

Experimental study of embankment dams overtopping breach hydraulic results

Mahdi Ebrahimi^{۱*}, Mirali Mohammadi^۲

مطالعه آزمایشگاهی آثار هیدرولیکی شکست روگذری سدهای خاکی

مهدی ابراهیمی^{۱*}، میر علی محمدی^۲

Abstract

The overtopping phenomenon is the most common cause of embankment dams failure; and it contains a complicate process. Hence, its experimental investigation will be important. To study the hydraulic outcomes, the physical modeling of the mentioned phenomenon was performed at Hydraulic laboratory of Iranian water research institute. The results were analyzed in three stages: initiation, development, and the end which the breach moment of impermeable core is the boundary between initiation and development stages. Moreover, the development stage includes maximum breach geometry variations; peak discharge occurrence; and major sedimentation in the channel bed. When sedimentation pattern was drawn, the volume and the mass of eroded material were calculated. Also, the sediment thickness decreases moving downstream. Because of digging of the primary breach channel in the crest middle; the relatively-symmetrical sedimentation pattern and breach geometry were observed. The simultaneous measurements of breach geometry, flow hydrograph, and final sedimentation pattern are the unique achievements of the current research. The current research results make a new insight to manage the dam breach flow

Keywords: Embankment dam, Physical model, Breach geometry, Flow hydrograph, Sedimentation pattern.

Received: April ۸, ۲۰۲۴

Accepted: May ۲۱, ۲۰۲۴

چکیده

شکست روگذری سدهای خاکی غیر همگن، به‌عنوان محتمل‌ترین علت خرابی، دارای پیچیدگی زیادی است؛ بنابراین بررسی آزمایشگاهی آن از دیدگاه پژوهشی دارای اهمیت ویژه‌ای است. مدل‌سازی فیزیکی پدیده مذکور در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیروی ایران، انجام شد و آثار هیدرولیکی آن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که فرایند شکست مدل فیزیکی را می‌توان در سه مرحله شروع، توسعه و پایان، تشریح کرد که لحظه شکست هسته ناتراوا، مرز بین مرحله شروع و توسعه است. مرحله توسعه، دربرگیرنده بیشترین تغییرات هندسه شکست، رخداد دبی اوج و رسوب‌گذاری عمده در کف کانال بود. با ترسیم الگوی رسوب‌گذاری پایین‌دست، امکان محاسبه حجم مصالح فرسایش‌یافته و جرم رسوبات فراهم شد؛ همچنین مشخص شد ضخامت رسوبات در جهت پایین‌دست کاهش می‌یابد. به‌دلیل حفر کانال اولیه شکست در وسط تاج، هندسه شکست و الگوی رسوب‌گذاری نسبتاً متقارن، مشاهده گردید. اندازه‌گیری هم‌زمان هندسه شکست، هیدروگراف جریان و الگوی رسوب‌گذاری نهایی از دستاوردهای منحصربه‌فرد تحقیق حاضر است. نتایج تحقیق حاضر، بصیرت جدیدی را در مورد مدیریت جریان ناشی از شکست سد خاکی ایجاد می‌کند.

کلمات کلیدی: سد خاکی، مدل فیزیکی، هندسه شکست، هیدروگراف جریان، الگوی رسوب‌گذاری
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۳/۱

۱. PhD Graduate, Department of Civil Engineering (Water & Hydraulic Structures), Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

۱. دانش‌آموخته دکتری مهندسی عمران (آب و سازه‌های هیدرولیکی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲. استاد گروه مهندسی عمران (آب و سازه‌های هیدرولیکی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

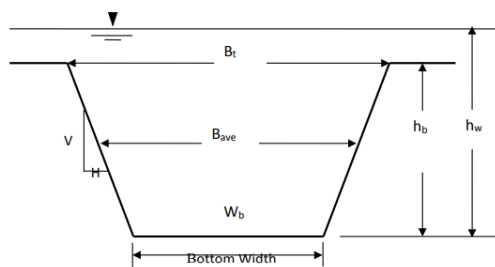
ایمیل: ma.ebrahimi@urmia.ac.ir

۲. Professor, Department of Civil Engineering (Water & Hydraulic Structures), Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Email ma.ebrahimi@urmia.ac.ir

* Corresponding Author

عمر سدهای ساخته شده و یا لزوم برچیدن سد، نیاز به مشخص کردن 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 است که برخی از آن‌ها در تحقیقات قبلی، مورد توجه قرار گرفته است. هندسه شکست، معمولاً به شکل دوزنقه است و مهم‌ترین پارامترهای آن، ارتفاع شکست و عرض شکست می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱: شماتیک هندسه شکست

(Brunner GW, ۲۰۱۶)

در شکل فوق h_b ارتفاع مقطع شکست، 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. بسته به روند شکست سدهای خاکی، مراحل (فازهای) مختلفی برای تفسیر هیدروگراف در نظر گرفته می‌شود، اما همواره یکی از

مقدمه

مطالعه آزمایشگاهی شکست روگذری سدهای خاکی غیرهمگن، به ۴ دلیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ ۱) فراوانی تعداد سدهای خاکی غیرهمگن در جهان؛ ۲) وقوع پدیده روگذری که شایع‌ترین دلیل خرابی سدهای خاکی بوده است (Committee on dam safety, ۲۰۱۹)؛ ۳) داشتن هسته ناتراوا برای آب‌بندی بدنه سد است که در مقایسه با سدهای همگن، تحلیل شکست آن را پیچیده‌تر می‌کند؛ ۴) فقدان داده‌های آزمایشگاهی کافی برای ارزیابی آثار هیدرولیکی شکست سدهای خاکی غیرهمگن. منظور از روگذری، عبور آب از روی تاج سد است که باعث فرسایش بدنه سد و تخریب آن خواهد شد و عمدتاً به دلایلی همچون عدم ظرفیت کافی سرریز جهت تخلیه سیلاب، کاهش ظرفیت ذخیره آب مخزن سد به علت انباشتگی رسوبات و نشست سد رخ می‌دهد (Association of state dam safety officials, ۲۰۲۳).

مدل‌سازی‌های غیرآزمایشگاهی (شامل مدل‌سازی‌های مقایسه‌ای و نرم‌افزاری) با ساده‌سازی‌هایی همراه است که صحت نتایج پدیده مذکور را با چالش جدی مواجه می‌کند. بررسی پدیده شکست سدهای خاکی تحت سناریوی 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 است که بعد از اتمام

در فلوم آزمایشگاهی بررسی کردند تا به مطالعه اثرات مقیاس، روی روند شکست سدهای خاکی بپردازند. آن‌ها نتیجه گرفتند سدهای ساخته شده با مقیاس کوچک و بزرگ، از روند فرسایش‌پذیری و نرخ شکست تقریباً یکسانی، پیروی می‌کنند. صابری (۲۰۱۶) به توسعه هیدروگراف حاصل از شکست سدهای خاکی با روش‌های عددی پرداخت. او نتیجه گرفت که برای شیب‌های کوچک (کمتر از ۱٪)، معتبرترین معادله حمل بار رسوب کف، معادله Meyer-Peter-Muller است. محققین مؤسسه (Energiforsk، ۲۰۱۸) در سوئد، با ساخت دو مدل آزمایشگاهی (مقیاس‌های ۱:۳ و ۱:۶) برای یک نمونه سرریز اضطراری واقعی، نتیجه گرفتند که ساخت هر دو مدل، به داشتن تصویر کامل از رفتار شکست آن، کمک می‌کند. صادقی (۲۰۲۰) به مدل‌سازی فیزیکی سدهای خاکی غیرهمگن با هسته‌های رسی، پرداخت. وی نتیجه گرفت با افزایش چسبندگی هسته، دبی خروجی اوج و زمان وقوع آن، به شکل قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین برای مصالح هسته با چسبندگی کمتر، روند تشکیل شکست، شبیه سد همگن خواهد بود (et al., ۲۰۲۳). Taskaya به مدل‌سازی فیزیکی شکست روگذری سدهای خاکی همگن با هدف مطالعه حرکت رسوبات پرداختند. نتایج نشان دادند که بخش قابل‌توجهی از رسوبات حاصل از بدنه مدل‌های فیزیکی، به سمت پایین‌دست جابه‌جا شدند. همچنین تغییرات ضخامت رسوبات در جهت طولی و عرضی، غیریکنواخت بودند.

اهداف مهم در اندازه‌گیری آن، تعیین اوج و زمان رخداد آن است (Morris et al, ۲۰۰۹). منظور از الگوی رسوب‌گذاری در پایین‌دست، برآورد تغییرات توپوگرافی از طریق محاسبه ضخامت رسوبات می‌باشد. در سال‌های قبل، پژوهش‌های آزمایشگاهی محدودی در زمینه شکست روگذری سدهای خاکی غیرهمگن انجام شده است. موریس و همکاران (۲۰۰۹) در یکی از گزارش‌های پروژه محل سیل (FLOOD site) به تبیین مدل‌سازی شروع شکست سدهای خاکی و توسعه آن پرداختند. در تحقیق آن‌ها از نتایج مدل‌سازی‌های عددی که بر مبنای نتایج آزمایشگاهی بود، استفاده شد. الرفاعی (۲۰۱۴) Al-Riffai با انجام آزمایش‌هایی که دارای سه فاز بود، روی جنبه‌های ژئوتکنیکی و هیدرولیکی مکانیزم شکست سدهای خاکی غیرچسبنده، متمرکز شد. دو فاز نخست به موضوعات زهکشی و تراکم اختصاص یافت. فاز سوم برنامه آزمایشگاهی وی به بررسی فرسایش‌پذیری یک شیب تند در مدل‌های سد خاکی پرداخته بود (Froehlich, ۲۰۱۸). با استناد به جریان‌های خروجی اندازه‌گیری شده از ۴۱ واقعه شکست سدهای خاکی، دو مدل ریاضیاتی غیرخطی برای پیش‌بینی دبی حداکثر، ارائه کرد. مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها با دیگر روش‌های محاسبه دبی اوج، پیش‌بینی‌های دقیق‌تر دو مدل مذکور، ثابت شد (۲۰۱۶) EL-Ghorab and Abdellatif Mohamed، شکست دو سد خاکی کوچک مقیاس، تحت جریان روگذری را

همچنین درصد رطوبت بهینه ۹.۲ درصد تعیین شد (ASTM D۴۲۲-۶۳, ۲۰۰۲; ASTM D۱۵۵۷, ۲۰۰۷). بر اساس آزمایش برش مستقیم، پارامتر زاویه اصطکاک داخلی مصالح پوسته برابر ۳۵ درجه و فاقد چسبندگی تعیین شد (ASTM D۳۰۸۰, ۲۰۰۳).

ساخت هسته ناتراوا و پوسته مدل فیزیکی

جهت ساختن مدل فیزیکی از مقیاس هندسی ۱/۲۰۰ یکی از سدهای خاکی بلند ایران استفاده شد (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۴۰۰) که منطبق با اصول طراحی ذکر شده در منابع معتبر بود

(وفاییان ۱۳۹۶؛ USBR ۱۹۸۷؛ USACE ۲۰۰۴). ابتدا

هسته ناتراوا در ۶ لایه و در قالب چوبی به طول ۹۸ سانتیمتر ساخته شد. پس از اتمام عملیات تراکم، قالب موردنظر ۱۸۰ درجه دوران داده شد تا در جای واقعی هسته قرار بگیرد و سپس اقدام به باز کردن قالب شد (شکل‌های ۳، ۴ و ۵). مشخصات هسته ساخته شده در جدول (۱) آورده شده است.

بعد از ساختن هسته ناتراوا، اقدام به ساخت پوسته بالادست و پایین‌دست گردید. پوسته مذکور در شش لایه ساخته شد. عملیات تراکم مصالح هسته و پوسته با چکش‌های مسطح و در رطوبت بهینه صورت گرفت و تا رسیدن به حدی که امکان تغییر حجم بیشتر، وجود نداشته باشد، ادامه یافت. رابطه (۱) مربوط به محاسبه درصد تراکم می‌باشد. Y_d و Y_{dmax} به ترتیب وزن مخصوص خشک و بیشینه وزن مخصوص خشک مصالح است. در جدول (۲) مشخصات پوسته آورده شده است.

همه مناطق پایین‌دست با جریان گل‌آلود، غرقاب شدند. همان‌طور که از پیشینه تحقیق مشخص شد، خلأ تحقیقات آزمایشگاهی در حوزه شکست سدهای خاکی غیرهمگن کاملاً مشهود است. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا مدل‌سازی فیزیکی سد خاکی غیرهمگن مورد توجه واقع شود و نتایج مربوطه (هندسه شکست، هیدروگراف جریان و الگوی رسوب‌گذاری) ارائه شود.

مواد و روش‌ها

ساخت مدل فیزیکی

ساخت کانال

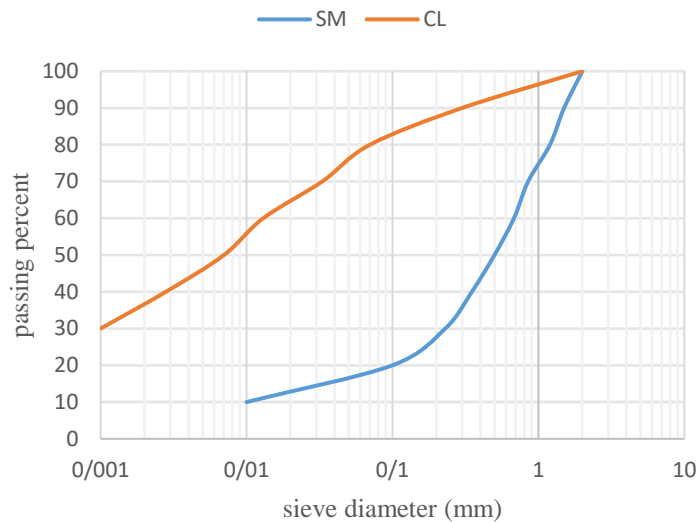
آزمایش موردنظر در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیروی ایران، انجام شده است. برای نیل به اهداف تحقیق، ابتدا اقدام به ساخت کانال سیمانی به عرض یک متر و شیب ۰.۰۰۲ گردید.

آماده‌سازی مصالح و تعیین مشخصات

ژئوتکنیکی

قبل از انجام آزمایش، اقدام به سرند کردن مصالح ماسه (با استفاده از سرند دو میلیمتری) شد تا ساخت مدل فیزیکی با ماسه ریزتر از دو میلیمتر انجام شود. از ماسه‌های سرند شده و خاک رس، نمونه‌های لازم اخذ و منحنی‌های دانه‌بندی و تراکم توسط آزمایشگاه مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی ایران، تعیین شد. بر اساس طبقه‌بندی متحد (USCS) دانه‌بندی پوسته SM و دانه‌بندی خاک رس CL تعیین شد (شکل ۲).

$$R = \frac{Y_d}{Y_{dmax}} \times 100 \quad (1)$$



شکل ۲: نمودار دانه‌بندی مصالح مصرفی

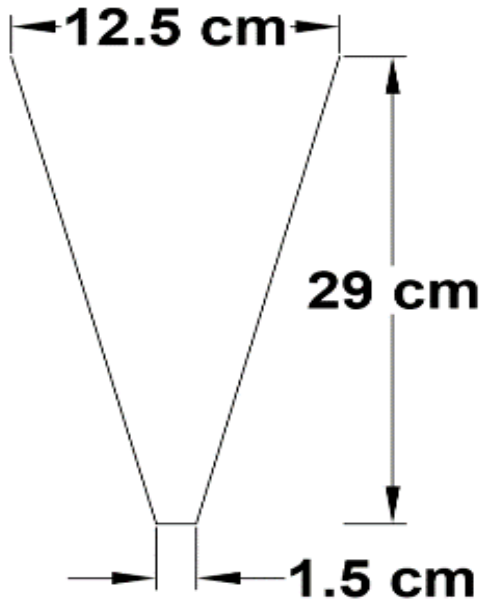
جدول ۱: مشخصات هسته ناتراوا

Height (cm)	Top width (cm)	Bottom width (cm)	Upstream slope	Downstream slope	Material weight (kg)	Compaction percent
۲۹	۱,۵	۱۲,۵	۱H:۵,۲V	۱H:۵,۲V	۳۵	۹۰

جدول ۲: خصوصیات پوسته

Height (cm)	Top width (cm)	Bottom width (cm)	Upstream slope	Downstream slope	Material weight (kg)	Compaction percent
۲۹,۵	۵,۵	۱۵۹	۱V:۲,۷H	۱V:۲,۵H	۲۸۰	۶۵

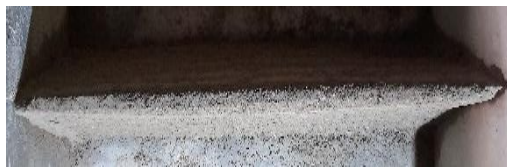
قبل از انجام آزمایش، اقدام به حفر شیار مستطیلی به طول ۱۰ سانتیمتر و عمق ۲.۵ سانتیمتر در وسط تاج، جهت هدایت شکست روگذری گردید.



شکل ۳: شماتیک مقطع قالب چوبی برای ساختن هسته ناتراوا



شکل ۴: تراکم هسته در قالب چوبی



شکل ۵: پلان هسته ناتراوا بعد از باز کردن قالب

تعیین الگوی رسوب‌گذاری

با توجه به آزمایش‌های مقدماتی انجام شده، طول رسوب‌گذاری در پایین‌دست، چهار متر لحاظ شد.

اندازه‌گیری آثار هیدرولیکی

اندازه‌گیری هندسه شکست

جهت آنالیز هندسه شکست از استقرار دو دوربین دیجیتال در مقابل وجه بالادست و پایین‌دست مدل فیزیکی استفاده شد. هندسه نهایی شکست نیز توسط متر اندازه‌گیری شد (شکل ۶).

اندازه‌گیری هیدروگراف جریان شکست

برای اندازه‌گیری هیدروگراف جریان ناشی از شکست، از سرریز مثلثی ۹۰ درجه در فاصله ۵.۵ متری پایین‌دست و استقرار دوربین دیجیتال در مقابل آن استفاده شد (شکل ۶). رابطه (۲) مربوط به محاسبه دبی عبوری (مترمکعب در ثانیه) از روی شکاف سرریز مثلثی است (محمدی، ۱۳۹۸).

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

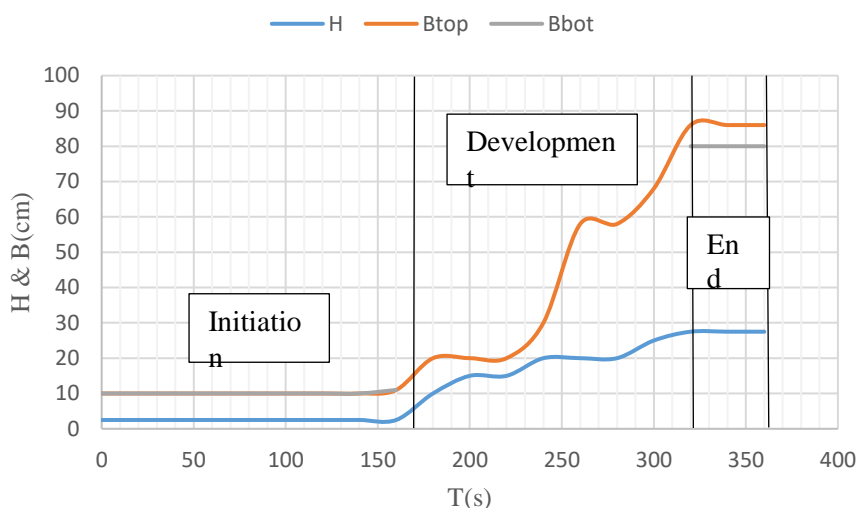
در رابطه فوق C_d ضریب دبی است که تابعی از زاویه شکاف است و برای زاویه شکاف (θ) ۹۰ درجه، حدود ۰.۵۸ می‌باشد و H (بر حسب متر) تراز آب روی شکاف است.

شکل ۶: شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی برای مدل فیزیکی، الف) پلان و ب) نمای جانبی

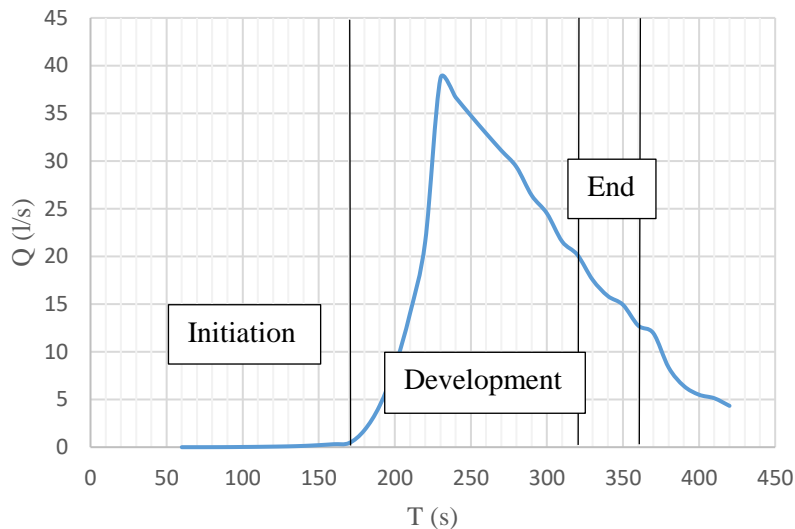
پس از نمونه برداری تصادفی از رسوبات انباشته شده در کف کانال و قرارگیری آنها در کوره به مدت ۲۴ ساعت، جرم مربوطه یادداشت شد. با تقسیم جرم نمونه خشک به حجم آن، وزن مخصوص خشک حاصل شد. با توجه به اعداد به دست آمده، عدد ۱۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب به عنوان وزن مخصوص خشک میانگین رسوبات کف کانال، انتخاب شد.

نتایج

در نمودارهای ذیل، هندسه شکست (ارتفاع، عرض بالا و عرض پایین) و هیدروگراف جریان ناشی از شکست مدل فیزیکی ترسیم شده است (شکل‌های ۷ و ۸).



شکل ۷: تغییرات هندسه شکست



شکل ۸: هیدروگراف شکست

دبی دارای تأخیر ۶۰ ثانیه است. تعیین طول مرحله شروع از طریق رصد دوربین مقابل وجه پایین دست (در فاصله ۱.۵ متری نصب شده است)، محاسبه شده است که ۱۷۰ ثانیه است. با توجه به مشاهدات انجام شده، قسمت عمده رسوبات کف کانال در نزدیکی پنجه مدل فیزیکی قرار گرفته است.

توسعه شکست

بعد از مرحله شروع، فرایند شکست وارد مرحله توسعه می‌شود. در این مرحله، شکست هسته ناتراوا مشاهده می‌شود. ابعاد کانال مستطیلی تاج، افزایش محسوس می‌یابد و مقطع شکست مدل فیزیکی، به مقدار نهایی می‌رسد (ارتفاع مقطع شکست به ۲۷.۵، عرض بالای شکست به ۸۶ و عرض پایین شکست به

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی و نمودارهای ترسیم شده بر اساس آنالیز دوربین‌ها، فرایند شکست مدل فیزیکی را می‌توان در سه مرحله مهم بیان کرد (شکل ۹).

شروع شکست

این مرحله از زمان ورود آب به وجه پایین دست، آغاز می‌شود. فرایند شکست وجه پایین دست، در مسیری مستقیم و در امتداد کانال اولیه حفر شده تاج، ادامه می‌یابد. در این مرحله، ابعاد شیار اولیه حفر شده تاج، افزایش محسوسی ندارد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری دبی جریان توسط سرریز مثلثی و در فاصله ۵.۵ متری پنجه مدل فیزیکی انجام می‌شود، اندازه‌گیری

فیزیکی، ادامه دارد تا زمانی که تغییر شکل وجه بالادست، به حالت نهایی برسد (ضخامت باقیمانده پاشنه مدل فیزیکی به شش سانتیمتر می‌رسد). مدت زمان مرحله پایانی ۴۰ ثانیه است. کاهش محسوس شدت جریان ناشی از شکست و تغییرات اندک الگوی رسوب‌گذاری، از نتایج مرحله پایان خواهد بود. همچنین شیب متوسط مقطع شکست ۸۴ درجه اندازه‌گیری شد. بر اساس مشاهدات انجام شده، هندسه نهایی شکست هسته ناتراوا با هندسه نهایی شکست مدل فیزیکی، یکسان است. در جدول (۳) خلاصه نتایج مربوط به هندسه شکست و هیدروگراف جریان آمده است.

الف) شروع؛ ب) لحظه شکست هسته؛ ج) بعد از شکست هسته؛ د) پایان؛ ه) وضعیت نهایی کانال آزمایش، و) هسته باقیمانده بعد از شکست.

۸۰ سانتیمتر می‌رسد). اعداد مربوط به عرض پایین مقطع شکست در مرحله توسعه، به علت وضعیت استغراق جریان آب، قابل ثبت نبوده است؛ بنابراین در نمودارهای مربوطه ترسیم نشده است. بیشترین تغییرات در مورد هندسه شکست، متعلق به مرحله توسعه است. در نمودار هیدروگراف، بازوی بالارونده و بخشی از بازوی پایین‌رونده (دربرگیرنده دبی اوج به میزان ۳۸.۷ لیتر در ثانیه و در ۲۳۰ ثانیه پس از شروع شکست) مربوط به مرحله توسعه می‌باشد. مدت زمان مرحله توسعه ۱۵۰ ثانیه است. بنابر مشاهدات، قسمت عمده الگوی رسوب‌گذاری، در همین مرحله شکل می‌گیرد.

پایان شکست

در این مرحله، ابعاد مقطع شکست، تغییر محسوسی ندارد اما اندرکنش جریان آب و وجه بالادست مدل



د

الف



ب



د



ج



و

شکل ۹: مراحل مختلف شکست

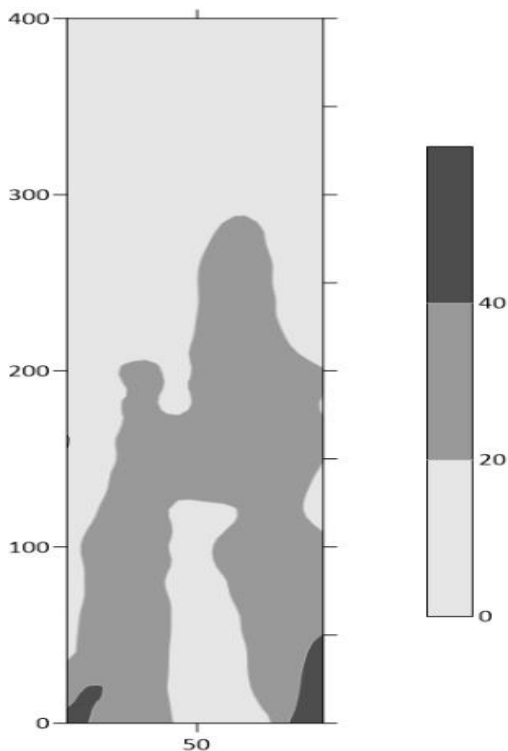
جدول ۳: نتایج هندسه شکست و هیدروگراف جریان

Subject	Breach time (s)	Height (cm)	Top width (cm)	Bottom width (cm)	Average side slope (degree)
Benchmark	۳۶۰	۲۷,۵	۸۶	۸۰	۸۴

Subject	Peak discharge ($\frac{lit}{s}$)	Peak time (s)	Initiation duration (s)	Development duration (s)	End duration (s)
Benchmark	۳۸,۷	۲۳۰	۱۷۰	۱۵۰	۴۰

الگوی رسوب‌گذاری

در شکل ۱۰ الگوی رسوب‌گذاری ترسیم شده است (ابعاد کانال آزمایشگاهی بر حسب سانتیمتر و اعداد مقیاس بر حسب میلی‌متر است).



شکل ۱۰: الگوی رسوب‌گذاری بعد از پایان

شکست

میلی‌متر، حجم مصالح فرسایش یافته ۰.۰۶۹ مترمکعب و جرم رسوبات مربوطه ۹۹.۸ کیلوگرم است. یکی از نتایج کاربردی تعیین الگوی رسوب‌گذاری، محاسبه حجم مصالح فرسایش یافته و جرم آن‌ها می‌باشد. با توجه به حفر کانال اولیه شکست در وسط تاج مدل فیزیکی، هندسه شکست و الگوی رسوب به دست آمده، دارای شکل نسبتاً متقارن است؛ همچنین با حرکت به سمت پایین دست، از ضخامت رسوبات کاسته می‌شود.

جدول ۴: نتایج الگوی رسوب‌گذاری

Subject	Average sedimentation thickness (mm)	Eroded materia l volume (m^3)	Sedimen t mass (kg)
Benchmark	۱۷,۲	۰,۰۶۹	۹۹,۸

جمع‌بندی

با توجه به آزمایش انجام شده مربوط به شکست روگذری مدل غیرهمگن و تحلیل نتایج، خلاصه نتایج به شرح ذیل حاصل می‌شود:

(۱) روند شکست مدل غیرهمگن را می‌توان در قالب سه مرحله شروع، توسعه و پایان در نظر گرفت که لحظه شکست هسته ناتراوا، مرز بین مرحله شروع و مرحله توسعه است. مرحله توسعه، دربرگیرنده توسعه جانبی کانال شکست تشکیل شده در وجه

در جدول (۴) اعداد مربوط به ضخامت میانگین رسوبات، با میانگین‌گیری از ۱۴۰ نقطه برداشت شده، به دست آمد. همچنین حجم مصالح فرسایش یافته به وسیله نرم‌افزار Surfer تعیین شد. از حاصل ضرب حجم مصالح فرسایش یافته در چگالی رسوبات، جرم میانگین رسوبات، به دست آمده است. ضخامت میانگین رسوبات پایین دست ۱۷.۲



صنعتی سهند تبریز، (۱۳۹۹).

محمدی م، هیدرولیک کاربردی، انتشارات دانشگاه

ارومیه، (۱۳۹۸).

وفاییان م، سدهای خاکی و سنگریز، انتشارات

ارکان دانش، (۱۳۹۶).

Abdellatif Mohamed MM, El-Ghorab EAS

(۲۰۱۶) Investigating scale effects on breach

evolution of overtopped sand embankments.

Water Science ۳۰: ۸۴-۹۵.

Al-Riffai M (۲۰۱۴) Experimental study of

breach mechanics in overtopped

non-cohesive earthen embankments. PhD

thesis, University of Ottawa, Ottawa, Canada.

Association of state dam safety officials

(۲۰۲۳) Kentucky, USA. Available from:

<https://damsafety.org>

ASTM D ۴۲۲-۶۳ (۲۰۰۲) Standard test

method for particle size analysis of soils.

ASTM D ۱۵۵۷ (۲۰۰۷) Standard test methods

for laboratory compaction characteristics of

soil using standard effort. West

Conshohocken, PA, USA.

ASTM D ۲۰۸۰ (۲۰۰۳) Standard test method

for direct shear test of soils under

consolidated drained conditions. Annual

Book of ASTM Standards, Philadelphia, ۴۰۸:

۱-۷.

Brunner GW (۲۰۱۶) HEC-RAS Reference

Manual, version ۵.۰. Hydrologic Engineering

Center, Institute for Water Resources, US

Army Corps of Engineers, Davis, California.

Committee on dam safety (۲۰۱۹) ICOLD

incident database bulletin ۹۹ update:

پایین دست تا نهایی شدن هندسه شکست خواهد

بود. در مرحله توسعه، بیشترین تغییرات در هندسه

شکست مشاهده شد و مرحله مذکور دربرگیرنده

بازوی بالارونده و بخشی از بازوی پایین‌رونده

هیدروگراف است. مدت زمان مرحله شروع،

بیشترین مقدار و مدت زمان مرحله پایان، کمترین

مقدار به ثبت رسید.

(۲) ارتفاع نهایی مقطع شکست، ۲۷.۵ سانتیمتر بوده

است. همچنین شیب میانگین مقطع شکست ۸۴

درجه بود. دبی اوج به میزان ۳۸.۷ لیتر در ثانیه و

در ۲۳۰ ثانیه پس از شروع شکست رخ داد. به علاوه،

هندسه شکست نهایی مدل فیزیکی با هندسه

شکست نهایی هسته ناتراوا یکسان بود.

(۳) با توجه به حفر کانال شکست اولیه در وسط تاج

مدل غیرهمگن، هندسه شکست و الگوی

رسوب‌گذاری به دست آمده، دارای شکل نسبتاً

متقارن بود. همچنین مشاهده شد که با حرکت

به سمت پایین دست، از ضخامت رسوبات کاسته شده

است. محاسبه حجم و جرم رسوب‌گذاری حاصل

شکست، از نتایج تعیین الگوی رسوب‌گذاری است.

مراجع

شرکت مدیریت منابع آب ایران، گزارش فنی سد

ستارخان، (۱۴۰۰).

صادقی، ص، «بررسی آزمایشگاهی شکافت سدهای

خاکی کوتاه با هسته رسی ناشی از روگذری

جریان»، رساله دکتری مهندسی عمران، دانشگاه

Statistical analysis of dam failures, technical report, international commission on large dams Available from: <https://www.icoldchile.cl/boletines/۱۸۸.pdf>

Energiforsk institute (۲۰۱۸) Fuse plug breach tests. Report ۲۰۱۸: ۴۶۵. Available from: <https://www.energiforsk.se>.

Froehlich DC (۲۰۱۶) Predicting peak discharge from gradually breached embankment dam. Journal of Hydrologic Engineering. ۱۵: ۰۴۰۱۶۰۴۱: ۱-۱۵. [https://doi.org/۱۰.۱۰۶۱/\(ASCE\)HE.۱۹۴۳-۵۵۸۴.۰۰۰۱۴۲۴](https://doi.org/۱۰.۱۰۶۱/(ASCE)HE.۱۹۴۳-۵۵۸۴.۰۰۰۱۴۲۴).

Morris M, Kortenhaus A, Visser P (۲۰۰۹) Modelling breach initiation and growth. FLOODsite report: T۰۶-۰۸-۰۲, FLOODsite Consortium, Wallingford, UK.

Saberi O (۲۰۱۶) Embankment dam failure outflow hydrograph development. PhD thesis, Graz University of Technology, Austria.

Taskaya E, Bombar G, Tayfur G (۲۰۲۳) Experimental investigation of sediment movement as a result of homogeneous earth-fill dam overtopping break over a simplified urban area. Journal of Hydrology ۶۱۷: ۱۲۸۹۲۴. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.jhydrol.۲۰۲۲.۱۲۸۹۲۴>

USACE (۲۰۰۴) General design and construction considerations for Earth and rock-fill dams. US Army Corps of Engineers, Washington DC, USA

USBR (۱۹۸۷) Design of small dams. Bureau of Reclamation, water resources technical Publication