

تحلیل سه بعدی فرآیند تخریب فیوز پلاگ خاکی همگن با دبی ثابت در مدل آزمایشگاهی

مصطفی نداشتی گر*^۱، سعید هاشمی حلوائی^۲، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

DOI: 10.22103/nrswe.2023.20955.1024

چکیده

در بحث مدیریت سیلاب، استفاده از فیوز پلاگ‌های خاکی و سیل بندها امر بسیار مهمی بشمار می‌آید. فیوز پلاگ خاکی از روگذری ناگهانی سدها و سیل بندهای موجود در برابر سیل‌های ناگهانی جلوگیری نموده و اجازه تخلیه جریان‌های مازاد را در هنگام سیلاب می‌دهد. در این تحقیق با مدلسازی آزمایشگاهی فیوز پلاگ خاکی همگن با هدف بررسی نحوه تخریب سازه فیوز پلاگ خاکی و چگونگی گسترش شکاف در آن بر اثر روگذری جریان در نتیجه تغییر در ابعاد کانال هادی، به مطالعه نرخ افزایش ارتفاع آب در پشت سازه و تغییر در ارتفاع پرداخته شده است که در مجموع ۳۶ عدد آزمایش انجام و مشخصات تخریب آنها تحلیل شد. تحلیل‌های ۳ بعدی از شکاف فیوز پلاگ خاکی بعد از روگذری آب از آن انجام گرفت که این تحلیل‌ها شامل نرخ گسترش شکاف، برداشت شکل شکاف و نحوه گسترش شکاف می‌باشد. نتایج به دست آمده از تحلیل شکاف نشان داد که فرآیند تخریب فیوز پلاگ در ۳ مرحله انجام می‌گیرد. همچنین مدت زمان شکافتن کامل شکاف بین ۴۰ تا ۵۵ ثانیه در حالت‌های مختلف ثبت شد. نتایج بررسی نرخ بازشدگی شکاف نشان داد که در حدود ثانیه ۲۰ نقطه عطفی در نمودارها مشاهده می‌شود که نشان دهنده کاهش نرخ بازشدگی در مرحله دوم به دلیل فرآیند زیرشویی اطراف کانال هادی است.

واژگان کلیدی: فرآیند سه بعدی تخریب، فیوز پلاگ خاکی، مدل‌سازی آزمایشگاهی، مصالح غیر چسبنده.

*^۱ - نویسنده مسئول و فارغ التحصیل دکتری مهندسی عمران - آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. Email: mostafa.neshastehgar@modares.ac.ir

^۲ - کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۳ - استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

مقدمه

گرچه شکست سد به ندرت اتفاق می‌افتد، اما خطرات ناشی از آن به هیچ عنوان قابل چشم پوشی نیست، خطری که ممکن است جان تعداد زیادی از انسان‌ها را به مخاطره بیندازد و خسارات مالی فراوانی را به بار آورد. شکست سد در اثر روگذری جریان آب در هر نوع سدی می‌تواند اتفاق بیفتد، ولی این رخداد در سدهای خاکی به علت شسته شدن و فرسایش سریع مصالح سد به مراتب محتمل‌تر است. در این راستا فیوز پلاگ^۱ به عنوان شیر اطمینان برای محافظت از سد در برابر خرابی‌های فاجعه بار ناشی از روگذری جریان آب بکار می‌رود (Pugh 1985).

فیوز پلاگ به عنوان سرریز کمکی یا سرریز اضطراری در سدها ایفای نقش می‌کند. افزایش روز افزون سیلاب‌ها و خسارت‌های گاه جبران ناپذیر آن، باعث شده که کارشناسان و طراحان سد بررسی بیشتری را درباره اقتصادی‌ترین روش ساخت سرریز بعمل آورند. بنابراین بایستی بطریقی میزان ظرفیت آبگذری سرریزها را افزایش داد. یکی از روش‌ها استفاده از یک سرریز کمکی در کنار سرریز اصلی است. فیوز پلاگ می‌تواند به عنوان یک سرریز کمکی یا سرریز اضطراری بکار رود که غالباً گزینه‌ای اقتصادی می‌باشد. همچنین استفاده از فیوز پلاگ در تخلیه سیلاب‌های غیرعادی، طرحی مطمئن بوده و باعث صرفه جویی در هزینه‌های گزاف سرریزهای بتنی می‌شود (Pugh 1985). لذا با توجه به شرایط سد، از سرریز اصلی برای تخلیه سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا (سیلاب طرح) و از سرریز کمکی یا اضطراری برای تخلیه سیلاب‌های بالاتر (بالاتر از سیلاب طرح) استفاده می‌شود.

فیوز پلاگ به نام‌های خاکریز فرسایشی^۲ و خاکریز شسته شونده نیز خوانده می‌شود. عملکرد فیوز پلاگ‌ها همانطور که از نام آنها مشخص است بدین ترتیب است که هنگام وقوع سیلاب‌های غیرعادی، آب از خاکریز سرریز کرده و شروع به فرسایش در خاکریز می‌نماید. خاکریز شسته شده و در نتیجه مسیر برای جریان آب باز می‌شود. وقتی که سیلاب دفع گردید، خاکریز مجدداً بنا می‌گردد (Tinney)

(and Hsu 1961). عملکرد فیوز پلاگ کاملاً خودکار بوده و نیازی به اپراتور ندارد. فیوز پلاگ در مواقع غیربهره‌برداری بایستی پایدار بوده و ضرایب اطمینانی مساوی سدهای خاکی داشته باشد.

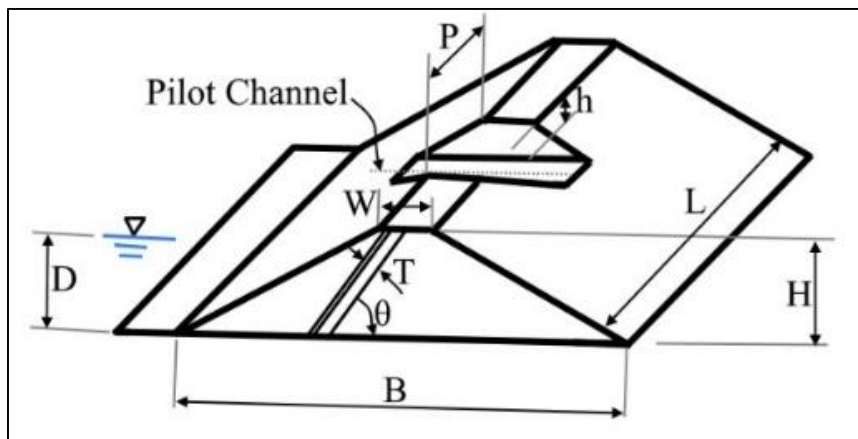
ساختمان فیوز پلاگ را به طور کلی می‌توان به دو بخش بدنه خاکریز و کانال هادی^۳ تقسیم‌بندی کرد. فیوز پلاگ‌ها با همان جزئیات و بخش‌هایی که در اغلب سدهای خاکی یا سنگریزه‌ای یافت می‌شود، طراحی می‌گردند. فیوز پلاگ از نظر مصالح تشکیل دهنده بدنه به دو نوع همگن و غیر همگن تقسیم بندی می‌شود. مصالح هسته (موجود در خاکریزهای غیرهمگن) نیز بطور طبیعی سیلت یا رس می‌باشد.

شکل (۱) مشخصات هندسی فیوز پلاگ را نشان می‌دهد که در آن D ارتفاع جریان در مخزن روی پی فیوز پلاگ، H ارتفاع فیوز پلاگ، L طول فیوز پلاگ، P عرض کانال هادی در طول فیوز پلاگ، T ضخامت هسته‌رسی، h عمق کانال هادی، W عرض تاج فیوز پلاگ، θ زاویه هسته‌رسی با سطح افق و B عرض تحتانی فیوز پلاگ می‌باشد (Pugh 1985). با استفاده از مصالح شسته شونده در کانال هادی، پس از روگذری آب، تخریب به سرعت رخ میدهد. بقیه سازه به صورت جانبی شسته شده و بالازدگی از سازه رخ نمیدهد. خرابی خودکار سازه مطلوب است، به دلیل آنکه اگر وابسته به عوامل مکانیکی و یا انسانی باشد، در صورت خطا می‌تواند منجر به خسارات فراوانی شود. در تحقیق حاضر از نتایج تحقیقات گذشته در زمینه نحوه عملکرد و تخریب فیوز پلاگ، روگذری جریان آب از خاکریز و سد خاکی استفاده شده است. از جمله تحقیقاتی که در زمینه فیوز پلاگ دارای هسته رسی بعمل آمده است، تحقیقی است که توسط (Tinney and Hsu 1961) به منظور مدل کردن سرریز پروژه آکسبو صورت گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی ایشان به دو منظور تشخیص مکانیسم مراحل مختلف شسته شدن خاکریز و تعیین روابط تشابه برای سرعت شسته شدن خاکریزها انجام گرفته است.

^۳ - Pilot channel

^۱ - Fuse plug

^۲ - Erodible Embankment



شکل (۱): مشخصات هندسی فیوز پلاگ (Pugh 1985)

عرض و عمق کانال هادی مورد آزمایش قرار گرفت. نتیجه این مطالعه ارائه هیدروگراف و روابطی بی بعد برای دبی خروجی از خاکریز بود و همچنین برای کانال هادی، عمق و عرض بهینه ارائه شد. همچنین (Neshastehgar et al. 2020) در مطالعه‌ای به بررسی تاثیر اندازه ذرات تشکیل دهنده بدنه فیوز پلاگ خاکی بر چگونگی شسته شدن آن پرداختند که طبق نتایج به دست آمده، در d^* (نسبت قطر متوسط ذرات به ارتفاع فیوز پلاگ) برابر با $0/004$ بیشترین مقدار نرخ متوسط تخریب نسبت به دو d^* دیگر یعنی $0/00133$ و $0/006$ رخ داد. (Rajabzadeh et al. 2023) به معرفی چارچوبی برای اندازه‌گیری ریسک روگذری جریان در سدهایی با سرریز دوگانه که سرریز دوم یک فیوز پلاگ خاکی می‌باشد، پرداخته‌اند. طبق نتایج به دست آمده علیرغم روندیابی سیلاب در مخزن سد، تخریب فیوز کمک قابل توجهی در کاهش پیک سیلاب دارد.

در تحقیق حاضر سعی شده است به فرآیند سه بعدی تخریب فیوز پلاگ همگن تحت دبی ثابت پرداخته شود. در اکثر کارهای قبلی تراز آب در زمان تخریب ثابت نگه داشته شده است. در این سری از آزمایش‌ها فرض بر آن است که آب پشت سازه با نرخ ثابتی افزایش می‌یابد و بر اثر آن دبی ورودی در طول فرآیند تخریب ثابت فرض شده است. با استناد به تحقیقات (Schmocker et al. 2013) و (Neshastehgar et al. 2017, 2018, 2020)، فیوز پلاگ

(Mohamed et al. 1999) تغییرات عرضی شکاف را نتیجه ترکیبی از فرسایش ممتد و تخریب ناگهانی ناشی از ریزش مصالح از شیب جانبی عنوان کردند و پروفیل حاصله را سهموی یا دوزنقه‌ای بیان کردند. (Schmocker et al. 2013) مطالعه مدل هیدرولیکی فیوز پلاگ کانال هنگنک^۱ سوئیس را انجام دادند. دو طرح مختلف برای این فیوز پلاگ مطرح و مورد آزمایش قرار گرفت. طرح اول دارای هسته رسی مورب بوده و طرح دوم با بدنه همگن ماسه‌ای می‌باشد که در نهایت طرح دوم برای اجرا انتخاب شد. (Asghari et al. 2015) به مدلسازی آزمایشگاهی فرآیند خرابی خاکریز ناشی از روگذری جریان در حالت همگن بدون چسبندگی و نامتراکم پرداختند و رابطه‌ای برای انتقال بار بستر ارائه کردند. همچنین در مطالعه‌ای دیگر (Asghari et al. 2017) تاثیر تراکم مصالح خاکریز روی تخریب عمودی ناشی از روگذری آن را مورد مطالعه قرار دادند و دو فرمول بی‌بعد برای تغییرات ارتفاع تاج و طول کف خاکریز با زمان ارائه دادند.

(Neshastehgar et al. 2017) تاثیر عرض کانال هادی فیوز پلاگ بر روی نحوه تخریب، نرخ شستشوی مصالح خاکریز و هیدروگراف خروجی حاصل از روگذری جریان را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه دیگری نیز توسط (Neshastehgar et al. 2018) انجام شد که در این مطالعه هیدروگراف خروجی حاصل از روگذری جریان ناشی از تغییر

^۱- Hangneck Canal

مواد و روش ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه تربیت مدرس تهران، در یک فلوم به طول ۶ متر، عرض ۴۵ سانتیمتر و ارتفاع ۴۵ سانتیمتر انجام شد. این فلوم دارای دیواره‌های شیشه‌ای و کف تخت می‌باشد. بنا بر طرح در نظر گرفته شده برای فیوز پلاگ، عرض فلوم به ۲۰ سانتی متر کاهش پیدا کرد. همچنین در این محدوده ارتفاع، کف فلوم نیز به علت جلوگیری از تاثیر پذیرفتن نحوه تخریب خاکریز از پایاب^۱ به میزان ۱۵ سانتیمتر بالا آورده شده است. مجموعه آزمایشگاهی شامل یک مخزن در بالادست و یک مخزن در پایین دست فلوم می‌باشد که آب به صورت یک چرخه بسته از مخزن پایین دست به مخزن بالادست توسط پمپی با ظرفیت بیشینه ۶۰ لیتر در ثانیه پمپ می‌شود. بعد از ورود جریان به مخزن بالادست، آرام کننده جریان قرار دارد که شامل توری با منافذ دایره‌ای به قطر ۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین برای آرام‌سازی بیشتر و جلوگیری از تلاطم سطحی از صفحات یونولیت بر روی سطح آب در مخزن بالادست استفاده شده است. بعد از آن آب وارد فلوم شده و بعد از روگذری از خاکریز خود را به مخزن پایین دست می‌رساند. به منظور اندازه‌گیری دبی روگذری از فیوز پلاگ، مخزن پایین دست نیز به دو قسمت تقسیم شد تا بتوان با تعبیه سرریز ترکیبی لبه تیز این دبی را اندازه‌گیری کرد. نمای شماتیک مجموعه آزمایشگاهی در شکل (۲) نشان داده شده است. فیوز پلاگ مورد آزمایش در این مطالعه از نوع همگن ماسه‌ای می‌باشد. شرایط انتخاب هندسه خاکریز و اندازه مصالح بکار رفته در بدنه فیوز پلاگ، یکی حفظ پایداری سازه قبل از روگذری جریان بر اثر پدیده رگاب و دیگری تخریب سریع خاکریز پس از روگذری جریان می‌باشد که در این راستا آزمایش-های مقدماتی طراحی و انجام شد. مصالح انتخابی، ماسه همگن دارای دانه‌بندی یکنواخت با d_{50} برابر ۰/۶ میلی‌متر، σ_g برابر ۱/۲۹ و جرم مخصوص برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد که نمودار دانه‌بندی آن و مصالح در حالت خشک در شکل (۳) ارائه شده است.

همگن با دانه بندی ماسه‌ای بین ۰/۳ تا ۰/۹ میلی‌متر عملکرد مناسبی از خود نشان داده است و به دلیل آن که هزینه و سادگی ساخت آنها در مقیاس بزرگ بسیار کمتر از مدل شامل هسته رسی آن است، در این تحقیق از فیوز پلاگ همگن استفاده شده است. در انجام آزمایش‌ها فرضیاتی در نظر گرفته شده است که به شرح زیر هستند.

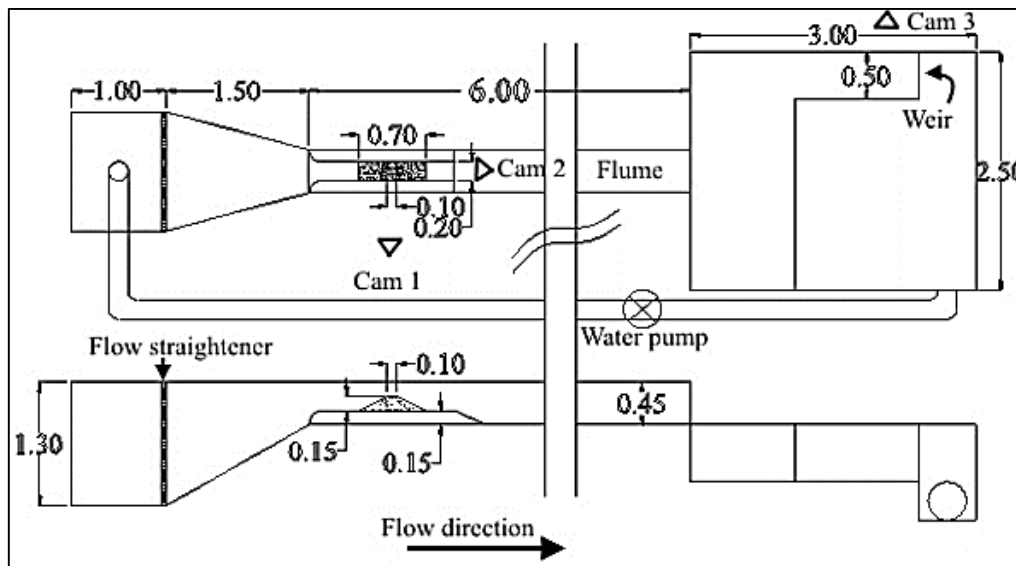
۱. سیلاب ورودی با دبی ثابتی وارد مخزن سد می‌شود که این امر باعث افزایش آب با نرخ ثابت پشت سازه می‌شود.
۲. محل اتصال فیوز پلاگ به جداره‌ها و کف، صاف و صیقلی هستند.

۳. مخزن وسیع فرض شده و سرعت در داخل مخزن دور از فیوز پلاگ صفر است. در حالت واقعی به دلیل بزرگ بودن مخزن سد، این امر اتفاق می‌افتد و فیوز پلاگ تنها بر اثر افزایش نرخ آب تخریب می‌شود.

مطالعات گذشته مشخص کرد که مطالعات انجام شده بر روی فیوز پلاگ بیشتر بر روی فیوز پلاگ غیر همگن بوده است. علاوه بر آن، بررسی تاثیر ارتفاع فیوز پلاگ همگن بر نحوه شسته شدن آن و گسترش شکاف بعد از روگذری تا کنون بررسی نشده است. لذا هدف از این تحقیق آزمایشگاهی، بررسی نحوه تخریب سازه فیوز پلاگ خاکی و چگونگی گسترش شکاف در آن بر اثر روگذری جریان در نتیجه تغییر در ابعاد کانال هادی، نرخ افزایش ارتفاع آب در پشت سازه و تغییر در ارتفاع می باشد که در مجموع ۳۶ عدد آزمایش انجام و مشخصات تخریب آنها تحلیل شد. به شکل خلاصه نوآوری تحقیق حاضر به شرح ذیل می باشد:

۱. بررسی نرخ بازشدگی شکاف در فرآیند تخریب فیوز پلاگ همگن.
۲. تاثیر ارتفاع فیوز پلاگ بر تحلیل‌های ۳ بعدی فرآیند تخریب فیوز پلاگ.
۳. بررسی فیوز پلاگ با ۱۲ هندسه متفاوت (ترکیب عمق و ارتفاع کانال هادی و ارتفاع سازه فیوز پلاگ).
- ۴- بررسی نرخ افزایش ارتفاع آب در پشت سازه بر نحوه تخریب آن.

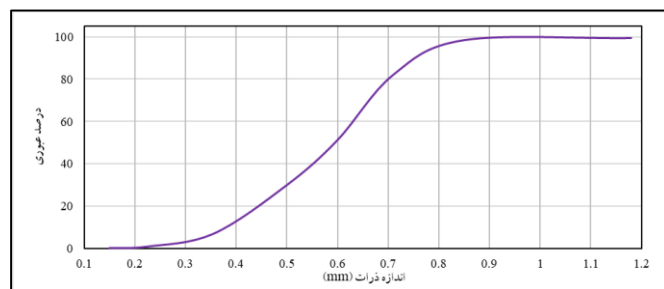
^۱- Tailwater



شکل (۲): نمای شماتیک مجموعه آزمایشگاهی (ابعاد به متر می‌باشند)



ب



الف

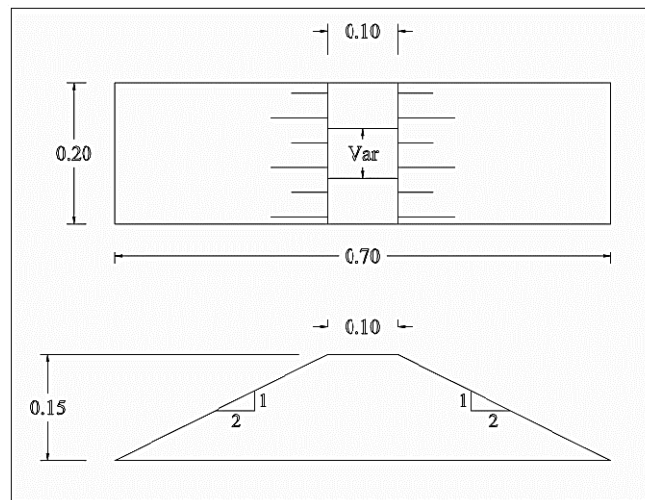
شکل (۳): الف: نمودار دانه بندی مصالح استفاده شده در بدنه خاکریز - ب: تصویر مصالح در حالت خشک در آزمایش دانه بندی

سه عرض ۳، ۵ و ۷ سانتیمتر و هریک با عمق های ۱ و ۲ سانتیمتر برای کانال هادی (با فرض رعایت تناسب با ارتفاع سازه و شبیه سازی آن با یک سازه واقعی) که در مرکز تاج خاکریز قرار دارد، در نظر گرفته شد. وجود این کانال به جریان دیکته می‌کند تا در ابتدا از این محل عبور کند و شکاف از این مکان ایجاد شده و گسترش یابد. آب به آرامی وارد مخزن بالادست می‌گردد و در حین عبور از آرام کننده جریان، مخزن را پر کرده و در پشت خاکریز شروع به افزایش ارتفاع می‌کند. سه نرخ افزایش آب پشت سازه (۳، ۱/۵ و ۰/۵ سانتی متر بر دقیقه) برای سری اول آزمایش‌ها برای شبیه سازی اثر دبی سیلاب ورودی به مخزن با اندازه‌های مختلف انتخاب شد که بنا بر ارتفاع ثابت فیوز پلاگ در این

مطابق شکل (۴) مدل فیوز پلاگ دارای مقطعی دوزنقه شکل به طول ۲۰ سانتیمتر، ارتفاع ۱۵ سانتیمتر و عرض ۱۰ سانتیمتر در تاج و ۷۰ سانتیمتر در کف و شیب جانبی افقی به عمودی ۲ به ۱ است که در ابتدای ورودی فلوم و نزدیک به مخزن بالادست ساخته شده است. در تمامی آزمایش‌ها در ابتدا مصالح در سه لایه ۵ سانتیمتری با رطوبت بهینه ۵ درصد با وزن مشخص در حجم مشخص مورد تراکم قرار می‌گیرند. بعد از رسیدن به میزان تراکم مطلوب، شیب‌های بالادست و پایین دست و کانال هادی برش داده شده و هندسه خاکریز تکمیل می‌گردد. چگالی خشک مصالح خاکریز ساخته شده پس از تراکم برابر با ۱۵۷۶ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

که فرآیند سه بعدی تخریب فیوز پلاگ را از زمان روگذری (نقطه شروع) تا انتهای فرآیند ثبت می‌کند. استخراج داده‌ها از فیلم‌ها با استفاده از ذخیره تصاویر در فریم‌های زمانی مورد نظر و رقومی سازی آنها با دقتی برابر با ± 1 mm انجام گرفت. هر آزمایش حداقل دو بار برای تایید تکرارپذیری انجام شد که آزمایش‌ها تکرار شده با شرایط اولیه یکسان، در یک تیپ آزمایش قرار گرفتند.

آزمایش‌ها که برابر ۱۵ سانتیمتر است؛ نرخ افزایش آب برابر ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۳ ارتفاع فیوز پلاگ در دقیقه می‌باشد (جدول ۱). در این سری از آزمایش‌ها دبی در طول انجام آزمایش ثابت نگه داشته شده است و شروع فرآیند تخریب از زمانی است که روگذری جریان از شیب پایین دست آغاز می‌گردد. در طول مدت آزمایش از یک دوربین تصویربرداری با کیفیت^۱ FHD با وضوح تصویر ۱۹۲۰ در ۱۰۸۰ پیکسل برای ثبت تصاویر نحوه تخریب فیوز پلاگ استفاده شده است. این دوربین در بالای فلوم روبروی فیوز پلاگ نصب شده است



شکل (۴): هندسه مدل فیوز پلاگ مورد استفاده در آزمایش‌ها (ابعاد به متر می‌باشند)

جدول (۱): مشخصات فیوز پلاگ در آزمایش‌های سری اول

F	E	D	C	B	A	تیپ آزمایش
۳	۳	۵	۵	۷	۷	عرض کانال هادی (cm)
۲	۱	۲	۱	۲	۱	عمق کانال هادی (cm)
۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۳۵	$\alpha=P/L$
۰/۱۳	۰/۰۶۷	۰/۱۳	۰/۰۶۷	۰/۱۳	۰/۰۶۷	$\beta=h/H$

P: عرض کانال هادی، h: عمق کانال هادی، L: عرض سازه، H: ارتفاع سازه

جدول (۲): مشخصات فیوز پلاگ در آزمایش‌های سری دوم

F	E	D	C	B	A	تیپ آزمایش
۱۱/۲۵	۱۱/۲۵	۱۱/۲۵	۲۲/۵	۲۲/۵	۲۲/۵	ارتفاع سازه
۳	۵	۷	۳	۵	۷	عرض کانال هادی (cm)
۱/۵	۱/۵	۱/۵	۳	۳	۳	عمق کانال هادی (cm)
۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۳۵	$\alpha=P/L$
۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	$\beta=h/H$

^۱ - Full High-Definition

نتایج و بحث

تکرار پذیری

برای اطمینان از قابل اعتماد بودن اندازه‌گیری‌های انجام شده، تکرارپذیری آزمایش‌ها با بررسی پروفیل آب و پروفیل خاکریز کنترل شد. داده‌های اندازه‌گیری شده حداقل دو بار در هر آزمایش تحت شرایط یکسان و برای کاهش عدم قطعیت ثبت شد. نتایج با یکدیگر اختلافی کمتر از ۵ درصد داشتند که با توجه به انطباق خوب پروفیل آب، نتایج تکرارپذیری قابل قبول تلقی می‌شوند.

تکامل تدریجی شکل شکاف

پس از روشن کردن پمپ و بالا آمدن آب پشت سازه با نرخ افزایشی ثابت، تراز آب به تراز کانال هادی که پایین‌تر از تراز تاج فیوز پلاگ است (در تیپ‌های A-C-E ۱ سانتیمتر و در تیپ‌های B-D-F ۲ سانتیمتر پایین‌تر) می‌رسد. با توجه به مطالعه (Schmocker and Hager 2009) مکانیزم شکاف در خاکریز با روگذری جریان به دو دسته دوبعدی^۱ و سه بعدی^۲ قابل طبقه‌بندی است. مکانیزم سه بعدی شامل فرسایش جانبی^۳ و عمودی^۴ است، در حالی که مکانیزم دو بعدی تنها فرسایش عمودی^۴ را شامل می‌شود. در این مطالعه به مکانیزم سه بعدی شکاف که با شروع روگذری آغاز می‌شود، پرداخته می‌شود. در کلیه آزمایش‌ها این مکانیزم به طور میانگین ۴۰ ثانیه طول می‌کشد و بعد از آن تا آخر آزمایش فرآیند ۲ بعدی مشاهده می‌شود.

بعد از شروع روگذری به دلیل عبور کم آب از کانال هادی هد آب کمی از ارتفاع فیوز پلاگ بالاتر می‌رود و همین بالا زدگی سرعت شستشوی مصالح را زیاد می‌کند. بعد از حدود ۱۵ ثانیه بعد از روگذری، سرعت شستشوی مصالح به بیشینه خود می‌رسد. تیپ‌های آزمایش‌ها از ابتدا تا پایان مکانیزم سه بعدی و رسیدن شکاف به دیواره‌های فلوم به چهار مرحله با فواصل زمانی ۱۰ ثانیه در شکل (۵) نشان داده شده است و در تمامی تیپ‌ها نرخ افزایش تراز آب ۳ سانتیمتر بر دقیقه است.

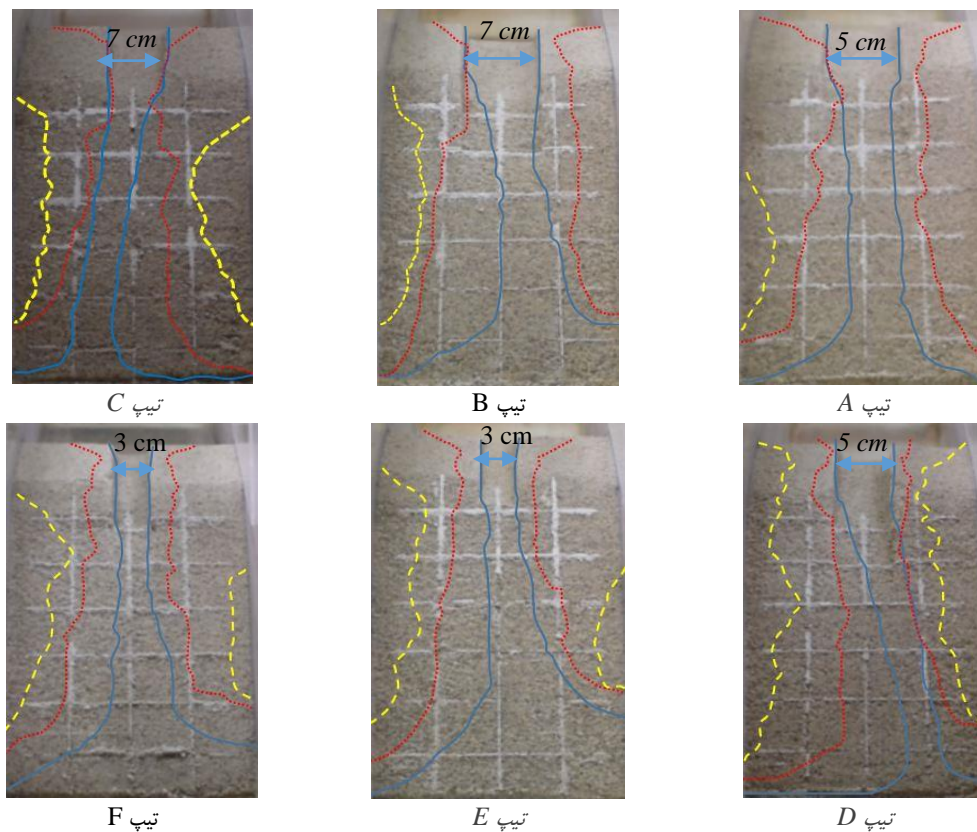
نکته قابل توجه در این باره، نرخ بازشدگی در تیپ‌های مختلف است. هر چه مقدار α بیشتر باشد سرعت شستشو بیشتر است. با افزایش α مقدار آبگذری فیوز پلاگ بیشتر می‌شود و این امر باعث افزایش نرخ بازشدگی مصالح می‌شود. تاثیر توسعه شکاف در تیپ‌های β با یکسان در بزرگترین مقدار α ، بیشترین و در مقدار α میانی، کمترین می‌باشد. علت این اختلاف را می‌توان کاهش مقدار α بیشتر از حدی که سبب کاهش میزان عرض لازم برای خروج جریان روگذر شده می‌شود، دانست و نتیجه آن افزایش تراز روگذری و سرعت شستشوی بیشتر می‌باشد. در شکل (۶) نتایج سری آزمایش تیپ F با نرخ افزایش ۳ سانتیمتر بر دقیقه برای نشان دادن توضیحات در گام‌های ۱۰ ثانیه نشان شده است.

سرعت نرخ بازشدگی

برای بررسی نرخ ایجاد شکاف در سازه در تیپ‌های مختلف متغیری به نام نرخ بازشدگی شکاف که عبارت است از عرض شکاف بعد از روگذری جریان (L) به عرض شکاف قبل از روگذری جریان (L_0)، تعریف شده است. به میانگین فاصله بین منحنی‌های هم‌تراز در راستای ارتفاع سازه، میزان بازشدگی شکاف گفته می‌شود. برای به دست آوردن این مقدار فیوز پلاگ در ارتفاع به بخش‌های ۲/۵ سانتیمتری تقسیم شد و مقدار باز شدگی در هر ارتفاع محاسبه گردید. در انتها از این مقادیر میانگین گرفته شد و مقدار میانگین به عنوان بازشدگی سازه در آن لحظه خاص گزارش شد. در شکل (۷) تاثیر میزان نرخ‌های متفاوت بالا آمدن آب بر نرخ باز شدگی نسبت به حالت اولیه در تیپ B نشان داده شده است.

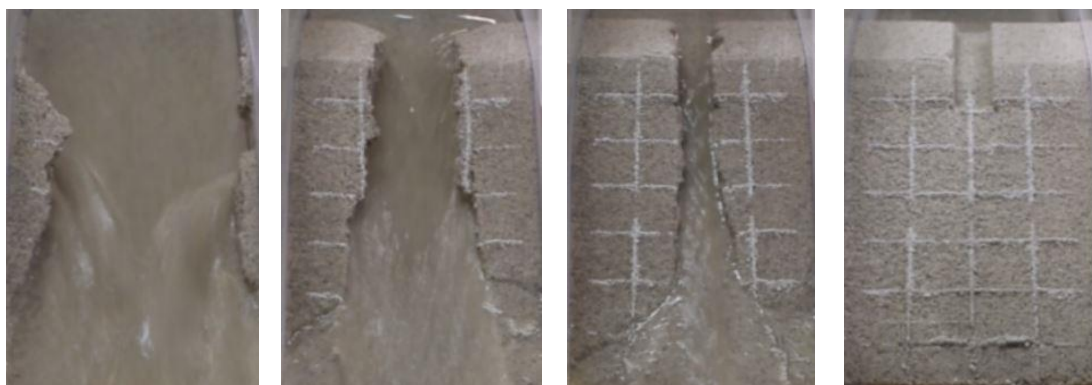
همانطور که در شکل (۷) قابل مشاهده است، با افزایش نرخ بالا آمدگی آب پشت سازه مدت زمان فرآیند سه بعدی کاهش می‌یابد و سازه زودتر شسته می‌شود. با افزایش نرخ بالا آمدگی و به تبع آن افزایش دبی ورودی زمان فرآیند سه بعدی از ۶۵ ثانیه به ۳۵ ثانیه کاهش یافته است.

^۲ - Lateral^۴ - Vertical^۱ - Plane^۲ - Spatial



— شکل تخریب پس از ۱۰ ثانیه — شکل تخریب پس از ۲۰ ثانیه — شکل تخریب پس از ۳۰ ثانیه

شکل (۵): شکل شکاف ایجاد شده برای تیپ‌های A تا F از ابتدای آزمایش تا پایان مکانیزم سه بعدی



۳۰ ثانیه پس از روگذری

۲۰ ثانیه پس از روگذری

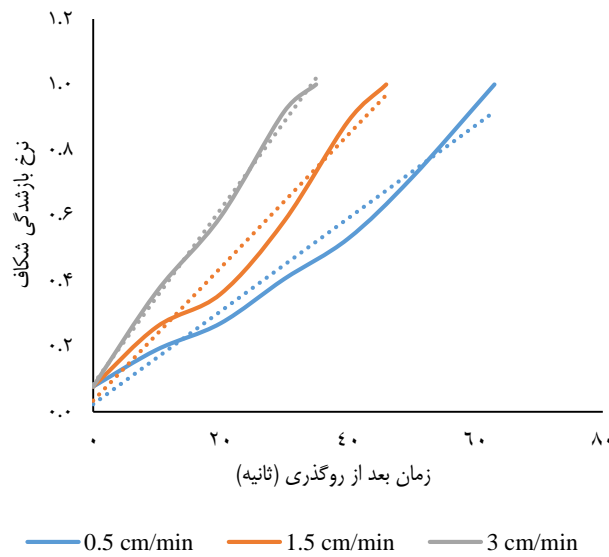
۱۰ ثانیه پس از روگذری

قبل از روگذری

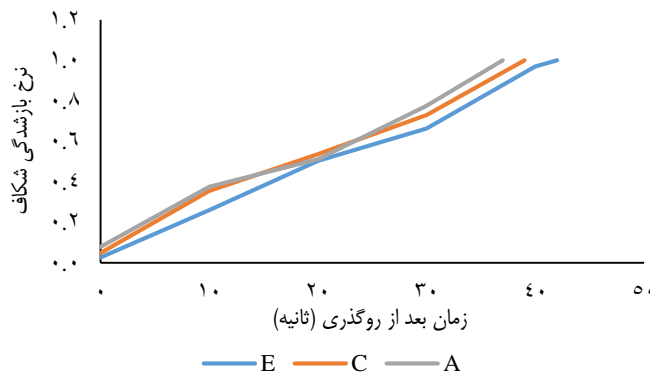
شکل (۶): شکل شکاف ایجاد شده برای تیپ F از ابتدای آزمایش تا پایان مکانیزم سه بعدی

۱/۵ سانتیمتر در دقیقه با هم مقایسه شده‌اند و نتایج در شکل (۸) آورده شده است.

مقدار شیب میانگین نمودار از ۰/۰۱۴ به ۰/۰۲۶ (s^{-1}) افزایش می‌یابد و به تبع آن نرخ شستشوی مصالح افزایش می‌یابد. برای بررسی تاثیر عرض کانال هادی بر گسترش شکاف فیوز پلاگ، تیپ‌های A, C, E با نرخ افزایش آب



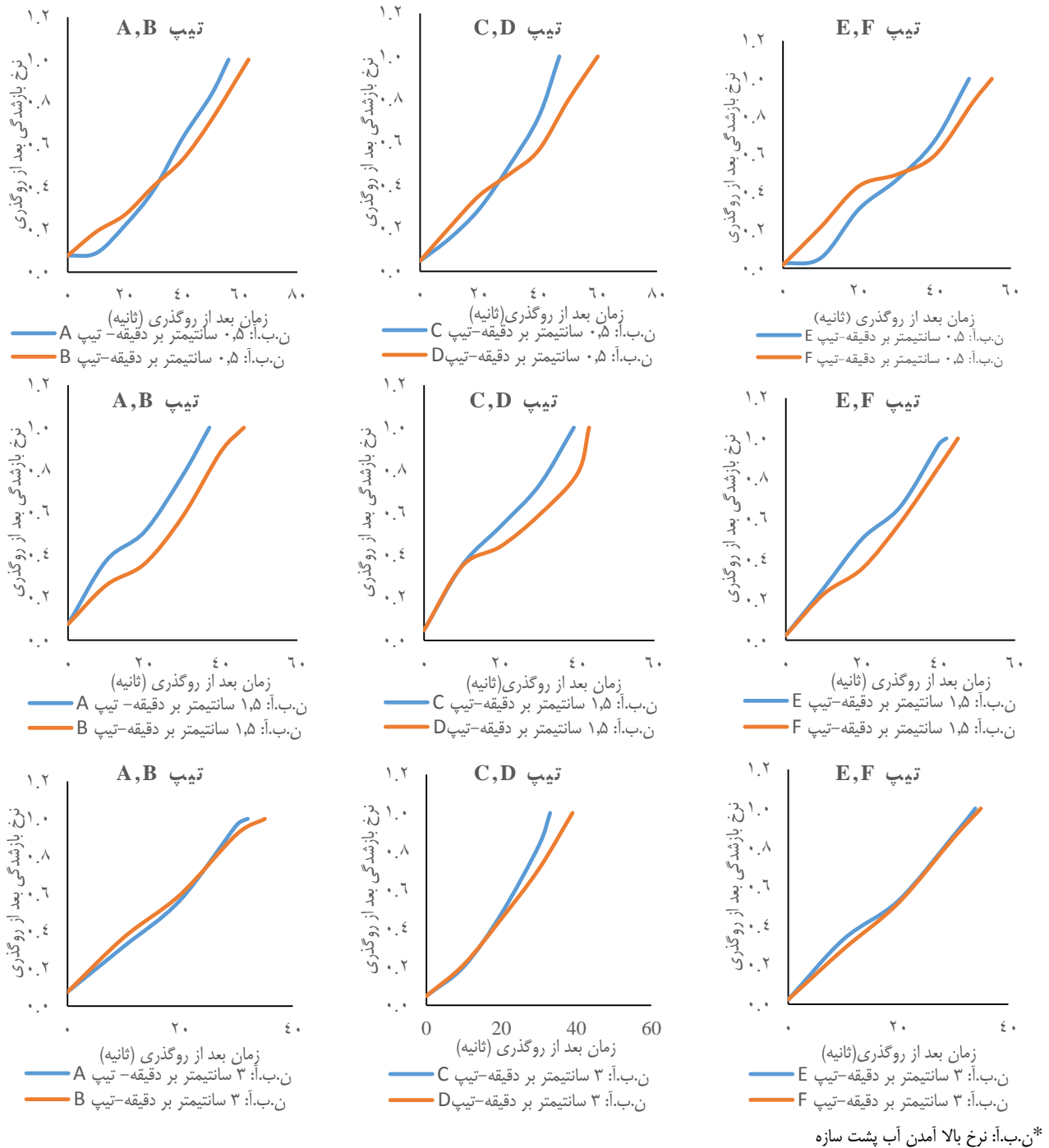
شکل (۷): تاثیر نرخ افزایش تراز آب بر نرخ بازشدگی



شکل (۸): تاثیر عرض کانال هادی بر نرخ بازشدگی شکاف فیوز پلاگ

سرعت پخش شکاف در سطح فیوز پلاگ بیشتر می‌شود. افزایش عرض کانال هادی از ۳ به ۷ سانتیمتر مدت زمان فرآیند تخریب سه بعدی را از ۴۲ به ۳۷ ثانیه کاهش می‌دهد. سرعت پخش شکاف در سطح فیوز پلاگ بیشتر می‌شود. در شکل (۹) که نرخ بازشدگی در تمامی حالات آورده شده است؛ نتایج زیر قابل مشاهده است. در تمامی حالات با افزایش عمق کانال هادی زمان بازشدگی کامل خاکریز بین ۵ تا ۱۵ درصد افزایش یافته است. دلیل آن پایین‌تر بودن هد آب و کاهش نرخ فرسایش افقی و قائم سازه با افزایش عمق کانال هادی است.

آب با عبور از کانال هادی روی شیب پایین دست خاکریز به سمت پایین سرازیر می‌شود. با توجه به اینکه کانال هادی در مرکز خاکریز قرار دارد، شروع فرسایش معمولاً از ناحیه وسط خاکریز اتفاق می‌افتد. در ابتدای شروع روگذری جریان و تا حدوداً ۵ ثانیه بعد از آن، با توجه به دبی کم آب روگذر شده، فرسایش با غلظت بالا انجام می‌شود. بگونه‌ای که حرکت توده‌ای از خاک اشباع را می‌توان دید و این توده با توجه به غلظت بالای ماسه در پنجه پایین خاکریز رسوب می‌کند. این ته نشینی در عرض کانال، در انتهای شیب پایین دست گسترش می‌یابد و آب از روی این توده ته نشین شده عبور می‌کند. هر چه عرض کانال هادی بیشتر باشد،



شکل (۹): نرخ بازشدگی شکاف بعد از روگذری جریان (L/L0) در آزمایش‌های سری اول

با افزایش نرخ آب ورودی از ۰/۵ به ۱/۵ سانتیمتر بر دقیقه، نرخ بازشدگی در تیپ‌های A و B به میزان ۳۵٪ افزایش پیدا کرده است. نرخ بازشدگی در تیپ‌های C و D به میزان ۱۸٪ و در تیپ‌های E و F ۱۱٪ افزایش یافته است.

با افزایش نرخ آب پشت سازه تاثیر عمق کانال هادی بر نرخ بازشدگی کاهش یافته است. با کاهش عرض کانال هادی لازم برای بازشدگی کامل سازه افزایش پیدا کرده است. دلیل آن کم بودن دبی خروجی از کانال هادی و به تبع آن کم بودن تنش برشی در لایه رویی سازه است.

بیشتری اتفاق افتاد. این فرسایش تا حدود ۱۵ ثانیه پس از روگذری و بیشتر به صورت عمودی در حال انجام بوده است. فرسایش‌های جانبی نیز در طول این مدت اتفاق افتاده است، ولی بیشتر این فرسایش‌ها به صورت زیرشویی بوده و به همین علت می‌توان شاهد تکه‌های آبکند و ریزش آنها داخل شکاف، در لبه شکاف، مخصوصاً در ناحیه یک سوم پایینی شیب پایین دست بود. از این لحظه (ثانیه ۱۵ پس از روگذری) تا انتهای مکانیزم سه بعدی، تکه‌های آبکند با ابعاد بزرگتر به داخل شکاف سقوط کرده‌اند.

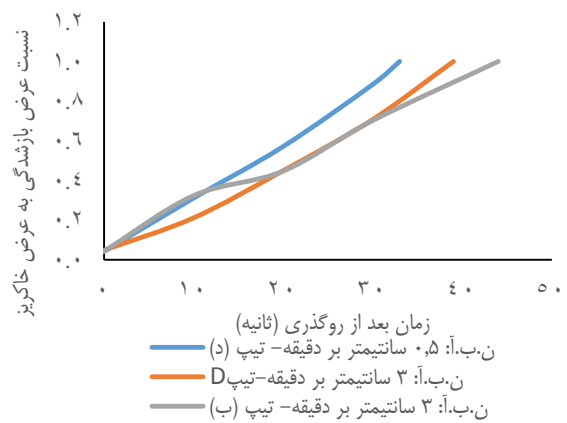
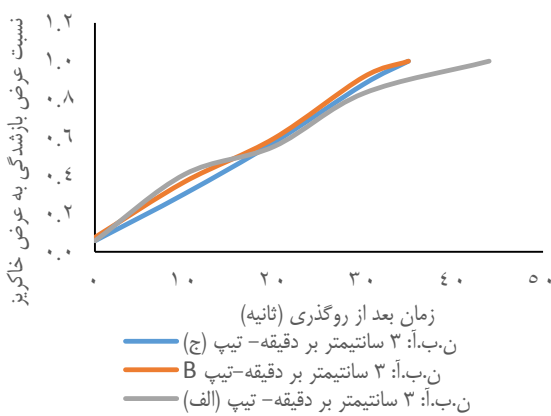
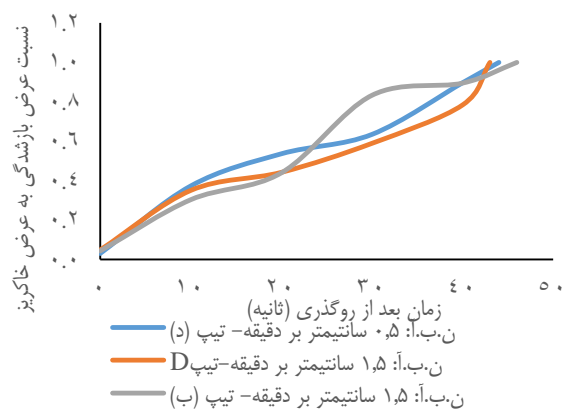
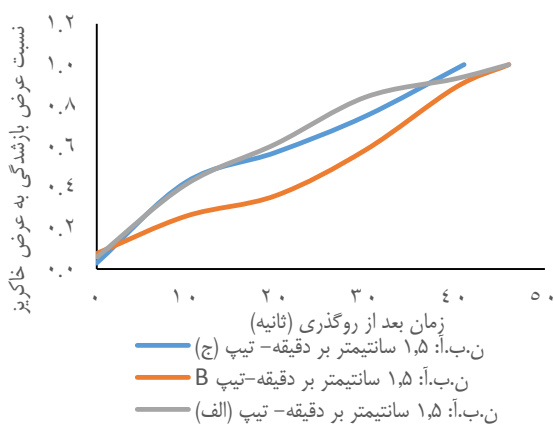
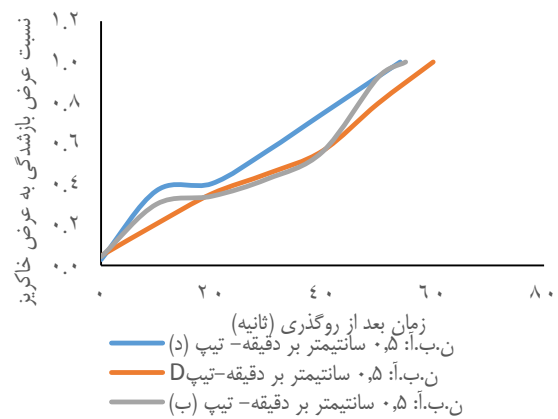
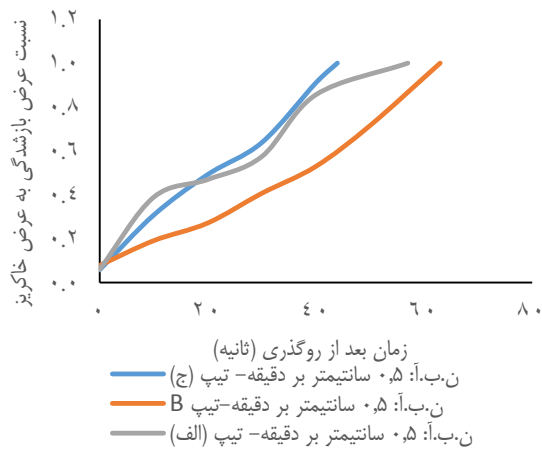
بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش عرض، مقدار آبگذری فیوز پلاگ بیشتر می‌شود و این امر باعث افزایش نرخ شستشوی مصالح می‌شود. همچنین در تمامی حالات با افزایش عمق کانال هادی زمان بازشدگی کامل خاکریز بین ۵ تا ۱۵ درصد افزایش یافته است. افزایش نرخ آب ورودی به کانال منجر به افزایش نرخ بازشدگی می‌گردد، به گونه ای که افزایش نرخ آب ورودی از ۰/۵ به ۱/۵ سانتیمتر بر دقیقه در تیپ‌های A و B دلیل افزایش ۳۵ درصدی نرخ بازشدگی شکاف می‌باشد. در تیپ‌های C و D ۱۸٪ و در تیپ‌های E و F به میزان ۱۱٪ نرخ بازشدگی شکاف افزایش یافته است. برای مقایسه نتایج مربوط به گسترش شکاف در سری اول و دوم آزمایش‌ها، نرخ بازشدگی در تیپ‌های (ج-B-الف) و (د-D-ب) با یکدیگر مقایسه شده‌اند و نتایج آن در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰، در آزمایش‌ها با نرخ‌های متفاوت بالا آمدن آب، واکنش فیوز پلاگ‌ها در تخریب ۳ بعدی متفاوت خواهد بود. در آزمایش‌ها با نرخ بالا آمدن آب برابر ۰/۵ سانتیمتر بر دقیقه، شکل بازشدگی تیپ‌های (ج) و B حالت خطی به خود گرفته‌اند، در صورتی که شکل بازشدگی تیپ (الف) به صورت منحنی درجه سوم و دارای یک نقطه عطف در حدود ثانیه ۲۰ می‌باشد.

این نقطه عطف مربوط به مرحله دوم بازشدگی است و نشان دهنده کاهش نرخ بازشدگی در مرحله دوم فرآیند می‌باشد. با افزایش نرخ بالا آمدن آب پشت سازه، نمودارهای بازشدگی ۳ تیپ به یکدیگر شبیه می‌شوند.

به دلیل آنکه تمامی آزمایش‌ها در سری دوم با $\beta=0.13$ صورت گرفته است، تیپ‌هایی در سری اول قابل مقایسه با سری دوم هستند که با $\beta=0.13$ صورت گرفته باشند (تیپ‌های B و D و F). برای مقایسه نتایج مربوط به گسترش شکاف در سری اول و دوم آزمایش‌ها، نرخ بازشدگی در تیپ‌های (ج-B-الف) و (د-D-ب) با یکدیگر مقایسه شده‌اند و نتایج آن در شکل (۱۰) قابل مشاهده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۱۰) در آزمایش‌ها با نرخ‌های متفاوت بالا آمدن آب، واکنش فیوز پلاگ‌ها در تخریب سه بعدی متفاوت بوده است. در آزمایش‌ها با نرخ بالا آمدن آب برابر ۰/۵ سانتیمتر بر دقیقه، نمودار بازشدگی تیپ‌های (ج) و B حالت خطی به خود گرفته‌اند، در صورتی که نمودار بازشدگی تیپ (الف) به صورت منحنی درجه سوم و دارای یک نقطه عطف در حدود ثانیه ۲۰ می‌باشد. این نقطه عطف مربوط به مرحله دوم بازشدگی است و نشان دهنده کاهش نرخ بازشدگی در مرحله دوم فرآیند می‌باشد. با افزایش نرخ بالا آمدن آب پشت سازه، نمودارهای بازشدگی ۳ تیپ به یکدیگر شبیه می‌شوند. به این صورت که با افزایش دبی روگذری که با افزایش نرخ بالا آمدن آب رخ می‌دهد، طول مدت زمان مرحله دوم بازشدگی کاهش می‌یابد و زیرشویی اطراف کانال هادی در زمان کمتری رخ می‌دهد، این امر باعث خطی شدن نمودارها می‌گردد.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر یکسری آزمون‌های آزمایشگاهی با هدف مطالعه تاثیر عرض و عمق کانال هادی بر نحوه شسته شدن فیوز پلاگ همگن غیر چسبنده و نحوه تخلیه جریان انجام شدند. نکته حائز اهمیت در این تحقیق، بررسی دقیق نحوه شکست فیوز پلاگ و پیشروی آن در شرایط سه بعدی می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان داد در ابتدای شروع روگذری جریان و تا حدوداً ۵ ثانیه بعد از آن، با توجه به دبی کم آب روگذر شده، فرسایش با غلظت بالا انجام شد، بگونه‌ای که حرکت توده‌ای از خاک اشباع مشاهده شد و این توده با توجه به غلظت بالای ماسه در پنجه پایین خاکریز رسوب کرد. این ته نشینی در عرض کانال، در انتهای شیب پایین دست گسترش یافته و آب از روی این توده ته نشین شده عبور کرد. بعد از آن با افزایش دبی روگذری، فرسایش با نرخ



شکل (۱۰): گسترش شکاف در تیپ‌های ج-B-الف و د-D-ب

زمان کمتری رخ می‌دهد، این امر باعث خطی شدن نمودارها می‌گردد.

به این صورت که با افزایش دبی روگذری که با افزایش نرخ بالا آمدن آب رخ می‌دهد، طول مدت زمان مرحله دوم بازشدگی کاهش می‌یابد و زیرشویی اطراف کانال هادی در

منابع

1. Asghari Tabrizi A., Elalfy E., Elkholy M., Chaudhry M. H. and Imran J. 2017. Effects of compaction on embankment breach due to overtopping. *Journal of Hydraulic Research*, 55(2):236–247.
2. Asghari Tabrizi A., Elalfy E., LaRocque L. A., Chaudhry M., and Imran J. 2015. Experimental modeling of levee failure process due to overtopping. In Annual Meeting of the Association of State Dam Safety Officials (ASDSO), September, New Orleans, LA, USA.
3. Mohamed M.A.A., Samuels P.G., Morris M.W., and Ghataora G.S. 1999. A new methodology to model the breaching of non-cohesive homogeneous embankments. *Proc. Concerted Action on Dam-Break Modelling CADAM*, Zaragoza, 289–308 (www.hrwallingford.co.uk/projects/CADAM/CADAM/).
4. Neshastehgar M., Salehi Neyshabouri S. A. A., Nasiri Saleh F., and Ghodsian M. 2017. Effect of pilot channel width on washout mechanism of fuse plug. 16th Iranian Hydraulic Conference. Ardabil. Iran (In Persian).
5. Neshastehgar M., Salehi Neyshabouri S. A. A., Nasiri Saleh F., and Ghodsian M. 2018. Investigating the effect of plug fuse washout on the outflow discharge from the dam reservoir. *Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant*, 18:37-49 (In Persian).
6. Neshastehgar M., Salehi Neyshabouri S. A. A., Nasiri Saleh F., and Ghodsian M. 2020. Investigating the effect of grain size of embankment fuse plug body on their washout mechanism. *Modares Civil Engineering journal*, 20(6):145-161 (In Persian).
7. Pugh, C. A. 1985. Hydraulic model studies of Fuse plug embankments, REC-ERC-85-7, USBR, USA.
8. Rajabzadeh V., Hekmatzadeh A., Tabatabaie P., and Torabi A. 2023. Introducing a probabilistic framework to measure dam overtopping risk for dams benefiting from dual spillways. *Reliability Engineering & System Safety Journal*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.109030>
9. Schmocker L. and Hager W. H. 2009. Modelling dike breaching due to overtopping. *Journal of Hydraulic Research*, 47(5):585–597.
10. Schmocker L. HÖ ck E., Mayor P. A., and Weitbrecht V. 2013. Hydraulic model study of the fuse plug spillway at Hagneck Canal, Switzerland. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(8):894–904.
11. Tinney E. R., and Hsu H. 1961. Mechanics of washout of an erodible fuse plug. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(3):1–29.

3D Analysis on Washout of Homogenous Fuse-Plug Embankment with Constant Discharge by Experimental Model

Mostafa Neshastehgar*¹, Saeed Hashemi Halvae², Seyed Ali Akbar Salehi Neyshabour³

DOI: 10.22103/nrswe.2023.20955.1024

Abstract

In the discussion of flood management, the use of embankment plug fuses and dams is considered very important. The embankment plug fuse prevents the sudden overtopping of dams against sudden floods and allows the discharge of excess flows during floods. Gives. In this research, with the experimental modeling of a homogeneous embankment fuse plug, with the aim of investigating the destruction of the embankment plug fuse structure and how the breach in it expands due to the current passing through as a result of the change in the dimensions of the pilot channel, the rate of increase of the water height behind the structure and the change in height. A total of 36 tests were conducted and their degradation characteristics were analyzed. 3D analysis of the breach in embankment plug after passing water through it was done, and these analyzes include the crack expansion rate, the shape of the breach, and the way the breach expands. The results obtained from the gap analysis showed that the plug fuse destruction process takes place in 3 stages. Also, the duration of complete splitting between 40 and 55 seconds was measured in different modes. The results of the examination of the breach-opening rate showed that in about 20 seconds, a turning point can be seen in the graphs, which indicates a decrease in the opening rate in the second stage due to the undermining process around the pilot channel.

Key words: 3D Failure Process, Embankment Fuse Plug, Experimental Modeling, Non-Cohesive Material.

¹*- Graduated in PhD of Water engineering, Civil & Environmental Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Corresponding author Email: mostafa.neshastehgar@modares.ac.ir

² - M.Sc of Civil & Environmental Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

³ - Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.