



An Experimental Investigation of Homogeneous Embankment Dams Overtopping Breach Hydraulic Results by Different Scenarios

Mahdi Ebrahimi¹ | Mirali Mohammadi² | Sayed Mohammad Hadi Meshkati³ | Farhad Imanshoar⁴

1. Department of Civil Engineering (Water and Hydraulic Structures), Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: ma.ebrahimi@urmia.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering (Water and Hydraulic Structures), Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: m.mohammadi@urmia.ac.ir
3. Department of Hydraulics and Hydro-Environmental Engineering, Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: smh.meshkati@wri.ac.ir
4. Iranian Water Resources Management Company, Tehran, Iran. E-mail: imanshoar@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 4 February 2023
Received in revised form
9 July 2023
Accepted 1 July 2023
Published online 12 October 2023

Keywords:

Breach geometry
Embankment dam
Flow hydrograph
Physical model
Sedimentation pattern

ABSTRACT

Experimental investigation of embankment dams due to overtopping breach is a remarkable subject because it is the most possible failure reason, and it includes a complicated process. The mentioned phenomenon physical modeling has performed at energy ministry water research institute, hydraulics laboratory, and its hydraulic outputs compared with a benchmark model outcome in three scenarios framework. The results reveal that the breach process of physical models comprises three stages: i.e., initiation, development, and the end. Also, the development time is longer than that of the other stages. In first scenario, when shell gradation d_{50} varied from 0.5mm to 1.7mm, 26 percent of peak discharge increased and 14 percent of breach time decreased. In second scenario in which lake water level maintained at overtopping threshold for two hours (for more saturation), 15 percent of peak discharge and 14 percent of breach time declined. In third scenario where the primary breach groove did not excavate, the highest difference in comparison with benchmark model results occurred, when 34 percent of peak discharge grew and 24 percent of breach time reduced. Moreover, asymmetrical sedimentation pattern happened in the last scenario. The Calculation of eroded material volume and mass was sedimentation pattern determination harvest. Herein, the simultaneous measurements of breach geometry, flow hydrograph, and final sedimentation pattern are the research unique achievements. However, further acquired analysis would be influential for the embankment dam's failure phenomenon management.

Cite this article: Ebrahimi, M., Mohammadi, M., Meshkati, S. M. H., & Imanshoar, F. (2023). An Experimental Investigation of Homogeneous Embankment Dams Overtopping Breach Hydraulic Results by Different Scenarios. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (3), 651-664. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.354765.1047>





پژوهش آزمایشگاهی آثار هیدرولیکی شکست روگذری سدهای خاکی همگن تحت سناریوهای مختلف

مهدی ابراهیمی^۱ | میرعلی محمدی^۲ | سیدمحمدهادی مشکاتی^۳ | فرهاد ایمانشعار^۴

۱. گروه مهندسی عمران (آب و سازه‌های هیدرولیکی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: ma.ebrahimi@urmia.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران (آب و سازه‌های هیدرولیکی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.mohammadi@urmia.ac.ir
۳. پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط‌های آبی، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: smh.meshkati@wri.ac.ir
۴. شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران. رایانامه: imanshoar@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵
 تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸
 تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰
 تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

شکست روگذری، به‌عنوان محتمل‌ترین علت خرابی در سدهای خاکی است که دارای پیچیدگی زیادی بوده و بنابراین بررسی آزمایشگاهی آن، از دیدگاه پژوهشی دارای اهمیت زیادی است. مدل‌سازی فیزیکی پدیده مذکور در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شد و آثار هیدرولیکی آن در قالب سه سناریو با مدل مبنا مقایسه گردید. نتایج حاکی از آن است که فرایند شکست مدل‌های فیزیکی از سه مرحله شروع، توسعه و خاتمه تبعیت می‌کند که در تمام آزمایش‌های انجام‌شده، مدت زمان مرحله توسعه، طولانی‌تر از مراحل دیگر بود. در سناریوی اول با افزایش قطر میانگین مصالح پوسته از ۰/۵ میلی‌متر به ۱/۷ میلی‌متر، ۲۶ درصد افزایش دبی اوج و ۱۴ درصد کاهش زمان شکست رخ داد. سناریوی دوم که در آن ماندگار کردن آب در دریاچه به‌مدت دو ساعت در تراز نزدیک به روگذری (به‌منظور افزایش میزان اشباع شدگی مصالح) بررسی گردید، حاکی از کاهش دبی اوج به میزان ۱۵ درصد و کاهش مدت زمان شکست به میزان ۱۴ درصد بوده است. در سناریوی سوم، با لحاظ‌کردن کانال اولیه شکست در تاج مدل فیزیکی، افزایش ۳۴ درصدی دبی اوج و کاهش ۲۴ درصدی زمان شکست و الگوی رسوب‌گذاری نامتقارن مشاهده گردید که بیش‌ترین اختلاف را با نتایج مدل مبنا نشان داد. محاسبه حجم مصالح فرسایش یافته و جرم آن‌ها از دیگر نتایج مربوط به تعیین الگوی رسوب‌گذاری در این پژوهش بوده است. اندازه‌گیری همزمان هندسه شکست، هیدروگراف جریان و الگوی رسوب‌گذاری نهایی از دستاوردهای منحصربه‌فرد پژوهش حاضر است و در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده در مدیریت پدیده شکست سدهای خاکی مؤثر خواهد بود.

کلیدواژه‌ها:

الگوی رسوب‌گذاری
 سد خاکی
 مدل فیزیکی
 هندسه شکست سد
 هیدروگراف جریان

استناد: ابراهیمی، مهدی؛ محمدی، امیرعلی؛ مشکاتی، سیدمحمدهادی؛ و ایمانشعار، فرهاد (۱۴۰۲). پژوهش آزمایشگاهی آثار هیدرولیکی شکست روگذری سدهای خاکی همگن تحت سناریوهای مختلف. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۳)، ۶۴۱-۶۴۴.
 DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.354765.1047>



۱- مقدمه

اهمیت بررسی پدیده شکست سدهای خاکی ناشی از روگذری جریان از آنجا نشأت می‌گیرد که از میان تعداد ۸۰۰۰۰ سد ثبت‌شده توسط U.S National Inventory، تعداد ۸۱ درصد از آن‌ها خاکی بوده است. همچنین علت شکست درصد قابل توجهی از سدهای خاکی (حدود ۴۵ درصد)، پدیده روگذری بوده است (ICOLD, 2019). منظور از روگذری، عبور جریان آب از روی تاج سد است که سبب فرسایش و آبستگی در بدنه سد و تخریب آن می‌شود و به‌طور عمده به دلایلی همچون عدم ظرفیت کافی سرریز جهت تخلیه سیلاب، کاهش ظرفیت ذخیره آب مخزن سد به‌علت انباشتگی رسوبات و نشست سد رخ می‌دهد (Association of state dam safety officials, 2023). بررسی پدیده شکست سدهای خاکی تحت سناریوهای روگذری، از نظر مدیریت پیامدهای جانی، مالی و زیست‌محیطی، دارای اهمیت کاربردی است. به‌علاوه، حمل رسوبات ناشی از شکست سدهای خاکی، از این زاویه قابل بحث می‌باشد که بعد از اتمام عمر سدهای ساخته‌شده و یا لزوم برچیدن سد، نیاز به مشخص‌نمودن نحوه حمل رسوب و انباشتگی رسوبات حاصله است. مهم‌ترین اهداف در مطالعه آزمایشگاهی شکست سدهای خاکی، حصول هندسه شکست، هیدروگراف جریان ناشی از شکست و الگوی رسوب‌گذاری می‌باشد که برخی از آن‌ها در تحقیقات قبلی، موردتوجه قرار گرفته است. بررسی روند شکست سدهای خاکی، به مشخصات هندسی سد و مخزن، ویژگی‌های ژئوتکنیکی سد و مشخصه‌های سیلاب ورودی به مخزن سد، وابسته است. آنالیز پدیده مذکور تاکنون از طریق مدل‌های مقایسه‌ای، تجربی، نیمه‌فیزیکی (مانند HEC-RAS) و فیزیکی (مانند Breach) انجام شده است که اهمیت هیچ‌کدام به اندازه مدل‌سازی آزمایشگاهی نخواهد بود. زیرا فرایند شکست سدهای خاکی و عوامل متعدد اثرگذار بر آن در قالب مدل‌سازی‌های غیرآزمایشگاهی با ساده‌سازی‌هایی همراه است که صحت نتایج را با چالش جدی مواجه خواهد کرد. هندسه شکست، معمولاً به‌شکل دوزنقه است و مهم‌ترین پارامترهای آن، ارتفاع شکست و عرض شکست می‌باشد (شکل ۱).

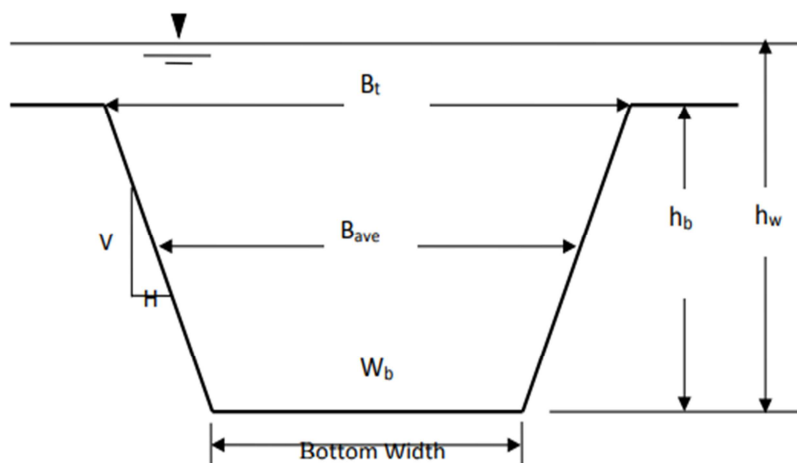


Figure 1. A sample of breach geometry

در شکل فوق، h_b ارتفاع مقطع شکست سد، B_t عرض بالای مقطع شکست، W_b عرض پایین مقطع شکست، B_{ave} عرض متوسط مقطع شکست، V شیب عمودی مقطع شکست، H شیب افقی مقطع شکست و h_w ارتفاع آب هنگام روگذری است (Brunner, 2016). بسته به روند شکست سدهای خاکی، مراحل (فازهای) مختلفی برای تفسیر هیدروگراف در نظر گرفته می‌شود، اما همواره یکی از اهداف مهم در اندازه‌گیری آن، تعیین دبی اوج و زمان رخداد آن

است (Morris *et al.*, 2009). منظور از الگوی رسوب گذاری در پایین دست، برآورد تغییرات توپوگرافی از طریق محاسبه ضخامت رسوبات می باشد.

۲- مرور ادبیات پیشینه تحقیق

Coleman *et al.* (2002) سدهای خاکی همگن را در فلومهای آزمایشگاهی با مصالح غیرچسبنده یکنواخت ساختند. فرسایش سد خاکی در ابتدا به شکل عمودی و سپس بطور جانبی، توسعه می یابد. Morris *et al.* (2009) در یکی از گزارش های پروژه FLOOD site به تبیین مدل سازی شروع شکست سدهای خاکی و توسعه آن پرداختند. Pickert *et al.* (2011) آزمایش هایی را درخصوص شکست روگذری سدهای خاکی غیرچسبنده همگن، انجام دادند. معلوم شد که مصالح درشت تر، پروسه های شکست سریع تر و نرخ های شکست تقریباً ثابت و نرمی دارند. Orendorff *et al.* (2013) با در نظر گرفتن سه کانال اولیه شکست متفاوت، روی تاج مدل های فیزیکی غیرچسبنده همگن، نتیجه گیری کردند که کانال های اولیه شکست مختلف، دارای مکانیزم شروع شکست متفاوتی هستند که در نهایت روی زمان شکست، اثرگذار خواهند بود. El-Ghorab *et al.* (2013) به ساختن سه سد خاکی همگن با ارتفاع و جنس متفاوت پرداختند. خاک با فرسایش پذیری بالاتر، هندسه شکست بزرگ تر، زمان شکست کوتاه تر و حداکثر جریان خروجی بزرگ تری دارد. Hakimzadeh *et al.* (2014) با استفاده از تکنیک برنامه ریزی ژنتیک، رابطه ای را برای دبی اوج مدل های فیزیکی همگن پیشنهاد نمودند. تطابق نتایج تکنیک مذکور با مقادیر مشاهداتی، مطلوب ارزیابی شد. Al-Riffai (2014) با انجام آزمایش هایی که دارای سه فاز بود، روی جنبه های ژئوتکنیکی و هیدرولیکی مکانیزم شکست سدهای خاکی غیرچسبنده، متمرکز شد. Zumrawi (2015) به بررسی بصری و آزمایشگاهی شکست سد Tawila در سودان پرداخت. در پژوهش وی آمده است که رسوب گذاری در مخزن سد و نشست سد، می تواند باعث شکست روگذری شوند. Alhasan *et al.* (2015) به تحلیل روند شکست چهار سد کوچک در جمهوری Czech پرداختند که در سیلاب سال ۲۰۰۲ شکسته شدند. Msadala (2016) به توسعه معادلات حمل رسوب کاربردی جدید، برای شیب های بستر تند، جهت مدل سازی شکست سد خاکی همگن، پرداخت. تعداد ۸۷ آزمایش با سه سایز دانه های رسوبی انجام شدند. Froehlich (2016) با استناد به جریان های خروجی اندازه گیری شده از ۴۱ واقعه شکست سدهای خاکی، دو مدل ریاضیاتی غیرخطی برای پیش بینی دبی حداکثر، ارائه کرد. Abdellatif Mohamed and El-Ghorab (2016) شکست دو سد خاکی کوچک مقیاس، تحت جریان روگذری را در فلوم آزمایشگاهی بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند که سدهای ساخته شده با مقیاس کوچک و بزرگ، از روند فرسایش پذیری و نرخ شکست تقریباً یکسانی، پیروی می کنند. Sadeghi (2020) به مدل سازی فیزیکی سدهای خاکی پرداخت. وی نتیجه گرفت که دبی اوج و زمان شکست مدل های غیرهمگن، بیش تر از مدل های همگن است. هم چنین با افزایش چسبندگی مصالح بدنه، نرخ فرسایش کاهش می یابد. Kouzehgar *et al.* (2021) با ساخت مدل های فیزیکی همگن به ارتفاع ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی متر با دانه بندی های مختلف، به نقش مهم عرض متوسط شکاف در هیدروگراف خروجی و هم چنین نقش مهم دانه بندی خاک و تراکم مصالح در نرخ فرسایش، اشاره کردند.

در پژوهش حاضر تلاش شده است تا سه سناریوی کاربردی در مدل سازی آزمایشگاهی سدهای خاکی همگن (تغییر دانه بندی پوسته، افزایش میزان اشباع بدنه سد و فقدان کانال اولیه شکست در تاج) مورد توجه واقع شود. هم چنین اندازه گیری همزمان سه خروجی هیدرولیکی مهم (هندسه شکست، هیدروگراف جریان و الگوی رسوب گذاری) انجام شده و با نتایج آزمایش مبنا (bench mark) مقایسه گردند.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مدل آزمایشگاهی و نحوه اندازه‌گیری پارامترها

آزمایش‌های موردنظر در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده است. برای نیل به اهداف پژوهش، اقدام به ساخت کانال سیمانی به عرض یک متر و شیب ۰/۰۰۲ گردید. ارتفاع مدل‌های فیزیکی ۲۷ سانتی‌متر، شیب افقی بالادست و پایین‌دست به ترتیب سه و ۲/۷، فاصله پاشنه تا پنجه در قاعده پایین ۱۵۹ سانتی‌متر و عرض تاج، پنج سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای پایش و آنالیز هندسه شکست و شدت جریان پایین‌دست، از استقرار سه دوربین دیجیتال در محل‌های مناسب استفاده شد. با توجه به حجم بالای آب دریاچه، برای اتمام فرایند شکست، نیازی به تخلیه کل حجم نبوده است و با آنالیز دوربین مقابل وجه بالادست، زمان پایان شکست ثبت شد. برای اندازه‌گیری هیدروگراف جریان ناشی از شکست، از سرریز مثلثی ۹۰ درجه در فاصله ۵/۵ متری پایین‌دست استفاده شد (شکل ۲). رابطه (۱) فرمول محاسبه دبی عبوری (مترمکعب در ثانیه) از روی شکاف یک سرریز مثلثی را به دست می‌دهد (Mohammadi, 2022).

$$Q = \frac{8}{15} * \sqrt{2g} * C_d * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * H^{2.5} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق، C_d ضریب گذردهی دبی جریان است که تابعی از زاویه شکاف می‌باشد و برای زاویه شکاف θ ۹۰ درجه، حدود ۰/۵۸ می‌باشد و H (برحسب متر) تراز آب روی شکاف است. با توجه به آزمایش‌های مقدماتی انجام‌شده قبلی، طول رسوب‌گذاری در پایین‌دست، چهار متر لحاظ شد. تعیین ضخامت رسوبات در ۱۴۰ نقطه با استقرار اراجه روی کانال و متر لیزری صورت گرفت (تفاضل کد ارتفاعی کف کانال، قبل و بعد از رسوب‌گذاری). سپس پلان رسوب‌گذاری توسط نرم‌افزار Surfer ترسیم شد. دبی ورودی برای پرکردن دریاچه بالادست، ۲/۵ لیتر در ثانیه و حجم دریاچه هنگام شروع شکست ۴/۳ مترمکعب بود. پس از اتمام هر آزمایش، فیلم ضبط‌شده در رایانه ذخیره شد و اطلاعات مربوط به هندسه شکست و هیدروگراف با نرم‌افزار Plot Digitizer استخراج گردید. در شکل (۲) نمای جانبی و پلان اجزای مدل آزمایشگاهی شکست سد خاکی دوزنقه‌ای به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

قبل از انجام آزمایش‌ها، اقدام به سرند مصالح ماسه (سرند دو میلی‌متر) شد تا ساخت مدل‌های فیزیکی با ماسه ریزتر از دو میلی‌متر انجام شود (البته برای سناریوی مربوط به تغییر دانه‌بندی پوسسته، ماسه کوچک‌تر از پنج میلی‌متر استفاده شد). از ماسه‌های سرندشده، نمونه‌های لازم اخذ و منحنی دانه‌بندی و تراکم توسط آزمایشگاه مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی تعیین شد. براساس طبقه‌بندی متحد (USCS) دانه‌بندی پوسسته SM (ماسه لای‌دار) و رطوبت بهینه ۹/۲ درصد، تعیین شد (ASTM D422-63, 2002; ASTM D1557, 2007). هم‌چنین براساس آزمایش برش مستقیم، پارامتر زاویه اصطکاک داخلی برابر ۳۵ درجه و فاقد چسبندگی تعیین شد (ASTM D3080, 2003). برای طراحی هندسی سدهای خاکی از منابع معتبر، بهره گرفته شد (Rahimi, 2019; Engomoen, 2014; USACE, 2004; USBR, 1987). هرکدام از مدل‌های فیزیکی در شش لایه ساخته شدند (پنج لایه به ضخامت پنج سانتی‌متر و یک لایه به ضخامت دو سانتی‌متر). عملیات تراکم مصالح پوسسته با چکش‌های مسطح و در رطوبت بهینه صورت گرفت و تا رسیدن به حدی که امکان تغییر حجم بیش‌تر وجود نداشته باشد، ادامه یافت. درصد تراکم مربوطه ۶۹ درصد و میزان مصالح ماسه مصرفی ۲۹۶ کیلوگرم بوده است. قبل از انجام آزمایش، اقدام به حفر کانال اولیه مستطیلی به طول ۱۰ سانتی‌متر و عمق ۲/۵ سانتی‌متر در وسط تاج، جهت هدایت شکست روگذری گردید که البته تاج مدل فیزیکی در سناریوی شماره سه، فاقد کانال اولیه شکست است.

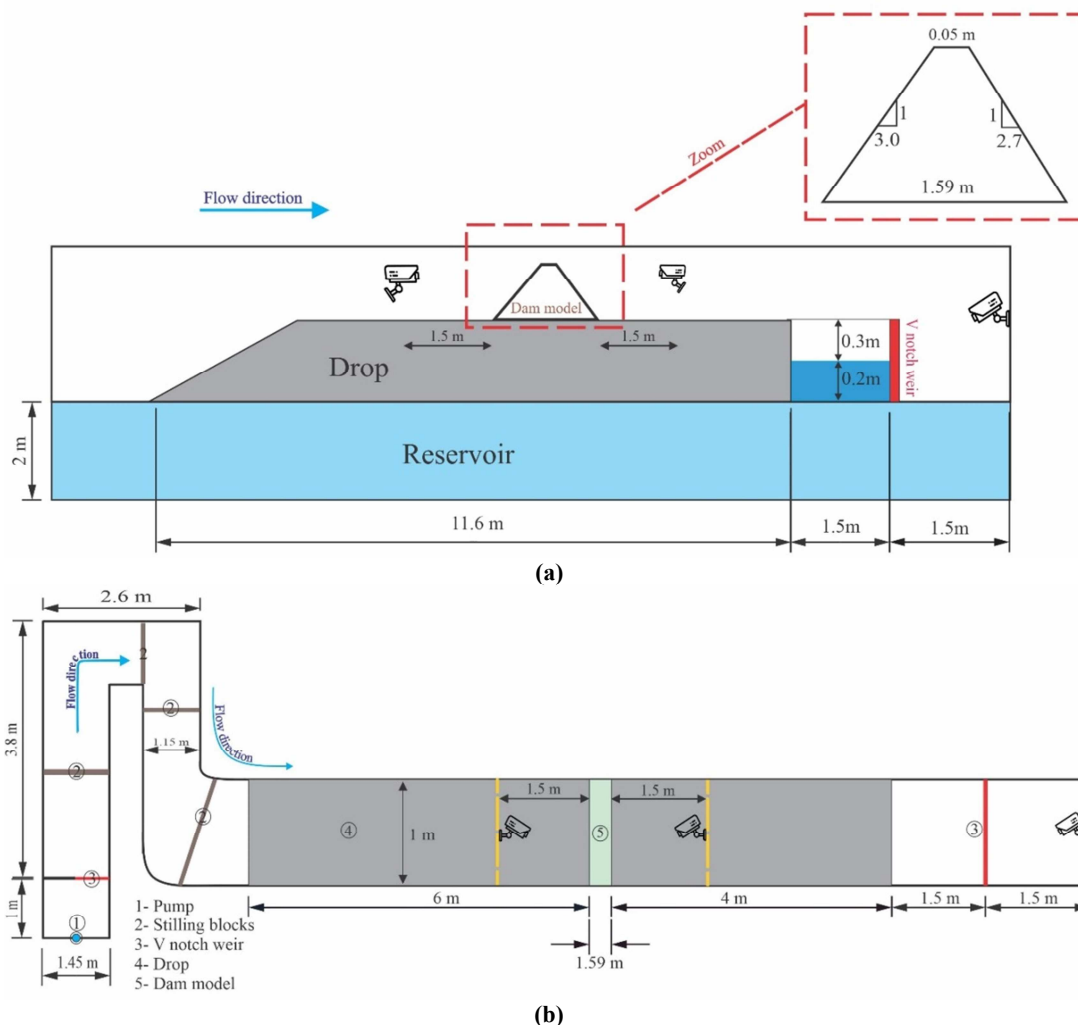


Figure 2. Experimental setup rig: (a) side view and (b) plan view

۳-۲- برنامه آزمایش‌ها و روش تحلیل

در پژوهش حاضر، نتایج چهار نمونه آزمایش ارائه شده است. آزمایش اول به‌عنوان آزمایش مبنا، در نظر گرفته شده است و جهت اطمینان از نتایج مربوط، آزمایش مبنا تکرار شده است. نتایج آزمایش‌های شماره دو (سناریوی اول و تغییر دانه‌بندی پوسته)، شماره سه (سناریوی دوم و افزایش میزان اشباع مصالح پوسته از طریق ماندگار کردن آب دریاچه در تراز ۲۳/۵ سانتی‌متر به مدت دو ساعت) و شماره چهار (سناریوی سوم و عدم حفر کانال اولیه شکست در تاج) با نتایج آزمایش مبنا مقایسه شده‌اند. به محض ورود آب به شیروانی پایین‌دست، شکست روگذری آغاز می‌شود. تراز آب دریاچه در شروع آزمایش‌های مبنا، سناریوی اول و سناریوی دوم، ۲۴/۵ سانتی‌متر و در سناریوی سوم، ۲۷ سانتی‌متر بود. برای تعیین وزن مخصوص خشک رسوبات ناشی از شکست مدل‌های همگن از چهار نمونه در آزمایش‌های مختلف استفاده شد. پس از نمونه‌برداری تصادفی از رسوبات انباشته‌شده در کف کانال و قرارگیری آن‌ها در کوره به مدت ۲۴ ساعت، جرم مربوطه یادداشت شد. با تقسیم جرم نمونه خشک به حجم آن وزن مخصوص خشک، حاصل شد. با توجه به اعداد به‌دست‌آمده عدد ۱۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب به‌عنوان وزن مخصوص خشک میانگین رسوبات کف کانال انتخاب شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج مدل مینا

در نمودارهای ذیل، هندسه شکست (ارتفاع، عرض بالا و عرض پایین) و هیدروگراف جریان ناشی از شکست برای مدل مینا ترسیم شده است (شکل‌های ۳ و ۴).

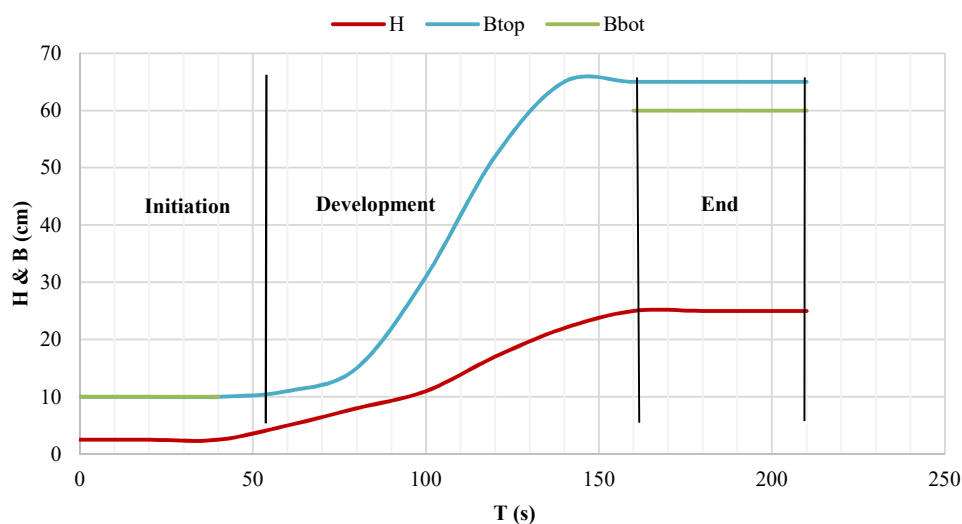


Figure 3. Benchmark breach geometry variations

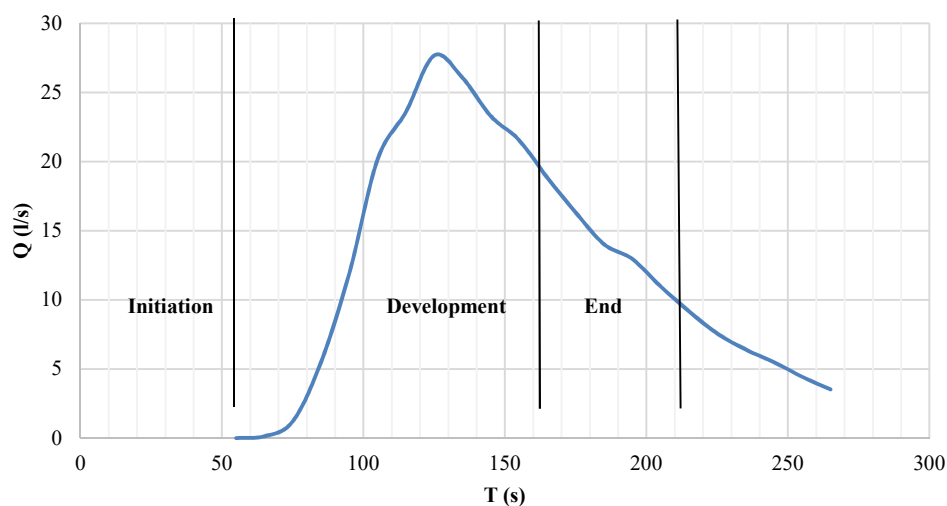


Figure 4. Benchmark breach hydrograph

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی و نمودارهای ترسیم‌شده براساس آنالیز دوربین‌ها، فرایند شکست مدل‌های فیزیکی را می‌توان در سه مرحله (شروع، توسعه و پایان شکست) بیان کرد که به‌طور خاص، برای مدل فیزیکی مینا تشریح می‌گردد (شکل ۵) مراحل مختلف شکست مدل فیزیکی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که این الگو در سناریوهای دیگر نیز تکرار شده است.

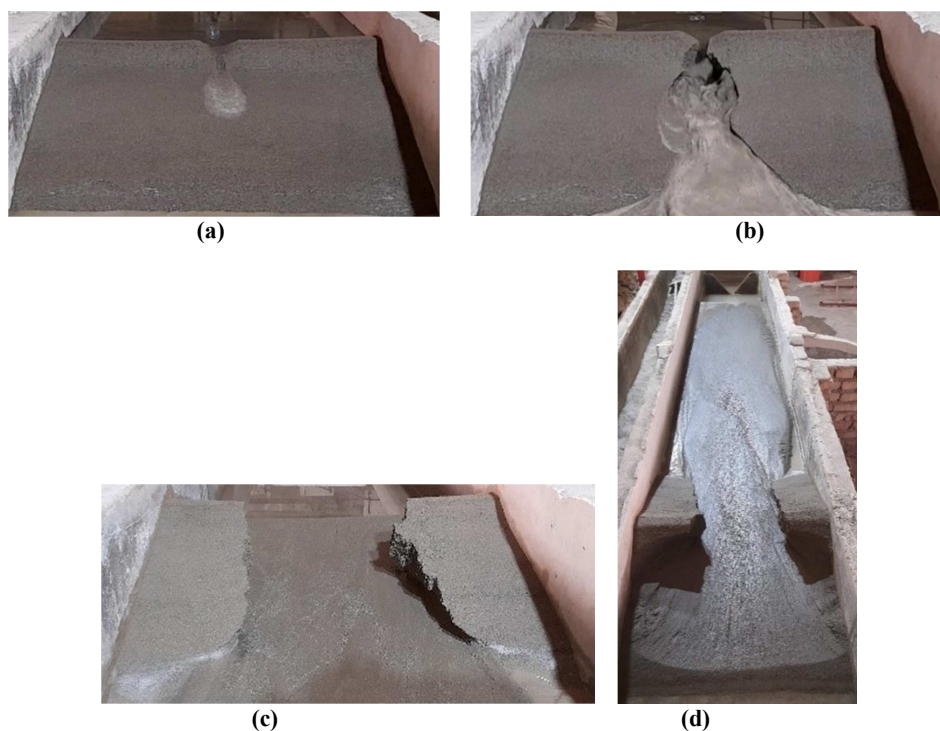


Figure 5. Breach phases: (a) initiation, (b) development, (c) end and (d) final status

۴-۲- مرحله اول: شروع شکست

این مرحله از زمان ورود آب به شیروانی پایین دست آغاز می‌گردد. فرایند شکست در وجه پایین دست در مسیری مستقیم و در امتداد کانال اولیه حفر شده در تاج ادامه می‌یابد. در این مرحله، ابعاد کانال اولیه حفر شده در تاج افزایش محسوس ندارد. با توجه به این که اندازه‌گیری دبی جریان توسط سرریز مثلثی و در فاصله ۵/۵ متری پنجه مدل فیزیکی انجام می‌شود، اندازه‌گیری دبی دارای تأخیر می‌باشد که در مورد مدل مینا ۵۵ ثانیه است. بنابراین سرریز مذکور در طول مرحله شروع، دبی جریان را ثبت نمی‌کند زیرا طول مرحله شروع ۵۰ ثانیه است. تعیین طول مرحله شروع از طریق رصد دوربین مقابل وجه پایین دست (که در فاصله ۱/۵ متری پنجه نصب شده است)، محاسبه شده است. با توجه به مشاهدات انجام شده، قسمت عمده رسوبات کف کانال در نزدیکی پنجه مدل فیزیکی قرار گرفته است.

۴-۳- مرحله دوم: توسعه شکست

بعد از مرحله شروع، فرایند شکست وارد مرحله توسعه می‌شود. در این مرحله، شاهد توسعه جانبی کانال شکست تشکیل شده در وجه پایین دست هستیم. ابعاد کانال مستطیلی تاج، افزایش محسوس می‌یابد و مقطع شکست مدل فیزیکی، به مقدار نهایی می‌رسد (ارتفاع مقطع شکست به ۲۵ سانتی‌متر، عرض بالای شکست به ۶۵ سانتی‌متر و عرض پایین شکست به ۶۰ سانتی‌متر می‌رسد). اعداد مربوط به عرض پایین مقطع شکست در مرحله توسعه، به علت وضعیت استغراق جریان آب قابل ثبت نبوده است و بنابراین در نمودارهای مربوطه ترسیم نشده است. بنابراین بیش‌ترین تغییرات در مورد هندسه شکست، متعلق به مرحله توسعه است. در نمودار هیدروگراف، بازوی بالارونده و بخشی از بازوی پایین‌رونده (درب‌گیرنده دبی اوج به میزان ۲۷/۷ لیتر در ثانیه و در ۱۲۵ ثانیه پس از شروع شکست) مربوط به مرحله توسعه می‌باشد. مدت زمان مرحله توسعه ۱۱۰ ثانیه می‌باشد. طبق مشاهدات، قسمت عمده رسوب‌گذاری، در همین مرحله شکل می‌گیرد.

۴-۴- مرحله سوم: پایان شکست

در این مرحله، ابعاد مقطع شکست تغییر محسوسی ندارد، اما اندرکنش جریان آب و وجه بالادست مدل فیزیکی ادامه دارد تا زمانی که تغییر شکل وجه بالادست به میزان نهایی خود برسد (ضخامت باقیمانده پاشنه مدل فیزیکی به شش سانتی متر می رسد). با توجه به حجم بالای دریاچه (۴/۳ مترمکعب) و زمان بر بودن تخلیه کامل آن، اتمام شکست از طریق دوربین نصب شده در فاصله ۱/۵ متری پاشنه، محاسبه شد. مدت زمان مرحله پایانی ۵۰ ثانیه است. کاهش محسوس شدت جریان ناشی از شکست و تغییرات اندک الگوی رسوب گذاری از نتایج مرحله پایان است. همچنین شیب متوسط مقطع شکست ۸۴ درجه اندازه گیری شد.

۴-۵- مقایسه هندسه شکست

در نمودارهای ذیل، مقایسه هندسه شکست در مدل مینا با سایر سناریوها انجام شده است (شکل های ۶ تا ۸).

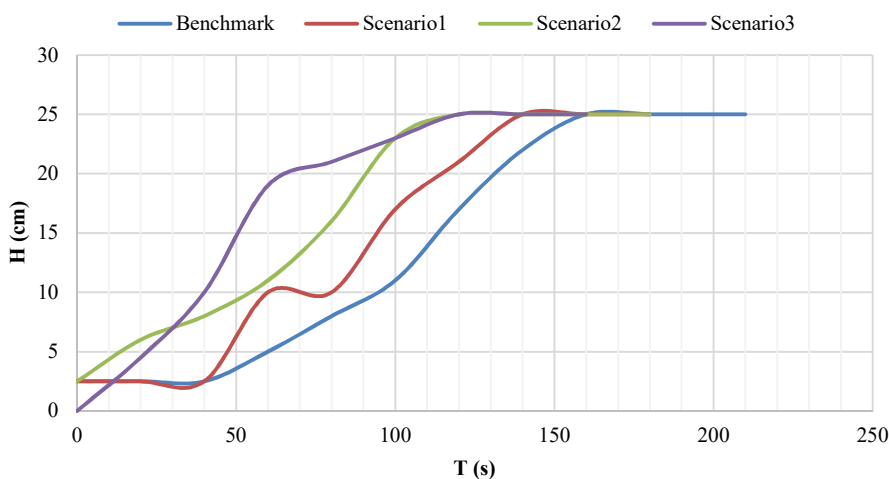


Figure 6. A comparison of breach heights

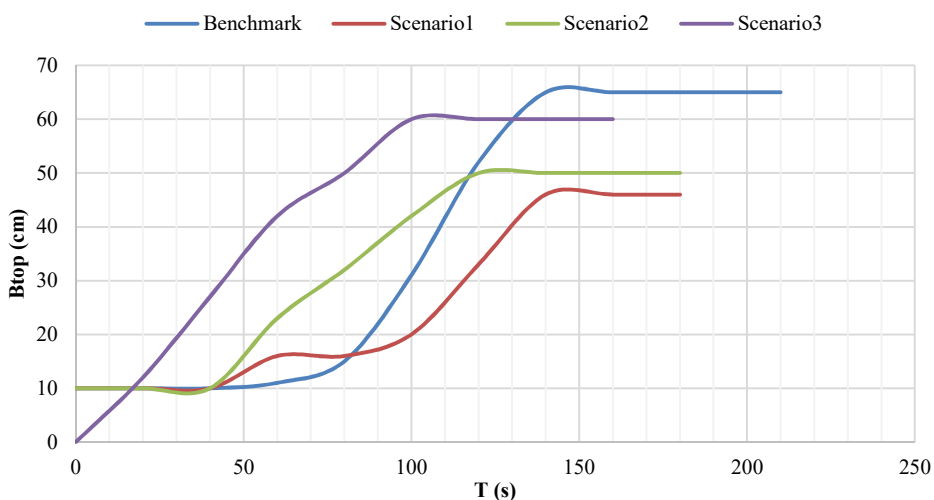


Figure 7. A comparison of breach top widths

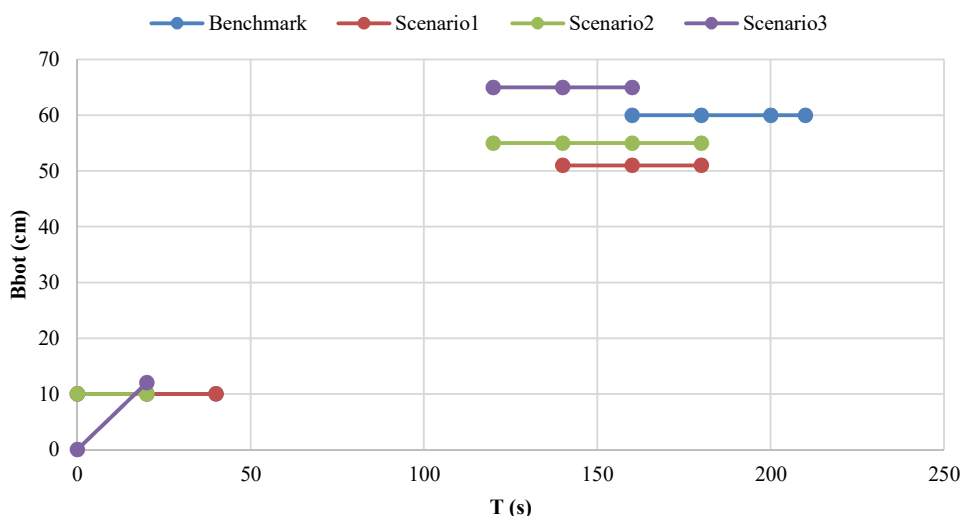


Figure 8. A comparison of breach bottom widths

با توجه به نمودارهای ترسیم شده درخصوص مقایسه هندسه شکست مدل‌های فیزیکی، ارتفاع نهایی مقطع شکست در آزمایش‌های مختلف ۲۵ سانتی‌متر بوده است و ضخامت رسوبات باقیمانده در مقطع شکست دو سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین تفاوت هندسه نهایی شکست در آزمایش‌های مختلف مربوط به تفاوت عرض مقطع شکست خواهد بود. در بخش انتهایی ارتفاع شکست (حدود پنج سانتی‌متری کف کانال)، افزایش عرض شکست رخ داده است و در بخش‌های فوقانی، الگوی شکست دوزنقه‌ای قابل‌رؤیت است (شکل ۹). همچنین شیب میانگین مقطع شکست در آزمایش‌های مختلف بین ۸۴ درجه تا ۸۵ درجه بوده است و تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. کم‌ترین زمان شکست، برای سناریوی سوم است (۲۴ درصد کمتر از آزمایش مینا) که دلیل آن عبور جریان روگذری از قسمت‌های مختلف تاج بوده است و باعث تسریع فرایند شکست می‌گردد. مدت زمان مرحله توسعه در آزمایش‌های انجام شده بیش‌تر از مراحل شروع و پایان می‌باشد. در جدول (۱) مقایسه بین اعداد نهایی هندسه‌های شکست آورده شده است.

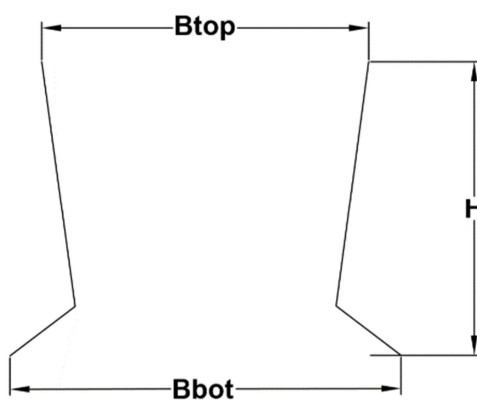


Figure 9. Scenarios for breach geometry

۴-۶- مقایسه هیدروگراف جریان ناشی از شکست

در نمودار ذیل، مقایسه بین هیدروگراف مدل مینا و سایر سناریوها انجام گرفته است (شکل ۱۰).

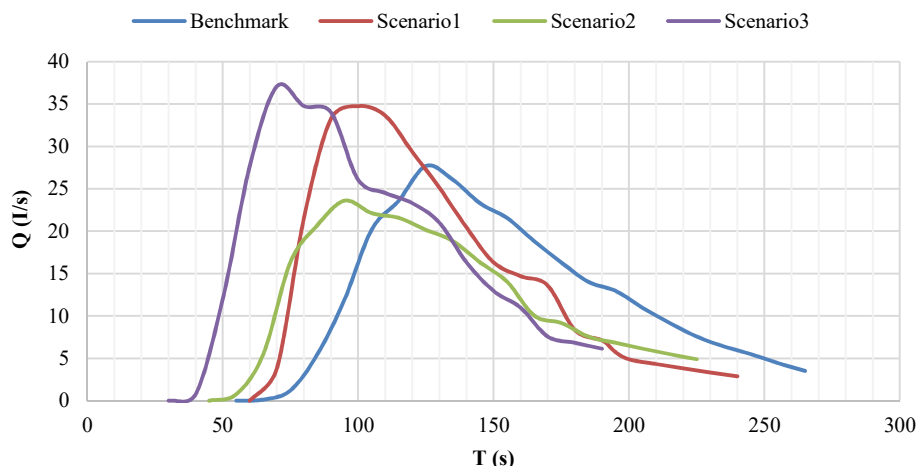


Figure 10. A comparison of breach hydrographs

با تحلیل نتایج به دست آمده، در سناریوی اول، ۱۴ درصد کاهش در زمان شکست و ۲۶ درصد افزایش در دبی اوج مشاهده شد که دلیل آن تأثیر دانه بندی درشت تر بر افزایش سرعت شکست مدل فیزیکی است. در سناریوی دوم، کاهش ۱۴ درصدی زمان شکست و کاهش دبی اوج به میزان ۱۵ درصد ثبت شد. علت کاهش زمان شکست در سناریوی دوم را می توان به اشباع بیش تر بدنه مدل فیزیکی سد (و افزایش فشار آب حفره ای) و تسریع فرایند شکست آن، مربوط دانست و کاهش دبی اوج از دستاوردهای مهم آزمایشگاهی محسوب می شود. کم ترین زمان شکست به میزان ۲۴ درصد و بیش ترین افزایش دبی اوج به میزان ۳۴ درصد، متعلق به سناریوی سوم است. در جدول (۱) مقایسه بین اعداد نهایی هیدروگراف های شکست آورده شده است.

Table 1. Models breach geometry and flow hydrograph results

Subject	Breach time (s)	Height (cm)	Top width (cm)	Bottom width (cm)	Average side slope (degree)
Benchmark	210	25	65	60	84
Scenario1	180	25	46	51	85
Scenario2	180	25	50	55	85
Scenario3	160	25	60	65	84

Subject	Peak discharge ($\frac{lit}{s}$)	Peak time (s)	Initiation duration (s)	Development duration (s)	End duration (s)
Benchmark	27.7	125	50	110	50
Scenario1	34.8	100	50	80	50
Scenario2	23.6	95	40	80	60
Scenario3	37	70	30	90	40

۴-۷- مقایسه الگوهای رسوب گذاری

در شکل (۱۱)، مقایسه الگوی رسوب گذاری مدل مبنا و سایر سناریوها انجام شده است (ابعاد کانال آزمایشگاهی برحسب سانتی متر و اعداد مقیاس برحسب میلی متر ترسیم شده است).

در جدول (۲) اعداد مربوط به ضخامت میانگین رسوبات، با میانگین گیری از ۱۴۰ نقطه برداشت شده به دست آمد و با حاصل ضرب آن در مساحت چهار مترمربعی محدوده رسوب گذاری پایین دست، حجم مصالح فرسایش یافته حاصل شد. هم چنین از حاصل ضرب حجم مصالح فرسایش یافته در چگالی رسوبات جرم میانگین رسوبات به دست آمد. برای مدل مبنا، ضخامت میانگین رسوبات ۱۸/۲ میلی متر محاسبه شد. بنابراین حجم مصالح فرسایش یافته، ۰/۰۷۳ مترمکعب و جرم مربوطه ۱۰۵/۶

کیلوگرم خواهد بود. بنابراین یکی از نتایج کاربردی تعیین الگوی رسوبگذاری محاسبه حجم مصالح فرسایش یافته و جرم آن‌ها می‌باشد. با توجه به شکل (۱۱) با حرکت به سمت پایین دست از ضخامت رسوبات کاسته می‌شود. به دلیل حفر کانال اولیه شکست در وسط تاج مدل‌های فیزیکی (به جز سناریوی سوم)، هندسه شکست و الگوی رسوب گذاری به دست آمده دارای شکل نسبتاً متقارن می‌باشند. همچنین الگوی رسوب گذاری در سناریوی سوم نامتقارن شده است.

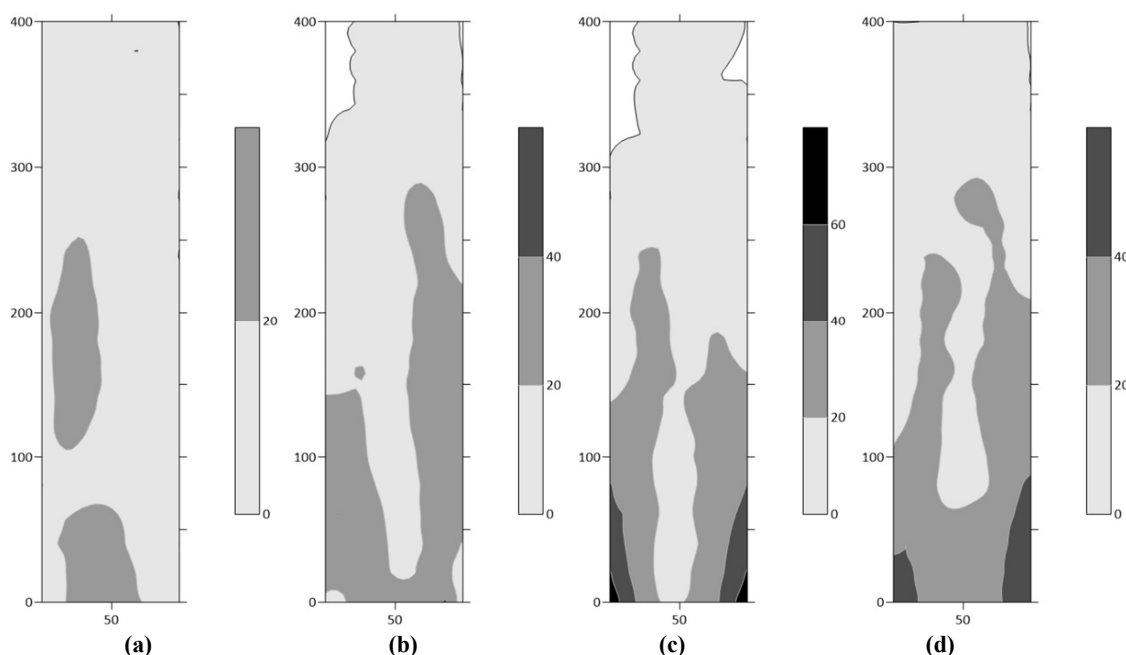


Figure 11. A comparison of sedimentation patterns after dam failure in different scenarios: (a) benchmark, (b) scenario 1, (c) scenario 2 and (d) scenario 3

Table 2. Sedimentation patterns results

Subject	Average sedimentation thickness (mm)	Eroded material volume (m^3)	Sediment mass (kg)
Benchmark	18.2	0.073	105.6
Scenario1	18.6	0.074	107.9
Scenario2	16.9	0.068	98
Scenario3	12.5	0.05	72.5

۵- نتیجه گیری

مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر که به صورت آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری توامان هندسه شکست، هیدروگراف جریان و الگوهای رسوب‌گذاری، انجام گرفت به شرح ذیل است:

- ۱- فرایند شکست در مدل‌های فیزیکی به طور کلی شامل سه مرحله شروع، توسعه و پایان می‌باشد که مدت زمان مرحله توسعه از دو مرحله دیگر بیشتر است. مرحله توسعه، دربرگیرنده توسعه جانبی کانال شکست تشکیل شده در وجه پایین دست تا نهایی شدن هندسه شکست (ارتفاع و عرض شکست) می‌باشد.
- ۲- در همه آزمایش‌ها، ارتفاع نهایی مقطع شکست، ۲۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و بنابراین تفاوت هندسه شکست مربوط به اختلاف عرض‌های بالا و پایین شکست بود. همچنین بخش‌های عمده هندسه نهایی شکست، دارای شکل تقریبی دوزنقه‌ای بود.

۳- در سناریوی اول با افزایش قطر میانگین مصالح پوسته، افزایش ۲۶ درصدی دبی اوج و کاهش ۱۴ درصدی زمان شکست مشاهده شد که از تأثیر مهم اندازه مصالح تشکیل دهنده بر روند شکست حکایت داشت.

۴- کاهش ۱۵ درصدی دبی اوج در سناریوی دوم از دستاوردهای پژوهش آزمایشگاهی حاضر است که نشان از تأثیر اشباع بیش‌تر بدنه مدل فیزیکی بر روند شکست داشت. بیش‌ترین دبی اوج و کم‌ترین زمان شکست برای سناریوی سوم ثبت شد که به ترتیب ۳۴ درصد افزایش و ۲۴ درصد کاهش در مقایسه با مدل مبنا داشت.

۵- به دلیل عدم لحاظ کردن کانال اولیه شکست در سناریوی سوم، الگوی رسوب‌گذاری نامتقارن شکل گرفت و درخصوص سایر مدل‌ها الگوی رسوب‌گذاری تقریباً متقارن مشاهده گردید. تعیین حجم مصالح فرسایش‌یافته و جرم مربوطه، از طریق محاسبه ضخامت میانگین رسوبات فراهم شد.

۶- تشکر و قدردانی

از جناب آقایان دکتر فقیهی‌راد، مهندس صفوی و مهندس اکبریان در مؤسسه تحقیقات آب بابت همکاری در پیشرفت پژوهش آزمایشگاهی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸- منابع

- Abdellatif Mohamed, M.M., & El- Ghorab, E.A.S. (2016). Investigating scale effects on breach evolution of overtopped sand embankments. *Journal of Water Science*, 30, 84-95.
- Alhasan, Z., Jandora, J., & Riha, J. (2015). Study of dam-break due to overtopping of four small dams in the Czech Republic. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63(3), 717-729.
- Al-Riffai, M. (2014). *Experimental study of breach mechanics in overtopped non-cohesive earthen embankments*. PhD thesis, University of Ottawa, Canada.
- Association of state dam safety officials. (2023). Kentucky, USA.
- ASTM D422-63. (2002). *Standard test method for particle size analysis of soils*.
- ASTM D1557. (2007). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D3080. (2003). *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia 408, 1-7.
- Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS Reference Manual, version 5.0*. Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, Davis, Calif.
- Coleman, S.E., Andrews, D.P & Webby, M.G. (2002). Overtopping breaching of non-cohesive homogeneous embankments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (9), 829-838.
- El-Ghorab, E.A.S., Fahmy, A., & Fodda, M. (2013). Large scale physical model to investigate the mechanics of embankment erosion during overtopping flow. *Engineering Research Journal*, 36 (3), 287-302.
- Engomoen, B., Witter, D.T., Knight, K., & Luebke, T.A. (2014). *Design Standards No 13: Embankment Dams*. United States Bureau of Reclamation.
- Froehlich, D.C. (2016). Predicting peak discharge from gradually breached embankment dam. *Journal of Hydrologic Engineering*, 04016041, 1-15.

- Hakimzadeh, H., Nourani, V., & Amini, A.B. (2014). Genetic programming simulation of dam breach hydrograph and peak outflow discharge. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19 (4), 757-768.
- ICOLD. (2019). *ICOLD incident database bulletin 99 update: statistical analysis of dam failures, technical report*, international commission on large dams: Paris, France.
- Kouzehgar, K., Hassanzadeh, Y., Eslamian, S., Yousefzadeh, F.M., & Babaeian, A.A. (2021). Physical modelling into outflow hydrographs and breach characteristics of homogeneous earthfill dams failure due to overtopping. *Journal of Mountain Science*, 18 (2), 462-481.
- Mohammadi, M. (2022). *Applied hydraulics*. Urmia: Urmia university press. (In Persian).
- Morris, M., Kortenhaus, A., & Visser, P. (2009). *Modelling breach initiation and growth. FLOODsite report: T06-08-02*, FLOODsite Consortium, Wallingford, UK.
- Msadala, V. (2016). *Sediment transport dynamics in dam break modelling*. PhD thesis, Stellenbosch university, South Africa.
- Orendorff, B., Al-Riffai, M., Nistor, I., & Rennie, C.D. (2013). Breach outflow characteristics of non-cohesive embankment dams. Subject to blast. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40, 243-253.
- Pektas, A.O., & Erdik, T. (2014). Peak discharge prediction due to embankment dam break by using sensitivity analysis based ANN. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1868-1876.
- Pickert, G., Weitbrecht, V., & Bieberstein, A. (2011). Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion. *Journal of Hydraulic Research*, 49(2), 143-156.
- Rahimi, H. (2019). *Embankment dams*. Tehran university press. (In Persian).
- Saberi, O. (2016). *Embankment dam failure outflow hydrograph development*. PhD thesis, Graz university of technology, Austria.
- Sadeghi, S. (2020). *Experimental investigation into breach in small Earth dams with clay core due to overtopping*. PhD thesis, Sahand University of Technology, Iran. (In Persian).
- USACE. (2004). *General design and construction considerations for Earth and rockfill dams*. US Army Corps of Engineers, Washington DC, USA.
- USB. (1987). *Design of small dams*. Bureau of Reclamation, water resources technical Publication.
- Zumrawi, M. (2015). Failure investigation of Tawila dam in north Darfur, Sudan. *International Journal of Science and Research*, 4 (5), 963-967.