Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2024: Vol 2, Issue 2
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1128791

Research Article

Investigating the dam failure process and associated risks: A case study of Doroudzan dam

Roozbeh Aghamajidi

Department of Civil Engineering, Sepidan Branch, Islamic Azad University, Sepidan, Iran.

Corresponding Author email: roozbeh1381@yahoo.com

© The Author(s) 2024

Received: 11 Aug 2024 Accepted: 07 Dec 2024 Published: 24 Dec 2024

Extended Abstract

Extended Abstract

Introduction

The issue of dam failure is critical due to the severe risks it poses to human communities. Dams play a vital role in water resource management and energy production, and any failure can result in significant loss of life and property. Given the importance of dams, particularly earthen dams, analyzing and understanding the factors that lead to their failure is essential. The Doroudzan Dam is one of the most significant dams in Iran, vital for water supply and agriculture in the region. This study aims to investigate the potential failure of the Doroudzan Dam and the associated risks. Utilizing numerical modeling through the MIKE 21 software, which allows for precise simulation of water flow and structural behavior under various conditions, this research evaluates the impacts of dam failure on downstream areas, including flood levels, flow velocities, and affected regions. The results indicate that a failure of the Doroudzan Dam could lead to severe flooding and extensive damage in downstream areas, impacting residential zones, agricultural lands, and critical infrastructure. These findings underscore the necessity for preventive measures and proper dam design. Additionally, educating local communities about the potential hazards of dam failure and conducting regular emergency drills can help mitigate losses and damages. This research demonstrates that employing scientific methods and advanced technologies can reduce the risks associated with dam failures and prevent human and financial losses.

Materials and Method

This study employs the MIKE 21 software, a sophisticated tool for two-dimensional modeling of water environments and flood scenarios, developed by DHI in Denmark. MIKE 21 utilizes advanced technologies to accurately simulate surface flows, dam breaks, sediment transport, and other hydraulic processes. The modeling process in MIKE 21 is based on two main methods: the finite difference method on structured grids and the finite volume method on unstructured triangular grids. This flexibility allows for high-precision simulations of various scenarios. For this study, the Doroudzan Dam, located on the Koor River near Marvdasht, Fars Province, was selected. The dam, completed in 1971, regulates approximately 760 million cubic meters of water annually for agricultural irrigation and municipal water supply. The modeling focused on assessing the potential flood risks associated with dam failure, utilizing parameters such as breach width and height to simulate scenarios of sudden dam failure and evaluate the subsequent flood wave propagation.

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2024: Vol 2, Issue 2
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1128791

Results and Discussion

The modeling results illustrate the potential consequences of a dam failure, indicating various risk zones downstream of the Doroudzan Dam. The simulation revealed that the red zone represents the highest risk area, which is critical for management and evacuation planning. This zone encompasses residential areas and agricultural lands that are particularly vulnerable to flooding. The yellow, green, and blue zones indicate varying flood intensities, with the yellow area experiencing high flood severity and the green area showing lesser impacts. The flow patterns and discharge rates were also analyzed, revealing that the initial peak discharge could exceed 10,000 cubic meters per second, posing a significant threat to downstream communities. The rapid increase in discharge highlights the urgency of implementing effective flood management strategies and early warning systems. Additionally, the study emphasizes the importance of continuous monitoring and maintenance of dam structures to prevent such catastrophic events.

Conclusion

The analysis of the Doroudzan Dam provides valuable insights into the catastrophic consequences of dam failure. The findings not only confirm the potential hazards but also offer significant opportunities for enhancing risk management and preparedness for similar incidents. Key factors influencing dam failure include the limited response time for evacuation, the impact of topography on flood intensity, and the vulnerability of surrounding areas. Establishing efficient early warning systems and public education about dam failure risks are crucial for minimizing casualties and property damage. Furthermore, continuous hydrological and geotechnical studies are essential for adapting to climate changes and ensuring the safety of dam structures. This research underscores the need for integrating advanced technologies in risk management and emphasizes the importance of community involvement in disaster preparedness initiatives.

Keywords: Dam Failure, Earth Dam, MIKE 21 Model, Numerical method

Extended Abstract

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Summer 2024: Vol 2, Issue 2, 174-185
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1128791

Research Article

Investigating the dam failure process and associated risks: A case study of Doroudzan dam

Roozbeh Aghamajidi

Department of Civil Engineering, Sepidan Branch, Islamic Azad University, Sepidan, Iran.

Corresponding Author email: roozbeh1381@yahoo.com

© The Author(s) 2024

Received: 11 Aug 2024 Accepted: 07 Dec 2024 Published: 24 Dec 2024

Abstract

Dam failures pose significant risks to human communities, as these critical structures are essential for water resource management and energy production. Consequently, any failure can result in substantial loss of life and property. This study examines the factors contributing to dam failures, specifically focusing on the Doroudzan earth dam, which plays a vital role in regional water supply and agriculture. The purpose of this study is to investigate the dam failure process and associated risks: A case study of Doroudzan dam. MIKE 21 software was employed to analyze these risks and provide detailed numerical modeling. MIKE 21 enables precise simulation of water flow and structural behavior under various scenarios, facilitating a comprehensive assessment of potential dam failure impacts on downstream areas.

The results indicate that failure of the Doroudzan earth dam could lead to catastrophic flooding, causing widespread damage to downstream communities. Simulations highlight that residential areas, agricultural lands, and critical infrastructure are particularly vulnerable, emphasizing the need for optimal dam design and proactive risk management measures. Raising community awareness about dam failure risks and promoting emergency preparedness through regular drills can further mitigate human and financial losses. This study underscores that adopting scientific approaches and leveraging advanced technologies such as MIKE 21 can significantly reduce the adverse effects of dam failures, helping to protect lives and minimizing property damage.

***Keywords**:* Dam Failure, Earth Dam, MIKE 21 Model, Numerical method

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۲۹۸۱-۱۴۴۹
تابستان ۱۴۰۳، دوره دو، شماره۲، ۱۷٤-۱۸۵
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1128791

مقاله پژوهشی

بررسی روند شکست سد و خطرات ناشی از آن درصورت وقوع (مطالعه موردی سد درودزن)

روزبه آقامجیدی

استادیار گروه عمران، واحد سپیدان، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: roozbeh1381@yahoo.com

© The Author(s) 2024

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

چکیده

اهمیت مسئله شکست سد از آنجا ناشی می‌شود که این حوادث خطرات جدی برای جوامع انسانی به همراه دارند. سدها به عنوان سازه‌های کلیدی در مدیریت منابع آبی و تولید انرژی، نقش مهمی در زندگی انسان‌ها ایفا می‌کنند و هر گونه شکست در آنها می‌تواند به خسارات جانی و مالی قابل توجهی منجر شود. با توجه به اهمیت سدها، به‌ویژه سدهای خاکی، بررسی و تحلیل عوامل شکست آنها اهمیت بالایی دارد. سد خاکی درودزن یکی از سدهای مهم کشور است که در تأمین آب و کشاورزی منطقه نقش حیاتی دارد. هدف از این مطالعه بررسی روند شکست سد و خطرات ناشی از آن درصورت وقوع (مطالعه موردی سد درودزن) است. در این تحقیق برای تحلیل دقیق‌تر، از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار MIKE 21 استفاده شده است که قابلیت شبیه‌سازی دقیق جریان آب و رفتار سازه را در شرایط مختلف دارد. این مدل‌سازی به ارزیابی تأثیرات شکست سد بر مناطق پایین‌دست کمک می‌کند و شامل محاسبه سطح سیلاب، سرعت جریان آب و تعیین مناطق است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که شکست سد درودزن می‌تواند باعث سیلاب‌های شدید و خسارات گسترده در مناطق پایین‌دست شود و به مناطق مسکونی، زمین‌های کشاورزی و زیرساخت‌های حیاتی آسیب برساند. این یافته‌ها بر لزوم اقدامات پیشگیرانه و طراحی صحیح سدها تأکید دارند. همچنین، آموزش و آگاهی‌بخشی به جوامع محلی درباره خطرات بالقوه شکست سد و برگزاری نمایش‌های امدادی دوره‌ای، می‌تواند به کاهش تلفات و خسارات کمک کند. این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌های علمی و فناوری‌های پیشرفته، می‌توان خطرات شکست سدها را کاهش داده و از خسارات جانی و مالی جلوگیری کرد.

واژه‌های کلیدی: شکست سد، سد خاکی، مدل MIKE 21، روش عددی

۱- مقدمه

شکست سدها یکی از مسائل مهم و حیاتی در مهندسی هیدرولیک و مدیریت منابع آب است که می‌تواند خسارات جانی و مالی قابل‌توجهی به بار آورد. سدها به‌طور کلی به عنوان ساختارهای مهندسی بزرگ با هدف ذخیره‌سازی و تنظیم جریان آب، تولید برق، تأمین آب شرب و کشاورزی و کنترل سیلاب‌ها ساخته می‌شوند. هرچند که با توجه به اهمیت بالای این سازه‌ها، احتمال شکست آن‌ها و اثرات آن بر جوامع پایین‌دست باید به‌دقت مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. از منظر تاریخی، شکست سدها به دلایل مختلفی از جمله وقوع سیلاب، نقص‌های سازه‌ای و پدیده‌های زمین‌شناسی همچون لغزش زمین و زلزله رخ داده است (Hydrologic Engineering Center, 2014).

سدها به انواع مختلف سدهای خاکی یا سنگریزه‌ای، سدهای بتنی وزنی، سدهای بتنی تک‌قوسی یا چندقوسی، سدهای پشت‌بند دار و سدهایی از جنس فولاد یا تیرچوبی تقسیم می‌شوند. هر نوع سد با توجه به نوع مصالح و طراحی خاص خود دارای نقاط قوت و ضعف مشخصی در برابر نیروهای مختلف از جمله سیلاب، نشت، لغزش و دیگر پدیده‌های طبیعی و انسانی است. گزارش Costa (1988) و Atallah (2002) نشان می‌دهد که بیشترین علت شکست سدها روگذری سیلاب از تاج سد و سپس نقص در پی سد بوده است.

علل شکست سدها به مکانیزم‌های مختلفی وابسته است که می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

سیلاب شدید: باعث روگذری آب از تاج سد و احتمالاً تخریب سازه می‌شود.

نشت یا رگاب: حرکت آب از طریق شکاف‌ها یا نواحی مستعد نفوذ در زیر یا اطراف سد که می‌تواند منجر به تضعیف ساختار سد شود.

لغزش زمین: وقوع زمین‌لغزش در اطراف یا زیر سد.

زلزله: تکان‌های ناشی از زمین‌لرزه که ممکن است به شکست ساختار سد منجر شود.

نقص پی: ضعف در پایه سد یا خاک زیر آن که می‌تواند از دلایل شکست باشد(Costa, 1988).

برای پیش‌بینی دقیق هیدروگراف خروجی از سد و هیدروگراف پایین‌دست، تعیین محل، ابعاد و زمان توسعه شکاف ایجاد شده در سد حیاتی است. این پارامترها به تحلیل ریسک، پیش‌بینی سیلاب و مدیریت بحران کمک می‌کنند و در نرم‌افزارهایی مانند HEC-RAS جهت مدل‌سازی هیدرولیکی استفاده می‌شوند. پارامترهای کلیدی در این مدل‌سازی عبارتند از: عرض شکاف و ارتفاع شکاف(فاصله عمودی از کف شکاف تا تاج سد) (Urzică et al., 2021).

روش‌های مختلفی برای برآورد پارامترهای شکست سد وجود دارد، از جمله:

دستورالعمل آژانس‌های فدرال: ارائه محدوده مقادیر پارامترهای شکست بر اساس تاریخچه شکست سدها.

معادلات رگرسیون: استفاده از داده‌های تاریخی برای برآورد پارامترهای شکست.

آنالیز مقایسه‌ای: مقایسه سد مورد مطالعه با سد مشابهی که قبلاً دچار شکست شده است.

مدل‌های کامپیوتری فیزیکی: استفاده از نرم‌افزارهایی که شبیه‌سازی فرآیندهای شکست را انجام می‌دهند.

هرکدام از این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند و انتخاب روش مناسب برای تحلیل شکست سد نیازمند شناخت دقیق از ویژگی‌های سد و محدودیت‌های روش‌ها است. به عنوان مثال، در تحلیل حساسیت، می‌توان تأثیر هر یک از پارامترهای شکست را بر هیدروگراف خروجی، دبی حداکثر، عمق جریان در پایین‌دست و زمان هشدار به جمعیت‌های در معرض خطر ارزیابی کرد.

شکست سدها به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین مسائل مهندسی، تهدیدات جدی برای جوامع و محیط زیست ایجاد می‌کند. بررسی عوامل مؤثر در شکست سدها، به‌ویژه تحت تأثیر سیلاب یا بارهای لرزه‌ای، می‌تواند به بهبود طراحی و بهره‌برداری ایمن‌تر کمک کند.

عوامل شکست سدها شامل فرسایش تاج سد، نشست‌های غیریکنواخت، لرزش‌های ناشی از زلزله و تأثیرات توپوگرافی پایین‌دست است. تاج سد به‌عنوان یکی از نقاط بحرانی، مستعد فرسایش و شکست در زمان عبور جریان سیلابی است.

(Wahl, 2004) در مطالعه‌ای، با استفاده از مدل‌سازی، نشان داد که استفاده از موادی نظیر آسفالت برای بهسازی تاج سد می‌تواند به کاهش خطر فرسایش و افزایش ایمنی در برابر عبور سیلاب کمک کند. همچنین، این پژوهش نشان داد که شکست سدهای خاکی عمدتاً در شیب بالادست اتفاق می‌افتد و تغییرات ایجاد شده اغلب موضعی هستند و به فروپاشی کامل بدنه سد منجر نمی‌شوند. تحلیل لرزه‌ای سدها نیز اهمیت ویژه‌ای در طراحی مقاوم‌تر آنها دارد. (Sun et al., 2014) با استفاده از روش اجزای محدود نشان دادند که شکست لرزه‌ای بیشتر در مناطق آسیب‌پذیر شیب بالادست رخ می‌دهد و تغییرات ناشی از آن ممکن است باعث تضعیف تدریجی سد شود. از سوی دیگر، نقش توپوگرافی پایین‌دست سدها در انتشار موج سیلاب قابل‌توجه است. (Dorn et al., 2014) در پژوهشی نشان دادند که سدهای واقع در مناطق کوهستانی به دلیل وجود دره‌ها و موانع طبیعی، باعث کاهش سرعت موج سیلاب و افزایش پیچیدگی در مسیر جریان می‌شوند. همچنین، مدل‌سازی عددی نشان داده است که هندسه سد و ساختار پایین‌دست تأثیر زیادی بر مشخصات جریان سیلاب دارد. (Froehlich, 2008) با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و روش VOF نشان داد که در صورت وقوع شکست، نحوه حرکت جریان سیلاب تحت تأثیر پارامترهایی نظیر وضعیت پایین‌دست، شرایط توپوگرافی و کیفیت مصالح سد قرار می‌گیرد. علاوه بر این، بهسازی تاج سد با استفاده از روش‌هایی مانند پوشش‌های مقاوم در برابر فرسایش، به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش خطر شکست سدها شناخته می‌شود. همچنین، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته تحلیل لرزه‌ای و ارزیابی هیدرولیکی سدها، به شناخت بهتر نقاط ضعف و بهبود ایمنی سدها کمک می‌کند. تحقیقات جدید بر شناسایی عوامل اصلی شکست سدها تمرکز کرده‌اند و نشان می‌دهند که طراحی نادرست، عدم نگهداری مناسب و وقوع رویدادهای طبیعی مانند زمین‌لرزه یا سیلاب، از دلایل اصلی این پدیده هستند. به‌طور خاص، (Das et al., 2024) اشاره کرده‌اند که نشت آب و فرسایش داخلی از مهم‌ترین دلایل شکست در سدهای خاکی به شمار می‌آید. این مطالعه تأکید دارد که نظارت دقیق و شناسایی زودهنگام این مشکلات می‌تواند خطر شکست را کاهش دهد. در زمینه کنترل و پیشگیری، استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای مدیریت ریسک سدها در اولویت قرار گرفته است. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از ابزارهای حسگر برای پایش تغییرات فشار و نشت، می‌تواند دقت پیش‌بینی خطرات را افزایش دهد. به عنوان مثال، (Mostafa & Zhenzhong 2023) بیان کردند که نصب سیستم‌های هشداردهنده زودهنگام در ترکیب با نرم‌افزارهای تحلیلی، به کاهش احتمال وقوع فجایع منجر می‌شود. علاوه بر این، استفاده از ژئوتکستایل‌ها برای تقویت ساختار سد و جلوگیری از فرسایش، در مطالعات مختلف مورد تأیید قرار گرفته است.

روش‌های شبیه‌سازی عددی نیز نقش مهمی در تحلیل و مدیریت ریسک شکست سدها ایفا می‌کنند. مدل‌هایی مانند HEC-RAS برای شبیه‌سازی جریان‌های آب و پیش‌بینی پدیده شکست استفاده می‌شوند. (Haltas et al., 2016) با استفاده از این مدل‌ها نشان دادند که پیش‌بینی جریان‌های بحرانی می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از شکست کمک کند. این مطالعات همچنین تأکید دارند که شبیه‌سازی‌های دو و سه بعدی می‌توانند در ارزیابی پایداری سدها در شرایط مختلف، از جمله وقوع سیلاب‌های بزرگ، به‌کار گرفته شوند. پیامدهای شکست سدها اغلب فراتر از خسارات مالی است و اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی گسترده‌ای به دنبال دارد.

(Pareta, 2024) نشان داد که تخریب زیستگاه‌های طبیعی و افزایش آلودگی منابع آب از پیامدهای بارز شکست سدها است. علاوه بر این، تأثیرات اجتماعی شامل جابجایی جمعیت و کاهش دسترسی به منابع آب شیرین می‌باشد که نیازمند مدیریت دقیق پیامدهای پس از بحران است. این مطالعه بر لزوم برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات محیطی و بازسازی سریع مناطق آسیب‌دیده تأکید دارد.. تحقیقاتی نظیر (Wang et al., 2023) بر اهمیت استفاده از مصالح باکیفیت و بهبود روش‌های اجرایی تأکید کرده‌اند. جمع‌بندی مطالعات نشان

می‌دهد که پیشگیری از شکست سدها نیازمند تلفیق فناوری‌های نوین، طراحی مقاوم و پایش مستمر است. همچنین، ترکیب ابزارهای پیشرفته با رویکردهای مبتنی بر شبیه‌سازی، به مهندسان کمک می‌کند تا خطرات بالقوه را به حداقل برسانند.

با توجه به اهمیت موضوع تحلیل شکست سد (شکل ۱) و خطرات ناشی از وقوع آن این پژوهش با هدف بررسی روند شکست سد و خطرات ناشی از آن در صورت وقوع انجام شد و شکست سد درودزن با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته هیدرولیکی MIKE21 مدلسازی گردید.

شکل ۱- نمایی از اهمیت تحلیل شکست سد در کل مطالعات

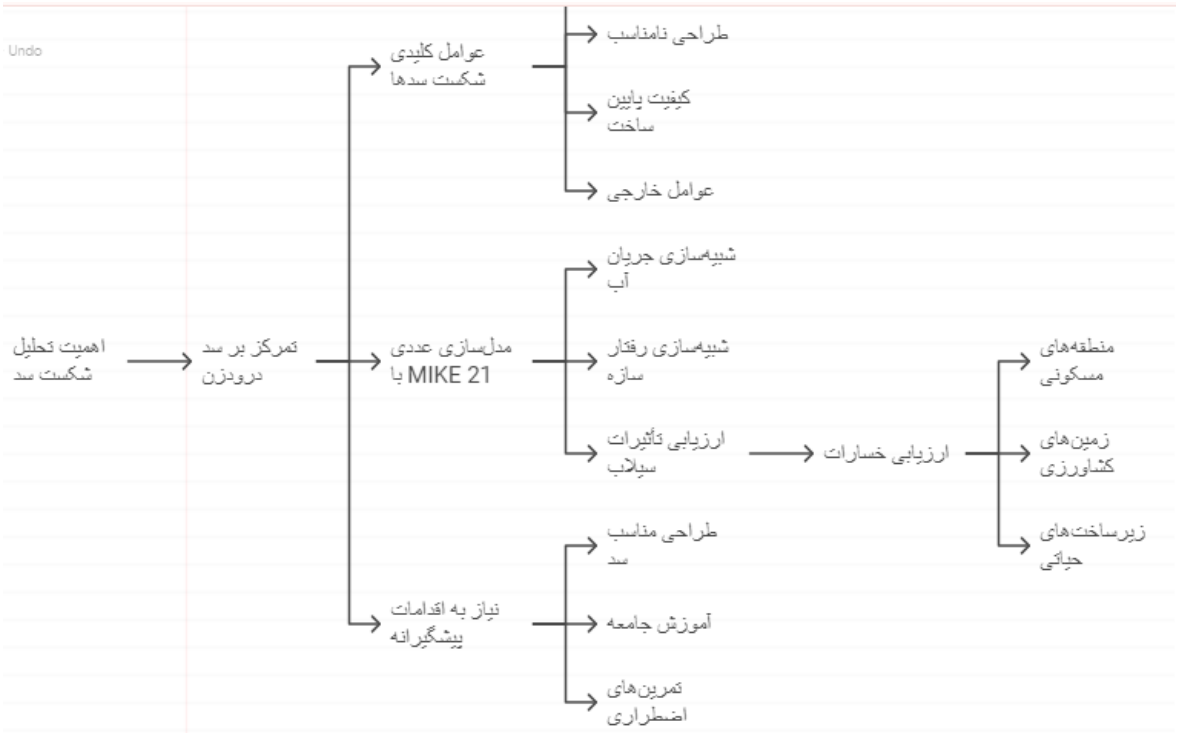

Fig 1. An overview of the importance of dam failure analysis in all studies

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نرم‌افزار MIKE21

نرم‌افزار MIKE21 یکی از ابزارهای پیشرفته و جامع برای مدل‌سازی دوبعدی در محیط‌های آبی و سیلاب‌ها است که توسط موسسه DHI دانمارک توسعه یافته است. این نرم‌افزار با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان‌های سطحی، شکست سد، انتقال رسوبات و سایر فرآیندهای هیدرولیکی دارد. مدل‌سازی در MIKE21 بر پایه دو روش اصلی انجام می‌شود: روش تفاضل محدود در شبکه منظم و روش حجم محدود در شبکه بی‌سازمان مثلثی. این روش‌ها به نرم‌افزار امکان می‌دهند تا شرایط مختلف را با دقت بالا شبیه‌سازی کند و از ویژگی‌های هر روش برای حل مسائل پیچیده هیدرولیکی بهره ببرد (DHI, 2024).

یکی از ویژگی‌های کلیدی MIKE21، انعطاف‌پذیری در شبکه‌بندی است. به‌طور معمول، در مناطقی با اهمیت بیشتر، مانند اطراف محل شکست سد یا مناطق مجاور رودخانه، شبکه محاسباتی با دقت بالاتری طراحی می‌شود. این قابلیت باعث می‌شود تا فرآیندهایی مانند توزیع سیلاب و انتقال رسوبات با دقت بیشتری مدل‌سازی شوند. در عین حال، در مناطقی با اهمیت کمتر، می‌توان از سلول‌های

بزرگ‌تر استفاده کرد که موجب کاهش زمان محاسبات و بهینه‌سازی منابع می‌شود (Pareta, 2024). این ویژگی باعث افزایش کارایی نرم‌افزار و تطبیق آن با نیازهای مختلف پروژه‌ها شده است.

سادگی کاربری و سرعت بالا از دیگر مزایای MIKE21 محسوب می‌شود. این نرم‌افزار، با وجود دقت بالای محاسبات، برای کاربران با تجربه‌های مختلف طراحی شده و محیط کاربرپسندی ارائه می‌دهد. تنظیم محدوده شبکه محاسباتی و امکان تعریف سلول‌های با ابعاد متفاوت در بخش‌های مختلف مدل، از عوامل اصلی افزایش کارایی این نرم‌افزار است. همچنین، قابلیت تنظیم شرایط مرزی و هیدرولیکی پیچیده، آن را به ابزاری مناسب برای تحقیقات پیشرفته و پروژه‌های کاربردی تبدیل کرده است (Bigdeli et al., 2022).

MIKE21 در بسیاری از پروژه‌های مدل‌سازی سیلاب و مدیریت منابع آبی به کار گرفته شده و نتایج آن در مقایسه با داده‌های واقعی از دقت بالایی برخوردار بوده است. این ویژگی‌ها همراه با الگوریتم‌های بهینه و روش‌های عددی پیشرفته، آن را به یکی از محبوب‌ترین نرم‌افزارها در حوزه مدل‌سازی هیدرولیکی تبدیل کرده است(Pareta, 2024).

از دیگر مزایای MIKE21، قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با رسوبات ته‌نشسته و تعلیق مجدد آنها است. این ویژگی به‌ویژه در پروژه‌هایی که در آن‌ها مسائل رسوب‌گذاری و انتقال رسوبات نقش مهمی ایفا می‌کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل رسوب MIKE21 به کاربر این امکان را می‌دهد تا روند تحکیم و تعلیق رسوبات را در شرایط مختلف بررسی کرده و نتایج دقیقی از این فرآیندها به دست آورد. (DHI, 2024).

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

سد درودزن سدی خاکی است که بر روی رودخانه کر احداث شده است. این سد در نزدیکی شهر مرودشت استان فارس قرار گرفته است. سد مخزنی درودزن در صد کیلومتری شمال غرب شیراز بر روی رودخانه کر و حدود جغرافیایی ۲۵و۵۲ طول شرقی و ۱۳و۳۰ عرض شمالی احداث گردیده است. ساختمان خاکی سد در آذر ۱۳٤٥ آغاز شد و در اسفند ماه ۱۳۵۰ به‌عنوان اولین سد خاکی خاورمیانه به اتمام رسید و از سال ۱۳۵۱ آبگیری و مورد بهره‌برداری قرار گرفت. این سد با تنظیم حدود ۷٦۰ میلیون مترمکعب آب در سال، آب کشاورزی حدود ٤۲ هزار هکتار از اراضی بلوک رامجرد و حدود ۳٤ هزار هکتار از اراضی منطقه کربال و کناره مرودشت را تامین می‌نماید، همچنین از طریق سد درودزن آب شرب شهر شیراز- مرودشت و تعدادی از روستاهای بین راه و موسسات بزرگ صنعتی نزدیک و نیز آب صنعتی جهت مصارف صنایع پتروشیمی تامین می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

نتایج مربوط به مدل‌سازی شکست سد و بررسی محدوده پایین‌دست سد درودزن با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته MIKE21 در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شکل، محدوده‌های مختلف تحت تأثیر شکست سد با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی و رنگ‌بندی مشخص شده‌اند. در ادامه توضیحی در خصوص آن ارائه می‌شود:

محدوده قرمز: نشان‌دهنده بیشترین تأثیر شکست سد بر پایین‌دست است. این ناحیه نمایانگر مناطق پرخطر در هنگام شکست سد با دبی‌های بالا است که باید در مدیریت بحران و تخلیه جمعیت مورد توجه قرار گیرد. همان طور که مشهود است باغات و منازل مسکونی به وفور در اطراف رودخانه پراکنده شده‌اند که در هنگام بروز حوادث سیل مشکلاتی اساسی در پی خواهد داشت. متأسفانه این ناحیه کاملا کوهستانی است که در صورت کمی تأخیر خسارات غیرقابل جبرانی قابل انتظار است.

محدوده زرد، سبز و آبی: پهنه‌های سیلابی با شدت متفاوت را نشان می دهد که نمایانگر میزان پراکندگی جریان و شدت سیلاب در مناطق پایین‌دست است. رنگ زرد نواحی با شدت سیلاب بالا را نشان می‌دهد، در حالی که رنگ سبز مناطق با شدت سیلاب کمتر را پوشش می‌دهد.

خطوط و مسیرهای جریان: الگوی توزیع جریان هستند، مسیر حرکت آب پس از شکست سد را نشان می‌دهند. این مسیرها به شناسایی مناطق در معرض خطر و برنامه‌ریزی برای اقدامات محافظتی کمک می‌کنند.

شکل۲ – مدل‌سازی شکست سد و بررسی محدوده پایین‌دست سد درودزن

Fig 2. Dam failure modeling and investigation of the downstream area of the Dorudzan Dam

شکل (۳) نشان‌دهنده مناطق با خطرپذیری مختلف در اثر شکست ناگهانی سد می‌باشد. براساس محاسبات انجام شده در صورت بروز خطر با احتمالات مختلف، محیط و مساحت تحت تاثیر مناطق اطراف سد، بصورت جدول (۱) خواهد بود. این جدول خروجی نرم افزار است.

شکل ۳– مناطق با خطرپذیری مختلف سد درودزن (مخزن کارده مربوط به مخرن کنترل پایین دست سد درودزن می‌باشد)

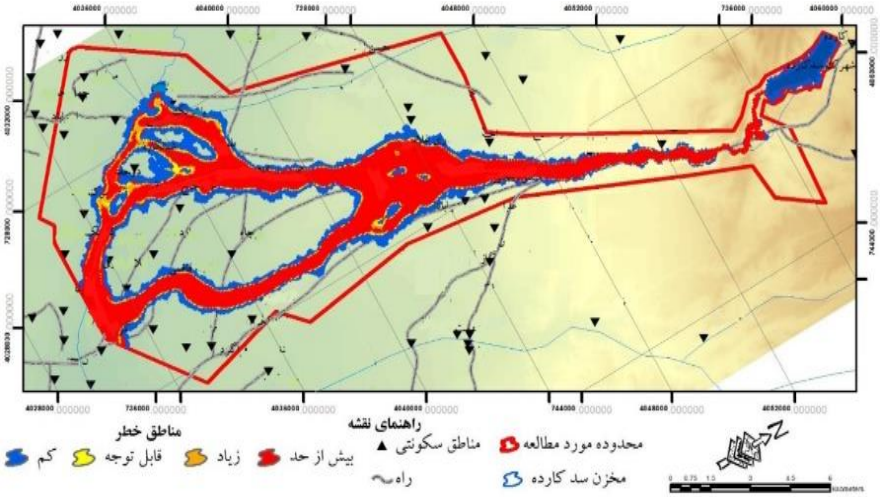

Fig 3. Areas with different risks of Doroudzan Dam

شکل (٤)، نمودار تغییرات ارتفاع آب (H) بر حسب فاصله (Station) در امتداد یک رودخانه یا کانال را بعد از شکست سد نشان می‌دهد که مربوط به شرایط زمانی t= 5s است. این نمودار بیانگر یک کاهش شدید و سریع در ارتفاع آب در ابتدا و سپس تثبیت آن

به نزدیک صفر در فواصل دورتر است. این کاهش سریع ارتفاع ممکن است ناشی از وقوع یک پدیده ناگهانی مانند شکست سد باشد، که منجر به آزادسازی حجم زیادی از آب و جریان شدید در طول رودخانه می‌شود.

در فاصله‌های نزدیک (کمتر از ۵۰۰ متر)، بیشترین ارتفاع آب مشاهده می‌شود که ناشی از اثر مستقیم موج اولیه آزاد شده است. به‌تدریج با افزایش فاصله، انرژی جریان کاهش می‌یابد و ارتفاع آب به طور نمایی کم می‌شود. این رفتار معمولاً به دلیل اتلاف انرژی جریان از طریق اصطکاک بستر، پراکندگی جریان و کاهش سرعت موج رخ می‌دهد.

شکل (٤) نشان می‌دهد که شکست سد منجر به انتشار موج قوی در مدت‌زمان کوتاه می‌شود که اثرات آن در نزدیکی محل سد بسیار شدید است. اما با فاصله گرفتن از محل شکست، شدت و ارتفاع موج به‌سرعت کاهش می‌یابد. این تحلیل اهمیت مدیریت ریسک شکست سد و طراحی مناسب سازه‌های پایین‌دست را برای کاهش خطرات و خسارات ناشی از چنین پدیده‌هایی برجسته می‌سازد.

جدول۱- مشخصات مناطق با خطرپذیری مختلف

Table 1. Characteristics of areas with different risk

سطح خطرپذیری	محیط (m)	مساحت (m^2)
کم	۲۳۹٤۵۳/۳	۱۵/۷
قابل توجه	۱۳۷٤٦۸/۳	½
زیاد	۱٤٦٤۵۰/٦	۲/٦
بیش از حد	۱۹۵۲۳۲/۵	۳۵/۸
جمع	۷۱۸٦۰٤/۷	۵٦/۲
فاقد آبگرفتگی	۱۹۹۷۱۲/٤	۱۱۰/۷
جمع کل	۹۱۸۳۱۷/۱	۱٦٦/۹

شکل (۵) تغییرات ارتفاع سطح آب (H) را در مقابل موقعیت (Station) در امتداد یک رودخانه نشان می‌دهد. خطوط پیوسته و خط‌چین به ترتیب سطح آب در ساحل راست و ساحل چپ را نمایش می‌دهند. روند کلی نشان‌دهنده کاهش تدریجی ارتفاع است، اما در بخش‌هایی از نمودار، تغییرات ناگهانی در ارتفاع مشاهده می‌شود که ممکن است به دلیل وجود شیب‌های تند یا موانع طبیعی باشد. در صورت وقوع شکست سد، این تغییرات به‌شدت تشدید شده و باعث افزایش ناگهانی سطح آب در پایین‌دست رودخانه می‌شود، که می‌تواند منجر به سیلاب و تخریب شدید مناطق مسکونی و زیرساخت‌ها در آن منطقه شود. بنابراین، تحلیل این نمودارها برای ارزیابی خطرات ناشی از شکست سد و اتخاذ اقدامات پیشگیرانه ضروری است.

شکل ٤- ارتفاع آب بعد از شکست سد در ۵ ثانیه

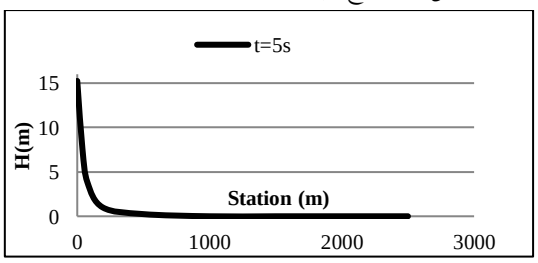

Fig 4. Water height after dam failure in 5 seconds

شکل ۵- ارتفاع آب در سواحل سمت راست و چپ بعد از ۹۰ ثانیه

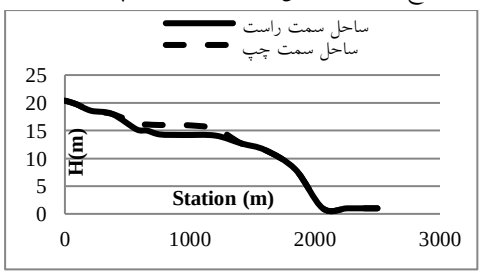

Fig 5. Water height on the right and left banks after 90 seconds

شکل(٦) تغییرات دبی جریان (Discharge) را بر حسب زمان (Time) در فاصله ۱۵۰۰ متری محل شکست نشان می‌دهد و روند یک سیلاب ناشی از شکست سد را مدل‌سازی می‌کند. در ابتدا، دبی جریان با سرعت زیاد افزایش یافته و در مدت کوتاهی به مقدار اوج نزدیک به ۱۰,۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. این مرحله نشان‌دهنده آزادسازی ناگهانی و شدید حجم زیادی از آب ذخیره‌شده در پشت سد است. این افزایش ناگهانی دبی، خطر بالایی برای مناطق پایین‌دست رودخانه دارد و می‌تواند باعث تخریب سازه‌ها و زیرساخت‌ها شود.

پس از رسیدن به اوج دبی، جریان به‌آرامی شروع به کاهش می‌کند. این کاهش به دلیل تخلیه تدریجی آب ذخیره‌شده پشت سد و کاهش انرژی سیلاب است. کاهش دبی به‌صورت نمایی رخ می‌دهد و نشان‌دهنده کاهش خطر در مناطق پایین‌دست در طول زمان است. این روند معمولاً در اثر اصطکاک بستر، کاهش حجم آب ذخیره‌شده و پراکندگی انرژی جریان اتفاق می‌افتد.

در بخش نهایی نمودار، دبی جریان به مقادیر نزدیک به صفر میل می‌کند و به یک حالت پایدار می‌رسد. این بخش نشان‌دهنده پایان یافتن سیلاب و بازگشت جریان به شرایط طبیعی است.

می‌توان بیان داشت که در جریان شکست سد، اوج دبی و زمان رسیدن به آن دو عامل کلیدی هستند که می‌توانند خسارات و تأثیرات سیلاب را تعیین کنند. تحلیل این داده‌ها می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر برای مدیریت بحران، طراحی سیستم‌های هشدار سریع و ساخت سازه‌های مقاوم در پایین‌دست کمک کنند. به‌علاوه، این اطلاعات برای کاهش ریسک و حفاظت از جوامع انسانی بسیار ارزشمند است.

شکل ٦- تغییرات دبی عبوری در فاصله ۱۵۰۰ متری محل شکست

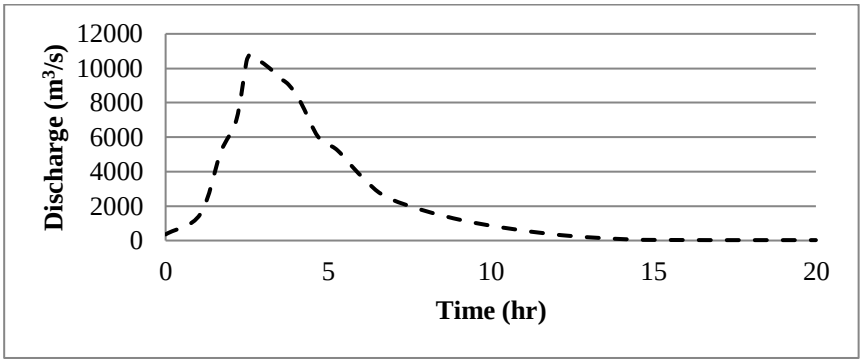

Fig6. Changes in discharge at a distance of 1500 meters from the failure site

شکل (۷) تغییرات H (ارتفاع آب یا بار هیدرولیکی) را بر حسب فاصله (Station) در یک کانال یا رودخانه برای سه مقادیر مختلف ضریب زبری مانینگ برابر با ۰/۲، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۳ نشان می‌دهد.

محور افقی(Station) بیانگر فاصله (برحسب متر) از نقطه‌ی مرجع یا نقطه‌ی آغازین جریان آب است. محور عمودی (H) ارتفاع یا بار هیدرولیکی آب را (برحسب متر) نشان می‌دهد. سه منحنی مختلف برای مقادیر مختلف ضریب زبری مانینگ (n) رسم شده‌اند: خط قرمز (n = 0.025) نمایانگر ضریب زبری کمتر است که نشان‌دهنده سطح صاف‌تری برای جریان است. خط نقطه‌چین سیاه (n = 0.02) نمایانگر ضریب زبری متوسط است. خط سیاه با خط‌چین ضخیم (n = 0.035) ضریب زبری بیشتری دارد که نشان‌دهنده سطح ناهموارتر است. در تمامی حالات، ارتفاع آب در ابتدای نمودار به شدت کاهش یافته و سپس در طول کانال یا رودخانه به حالت پایدار و تقریباً ثابت می‌رسد. افزایش ضریب زبری (n) تأثیر چشمگیری در کاهش سریع‌تر ارتفاع یا بار هیدرولیکی در طول جریان دارد. در مقادیر بزرگ‌تر ضریب زبری(n = 0.035)، کاهش بار هیدرولیکی سریع‌تر اتفاق می‌افتد و در نقاط ابتدایی جریان، اختلاف در ارتفاع آب واضح‌تر است. این نوع نمودارها به طور معمول برای تحلیل تأثیر زبری کف و دیواره‌های کانال بر رفتار جریان آب و انتقال انرژی استفاده می‌شوند.

شکل ۷- تغییرات ارتفاع آب بر حسب فاصله در یک کانال یا رودخانه برای سه مقادیر مختلف ضریب زبری مانینگ

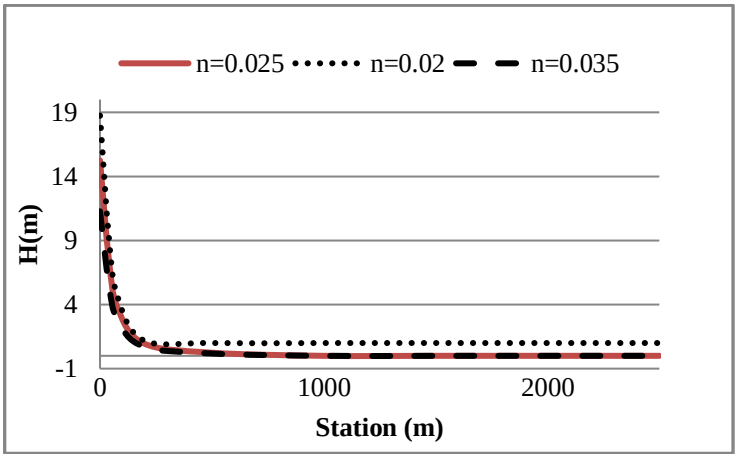

Fig 7. Variations in water height based on distance in a channel or river for three different values of the Manning roughness coefficient

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه انجام شده بر روی سد درودزن، تصویری روشن از پیامدهای فاجعه‌بار شکست سد را ارائه داده است. نتایج این تحقیق، علاوه بر تأیید خطرات بالقوه، فرصتی ارزشمند برای بهبود مدیریت ریسک و آمادگی در برابر حوادث مشابه را فراهم می‌کند. در ادامه عوامل موثر و تاثیرگذار در شکست سد ارائه شده است که بتوان در مورد عملکرد و تاثیر آن بر پایین دست سد بهتر قضاوت نمود(شکل ۸).

زمان محدود برای واکنش: مدت زمان دو ساعته برای رسیدن سیلاب به مناطق پایین‌دست، به ظاهر زمانی قابل توجه است، اما در شرایط اضطراری، این مدت زمان بسیار کوتاه است. با توجه به اینکه بسیاری از مناطق روستایی ممکن است به زیرساخت‌های ارتباطی و امدادی ضعیفی مجهز باشند، دو ساعت برای تخلیه کامل و ایمن جمعیت کافی نخواهد بود.

تأثیر توپوگرافی بر شدت سیلاب: وجود کوه‌های سنگی و ضریب زبری کم، علاوه بر افزایش سرعت سیلاب، می‌تواند باعث تمرکز جریان آب در برخی مناطق و تشدید خسارت‌ها شود. این موضوع اهمیت مطالعه دقیق توپوگرافی و هیدرولوژی منطقه را در ارزیابی ریسک شکست سد برجسته می‌کند.

آسیب‌پذیری بالای مناطق اطراف سد: زمان فرار بسیار کوتاه برای مناطق اطراف سد، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای این مناطق است. این مناطق اغلب به دلیل نزدیکی به سد، از نظر زیرساختی و اجتماعی نیز آسیب‌پذیرتر هستند.

ضرورت سیستم‌های هشدار سریع و کارآمد: ایجاد سیستم‌های هشدار سریع که بتوانند با دقت و سرعت بالا وقوع شکست سد را پیش‌بینی کنند، از اهمیت حیاتی برخوردار است. این سیستم‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند به سرعت به ساکنان مناطق خطرناک اطلاع‌رسانی کنند و آنها را برای تخلیه آماده سازند.

اهمیت آموزش و فرهنگ‌سازی: آموزش عمومی در مورد خطرات ناشی از شکست سد و نحوه مقابله با آن، نقش مهمی در کاهش خسارات جانی و مالی ایفا می‌کند. برگزاری مانورهای آمادگی و ایجاد فرهنگ خودامدادی در بین مردم، می‌تواند به افزایش آمادگی جامعه در برابر حوادث کمک کند.

شکل ۸- بررسی عکس‌العمل و آمادگی برای کنترل شکست سد

Fig 8. Reaction and readiness check for dam failure control

به‌روزرسانی مداوم مطالعات هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی: با توجه به تغییرات اقلیمی و عوامل دیگر، مطالعات هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی سدها باید به صورت دوره‌ای به‌روزرسانی شوند تا اطمینان حاصل شود که ارزیابی ریسک بر اساس آخرین اطلاعات انجام می‌شود.

تقویت نظارت بر سدها: نظارت مستمر بر وضعیت سدها و انجام تعمیرات و نگهداری به‌موقع، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از فناوری‌های نوین مانند حسگرها و سیستم‌های نظارت از راه دور می‌تواند به بهبود کیفیت نظارت کمک کند.

ایجاد سیستم‌های هشدار چندمرحله‌ای: سیستم‌های هشدار باید به گونه‌ای طراحی شوند که بتوانند هشدارهای اولیه، هشدارهای جدی و دستور تخلیه را صادر کنند. این سیستم‌ها باید با سایر سیستم‌های هشدار مانند سیستم‌های هشدار زلزله و سیلاب نیز هماهنگ باشند.

توسعه برنامه‌های آمادگی اضطراری جامع: برنامه‌های آمادگی اضطراری باید شامل تمام مراحل از جمله پیش‌بینی، هشدار، تخلیه، امداد و نجات و بازسازی باشد. این برنامه‌ها باید با مشارکت همه دستگاه‌های اجرایی و مردم محلی تدوین و اجرا شوند.

توجه به ابعاد اجتماعی و روانشناسی بحران: در کنار ابعاد فنی و مهندسی، ابعاد اجتماعی و روانشناسی بحران نیز باید مورد توجه قرار گیرد. آموزش‌های روانشناسی برای مقابله با استرس و اضطراب در شرایط بحرانی، می‌تواند به کاهش اثرات روانی حادثه کمک کند.

توسعه تحقیقات در زمینه شکست سد: تحقیقات در زمینه شکست سد باید به صورت مستمر ادامه یابد تا شناخت ما از این پدیده افزایش یابد و روش‌های پیش‌بینی و مقابله با آن بهبود یابد.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسنده این پژوهش اعلام می‌دارد که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این پژوهش ندارد.

۶- منابع

Atallah, T. A. (2002). A review on dams and breach parameters estimation. *Hydrosystem Engineering M. Sc* (Doctoral dissertation, Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University).

Bigdeli, M., Taheri, M., & Mohammadian, A. (2022). Numerical modeling of dam-break flood flows for dry and wet sloped beds. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 29(3), 259–269. https://doi.org/10.1080/09715010.2022.2052986

Costa, J. E. (1988). Floods from dam failures. *Open-File Report*, 85-560. https://doi.org/10.3133/ofr85560

Das, S., Priyadarshana, A., & Grebby, S. (2024). Monitoring the risk of a tailings dam collapse through spectral analysis of satellite InSAR time-series data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(8), 2911-2926. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.00781

DHI. (2024). MIKE21 user manual. *DHI Software*.

Dorn, H., Vetter, M., & Höfle, B. (2014). GIS-based roughness derivation for flood simulations: a comparison of orthophotos, LiDAR and crowdsourced geodata. *Remote sensing*, *6*(2), 1739-1759. https://doi.org/10.3390/rs6021739

Hydrologic Engineering Center. (2014). HEC-RAS river analysis system user's manual. *U.S. Army Corps of Engineers*.

Froehlich, D. C. (2008). Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), 1708-1721. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708)

Haltas, I., Elçi, S., & Tayfur, G. (2016). Numerical simulation of flood wave propagation in two-dimensions in densely populated urban areas due to dam break. *Water Resources Management*, 30, 5699-5721. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1344-4

Mostafa, M. M., & Zhenzhong, S. (2023). Effect of zones' dimensions and geometry on seepage through zoned earth dams. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1), 46. https://doi.org/10.1186/s44147-023-00223-7

Pareta, K. (2024). 1D-2D hydrodynamic and sediment transport modelling using MIKE models. *Discover Water*, 4(1), 94. https://doi.org/10.1007/s43832-024-00130-9

Sun, R., Wang, X., Zhou, Z., Ao, X., Sun, X., & Song, M. (2014). Study of the comprehensive risk analysis of dam-break flooding based on the numerical simulation of flood routing. Part I: model development. *Natural hazards*, 73, 1547-1568. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1154-z

Urzică, A., Mihu-Pintilie, A., Stoleriu, C. C., Cîmpianu, C. I., Huţanu, E., Pricop, C. I., & Grozavu, A. (2021). Using 2D HEC-RAS modeling and embankment dam break scenario for assessing the flood control capacity of a multi-reservoir system (NE Romania). *Water*, 13(1), 57. https://doi.org/10.3390/w13010057

Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(5), 389–397. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:5(389)

Wang, H., Li, D., Sheng, T., Sheng, J., Jing, P., & Zhang, D. (2023). A modeling of human reliability analysis on dam failure caused by extreme weather. *Applied Sciences*, 13(23), 12968. https://doi.org/10.3390/app132312968