

Research Paper

Hydraulic Simulation of the Failure of the Embankment Dams: (Part 2: Risk Analysis and Identifying of Vulnerable Points)

Amir Reza Kavosizadeh¹, Reza Barati², Ali Foroudi^{3*}, Hossein Saboorkazeran⁴

¹ MSc of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

² Head of Applied Research Group, Regional Water Authority of Khorasan Razavi, r88barati@gmail.com; reza.barati@modares.ac.ir

^{3*} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Science, Quchan University of Technology, Quchan, Iran. aliforoudi@qiet.ac.ir

⁴ Expert at Water Resources Basic Studies, Regional Water Authority of Khorasan Razavi, saboor@khrw.ir



[10.22125/iwe.2024.443144.1794](https://doi.org/10.22125/iwe.2024.443144.1794)

Received:
January 18, 2024
Accepted:
May 23, 2024
Available online:
October 13, 2024

Keywords:
**Dam-break, Flood Risk
Zoning, Crisis
Management,
Vulnerability**

Abstract

In the first part of this study, hydraulic modeling of failure of the Tabarakabad and Cahcahe dams in Khorasan Razavi province was analyzed and discussed. In the second part, the consequences of the failure of these two dams will be examined. In order to assess the risk, a method based on descriptive-analytical (quantitative-qualitative) approaches has been proposed and a questionnaire has been prepared in this regard. Risk assessment and analysis of these dams in the proposed method, which is consistent with passive defense approaches, was implemented with the help of experts in this field and with the help of a coded program. Finally, for different scenarios such as overtopping, piping and sudden failures (subversive actions), assets valuation of downstream dams, threats, vulnerabilities, risk zoning maps and drafting of emergency action plan is presented. According to the results, it was indicated that the risk of the Tabarakabad dam is higher than Cahcahe dam and in case of an accident, the villages adjacent to the dam and the city of Quchan will suffer serious damage. However, the correct operation of the Cahcahe dam overtopping can play an important role in stabilizing and preventing the occurrence of crisis.

1. Introduction

By increasing human interference in the environment, flood damage in catchment area has increased and endangered its stability. So, analysis of dam break consequences is considered one of the most important studies in crisis management and water engineering contexts. Previously, Heydari [6] presented an emergency action plan to deal with sudden failure of Urmia's Shahrchai Dam and Amini et al. (2021) have also investigated the effects of dam failure on downstream of dam and lands using HEC-RAS for the safe operation of two successive dams in Kurdistan province and by optimizing the storage volume of these two dams, the presented a decision - making model for safe operation and determined that in most cases the failure of the upstream dam will result in the failure of the downstream dam. In the first part of this research, dam failure hydraulic modeling of Tabarakabad and Chahchaheh in Khorasan Razavi province has been analyzed. In the second part, the consequences of failure of these two dams will be discussed. In order to assess the risk of failure a method based on descriptive - analytical approaches has been proposed and a questionnaire was developed and operated by using passive defense approaches and the help of experts in this field and by using a code program. So, finally

in return for different scenarios such as failures of piping, overtopping and sudden types (acts of sabotage), valuating the assets downstream of the dams, threats, vulnerabilities, risk zoning maps and a draft of emergency measures are presented.

2. Materials and Methods

In this study, in order to analyze the risk, a qualitative-quantitative and descriptive-analytical approach based on passive defense science has been used. The appropriate collection and classification of known assets and hazards is done as collecting qualitative information step. Then, using the opinions of the authorities, defense experts, university professors and using a questionnaire method, qualitative variables are converted to quantitative variables. One of the innovations in this research is to establish a relationship between numerical analysis and risk assessment. Simulation of flood due to dam break and its maximum flood zoning are estimated, making a relationship between numerical simulation and risk assessment is possible. For this purpose, the comprehensive approach in risk analysis and assessment will be used in which the risk value (hazard zonation maps) is determined after implementing GIS maps for the three mentioned contexts. The assets will be determined using satellite maps and weighting according to the resident population in the downstream of the dams and by weighting coefficients extracted from questionnaire (importance of assets). With the help of numerical simulation of flood zoning and GIS maps, the areas under the flood are identified as potential threats and the vulnerability of the downstream properties, considering the speed and height of the flood waves scored in the first part of the study.

3. Results

According to the results, the vulnerable points for Tabarakabad dam (with higher quantitative amounts) are extended in a broader area than the Chahchaheh dam. Risk zoning maps for different failure scenarios indicate that the sudden failure risk for Tabarakabad dam is lower than two other types of failure and overtopping failure probability is far below the probability of piping and hence stability and control of seepage from dam body can significantly reduce the irreparable consequences of failure of this dam. For the Chahchaheh dam, there is a similar situation for sudden failure, except that for areas other than the points near the dam, other points (east region) are facing a relatively low risk level. Also, by assessing the flood zoning and approximate arrival time of flood wave to the area of Quchan city, it was determined that there is enough time to prevent the casualties of the city and all of the casualties are related to the surrounding villages to the dam. In addition, considering the height of the flood, all agricultural lands and gardens will be destroyed and due to the topography of the downstream bed, a serious damage would be imposed on most buildings in this city as well as part of the communication roads. Therefore, according to the zoning map of risk, two areas have been proposed for the settlement of the people in the time of the crisis, and also proposed to make the communication way to the region wider and more available.

4. Discussion and Conclusion

According to first part of the study for the three scenarios of sudden, piping and overtopping failures, it was determined that the probability of overtopping failure for Tabarakabad dam was much lower than that of the piping failure where stability and leakage control of the dam body could significantly reduce the adverse consequences of failure of this dam. Also, with the analysis of the zoning maps and approximate arrival time of the flood wave and its height, the points exposed to inundation and the incidence of damage have been determined, which indicates the existence of sufficient opportunity to prevent criminal damage to the city population and to the neighboring villages and serious damage to most of the buildings and some of the communication ways. According to the risk zoning map, safe areas have been proposed to save individuals during the crisis. For Chahchaheh dam, regarding the different failure scenarios and contrary to Tabarakabad dam, there has been a possibility of an

overtopping failure that is sufficient considering the minimum arrival time of flood wave in order to save the lives of people living in the village.

5. Six important references

- 1). Amini, A., Bahrami, J., & Miraki, A. (2022). Effects of dam break on downstream dam and lands using GIS and Hec Ras: a decision basis for the safe operation of two successive dams. *International Journal of River Basin Management*, 20(4), 487-498.
- 2). Akbari, G. H., & Barati, R. (2012). Comprehensive analysis of flooding in unmanaged catchments. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 165, No. 4, pp. 229-238). Thomas Telford Ltd.
- 3). Barati, R., Akbari, G. H., & Rahimi, S. (2013). Flood Routing of an Unmanaged River Basin Using Muskingum--Cunge Model; Field Application and Numerical Experiments. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 2(6).
- 4). Smith, G.P., Davey, E. K. and Cox, R. (2014). Flood Hazard. WRL Technical Report.
- 5). Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters, *Journal of hydraulic engineering*, vol. 130, pp. 389-397, 2004.
- 6). Zhang, L., Xu, Y. and Jia, J. (2009). "Analysis of earth dam failures: A database approach," *Georisk*, vol. 3, pp. 184-189.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



شبیه‌سازی هیدرولیکی شکست سدهای خاکی: (بخش دوم: تحلیل ریسک و شناسایی نقاط آسیب‌پذیر)

امیررضا کاوسی زاده^۱، رضا براتی^۲، علی فرودی^۳، حسین صبورکارزرا^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳

مقاله پژوهشی

چکیده

در بخش اول این تحقیق، مدل‌سازی هیدرولیکی شکست سدهای تبارک‌آباد و چهچهه در استان خراسان رضوی مورد تحلیل و بحث قرار گرفت. در بخش دوم، تبعات شکست این دو سد بررسی خواهد شد. به منظور ارزیابی ریسک روشی مبتنی بر رویکردهای توصیفی-تحلیلی (کمی-کیفی) پیشنهاد شده و در این راستا پرسشنامه‌ای تهیه شده است. ارزیابی و تحلیل ریسک این سدها در روش پیشنهادی که با رویکردهای پدافند غیرعامل همخوانی دارد با کمک صاحب‌نظران این حوزه و با کمک برنامه‌کدنویسی شده عملیاتی گردید. در نهایت به ازای سناریوهای مختلف نظیر شکست روگذری، رگاب و شکست آبی (اقدامات خرابکارانه)، ارزش‌گذاری دارایی‌های پایین دست سدها، تهدیدها، نقاط آسیب‌پذیر، نقشه‌های پهنه‌بندی ریسک و پیش‌نویسی از برنامه اقدامات اضطراری ارائه گردیده است. مطابق نتایج به دست آمده مشخص گردید که ریسک سد تبارک‌آباد نسبت به سد چهچهه درجه بالاتری دارد و در صورت بروز حادثه، روستاهای مجاور سد و همچنین شهر قوچان دچار آسیب‌های جدی خواهند شد. با اینحال عملکرد صحیح سرریز سد چهچهه می‌تواند در پایداری و جلوگیری از وقوع بحران نقش بسزایی ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: شکست سد خاکی، پهنه‌بندی ریسک سیلاب، مدیریت بحران، آسیب‌پذیری.

^۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، kavousi@hotmail.com

^۲ دکتری تخصصی مهندسی عمران، رئیس گروه تحقیقات کاربردی، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، reza.barati@modares.ac.ir

^۳ گروه مهندسی عمران، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران، aliforoudi@qiet.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۴ دکتری تخصصی مهندسی عمران، کارشناس مطالعات پایه منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، saboor@khrw.ir



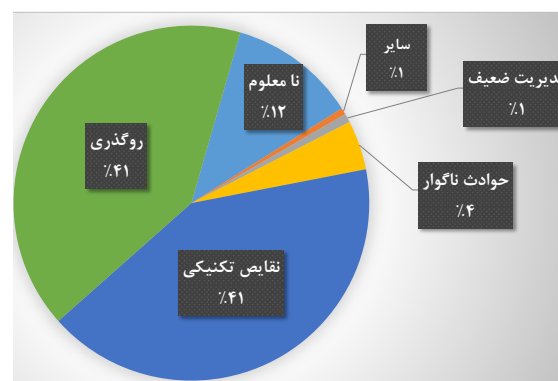
نا معلوم

شکل (۲): تقسیم بندی دلایل شکست سدهای خاکی Zhang et al. (2009)

Fan et al. (2021) به بررسی مروری آخرین روش های مرتبط با شکست سدهای خاکی از جمله استفاده از رویکرد سنجش از دور و روش های ژئوفیزیکی پرداختند. Urzică et al. (2021) با استفاده از مدل هیدرولیکی به شبیه سازی شکست سد دو بعدی در سد خاکی پرداختند. Gaagai et al. (2022) مدل سازی هیدرولیکی و تحلیل عدم قطعیت در سد یابوس را مد نظر قرار دادند. Bilali et al. (2022) یک رویکرد احتمالاتی کاربردی برای شبیه سازی تلفات انسانی در مناطق شهری ناشی از شکست سد ارائه دادند. Garsole et al. (2023) بررسی مروری کاربرد مدل های هوش مصنوعی برای پیش بینی نشت از سدها را ارائه نمودند. Rizzo et al. (2023) به بررسی تحلیل

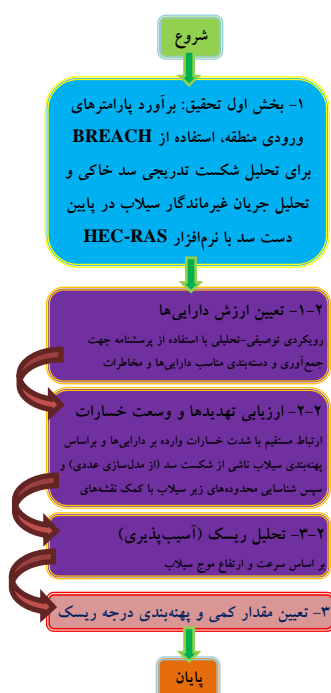
مقدمه

تحلیل تبعات شکست سد یکی از مهم ترین مطالعات در حوزه مدیریت بحران و مهندسی آب به حساب می آید (Barati, 2010; Ghandehary and Barati, 2018; Akbari et al. 2012; Amini et al. 2021; Hajiabadi et al. 2022; Sarvestan et al. 2024). Maharjan and Takahashi (2014) نشان دادند که احتمال وقوع و میزان خرابی توده های خاکی ناهمگن نسبت به توده های خاکی همگن بیشتر است و از آنجاکه اغلب سدهای خاکی از خاک های گوناگونی تشکیل شده اند، لذا بررسی احتمال وقوع روان گرایی در این سدها اهمیت ویژه ای دارد. بر اساس مطالعات Zhang et al. (2009) بر روی ۱۰۶۵ سد خاکی که دچار شکست شده اند نزدیک به ۸۰ درصد موارد شکست ناشی از روگذری و نقایص تکنیکی بیان می شود. نمودار دایره ای در شکل ۱ درصد هر یک از علل شکست سدها را در آن مطالعات نمایش می دهد. همچنین در مطالعات آنان عوامل ممکن شکست سد به زیرمجموعه هایی تقسیم می شود. این تقسیم بندی در شکل ۲ نمایش داده شده است. با وجود آنکه دلایل ذکر شده در این شکل، مخصوص سدهای خاکی است، تعدادی از این دلایل برای انواع دیگر سدها نیز قابل تعمیم است.



شکل (۱): دلایل شکست سدهای خاکی Zhang et al. (2009)

مناسب برای از بین بردن خطر و یا کنترل آن در زمانی که خطر را نمی‌توان از بین برد (کنترل ریسک) دنبال می‌شود. از دیدگاه پدافند غیرعامل، ارزیابی ریسک می‌بایست در سه حوزه مورد مطالعه قرار گیرد که مربوط به ارزش‌داری‌ها (ارزش اقتصادی و ریالی‌داری و سرمایه)، ارزیابی تهدیدها (و سپس وسعت خسارات وارده)، و سوم در ارتباط با تحلیل ریسک (آسیب‌پذیری) می‌باشد. در نهایت مقدار کمی درجه ریسک، وضعیت موجود هر مورد مطالعاتی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): فرآیند تحلیل هیدرولیکی و ریسک شکست سد

رویکردی کیفی-کمی این مطالعه مبتنی بر روش توصیفی-تحلیلی بوده که در آن به‌منظور جمع‌آوری و دسته‌بندی مناسب‌داری‌ها و مخاطرات شناخته‌شده و تکمیل رده‌های این دسته‌بندی از روش کتابخانه‌ای، اسنادی و جستجوی اینترنتی (جمع‌آوری اطلاعات کیفی) استفاده شده است. شایان ذکر است که یکی از نوآوری‌های صورت گرفته در این تحقیق، ایجاد ارتباط بین تحلیل عددی و ارزیابی ریسک است. برای اغلب روش‌های مرسوم در مهندسی پدافند غیرعامل در برآورد تهدیدها و ریسک از پارامترهای توصیفی استفاده می‌شود و معمولاً حادثه محتمل را به‌صورت عددی شبیه‌سازی نمی‌کنند، اما به

احتمالاتی و عدم قطعیت شکست سد پرداختند. Verma et al. (2023) طراحی دبی اوج خروجی ناشی از روگذری سد خاکی را با کمک رویکرد رگرسیونی و مدل‌سازی انجام دادند.

سدهای خاکی مورد مطالعه در این تحقیق سد تبارک‌آباد و سد چهچهه می‌باشد. به‌منظور ارزیابی ریسک روشی مبتنی بر رویکردهای توصیفی-تحلیلی پیشنهاد و از طریق اخذ نظرات متخصصان و کارشناسان این حوزه و تبدیل متغیرهای کیفی به کمی تبدیل شده است. ارزیابی و تحلیل ریسک این سدها در روش پیشنهادی که با رویکردهای پدافند غیرعامل همخوانی دارد با کمک صاحب‌نظران این حوزه و با کمک برنامه‌کدنویسی شده عملیاتی گردید و در نهایت به ازای سناریوهای مختلف نظیر شکست روگذری، رگاب و آبی (اقدامات خرابکارانه)، ارزش‌گذاری‌داری‌های پایین دست سدها، تهدیدها، نقاط آسیب‌پذیر، نقشه‌های پهنه‌بندی ریسک ترسیم و پیش‌نویسی از برنامه اقدامات اضطراری تدوین خواهد شد.

مواد و روش‌ها

همانطور که در بخش اول تحقیق بحث شد، پس از وقوع پدیده شکست سد، جریانی از نوع غیردائمی متغیر سریع ایجاد شده که توسط معادلات سنت و نانت بیان می‌شوند. به‌منظور تحلیل هیدرولیکی از مدل رایگان HEC-RAS استفاده گردید و نتایج شبیه‌سازی دوبعدی جریان در بخش اول تحقیق ارائه و مورد بحث قرار گرفت. فرآیند تحلیل هیدرولیکی شکست سد از ابتدا تا انتها در شکل ۳ ارائه شده است که در بخش دوم فرآیندهای مربوط به تعیین ارزش‌داری‌ها، ارزیابی تهدیدها و تحلیل ریسک و اضافه شده است.

Sattar et al. (2021) به بررسی ارزیابی خطر در پایین دست دریاچه‌های یخچالی پرداختند. برای شناسایی تهدیدها، آسیب‌ها و پیامدهای ناشی از خطرات مربوط به هر زیرساختی، روش‌های علمی مختلفی از جمله ارزیابی و تحلیل ریسک وجود دارد که در آن شناسایی خطرات و عوامل آسیب‌زننده، تجزیه و تحلیل و ارزیابی ریسک مربوط به آن خطر (شناسایی آسیب‌پذیری‌ها و تحلیل آن) و تعیین راه‌های

شناسایی تهدیدها ارتباط مستقیمی با شدت خسارات وارده بر دارایی‌ها دارد و از آنجایی که سیلاب ناشی از شکست سد و پهنه‌بندی آن در این تحقیق مدل‌سازی می‌شود، لذا به نوعی محدوده‌هایی که در معرض تهدیدهای بالقوه هستند با کمک شبیه‌سازی عددی مشخص می‌شوند و پس از تعیین پهنه‌بندی سیلاب، با کمک نقشه‌های GIS محدوده‌هایی که زیر سیلاب قرار می‌گیرند به عنوان تهدیدهای بالقوه تعیین می‌شوند (Akbari and Barati 2012; Barati et al. 2012, 2013; Atashi et al. 2023). میزان آسیب‌پذیری دارایی‌ها در پایین دست شکسته شده، به سرعت و ارتفاع موج سیلاب بستگی دارد که در بخش اول تحقیق و پس از تحلیل سیلاب ناشی از شکست، در طول مسیل محاسبه شده و بر همین اساس، آسیب‌پذیری امتیازدهی می‌شود.

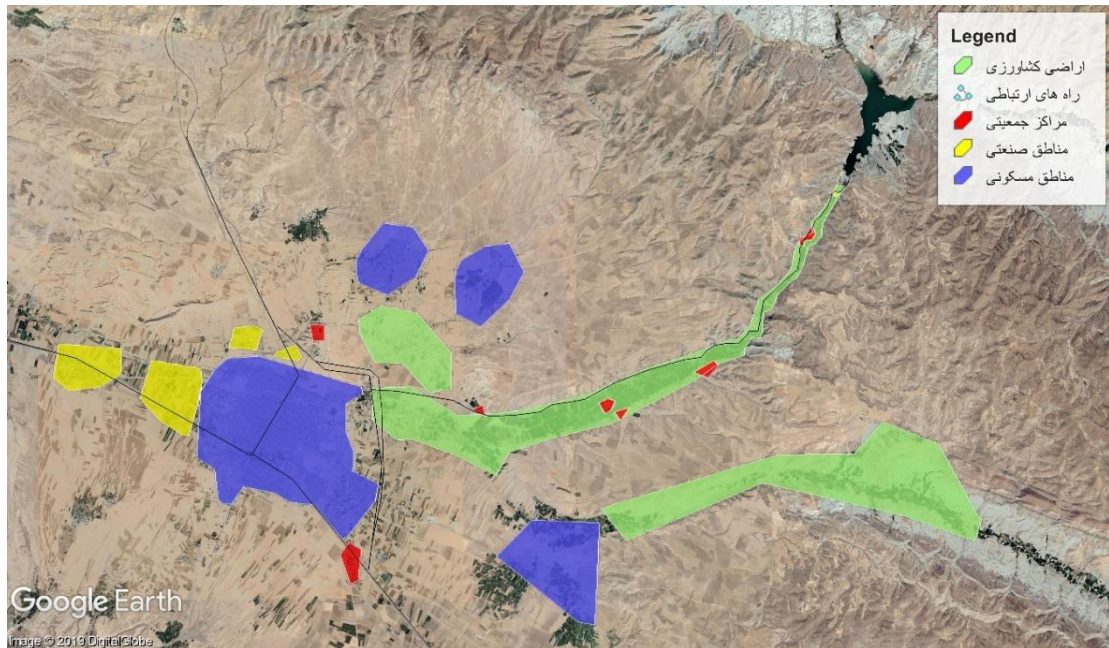
نتایج و بحث

در بخش اول تحقیق مدل‌سازی سه سناریو برای شکست سدهای مورد مطالعه انجام گردید. همچنین طبق پهنه‌بندی سیلاب بدست آمده ناشی از سناریوهای مختلف شکست، زمان تقریبی رسیدن پیشانی موج سیلاب به محدوده شهر قوچان در حدود ۱ ساعت و نیم تا ۲ ساعت با ارتفاع پیشانی سیلاب حدود ۱۵ تا ۲۰ متر پس از وقوع شکست سد بوده، در حالیکه برای سد چهچهه، امکان بروز شکست روگذری وجود دارد و کمترین زمان تقریبی رسیدن موج سیلاب پس از نشانه‌های شکست تدریجی در حدود ۴۵ دقیقه تا ۱ ساعت برآورد گردیده است. در ادامه تحلیل و پهنه‌بندی ریسک بر مبنای علم پدافند غیرعامل و با رویکردی کمی-کیفی توسعه یافته است. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب دارایی‌های پایین دست سد تبارک‌آباد و چهچهه را نمایش می‌دهند.

جهت اینکه در این تحقیق، شبیه‌سازی سیلاب ناشی از شکست سد صورت می‌گیرد و پهنه‌بندی حداکثری سیلاب آن تخمین زده می‌شود، ایجاد ارتباط بین شبیه‌سازی عددی و برآورد ریسک امکان‌پذیر است. بدین منظور از رویکرد جامع در تحلیل و ارزیابی ریسک استفاده خواهد شد (عطایی کجویی، ۱۳۹۶). در این رویکرد پس از پیاده‌سازی نقشه‌های GIS برای سه حوزه اشاره شده لازم است میزان ریسک با توجه به فرمول زیر تعیین گردد:

$$R = T \cdot V \cdot C \quad (1)$$

که در آن R بیانگر میزان ریسک، T امتیاز مربوط به تهدید، V امتیاز مربوط به آسیب‌پذیری و C امتیاز مربوط به پیامد از دست دادن المان مورد مطالعه یا به عبارتی ارزش دارایی است. به منظور تعیین محدوده‌های با ریسک بالا تنها کافی است امتیازات موجود در هر یک از لایه‌های GIS را در یکدیگر ضرب نمود و تصویری را از نقاط با ریسک بالا (نقشه‌های پهنه‌بندی ریسک) نشان داد. در تحقیق حاضر، دارایی‌ها در ۵ گروه شامل زمین‌های کشاورزی (به عنوان اصلی‌ترین ابزار یا وسیله درآمد در مناطق مورد مطالعه)، تأسیسات زیربنایی صنایع، معادن و کارخانه‌ها، راه‌های ارتباطی، مناطق مسکونی (شامل ساختمان‌های متعلق به شهر یا روستاها) و مراکز جمعیتی و نیروهای انسانی (مانند دانشگاه‌ها، ورزشگاه‌ها و ...) تقسیم شده که برای هر یک از سدهای مورد نظر چه از لحاظ ارزش و چه از لحاظ محدوده متفاوت است (قلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶). لذا ابتدا با استفاده از نقشه‌های ماهواره‌ای، این دارایی‌ها در محدوده مورد مطالعه مشخص می‌شوند. وزن دهی مراکز جمعیتی بسته به جمعیت ساکن در پایین دست هر سد و توسط ضرایب وزنی مستخرج از پرسشنامه که اهمیت هر یک از دارایی‌ها و ضرایب وزنی متناظر با آنها را مشخص خواهد نمود، به دست می‌آید. از طرف دیگر



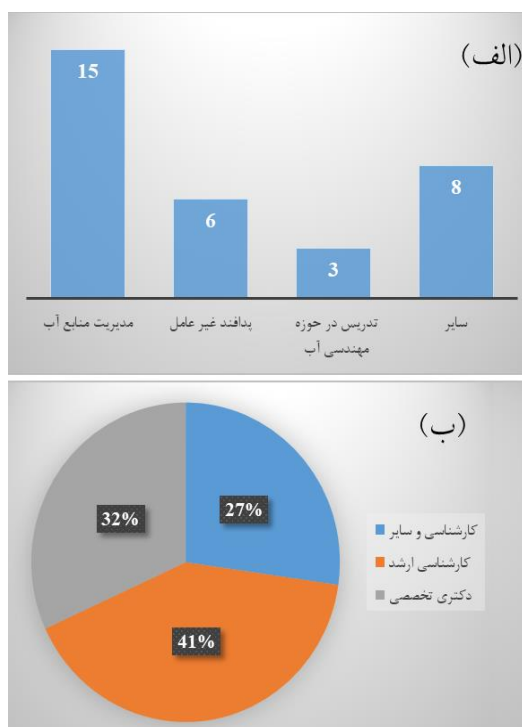
شکل (۴): دارایی‌های پایین‌دست سد تبارک‌آباد

به‌عنوان نمونه در حالت شکست رگاب برای سد تبارک‌آباد و چهچه در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همانطور که از مشاهده این شکل‌های پیداست، محدوده ارزش دارایی‌های پایین‌دست سد تبارک‌آباد با توجه به وجود شهر قوچان با جمعیت قابل توجه در ناحیه جنوب غربی آن نسبت به سد چهچه بالاتر است.

نظرات جامعه آماری شامل ۲۲ نفر از متخصصین مطابق نمودارهای شکل ۶ استفاده شده است. در جداول ۱ و ۲ ارزش دارایی‌های پایین‌دست سدهای مورد مطالعه به تفکیک مورد مطالعاتی بر اساس انتخاب جامعه متخصصان و خبرگان ارائه شده است. مطابق با نتایج بدست آمده از نظرات جامعه آماری معرفی شده، پهنه‌بندی ارزش دارایی‌ها



شکل (۵): دارایی‌های پایین‌دست سد چهچه



شکل (۶): مشخصات شرکت کنندگان در نظرسنجی (الف) تخصص و (ب) میزان تحصیلات

جریان و آسیب پذیری احتمالی ناشی از عمق سیلاب (فارغ از تأثیر سرعت جریان) به ترتیب در جداول ۳ تا ۵ ارائه شده است.

پاسخهای جامعه متخصصان و خبرگان در خصوص دامنه تهدیدها (فاصله تا پهنه بندی سیلاب حاصل شده از تحلیل عددی)، آسیب پذیری موج سیلاب ناشی از سرعت

جدول (۱): تعیین دارایی های پایین دست سد تبارک آباد براساس انتخاب های جامعه آماری

دارایی	امتیاز	میانگین وزنی نظرات
	۲ ۴ ۶ ۸ ۱۰	
زمین کشاورزی	۵ ۶ ۸ ۳ ۰	۴٫۸
تأسیسات زیربنایی، صنایع، معادن و کارخانه ها	۲ ۶ ۷ ۷ ۰	۵٫۷
راه های ارتباطی	۰ ۴ ۴ ۸ ۶	۷٫۵
مناطق مسکونی	۰ ۰ ۴ ۵ ۱۳	۸٫۸
مراکز جمعیتی و نیروهای انسانی	۳ ۷ ۵ ۳ ۴	۵٫۸



جدول (۲): تعیین دارایی‌های پایین‌دست سد چهجه براساس انتخاب‌های جامعه آماری

دارایی	امتیاز	میانگین
وزنی نظرات	۲ ۴ ۶ ۸ ۱۰	
زمین کشاورزی	۸ ۶ ۴ ۲ ۰	۴٫۵
تأسیسات زیربنایی، صنایع، معادن و کارخانه‌ها	۱۶ ۱ ۴ ۱ ۰	۳٫۱
راه‌های ارتباطی	۵ ۹ ۶ ۲ ۰	۴٫۵
مناطق مسکونی	۲ ۱ ۴ ۸ ۷	۷٫۵
مراکز جمعیتی و نیروهای انسانی	۶ ۵ ۴ ۵ ۲	۵٫۳

جدول (۳): انتخاب‌های جامعه آماری برای تعیین ضرایب تهدید

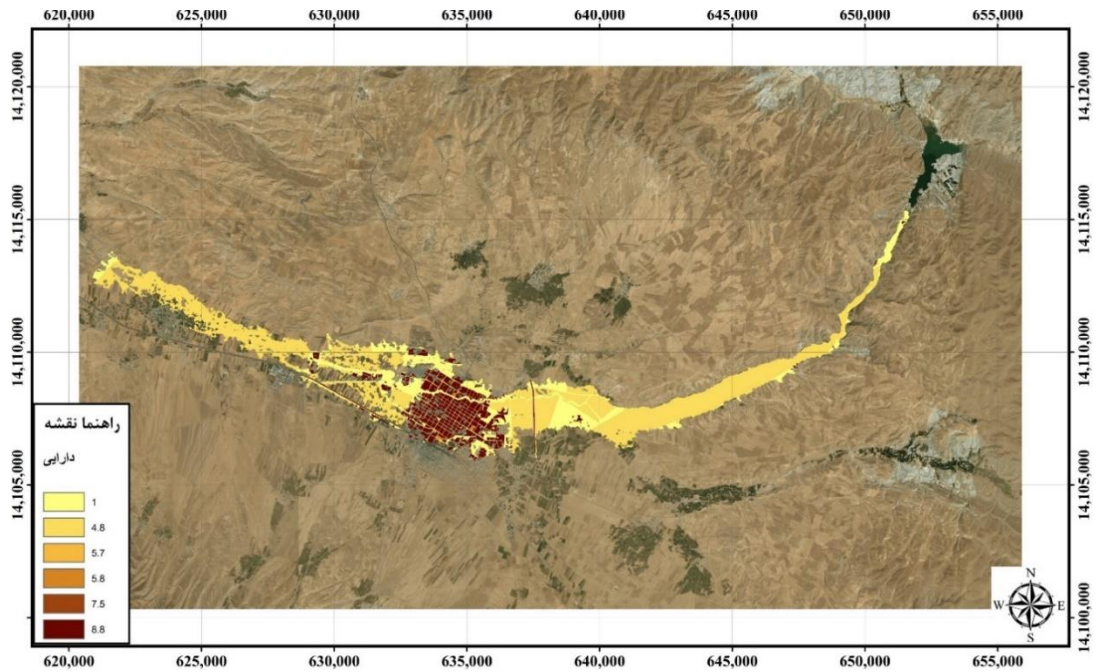
تعداد لایه	۲	۳	۴	۵	۶	۷
فاصله به سد (متر)	۵	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	۱۰	۲	۵	۰	۰	۰
۲۵	۱	۲	۲	۱	۱	۲
۵۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
۱۰۰	۱	۰	۱	۲	۰	۰
۲۰۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
میانگین تعداد لایه‌های انتخابی	۴٫۱۴	۴٫۱۴	حداکثر فاصله مؤثر	۱۴۰۰٫۴۵۵		

جدول (۴): انتخاب‌های جامعه آماری برای تعیین ضرایب آسیب ناشی از سرعت

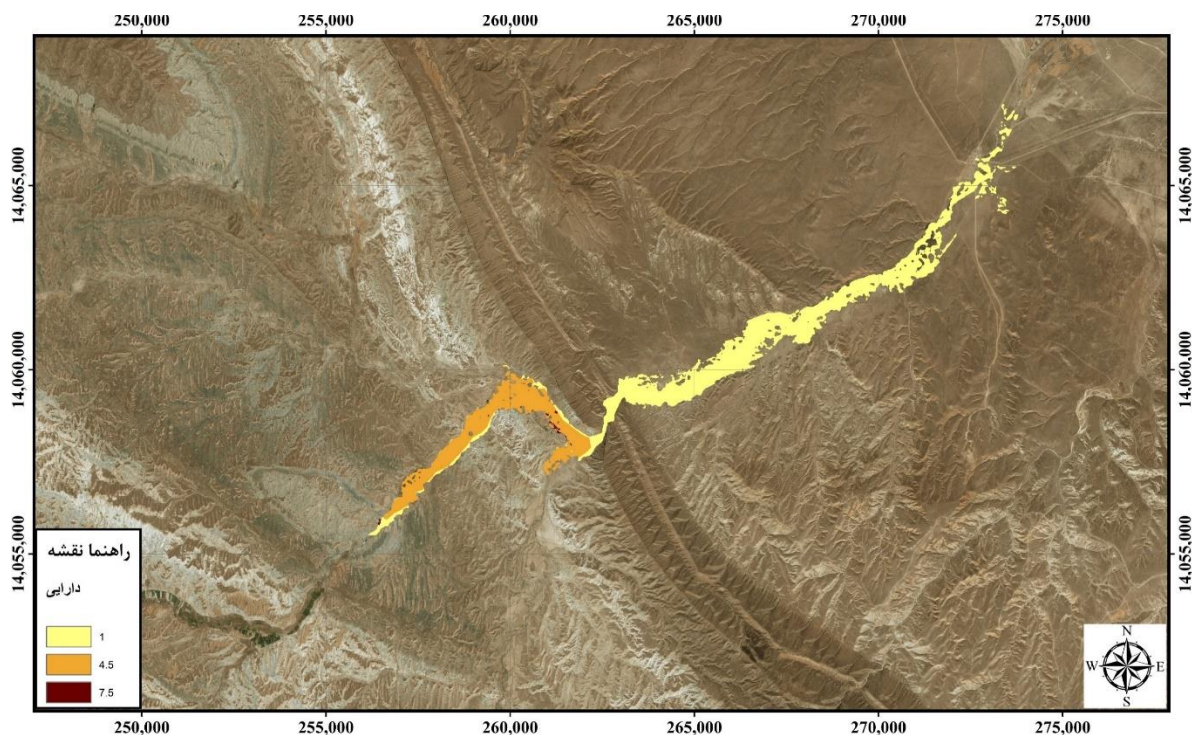
تعداد لایه	۲	۳	۴	۵	۶
۰٫۲۵	۰	۱	۰	۰	۱
۰٫۵	۰	۱	۳	۲	۱
۱	۱	۱	۴	۱	۰
۱٫۵	۰	۳	۲	۱	۰
۳	۳	۰	۰	۰	۰
میانگین تعداد لایه‌های انتخابی	۴	۴	سرعت حداکثر	۲۰۵۸	

جدول (۵): انتخاب‌های جامعه آماری برای تعیین ضرایب آسیب ناشی

از سرعت					
تعداد لایه	۲	۳	۴	۵	۶
فاصله به متر	۱	۴	۱	۱	۲
	۲	۰	۴	۰	۰
	۳	۰	۱	۲	۰
	۴	۰	۰	۱	۰
	۵	۰	۰	۰	۰
میانگین تعداد لایه‌های انتخابی	۳٫۶۸	عمق حداکثر (متر)	۵		



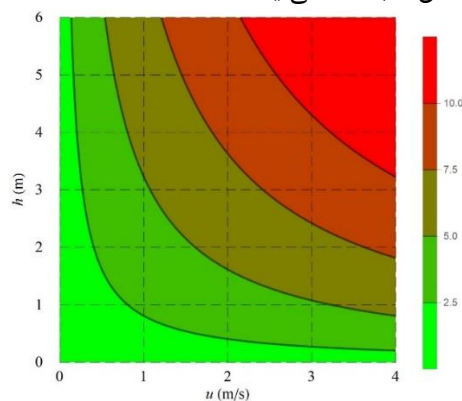
شکل (۷): نقشه ارزش داریب‌های سد تبارک‌آباد متناسب با سناریو شکست رگاب



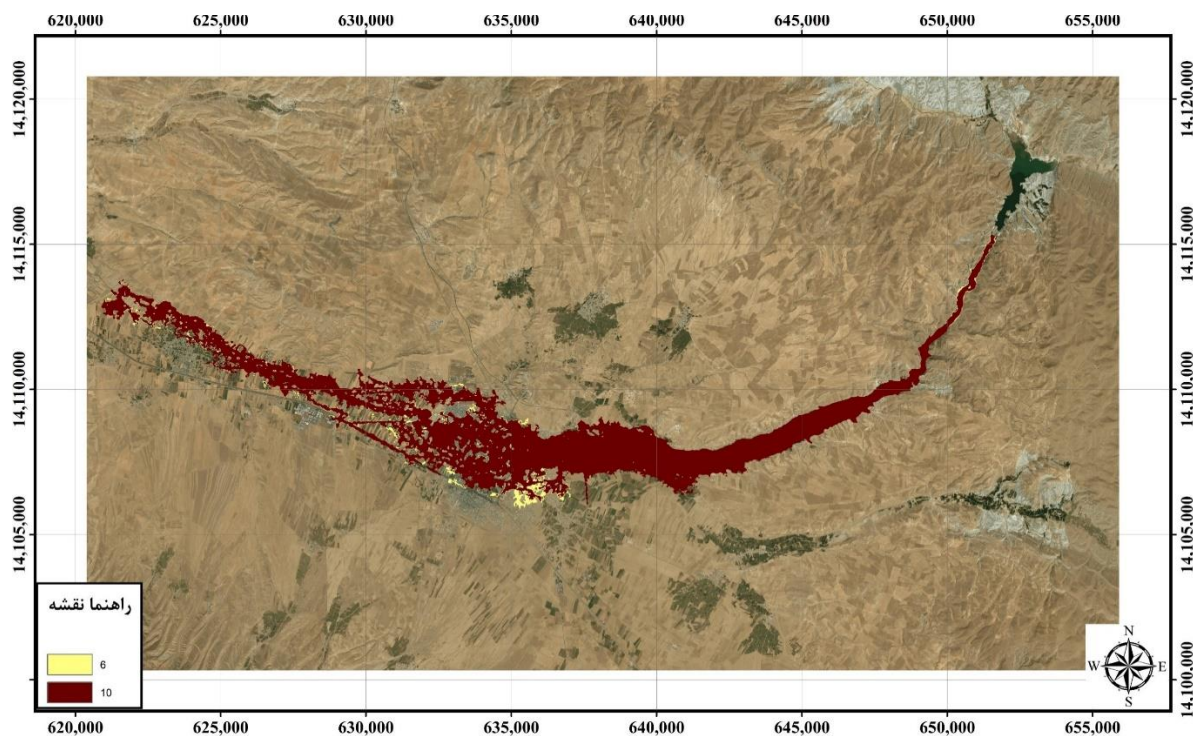
شکل (۸): نقشه ارزش دارایی‌های سد چهچهه متناسب با سناریو شکست رگاب

از آنجا که شناسایی تهدیدها ارتباط مستقیمی با شدت خسارات وارده بر دارایی‌ها دارد و مدل‌سازی انجام شده برای سیلاب ناشی از شکست سد و پهنه‌بندی آن در بخش اول این تحقیق، محدوده‌هایی که در معرض تهدیدهای بالقوه وجود دارند با کمک شبیه‌سازی عددی مشخص شده است. لذا پس از تعیین پهنه‌بندی سیلاب، با کمک نقشه‌های GIS محدوده‌هایی که زیر سیلاب ناشی از شکست سد قرار می‌گیرند به‌عنوان تهدیدهای بالقوه تعیین می‌شوند. نقشه‌های پهنه‌بندی تهدیدها برای سد تبارک‌آباد و چهچهه و به‌عنوان نمونه برای سناریو شکست رگاب برای دو محدوده کمتر از ۶ و بالاتر از آن در اشکال ۱۰ و ۱۱ ارائه شده‌اند.

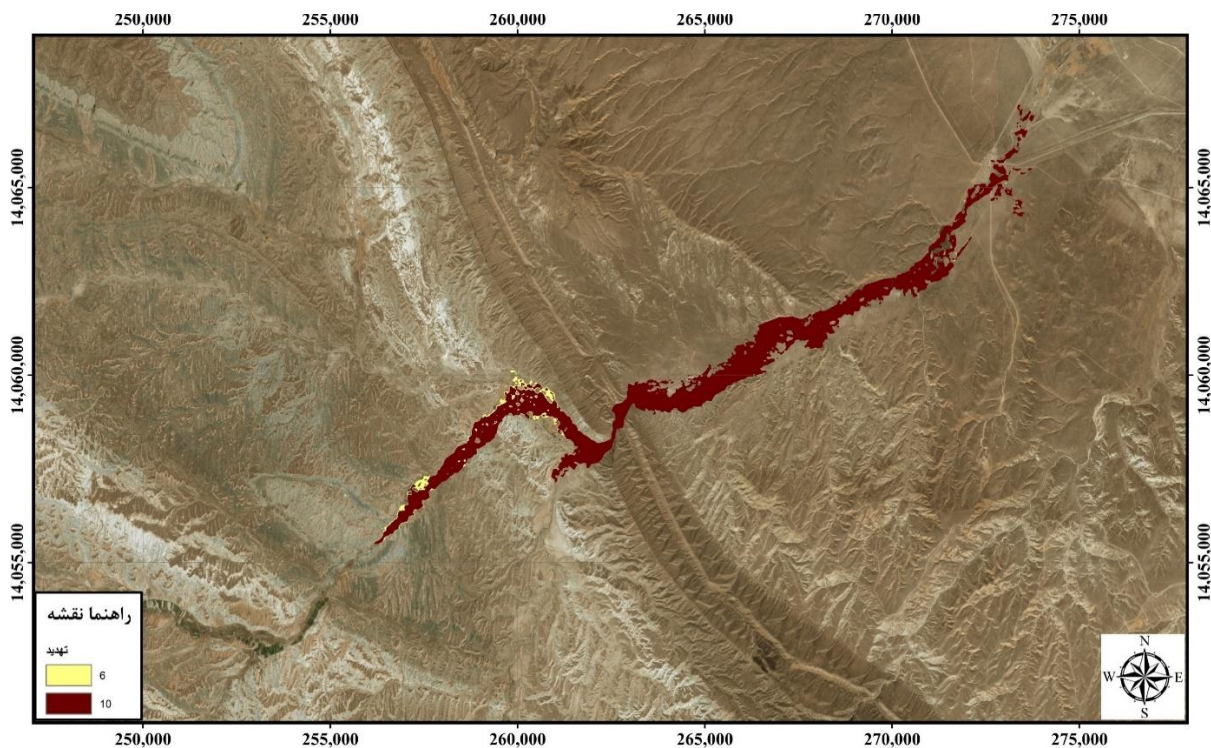
در نهایت با استفاده از داده‌های جداول ۴ و ۵، میزان آسیب‌پذیری با در نظر گرفتن ۴ لایه محاسباتی به‌صورت شکل ۹ بدست می‌آید.



شکل (۹): منحنی‌های آسیب‌پذیری براساس سرعت و عمق



شکل (۱۰): نقشه تهدیدها سد تبارک آباد متناسب با سناریو شکست رگاب



شکل (۱۱): نقشه تهدیدها سد چهچه متناسب با سناریو شکست رگاب

پیشنهادهای سازنده‌ای به شرح ذیل ارائه و اعمال گردید:
 - در خصوص شاخص مربوط به تهدیدها، پیشنهاد شد

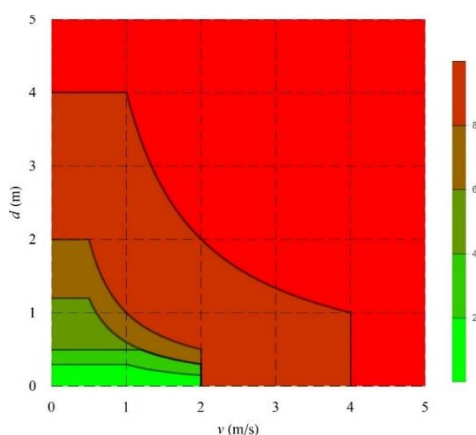
پس از جمع‌بندی نتایج حاصل از پرسشنامه به‌منظور
 بهبود روش پیشنهادی، بر اساس نظر متخصصین

جدول (۶): شرح ضوابط حاکم بر معیارهای آسیب پذیری رویکرد
Smith et al. (2014)

سطح خطر	موارد آسیب پذیری	پارامتر	عمق	سرعت
		$d \cdot v$	جریان	جریان v
			d (متر)	(متر بر ثانیه)
H1	عدم وجود آسیب پذیری	≤ 0.3	0.3	2
H2	وسایل نقلیه کوچک	≤ 0.6	0.5	2
H3	وسایل نقلیه، کودکان و سالمندان	≤ 0.6	1.2	2
H4	وسایل نقلیه و همه مردم	≤ 1	2	2
H5	وسایل نقلیه و همه مردم، احتمال ایجاد آسیب برای ساختمان‌ها	≤ 4	4	4
H6	وسایل نقلیه و مردم و آسیب پذیری جدی برای همه نوع ساختمان	> 4	-	-

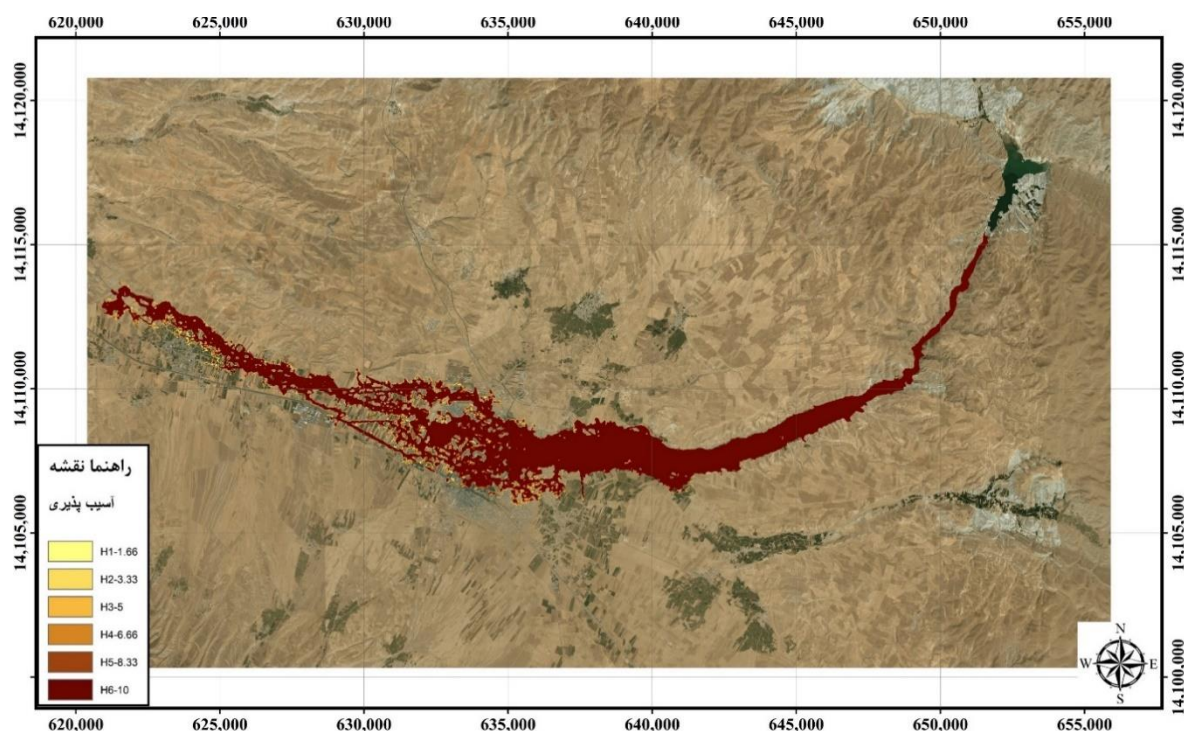
که زبری معادل در پایین دست سد دارای دو مقدار کمینه و بیشینه در نظر گرفته شود تا بحث عدم قطعیتی که در این بخش مورد ارزیابی شرکت کنندگان قرار گرفته بود، با دقت بالاتری و به واسطه تحلیل‌های عددی لحاظ شود. از این رو قسمت دوم مربوط به پرسشنامه با محاسبات ریاضی و شبیه‌سازی عددی با رویکرد اعمال عدم قطعیت زبری جایگزین می‌شود.

- در خصوص بهبود تعیین شاخص آسیب پذیری، مجموعه‌ای از مطالعات انجام شده در شمال شرق استرالیا (کوئینزلند) توسط Smith et al. (2014) پیشنهاد گردید. این مطالعات آسیب پذیری ناشی از سیلاب را متناسب با سرعت و عمق‌های مختلف تخمین می‌زند و نمودارهای آسیب پذیری مشابه تحقیق حاضر (در پرسشنامه) ارائه کرده که اعمال آن موجب افزایش دقت در تخمین آسیب‌های احتمالی خواهد شد که در جدول ۶ و شکل ۱۲ ضوابط مربوط به این نواحی و شرح موارد آسیب پذیری بیان شده است.

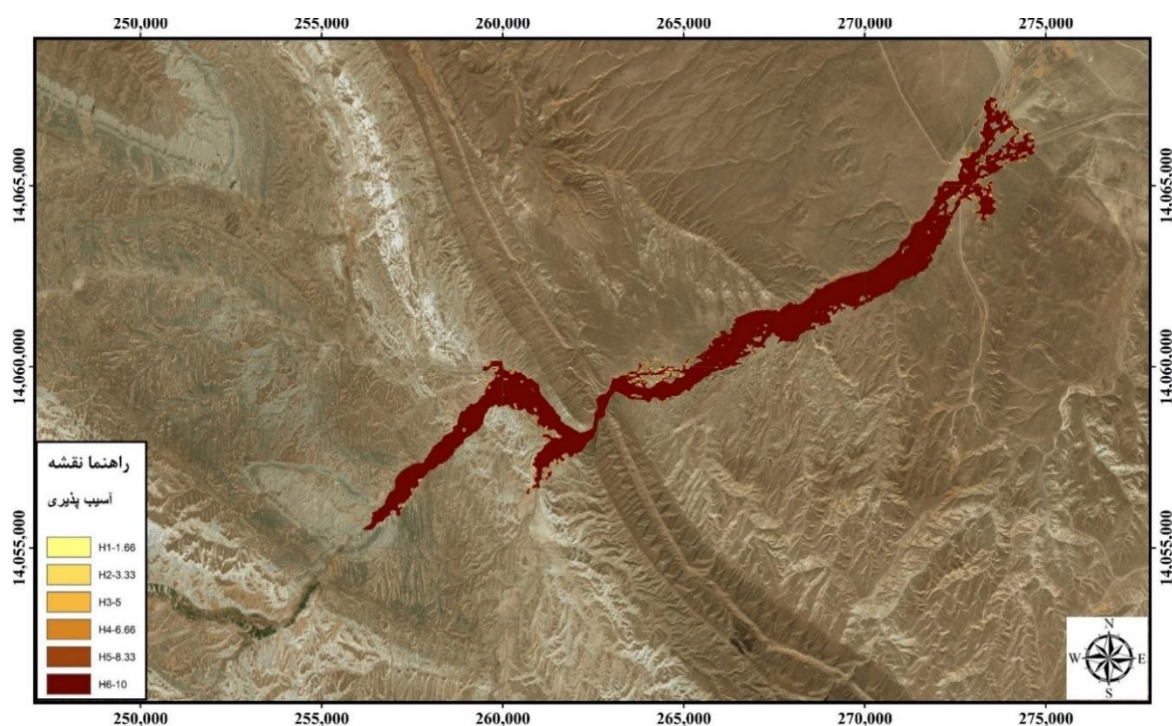


شکل (۱۲): منحنی‌های آسیب پذیری بر اساس سرعت و عمق
(Smith et al. 2014)

مطابق رده‌بندی توصیف شده، به عنوان نمونه نقشه پهنه‌بندی آسیب پذیری برای سناریوی شکست رگاب برای سد تبارک‌آباد در شکل ۱۳ و نقشه پهنه‌بندی آسیب پذیری برای سناریوی شکست روگذری برای سد چهچه در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. مطابق نتایج بدست آمده اغلب نقاط پایین دست سدها، با سطح خطر بالا برای وسایل نقلیه، مردم و همه نوع ساختمان می‌باشند که برای سناریو شکست رگاب تفاوت قابل توجهی با شکست روگذری نخواهد داشت. با اینحال نقاط آسیب پذیر برای سد تبارک‌آباد (با مقادیر کمی بزرگتر) در محدوده وسیع‌تری گسترده بوده که دلیل آن هم وجود شهر قوچان در محدوده پایین دست سد است.



شکل (۱۳): نقشه آسیب پذیری سد تبارک آباد متناسب با سناریو شکست رگاب



شکل (۱۴): نقشه آسیب پذیری سد چهچهه متناسب با سناریو شکست روگذری

(۱) و میزان ریسک، امتیاز مربوط به تهدیدها و آسیب پذیری و همچنین امتیاز مربوط به ارزش دارایی بدست آمده است. به عنوان نمونه نقشه پهنه بندی ریسک

با استفاده از رویکرد پیشنهادی در این تحقیق نقشه های پهنه بندی ریسک برای سناریوهای مختلف شکست و برای هر سد مورد مطالعه و با استفاده از رابطه

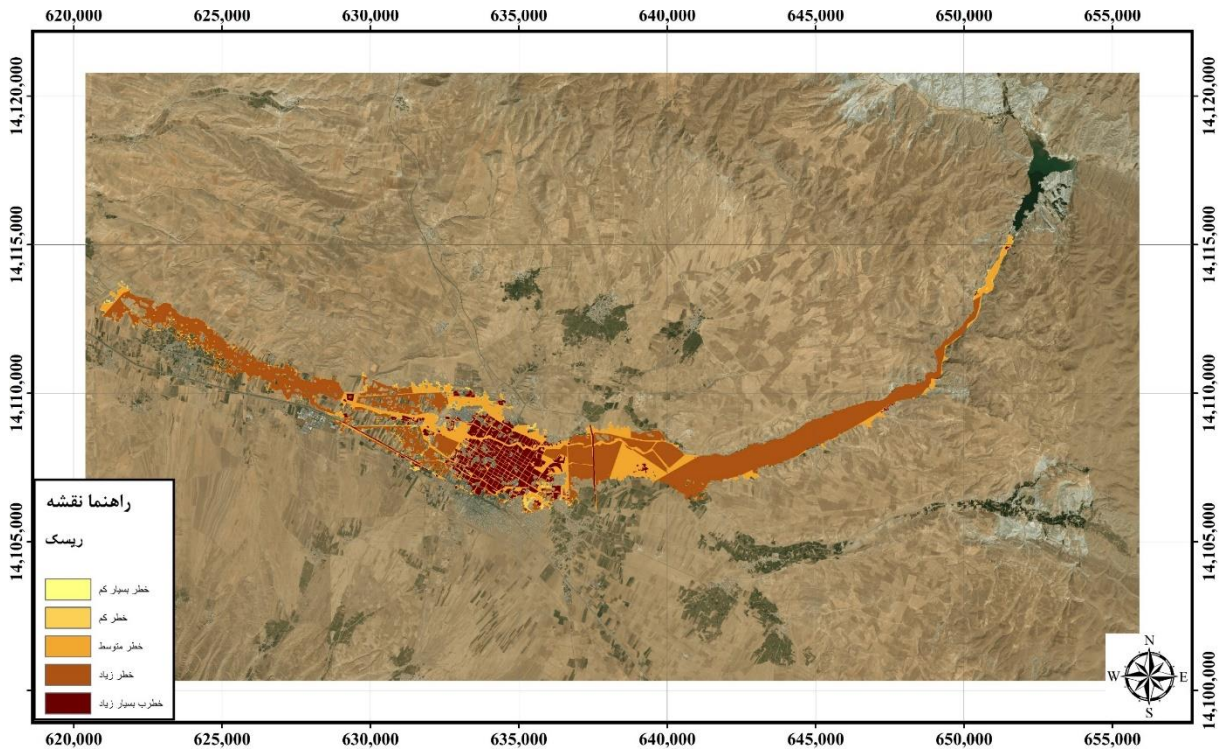


جلوگیری از خسارت‌های جانی برای مردم این شهر وجود دارد. از طرفی، با توجه به وجود چندین روستا در مجاورت این سد، انتظار می‌رود تمامی تلفات جانی مربوط به این محدوده باشد. علاوه بر این در صورت بروز سیلاب، تمامی اراضی کشاورزی و باغات این محدوده نابود خواهند شد زیرا ارتفاع پیشانی آن سیلاب در حدود ۱۵ تا ۲۰ متر خواهد بود (بخش اول تحقیق). همچنین به دلیل توپوگرافی بستر پایین‌دست و همچنین قرارگیری شهر قوچان، نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که به اکثر ساختمان‌های این شهر و همچنین بخشی از راه‌های ارتباطی آسیب جدی وارد خواهد شد. بدین جهت برای نجات جان افراد، با توجه به نقشه پهنه‌بندی ریسک، دو محدوده در زمان بروز بحران می‌تواند جان ساکنین شهر قوچان را نجات دهد. منطقه اول در سمت شمالی شهر و منطقه دوم در قسمت جنوبی شهر و در دامنه کوهپایه‌ها می‌تواند در نظر گرفته شود. البته با توجه به اینکه ارتباط محدوده شمالی و جنوبی شهر به دلیل بروز سیلاب قطع خواهد شد به همین دلیل انتخاب محل اسکانی که بتواند کمک‌های مردمی و هلال‌احمر را بدون مشکل در دسترس ساکنین قرار دهد اولویت دارد. از این رو بهتر است مسئولین مدیریت بحران، مردم شهر قوچان را به سمت جنوب شهر (اطراف روستای گوجه یا سراب) اسکان دهند و همچنین راه ارتباطی به این منطقه را عریض‌تر و در دسترس‌تر تعبیه کنند. تمهیداتی که می‌بایست برای کاهش خسارات احتمالی در نظر گرفته شوند عبارت‌اند از:

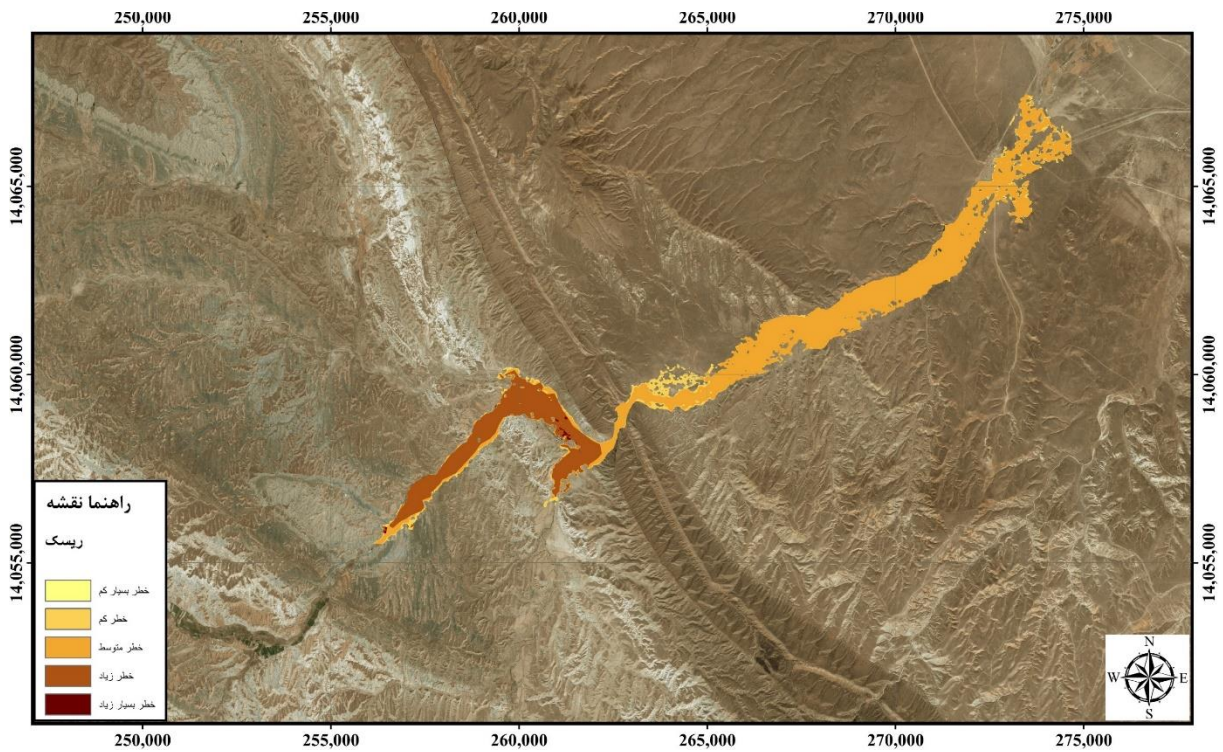
- تخلیه ساکنین روستاهای مجاور سد در صورت نشانه‌هایی از شکست رگاب
- اطلاع‌رسانی سریع به اهالی شهر قوچان جهت تخلیه منازل و حرکت به سمت جنوب شهر (البته اهالی واقع در محدوده شمالی شهر کافی است به سوی ورزشگاه قوچان حرکت نمایند).
- مراقبت‌های ویژه در خصوص پایداری و کنترل نشست‌های احتمالی توسط دفتر نگهداری و بهره‌برداری از تأسیسات آبی آب منطقه‌ای خراسان رضوی
- نصب بلندگوهایی در محدوده‌های مختلف شهر جهت اعلام هشدار در زمان بروز بحران

ناشی از سناریو شکست رگاب سد تبارک‌آباد در شکل ۱۵ و نقشه پهنه‌بندی ریسک ناشی از سناریو شکست روگذری سد چهچه در شکل ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده برای پهنه‌بندی ریسک و سه سناریو شکست مشخص گردید که ریسک شکست آنی برای سد تبارک‌آباد کمتر از دو نوع دیگر شکست بوده است. دلیل این موضوع به نتایج بخش اول تحقیق مربوط بوده که سطح خطر آبگرفتگی (حداکثر عمق) در این حالت کمتر از دو سناریو دیگر شکست (رگاب و روگذری) بوده است. برای سد چهچه نیز وضعیت مشابهی برای شکست آنی وجود دارد با این تفاوت که غیر از نقاطی که در نزدیکی سد قرار دارند، سایر مناطق پایین دست سد (ناحیه شرقی) با سطح ریسک نسبتاً پایین روبرو هستند. از همین رو در ادامه، پیرامون نقاط آسیب پذیر و تخمین خسارات احتمالی بحث خواهد شد.

به منظور تحلیل ریسک و آسیب‌پذیری در این تحقیق **سه نوع خروجی** برای هر سناریو مورد استفاده قرار گرفت. دسته اول نتایج زمان حرکت موج پس از شکست سد بوده که در اقدامات فوری پس از شکست نقش مهمی دارد و مدیران مربوطه می‌توانند با اطلاع به موقع باعث کاهش تلفات انسانی شوند. دسته دوم حداکثر عمق جریان در نقاط محاسباتی در پهنه‌بندی نهایی و دسته سوم نتایج **حداکثر سرعت جریان** در کل فرآیند شکست سد بوده که با استفاده از آنها و همچنین استفاده از پرسشنامه، ارزیابی ریسک پایین‌دست سدها با رویکرد پیشنهادی صورت پذیرفت. برای سد تبارک‌آباد با مدل‌سازی سه سناریو شکست سد مشخص گردید که احتمال وقوع شکست روگذری به مراتب پایین‌تر از احتمال وقوع پدیده رگاب است. از این رو پایداری و کنترل نشست از بدنه سد می‌تواند به طرز قابل توجهی پیامدهای جبران‌ناپذیر شکست این سد را کاهش دهد. همچنین با بررسی پهنه‌بندی سیلاب ناشی از سناریوهای مختلف (بخش اول تحقیق) زمان تقریبی رسیدن پیشانی موج سیلاب به محدوده شهر قوچان در حدود ۹۰ دقیقه تا ۱۲۰ دقیقه پس از وقوع شکست سد است و لذا فرصت کافی برای



شکل (۱۵): نقشه پهنه‌بندی ریسک ناشی از سناریو شکست رگاب سد تبارک‌آباد



شکل (۱۶): نقشه پهنه‌بندی ریسک ناشی از سناریو شکست روگذری سد چهچهه

اینرو محدوده وسیعی از پایین‌دست سد، پس از وقوع شکست دچار آب‌گرفتگی می‌شود و با توجه به سناریوهای

در ارتباط با سد چهچهه بستر رودخانه پایین‌دست، نمی‌تواند جریان خروجی از شکست سد را عبور دهد. از



مدل‌سازی سه سناریو شکست آبی، رگاب و روگذری برای دو سد مذکور مشخص گردید که برای شکست سد تبارک‌آباد احتمال وقوع شکست روگذری به مراتب پایین‌تر از احتمال وقوع پدیده رگاب است که از همینرو پایداری و کنترل نشت از بدنه سد می‌تواند به طرز قابل توجهی پیامدهای جبران‌ناپذیر شکست این سد را کاهش دهد. همچنین بررسی پهنه‌بندی سیلاب ناشی از سناریوهای مختلف زمان تقریبی رسیدن پیشانی موج سیلاب به محدوده شهر قوچان در حدود ۹۰ دقیقه تا ۱۲۰ دقیقه با ارتفاع پیشانی سیلاب حدود ۱۵ تا ۲۰ متر پس از وقوع شکست سد بوده است که انتظار می‌رود تمامی اراضی کشاورزی و باغات این محدوده نابود شوند. هرچند که فرصت کافی برای جلوگیری از خسارت‌های جانی برای مردم این شهر وجود دارد انتظار می‌رود تمامی تلفات جانی مربوط به وجود چندین روستا در مجاورت این سد باشد. همچنین به دلیل توپوگرافی بستر پایین‌دست و همچنین قرارگیری شهر قوچان، نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که به اکثر ساختمان‌های این شهر و همچنین بخشی از راه‌های ارتباطی آسیب جدی وارد خواهد شد که با توجه به نقشه پهنه‌بندی ریسک برای نجات جان افراد محدوده‌های ایمن در زمان بروز بحران پیشنهاد گردید. برای سد چهچهه با توجه به سناریوهای مختلفی که برای شکست این سد در نظر گرفته شده، برخلاف سد تبارک، امکان بروز شکست روگذری وجود دارد و کمترین زمان تقریبی رسیدن موج سیلاب پس از نشانه‌های شکست تدریجی در حدود ۴۵ دقیقه تا ۱ ساعت برآورد گردیده که برای نجات جان افراد ساکن در روستا کافی به نظر می‌رسد.

مختلفی که برای شکست این سد در نظر گرفته شده، برخلاف سد تبارک، امکان بروز شکست روگذری برای آن وجود دارد. دارایی‌هایی که پس از وقوع شکست این سد آسیب می‌بینند مزارع کشاورزی و همچنین روستای چهچهه است. متأسفانه موقعیت این روستا به گونه‌ای است که بخش شمالی آن به طور کامل در زیر آب قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی (بخش اول تحقیق)، کمترین زمان تقریبی رسیدن موج سیلاب پس از نشانه‌های شکست تدریجی سد چیزی در حدود ۴۵ دقیقه تا ۶۰ دقیقه برآورد می‌گردد که برای نجات جان افراد ساکن در روستا کافی به نظر می‌رسد.

تمهیداتی که برای این سد می‌توان در نظر گرفت عبارت‌اند از:

- طراحی دیوار ساحلی بر اساس نقشه خطرپذیری
- بررسی منظم سازه سرریز این سد به منظور اطمینان از صحت عملکرد این سازه
- بررسی و نظارت کافی بر پایداری و نشت‌های احتمالی که در زمان بروز نشانه‌هایی از نشت به سرعت تراز مخزن سد با باز کردن دریچه تخلیه تحتانی کاهش یابد. در این راه از نتایج نرم‌افزار BREACH میتوان استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده روش‌های نوین و نتایج بدست آمده از تحلیل‌های هیدرولیکی بخش اول تحقیق، بحث پیرامون شناسایی خطرات ناشی از شکست سدهای تبارک‌آباد و چهچهه انجام شد. روش‌های ابتکاری یا برنامه‌های کامپیوتری ارائه شده در این پژوهش قابل استفاده برای سایر سدها در سطح کشور نیز خواهد بود.

منابع

- کاوسی‌زاد، ا، براتی، ر، صبورکازران، ح و فرودی، ع. (۱۴۰۱) شبیه‌سازی هیدرولیکی شکست سدهای خاکی: (بخش اول): توسعه مدل
- . نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، همین شماره.
- قلی‌زاده س.، نکویی مفخرائی . ح، ۱۳۹۶. "بررسی و ارزیابی تهدیدها دارایی‌های پایین دست سدها با رویکرد پدافند غیرعامل (مطالعه موردی: سد شیرین دره)،" پدافند غیر عامل، شماره ۲۹، صفحه ۲۵-۳۴.
- عطایی کچویی، م. ح. ۱۳۹۶. کتاب جامع آموزش پدافند غیر عامل: انتشارات رسانه تخصصی.



Amini, A., Bahrami, J., & Miraki, A. (2021). Effects of dam break on downstream dam and lands using GIS and Hec Ras: a decision basis for the safe operation of two successive dams. *International Journal of River Basin Management*, 1-12. DOI: 10.1080/15715124.2021.1901728.

Akbari, G. H., & Barati, R. (2012). Comprehensive analysis of flooding in unmanaged catchments. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 165, No. 4, pp. 229-238). Thomas Telford Ltd.

Akbari, G. H., Nezhad, A. H., & Barati, R. (2012). Developing a model for analysis of uncertainties in prediction of floods. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 73-79.

Atashi, V., Barati, R., & Lim, Y. H. (2023). Development of a distributed nonlinear Muskingum model by considering snowmelt effects for flood routing in the Red River. *Scientific Reports*, 13(1), 21356.

Barati, R. (2010). Investigation of flood routing methods in natural waterways. Master's Thesis, The University of Sistan and Baluchestan Graduate School.

Barati, R., Rahimi, S., & Akbari, G. H. (2012). Analysis of dynamic wave model for flood routing in natural rivers. *Water Science and Engineering*, 5(3), 243-258.

Barati, R., Akbari, G. H., & Rahimi, S. (2013). Flood Routing of an Unmanaged River Basin Using Muskingum--Cunge Model; Field Application and Numerical Experiments. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 2(6).

Bilali, A. E., Taleb, I., Nafii, A., & Taleb, A. (2022). A practical probabilistic approach for simulating life loss in an urban area associated with a dam-break flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 76, 103011.

Fan, X., Dufresne, A., Whiteley, J., Yunus, A. P., Subramanian, S. S., Okeke, C. A., ... & Stefanelli, C. T. (2021). Recent technological and methodological advances for the investigation of landslide dams. *Earth-Science Reviews*, 218, 103646.

Hajiabadi, A., Sakhdari, S., & Barati, R. (2022). Study of morphologic changes in the past and predicting future changes of border rivers (case study: Arvand River, Iran-Iraq Border Line). In *Current Directions in Water Scarcity Research* 7, 153-163. Elsevier.

Gaagai, A., Aouissi, H. A., Krauklis, A. E., Burlakovs, J., Athamena, A., Zekker, I., ... & Chenchouni, H. (2022). Modeling and risk analysis of dam-break flooding in a semi-arid Montane watershed: a case study of the Yabous Dam, Northeastern Algeria. *Water*, 14(5), 767.

Ghandehary, A., & Barati, R. (2018). River flow modeling by the application of remote sensing and fuzzy regression. *Progress in River Engineering and Hydraulic Structures*, International Energy and Environment Foundation Publisher, Najaf, Iraq, 129-150.

Garsole, P. A., Bokil, S., Kumar, V., Pandey, A., & Topare, N. S. (2023). A review of artificial intelligence methods for predicting gravity dam seepage, challenges and way-out. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(7), 1228-1248.

Maharjan, M. & Takahashi, A. (2014). Liquefaction-induced deformation of earthen embankments on non-homogeneous soil deposits under sequential ground motions," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 66, pp. 113-124.

Urzičă, A., Mihău-Pintilie, A., Stoleriu, C. C., Cîmpianu, C. I., Huțanu, 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.

Rizzo, C., Maranzoni, A., & D'Oria, M. (2023). Probabilistic mapping and sensitivity assessment of dam-break flood hazard. *Hydrological Sciences Journal*, 68(5), 700-718.



Sarvestan, R., Barati, R., Shamsipour, A., Khazaei, S., & Kleidorfer, M. (2024). Evaluation of the performance of satellite products and microphysical schemes with the aim of forecasting early flood warnings in arid and semi-arid regions (a case study of northeastern Iran). *Natural Hazards*, 1-26.

Sattar, A., Haritashya, U. K., Kargel, J. S., Leonard, G. J., Shugar, D. H., & Chase, D. V. (2021). Modeling lake outburst and downstream hazard assessment of the Lower Barun Glacial Lake, Nepal Himalaya. *Journal of Hydrology*, 598, 126208.

Smith, G.P., Davey, E. K. and Cox, R. (2014). *Flood Hazard*. WRL Technical Report.

Verma, D., Berwal, P., Khan, M. A., Alharbi, R. S., Alfaisal, F. M., & Rathnayake, U. (2023). Design for the Prediction of Peak Outflow of Embankment Breaching due to Overtopping by Regression Technique and Modelling. *Water*, 15(6), 1224.

Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters, *Journal of hydraulic engineering*, vol. 130, pp. 389-397, 2004.

Zhang, L., Xu, Y. and Jia, J. (2009). "Analysis of earth dam failures: A database approach," *Georisk*, vol. 3, pp. 184-189.