

ارزیابی تأثیر تراکم بر روند فرسایش ناشی از روگذری جریان در خاک ریز با استفاده از پردازش تصویر

محمد جعفر عطایی نوقاب (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سید محمد علی زهردیان* (دانشیار)

بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

روگذری جریان عمده‌ترین عامل تخریب سازه‌های خاکی در اثر به وجود آمدن سیلاب به شمار می‌آید؛ به طوری که ۳۴٪ شکست همگی سدها و ۳۵٪ شکست سدهای خاکی در اثر روگذری جریان گزارش شده است. با توجه به کمبود و نیاز به مطالعات بیشتر برای درک صحیحی از روند فرسایش ناشی از روگذری، در این پژوهش سعی شده است که تأثیر تراکم خاک به کمک پردازش تصویر بررسی شود. خاک مورد بررسی بر اساس طبقه‌بندی متحد در کلاس ماسه‌ی لای دار جای دارد که با اعمال ۳٪ تراکم نسبی متفاوت به عنوان تیمار، با استفاده از پردازش تصاویر ضبط شده، به بررسی روند فرسایش ناشی از روگذری جریان در خاک ریز پرداخته شد. نتایج رابطه‌ی مستقیمی بین درصد تراکم نسبی با زمان فرسایش و رابطه‌ی معکوس آن با نرخ فرسایش را نشان می‌دهند. از طرفی نقش پدیده سرریز در درصد تراکم نسبی ۱۰٪ و بیشتر از آن بر نرخ و سرعت فرسایش کاملاً مشهود است.

واژگان کلیدی: روگذری جریان، تراکم، پردازش تصویر، هدکات.

۱. مقدمه

روگذری جریان ایفا می‌کند؛ به طوری که یک همبستگی مستقیم بین حرکت عرضی و طولی هدکات با بافت و درصد رطوبت تراکم وجود دارد.^[۱] شکل ۱ مراحل ایجاد و توسعه‌ی هدکات را نمایش می‌دهد که مطابق آن ابتدا در صورت وجود پوشش محافظ، پوشش حذف می‌شود؛ سپس سطح دچار فرسایش می‌شود شکل ۱، الف و در ادامه فرسایش توده‌ی ذرات به هم چسبیده‌ی خاک باعث شکل‌گیری هدکات می‌شود شکل ۱، ب که به صورت هم‌زمان عریض می‌شود و به سمت بالا دست حرکت می‌کند (شکل ۱، ج و د).

از جمله عوامل مؤثر بر میزان و روند فرسایش ناشی از روگذری نیز می‌توان تراکم، بافت و دانه‌بندی خاک را نام برد. در سال‌های اخیر پژوهشگران متعددی به بررسی عوامل مؤثر بر روند و میزان فرسایش ناشی از روگذری پرداخته‌اند، که در ادامه نتایج برخی از این پژوهش‌ها آورده شده است.

ژیانگانگ و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به بررسی هفت ترکیب مختلف از رسوبات ریزدانه و درشت‌دانه بر فرسایش ناشی از روگذری پرداختند که نتایج نشان داد هرچه میزان ذرات ریزدانه بیشتر باشد، هدکات شدیدتری رخ می‌دهد و به تبع آن فرسایش بیشتری هم صورت می‌پذیرد.^[۲] اشموکر و همکاران (۲۰۱۴) نیز به بررسی تأثیر دانه‌بندی ذرات بر شکست ناشی از روگذری جریان پرداختند که نتایج نشان از تأثیرگذاری کم دانه‌بندی و غالب بودن شرایط هیدرولیکی جریان بر روند فرسایش داشت که با نتیجه‌ی پژوهشی دیگر از اشموکر و همکاران (۲۰۱۳) مغایرت دارد به نحوی که آنها در بررسی تأثیر ارتفاع خاک ریز، اندازه‌ی رسوب و

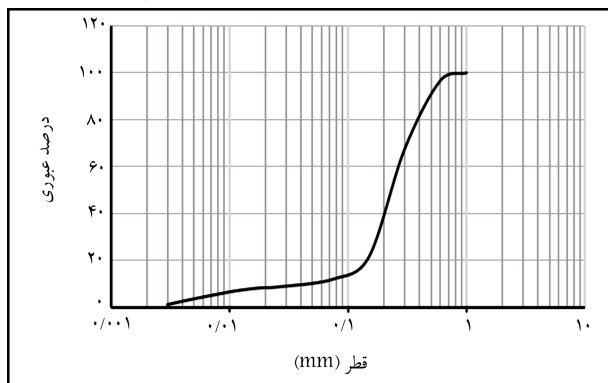
تا سال ۲۰۷۰ بیش از ۱۴۰ میلیون نفر و سرمایه‌ی حدود ۳۰۰۰۰ میلیارد یورو در مناطق ساحلی و مجاور رودخانه‌ها در معرض خطر سیل‌زدگی قرار خواهند داشت^[۱] از طرفی روگذری جریان، اصلی‌ترین عامل تخریب سازه‌ها بر اثر به وجود آمدن سیلاب است؛ به طوری که ۳۴٪ شکست همگی سدها و ۳۵٪ شکست سدهای خاکی در اثر روگذری جریان گزارش شده است.^[۲] روگذری جریان یکی از علل عمده‌ی تخریب سدها به خصوص سدهای خاکی است به طوری که بررسی‌ها نشان می‌دهد ۳۰٪ شکست سدها در آمریکا طی ۸۰ سال اخیر به همین دلیل بوده است، همچنین بیش از ۶۰٪ تلفات انسانی ناشی از شکست سدها در اثر تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم روگذری جریان بوده است.^[۳] روگذری جریان با افزایش ارتفاع سطح آب در اثر بارندگی یا ایجاد امواج توسط عواملی نظیر باد و زلزله و سرریز شدن آب از روی سازه به وقوع می‌پیوندد. از دلایل ایجاد روگذری نیز می‌توان عدم در نظر گرفتن ارتفاع آزاد کافی، ظرفیت کم سرریز و پیش‌بینی نادرست بیشترین سیل محتمل را نام برد.

در تخریب سازه‌های خاکی در اثر روگذری جریان پدیده‌ی هدکات نقش مهمی ایفا می‌کند. در خاک‌های چسبنده این پدیده نقش مؤثری در فرسایش ناشی از

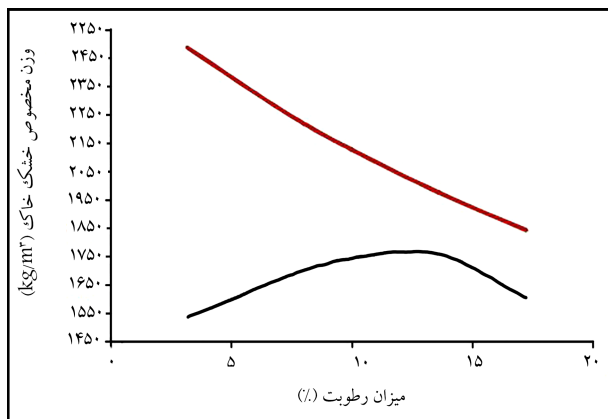
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۱۲/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۸/۳/۱۸، پذیرش ۱۳۹۸/۴/۵.

DOI:10.24200/J30.2019.53044.2525



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک مورد بررسی.



شکل ۳. منحنی تراکم خاک مورد بررسی.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مورد بررسی.

پارامتر	مقدار
Gs	۲٫۷
$\rho_d \max$	1770 kg/m^3
ω_{op}	٪۱۲٫۸
D_{50}	۰/۱۹mm
LL	non plastic
PL	non plastic

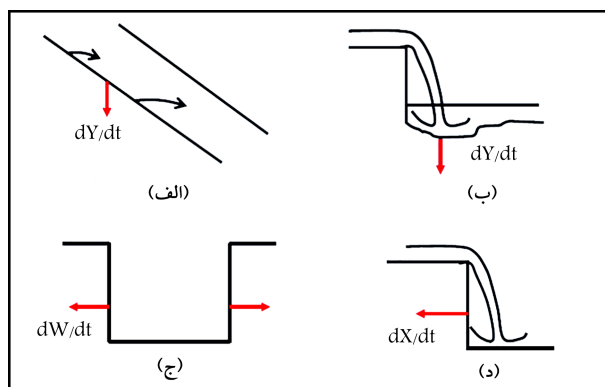
۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. خاک

خاک مورد بررسی در این پژوهش ترکیبی از ماسه با دانه‌بندی یکنواخت و خاک عبوری از الک ۴ منطقه‌ی باجگاه شیراز (با نسبت ترکیب ۴ به ۱) انتخاب شد. آزمایش‌های دانه‌بندی (D۴۲۲)، تراکم استاندارد (D۶۹۸)، حدود اتربرگ (D۴۳۱۸) و چگالی مخصوص دانه‌های خاک (D۸۵۴) بر طبق استاندارد ASTM صورت پذیرفت.

شکل ۲ و ۳ و جدول ۱ به ترتیب منحنی دانه‌بندی و منحنی تراکم و مشخصات فیزیکی خاک را نشان می‌دهد.

خاک استفاده شده بر طبق سیستم طبقه‌بندی متحد در گروه ماسه‌ی لای‌دار (SM) قرار می‌گیرد.



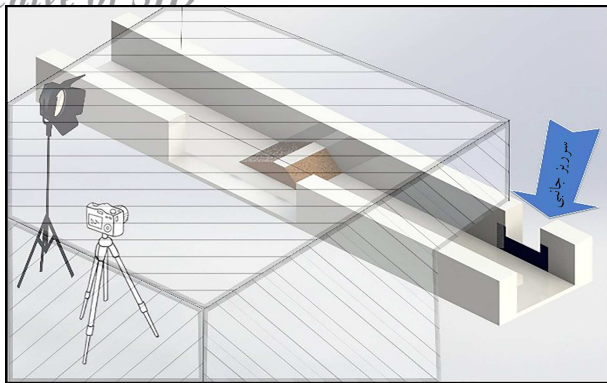
شکل ۱. شکل‌گیری و توسعه‌ی هدکات.

دبی ورودی بر فرسایش ناشی از روگذری، این سه پارامتر را از جمله پارامترهای حاکم بر روند فرسایش و اندازه‌ی رسوبات را عاملی تعیین‌کننده در فرایند فرسایش معرفی کردند.^[۶] میزوتانی و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی تأثیر اندازه‌ی رسوبات غیرچسبیده بر فرسایش ناشی از روگذری برای ارائه‌ی یک مدل عددی بیان کردند که خاک‌ریز ساخته شده با ذرات ریزدانه فرسایش کمتری در مقایسه با خاک‌ریز ساخته شده با ذرات درشت‌دانه دارد که مقاومت برشی ناشی از مکش خاک اشباع نشده می‌تواند علت این امر باشد.^[۸]

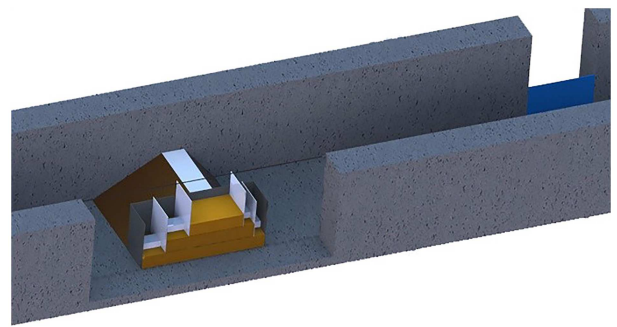
الیتی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی که با چهار ترکیب متفاوت از رسوبات انجام شد، نتیجه گرفتند در خاک با ترکیب ماسه‌ی لای‌دار فرسایش از تاج خاک‌ریز شروع می‌شود و به سمت پنجه حرکت می‌کند؛ در حالی که برای خاک با ترکیب ماسه‌ی رسی فرسایش از پنجه شروع می‌شود و به سمت تاج حرکت می‌کند.^[۹] تبریزی و همکاران (۲۰۱۷) نیز به بررسی تأثیر تراکم بر فرسایش ناشی از روگذری جریان در خاک‌ریزهای ماسه‌یی یکنواخت (غیرچسبیده) پرداختند. آنها یک مدل عددی برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی شکست در اثر روگذری ارائه کردند که نشان داد افزایش درجه‌ی تراکم خاک‌ریز، کاهش دبی پیک جریان خروجی را در مدت زمان بیشتری در پی دارد.^[۱۰] کی‌مینگ و همکاران (۲۰۱۷) نیز برای بررسی پیش‌بینی شکست در سدهای خاکی همگن (چسبیده) در اثر روگذری جریان، مدل عددی ارائه کردند که در بین مدل‌های موجود از جمله HR-Breach و WinDam از دقت بیشتری برای پیش‌بینی شکست برخوردار است. آنها در طراحی مدل، پدیده‌ی هدکات را پارامتری کلیدی در نظر گرفتند.^[۱۱] عبدالطیف و همکاران (۲۰۱۶) نیز به بررسی اثر مقیاس بر روند شکست ناشی از روگذری جریان در خاک‌ریز پرداختند که نتایج نشان از عدم تأثیرگذاری مقیاس بر نتیجه‌ی آزمایش‌ها (روند فرسایش) داشت که با توجه به آن می‌توان آزمایش‌های کوچک‌مقیاس را به علت سهولت ساخت و هزینه‌ی کمتر برای بررسی روند فرسایش مورد استفاده قرار داد.^[۱۲]

با توجه به مطالب بیان شده، در بیشتر پژوهش‌ها تأثیر ترکیب خاک بر فرسایش بررسی شده است، از آن‌جا که تغییر نوع مصالح در صورت مناسب نبودن منابع قرضه مقرون به صرفه نیست، باید در پی اصلاح مصالح موجود یا عامل‌های مؤثر و قابل تغییر بر فرسایش‌پذیری بود.

در پژوهش حاضر با هدف به تصویر کشیدن و درک بهتر فرسایش ناشی از روگذری و تأثیر تراکم (عامل تغییرپذیر در خاک) از روش پردازش تصویر استفاده شده است. سه تراکم نسبی ۹۵، ۱۰۰ و ۱۰۵ درصد بر روی ترکیبی از ماسه و خاک منطقه‌ی باجگاه شیراز آزمایش شد.



شکل ۵. محل استقرار دوربین و تجهیزات تصویربرداری * منطقه هاشورخوردہ توسط پرده پوشیده شده است.



شکل ۴. نمایی از فلوم بتنی.

۲.۲. آماده سازی نمونه ها

جرم خاک مورد نیاز برای هر آزمایش با توجه به ارتفاع نهایی خاکریز و چگالی بیشینه ی خشک خاک محاسبه شد. سپس رطوبت وزنی بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم به خاک افزوده شد که به منظور ایجاد یکنواختی رطوبت، نمونه درون سطل پلاستیکی درب دار به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شده است.

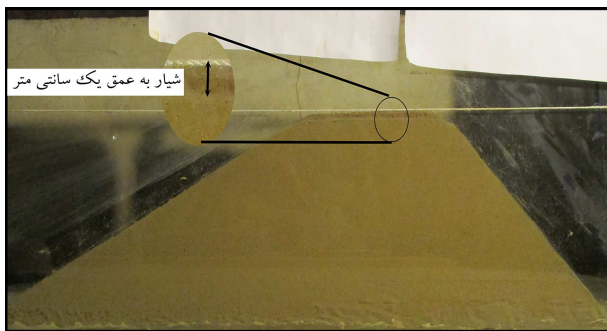
۳.۲. انجام آزمایش

آزمایش های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشکده ی کشاورزی دانشگاه شیراز، در (بدسنج) بتنی به ابعاد ۰/۵ متر عرض، ۰/۵ متر عمق و ۱۶/۵ متر طول انجام شد. شکل ۴ نمایی از بدسنج را نشان می دهد.

مطابق شکل ۴ در قسمتی از دیواره ی کانال، شیشه یی برای مشاهده ی روند فرسایش و تصویربرداری از آن تعبیه شده است. خاکریز در مجاورت شیشه و در ابعاد ۱۵ × ۱۵ × ۵۵ سانتی متر و شیب بالادست ۱:۱ و پایین دست ۲:۱ ساخته شده است. به منظور کاهش جرم خاک مورد نیاز برای ساخت خاکریز، یک مدل فلزی با ابعاد ۱۵ × ۳۵ × ۵۵ سانتی متر و شیب برابر در بالادست و پایین دست با خاکریز ساخته و در کانال نصب شد. پس از ساخت خاکریز، آب وارد کانال می شود و با وجود خاکریز در کانال شروع به ذخیره شدن و افزایش ارتفاع می کند که به منظور ایجاد هد ثابت در حین آزمایش در بالادست خاکریز و به فاصله ی ۱/۵ متری از آن یک سرریز جانبی ایجاد شده است شکل ۵ سرریز جانبی از نوع مستطیلی لبه تیز، با ارتفاع تاج (از کف کانال) ۱۳/۵ سانتی متر و طول تاج ۳۰ سانتی متر است. در سطح خاکریز و در مجاورت شیشه خراشی به عمق ۱ سانتی متر شکل ۶ به منظور عامل شروع کننده ی روگذری ایجاد شده است که پس از رسیدن آب به ارتفاع ۱۴ سانتی متری خاکریز، دوربین مستقر شده به صورتی که در شکل ۵ نشان داده شده است در کنار فلوم شروع به ضبط تصاویر می کند. دبی مورد استفاده برای تمامی آزمایش ها ثابت و با توجه به دبی سنج واقع در آزمایشگاه برابر ۱/۵ لیتر بر ثانیه بوده است.

۴.۲. پردازش تصویر

برای ثبت تصاویر در این پژوهش از یک دوربین عکس برداری با قابلیت فیلم برداری HD و نرخ ثبت ۳۰ قاب بر ثانیه استفاده شد. به منظور نورپردازی با شدت یکسان و کاهش نوقه های ناخواسته، محدوده ی فیلم برداری توسط پرده پوشیده شده است و یک نورافکن با توان ۳۰ وات در آن جای گذاری شده است. همچنین از محلول پتاسیم پرمنگنات نیز به عنوان ماده ی رنگی برای ایجاد تمایز بین خاک فرسایش یافته



دبی مورد استفاده برای تمام آزمایش ها ثابت و با توجه به دبی سنج واقعی در آزمایشگاه برابر ۱/۵ لیتر بر ثانیه بوده است. شکل ۶. ایجاد شمار روی تاج در مجاورت شیشه.

و خاکریز استفاده شده است. پردازش تصویر با استفاده از الگوریتم لبه یاب کنی^۱ صورت گرفته است. الگوریتم کنی، در سال ۱۹۸۳ مطرح و با استقبال بسیار زیاد صاحب نظران روبه رو شد. هم اکنون از این الگوریتم به عنوان یک آشکارساز در صنعت به صورت گسترده استفاده می شود. شکل ۷ مختصری از عملیات پردازش تصویر انجام شده را نشان می دهد.

شکل ۷ الف یک فریم از فیلم ضبط شده از آزمایش است. هر فیلم به فریم هایی به فاصله ی زمانی ۵ ثانیه تبدیل شده است که در این حالت مدل رنگی تصویر RGB (متشکل از سه رنگ قرمز، سبز و آبی) است. در تصویر ب مدل رنگی تصویر از سطح RGB به سطح خاکستری ۸ بیتی تبدیل شده است. در سطح خاکستری ۸ بیتی هر پیکسل از تصویر می تواند شدت نوری بین ۰ تا ۲۵۵ را به خود اختصاص دهد که ۰ نشان دهنده ی رنگ سیاه و ۲۵۵ نشان دهنده ی رنگ سفید است. در مرحله ی ج عمل آستانه گذاری بر روی تصویر برای متمایز کردن مرزها و سهولت در تقطیع و لبه یابی انجام شده است. تابع آستانه گذاری با مشخص کردن یک مقدار از شدت روشنایی به عنوان آستانه، مقدار شدت روشنایی تمام پیکسل های کمتر از آن را صفر و بیشتر یا مساوی با آن را یک می کند که ۰ متعلق به رنگ سیاه و ۱ متعلق به رنگ سفید است. در واقع، پس از آستانه گذاری تصویر به سطح دودویی (در مبنای دو) تغییر می یابد. در مرحله ی د نیز لبه یابی توسط تابع لبه یاب کنی (canny) صورت پذیرفته است که در آن لبه ی تمام اشیاء داخل تصویر به رنگ سفید نشان داده شده است که از این بین فقط خط مربوط به فرسایش ناشی از روگذری مد نظر بوده است و بقیه ی خطوط سفید نویز محسوب شده اند؛ در تصویر مرحله ی ۰ تمام نویزها با

۲.۵.۲. روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ^۲ یا به اختصار RSM، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه‌ی بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل (مورد مطالعه) تعیین می‌کند. هدف در روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) است. از مزایای این روش نسبت به شبکه‌ی عصبی ارائه‌ی روابط تخمین زده شده بین متغیرهای ورودی و پاسخ است که با توجه به آنها می‌توان حساسیت پاسخ را نسبت به هر یک از عوامل (متغیرهای ورودی) نیز مشخص کرد.

۳. بحث و نتایج

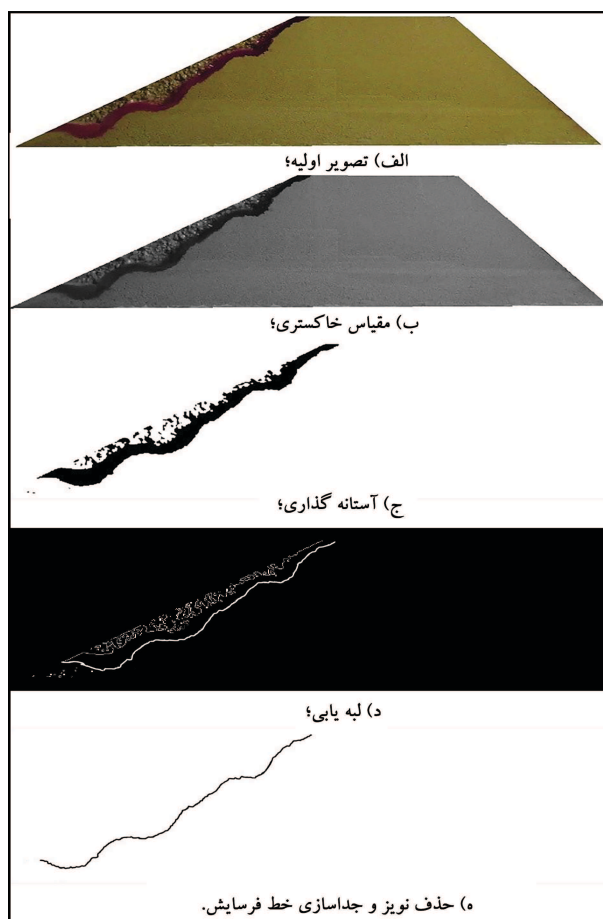
در این پژوهش با توجه به کمبود مطالعات و نیاز بیشتر به انجام تحقیقی به منظور درک صحیحی از روند فرسایش ناشی از روگذری جریان، سعی شده است که تأثیر میزان تراکم خاک با اعمال ۳٪ تراکم نسبی متفاوت به عنوان تیمار بر روند فرسایش ناشی از روگذری جریان بررسی شود.

بررسی تراکم نسبی در سه مقدار ۹۵، ۱۰۰ و ۱۰۵ درصد با دو تکرار برای هر نمونه انجام شد که در شکل ۸ نمونه‌ی از تکرارپذیری این آزمایش‌ها آورده شده است. مطابق شکل ۸ روند فرسایش در تمام مراحل آزمایش‌ها (سری ۱ و ۲) از تطابق قابل قبولی برخوردار است.

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ تصاویر حاصل از جمع خطوط فرسایش ناشی از روگذری جریان آورده شده است. پس از انجام پردازش تصاویر مربوط به هر آزمایش و مشخص‌سازی خط حاصل از فرسایش در هر گام زمانی، خطوط فرسایش در فاصله‌های زمانی ۵، ۱۰ و ۲۰ ثانیه توسط تابع جمع منطقی تصاویر با همدیگر جمع شدند. تابع جمع منطقی به این صورت عمل می‌کند که مقدار شدت نور مربوط به هر پیکسل (در حالت سیاه و سفید) را با مقدار متناظر آن در تصویر دیگر جمع می‌بندد؛ به این صورت که اگر مقدار شدت نور در دو پیکسل متناظر برابر باشد مقدار شدت نور پیکسل در تصویر پاسخ نیز همان مقدار است. چنانچه این دو مقدار مساوی نباشند مقدار آن برابر با (۰ رنگ سیاه) می‌شود.

با توجه به تصاویر هرچه تراکم نسبی افزایش می‌یابد، خطوط فرسایش به همدیگر نزدیک تر می‌شوند که نشان از مقاومت بیشتر خاک‌ریز در برابر فرسایش دارد. از طرفی با افزایش تراکم نسبی روند فرسایش نیز دچار تغییر می‌شود؛ به طوری که در تراکم نسبی ۹۵٪ شکل ۹ تصویر ج پدید می‌آید که در نزدیکی تاج خاک‌ریز رخ داده و با حرکت به سمت تاج باعث تخریب سریع خاک‌ریز شده است؛ اما در نمونه‌هایی با تراکم نسبی ۱۰۰٪ و بیش از آن ۱۰۵٪ این پدیده به صورت شدیدتر ولی در پایین دست خاک‌ریز رخ داده است؛ سپس به سمت بالادست حرکت کرده و پس از رسیدن به تاج خاک‌ریز موجب تسریع در شکست خاک‌ریز شده است. تصویر ج شکل ۱۰ نشان‌دهنده‌ی مطالب بیان شده برای روند فرسایش در تراکم نسبی ۱۰۰ و ۱۰۵ درصد است؛ به طوری که قسمت مشخص شده با شماره ۱ نشان از ایجاد هدکات در پایین دست و قسمت‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده‌ی عمیق شدن (تشدید فرسایش) و حرکت آن به بالادست و قسمت ۴ رسیدن به ابتدای تاج خاک‌ریز است. روند فرسایش در شکل ۱۱ (تراکم نسبی ۱۰۵٪) نیز مشابه روند فرسایش تراکم نسبی ۱۰۰٪ است. فقط تراکم خطوط بیشتر است که نشان‌دهنده‌ی افزایش مدت زمان آزمایش و مقاومت خاک در برابر فرسایش به علت افزایش تراکم است.

نتایج حاصل با نتایج پژوهش الیتی و همکاران (۲۰۱۷) که تأثیر ترکیب خاک بر



شکل ۷. مراحل پردازش تصاویر.

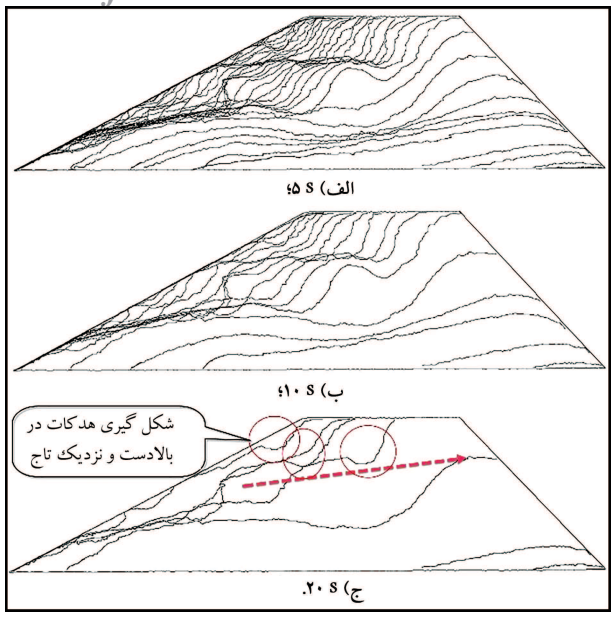
اعمال چند فیلتر حذف شده‌اند. این تصویر خروجی عملیات پردازش تصویر صورت گرفته است که برای تبدیل عکس به نمودار (رقومی کردن) استفاده شده است.

۲.۵.۵. معادلات و شبکه‌ی عصبی

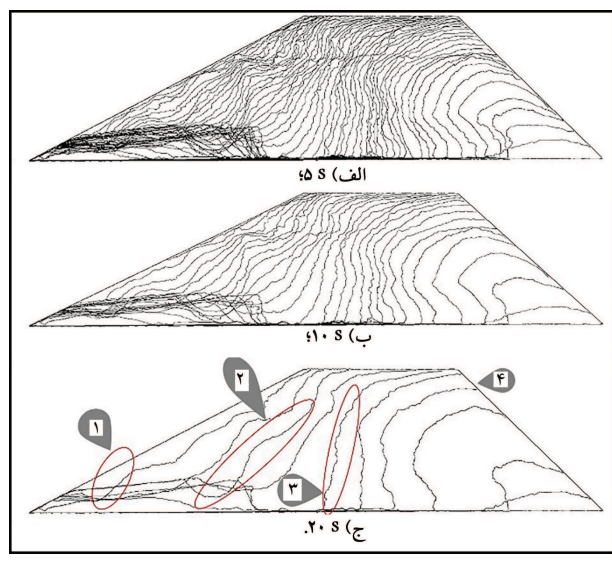
برای بررسی وجود رابطه‌ی بین پارامترهایی نظیر تراکم و زمان سپری شده از شروع آزمایش، تصاویر خطوط فرسایش حاصل از پردازش تصویر، رقمی شده‌اند؛ سپس داده‌های حاصل توسط شبکه‌ی عصبی و روش سطح پاسخ بررسی شده است.

۲.۱.۵.۲. شبکه‌ی عصبی

در این پژوهش به منظور عمق‌سنجی خط فرسایش، از داده‌های حاصل از رقمی شدن تصاویر خطوط فرسایش برای آموزش شبکه‌ی عصبی (پرسپترون) استفاده شد. برای یافتن بهترین نگاشت نیز بین مقادیر ورودی و خروجی در شبکه‌ی طراحی شده از دو لایه‌ی پنهان، هریک با ۱۰ نورون و از سه تابع انتقال تانژانت سیگموئید، لگاریتم سیگموئید و بیشینه‌ی هموار استفاده شده است. توابع انتقال یا فعال‌ساز در واقع یک قسمت در شبکه‌های عصبی هستند که ورودی آنها یک عدد (کوچک یا بزرگ در بازه‌ی دلخواه) است و خروجی آنها معمولاً یک عدد بین ۰ و ۱، یا (۱- و ۱+) است. در واقع این توابع یک عدد ورودی را به یک بازه‌ی مشخص (مثلاً ۱- تا ۱+) تبدیل می‌کنند. به توابع فعال‌ساز، توابع انتقال نیز می‌گویند. برای انتخاب بهترین شبکه مقادیر میانگین مربعات خطای شبکه‌ها با هم مقایسه شدند و شبکه‌ی دارای کمترین خطا به عنوان بهینه‌ترین شبکه انتخاب شد.

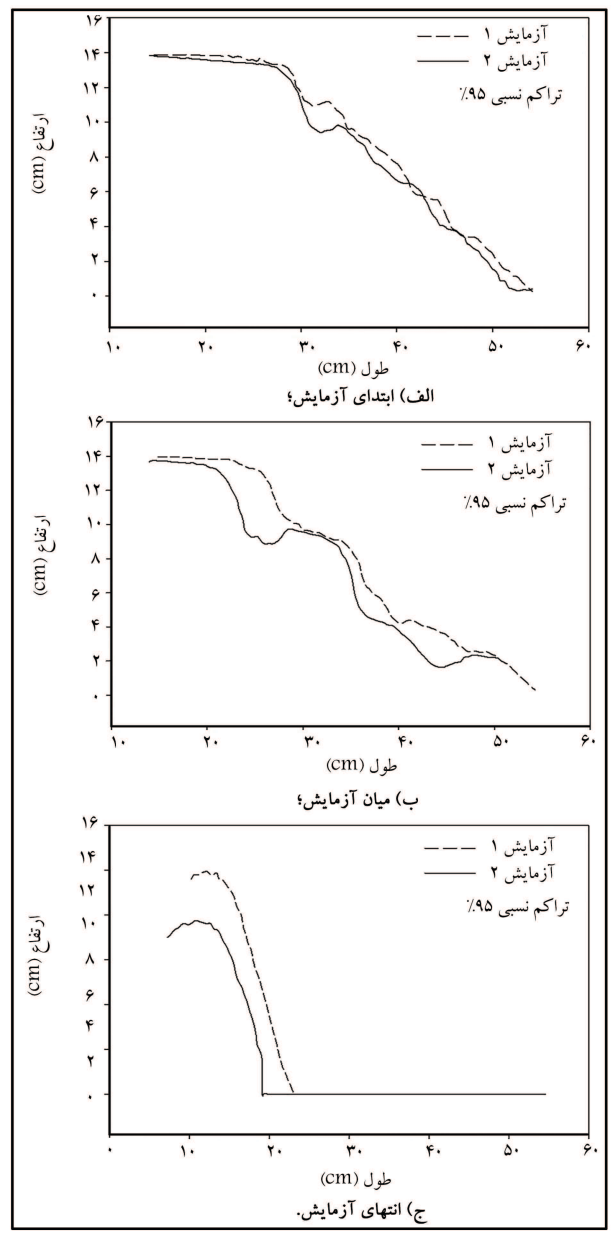


شکل ۹. خطوط فرسایش نمونه‌ی خاک با تراکم ۹۵٪ در فاصله‌های زمانی.



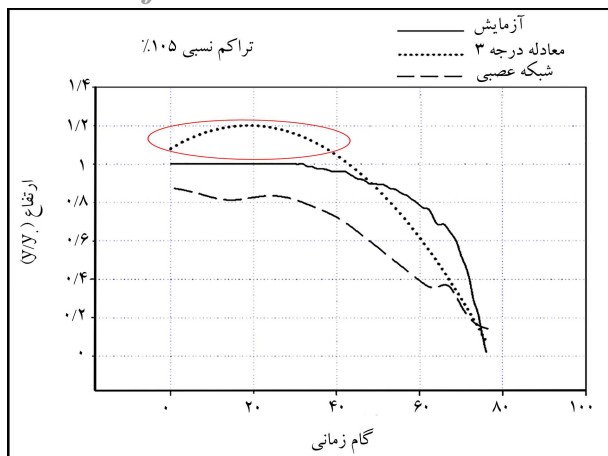
شکل ۱۰. خطوط فرسایش نمونه‌ی خاک با تراکم ۱۰۰٪ در فاصله‌های زمانی.

اثر روگذری جریان ایفا می‌کند، بنابراین توانایی پیش‌بینی حرکت و زمان رسیدن آن به تاج خاک‌ریز از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ نشان‌دهنده‌ی میزان توانایی معادله‌ی درجه سه (حاصل از روش سطح پاسخ) و شبکه‌ی عصبی برازش داده شده در پیش‌بینی از لحظه‌ی رسیدن پدیده بدون سر (سر بریده) به تاج خاک‌ریز در سه درصد تراکم متفاوت می‌باشد. زمانی نشان‌دهنده‌ی رسیدن هدکات به ابتدای تاج خاک‌ریز است که تغییر ارتفاع تاج خاک‌ریز میان دو گام زمانی دارای جهش باشد. با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۴ و مساوی قرار دادن مقادیر برآورد شده بزرگ‌تر از یک با یک (برای تصحیح مدل با توجه به آن‌که مقادیر نمی‌توانند بیشتر از یک باشند)، معادله‌ی درجه سه پیش‌بینی قابل قبولی از زمان رسیدن هدکات به تاج خاک‌ریز ارائه می‌دهد (مطابقت خوب با داده‌های آزمایش در زمان رسیدن هدکات به ابتدای تاج خاک‌ریز).



شکل ۸. تکرارپذیری آزمایش‌ها، خاک با تراکم ۹۵٪ در سه زمان ابتدای سری دوم آزمایش‌ها صرفاً برای نشان دادن تکرارپذیری آزمایش‌ها صورت گرفته و تحلیل‌ها بر اساس آزمایش‌های اولیه انجام شده است.

فرسایش ناشی از روگذری جریان را بررسی کرده‌اند، همخوانی دارد؛ به طوری که برای خاک ماسه‌ی سیلتی فرسایش از تاج شروع می‌شود و به سمت پنجه حرکت می‌کند و برای خاک ماسه‌ی رسی فرسایش از پنجه شروع و به سمت تاج حرکت می‌کند. همچنین نتایج پژوهش ژبانگانگ و همکاران (۲۰۱۷) سه مرحله برای فرسایش را نشان داد که هدکات سهم عمده در کنده شدن شیب را دارد و هر چه میزان ریزدانه بیشتر باشد فرسایش شدیدتر روی می‌دهد (تشدید هدکات). در این پژوهش تیمار تراکم نسبی بوده است؛ پس افزایش تراکم باعث بیشتر شدن مقاومت خاک‌ریز در برابر فرسایش ناشی از روگذری می‌شود و مشابه حالت افزایش مواد ریزدانه عمل می‌کند. از آن‌جا که پدیده‌ی هدکات نقش مهمی در تخریب سازه‌های خاکی در



شکل ۱۴. نمودار مقایسه‌ی عملکرد شبکه‌ی عصبی و معادله‌ی درجه سه با داده‌های آزمایشگاهی در برآورد زمان رسیدن هدکات به تاج خاک ریز در تراکم نسبی ۱۰۵٪.



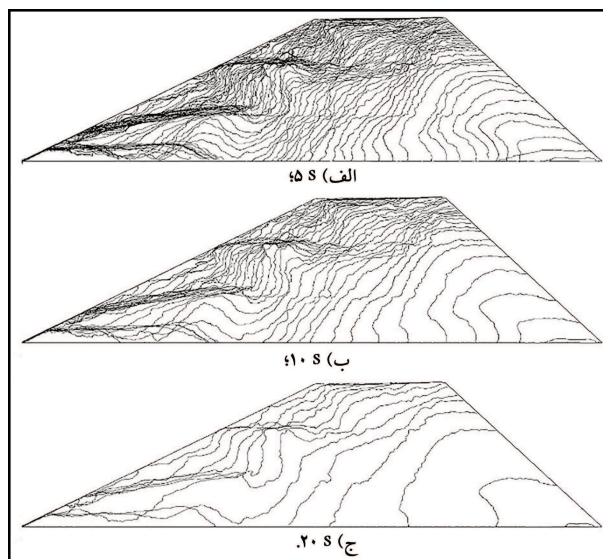
شکل ۱۵. وضعیت خاکریز هنگام رسیدن پدیده بدون سر الف) زمان برآورده شده، ب) از رسیدن آن به تاج خاکریز با درصد تراکم ۹۵٪.

با توجه به شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ در درصد‌های تراکم بالا روند فرسایش برآورد شده توسط معادله‌ی درجه سه تطابق بیشتری به روند فرسایش داده‌های آزمایش دارد که علت این امر را می‌توان داده‌های بیشتر شرکت داده شده از این آزمایش‌ها (به دلیل افزایش زمان آزمایش) در مدل استفاده شده از روش سطح پاسخ دانست.

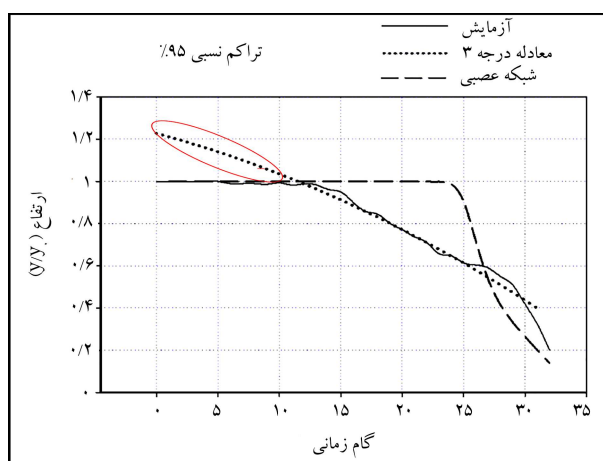
شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ زمان برآورد شده توسط معادله‌ی درجه سه و زمان واقعی رسیدن هدکات به ابتدای تاج خاکریز را در نمونه‌هایی با تراکم نسبی ۹۵، ۱۰۰ و ۱۰۵ درصد نشان می‌دهند.

۴. نتیجه‌گیری

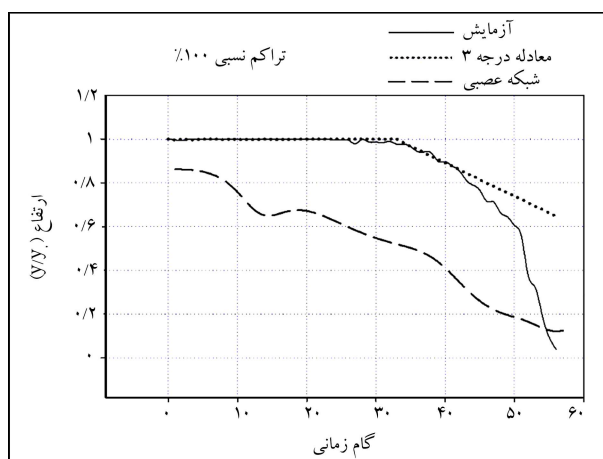
در این پژوهش به بررسی تأثیر تراکم بر فرسایش ناشی از روگذری جریان در خاکریز ساخته شده از ماسه‌ی لای‌دار پرداخته شد. خاکریز در ابعاد $15 \times 15 \times 55$ سانتی‌متر در یک کانال بتنی با ۳٪ تراکم متفاوت و هر درصد تراکم با دو تکرار آزمایش شد. نتایج نشان داد افزایش درصد تراکم باعث کاهش نرخ فرسایش و تغییر روند آن می‌شود؛ به نحوی که با افزایش درصد تراکم پدیده‌ی هدکات در پنجه‌ی



شکل ۱۱. خطوط فرسایش نمونه‌ی خاک با تراکم ۱۰۵٪ در فاصله‌های زمانی.



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ی عملکرد شبکه‌ی عصبی و معادله‌ی درجه سه با داده‌های آزمایشگاهی در برآورد زمان رسیدن هدکات به تاج خاکریز در تراکم نسبی ۹۵٪.



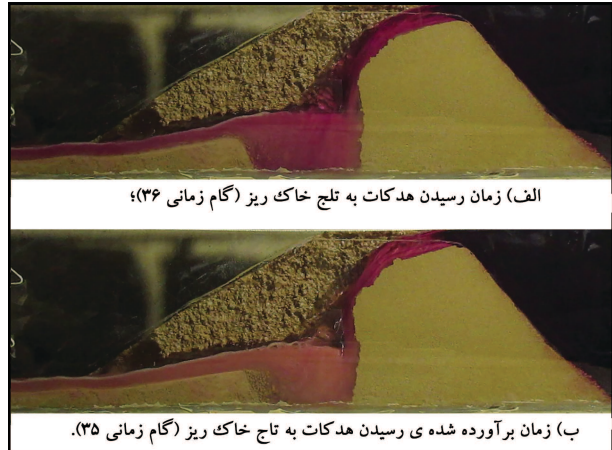
شکل ۱۳. نمودار مقایسه‌ی عملکرد شبکه‌ی عصبی و معادله‌ی درجه سه با داده‌های آزمایشگاهی در برآورد زمان رسیدن هدکات به تاج خاکریز در تراکم نسبی ۱۰۰٪.

خاک ریز شکل می‌گیرد و به سمت تاج حرکت می‌کند. همچنین با افزایش درصد تراکم، هدکات به صورت شدیدتری رخ می‌دهد. از طرفی درصد تراکم پایین نیز باعث شکل‌گیری هدکات در نزدیکی تاج و در پی آن تخریب زود هنگام خاک ریز می‌شود که این نتایج با قسمت‌هایی از نتایج پژوهش‌های الیتی و همکاران (۲۰۱۷)، ژیانگانگ و همکاران (۲۰۱۸) و هنسون و همکاران (۲۰۰۵) مطابقت دارد. با توجه به مشاهدات صورت گرفته می‌توان وجود رابطه‌ی مستقیم بین درصد تراکم و زمان فرسایش و رابطه‌ی معکوس با نرخ فرسایش حاصل از روگذری را نتیجه گرفت. از طرفی مقدار تراکم نسبی در موقعیت شکل‌گیری هدکات در خاک ریز مؤثر است به نحوی که:

- برای تراکم نسبی 100% و بالاتر هدکات در پایین‌دست خاک ریز شکل می‌گیرد و با گذشت زمان به سمت بالادست و تاج خاک ریز حرکت می‌کند.

- برای درصد تراکم نسبی کمتر از 100% هدکات در نزدیکی تاج شکل می‌گیرد. علت این امر در خاک ریز متراکم شده با تراکم نسبی کمتر از 100% ، کافی بودن سرعت جریان سرریز شده در بالادست خاک ریز (نزدیک تاج) برای ایجاد فرسایش است. ولی در خاک ریز متراکم شده با تراکم نسبی 100% و بیش از آن سرعت جریان در بالادست برای ایجاد فرسایش کم است؛ اما رفته رفته سرعت جریان به سمت پایین‌دست افزایش می‌یابد؛ به طوری که قادر به ایجاد فرسایش در پنجه‌ی خاک ریز شده است.

نرخ فرسایش خاک ریز پس از رسیدن هدکات به تاج بسیار شدید می‌شود و در واقع خاک ریز دچار شکست حتمی می‌شود. پس با توجه به آن که یکی از عوامل مهم در روگذری جریان مدت زمان رخ دادن روگذری است، اندوختن زمان کافی از طریق ایجاد مقاومت خاک ریز (افزایش درصد تراکم) در برابر فرسایش بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا چنانچه این افزایش مقاومت حتی باعث جلوگیری از تخریب خاک ریز نشود، زمان لازم برای انجام تمهیدات یا حتی فرار از منطقه‌ی خطر را فراهم می‌سازد.



شکل ۱۶. وضعیت خاک ریز هنگام رسیدن پدیده بدون سر الف) زمان برآورده شده، ب) از رسیدن آن به تاج خاک ریز با درصد تراکم 100% .



شکل ۱۷. وضعیت خاک ریز هنگام رسیدن پدیده بدون سر الف) زمان برآورده شده، ب) از رسیدن آن به تاج خاک ریز با درصد تراکم 105% .

پانویس‌ها

1. Canny
2. response surface methodology

منابع (References)

1. Kok, M., Vrijling, J. K. and Zevenbergen, C. "Towards an integrated evaluation framework for multi-Functional flood defences", *Comprehensive Flood Risk Management. Taylor & Francis Group, London*, pp.921-926 (2013).

2. ASCE/EWRI Task Committee on Dam/Levee Breaching "Earthen embankment breaching", *Journal of hydraulic engineering*, 137(12), pp. 1549-1564 (2011).
3. Costa, J. E. "Floods from dam failures" *Open-File Rep. US Geological Survey, Denver*. 85-560 (1985).
4. Hanson, G. J., Cook, K. R. and Hunt, S. L., "Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments", *Transactions of the ASAE*, 48(5), pp. 1783-1794 (2005).
5. Xiangang, J., Jiahua, H., Yunwei, W. and et al. "The influence of materials on the breaching process of natural dams", *Landslides*, 15(2), pp. 243-255 (2018).
6. Schmocker, L., Frank, P. J. and Hager, W. H., "Overtopping dike-breach: effect of grain size distribu-

- tion", *Journal of Hydraulic Research*, **52**(4), pp. 559-564 (2014).
7. Schmocker, L. and Hager, W. H., "Plane dike-breach due to overtopping: effects of sediment, dike height and discharge", *Journal of Hydraulic Research*, **50**(6), pp. 576-586 (2012).
8. Mizutani, H., Nakagawa, H., Yoden, T. and et al. "Numerical modelling of river embankment failure due to overtopping flow considering infiltration effects", *Journal of Hydraulic Research*, **51**(6), pp. 681-695 (2013).
9. Ellithy, G. S., Savant, G. and Wibowo, J. L., "Effect of Soil Mix on Overtopping Erosion", *In World Environmental and Water Resources Congress*, pp. 35-49 (2017).
10. Asghari Tabrizi, A., Elalfy, E., Elkholy, M. and et al. "Effects of compaction on embankment breach due to overtopping", *Journal of Hydraulic Research*, **55**(2), pp. 236-247 (2017).
11. Zhong, Q. M., Chen, S. S. and Deng, Z., "Numerical model for homogeneous cohesive dam breaching due to overtopping failure", *Journal of Mountain Science*, **14**(3), pp. 571-580 (2017).
12. Mohamed, M. M. A. and El-Ghorab, E. A. S., "Investigating scale effects on breach evolution of overtopped sand embankments", *Water Science*, **30**(2), pp. 84-95 (2016).