Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics
Vol. 20, No. 1, PP. 57-72, Spring 2025

Research Article
https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.427142.1687

Experimental Study of Local Failure Near the Tailings Dam Abutment with a Water Pond

Parham Shayan[1], Mitra Javan[2]*, Omid Mohseni[3]

1- M.Sc. Graduate Student, Water and Hydraulic Structures Engineering, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.
2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.
3- Senior Water Resources Engineer at Barr Engineering Company, Minneapolis, Minnesota, United States.

* **mjavan@razi.ac.ir**

Received: 4 December 2023
Accepted: 7 May 2024
Discussion: 22 June 2025

J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Tailing dams are responsible for collecting tailings from mining operations. Tailing dams are built to conserve water for use in mining and protecting the environment. These structures are often constructed using the tailing. This issue, along with factors such as the relatively long construction period and inadequate design and supervision, has resulted in a high number of tailings dam failures. Tailing dam accidents have occurred frequently in recent years. The current rate of failure of large tailings dams is about 2 to 5 cases a year. In the recent failure tailing dam on 2022, Nov. 7, the tailings escaped through an approx. 150 m wide breach of the eastern wall of the impoundment, which caused the release of 12.8 million m3 of water and tailings (World Information Service on Energy (2022)). Some tailings dams have a water pond near the dam crest and the water and tailings liquefy or not contribute to the tailing dam breach. Other tailings dams have no water pond or the pond is far from dam's crest. Water has no or less contribution to the tailings dam failure and the runout of tailings liquefy or not is significant. (Small et al. (2017)).

Methodology: This research explores a local failure dam near the tailings dam abutment with a water pond in the large-scale experimental setup that consists of a tailings pond by 505 cm(length), 310 cm (width) and 64 cm (height). The uniformity and curvature coefficient of tailings are 2.21 and 1.44 and tailings is not able to liquefied. The bed longitudinal slope is 2%. A gate with a 20 cm width is located as a dam breach near the left abutment of the dam. An ultrasonic equipment measured the time series of water surface elevation. The experimental tests were carried out at different water surface elevations and repeated three times to ensure the validity of the results. The bed topography is measured by the Kinect before and after the dam breach. These bed elevations were applied to calculate the volume of the eroded tailings by using Civil3D 2019 software. Moreover, some videos are provided to recognize the flow pattern and bed erosion.

Results and Discussion: In all experiments, after the local failure of the tailing dam, a pit was created inside the tailings next to the breach. At the beginning of the experiments, the pit did not affect on the water surface elevation. After that, the pit being was recognizable in while there was some water at the end of the pond just next to the dam body. At the end, there was some water inside the pit and a hydraulic jump occurred in it and grooves were

produced on the bed and the eroded sediments do not have any ability to move towards the breach downstream. The bed erosion pattern and transported sediment volume were surveyed at different water surface elevations of the tailings dam during a local failure near the abutment. Due to complex nature of sediment erosion, the bed topographies of the similar experiments were different in detail.

Conclusion: Water and sediment were quickly released from the local tailing dam breach and a pit formed in the bed next to the local failure. In all experiments, the volume ratio of the eroded sediment to the dam pond water approximately was about one percent. The variation of the water surface elevation with time was about 0.45. It was observed that the length of the pit in the dam body direction is more than the perpendicular direction to the dam body. The ratio of the length to width of the pit was 3 to 3.3, approximately.

Keywords: Tailings Dam, Local Failure, Water Pond, Abutment, non liquified tailings, Dam Failure.

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک
سال ۲۰، شماره ۱، صفحات ۵۷-۷۲، بهار ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.427142.1687

مطالعه آزمایشگاهی شکست موضعی سد باطله دارای حوضچه آب در نزدیکی تکیه‌گاه

پرهام شایان[۱]، میترا جوان[۲*]، امید محسنی[۳]

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۳- مهندس ارشد منابع آب، شرکت مهندسی Barr، مینیاپولیس، مینه‌سوتا، ایالات متحده آمریکا.

* mjavan@razi.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: سدهای باطله وظیفه جمع‌آوری باطله‌های حاصل از عملیات معدن‌کاری را برعهده دارند. این سازه‌ها اغلب با استفاده از خود باطله‌ها ساخته می‌شوند که این مسئله در کنار عواملی همچون دوره ساخت نسبتاً طولانی و عدم نظارت و طراحی دقیق این سدها منجر به شکست تعداد زیادی از سدهای باطله شده است. در این پژوهش شکست سد باطله در نزدیکی تکیه‌گاه مورد مطالعه قرار گرفته که حوضچه‌ای در نزدیکی سد وجود داشته و باطله ها در برابر روانگرایی حساس نیستند. برای این منظور از یک حوضچه بزرگ مقیاس استفاده شد تا نتایج استخراج‌شده مستقل از مقیاس ابعاد مخزن سد باشد. در این آزمایش ها الگوی فرسایش بستر، میزان انتقال رسوب و تغییرات تراز آب در تراز های مختلف سطح آب در هنگام شکست موضعی سد باطله موردمطالعه قرار گرفته است. در تمامی آزمایش‌ها نسبت حجم مصالح فرسایش یافته در نزدیکی محل شکست به حجم آب حوضچه سد حدودا یک درصد است. شیب تغییرات تراز سطح آب نسبت به تغییرات زمان در همه آزمایش ها حدودا ۰.۴۵ است.

کلیدواژگان: سد باطله، شکست موضعی، حوضچه آب، تکیه‌گاه، مصالح غیر روانگرا، شکست سد.

۱- مقدمه

سدهای نخاله‌گیر[1] را می‌توان به عنوان سازه‌های مهاری که برای گردآوری زباله‌های معدنی که در طی عملیات معدنی تولید شده‌اند، تعریف کرد. این سدها دارای ویژگی‌های مشترک بسیاری با سدهای آبی هستند، به ویژه اگر برای مهار (مهار) گرد و غبار، محدود کردن آلودگی هوا و یا محافظت از زهکشی سنگ‌های اسیدی، نیاز به ذخیره آب بر روی این‌گونه مواد وجود داشته باشد. سدهای نخاله‌گیر به طور معمول در حین بهره‌برداری ساخته می شوند که می تواند مدت زیادی به طول بیانجامد. نقص در طراحی، ساخت ضعیف، مصالح ساختمانی نامناسب و نبود برنامه‌ریزی مناسب در تعمیر و نگهداری آن‌ها ممکن است منجر به خرابی سد نخاله‌گیر شود. به عبارت دیگر شکست یا شکاف سد نخاله‌گیر به صورت شکست ساختاری سد و به دنبال آن رهاسازی مهار نشده مواد محتوی که می‌تواند شامل آب، مواد سیال یا جامد یا ترکیبی از آن‌ها باشد، در نظر گرفته می‌شود. در سدهای نخاله‌گیر به ازای هر ۷۰۰ الی ۱۷۵۰ سد یک خرابی رخ می‌دهد؛ این نسبت بسیار بیشتر از نسبت خرابی‌های بزرگ در سدهای آبی است که به طور تقریبی یک خرابی در هر ۱۰۰۰۰ سد رخ می‌دهد (Canadian Dam Association, 2014). سدهای نخاله‌گیر دارای ویژگی‌های مشترک بسیاری با سدهای آبی هستند، به ویژه اگر برای مهار گرد و غبار، محدود کردن آلودگی هوا و

1. Tailings dam

یا محافظت از زهکشی سنگ‌های اسیدی، نیاز به ذخیره آب بر روی نخاله‌ها وجود داشته باشد. طراحی این سدها برمبنای همان اصول ژئوتکنیکی طراحی سدهای خاکی می باشد با این تفاوت که حضور مواد نخاله‌ای (زباله‌ای) اشباع در مقایسه با آب، چالش بزرگی را پیش روی طراحان سدهای نخاله‌گیر قرار می‌دهد. سدهای نخاله‌گیر می توانند از نخاله های فرآوری نشده یا از مصالح قرضه[1] بدون استفاده از نخاله‌ها ساخته شوند. مهار (کنترل) تراوش در سدهای نخاله‌گیر از جنبه زیست محیطی بسیار با اهمیت می‌باشد زیرا اغلب نخاله ها حاوی مواد سمی و مضرر برای انسان و محیط زیست می باشند. این امر سبب می شود که دامنه مجاز تراوش از سدهای نخاله‌گیر به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از سدهای آبی در نظر گرفته شود (Tailings Dam Breach Working Group, 2017).

با وجود پیشرفت‌هایی که در سال‌های اخیر در طراحی و اجرای سدهای نخاله‌گیر به دست آمده است، همچنان شاهد شکست این‌گونه سدها هستیم که این موضوع نشان می‌دهد باید بررسی‌های بیشتری در این زمینه صورت پذیرد. داشتن اطلاعات کافی در زمینه شکست و خرابی سدهای نخاله‌گیر در گذشته و علت رخداد آن‌ها می‌تواند کمک شایانی در طراحی این‌گونه سدها و همچنین پیشگیری از رخدادهای همانند کند. این خرابی‌ها در کشورهای پیشرفته نیز رخ می‌دهد و محدود به کشورهایی با آیین‌نامه‌های ناکارآمد نمی‌باشد؛ به‌طوری که بررسی‌های Rico et al. (2008) نشان می‌دهد که بیشترین شکست سدهای نخاله‌گیر در سدهای در حال فعالیت رخ می‌دهد. بنابر نتایج این بررسی‌ها ۸۳ ٪ خرابی ها در سدهای فعال، ۱۵٪ در سدهای غیرفعال رهاشده و تنها ۲٪ در سدهای غیرفعال و نگهداری شده رخ داده است. برای سدهای غیرفعال، سرریزشدن، که علت نیمی از خرابی‌ها بود، علت اصلی خرابی سد در این وضعیت عنوان شده است.

علت‌های خرابی در سدهای فعال متنوع تر از انواع غیرفعال است. Rico et al. (2008) علت‌های خرابی سدهای نخاله را به ۱۱ دسته تقسیم می‌کنند: گسیختگی پی، ناپایداری شیروانی، سرریزشدن، فرونشست کان (معدن)، باران‌های سیلابی، ذوب شدن برف، فرسایش درونی و تراوش، روانگرایی لرزه‌ای، مسئله‌دار بودن سازه‌ای و نگهداری و علت‌های نامعلوم. همپوشانی های روشنی بین بسیاری از این گروه ها وجود دارد (به طور مثال آب شدن یخ، باران‌های سیلابی و سرریزشدن) که در اغلب خرابی ها بیش از یک عامل مؤثر است (به طور مثال نگهداری نامناسب و خرابی سازه‌ای). (Rico et al., 2008) رویدادهای سدهای نخاله‌گیر در سال‌های اخیر به طور مکرر رخ داده است. شمار کنونی خرابی سدهای نخاله بزرگ در حدود ۲ تا ۵ مورد در طول یک سال می‌باشد. در شکست سد نخاله‌گیر Williamson Mine در کشور تانزانیا که در تاریخ ۷ نوامبر ۲۰۲۲ رخ داد، مواد نخاله‌ای از طریق شکافی به عرض تقریبی ۱۵۰ متر خارج شدند که باعث آزادسازی ۱۲.۸ میلیون مترمکعب آب و نخاله‌ها شد. از دیگر خرابی های اخیر سدهای نخاله‌گیر می‌توان به شکست سد نخاله‌گیر Jagersfontein در کشور آفریقای جنوبی در تاریخ ۱۱ سپتامبر ۲۰۲۲ اشاره کرد (World Information Service on Energy, 2022). طبقه‌بندی‌های مدل‌سازی شکست سد نخاله‌گیر برمبنای بودن یا نبود حوضچه در نزدیکی تاج سد و همچنین روانگرایی مواد نخاله‌ای در چهار کلاس (1A, 2A, 1B, 2B) طبقه بندی می‌شوند. کلاس 1A برای موارد شکستی است که حوضچه در حوالی شکست وجود دارد و نخاله‌های انباشته شده دارای توان بالقوه (پتانسیل) روانگرایی قابل توجهی هستند. در این حالت انتظار می‌رود که جریان در شکاف شکست شامل آب و نخاله‌های فرسایش یافته و نخاله‌های مایع شده باشد. این کلاس با خرابی سدهای Mochikosh در ژاپن (۱۹۷۸) یا خرابی سد Tailing Merriespruit در آفریقای جنوبی (۱۹۹۴) سازگار است. کلاس 1B برای موارد شکافی است که حوضچه‌ای در نزدیکی شکست وجود دارد و نخاله‌ها در برابر روانگرایی حساس نیستند. پیش‌بینی می‌شود جریان در این شرایط از آب و نخاله‌های فرسایش یافته تشکیل شود. خرابی تاسیسات مخزن نخاله مونت پولی در بریتیش کلمبیا (۲۰۱۴) مربوط به این کلاس است که در آن ریزش‌هایی در شیب نخاله‌ها رخ داده اما روانگرایی

1. Borrow materials

گسترده‌ای در نخاله وجود نداشته که بتواند به افزایش قابل توجهی در حجم خروجی منجر شود.

در کلاس 2A حوضچه‌ی آبی وجود ندارد و نخاله‌ها پتانسیل روانگرایی قابل توجهی دارند. در این رویداد جریان شبیه جریان گل آلود، بستگی به مقاومت برشی باقی‌مانده نخاله‌های مایع شده دارد. برای این کلاس می‌توان خرابی سد نخاله‌گیر تاپو کنیون را در ایالت متحده در سال ۱۹۹۴ نام برد.

کلاس 2B برای مواردی است که هیچ حوضچه‌ی آبی در آن دخیل نباشد و نخاله‌ها مستعد مایع شدن نباشند. در این حالت حرکت نخاله‌ها توسط مقاومت برشی آن‌ها و نیروهای محرکه (شیب زمین) مهار (کنترل) می‌شود و شامل شکست شیب است. خرابی سد نخاله‌گیر موجود در معدن کستل دمو در ایالات متحده (۱۹۵۰) نیز متناسب با این طبقه‌بندی است. طبقه‌بندی‌های مدل‌سازی شکست سدهای نخاله‌گیر به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است (Martin et al., 2019).

جدول ۱ طبقه‌بندی‌های مدل‌سازی شکست سدهای نخاله‌گیر

Table 1 Tailings dam breach assessment cases

		Potential for tailings to runout of the breach area as a result of liquefaction (seismic or static)	
		Yes	No
Presence of free water	Pond near crest of dam	1A: Dam break method with flow of liquefied tailings contributing additional volume of material released	1B: Dam break method with tailings eroded, transported and deposited by flow of water
	No pond or pond far from crest	2A: Slope failure with debris flow or mud flow (degree of saturation)	2B: Slope failure

Jing et al. (2019) هیدرودینامیک جریان گل و لای یا نخاله مایع شده را در سه دانه‌بندی مختلف، بدون وجود حوضچه آب برای شکاف سد نخاله‌گیر بررسی کردند. آنان دریافتند که بیشینه فشار پویایی (دینامیکی) و سرعت به تدریج با افزایش اندازه ذرات نخاله افزایش می‌یابد (Jing et al., 2019).

شبیه‌سازی رها شدن نخاله‌ها در حالت های مختلف شکست سد با استفاده از مدل‌های فیزیکی توسط Souza Junior & Teixeira (2019) برای ارزیابی حجم مواد خروجی از مخزن در هنگام رخداد خرابی سد نخاله‌گیر بررسی شد. برای بررسی تأثیر فراسنجه (پارامتر) های مربوط به هندسه شکست و مقاومت برشی زهکشی نشده (Su) در یک رویداد شکست، ۲۰ پیش‌فرض (سناریو) با توجه به نبود آب در مخزن شبیه‌سازی شد. در این پژوهش از مصالح بنتونیت به دلیل همانندی بین خواص آن با مواد نخاله‌ای استفاده شد. آنان نتیجه گرفتند که حجم مواد نخاله خروجی به هندسه و عرض متوسط شکاف بستگی دارد (Souza Junior & Teixeira, 2019).

در این پژوهش با توجه به نبود پیشینه بررسی و ارزیابی شکست موضعی سدهای نخاله‌گیر دارای حوضچه آب، به بررسی آزمایشگاهی الگوی فرسایش بستر و میزان انتقال رسوب در تراز های مختلف سطح آب مخزن سد نخاله‌گیر با مصالح ناروانگرا و دارای حوضچه‌ی آب پرداخته می شود. کلاس شکست موضعی سد نخاله‌گیر در نزدیکی تکیه گاه سد در این پژوهش، از نوع 1B می باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه رازی انجام شد. برای بررسی آزمایشگاهی شکست موضعی سد نخاله‌گیر از مخزنی متشکل از صفحه‌های فلزی به ضخامت ۶ میلی‌متر ، به ابعاد ۵۰۵ در ۳۱۰ سانتی‌متر مربع و به ارتفاع ۶۴ سانتی‌متر استفاده شد. در پایین دست این مخزن دریچه ای به عرض ۲۰ سانتی‌متر

در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از تکیه گاه تعبیه شده است (شکل ۱).

برای برداشت جانگاری (توپوگرافی) سطح بستر رسوبی از دستگاه کینکت[1] استفاده شد. پایه‌ای به صورت تراز کامل برای استقرار کینکت ساخته شد که ارتفاع تراز قرارگیری آن از بستر صلب مخزن ۱۴۲ سانتی‌متر می‌باشد.

در آزمایش‌ها برای برداشت تراز سطح آب در قسمت خروجی مخزن نسبت به زمان، از ارتفاع سنج فراصوتی (آلتراسونیک) استفاده شد که قابلیت نمایش ارتفاع و زمان را دارد؛ دقت اندازه گیری این نوع ارتفاع سنج کمتر از ۱ میلی متر است.

مصالح بستر با شیب طولی ۲ درصد با عمق خاک ۳۰ سانتی‌متر در بالادست مخزن و ۲۰ سانتی‌متر در پایین‌دست در نظر گرفته شده است. در شکل (۱) نمای کلی مخزن مورد استفاده در آزمایش ها، موقعیت دریچه و همچنین موقعیت قرارگیری کینکت برای برداشت جانگاری و ناهمواری‌های سطح درون مخزن نشان داده شده است.

شکل ۲ میانگین منحنی دانه بندی مصالح بستر را در ۹ ناحیه از مخزن مورد بررسی نشان می‌دهد. با توجه به این منحنی، ضریب یکنواختی خاک (Cu) برابر ۲/۲۱ و ضریب انحنای خاک (Cc) برابر ۱/۴۴ به دست می آید. ضریب یکنواختی (Cu) به‌صورت نسبت D60 به D10 تعریف می‌شود. مقدار Cu بزرگ‌تر از ۴ تا ۶ خاک را در دسته دانه‌بندی خوب قرار می‌دهد. هنگامی که این مقدار کمتر از ۴ باشد، دانه‌بندی خاک یکنواخت است. ضریب انحنا از رابطه $\frac{D30^2}{D60*D10}$ محاسبه می‌شود. میزان‌های به دست آمده برای ضریب یکنواختی و ضریب انحنای خاک نشان دهنده آن است که خاک در دسته ماسه ساحلی قرار دارد.

۲-۲- روش انجام آزمایش‌ها

پس از آن که مدل فیزیکی جهت انجام آزمایش‌ها آماده شد، جانگاری و ناهمواری (توپوگرافی) سطح مخزن در نزدیکی محل شکست برداشت می‌شود که بتوان با مقایسه آن با جانگاری پس از انجام آزمایش، حجم رسوب خروجی از مخزن را محاسبه نمود.

برای برداشت جانگاری و ناهمواری به وسیله دستگاه کینکت، با استفاده از نرم‌افزار SDK Browser با فرمت ply از سطح بستر مورد نظر تصویرهایی برداشت می‌شود که این فایل ها قابلیت ویرایش با نرم‌افزار MeshLab 2020 را دارند. MeshLab نرم افزاری متن باز برای کار بر روی آبجکت های سه بعدی مش می باشد. با توجه به ارتفاع کینکت، در هر تصویر برداشت شده سطحی به ابعاد تقریبی ۱۲۰ در ۱۲۰ سانتی‌متر مربع برداشت خواهد شد. برای پوشش حفره آبشستگی نزدیک شکست موضعی به دو تصویر در راستای عرضی مخزن نیاز است. برای آسانگری ادغام عکس‌های برداشت شده سه نقطه نشانه مشترک میان دو تصویر در نظر گرفته شد.

پس از اصلاح داده ها و حذف بخش های مشترک تصویرها در نرم‌افزار MeshLab و تعیین دستگاه مختصات واحد برای تصویرها، با استفاده از ابزار Flatten Visible Layers دو تصویر با یکدیگر ادغام می‌شوند. در پایان از فایل مربوطه با فرمت dxf خروجی گرفته می‌شود تا بتوان از آن برای محاسبه حجم خاک خروجی از مخزن به‌وسیله نرم‌افزار Civil3D 2019 استفاده کرد که از داده های پیش از انجام آزمایش و پس از انجام آزمایش هرکدام به‌صورت جداگانه، یک سطح تولید می‌شود. با مقایسه دو سطح ایجاد شده به روش گفته شده می‌توان حجم رسوب خروجی را محاسبه نمود.

آزمایش ها با تراز های مختلف آب ۵۵، ۵۰ و ۴۵ سانتی متر و به عبارتی با عمق آب به ترتیب ۳۵، ۳۰ و ۲۵ سانتی متر در پایین‌دست مخزن انجام شد و برای اعتبارسنجی نتایج، آزمایش مربوط به هر تراز آب سه بار تکرار شد.

۳- نتایج و بحث

یکی از حالت های شکست موضعی سدهای نخاله‌گیر، شکست در نزدیکی تکیه‌گاه سد می‌باشد که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. در این قسمت در آغاز مشاهده‌ها کیفی ارائه شده آن‌گاه در ادامه نتایج آزمایش‌ها با ترازهای مختلف سطح آب ۵۵، ۵۰ و ۴۵ سانتی‌متر ارائه

1. Kinect

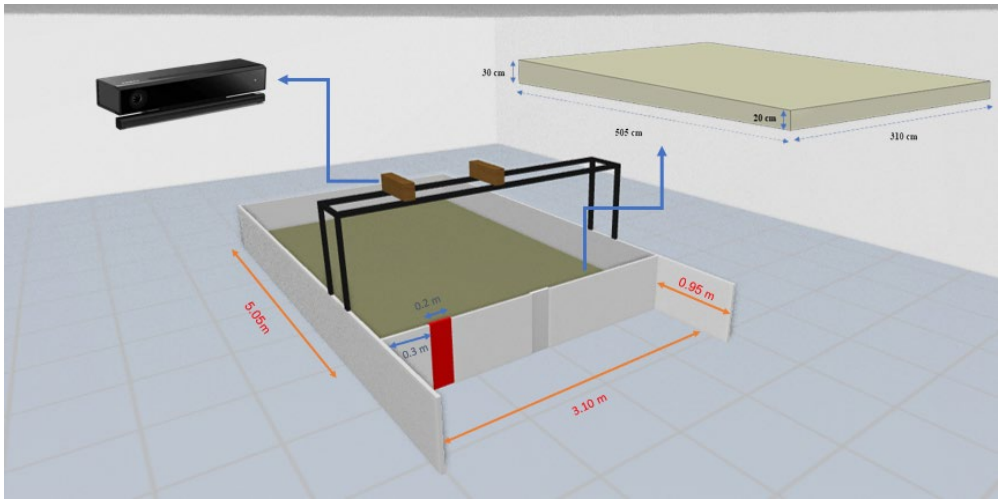


Fig. 1 Experimental Schematic plan in this research

شکل ۱ طرح کلی تجهیزات آزمایشگاهی

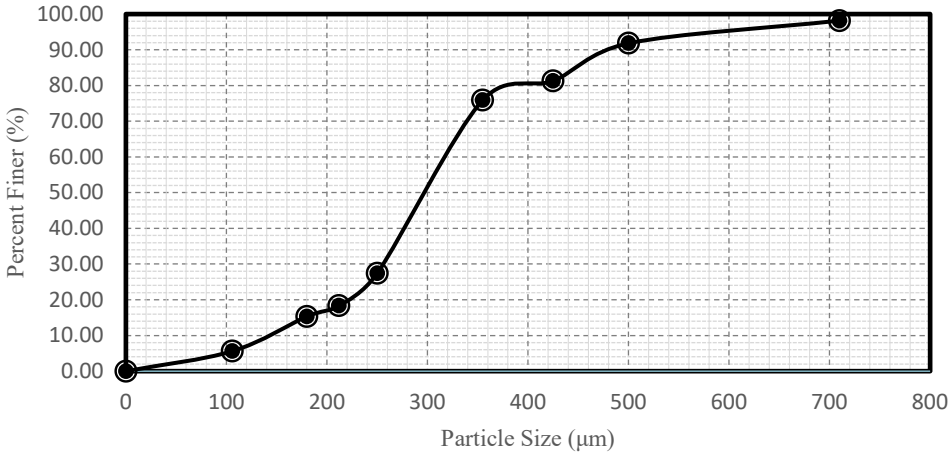


Fig. 2 Size distribution of bed materials

شکل ۲ منحنی توزیع دانه‌بندی مصالح بستر

می‌شود. لازم به یادآوری است برای اعتبارسنجی نتایج، آزمایش مربوط به هر تراز آب سه بار تکرار شد.

۳-۱- مشاهده‌های آزمایشگاهی

پس از شکست موضعی سد نخاله‌گیر، گودالی در بستر رسوبی درون مخزن سد نخاله‌گیر در نزدیکی محل شکست ایجاد می‌شود. در آغاز با استفاده از فیلم های تهیه شده از آزمایش ها، بررسی‌های کیفی مشاهده‌ها ارائه می‌شود. جهت تفسیر نحوه قرارگیری تراز آب مخزن نسبت به بستر در زمان های مختلف، خطوطی در راستاهای مختلف A,B,C مانند شکل (۳) در نظر گرفته می‌شود. لازم به یادآوری است که راستای A در راستای بدنه سد، راستای C عمود بر بدنه سد و راستای B متقاطع با راستاهای A و C است. حال با استفاده از فیلم آزمایش‌ها، می‌توان تغییرپذیری تراز آب نسبت به بستر رسوبی در امتداد هر یک از این راستاها را همانند شکل (۴) ترسیم کرد. همان‌گونه که در شکل (۴-a) مشاهده می‌شود، در آغاز آزمایش گودال آبشستگی ایجاد شده اثری بر تراز سطح آب ندارد. پس از گذشت زمان، تاثیر گودال بر سطح آب مشخص می‌شود (شکل (۴-b)). در این مرحله آب در انتهای طول مخزن و در نزدیکی بدنه سد و درون گودال وجود دارد و آب در بالادست طول مخزن تخلیه شده است. بررسی فیلم های آزمایش ها نشان می دهد که در مرحله بعد شکل (۴-c)، ارتفاع کمی از آب در درون گودال و نزدیکی بدنه سد وجود دارد و پرش هیدرولیکی در حفره

آبشستگی ایجاد می‌شود. در پایان آزمایش الگوی خروج آب در مخزن مانند شکل (۴ – d) است. لازم به یادآوری است که شیارهای ایجاد شده در بستر و افزایش طول حفره آبشستگی در مرحله‌های (c و d) رخ می‌دهد. با توجه به عمق آب کم باقی مانده در مرحله‌های c و d مصالح شسته شده توان جابه‌جایی زیادی نسبت به محل شکست سد ندارند. طول حفره آبشستگی در راستای بدنه سد (L)، طول حفره آبشستگی در راستای عمود بر بدنه سد (d) و بیشترین طول آبشستگی شیارها در راستای عمود بر بدنه سد (L') در قسمت های بعد ارائه می شوند. نمای کلی این ابعاد در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۶) نمای سه‌بعدی الگوهای آبشستگی مربوط به یکی از آزمایش‌ها ارائه شده است.

Fig. 3 Different directions for plotting the temporal changes of the water level

شکل ۳ راستاهای مختلف در نظر گرفته شده برای رسم تغییرپذیری‌های زمانی تراز آب

۳-۲- بررسی شکست موضعی سد نخاله‌گیر در نزدیکی تکیه‌گاه

در این بخش به بررسی آزمایش‌های شکست موضعی سد نخاله‌گیر در نزدیکی تکیه‌گاه پرداخته می‌شود. از جمله روش‌های نشان دادن ارتفاع در نقشه‌ها، استفاده از منحنی میزان است. در شکل (۷) خطوط جانگاری و ناهمواری (توپوگرافی) بستر پس از شکست سد در آزمایش‌های انجام شده ترسیم شده است که همه واحدها به متر بیان شده است. همان‌طور که مشخص است بیشترین ارتفاع آبشستگی در قسمت شکست موضعی سد رخ داده است. با توجه به ماهیت پیچیده رسوب مشاهده می‌شود که تصویرهای برداشت شده از بستر در همه آزمایش‌ها در جزییات با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند.

در جدول (۲) نسبت طول حفره آبشستگی در راستای بدنه سد (L)، طول حفره آبشستگی در راستای عمود بر بدنه سد(d) و بیشترین طول آبشستگی شیارها از بدنه سد (L') به عرض شکست موضعی سد (w) که برای همه آزمایش‌ها برابر ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد، محاسبه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود طول حفره آبشستگی در راستای بدنه سد نسبت به عرض شکست موضعی به‌صورت میانگین برای آزمایش‌های با تراز آب مختلف، در بازه (۳/۴, ۳) قرار دارد. همچنین نسبت طول حفره آبشستگی در راستای عمود بر بدنه سد به عرض شکست موضعی برای این آزمایش‌ها در بازه (۱/۱,۱/۴) و نسبت بیشترین طول آبشستگی شیارها از بدنه سد به عرض شکست موضعی در بازه (۳/۴,۵/۹) می‌باشد.

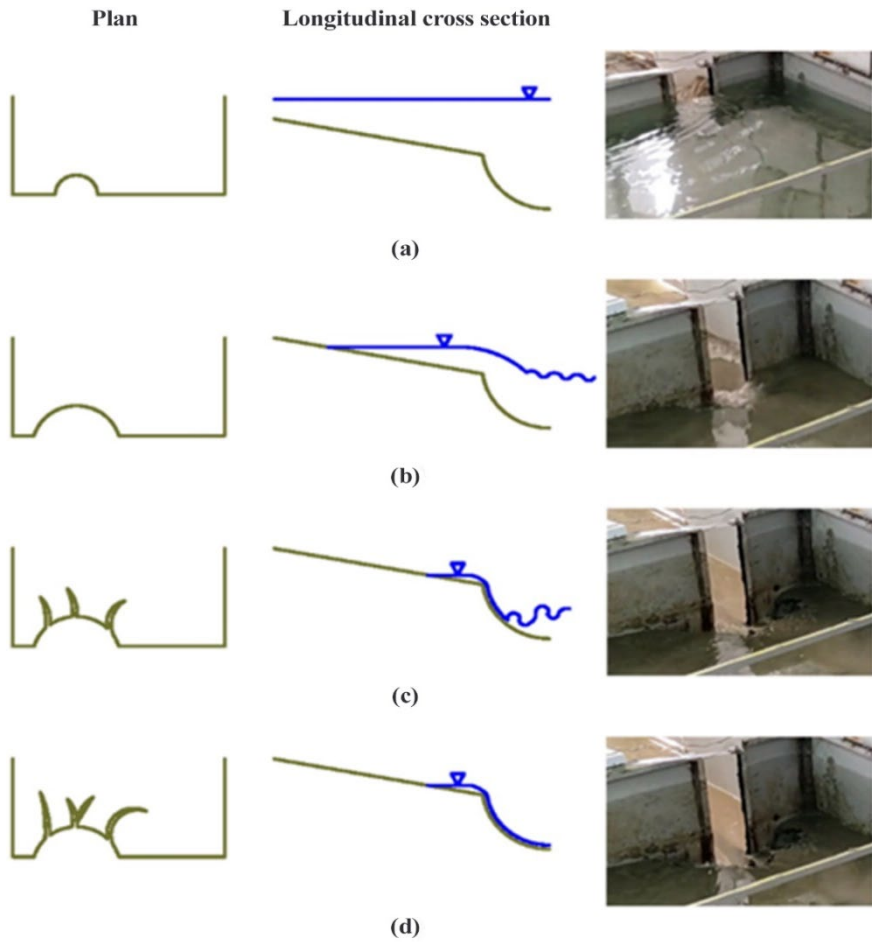


Fig. 4 Temporal changes of water level and bed in different directions inside the pond and a view of its experimental observations at the pit

شکل ۴ تغییرپذیری‌های زمانی تراز آب و بستر در راستاهای مختلف درون مخزن و نمایی از مشاهده‌های آزمایشگاهی آن در محل گودال

Fig. 5 Schematic of the length of the scour hole in the direction of the dam body (L), the length of the scour hole perpendicular to the dam body (d) and the maximum scour length of the grooves of the dam body (L')

شکل ۵ نمای کلی طول حفره آبشستگی در راستای بدنه سد (L)، طول حفره آبشستگی در راستای عمود بر بدنه سد(d) و بیشترین طول آبشستگی شیارها از بدنه سد (L')

Fig. 6 3D view of scouring patterns

شکل ۶ نمای سه‌بعدی الگوهای آبشستگی

جدول ۲ بررسی و مقایسه آبشستگی در راستاهای مختلف

Table 2 Examination and comparing scouring in different directions

Experiment No	w (m)	L/w	d/w	L'/w
Water Elev = 45 cm				
1	0.20	2.95	1.35	4.90
2	0.20	3.05	1.35	5.05
3	0.20	3.05	1.40	4.70
Average	0.20	3.02	1.37	4.88
Water Elev = 50 cm				
1	0.20	3.05	1.20	3.85
2	0.20	2.85	1.20	4.10
3	0.20	2.70	1.10	4.00
Average	0.20	2.87	1.17	3.98
Water Elev = 55 cm				
1	0.20	3.35	1.25	5.90
2	0.20	3.30	1.30	4.00
3	0.20	3.20	1.45	4.15
Average	0.20	3.28	1.33	4.68

جدول ۳ حجم مصالح خروجی از مخزن در اثر شکست موضعی در نزدیکی تکیه گاه

Table 3 The volume of materials output due to local failure near the abutment

Experiment No	The volume of eroded sediment (m^3)	The average volume of eroded sediment (m^3)	The ratio of the volume of eroded sediment to the water volume in the dam pond	standard deviation (m^3)	The percentage difference with the average relative to the average
Water Surface Elv = 45 cm					
1	0.03756				5.81
2	0.03782	0.03988	0.013	0.0031	5.16
3	0.04425				10.97
Water Surface Elv = 50 cm					
1	0.02547				8.78
2	0.02623	0.02792	0.007	0.0029	6.05
3	0.03206				14.83
Water Surface Elv = 55 cm					
1	0.05188				22.27
2	0.03716	0.04243	0.009	0.0067	12.42
3	0.03825				9.85

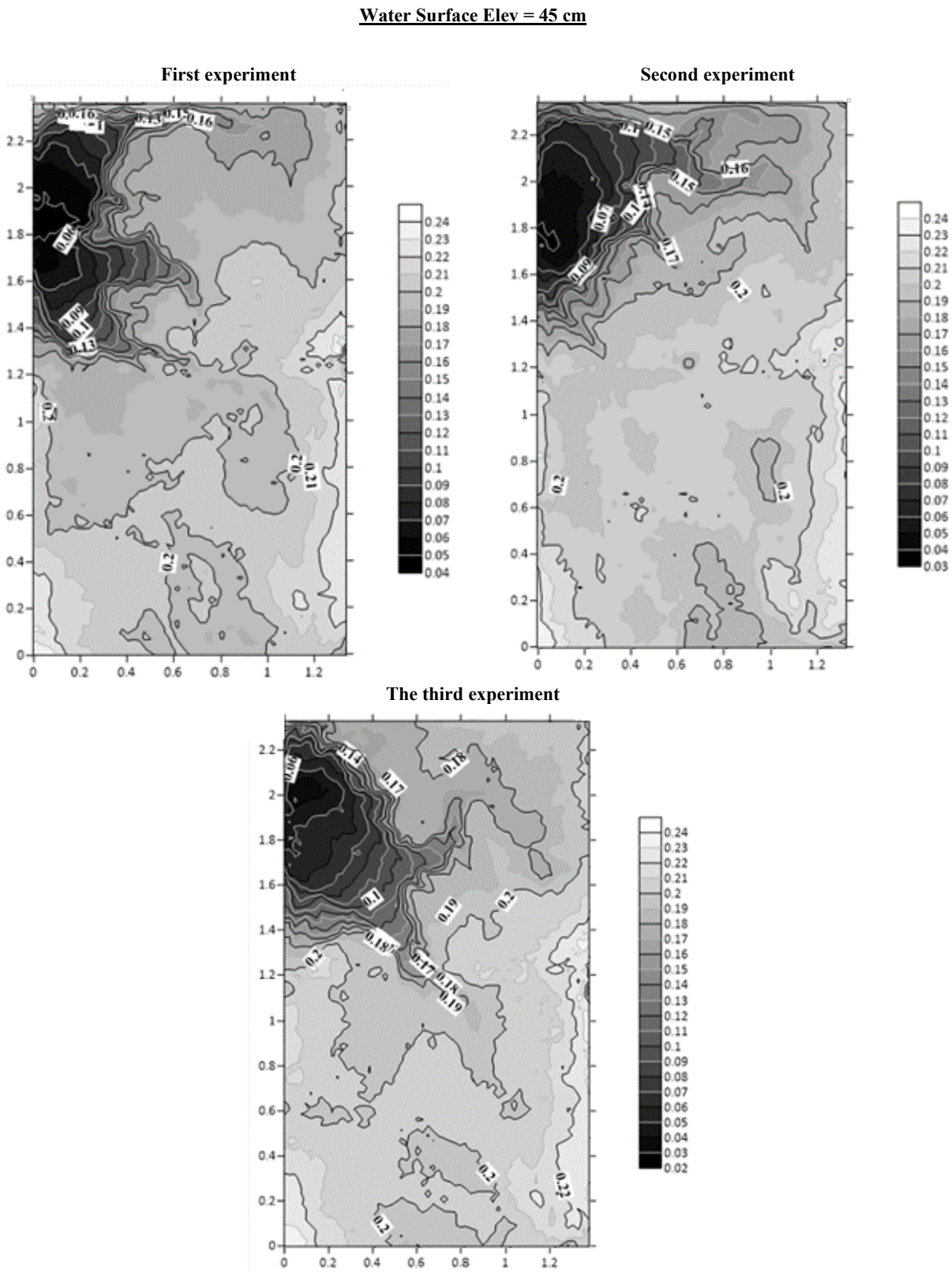
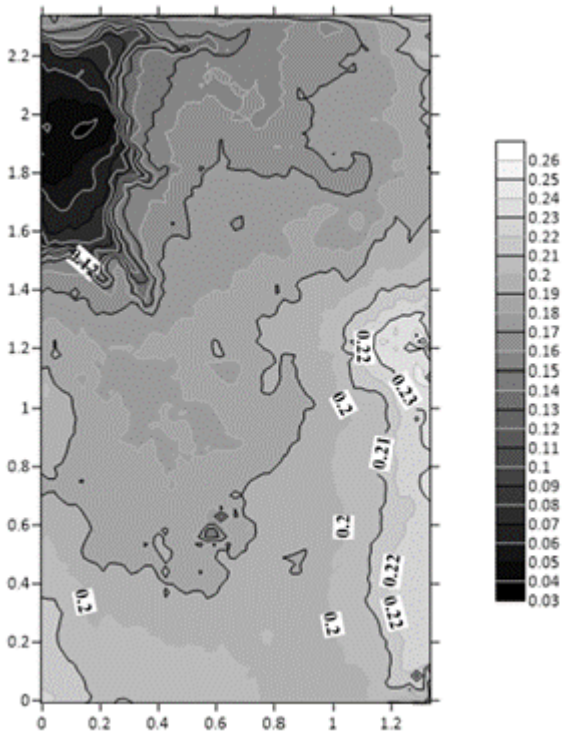


Fig. 7 Topography of scouring height

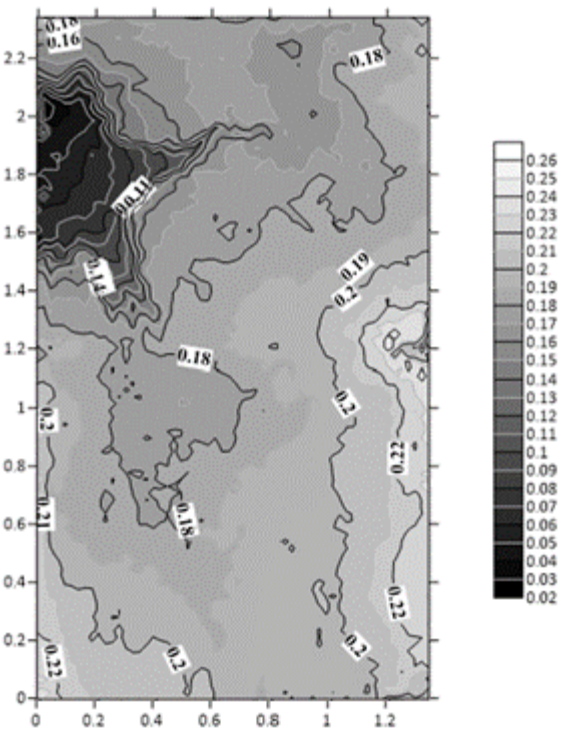
شکل ۷ منحنی میزان رقوم ارتفاعی آبشستگی

Water Surface Elev = 50 cm

First experiment



Second experiment



The third experiment

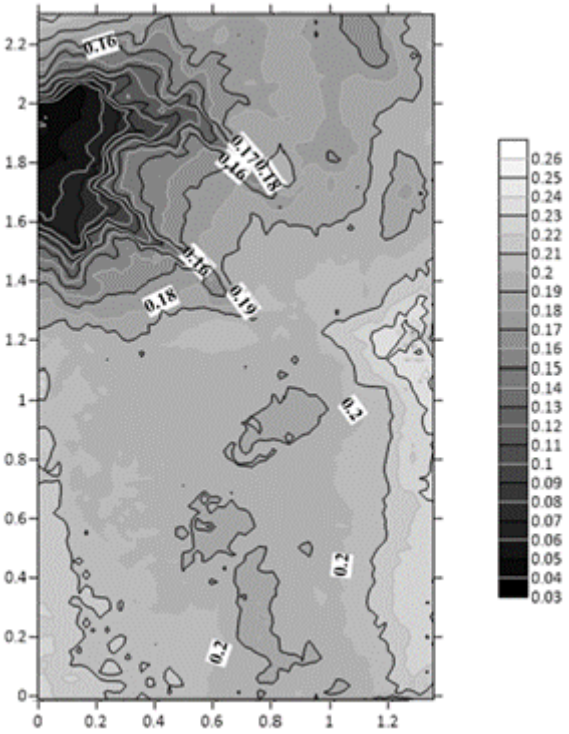
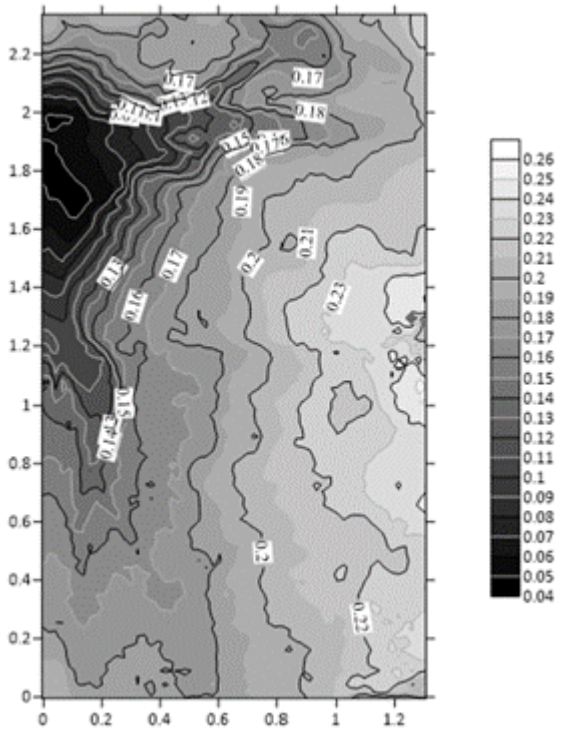


Fig. 7 Cont.

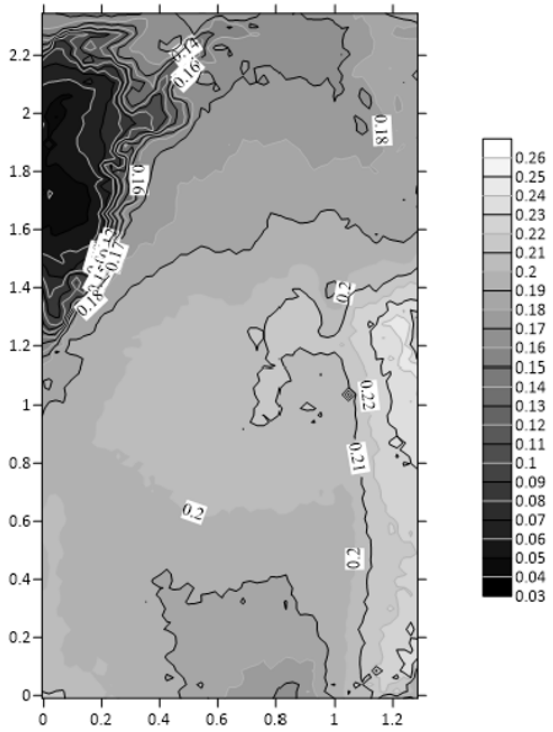
شکل ۷ ادامه

Water Surface Elev = 55 cm

First experiment



Second experiment



The third experiment

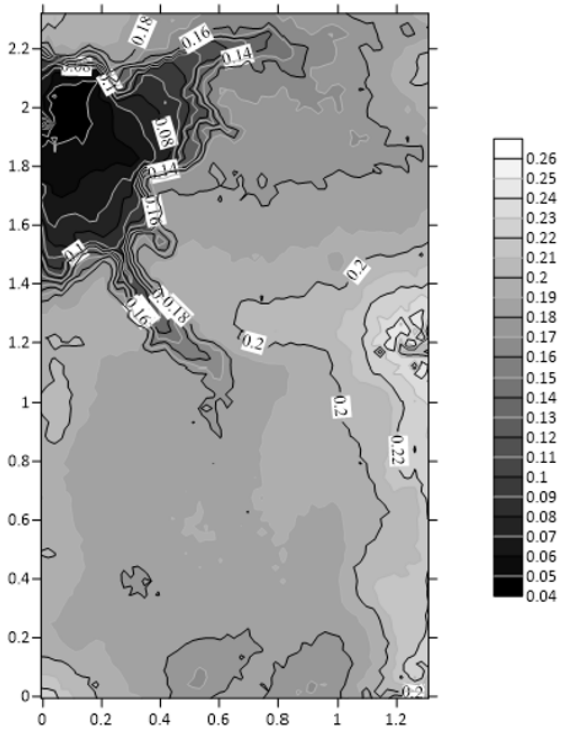


Fig. 7 Cont.

شکل ۷ ادامه

در جدول (۳) اطلاعات مربوط به حجم مصالح خروجی همه‌ی آزمایش‌های شکست موضعی سد نخاله‌گیر در نزدیکی تکیه‌گاه آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میانگین حجم رسوب خروجی از مخزن برای آزمایش‌های با تراز آب ۴۵، ۵۰ و ۵۵ سانتی‌متر به ترتیب ۰/۰۳۹۸۸، ۰/۰۲۷۹۲ و ۰/۰۴۲۴۳ مترمکعب می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که نسبت حجم مصالح خروجی از مخزن به حجم آب درون مخزن در همه آزمایش ها در حدود یک درصد است.

در شکل (۸) تغییرپذیری تراز سطح آب در قسمت شکست موضعی سد نخاله‌گیر در نزدیکی تکیه گاه نسبت به زمان برای تراز سطح آب ۵۰ سانتی‌متر آورده شده است. همان‌گونه که پیشتر بیان شد برای ثبت این تغییرپذیری‌ها از ارتفاع سنج فراصوتی استفاده شد. با توجه به آنکه آزمایش مربوط به هر تراز سطح آب سه بار تکرار شد، میانگین تراز آب این سه آزمایش نسبت به زمان برای هر تراز سطح آب محاسبه و در شکل (۹) ترسیم شد و بر داده های یادشده، خطی برازش داده شد. معادله این خطوط در جدول (۴) آورده شده است. در این جدول متغیر t زمان را نشان می دهد که t=0 زمان شکست سد است. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود شیب تغییرپذیری‌های تراز سطح آب نسبت به زمان در حدود ۲۵ درجه است.

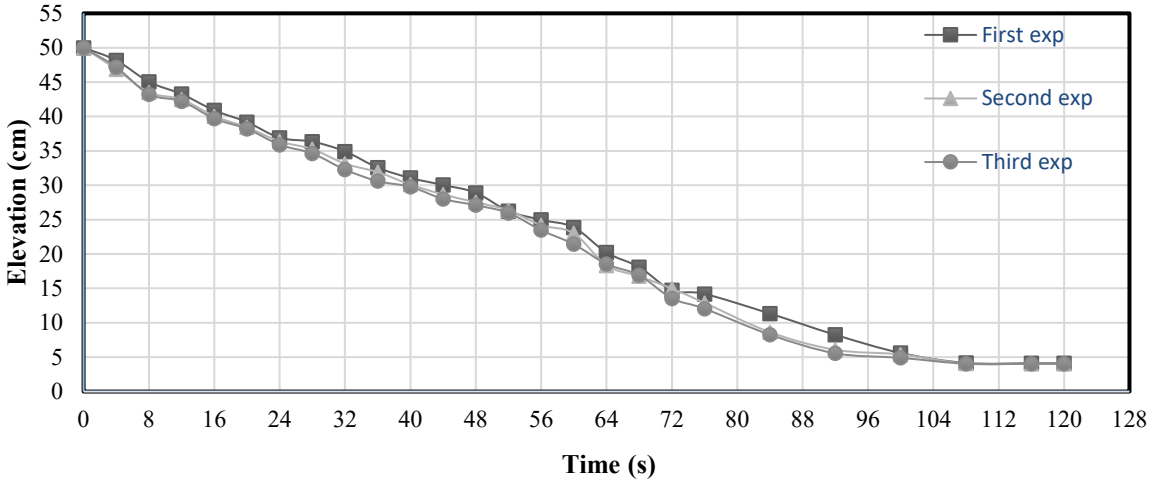


Fig. 8 Comparison of water level changes over time for the test with a water level of 50 cm

شکل ۸ مقایسه تغییرپذیری‌های تراز آب نسبت به زمان برای آزمایش با تراز آب ۵۰ سانتی متر

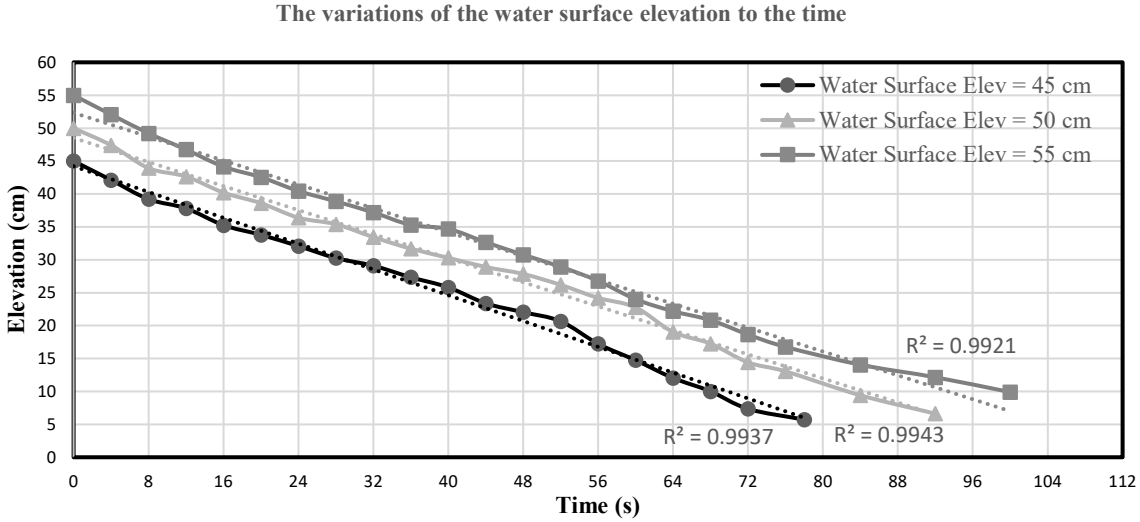


Fig. 9 Comparison of water level changes over time

شکل ۹ مقایسه تغییرپذیری‌های تراز آب نسبت به زمان

جدول ۴ معادله خط برازش بر منحنی تغییرپذیری‌های تراز آب نسبت به زمان

Table 4 The equation of the fitting line on the curve of water level changes over time

Water Surface Elev (cm)	The duration of the experiment (s)	The equation of the fitting line on the curve	Slope of the fitting line (degrees)	R^2
45	78	-0.46 t + 44.22	-24.7	0.9937
50	92	-0.456 t + 48.50	-24.5	0.9943
55	100	-0.453 t + 52.33	-24.4	0.9921

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی‌های آزمایشگاهی در زمینه بررسی و ارزیابی شکست موضعی سد نخاله‌گیر در نزدیکی تکیه‌گاه پرداخته شد. برای این منظور از یک حوضچه بزرگ مقیاس استفاده شد و شکست موضعی سد نخاله‌گیر مورد بررسی قرارگرفت و در رابطه با فرسایش بستر و میزان انتقال رسوب در فرآیند افزایش سطح آب بحث شد. با توجه به اینکه از حوضچه بزرگ مقیاس استفاده شده است نتایج آزمایش ها تحت تاثیر مدل سازی آزمایشگاهی قرار نمی گیرد. در این بخش به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها در زمینه پژوهش‌های آتی بر روی شکست سدهای نخاله‌گیر، براساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش پرداخته خواهد شد.

پس از گشودن دریچه که به منظور شبیه‌سازی شکست موضعی در مدل آزمایشگاهی تعبیه شده است، گودالی در بستر رسوبی درون مخزن در نزدیکی محل شکست ایجاد می‌شود. پس از گذشت مدت زمانی در درون گودال پرش هیدرولیکی مستغرق شکل می‌گیرد و چگونگی خروج آب در پایان آزمایش در مخزن باعث شکل‌گیری شیارهایی در بستر رسوبی می‌شود؛ با توجه به مشاهده‌های شیار در بستر رسوبی در انتهای آزمایش هنگامی که آب کمی در مخزن وجود دارد ایجاد می شود پس می‌توان گفت که حجم مصالح خروجی مربوط به این شیارها توان جابه‌جایی زیادی ندارند و در نزدیکی محل شکست باقی می‌مانند. لذا می‌توان به این نتیجه رسید که با وجود تفاوت در مقدار حجم خروجی مصالح در آزمایش‌های با تراز آب مختلف، عمده این تفاوت مربوط به شیارهای ایجاد شده می‌باشد.

در همه‌ی آزمایش‌ها مشاهده شد که طول حفره آبشستگی در جهت بدنه سد بیشتر از جهت عمود بر بدنه سد می‌باشد که این نسبت در همه آزمایش ها بیش از ۲ برابر می‌باشد.

نسبت طول حفره آبشستگی در جهت بدنه سد به عرض دریچه به‌صورت میانگین برای آزمایش‌ها با تراز های مختلف آب متفاوت می‌باشد که این نسبت در بازه‌ی ۳ تا ۳/۳ متغیر می‌باشد.

طول حفره آبشستگی در جهت عمود بر بدنه سد بیشتر از عرض دریچه شکست می‌باشد. این نسبت به‌صورت میانگین برای آزمایش‌ها با تراز آب مختلف در بازه‌ی ۱/۱ تا ۱/۴ متغیر می‌باشد.

برای به دست آوردن شناخت دقیق تر از شکست سدهای نخاله‌گیر، می توان به بررسی تاثیر دانه بندی مواد نخاله و زباله‌ای، ابعاد و شکل شکست موضعی، بررسی توامان شکست موضعی در چند ناحیه و شکست تدریجی در میزان فرسایش نخاله ها در سدهای نخاله‌گیر پرداخت.

۶- منبع‌ها

Correia dos Santos, R.N., Caldeira, L. & Serra, J. (2012). FMEA of a tailings dam, *Georisk Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, *6*(2), 89-104

Canadian Dam Association (CDA) (2014). Technical Bulletin: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams.

Jing, X., Chen, Y., Xie, D., Williams, D.J., Wu, S., Wang, W. & Yin, T. (2019). The Effect of Grain Size on the Hydrodynamics of Mudflow Surge from a Tailings Dam-Break. *Applied Sciences*, *9*(12), 2474.

Rico, M., Benito, G., Salguero, A.R., Díez-Herrero, A. & Pereira, H.G. (2008). Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context, *Journal of Hazardous Material*, *152*(2), 846-52.

analyses, 87th Annual Meeting of the International Commission on Large Dams, 15p.

World Information Service on Energy (2022). Tailings Dam Safety. https://www.wise-uranium.org/mdaf.html.

Xin, Z., Xiaohu, X. & Kaili, X. (2011). Study on the Risk Assessment of the Tailings Dam Break, *Procedia Engineering*, *26*, 2261-1169.

Zhong, D. & Sun, Y. (2011). Dam break threshold value and risk probability assessment for an earth dam, *Natural Hazards*, 59, 129-147.

Shayan, P. (2023). Experimental study of local failure near the tailings dam abutment, Master Thesis, University of Razi, Kermanshah, 119p. (In Persian)

Souza Junior, T.F.S & Teixeira, S. (2019). Simulation of tailings release in dam break scenarios using physical models, *REM - Int. Eng. J.*, *72*(3), 385-393.

Tailings Dam Breach Working Group. (2017). Tailings Dam Breach Inundation Study, Technical Bulletin, 49p.

Martin, V., Al-Mamun, M. & Small, A. (2019). CDA technical bulletin on tailings dam breach

© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.