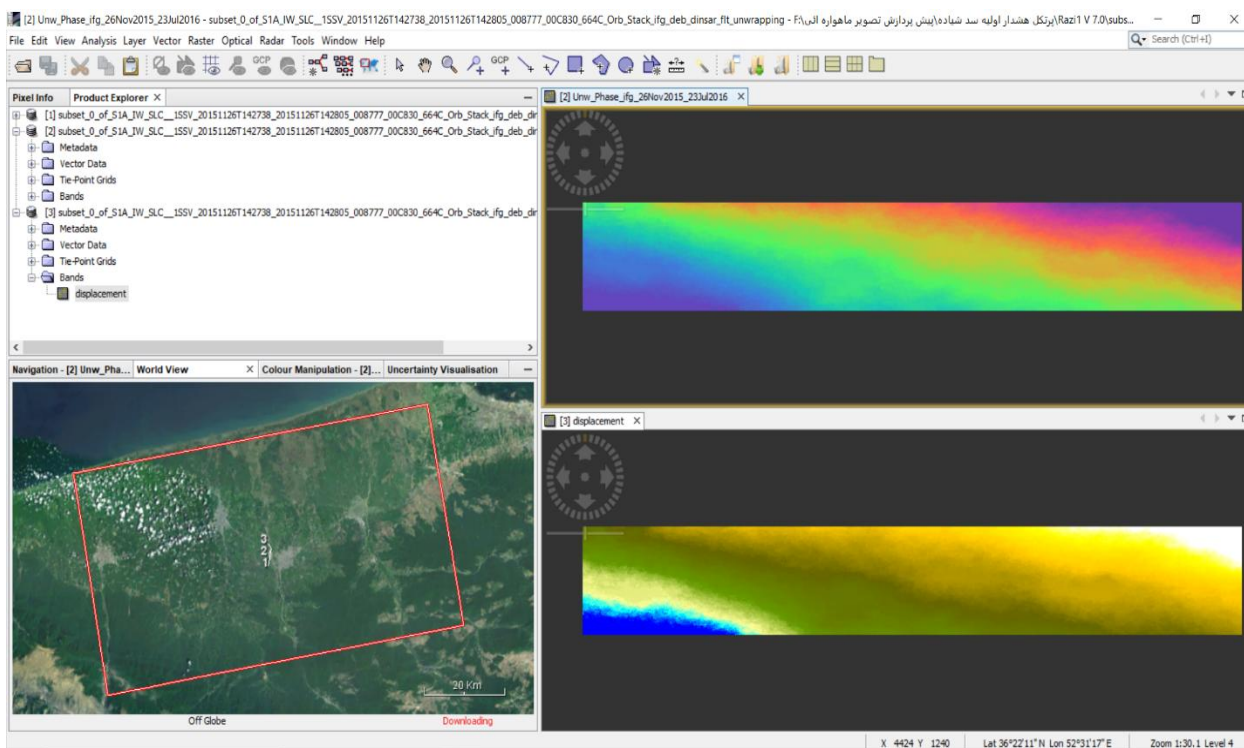


شکل ۹: مراحل پردازش گام به گام تصاویر ماهواره ای

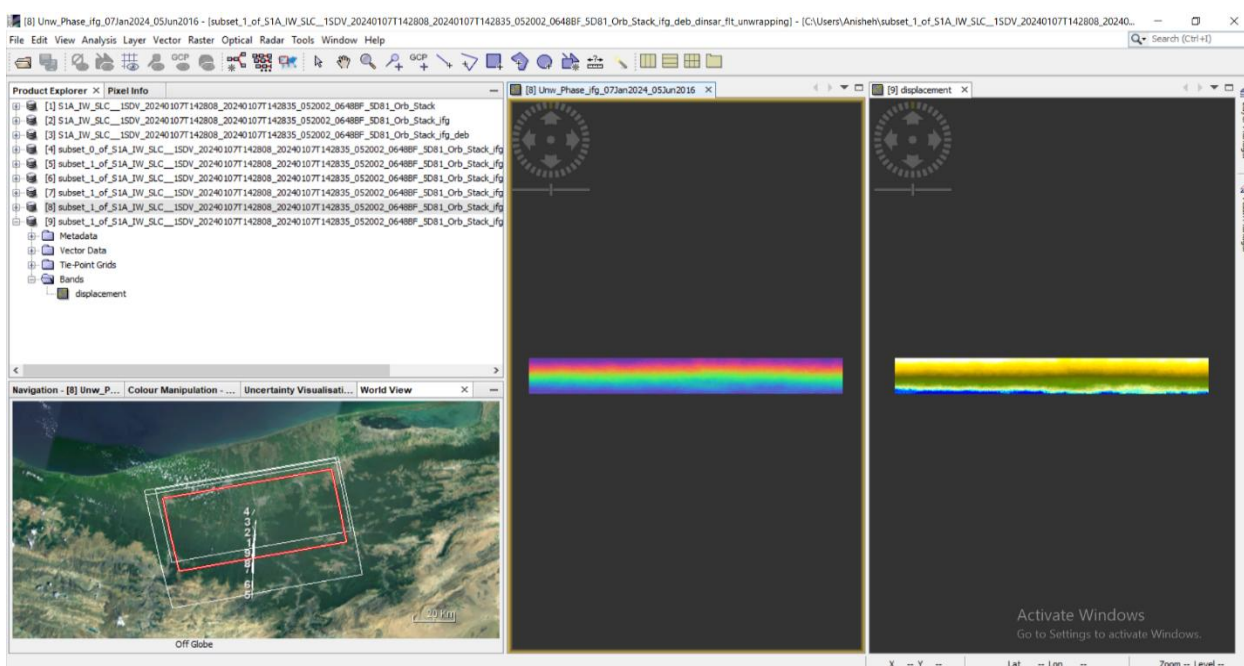
در پردازش با نرم افزار SNAP در مرحله Unwrapping، نتایج به صورت طیف رنگی نمایش داده می شوند. برای دستیابی به تغییر شکل عمودی یا نشست در تصاویر ماهواره ای، مرحله پردازش Phase to Displacement حائز اهمیت است. مقایسه روند تغییرات تصاویر مرحله پردازش Unwrapping با مرحله Phase to Displacement برای سال های مد نظر بصورت جداگانه در شکل های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده اند.



شکل ۱۰: تغییرات تصاویر مرحله پردازش Unwrapping با Phase to Displacement در سال های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵



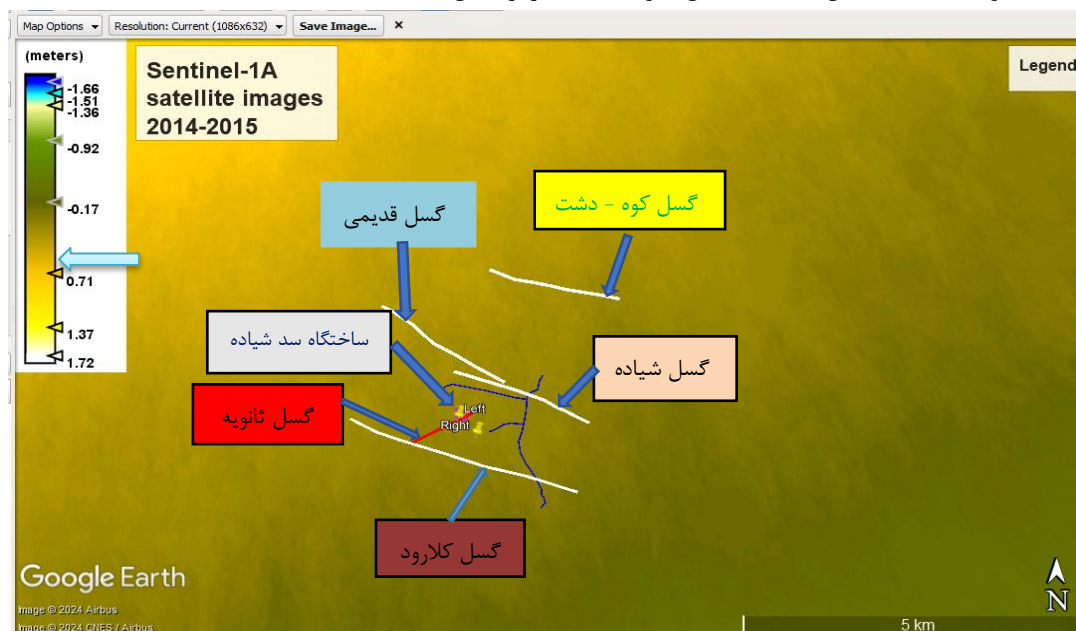
شکل ۱۱: تغییرات تصاویر مرحله پردازش Unwrapping با Phase to Displacement در سال های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶



شکل ۱۲: تغییرات تصاویر مرحله پردازش Unwrapping با Phase to Displacement در سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴

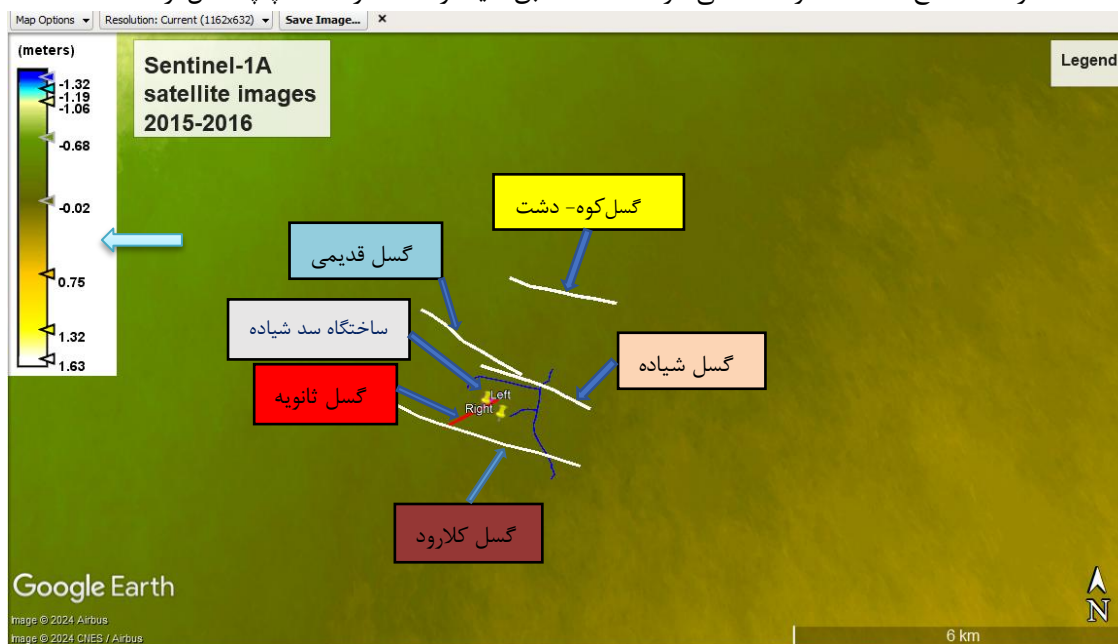
در شکل ۱۳، آخرین مرحله پردازش تصاویر ماهواره داندلود شده Sentinel-1A با عناوین S1A-IW-2014-12-2 و S1A-IW-2015-11-28 در نرم افزار SNAP بر مبنای تغییراتی که در سطح زمین ناشی از دو تصاویر ماهواره ائی اخذ گردید، بصورت نشست یا تغییر شکل عمودی (Vv displacement) ارائه شده است. نشست حاصل از برآیند اثر گسل ها، تغییرات تراز آب زیر زمینی، اثر جنبش زمین و دیگر عوامل ناشناخته در طبیعت، در نرم افزار Google Earth با مختصات utm در محدوده وسیعی از ساختگاه نمایش داده شده است.

نقطه در این شکل با رنگ مشخصی ارائه شده بطوریکه، هر نقطه با مختصات utm بیانگر مقدار نشست در آن نقطه می باشد. برای تعیین مقدار نشست نقاط مورد مطالعه، ابتدا رنگ نقاط مد نظر در نقشه را پیدا نموده و این رنگ را از طیف رنگی راهنما در سمت چپ شکل با واحد متریک نشان داده شده استخراج می گردد. نتایج پردازش در تصاویر ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ مقدار نشست در امتداد تاج سد به میزان ۰/۰۵ - متر (۵ سانتی متر نشست) مطابق طیف راهنما، در سمت چپ شکل بدست آمده است. گسل های کوه-دشت، گسل فعال شیاده، گسل قدیمی و کلارود با خطوط سفید مشخص شده اند. گسل ثانویه با خط قرمز نشان داده شده است.



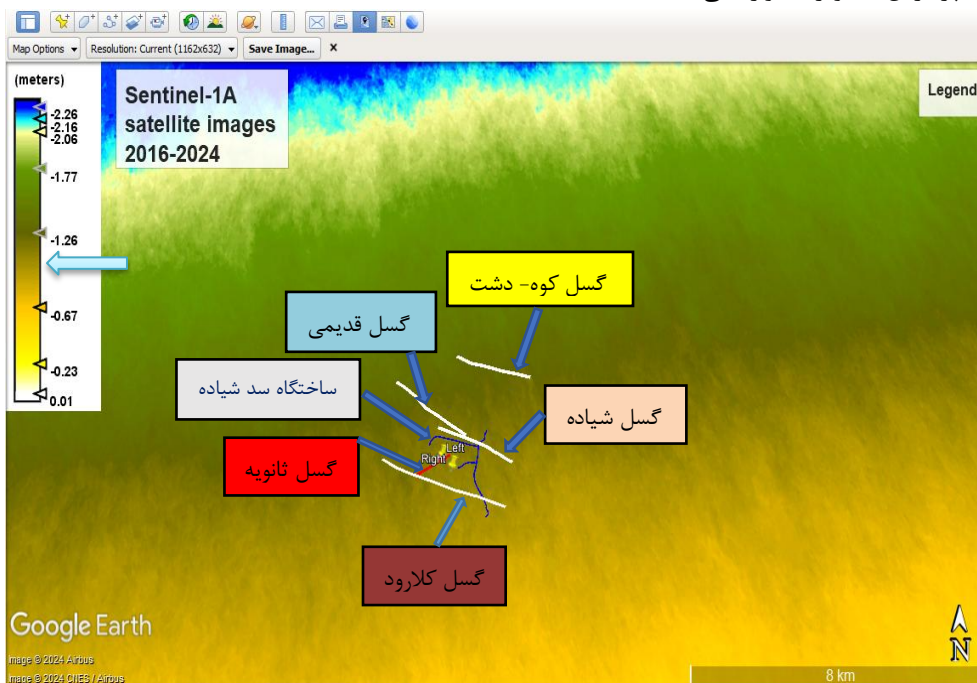
شکل ۱۳: نتایج نشست بصورت طیف رنگی مربوط به تصاویر ۲۰۱۴-۲۰۱۵

برای پردازش تصاویر ماهواره ای S1A-IW-SLC-2015-11-28 و S1A-IW-SLC-2016-07-23 در نرم افزار SNAP همانند مراحل پیشین دنبال شده است. شکل ۱۴ تغییرات نشست را به صورت یک طیف رنگی نشان می دهد که نتیجه پردازش در تصاویر سالهای ۲۰۱۵ با ۲۰۱۶ مقدار نشست در امتداد تاج ۰/۰۲ - متر (۲ سانتی متر نشست) مطابق طیف راهنما، در سمت چپ شکل ارائه شده است.



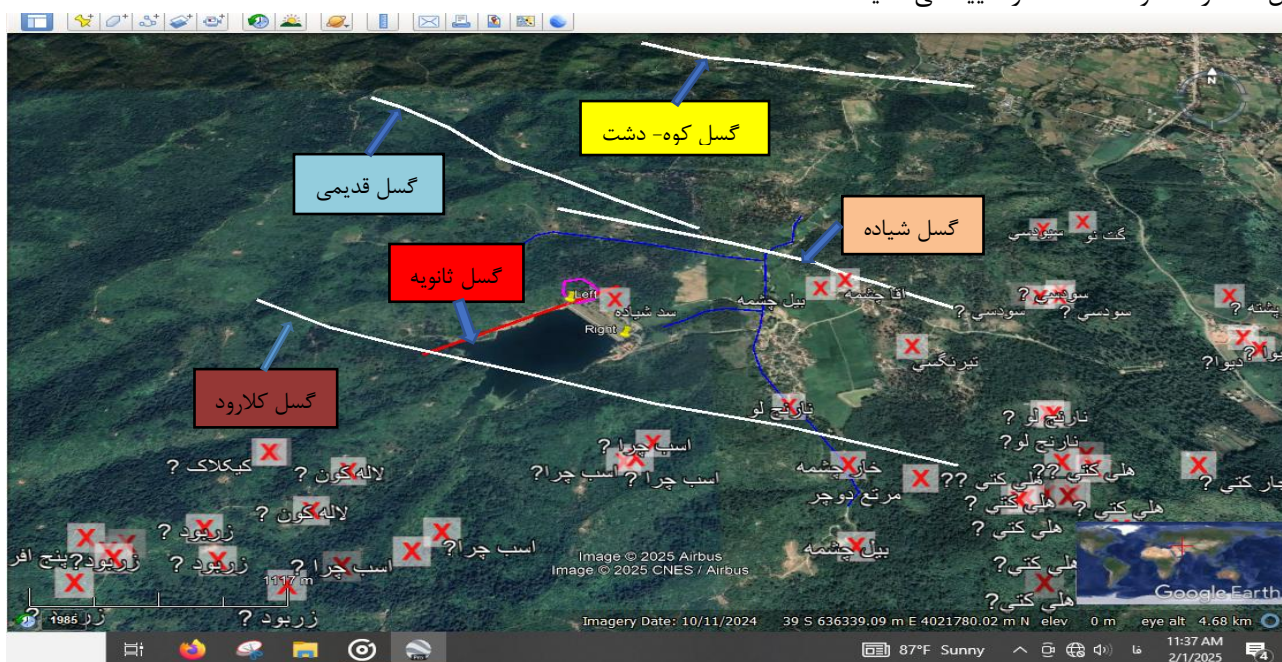
شکل ۱۴: نتایج نشست بصورت طیف رنگی مربوط به تصاویر ۲۰۱۵-۲۰۱۶

نتیجه پردازش تصاویر ماهواره‌ای S1A-IW-SLC-2024-01-07 و S1A-IW-SLC-2016-07-23 در نرم‌افزار SNAP در شکل ۱۵ نشست در امتداد تاج سد را با طیف رنگی در واحد متریک نشان می‌دهد که نتیجه پردازش تصاویر سالهای ۲۰۱۶ با ۲۰۲۴ مطابق طیف راهنمای در سمت چپ مقدار آن ۰.۸۰ - متر (۸۰ سانتی‌متر نشست) بدست آمده است. در نهایت کل نشست در امتداد تاج سد ۸۷ سانتی متر با استفاده از سه مرحله پردازش تصاویر ماهواره‌ای بدست آمده است.



شکل ۱۵: نتایج نشست بصورت طیف رنگی مربوط به تصاویر ۲۰۱۶-۲۰۲۴

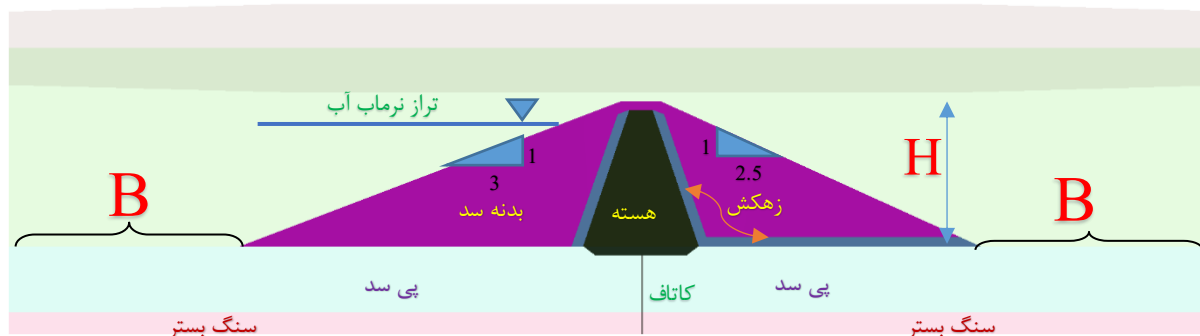
خوشرفتار و همکاران [۴۲] در مطالعه ارتباط گسل با چشمه کارستی در پراو بیستون کرمانشاه نشان داد که یکی از راههای شناسایی گسل وجود چشمه‌ها در محدوده مطالعه می‌باشد. جانمایی محل چشمه‌های اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای مازندران، وجود گسل‌ها شکل ۱۶ در محدوده ساختگاه را تایید می‌نماید.



شکل ۱۶: جانمایی محل چشمه های محدوده سد شیاده

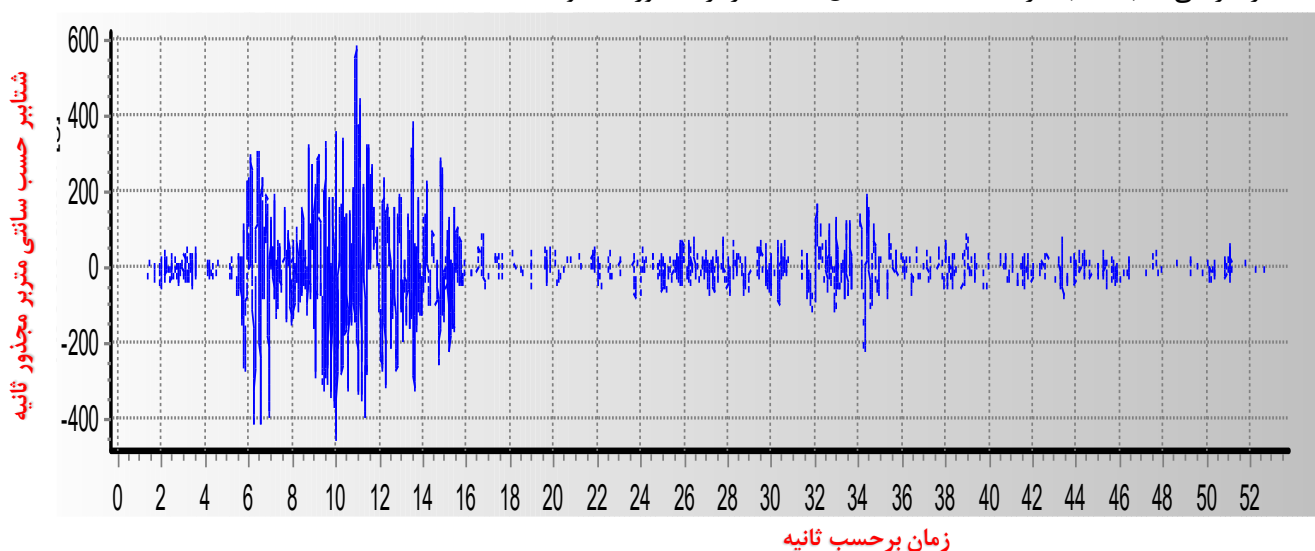
۳-۳- تحلیل های استاتیکی و دینامیکی سد خاکی با نرم افزار سه بعدی PLAXIS

این مطالعه شامل انجام تحلیل استاتیک و دینامیکی سه بعدی با استفاده از نرم افزار PLAXIS، با در نظر گرفتن، اثر اندرکنش پی و بدنه سد خاکی لحاظ شد. در شکل ۱۷، عرض مؤثر B برای مدل سازی سد خاکی نیاز است، تعیین شود. انیسه و همکاران [۴۳-۴۶] برای تعیین عرض مؤثر پی از روش بهینه سازی، الگوریتم های PSO^{۱۴}، بهینه سازی فاخته^{۱۵} و TWO^{۱۶} در تحلیل دویعدی با نرم افزار PLAXIS استفاده نمودند. در هر سه روش، عرض بهینه مؤثر پی بر حسب ارتفاع سد، $B = 1.81H$ به یک نتیجه واحد رسیدند. بنابراین، در مدل سازی سه بعدی، عرض بهینه مؤثر بر اساس ارتفاع سد شیاده در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۷: عرض مؤثر پی در مدل سه بعدی سد خاکی

یکی از زلزله هایی که اثرات تخریبی قابل توجهی در منطقه البرز داشت، زلزله منجیل بود که در ایستگاه آب بر سال ۱۹۹۰ رخ داد. شتاب افقی حداکثر با واحد متر بر مجذورثانیه ($PGA=0.51g$)، حداکثر سرعت افقی ($PGV=0.43 m/s$)، حداکثر تغییر مکان ($PGD=0.18 m$) بزرگای این زلزله $M_b=7.3$ و $M_s=7.7$ بود. در شکل ۱۸ مربوط به تاریخچه شتاب نرمالایز شده زلزله منجیل با نرم افزار SEISMOSIGNAL 2022 محور قائم شتاب (g) بر حسب سانتی متر بر مجذور ثانیه و محور افقی بر حسب ثانیه ارائه شده است. تراز حداکثر طراحی^{۱۷} (MDL) در سد شیاده، شتاب $0.28 g$ متر بر مجذورثانیه بوده است.



شکل ۱۸: شتاب زلزله منجیل با نرم افزار SEISMOSIGNAL 2022

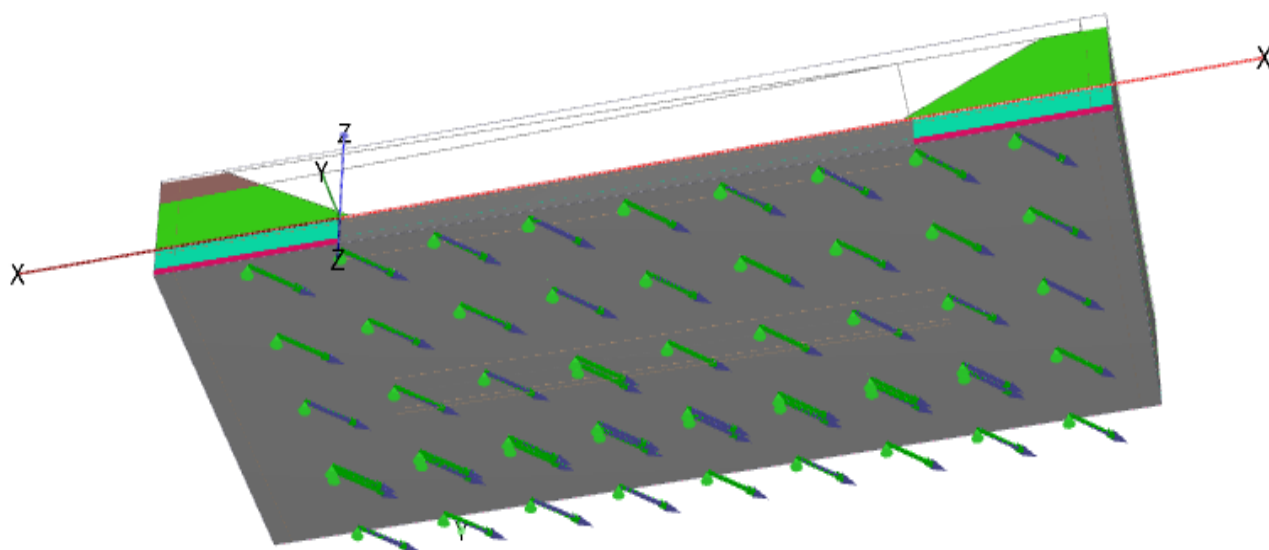
^{۱۴} Particle Swarm Optimization

^{۱۵} Cuckoo

^{۱۶} Invasive Weed Optimization

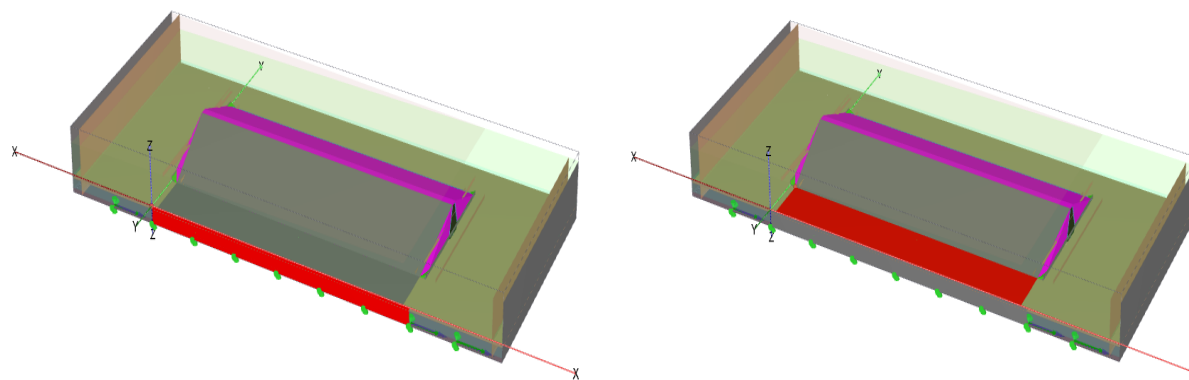
^{۱۷} Maximum design level

این رکورد در صفحه XY در دو جهت X و Y به پی سد خاکی به مدت ۵۳/۵۱ ثانیه، برای بررسی رفتار دینامیکی مدل سه بعدی PLAXIS مطابق شکل ۱۹ اعمال شده است. در طراحی سد خاکی شیاده بر مبنای دوره بهره برداری ۷۵ ساله با زلزله DBE مقدار $MW=7.1$ در نظر گرفته شده است. بر اساس تحلیل خطر در محدوده ساختگاه شیاده، مقدار شتاب افقی حداکثر با واحد متر بر مجذورثانیه ($PGA=0.37g$)، حداکثر سرعت افقی ($PGV=0.34 m/s$)، حداکثر تغییر مکان ($PGD=0.16 m$) است که در مقایسه با زلزله منجیل بسیار کمتر هستند یعنی سد خاکی زلزله با بزرگای کمتر از زلزله منجیل را تجربه نموده و طراحی انجام شده در جهت اطمینان بوده است.



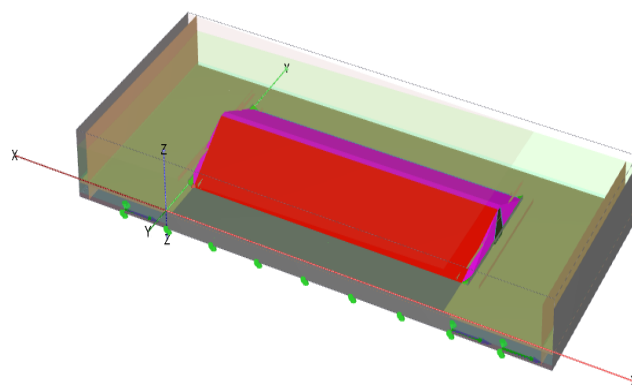
شکل ۱۹: اعمال رکورد زلزله در پی سد

از آنجائیکه سازه بتونی در مجاورت خاک با کاهش مقاومت ۰.۶۷ مواجه شده بنابراین لازمست تمام سطح تماس دیوار حائل بتونی با خاک و در لایه نفوذ ناپذیر Cut Off را Interfaces تعریف نمائیم. برای تکیه گاه طرفین نیاز است Interfaces لحاظ گردد. مختصات نقاط شرایط مرزی به رنگ قرمز در تراز آب زیر زمینی در بالادست در صفحه XZ $\{(0, 0, 0), (0, 0, 20), (0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0)\}$ و در تراز رودخانه در صفحه XY $\{(0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0)\}$ و در تراز حداکثر مخزن در شیب بالادست $\{(0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0), (0, 0, 0)\}$ بصورت جداگانه در شکل ۲۰ تعریف می شود.



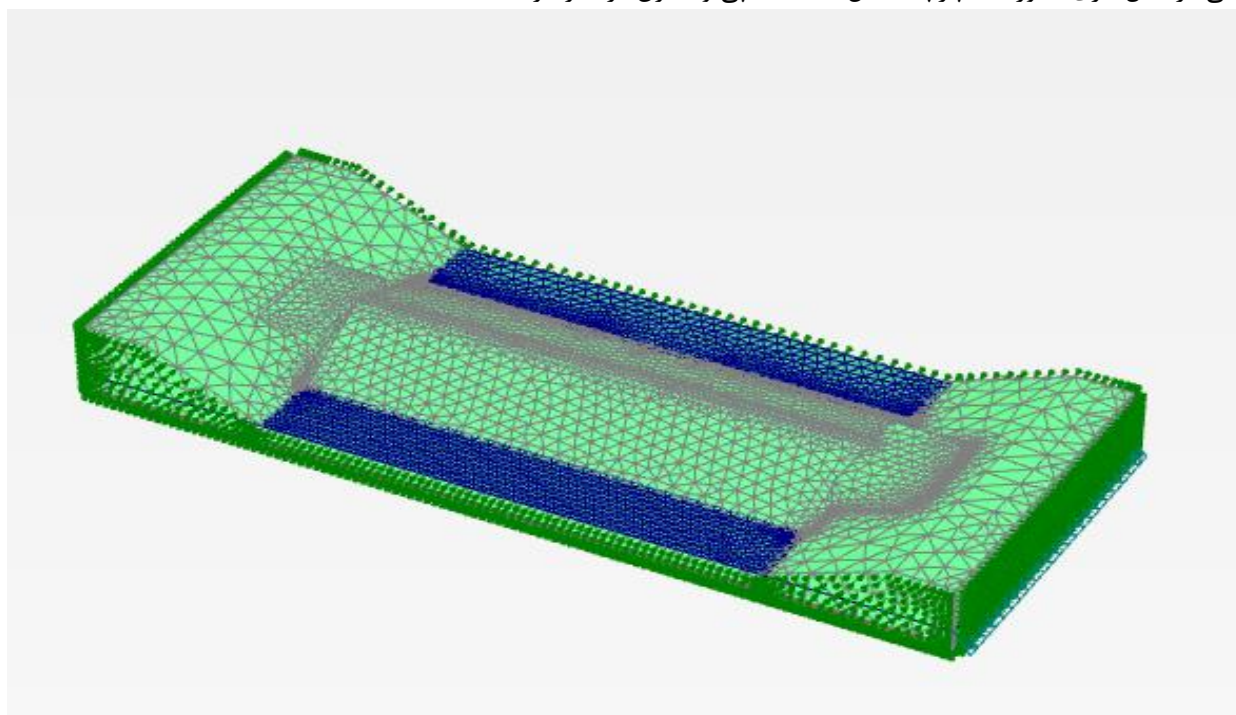
a) تراز آب زیر زمینی در بالادست صفحه XZ

b) تراز آب در تراز رودخانه صفحه XY



تراز حداکثر مخزن در شیب بالادست (c)
 شکل ۲۰: مختصات نقاط شرایط مرزی

به منظور بررسی اثر اندرکنش پی و بدنه سد، مخزن و تکیه گاه های طرفین، بصورت سه بعدی مطابق شکل ۲۱ با تنظیمات المان را Fine در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که نرم افزار PLAXIS به عنوان یک ابزار قابل اعتماد و مناسب برای حل مسائل تحلیل استاتیکی و دینامیکی در مدل سازی بصورت یکپارچه شامل بدنه سد، پی و مخزن در نظر گرفته شده است.



شکل ۲۱: اجزای بدنه سد خاکی، تکیه گاه ها و عرض موثر

جدول ۵ مشخصات ژئوتکنیکی اجزای سد خاکی را ارائه می دهد که توسط مشاور ژئوتکنیک تهیه و این مشخصات بعنوان پارامترهای اجزای مختلف سد در مدل سه بعدی PLAXIS استفاده شدند. این مشخصات معمولاً شامل ویژگی های پارامتر مقاومتی خاک و مدل رفتاری لایه های مختلف موجود، نوع مصالح و بخش های مختلف سازه ای سد مانند هسته، فیلتر، پوسته، کاتاف و سایر اجزا هستند [۴۷].

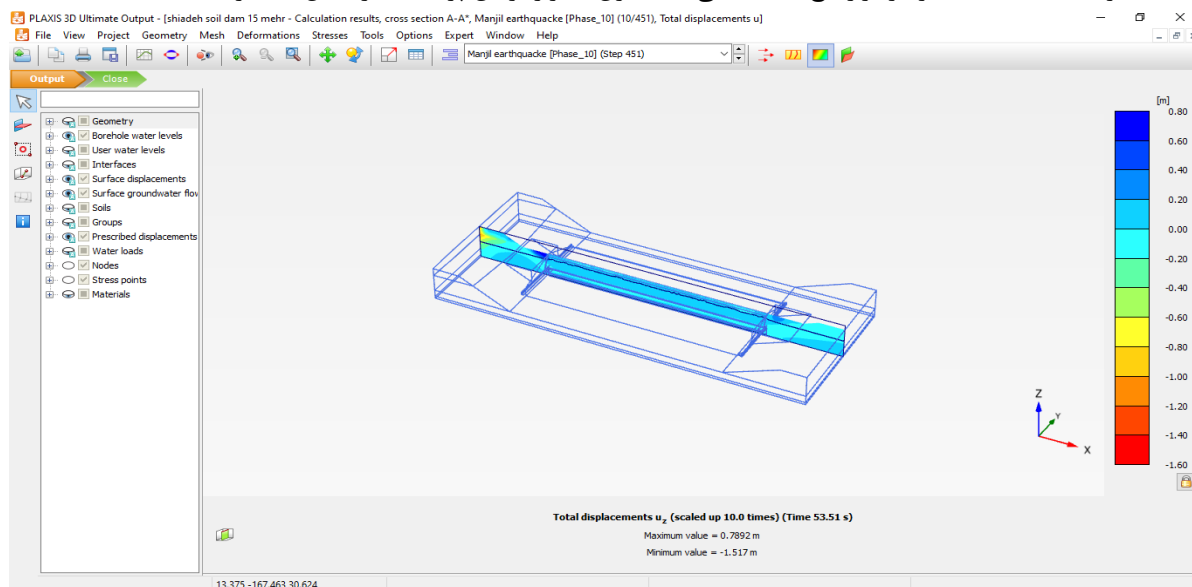
جدول ۵ مشخصات ژئوتکنیکی اجزای سد خاکی شیاده

واحد	کاتاف	لایه نفوذناپذیر	گراویل بستر رودخانه	تکیه گاه راست	تکیه گاه چپ	پوسته	فیلتر	هسته	نوع	پارامتر
-	الاستیک	بدون نفوذ	سخت	سخت	نرم	سخت	سخت	نرم	مدل	مدل رفتاری
-	زهکشی نشده	زهکشی نشده	زهکشی شده	زهکشی شده	زهکشی نشده	زهکشی شده	زهکشی شده	زهکشی نشده	-	نوع زهکشی
KN/m ³	25	22	21.2	21	17	21.8	18	18.8	Y _{unsat}	وزن مخصوص اشباع نشده
KN/m ³	25	22	22	21	19	22.2	20	19.8	Y _{sat}	وزن مخصوص اشباع
KN/m ²	23.5e6	5000	54E3	60E3	-	60E3	60E3	-	E	مدول یانگ
KN/m ²	10.22e6	2174	-	-	-	-	-	-	G	مدول برشی
-	0.15	0.15	0.2	0.2	0.15	0.2	0.2	0.2	v	نسبت پواسون
KN/m ²	-	150	2	10	16	2	2	50	C	چسبندگی
-	-	25	34	24	17	35	30	19	∅	زاویه اصطکاک داخلی
-	-	0	4	0	0	5	0	0	ψ	زاویه اتساع
KN/m ²	-	-	162E3	180E3	-	180E3	180E3	-	E _{ur}	مدول یانگ افزایشی
m/day	-	1E-6	0.864	0.0864	0.864E-3	0.864	0.864	0.864E-3	K _x , K _y	ضریب نفوذپذیری
-	-	-	-	-	0.106	-	-	0.106	-	λ*
-	-	-	-	-	0.055	-	-	0.055	-	K*

نشست سد خاکی شیاده با استفاده از نرم افزار سه بعدی PLAXIS در ۱۳ فاز به شرح زیر مورد ارزیابی قرار گرفت:

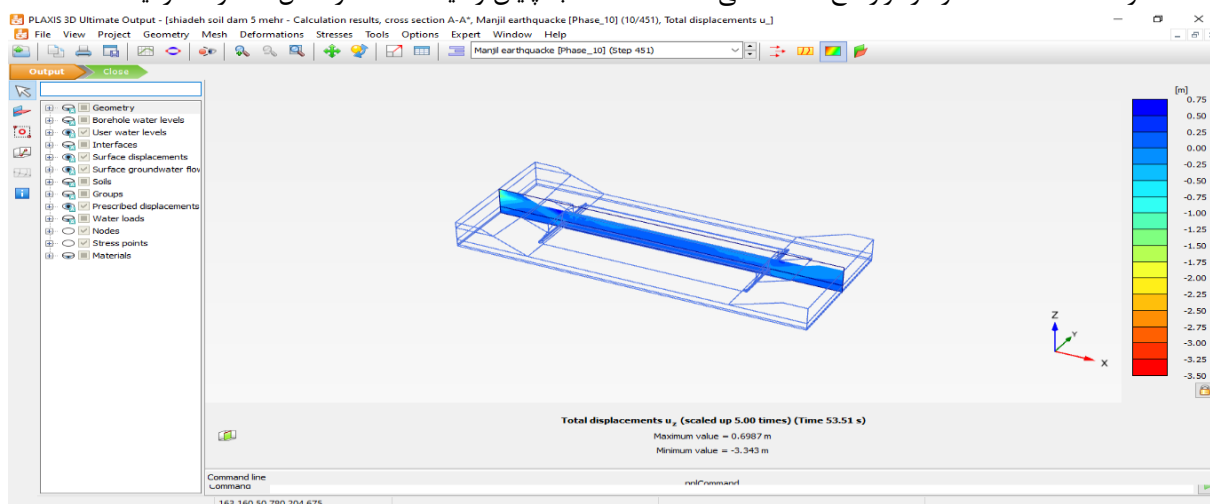
- (۱) فاز صفرم: وضعیت موجود بستر رودخانه و دو طرف تکیه گاه سد
- (۲) فاز ۱: حفر ترانشه، ساخت دیوار حائل و اجرای کاتاف تا لایه نفوذناپذیر. (۳) فاز ۲: ساخت سد خاکی.
- (۴) فاز ۳: پر شدن مخزن تا تراز حداکثر (تراز نرمال).
- (۵) فاز ۴: ضریب ایمنی برای مخزن پر.
- (۶) فاز ۵: تخلیه سریع مخزن.
- (۷) فاز ۶: ضریب ایمنی برای تخلیه سریع مخزن.
- (۸) فاز ۷: تخلیه کند مخزن.
- (۹) فاز ۸: ضریب ایمنی برای تخلیه کند مخزن.
- (۱۰) فاز ۹: حداقل تراز آب در مخزن.
- (۱۱) فاز ۱۰: ضریب ایمنی برای حداقل تراز آب در مخزن.
- (۱۲) فاز ۱۱: اعمال زلزله به سد خاکی پس از اتمام ساخت.
- (۱۳) فاز ۱۲: اعمال زلزله به سد خاکی با مخزن پر تا تراز نرمال.

نتایج نشست، یا حداکثر تغییر شکل عمودی تحت بارگذاری دینامیکی در طول تاج سد، در دو حالت مورد بررسی قرا گرفت:
الف) حداکثر نشست ۰/۷۹۸ متر در تراز تاج سد، حالتی که مخزن تا تراز نرمال پر شده، در شکل ۲۲ ارائه شده است.



شکل ۲۲: نشست در امتداد تاج سد در حالت مخزن پر

ب) حداکثر نشست ۰/۶۹۸ متر در تراز تاج سد، حالتی که ساخت سد به پایان رسیده است، در شکل ۲۳ ارائه گردید.



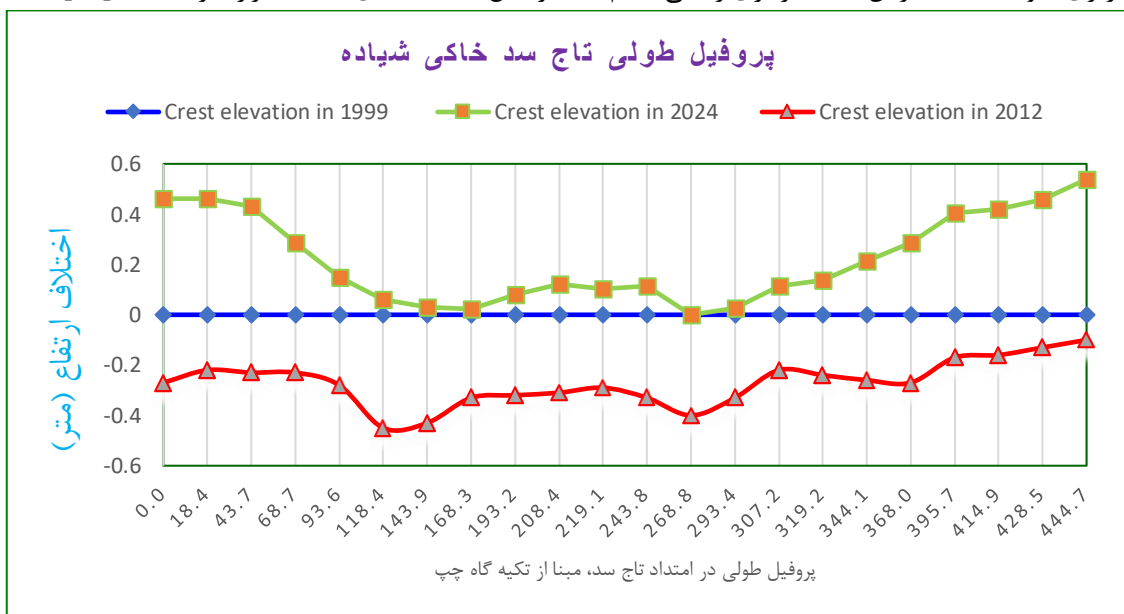
شکل ۲۳: نشست در امتداد تاج سد در حالت پس از پایان ساخت

با انجام فاز ۱۳ در تحلیل سه بعدی سد خاکی در شرایط مختلف آبیگری امکان ارائه همه نتایج خروجی پلکسیس وجود ندارد از آنجائیکه سیستم بدنه، پی و تکیه گاه بصورت یکپارچه مدل شده است در تحلیل ۱۳ فاز، مدل سه بعدی PLAXIS با ضریب اطمینان در محدوده بین ۱ تا ۱/۱۵ قرار دارد، بطوریکه با نشریه راهنمای تحلیل و طراحی لرزه‌های سدهای خاکی و سنگریز نشریه شماره ۶۲۴ نیز مطابقت دارد. [۴۸].

۴-۳- نقشه برداری زمینی از نقاط میکروژئودزی شیب پایین دست و تاج سد

آبیگری اولیه سد خاکی شیاده در سال ۱۹۹۹ انجام شد. در حالیکه، امکان محاسبه نشست سد از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۳ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای وجود نداشت. با این وجود، نقشه برداری زمینی که در سال ۲۰۱۲ در امتداد تاج سد، مطابق شکل ۲۴ انجام شد، نشست غیریکنواخت در امتداد تاج را نشان می دهد.

این نشست می تواند ناشی از تأثیر گسل ثانویه در تکیه گاه چپ باشد. این گسل باعث لغزش در پایین دست تکیه گاه چپ و لغزش در پنجه سد نیز شده است. شایان ذکر است که در سال های اخیر، شرکت آب منطقه ای مازندران با استفاده از مصالح درشت دانه، برای تسطیح تاج اقدام به شن ریزی نموده است. بنابراین، نقشه برداری زمینی انجام شده در سال ۲۰۲۴ مبنای مقایسه قرار نگرفته است [۴۹].



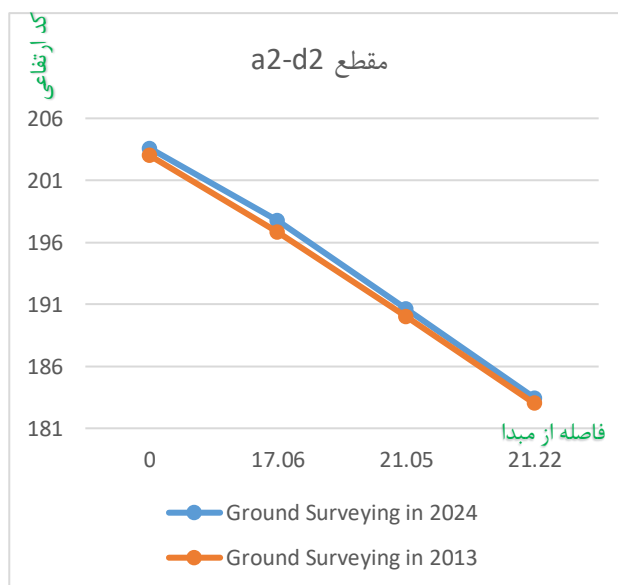
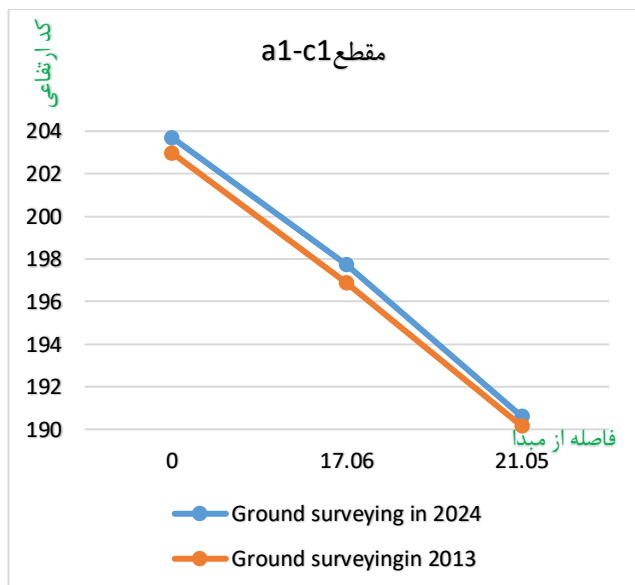
شکل ۲۴: مقایسه بررسی های نقشه برداری زمینی سالهای ۱۹۹۹، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۴

شکل ۲۵: جانمایی نقاط میکروژئودزی منصوبه در امتداد هفت محور در شیب پایین دست سد خاکی شیاده را نشان می دهد.



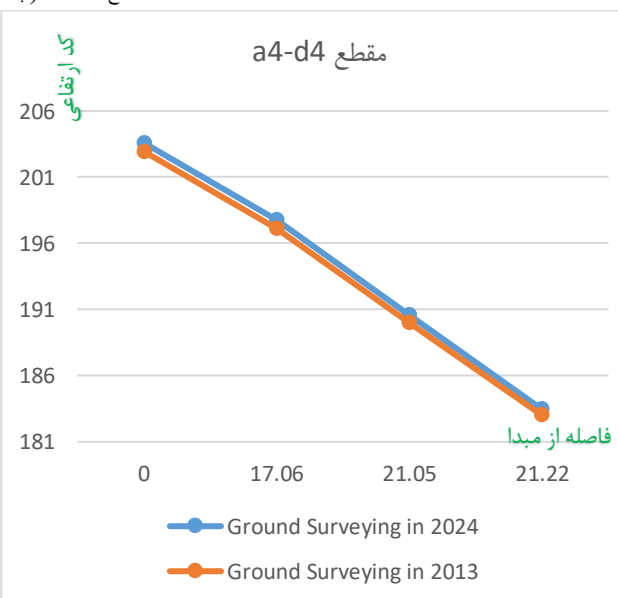
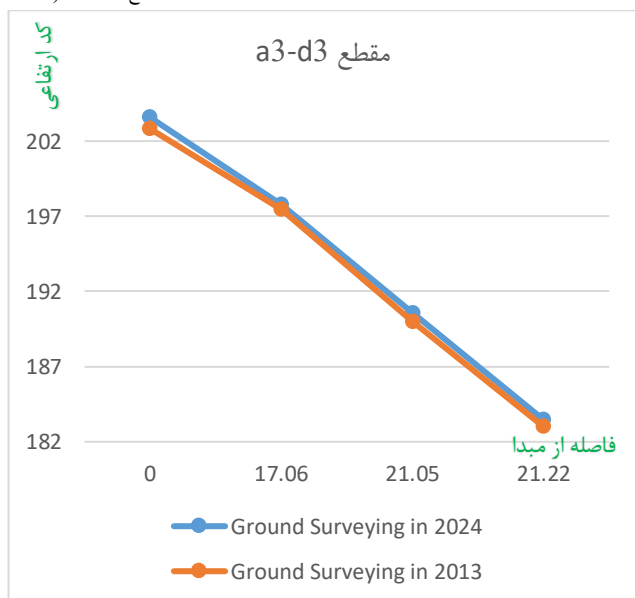
شکل ۲۵: پلان جانمایی نقاط میکروژئودزی در شیب پایین دست سد خاکی شیاده

شکل ۲۶ عملیات نقشه برداری زمینی از شیب پایین دست سد برای مقایسه وضعیت کد ارتفاعی، نقاط میکروژئودزی در سالهای ۲۰۱۳ و ۲۰۲۴ صورت گرفته است را نشان می دهد. در هفت مقطع ترسیم شده، محور افقی فاصله نقاط میکروژئودزی از یکدیگر و محور قائم رقوم یا کد ارتفاعی نقاط میکروژئودزی را نشان می دهد. نتایج نقشه برداری زمینی مقدار تورم یا بالازدگی در همه نقاط میکروژئودزی شیب پائین دست سد متغیر بوده است. تورم حداقل از ۲۰ سانتی متر تا ۴۰ سانتی متر بدست آمده است.



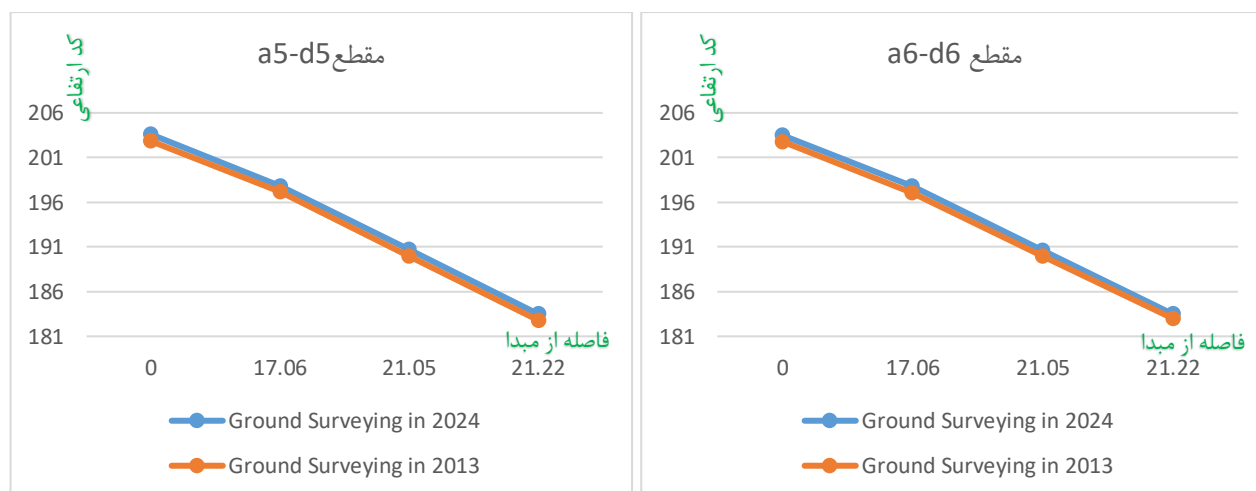
مقطع a1-c1 الف)

مقطع a3-d3 ب)



مقطع a2-d2 ج)

مقطع a4-d4 د)



مقطع a5-d5 (ر)

مقطع a6-d6 (ز)

شکل ۲۶: نتایج نقشه برداری در دو بازه زمانی ۲۰۱۳ و ۲۰۲۴ در همه نقاط میکروژئودزی

۴- پروتکل هشدار اولیه

پروتکل هشدار اولیه شامل چندین مرحله است. در مرحله مشاهده و پیمایش صحرایی، شیب‌های آسیب‌پذیر شناسایی و لیست‌بندی شده و اثرات عوامل تخریب تعیین می‌شود. دقت در بازدید و پیمایش صحرایی برای یافتن نشانه‌های ساختاری و هیدرولیکی در خرابی سد خیلی حائز اهمیت و نقش بسزائی دارد. در نشانه ساختاری، نشست غیر عادی تاج، مشاهده شکاف یا ترک در بدنه سد، خروج مواد ریز دانه از پاشنه سد (Piping)، شستگی یا تخریب پی سد را شامل می‌شود. نشانه‌های هیدرولیکی شامل الف) افزایش ناگهانی دبی نشت از بدنه یا پی سد. ب) کدر شدن آب خروجی در زهکش‌ها که نشانه‌هایی از فرسایش داخلی است. ج) نوسانات غیرمعمول در فشار آب‌های زیرزمینی اطراف سد.

بنابراین در مرحله مشاهدات، عوامل تخریب شناسائی شده تا در اقدام پیشگیرانه نسبت به برطرف نمودن نقص سازه ای یا غیر سازه ائی با حداقل هزینه در کوتاهترین زمان ممکن اقدام شود. در مرحله برنامه‌ریزی، روش‌های پایش موجود شناسایی شده و مدل‌های پیش‌بینی‌دهی اولیه طراحی می‌شوند. در مرحله تصمیم‌گیری، برآورد هزینه اقتصادی بهترین روش پیشنهادی صورت می‌گیرد. در نهایت، در مرحله اقدام، شیب‌های بحرانی اولویت‌بندی شده در سد، مطابق برنامه‌های عملیاتی اجرا می‌شوند.

هدف از این چارچوب، بهبود درک شیب‌های آسیب‌پذیر سدهای خاکی، ایجاد مدل‌های مؤثر پایش و پیش‌بینی، اتخاذ تصمیمات آگاهانه و اجرای تدابیری برای کاهش ریسک‌ها و افزایش ایمنی است. پروتکل هشدار اولیه پیشنهادی بر اساس شرایط خاص سد خاکی شیاده در استان مازندران انجام شده است. این رویکرد می‌تواند برای هر منطقه با هر نوع سد خاکی یا بتونی قابل اجرا باشد.

برای دستیابی به پروتکل هشدار اولیه، سیستم هشدار و اقدامات پاسخ سریع شامل:

- ۱) بررسی وضعیت هشدار: با استفاده از ابزار پایش مثل پیزومتر، سنسور لرزه ای، زهکش‌ها.
- ۲) بررسی اقدام اصلاحی: تزریق دوغاب یا اقدام بهسازی، کاهش تراز آب مخزن.
- ۳) مدیریت بحران: فعال سازی آژیر، تخلیه مناطق مسکونی، هماهنگی با نیروی امدادی.
- ۴) اعلام سطح هشدار با واکنش متناسب: رنگ سبز حالت عادی، رنگ زرد احتیاط و آماده باش، رنگ نارنجی حالت هشدار- رنگ قرمز حالت بحرانی و تخلیه ساکنین پائین دست بکارگیری شود.

بعد از تعیین وضعیت هشدار، اصلاحی، مدیریت بحران و اعلام سطح هشدار نیاز به اجرای پرتکل توسط نهادهای دولتی می باشد که لازمست به طرح پرتکل اعلام شده اعتماد داشته باشند و از هر گونه شک و تردید پرهیز نمایند. با اجرای یک پروتکل هشدار اولیه قوی و موثر، می توان خطرات احتمالی برای زیرساخت ها را شناسایی نموده و از آن جلوگیری کرد تا ایمنی و رفاه عمومی برای مردم تضمین شود. بر اساس

نتایج تحلیل نوبهار (۲۰۲۴)، برنامه مرحله اجراء پیشگیری جزء اصلی یک پرتکل EWP و مشاهدات، برنامه ریزی، تصمیم گیری و اقدام، پیشینیان کلیدی پرتکل پیشنهادی هستند.

۵- نتیجه گیری و جمع بندی

موفقیت یک پروتکل هشدار اولیه نیازمند، همکاری میان ذینفعان مختلف، از جمله مهندسان، محققان و نهادهای دولتی است. با اجرای یک پروتکل هشدار اولیه قوی و مؤثر، می توان ریسک های بالقوه برای زیرساخت ها را شناسایی و کاهش داد و ایمنی و رفاه عمومی را تضمین کرد. فراگیر شدن پروتکل هشدار اولیه برای پروژه های با اهمیت، می تواند مزایای زیادی داشته باشد: شناسایی به موقع خطرات بالقوه، فراهم آوردن زمان کافی برای اتخاذ اقدامات اصلاحی جهت کاهش اثرات ریسک ها، کاهش احتمال آسیب به زیرساخت ها، تضمین ایمنی عمومی از طریق فراهم آوردن زمان کافی برای تخلیه یا سایر اقدامات ایمنی برای ساکنین، کاهش ریسک اختلالات در خدمات و زنجیره های تأمین حیاتی، تضمین عملکرد خدمات اضطراری، برنامه ریزی جامع برای ایجاد اعتماد عمومی با ارائه تعهد به ایمنی را دارا خواهد بود.

۱ - سد خاکی شیاده در سال ۱۹۹۹ احداث و برای اولین بار تا تراز نرمال آبیگری شد و در سال ۲۰۱۳ ابزار دقیق منصوبه از کار افتادند، پیش بینی نشست با ۵۳۰ تعداد داده ثبت شده توسط الگوریتم توانمند RBF صورت گرفت. بنابراین، نه تنها محدودیتی برای پیش بینی نشست با الگوریتم وجود نداشته بلکه با برنامه نویسی در نرم افزار متلب با دقت بالائی صورت گرفته است.

۲- با پیش پردازش تصاویر ماهواره ای با استفاده از نرم افزار SNAP، نشست بین سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ معادل ۸۷ سانتی متر برای تاج سد شیاده محاسبه شد که نسبت به سایر روشها مقدار نشست بیشتری، بدست آمد. و این امر اثر گسل ثانویه را نشان می دهد که موجب لغزش های پائین دست و پنجه سد شده است. استفاده از تصاویر ماهواره ای برآورد نشست وسیعی از محدوده ساختگاه را ارائه نموده است

۳- تحلیل سه بعدی نرم افزار PLAXIS، با در نظر گرفتن تمامی فازهای مختلف در شرایط بارگذاری استاتیک و دینامیکی با ضریب ایمنی مناسب، نشست کل معادل ۷۸.۰۹ سانتی متر را ارائه نموده است که با نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره ای تطابق بسیار خوبی دارد. اختلاف نشست تصاویر ماهواره ای با تحلیل سه بعدی PLAXIS را میتوان به وجود یک گسل ثانویه در تکیه گاه سمت چپ سد نسبت داد. پس از وقوع لغزش در تکیه گاه چپ و لغزش سطحی در پنجه، شرکت آب منطقه ای مازندران بلافاصله اقدام به تثبیت و ترمیم بخش های آسیب دیده نموده است. در حال حاضر لغزشی در محدوده سد مشاهده یا گزارش نشده است، اما بدلیل قرارگیری ساختگاه سد شیاده در مجاورت گسل های موجود و گسل ثانویه امکان لغزش در آینده وجود دارد، بنابراین وضعیت سد شیاده در سطح هشدار ۲ (احتیاط) قرار دارد. بعبارت دیگر نیاز به پایش مستمر روش غیر سازه ای (تصاویر ماهواره ای) و انجام نقشه برداری زمینی در امتداد تاج و نقاط میکروژئودزی می باشد.

۴- مقایسه نشست در امتداد تاج سد از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۲ که در فاصله ۱۱۸.۴ متری از تکیه گاه چپ اندازه گیری شده، نشان دهنده بیشترین نشست ثبت شده در این دوره است. با مقایسه نقاط میکروژئودزی در شیب پائین دست سد، طی سالهای مختلف نقشه برداری زمینی، بوضوح مشخص شد که تمامی نقاط میکروژئودزی در شیب پائین دست سد، دچار تورم یا بالا زدگی شده اند.

۵- در این پژوهش، چندین مرحله جامع برای صحت سنجی و قابلیت اعتماد پروتکل پیشنهادی انجام شد. بر اساس نتایج تحلیل ها، برنامه مشاهدات و اقدام به موقع به عنوان جزء اصلی پروتکل معرفی گردید. ترکیب فناوری های نوین در قالب یک چارچوب منسجم، افق تازه ای در پایش سدهای خاکی و مدیریت ریسک فراهم می آورد. با تلفیق قابلیت پایش گسترده ماهواره ای، دقت مدل سازی عددی، قدرت پیش بینی الگوریتم توانمند، و صحت سنجی میدانی، می توان سیستمی جامع و قابل اعتماد برای هشدار اولیه طراحی نمود تا گامی مؤثر در افزایش ایمنی زیرساخت های آبی کشور باشد. این پروتکل یک رویکرد نوآورانه، علمی و عملی برای پایش سد خاکی شیاده در شرایط خاص و با حداقل دیتای موجود ارائه شده که از مزایای فناوری های روز بهره مند است. با اجرای این سیستم، می توان به شناسایی اولیه رفتارهای غیرطبیعی، پیش بینی بحران، و کاهش خسارات احتمالی ناشی از خرابی سدها دست یافت.

پیشنهاد می گردد این دسته از سدها را به تیم تحقیقاتی چندرشته ای (ژئوتکنیک، زمین شناسی، مدیریت بحران، اقتصاد و برنامه نویسی) واگذار نمود. لذا تکمیل مطالعات زمین شناسی و ژئوتکنیک برای تعیین شیب لایه خاک تکیه گاه و درزه های گسل برای تعیین فرار آب از مخزن، اثر تخریبی گسل ثانویه بلحاظ زمین شناسی نیاز است، بصورت جامع بررسی گردد.

References

- [1] Nobahar, M. Khan, MS. Alzeghoul, OE. Graham, G. Young, K. (2022). Condition Assessment of a HWS Using Field Instrumentation and Electrical Resistivity Imaging (ERI). pp. 102-112.
- [2] Nobahar, M. Khan, MS. Ivoke, J. (2020). Combined effect of rainfall and shear strength on the stability of highway embankments made of Yazoo clay in Mississippi. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 2787-2802.
- [3] Nobahar, M. Khan, MS. Salunke, R. Gardner, A. Chia, KH. (2022). Moisture Variation Monitoring of Failed and Not-Failed Highway Slope through Resistivity Imaging in Mississippi. pp. 72-81.
- [4] Nobahar, M. Salunke, R. Alzeghoul, OE. Khan, MS. Amini, F.(2023). Mapping of Slope Failures on Highway Embankments using Electrical Resistivity Imaging (ERI), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), and Finite Element Method (FEM) Numerical Modeling for Forensic Analysis, *Transportation Geotechnics*, Volume 40, 100949, ISSN 2214-3912.
- [5] Nobahar, M. Salunke, R. Khan, MS. Amini, F. (2022). Development of Soil Moisture Content and Soil Matric Suction Model Based on Field Instrumentation and Electrical Resistivity Imaging (ERI) for Highway Slopes Constructed on High Expansive Clay Soil. *Geotechnics*, 569 671-705.
- [6] Nobahar, M. (2022). An Early Warning Protocol Against Highway Slopes Failure On Expansive Soil." Jackson State University, Mississippi, USA.
- [7] Khan, MS. Amini, F. Nobahar, M. (2020). Performance Evaluation of Highway Slopes on Yazoo Clay. Mississippi. Dept. of Transportation..
- [8] Ivoke, John. (2021). Unsaturated Hydraulic Conductivity Variation of Expansive Yazoo Clay with Wet-Dry Cycles. <https://doi.org/10.1177/03611981211011994>
- [9] Kandalai, S. John, NJ. Patel, A. (2023). Effects of Climate Change on Geotechnical Infrastructures state of the art. *Environmental Science and Pollution Research*, Jan 5:1-27.
- [10] Vahedifard, F.(2022). Adaptation strategies for levees under a changing climate.
- [11] Bračko, T. Žlender, B. Jelušič, P.(2022). Implementation of Climate Change Effects on Slope Stability Analysis. *Applied Sciences*. Aug 16;12(16):8171.
- [12] Allard, RF.(2021). Climate change adaptation: Infrastructure and extreme weather. *Industry, Innovation, and Infrastructure*. 105-16.500
- [13] Fant, C. Jacobs, JM. Chinowsky, P. Sweet, W. Weiss, N. Sias, JE. Martinich, J, Neumann, JE. (2021) Mere nuisance or growing threat? The physical and economic impact of high tide flooding on US road networks. *Journal of infrastructure systems*. Dec 1;27(4):04021044.
- [14] Karagiannis, GM. Cardarilli, M. Turksezer, ZI. Spinoni, J. Mentaschi, L. Feyen, L. Krausmann, E. (2019). Climate change and critical infrastructure—storms. European Union: Luxembourg.
- [15] Pk, S. Bashir, R. Beddoe, R.(2018). Effect of climate change on earthen embankments in Southern Ontario, Canada. *Environmental Geotechnics*. Dec 18;8(2):148-69.
- [16] Toll D, G. Mendes, J. Gallipoli, D. Glendinning, S. Hughes, PN.(2012). Investigating the impacts of 577 climate change on slopes: field measurements. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*.;26(1):151-61.
- [17] Mendes, J. (2011). Assessment of the impact of climate change on an instrumented embankment: an unsaturated soil mechanics approach, Doctoral dissertation, Durham University,
- [18] Xu, Y. Su, C. Huang, Z. Yang, C. Yang, Y.(2022). Research on the protection of expansive soil slopes under heavy rainfall by anchor-reinforced vegetation systems. *Geotextiles and Geomembranes*. Dec 1;50(6):1147-58.
- [19] Liang, C. Wu, Z. Liu, X. Xiong, Z. Li, T.(2021). Analysis of shallow landslide mechanism of expansive soil slope under rainfall: a case study. *Arabian Journal of Geosciences*. Apr;14:1- 531 1.
- [20] Nobahar, M. Khan, MS. Ivoke, J. Amini, F.(2019). Impact of rainfall variation on slope made of expansive Yazoo clay soil in Mississippi. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 6(4), 318-336.
- [21] Nobahar, M. Khan, MS.(2021). Prediction of Matric Suction of Highway Slopes Using Autoregression Artificial Neural Network (ANN) Model. In *Geo-Extreme*, pp. 40-50.
- [22] Khan, MS. Ivoke, J. Nobahar, M. Amini, F.(2022). Artificial Neural Network (ANN) based Soil Temperature model of Highly Plastic Clay. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(4), 1230-1246
- [23] Abrams, TG. Wright, SG.(1972). A survey of earth slope failures and remedial measures in Texas.497 Dec
- [24] Wright, SG.(2005). Evaluation of soil shear strengths for slope and retaining wall stability analyses with emphasis on high plasticity clays. Project No. 5-1874. Aug;1.

- [25] Lee, Jr LT. State Study 151 and 236.(2012). Yazoo Clay Investigation, No. FHWA/MS- DOT-RD-11-236.
- [26] Nelson, J. Miller, DJ.(1997). Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering. John Wiley & Sons.
- [27] Kongai, F.(2023). Impact of Pit latrines on Groundwater Quality: A comparative study of boreholes and protected springs in Mpigi Town Council, Uganda
- [28] Wanare, R. Iyer, KK. Jayanthi, P.(2022). Recent advances in early warning systems for landslide forecasting. Geohazard Mitigation: Select Proceedings of VCDRR 2021. 249-60.
- [29] Fawzy, S. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review.
- [30] Petley, D. (2012) .Global patterns of loss of life from landslides. Geological Society of America,
- [31] Kjekstad, O. Highland, L.(2009). Economic and social impacts of landslides. In Landslides–disaster risk reduction. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 573-587.
- [32] Ghahramani,A. Tectonics of Iran. Tehran: University of Tehran
- [33] G. E. Fasshauer. (2007). Meshfree Approximation Methods with MATLAB, Vol. 6, World Scientific Publishing Co., Inc., River Edge, NJ, USA.
- [34] The Mazandaran Regional Water Company Control and Stability Report, (1999-2024)
- [35] Massonnet, D. Feigl, K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Reviews of Geophysics, 36(4): 441-500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
- [36] Simons, M. Rosen, P.A. (2007). Interferometric synthetic aperture radar geodesy. Geodesy, 3: 391-446. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00059-6>
- [37] Goudarzi, M. A. (2022). Detection and measurement of land deformations caused by seismic events using InSAR, Sub-pixel correlation, and Inversion techniques, p.<https://webapps.itc.utwente.nl>.
- [38] Kim, J. W. (2022). Applications of Synthetic Aperture Radar (SAR)/SAR Interferometry (InSAR) for Monitoring of Wetland Water Level and Land Subsidence, Ohio State Univ., 1–111, <https://core.ac.uk/download/pdf/159596183.pdf> (last access: 8 May).
- [39] Netzband, M. Stefanov, W. L, and Redman, C.(2007). Applied remote sensing for urban planning, governance and sustainability, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68009-3>.
- [40] Mondini, A.C. Santangelo, M. Rocchetti, M. Rossetto, E. Manconi, A. Monserrat, O.(2019). Sentinel-1 SAR amplitude imagery for rapid landslide detection. Remote Sensing, 11(7): 760. <https://doi.org/10.3390/rs11070760>
- [41] Ommati, M. (2022). FaraDars. www.Faradars.org
- [42] Khoshraftar,R. Jafari, G.(2018). Evaluation of the Relationship Between Faults and Karst Springs in the Paraw-Bisotun Mountain Massif, Kermanshah. Zanzan: Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, Vol. 19, No. 54
- [43] Anisheh, S. R. Sarifipour, M.(2024). Optimization of the effective width of the foundation of a homogeneous earth dam under earthquake using the IWO algorithm. International Journal of Natural and Engineering Sciences E-ISSN: 2146-0086 18 (2): 77-91.
- [44] Anisheh, S. R. Anisheh S. M. (2012). Application of Finite Difference Method and PSO Algorithm in Seismic Analysis of Narmab Earth Dam. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 54– No.1..
- [45] Anisheh, S. R. Anisheh, S. A. & Anisheh, S. H.(2019). Seismic analysis of Narmab earth dam and optimization of its parameters using cuckoo. International Journal of Natural and Engineering Sciences. E-ISSN: 2146-0086 13 (2): 53-58.
- [46] Farrokhi, F. Rasouli, R. Anisheh, S.R. (2018). Seismic Analysis of Homogeneous Earth Dam and Optimization of Its Parameters Using Pso. International Journal of Natural and Engineering Sciences E-ISSN: 2146-0086 12 (1): 42-48,
- [47] Report of the Shiadeh Dam Project, Khazar Ab Consulting in 1998.
- [48] Guidelines for Seismic Analysis and Design of Earth and Rockfill Dams, Publication No. 624
- [49] Report of the Shiadeh Dam Project, Regional Water Company of Mazandaran Province. (1998).
- [50] Nobahar. M. Khan, MS. (2024). Geotechnical and Geological Engineering Early Warning Protocol Against Highway Embankment Failures on Expansive Soil
- [51] Khan. MS. Ivoke, J. Nobahar, M. Amini, F.(2022). Artificial Neural Network (ANN) based Soil Temperature model of Highly Plastic Clay. Geomechanics and Geoengineering, 17(4), 1230-1246.
- [52] Saeed, Davar. Masoud, Nobahar. Mohammad, Sadik Khan and Farshad, Amini. (2022). The Development of PSO-ANN and BOA-ANN Models for Predicting Matric Suction in Expansive Clay Soil, Mathematics,