

## Research Paper

# Hydraulic Simulation of the Failure of the Embankment Dams: (Part 1: Model Development)

Amir Reza Kavosizadeh<sup>1</sup>, Reza Barati<sup>2\*</sup>, Hossein Saboorkazeran<sup>3</sup>, Ali Foroudi<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> MSc of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

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

<sup>3</sup> Expert at Water Resources Basic Studies, Regional Water Authority of Khorasan Razavi, saboor@khrw.ir

<sup>4\*</sup> Assistant Professor, Civil Engineering Department, Quchan University of Technology, Quchan, Iran. aliforoudi@qiet.ac.ir



10.22125/IWE.2024.333772.1613.

Received:  
**December 31, 2023**  
Accepted:  
**June 2, 2024**  
Available online:  
**June 29, 2024**

**Keywords:**  
**Dam-break, Flood Zoning, Hydraulic Analysis, Routing, Piping, Overtopping**

## Abstract

In the present study, the hydraulic failure of two embankment dams (the Tabarakabad and Cahcahe dams, the Khorasan Razavi province) has been studied. By modeling the failure phenomenon of the dams, failure parameters, flood routing for different scenarios such as overtopping, piping and sudden failures, zoning maps of velocity and depth of flood wave, arrival time of the flood peak and areas that will be submerged have been considered. In this study, a computer program is developed in the context of the Mathematica software, which with the help of the BREACH software results to analysis gradual failure of the dams through an iterative process. Minimum and maximum roughness conditions have been considered in the analysis of unsteady flow dam failure in the HEC-RAS software. The results of flood zoning due to different failure scenarios have also been evaluated. It is worth mentioning that in the second part of this article, risk analysis and identification of vulnerabilities will provide.

## 1. Introduction

Today, it is important to carefully study the phenomenon of dam failure due to the important role that dams play, such as water supply, groundwater recharge and flood control. The failure of the embankment dam can occur for various reasons such as the inability of the spillway to pass the overflow, the piping, sudden break, and technical defects. According to studies by Zhang et al. (2009) on 1065 earthen dams that have failed, nearly 80% of failure cases have been due to overtopping and technical defects. In the present study, hydraulic simulations of the failure of two embankment dams including Tabarakabad and Cahcahe dams has been considered.

\* **Corresponding Author:** Ali Foroudi

**Address:** Assistant Professor, Dep. Of Civil Engineering, College of Engineering, Industrial University of Quchan

**Email:** a.foroudi@qiet.ac.ir  
**Tel:** 98 915 300 57 07

## 2. Materials and Methods

The governing equations of flood wave movement due to dam failure are in the hydraulic condition of the unsteady rapidly varied flow. For hydraulic modeling, in the first step to determine the failure parameters, the piping calculation algorithm, which includes an iterative process in the form of a computer code, is implemented in the Mathematica software and the piping phenomenon is simulated by using BREACH model. The BREACH model is based on hydraulic, hydrological, erosion and sediment transport principles. This model allows the user to enter data such as inflow hydrograph, area-elevation curve for dam reservoir, downstream cross section and discharge curve of spillway into the model, and, the user can display the failure steps in animation and table as outputs. In order to simulate the unsteady flow due to dam failure, the two-dimensional HEC-RAS model was used and by entering the volume-level and area-level curves for sudden dam failure scenario and the dam output hydrograph for the overtopping and piping scenarios, unsteady flood wave was modeled at downstream of the dams.

## 3. Results

According to the results, only 65 levels in the Tabarakabad Dam and 84 levels in the Cahcahe Dam can complete this process. In order to simulate overtopping failure, a defect in the hydraulic system of the dam spillway was assumed when the flood enters the dam reservoir. The inflow to the reservoir is equivalent to PMF and the flood time is equivalent to the peak flood time in previous hydrological studies. By using the BREACH model, it was found that even with 50% capacity of the spillway, there is not high risk to the Tabarakabad dam for overtopping failure. Study of this scenario in the Cahcahe Dam indicates another issue that there is a risk of overtopping failure in this situation. Therefore, in order to prevent its occurrence, the correct operation of the overtopping of the Cahcahe dam in critical time is far more important than the Tabarakabad dam. The roughness value for the downstream waterway of the dams is 0.02 and 0.07 and for urban areas is equal to 10. By applying topographic data (satellite maps) in 2D HEC-RAS software, the results of speed and depth of simulations for sudden, piping and overtopping scenarios were analyzed. For the Tabarakabad dam, the maximum flow velocity similar to the Cahcahe dam is up to 20 m/s and in the area close to the dam to the city, and the maximum flow depth occurred in the case of overtopping failure with a value of 36 meters, while for the Cahcahe dam failure, this maximum value was up to 20 meters.

## 4. Discussion and Conclusion

In this research, in order to analysis the failure parameters and the dangerous case of the piping failure of dams, a computer program has been developed in the context of the Mathematica software, which has been used in combination with the results of the BREACH software. In addition, the computer code will enable the user to perform analyzes to determine the most important hydrograph by sorting the performance of the responses based on the similarity to the ideal answer (TOPSIS). Although piping failure is more likely for an embankment dam, the hydraulic conditions of the failure was performed for three scenarios and the results of zoning of velocity and depth for the minimum and maximum roughness conditions were presented and discussed. For Tabarakabad dam, the approximate time for the flood wave to reach the urban area was a maximum of 2 hours, while it is estimated to be about 45 minutes to 1 hour for the Cahcahe dam. The height of the flood front will be about 15 to 20 meters for both dams, which will inevitably cause serious damage to agricultural land and buildings in this area.

## 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) 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.
- 3) Chang, T.-J., Kao, H.-M., Chang, K.-H. & Hsu, M.-H. (2011). Numerical simulation of shallow-water dam break flows in open channels using smoothed particle hydrodynamics," *Journal of Hydrology*, 408, 78-90.
- 4) Hajeri, S., Shivapur, A.V and Venkatesh, B. 2016. Flood plain mapping and dam break analysis for Neerasagar reservoir. *International Research Journal of Engineering and Technology* 3(6): 1279-1285.

- 5) Heidari, S. M. (2020). Emergency Action Plan for Flash Flood Due to Dambreak–Case Study: Shahrchai Dam, Urmia (Iran). Urmia (Iran). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3709042>.
- 6) Zhang, L., Xu, Y. & Jia, J. (2009). Analysis of earth dam failures: A database approach, Georisk, 3, 184-189.

### **Conflict of Interest**

Authors declared no conflict of interest.



## شبیه‌سازی هیدرولیکی شکست سدهای خاکی: (بخش اول: توسعه مدل)

امیررضا کاوسی زاد<sup>۱</sup>، رضا براتی<sup>۲</sup>، حسین صبورکازران<sup>۳</sup>، علی فرودی<sup>۴\*</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳

مقاله پژوهشی

### چکیده

امروزه تأمین نیاز آبی، انرژی الکتریسیته، تغذیه سفره‌های زیرزمینی و کنترل سیلاب‌ها از اهداف ساخت سدها می‌باشند. از طرفی شکست سد می‌تواند با رهاسازی حجم عظیم آب منجر به تلفات حداکثری در پایین‌دست گردد. لذا با شبیه‌سازی این پدیده امکان آگاه‌کردن مدیران از ابعاد خسارات احتمالی، تصمیم‌گیری و مدیریت صحیح بحران میسر خواهد بود. در این تحقیق وضعیت هیدرولیکی شکست سدهای خاکی تبارک‌آباد و چهچهه در استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای شکست، روندیابی سیلاب به ازای سناریوهای مختلف نظیر شکست روگذری، رگاب و شکست آبی (اقدامات خرابکارانه) و نقشه‌های پهنه‌بندی و پارامترهای مربوطه تجزیه و تحلیل شده است. لذا با توجه به نتایج سرعت و عمق جریان سیلاب ناشی از شکست سد، زمان رسیدن اولین اثرات سیل و پهنه‌هایی که زیر آب خواهند رفت مشخص گردیده‌اند. بخشی از تحلیل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر، برنامه‌های کامپیوتری توسعه داده شده در بستر نرم‌افزار Mathematica بوده که در ترکیب با نتایج بدست آمده از نرم‌افزار BREACH امکان تعیین بدترین وضعیت شکست تدریجی سد از طریق یک فرآیند تکراری را فراهم می‌کند. در ادامه تحلیل جریان غیردائمی ناشی از شکست سد در نرم‌افزار HEC-RAS (دوبعدی) انجام شده است. به‌علاوه کد کامپیوتری کاربر را قادر خواهد ساخت تا تحلیل‌هایی به‌منظور تعیین مهمترین هیدروگراف خروجی از سد، با استفاده از روش مرتب‌سازی عملکرد پاسخ‌ها بر اساس شباهت به پاسخ ایده‌آل (TOPSIS) انجام داده که بر اساس آن، دو معیار اصلی برای هر هیدروگراف یعنی زمان دبی حداکثر و مقدار دبی حداکثر لحاظ خواهند شد. همچنین نتایج پهنه‌بندی سیلاب ناشی از سناریوهای مختلف و برای دو حالت زبری حداقل و حداکثر مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج هیدرولیکی آن مورد بحث و مقایسه قرار گرفته است. شایان ذکر است که در بخش دوم این مقاله تحلیل ریسک و شناسایی نقاط آسیب‌پذیر ارائه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: شکست سد خاکی، پهنه‌بندی سیلاب، تحلیل هیدرولیکی، روندیابی، رگاب، روگذری.

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، kavousi@hotmail.com

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، kavousi@hotmail.com

<sup>۳</sup> دکتری تخصصی مهندسی عمران، کارشناس مطالعات پایه منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، saboor@khrw.ir

<sup>۴</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، aliforoudi@qiet.ac.ir (نویسنده مسئول)



## مقدمه

به دنبال فعالیت‌های انسانی و دخالت وی در محیط‌زیست، میزان سیلاب‌ها در حوضه آبریز افزایش یافته و سدها با سیلاب‌های ورودی شدیدتری مواجه هستند که پایداری آنها را به خطر انداخته است (Barati, 2016; Hajeri et al, 2010). شکست سد خاکی می‌تواند به علل مختلفی نظیر روگذری، ایجاد رگاب، لغزش شیب خاکنیز، روان‌گرایی و ایجاد موج ضربه‌ای در اثر لغزش توده خاک به داخل مخزن رخ دهد (Wahl 1998; Amini et al. 2009; Wahl 2004; Badfar et al. 2021; Atashi et al. 2023 a, b, c). هم‌اکنون در ایران، حدود ۶۰۰ سد در حال بهره‌برداری است و با وجود مطالعات گسترده پیرامون محل احداث سد و محاسبات پیچیده سازه‌ای و صرف منابع مالی بسیار زیاد در احداث این سازه‌های هیدرولیکی، پدیده شکست سد همچنان محتمل است. این پدیده با ایجاد خرابی تدریجی یا ناگهانی در سدها وقوع پیوسته و منجر به رهاسازی حجم عظیم و غیر قابل کنترل آب ذخیره شده به پایین دست سد می‌شود. سیلاب‌های عظیم و مخرب، زلزله، تراوش شدید از بدنه سد یا رگاب، فرسایش داخلی در لایه‌های مختلف بدنه و روانگرایی از عوامل بروز این پدیده است. همچنین سدها به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های مهم کشورها در جنگ‌ها مورد توجه حمله متجاوزین بوده‌اند. (Chang et. (2011) یک مدل عددی بدون شبکه را توسط معادلات حاکم بر جریان آب‌های کم‌عمق در کلنال‌های روباز با بستر خشک و مرطوب به‌منظور تحلیل شکست سد معرفی کردند. (Maharjan and Takahashi (2014) نشان دادند که احتمال وقوع و میزان خرابی توده‌های خاکی ناهمگن نسبت به توده‌های خاکی همگن بیشتر است و از آنجا که اغلب سدهای خاکی از خاک‌های گوناگونی تشکیل شده‌اند، لذا بررسی احتمال وقوع روان‌گرایی در این سدها اهمیت ویژه‌ای دارد. (Heidari (2020) به ارائه یک برنامه اقدام اضطراری برای مقابله با شکست ناگهانی سد شهرچای ارومیه پرداخته که در نزدیکی شهر بزرگ ارومیه قرار گرفته است. برای مدلسازی شکست از دو سناریوی رگاب

و روگذری در نرم‌افزار HEC-RAS و برای تعیین مناطق سیل زده در پایین دست از ArcGIS بهره برده است. او برای هر منطقه با توجه به کاربری و جمعیت مقیم، برنامه تخلیه مناسب (با توجه به تخمین زمان رسیدن سیلاب) برای مردم و سازمان‌ها به‌منظور پرهیز از هرج و مرج در موقع شکست سد ارائه کرده است. (Amini et al. (2022) به بررسی اثرات شکست سد بر پایین دست با استفاده از HEC-RAS و GIS به‌منظور ارائه یک مبنای تصمیم‌گیری برای بهره‌برداری ایمن از دو سد متوالی (سد وحدت در بالادست سد ژاوه) در استان کردستان پرداخته و از طریق بهینه‌سازی حجم ذخیره این دو سد به ارزیابی پایداری پایین دست و ارائه مدل تصمیم‌گیری برای بهره‌برداری ایمن از آنها بوده است. بدین منظور سناریوهای مختلف با توجه به حجم آب رها شده برای دو نوع شکست رگاب و روگذری در نظر گرفته و مشخص گردید که در اغلب موارد شکست سد بالادست منجر به شکست سد در پایین دست خواهد شد و تراز آب مناسب برای بهره‌برداری ایمن تعیین گردید.

سدهای مورد مطالعه در این تحقیق شامل تبارک‌آباد و چهچهه می‌باشد. سد تبارک‌آباد یک سد خاکی سنگریزه‌ای با هسته رسی قائم با حداکثر ارتفاع ۵۰ متر از کف مخزن بوده و حجم ۶۰ میلیون مترمکعب و در ۲۱ کیلومتری شمال شرق شهر قوچان و ۱/۵ کیلومتری پایین دست روستای تبارک‌آباد و بر روی از یکی از سرشاخه‌های فرعی رودخانه اترک (رودخانه تبارک‌آباد) با هدف تأمین و تنظیم آب مورد نیاز اراضی کشاورزی و قسمتی از نیاز آب شرب طولانی‌مدت شهر قوچان، کنترل سیلاب و تغذیه آبخوان‌های زیرزمینی منطقه احداث گردیده است. اقلیم منطقه دربردارنده سد تبارک‌آباد از نوع سرد-خشک بوده و همچنین از اوایل فروردین تا اوایل اردیبهشت خطر بروز سیلاب حداکثر بیشتر از سایر ماه‌های سال است. موقعیت سد و شهر قوچان در تصویر ماهواره‌ای نشان داده شده در شکل ۱ ارائه شده است.

سد چهچهه، نیز یک سد خاکی سنگریزه‌ای با هسته رسی در شمال شرق خراسان رضوی و در شهرستان کلات

ترکمنستان احداث گردیده است. در مقایسه با سد تبارک آباد، منطقه سد چهچه خشک تر است و بارندگی کمتری دارد. در شکل ۲ نقشه ماهواره‌ای از موقعیت سد و روستای چهچه نشان داده شده است

واقعست. این سد با مساحت حوضه آبریز حدود ۴۶۴/۵ کیلومترمربع، ارتفاع ۴۶ متر و حجم بهینه حدود ۱۹ میلیون مترمکعب است که با هدف اولیه ذخیره جریان عبوری از رودخانه چهچه، توسعه کشاورزی منطقه و جلوگیری از هدر رفت جریان آب رودخانه از طریق مرز به



شکل (۱): نقشه ماهواره‌ای موقعیت سد تبارک آباد و شهر قوچان



شکل (۲): نقشه ماهواره‌ای موقعیت سد و روستای چهچه

آب‌های کم‌عمق است که شکل ساده‌تر آن به صورت معادلات سنت و نانت بیان شده و شامل معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت است (Akan, 2011; Akbari and Barati, 2012; Barati et al. 2012, 2013; Akbari et al. 2012)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta QV) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f - gAS_0 = 0 \quad (2)$$

که در آن  $Q$  دبی جریان و  $A$  مساحت مقطع عرضی جریان بوده و دو متغیری که نسبت به آن‌ها مشتق جزئی محاسبه شده یعنی  $x$  و  $t$  به ترتیب فاصله و زمان هستند.  $S_0$  شیب بستر و  $S_f$  شیب خط انرژی و پارامترهای  $\beta$ ،  $g$  و  $\lambda$  به ترتیب ضریب تصحیح اندازه حرکت، شتاب گرانش و عمق جریان هستند. در این پروژه از مدل HEC-RAS استفاده شده که در نسخه‌های جدید آن قابلیت شبیه‌سازی دوبعدی جریان و امکان ورود نقشه‌های

در این تحقیق با بررسی وضعیت هیدرولیکی شکست سد‌های تبارک‌آباد و چهچه پارامترهای شکست و روندیابی سیلاب به ازای سه سناریوی مختلف شکست شامل روگذری، رگاب و شکست آنی (اقدامات خرابکارانه) و نقشه‌های پهنه‌بندی و پارامترهای مربوطه در دو حالت زبری حداقل و زبری حداکثر مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. به این ترتیب با استفاده از برنامه کامپیوتری توسعه داده شده در نرم‌افزار Mathematica در ترکیب با نتایج نرم‌افزار BREACH قادر خواهیم بود تا بدترین وضعیت شکست تدریجی سد را تعیین نموده و تحلیل جریان غیردائمی ناشی از شکست در نرم‌افزار HEC-RAS (دوبعدی) میسر خواهد بود.

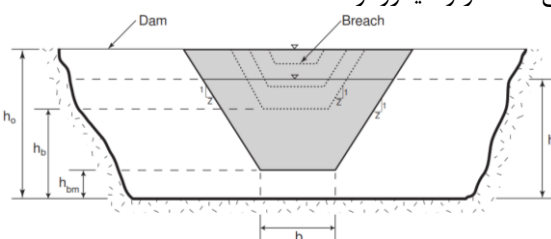
## مواد و روش‌ها

پس از وقوع پدیده شکست سد، جریانی از نوع غیردائمی متغیر سریع ایجاد می‌شود. معادلات حاکم بر این نوع جریان از نوع هایپربولیک یا هذلولی مربوط به

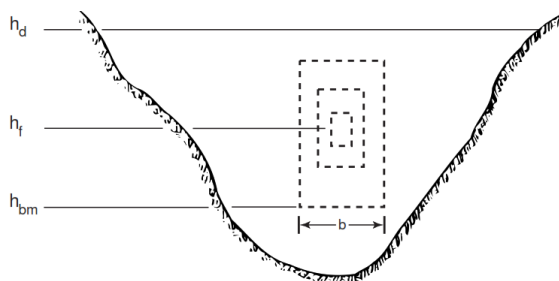


سیلاب خروجی ناشی از شکست باشند. فرض شکست ناگهانی و کامل سدها هرچند برای سدهای بتنی مناسب و سازگار بوده، در مورد سدهای خاکی تا حدی غیرمحمول است و معمولاً این سدها به صورت تدریجی تخریب می‌شوند. دو وضعیت در زمان شکست تدریجی سدهای خاکی محتمل است. وضعیت اول آن است که شکاف ایجاد شده ناشی از عبور جریان از روی تاج سد به وقوع بپیوندد (شکل ۳) و در وضعیت دوم روزنه در بدنه سد ایجاد شده و به دنبال آن پدیده رگاب اتفاق بیافتد (شکل ۴).

توپوگرافی فراهم شده است. در جریان شکست سد به ازای یک عمق جریان، دو مقدار متفاوت دبی (مرحله افزایش یا طغیان و دیگری کاهش یا فروکش سیلاب) وجود دارد. به منظور ساده‌سازی روابط، با فرض واحد بودن ضریب اصلاح اندازه حرکت و منشوری بودن مقطع این معادلات حل می‌شوند. علاوه بر آن، شیب بستر ناچیز فرض شده که منجر به برابری تقریبی عمق عمود بر بستر جریان با عمق قائم جریان می‌شود. پارامترهای شکست سد می‌توانند شامل عمق، عرض و شیب کناره‌های شکاف، زمان شروع و توسعه شکاف، دبی حداکثر و هیدروگراف



شکل (۳): نمایش پارامترهای شکست سد برای وضعیت حفره روگذری (Fread, 1984)



شکل (۴): نمایش پارامترهای شکست سد برای وضعیت حفره رگاب (Fread, 1984)

خروجی‌های این مدل همچنین شامل حداکثر دبی خروجی از شکاف، زمان رسیدن به حداکثر جریان خروجی، عمق نهایی شکاف، عرض بالا و عرض کف شکاف در زمان حداکثر دبی خروجی از شکاف، تراز نهایی سطح آب مخزن، شیب جانبی نهایی شکاف و زمان شکست است که برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد، تنها کافی است هیدروگراف خروجی از شکست به‌عنوان شرایط مرزی مورد استفاده قرار گیرد. سپس، تحلیل جریان غیردائمی با روش‌های عددی و کارآمد در این حوزه انجام می‌شود. در این تحقیق با توجه به احتمال ضعیف شکست ناگهانی سد خاکی، به تشریح فرآیند شکست در دو وضعیت روگذری و رگاب پرداخته می‌شود. الگوریتم محاسباتی شکست شامل

در گام نخست پارامترهای شکست سد تعیین گردیده که بدین منظور مدلی ریاضی بر اساس یافته‌های محققین پیشین، پیاده‌سازی شده و به شکل کد کامپیوتری توسعه می‌یابد. لذا با کمک مدل BREACH که مبتنی بر اصول هیدرولیک، هیدرولوژی، فرسایش و انتقال رسوب است و با در نظر گرفتن خصوصیات مصالح سد و پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژی (Fread, 1988)، شکست تدریجی شبیه‌سازی می‌شود. این مدل به کاربر اجازه می‌دهد که داده‌هایی از قبیل هیدروگراف ورودی، منحنی سطح دریاچه-ارتفاع، مقطع عرضی پایاب سد و منحنی دبی سرریز را وارد مدل کرده و در خروجی، امکان نمایش مراحل شکست به صورت پویانمایی و جدول برای کاربر فراهم است.

مشخصی ارزیابی می‌گردد و نیازمند آمار و اطلاعات کامل در مورد رودخانه‌ها و ایستگاه‌های متعدد هیدرومتری است. از اینرو از نرم افزار HEC-RAS استفاده شده که با وارد کردن هندسه (شامل مشخصات مقاطع عرضی پایاب سد، شکل سد و نوع شکست)، نوع تحلیل (دائمی و غیردائمی)، تعیین شرایط مرزی و شرایط اولیه و همچنین انتخاب پارامترهای تحلیل می‌توان به مدل‌سازی شکست سد پرداخت. شرایط اولیه مسئله، عمق و دبی آب در پایین‌دست سد بوده و شرط مرزی بالادست سیلاب ناشی از شکست سد به ازای سناریوهای احتمالی است که از نتایج BREACH حاصل می‌شود و شرط مرزی پایین‌دست درجایی بسیار دورتر از محل سد به گونه‌ای تعریف می‌شود که عمق جریان در آن محل با عمق نرمال مقطع مورد نظر برابر باشد. شایان ذکر است که در سناریوی شکست آنی سد، با مدل کردن مخزن و وارد کردن منحنی‌های حجم-تراز و سطح-تراز جریان غیردائمی در پایین‌دست مدل می‌شود. فرآیند توسعه داده شده در این پژوهش برای تحلیل هیدرولیکی شکست سدهای خاکی در شکل ۵ ارائه شده است.

یک فرآیند تکراری است، زیرا جریان در داخل کانال شکست به تراز کف و عرض کانال شکست مرتبط است و این در حالی است که این ویژگی‌ها به مقدار جریان عبوری و ظرفیت انتقال رسوبات بستگی دارد که خود وابسته به ابعاد و شدت جریان شکست است. بدین منظور از یک کد برنامه‌نویسی شده در Mathematica برای تعیین پارامترهای شکست، برای سدهای خاکی در دو نوع شکست (رگاب و روگذری) طراحی شده و در آن محدودیتی از قبیل وارد کردن منحنی‌های سطح مخزن-تراز آب، دبی-اشل سرریز و همچنین شکل مقطع عرضی پایاب سد وجود ندارد. خروجی این برنامه، هیدروگراف ناشی از شکست سد خواهد بود که در ادامه مدل‌سازی در تحلیل جریان غیرماندگار کاربرد دارد. باید توجه داشت که فرآیند فرسایش در این مدل برای حالت روگذری شامل فرسایش پایین‌دست، فرسایش بالادست و شکست کامل بوده و برای حالت رگاب شامل فرسایش پایین‌دست، فرسایش بالادست، سقوط مصالح بالایی و در نهایت شکست کامل می‌شود. همچنین به منظور تحلیل جریان غیرماندگار و پیش‌بینی عملکرد این نوع جریان در آبراهه‌ها از فرآیند روندیابی سیلاب استفاده می‌گردد که تغییرات دبی به صورت تابعی از زمان در محل



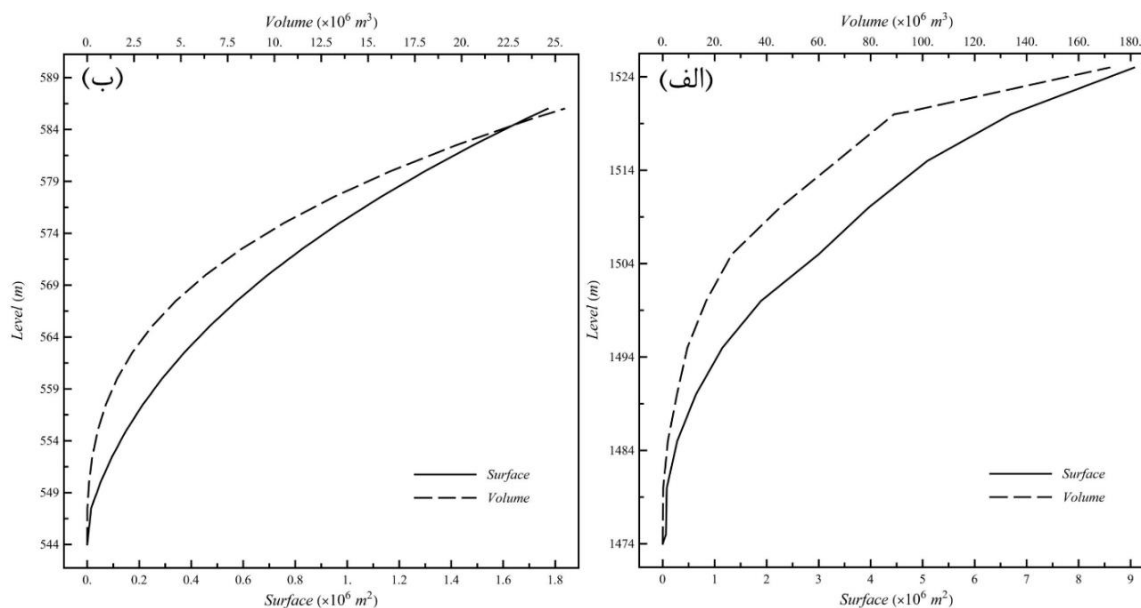
شکل (۵): فرآیند تحلیل هیدرولیکی شکست سد خاکی در مطالعه حاضر

## نتایج و بحث

به منظور مدل‌سازی پدیده رگاب یا روگذری، داده‌های هندسی و پارامترهای فیزیکی سدهای مورد مطالعه از گزارش‌های طراحی استخراج شده است.

همچنین به منظور دسترسی به اطلاعات رقوم ارتفاعی پایین دست سد تبارک‌آباد و تحلیل‌های هیدرولیکی جریان ناشی از شکست سد، روشی ابتکاری مبتنی بر دریافت داده‌های ارتفاعی از طریق اطلاعات ماهواره‌ای در ادامه پیشنهاد شده است. از طرف دیگر برای سد چهچه که در نزدیکی مرز قرار دارد و تحلیل آن می‌بایست تا آن سوی

مرزهای ترکمنستان دنبال شود، اطلاعات توپوگرافی حاصل از نقشه‌برداری در آن محدوده وجود نداشته و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای آن می‌تواند بسیار گره‌گشا باشد. سایر اطلاعات مورد نیاز در مدل BREACH به صورت مقادیر پیش فرض در نظر گرفته شده و همچنین اطلاعات مربوط به مقطع پایین دست سدها نیز با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌های مربوطه تعیین گردید. منحنی سطح-تراز و حجم-تراز مخزن نیز که با استفاده از داده‌های هیدرومتری موجود در منطقه بدست آمده‌اند که در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل (۶): منحنی‌های سطح-تراز و حجم-تراز در سدهای (الف) تبارک‌آباد و (ب) چهچهه

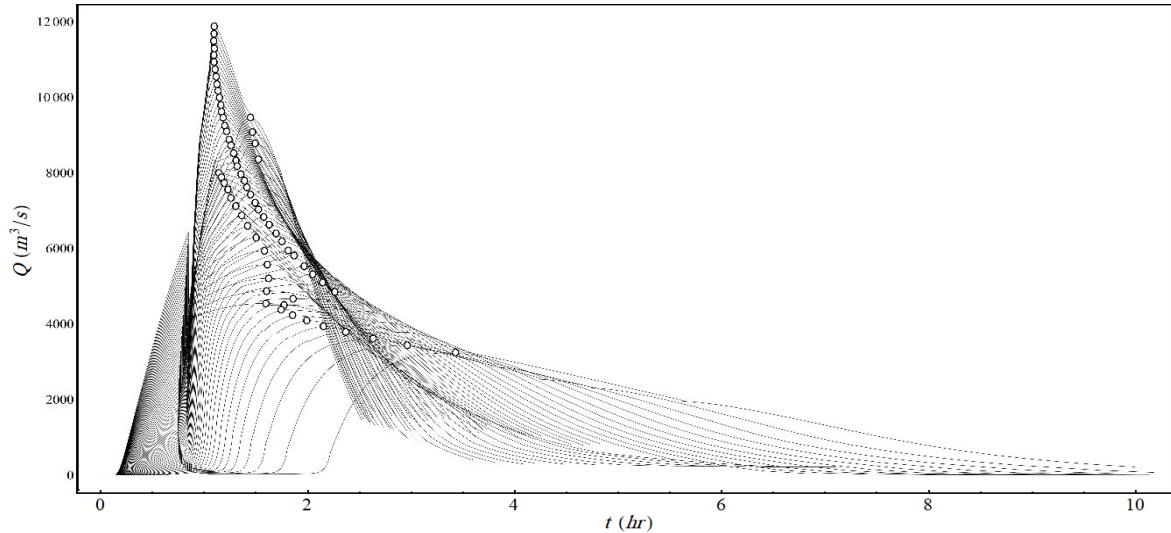
جریان به مخزن در لحظه شکست در نظر گرفته می‌شود. به علاوه، حجم مخزن پارامتر ورودی حساس در این تحلیل است. به دلیل آنکه به رخ دادن رگاب در بدنه سد به ازای ترازهای بالاتر سطح مخزن، محتمل‌تر و در نتیجه احتمال آسیب‌پذیری بیشتر خواهد بود، در این سناریو تراز مخزن معادل با تراز نرمال در نظر گرفته شده است. از طرفی پدیده رگاب و به دنبال آن وجود روزنه در بدنه سد می‌تواند در اعماق مختلفی اتفاق افتد که به ازای حالات متنوع شکست سد، دبی حداکثر و زمان پیک متفاوتی حاصل می‌شود. بدین منظور در این بخش به ازای عمق‌های مختلف، این پدیده با استفاده از نرم‌افزار و مدل برنامه‌نویسی شده، شبیه‌سازی می‌گردد تا پُراهمیت‌ترین هیدروگراف‌های این نوع شکست برای تحلیل جریان غیرماندگار تعیین شود. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار BREACH و کد برنامه‌نویسی شده، برای دو سد مورد مطالعه به ازای ۱۰۰ تراز مختلف، مابین تراز کف سرریز تا تراز معادل با ۰/۲۵ فاصله تراز بستر سد تا تراز کف سرریز شکست سد شبیه‌سازی گردید.

#### تحلیل هیدرولیکی شکست ناگهانی سد

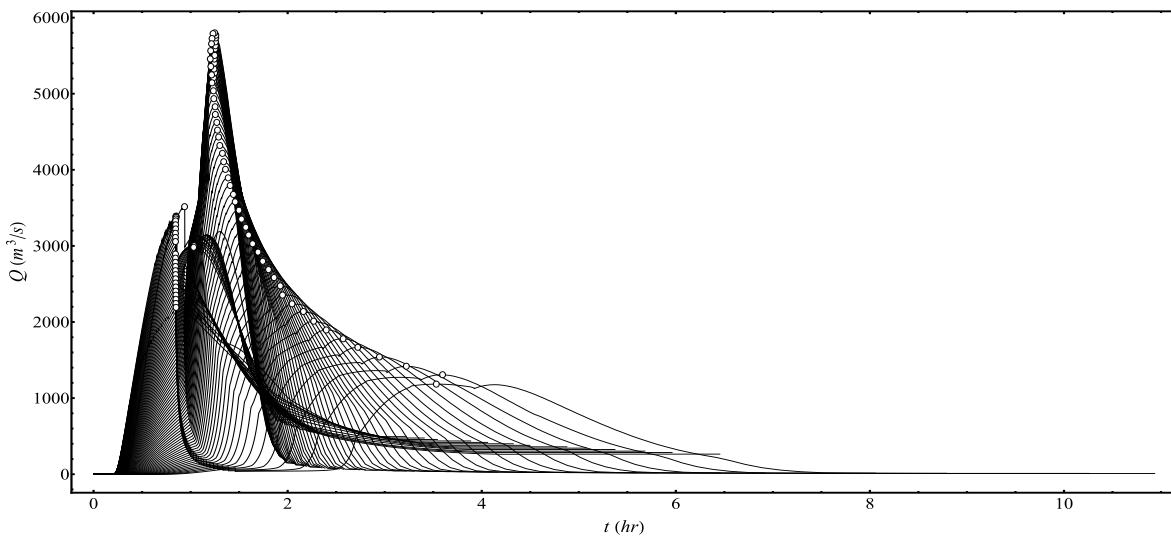
در حالت شکست آبی سد فرض می‌شود عمق جریان در محل شکست سد (در موقعیت بدنه) ثابت بوده و سرعت موج نیز در این موقعیت برابر با صفر باشد. در نظر گرفتن حجم مخزن، هیدروگراف دبی خروجی از سد در این حالت شامل دو قسمت می‌شود. ناحیه اول که دبی در تمام دوره زمانی ثابت و برابر با رابطه فوق خواهد بود. در این قسمت به دلیل خروج دبی از مخزن سد، مقدار حجم آب در مخزن و به دنبال آن تراز سطح آب کاهش می‌یابد. این فرآیند ادامه می‌یابد تا اینکه تراز سطح مخزن با  $4/9 \cdot y_0$  برابر شده و دبی خروجی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، برای مدل‌سازی این سناریو در نرم‌افزار HEC-RAS، از ارتباط بین مخزن و فضای دوبعدی استفاده شده و زمان شکست سد تنها چند ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

#### تحلیل هیدرولیکی شکست رگاب

در سناریو شکست سد ناشی از رگاب فرض عدم ورود



شکل (۷): شبیه‌سازی شکست سد تبارک‌آباد ناشی از پدیده رگاب به ازای ۶۵ تراز



شکل (۸): شبیه‌سازی شکست سد چهچه ناشی از پدیده رگاب به ازای ۸۴ تراز

نکته حائز اهمیت در این هیدروگراف‌ها آن است که لزوماً کمترین زمان دبی حداکثر و بیشترین مقدار دبی حداکثر متعلق به یک هیدروگراف نیست. لذا به منظور تعیین مهمترین هیدروگراف، از روش مرتب‌سازی عملکرد پاسخ‌ها بر اساس شباهت به پاسخ ایده‌آل (TOPSIS)<sup>۵</sup> بهره گرفته شده که بر اساس آن، دو معیار اصلی برای هر هیدروگراف یعنی زمان دبی حداکثر و مقدار دبی حداکثر با ضریب وزنی

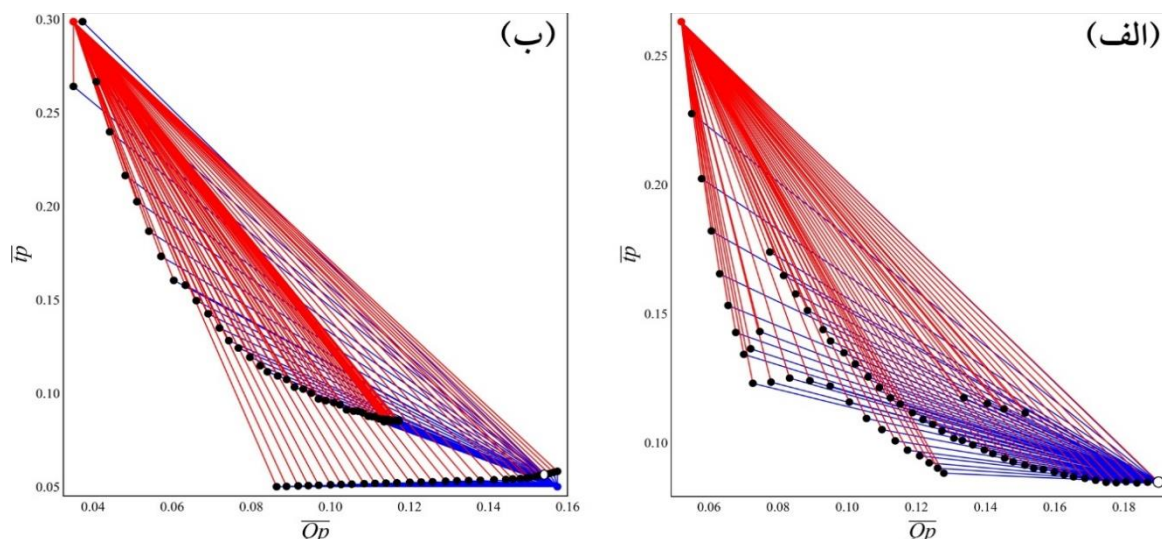
از آنجایی که در شکل‌گیری این پدیده رگاب، تراز آب کافی بر روی روزنه ایجاد شده برای تکمیل فرآیند شکست الزامی است، فقط ۶۵ تراز در سد تبارک‌آباد و ۸۴ تراز در سد چهچه می‌توانند این فرآیند را تکمیل کنند. نتایج بدست‌آمده در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند که در آنها موقعیت زمانی دبی حداکثر هر یک از هیدروگراف‌ها به صورت دایره توخالی نمایش داده شده است.

<sup>5</sup> Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

به نتایج حاصل از این روش بدترین شکست ناشی از رگاب در سد تبارک‌آباد به تراز ۲۲/۱۲ متر از کف و در سد چهچه به تراز ۲۰/۱۷ متر از کف مخزن به وجود می‌آید. در نهایت هیدروگراف‌هایی که از روش TOPSIS استخراج شده‌اند، برای دو سد تبارک‌آباد و چهچه به‌عنوان هیدروگراف ناشی از شکست رگاب در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۱۰ را مشاهده کنید) که به‌منظور صحت‌سنجی مدل برنامه‌نویسی شده، با نتایج تولید شده از نرم‌افزار BRCH-J مقایسه گردیده‌اند. مطابق با این شکل، برای شبیه‌سازی پدیده رگاب تطابق قابل قبولی بین کد برنامه‌نویسی و نتایج تولید شده با نرم‌افزار BREACH مشاهده می‌شود و تفاوت‌های نمایان شده به دلیل فرضیات و گام‌های زمانی متفاوت است.

برابر در فرآیندی ریاضی قرار گرفته و نتایج نهایی آن در شکل ۹ نشان داده شده است.

هدف از روش TOPSIS یافتن پاسخی از مجموعه پاسخ‌هاست که به ایده‌آل‌ترین پاسخ فرضی حاصل از نتایج بدست‌آمده نزدیک‌تر و از بدترین پاسخ فرضی مجموعه پاسخ دورتر باشد. برای نتایج ارائه شده در شکل ۹، پس از نرمال‌سازی دبی‌های حداکثر و زمان متناظر با آن‌ها توسط دستورالعمل موجود در این روش، فاصله بین بهترین پاسخ فرضی با مجموعه پاسخ‌ها (دایره‌های توپر) با خطوط آبی‌رنگ و فاصله بین بدترین پاسخ فرضی با مجموعه پاسخ‌ها با خطوط قرمز رنگ نمایش داده شده‌اند. همچنین بهترین پاسخ نیز با دایره سفید ترسیم شده است. با توجه



شکل ۹): نتایج حاصل از روش TOPSIS برای سدهای (الف) تبارک‌آباد و (ب) چهچه (برای درک بهتر شکل به نسخه رنگی و برخط مراجعه شود)

هواشناسی، مشخصات حوضه آبریز، شناخت مدل‌های آماری، اطلاعات توپوگرافی بستر حوضه و ... بوده و نتیجه آن دبی ورودی به مخزنی با احتمال پایین‌تر از PMF و شدت بیشتر است. روش دوم نیز در نظر گرفتن نقصی در سیستم هیدرولیکی سرریز سد بوده به‌گونه‌ای که در هنگام ورود سیلاب به مخزن سد، سرریز سد توانایی عبور تنها ۵۰ درصد از حجم افزوده شده به مخزن را داشته باشد. با توجه

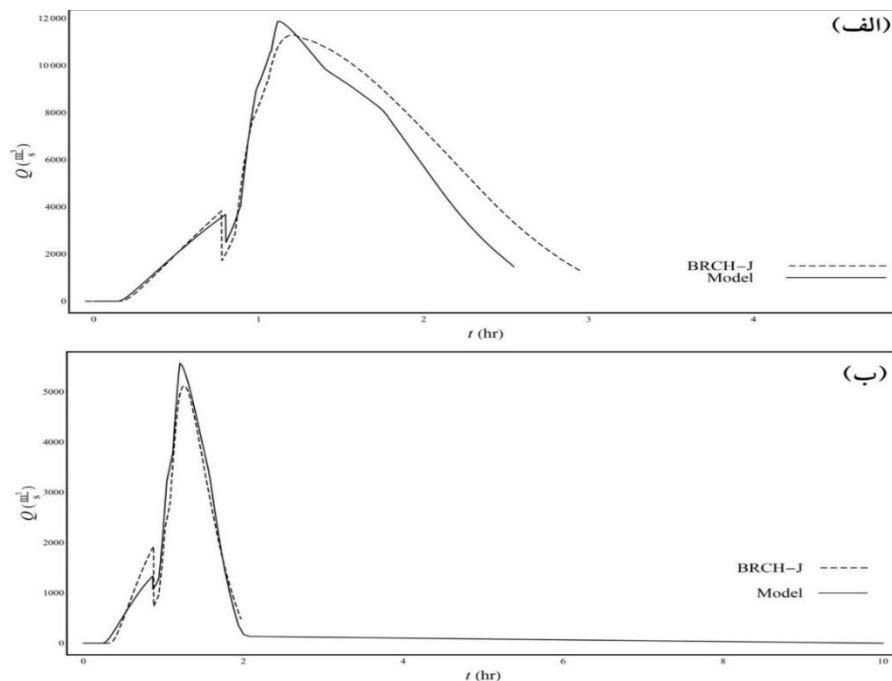
### تحلیل هیدرولیکی شکست روگذری

با توجه به اینکه سرریز هر دو سد برای سیلاب PMF طراحی شده‌اند، به‌منظور تحلیل روگذری نیاز به سناریو جدیدی برای به وقوع پیوستن شکست روگذری مورد نیاز بوده که از دو طریق فراهم است. روش اول تعیین سیلاب ورودی به مخزن با استفاده از مدل‌های هیدرولوژی است که نیازمند داشتن اطلاعات مختلفی نظیر ایستگاه‌های

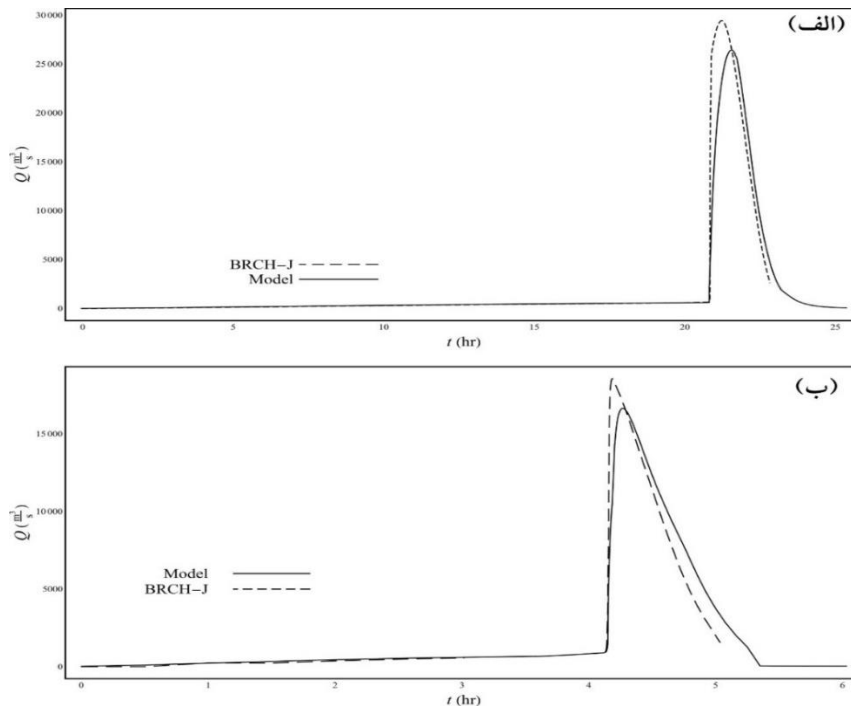
احتمال ناچیز بررسی می‌شود. بررسی این سناریو در سد چهچهه بیانگر موضوعی دیگر است. چنانچه سد چهچهه در آستانه سرریز شدن باشد و سیلابی معادل با دبی سیلاب PMF به مدت زمان پیک سیلاب (۵ ساعت) به مخزن ورود کند و همچنین سرریز سد عملکرد ۵۰ درصدی داشته باشد آنگاه خطر شکست روگذری در این وضعیت وجود دارد. به عبارت بهتر، به منظور جلوگیری از بروز شکست روگذری، عملکرد درست سرریز سد چهچهه در موقع بحرانی به مراتب از عملکرد سرریز در سد تبارک‌آباد از اهمیت بالاتری برخوردار است. مشابه قسمت قبل، به منظور صحت‌سنجی مدل برنامه‌نویسی شده نتایج تولید شده از نرم‌افزار BREACH و همچنین کد برنامه‌نویسی شده در وضعیت شکست روگذری برای هر یک از سدهای تبارک‌آباد و چهچهه در شکل ۱۱ ارائه شده است که بر این اساس تطابق قابل قبولی بین نتایج حاصل از نرم‌افزار و کد برنامه‌نویسی برقرار است.

به موارد فوق، روش دوم باتوجه به اینکه نیاز به اطلاعات آماری نداشته و از طرفی هم اهمیت سالم بودن سازه سرریز سدهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور سیلاب ورودی به مخزن معادل PMF و زمان سیلاب نیز معادل با زمان پیک سیلاب در مطالعات هیدرولوژی موجود در نظر گرفته شد.

با توجه به شکل توپوگرافی مخزن سد تبارک‌آباد که در ترازهای نزدیک به تاج سد، سطح و حجم مخزن به شدت افزایش می‌یابد و همچنین با بررسی مدل BREACH مشخص گردید که حتی با عملکرد حدود ۵۰ درصدی سرریز، در مدت زمان سیلاب ورودی به مخزن معادل با ۵ ساعت هیچ خطری را برای سد به وجود نمی‌آورد. از طرفی با آنالیزهای انجام شده مشخص گردید این سناریو به ازای مدت زمان سیلابی برابر با ۲۵ ساعت احتمال وقوع دارد. از این جهت احتمال شکست روگذری در این سد بسیار پایین به نظر می‌رسد. البته در این تحقیق شکست روگذری با این



شکل (۱۰): هیدروگراف طرح و صحت‌سنجی نتایج مدل برنامه‌نویسی شده با نتایج BREACH ناشی از شکست رگاب برای سدهای (الف) تبارک‌آباد و (ب) چهچهه



شکل (۱۱): هیدروگراف طرح و صحت سنجی نتایج مدل برنامه‌نویسی شده با نتایج BREACH ناشی از شکست روگذری سدهای (الف) تبارک‌آباد و (ب) چهچهه

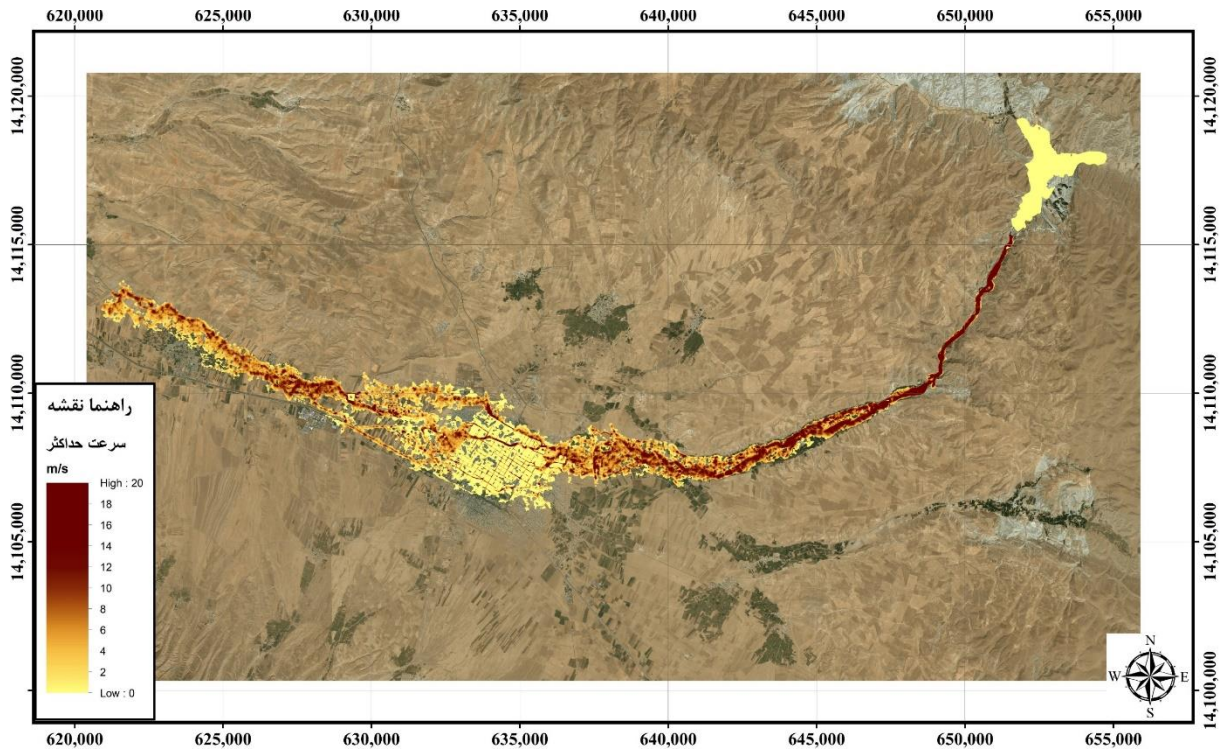
هیدرولیکی‌ها رودخانه‌ها، (۱۳۹۴) و جدول «تعیین ضریب زبری بر اساس تجربیات چاو» و ملاحظات مربوط به نوع آبراهه پایین‌دست سدها مقدار زبری کمینه برابر ۰/۰۲ و زبری بیشینه برابر ۰/۰۷ در نظر گرفته می‌شود. به علاوه برای مناطق مسکونی که ساختمان‌های در معرض خطر را شامل می‌شوند بسته به نوع استحکامات متفاوت و در این تحقیق برابر با ۱۰ منظور شده است. مطابق توضیحات قبلی، شرایط مرزی بالادست در دو سناریو شکست روگذری و رگاب مربوط به هیدروگراف خروجی از مخزن سد شکسته شده و در شکست آبی مجموعه‌ای از مشخصات مخزن سد، در پایین‌دست برابری شیب اصطکاکی و شیب طبیعی زمین و شرط اولیه، عدم وجود جریان در رودخانه پایین‌دست می‌باشد.

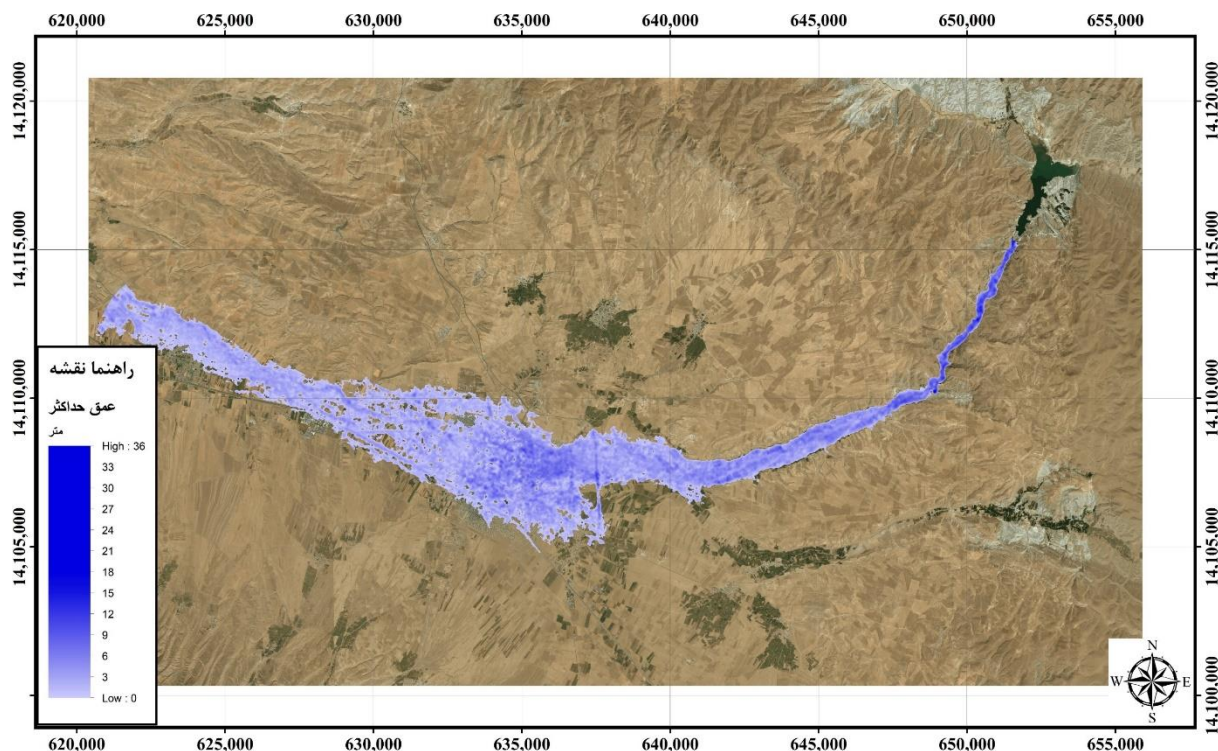
به‌منظور تحلیل جریان در نرم‌افزار HEC-RAS (دوبعدی) ابتدا داده‌های توپوگرافی به‌دست‌آمده از نقشه‌های ماهواره‌ای به نرم افزار وارد می‌شود و سپس مقاطع جریان شبکه‌بندی شده و زبری و شرایط مرزی و اولیه اعمال

### تحلیل جریان غیرماندگار و پهنه‌بندی سیلاب

به‌منظور شبیه‌سازی جریان غیردائمی ناشی از شکست سد، داده‌های ورودی از قبیل هندسه مقطع عرضی، زبری ناحیه‌های مختلف، داده‌های مربوط به شرایط اولیه و داده‌های مربوط به شرایط مرزی نیاز خواهد بود. اطلاعات هندسی مقاطع عرضی (توپوگرافی منطقه) با استفاده از نقشه‌های ماهواره‌ای استخراج شده است. از طرفی پارامتر تعیین کننده در تعیین عمق و سرعت جریان، پارامتر زبری جریان است که تخمین دقیق آن در رودخانه‌ها و اراضی پایین‌دست در عمل بسیار دشوار و پرهزینه بوده و نیازمند مطالعات و آزمایش‌های مستمر است. از آنجایی که جنس بستر در پایین‌دست این سدها مجموعه‌ای از مصالح را شامل می‌شود و قطعیتی در خصوص مقادیر زبری در هنگام بروز شکست سد وجود ندارد، انتخاب دو مقدار کمینه و بیشینه زبری امری منطقی به نظر می‌رسد. برای تعیین زبری با توجه به پیشنهاد ضابطه شماره ۶۸۸ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (راهنمای تعیین ضریب زبری

تحلیل انجام می شود.





شکل (۱۳): نقشه حداکثر عمق جریان در وضعیت زبری حداکثر برای سناریو شکست روگذری سد تبارک آباد

بدست آمده برای شکست سد تبارک آباد سرعت جریان تا حداکثر ۲۰ متر بر ثانیه و در محدوده نزدیک به سد تا فاصله حدود ۱۵ کیلومتری که به شهر می‌رسد اتفاق افتاده و سپس به سرعت در ناحیه آب گرفتگی محدوده شهری تنزل می‌یابد. شایان ذکر است که محدوده سرعت حداکثری برای سناریو شکست ناگهانی نسبت به دو سناریو دیگر محدوده وسیع‌تری از پایین دست سد را (تا نزدیکی شهر) فرا گرفته است. از سوی دیگر حداکثر عمق پیشانی جریان برای شکست آنی کمتر از دو سناریو دیگر است و بیشترین مقدار عمق جریان در حالت شکست روگذری با مقدار عددی ۳۶ متر اتفاق افتاده است.

در ارتباط با سد چهچه به عنوان نمونه نتایج سناریوی شکست ناگهانی در ارتباط با حداکثر سرعت جریان در وضعیت زبری حداقل در شکل ۱۴ و نتایج سناریوی شکست رگاب برای حداکثر عمق جریان در وضعیت زبری حداکثر در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند.

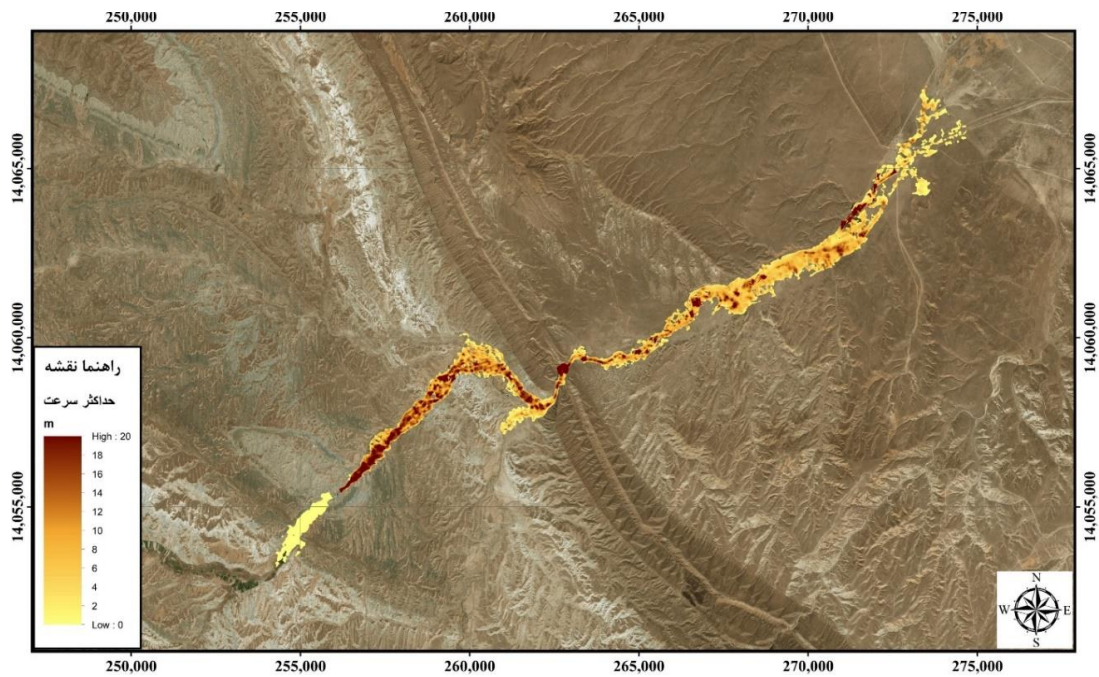
مشابه نتایج بدست آمده برای سد تبارک آباد، مطابق نتایج شبیه‌سازی بدست آمده برای شکست سد چهچه

از آنجاکه مدل برنامه نویسی شده (برای تحلیل جریان و همچنین تخمین پارامترهای شکست سد از نوع رگاب در ۱۰۰ تراز)، جریان غیرماندگار در فضای یک‌بعدی را برای کانال‌های منشوری و مرکب محاسبه می‌کند، صحت‌سنجی کد برنامه نویسی شده با داده‌های آزمایشگاهی Rashid and Chaudhry (1995) ارائه شده و تحلیل جریان توسط برنامه HEC-RAS در فضای دوبعدی انجام گرفته است. در تحلیل نتایج نقشه‌های پهنه بندی سیلاب ناشی از شکست سد برای حالت‌های مختلف از جمله حداکثر سرعت جریان در وضعیت زبری و حداکثر عمق جریان در وضعیت زبری حداکثر در هر یک از سه سناریوی شکست ناگهانی، شکست رگاب و شکست روگذری مورد ترسیم و مورد بحث قرار گرفته شده است.

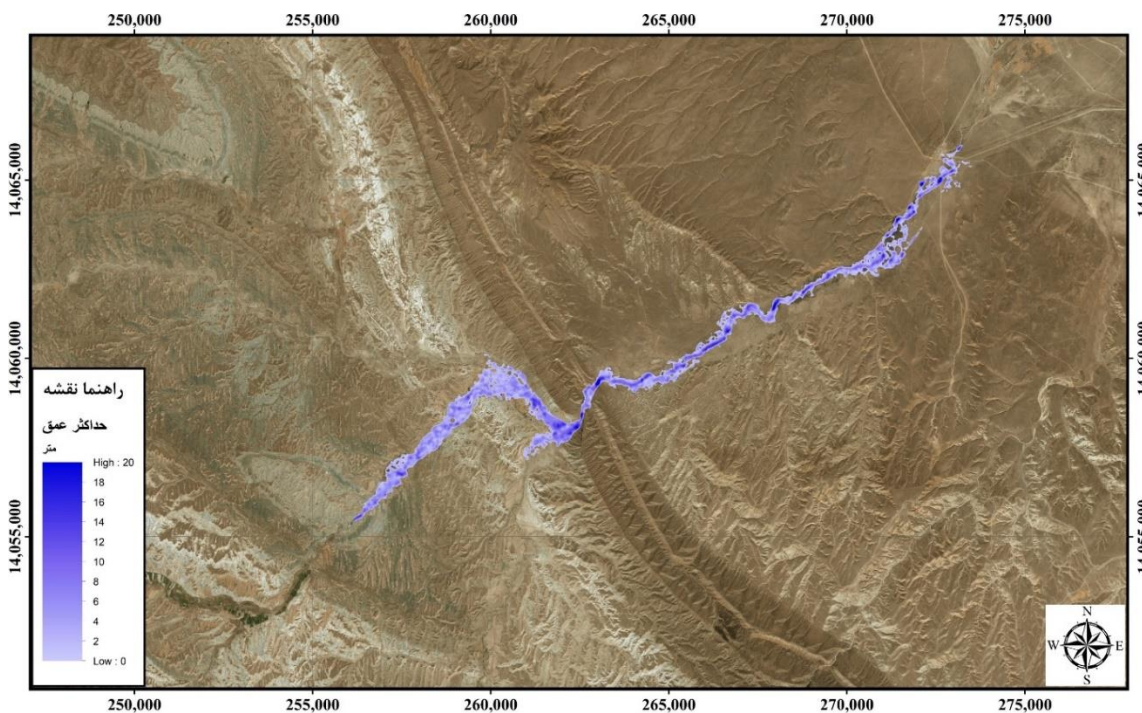
در ارتباط با سد تبارک آباد به عنوان نمونه نتایج سناریوی شکست ناگهانی در ارتباط با حداکثر سرعت جریان در وضعیت زبری حداقل در شکل ۱۲ و نتایج سناریوی شکست روگذری برای حداکثر عمق جریان در وضعیت زبری حداکثر در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی

علاوه نسبت به سد تبارک‌آباد برای محدوده سرعت حداکثری مشابه، حداکثر عمق برای شکست سد چهچهه کمتر بوده است که دلیل آن حجم آب کمتر (در تراز نرمال) این سد نسبت به سد تبارک‌آباد می‌باشد.

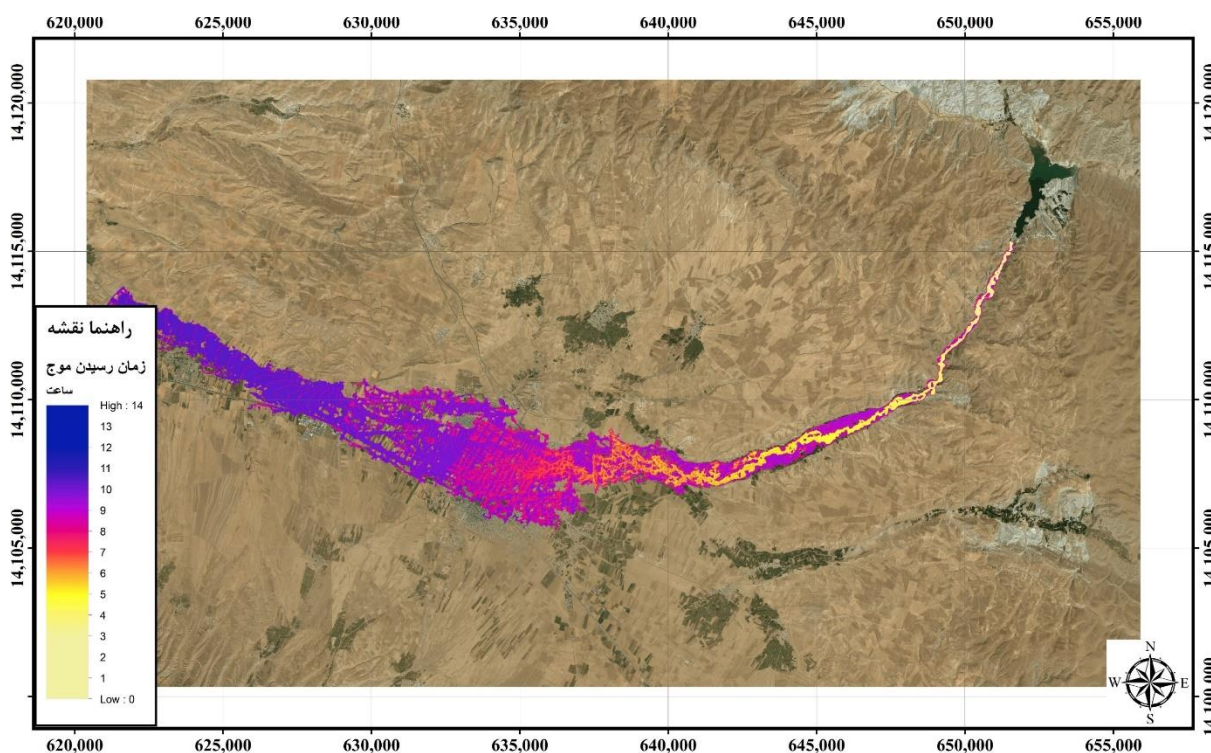
سرعت حداکثر جریان تا ۲۰ متر بر ثانیه بوده و که در حالت شکست ناگهانی محدوده وسیع‌تری را فرا گرفته است. برای حداکثر عمق پیشانی جریان نیز محدوده ۰ تا ۲۰ ثبت شده است که با توجه به اینکه غالب طول مسیر پایین دست کم عرض بوده است، مقادیر حداکثری را تجربه نموده است. به



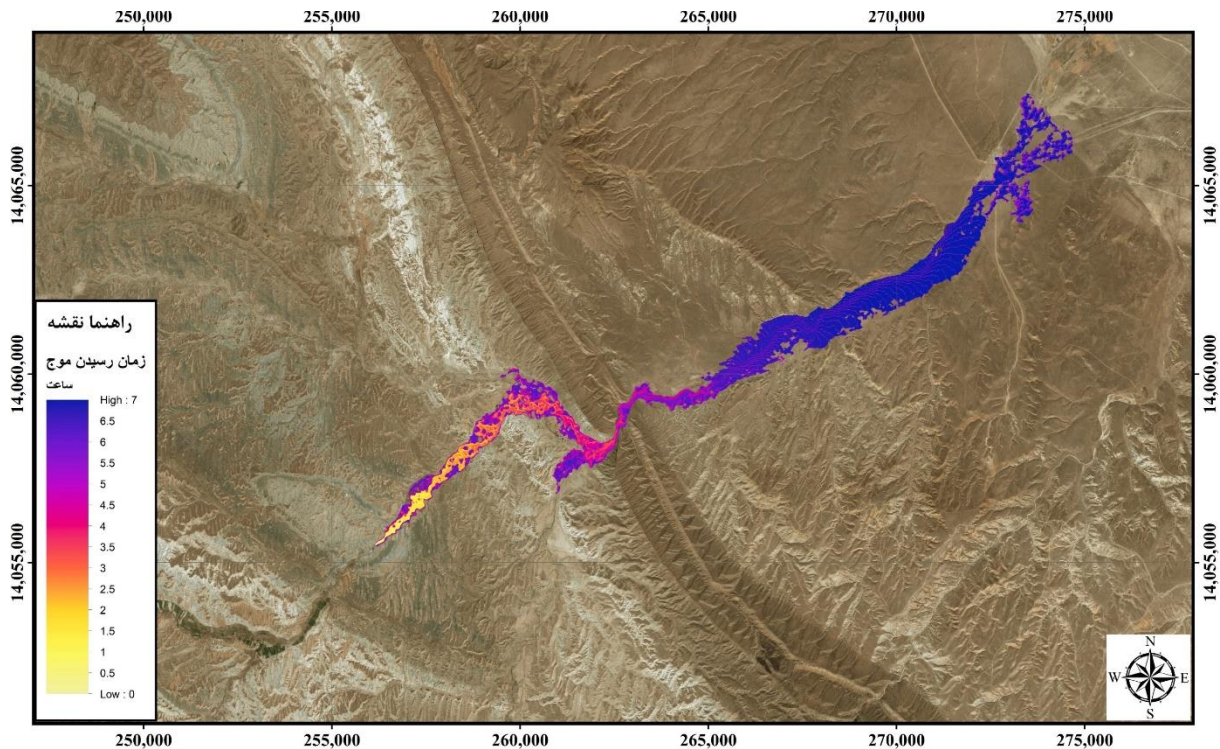
شکل (۱۴): نقشه حداکثر سرعت جریان در وضعیت زبری حداقل برای سناریو شکست ناگهانی سد چهچهه



شکل (۱۵): نقشه حداکثر عمق جریان در وضعیت زبری حداکثر برای سناریو شکست رگاب سد چهچه



شکل (۱۶): نقشه زمان رسیدن امواج سیلاب در وضعیت زبری حداقل برای سناریو شکست روگذری سد تبارک آباد



شکل (۱۷): نقشه زمان رسیدن امواج سیلاب در وضعیت زبری حداقل برای سناریو شکست روگذری سد چهچه

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 است. برای سد چهچه با توجه به سناریوهای مختلفی که برای شکست این سد در نظر گرفته شده است، برخلاف سد تبارک، امکان بروز شکست روگذری وجود دارد و کمترین زمان تقریبی رسیدن موج سیلاب به محدوده مسکونی پس از نشانه‌های شکست تدریجی در حدود ۴۵ دقیقه تا ۱ ساعت برآورد می‌گردد. چنین برآورد زمانی در تحلیل‌های مرتبط با ریسک سیلاب و آسیب‌پذیری می‌تواند حائز اهمیت باشد.

و عمق جریان سیلاب ناشی از شکست سد، زمان رسیدن اولین اثرات سیل و پهنه‌هایی که زیر آب خواهند رفت مشخص گردیده‌اند. برنامه‌های کامپیوتری ارائه شده در این پژوهش قابل استفاده برای سایر سدها در سطح کشور نیز می‌باشد. برنامه کامپیوتری در بستر نرم‌افزار Mathematica توسعه داده شده که با کمک آن و در

شایان ذکر است که هماهنگی که پی از این اشاره گردید برای سدهای خاکی مورد مطالعه شکست رگاب محتمل‌تر از شکست روگذری و ناگهانی است و لذا پایداری و کنترل نشت از بدنه سد می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی پیامدهای جبران‌ناپذیر شکست این سدها را کاهش دهد. نتایج پهنه‌بندی زمان رسیدن سیلاب به پایین دست سدها برای سناریو شکست روگذری در اشکال ۱۶ و ۱۷ به ترتیب برای سدهای تبارک‌آباد و چهچه برای نمونه در حالت زبری حداقل که بیشترین شتاب فراگیری سیلاب می‌باشد، نمایش داده شد است. بررسی پهنه‌بندی سیلاب ناشی از سناریوهای مختلف برای سد تبارک‌آباد نشان می‌دهد که

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده روش‌های نوین، سناریوهای مختلف شکست سدهای تبارک‌آباد و چهچه به‌منظور تعیین وضعیت هیدرولیکی شکست و مدل‌سازی جریان غیردائمی ناشی از آن انجام شده است. لذا با توجه به سرعت

محدوده شهر قوچان در حدود ۱ ساعت و نیم تا ۲ ساعت است. این زمان برای رسیدن موج سیلاب به مناطق مسکونی برای سد چهچهه پس از نشانه‌های شکست تدریجی در حدود ۴۵ دقیقه تا ۱ ساعت برآورد گردیده است. با اینحال ارتفاع پیشانی سیلاب حدود ۱۵ تا ۲۰ متر پس از وقوع شکست سد برای هر دو سد خواهد بود که به طور حتم برای اراضی کشاورزی، باغات و ساختمان‌های این محدوده خسارت جدی به بار خواهد آورد و در بخش دوم این تحقیق (کاوسی‌زاد و همکاران، ۱۴۰۱) مورد به همراه تحلیل ریسک مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

برای ادامه تحقیق پیشنهاد می‌گردد برنامه کامپیوتری و تجاری برای تخمین پارامترهای شکست سد بر اساس مدل توسعه داده شده در این پژوهش ارائه گردد. علاوه بر این با توجه به اهمیت موضوع ضرورت دارد تحلیل مشابهی برای سایر سدهای خاکی استان اجرا گردد.

ترکیب با نتایج نرم‌افزار BREACH امکان تعیین بدترین وضعیت شکست تدریجی سد فراهم گردیده و در تحلیل جریان غیردائمی ناشی از شکست از طریق یک فرآیند تکراری منظور شده است. به علاوه کد کامپیوتری کاربر را قادر خواهد ساخت تا تحلیل‌هایی به منظور تعیین مهمترین هیدروگراف، با از روش مرتب‌سازی عملکرد پاسخ‌ها بر اساس شباهت به پاسخ ایده‌آل (TOPSIS) انجام داده که بر اساس آن، دو معیار اصلی برای هر هیدروگراف یعنی زمان دبی حداکثر و مقدار دبی حداکثر با ضریب وزنی برابر در فرآیندی ریاضی قرار خواهند گرفت. هرچند که شکست رگاب برای سدهای خاکی محتمل‌تر بوده است، وضعیت هیدرولیکی شکست برای سه سناریو شکست آنی، رگاب و روگذری برای دو سد تبارک‌آباد و چهچهه انجام گردیده و نتایج پهنه‌بندی سیلاب ناشی از سناریوهای مختلف و برای دو حالت زبری حداقل و حداکثر بدست آمده است. نتایج سرعت و عمق جریان سیلابی حاکی از آن بوده که برای سد تبارک‌آباد زمان تقریبی رسیدن پیشانی موج سیلاب به

## منابع

کاوسی‌زاد، ا.، براتی، ر.، فرودی، ع. و صبورکازران، ح. (۱۴۰۱). شبیه‌سازی هیدرولیکی شکست سدهای خاکی: بخش دوم؛ تحلیل ریسک و شناسایی نقاط آسیب‌پذیر در سدهای تبارک‌آباد و چهچهه. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، همین شماره.

نشریه شماره ۶۸۸: راهنمای تعیین ضریب زبری هیدرولیکی رودخانه‌ها (۱۳۹۴)، وزارت نیرو؛ دفتر استانداردهای فنی، مهندسی، اجتماعی و زیست محیطی آب و آبفا. معاونت فنی و توسعه امور زیربنایی؛ امور نظام فنی و اجرایی کشور - دانشگاه تهران؛ کمیته تخصصی مهندسی رودخانه و سواحل

Amini, A., Ali, T. M., Ghazali, A. H. & Huat, B. K. (2009). Adjustment of peak streamflows of a tropical river for urbanization, *American Journal of Environmental Sciences*, vol. 5, p. 285.

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.

Akan, A.O. (2011). *Open channel hydraulics*: Elsevier.

Akbari, G. H., & Barati, R. (2012). Comprehensive analysis of flooding in unmanaged catchments. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 165(4), 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. (2023a). Development of a distributed nonlinear Muskingum model by considering snowmelt effects for flood routing in the Red River. *Scientific Reports*, 13(1), 21356.



- Atashi, V., Barati, R., & Lim, Y. H. (2023b). Distributed Muskingum model with a Whale Optimization Algorithm for river flood routing. *Journal of Hydroinformatics*, 25(6), 2210-2222.
- Atashi, V., Barati, R., & Lim, Y. H. (2023c). Improved river flood routing with spatially variable exponent Muskingum model and sine cosine optimization algorithm. *Environmental Processes*, 10(3), 42.
- Badfar, M., Barati, R., Dogan, E., & Tayfur, G. (2021). Reverse flood routing in rivers using linear and nonlinear Muskingum models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(6), 04021018.
- 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), 8-20.
- Chang, T.-J., Kao, H.-M., Chang, K.-H. & Hsu, M.-H. (2011). Numerical simulation of shallow-water dam break flows in open channels using smoothed particle hydrodynamics," *Journal of Hydrology*, vol. 408, pp. 78-90.
- Fread, D., (1984). DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model vol. 4: Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA.
- Fread, D. (1988). BREACH, an erosion model for earthen dam failures: Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA.
- Hajeri, S., Shivapur, A.V and Venkatesh, B. 2016. Flood plain mapping and dam break analysis for Neerasagar reservoir. *International Research Journal of Engineering and Technology* 3(6): 1279-1285.
- Heidari, S. M. (2020). Emergency Action Plan for Flash Flood Due to Dambreak–Case Study: Shahrchai Dam, Urmia (Iran). Urmia (Iran). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3709042>.
- 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.
- Rashid, R.M. and Chaudhry, M.H. (1995). "Flood routing in channels with flood plains," *Journal of Hydrology*, vol. 171, pp. 75-91.
- Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters, *Journal of hydraulic engineering*, vol. 130, pp. 389-397, 2004.
- Wahl, T.L. 1998. Prediction of Embankment Dam Breach Parameters. A Literature Review and Needs Assessment. U.S. Bureau of Reclamation Dam Safety Report DSO-98-004.
- Zhang, L., Xu, Y. & Jia, J. (2009). Analysis of earth dam failures: A database approach, *Georisk*, vol. 3, pp. 184-189.