

## کاربرد مدل‌های فیزیکی برای تعیین ویژگی‌های شکافت و جریان در شکست سدهای خاکریزهای

کامران کوزه‌گر<sup>۱</sup>، یوسف حسن‌زاده<sup>۲\*</sup>، سعید اسلامیان<sup>۳</sup>، میکائیل یوسف‌زاده فرد<sup>۴</sup> و علیرضا بابائیان امینی<sup>۵</sup>

### چکیده

در پدیده شکست سد خاکی، تعیین دقیق ویژگی‌های جریان، زمان و شکافت همراه با تحلیل اجزای هیدروگراف در کاهش آسیب‌پذیری دشت‌های سیلابی پایین‌دست و خسارت‌های مالی و جانی آن، نقش بسزایی دارد. در این پژوهش از مدل‌های فیزیکی با خصوصیت‌های مختلف هندسی و مکانیکی برای بررسی سازوکار فرسایش و تکامل شکافت استفاده شد. در تحلیل اجزای هیدروگراف حاصل از شکافت نیز نتایج آزمایشگاهی با داده‌های تاریخی حاصل از مدل ریاضی BREACH مقایسه شد. برای توسعه روابط جدید در تعیین دبی اوج ( $Q_p$ )، پارامترهایی معرفی شده است که تاکنون در تعیین آن به کار نرفته است. در این زمینه، از داده‌های تاریخی، آزمایشگاهی و شکست فرضی سدهای واقعی، به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد زمان توسعه شکافت ( $t_f$ )، وابستگی زیادی به ویژگی‌های هیدرولیکی و شکافت داشته و بر این اساس، روابط جدید بر مبنای آن پیشنهاد شده است. همچنین، روابط جدید معرفی شده مربوط به ارتفاع شکافت ( $H_b$ ) به ارزیابی دقیق‌تر فرایند شکافت در حالت‌های روگذری جریان و رگاب منتهی می‌شود. محدوده تغییرات عرض متوسط شکافت ( $B_{ave}$ ) برحسب ارتفاع جریان گذرنده از روی شکافت، که در این مطالعه تعریف شده است، دامنه وسیعی از سدهای خاکریزهای را فرامی‌گیرد. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای رابطه‌های پیشنهادی برای تعیین  $Q_p$  برحسب پارامترهای شکافت و با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و رگرسیون غیرخطی به ترتیب، برابر ۰/۸۴ و ۰/۸۴ است. این ضریب برای تعیین روابط  $t_f$  با رگرسیون و برحسب پارامترهای هیدرولیکی و شکافت به ترتیب، معادل ۰/۸۷ و ۰/۸۸ محاسبه شد. مقدار  $R^2$  در تعیین رابطه‌های جدید  $H_b$  با GEP و برحسب پارامترهای بدنه و مخزن در حالت‌های روگذری جریان و رگاب نیز به ترتیب، برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۹ بود.

**واژه‌های کلیدی:** اجزای هیدروگراف، سازوکار فرسایش، روابط تجربی، مدل‌های رگرسیونی، منابع آب، هوش مصنوعی.

**ارجاع:** کوزه‌گر ک. حسن‌زاده ی. اسلامیان س. یوسف‌زاده فرد م. و بابائیان امینی ع. ۱۴۰۰. کاربرد مدل‌های فیزیکی برای تعیین ویژگی‌های شکافت و جریان در شکست سدهای خاکریزهای. مجله پژوهش آب ایران. ۴۰: ۱۴۹-۱۶۲.

۱- دانشجوی دکترای مهندسی آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد.

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد.

۳- استاد گروه مهندسی آب، قطب علمی هیدروانفورماتیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

۴- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۵- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

۶- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب.

\* نویسنده مسئول: [yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir)

## مقدمه

خصوصیات اقلیمی از مهم‌ترین عواملی است که روی منابع آب یک منطقه تأثیر می‌گذارد و سیلاب‌های شدید متأثر، ریسک آسیب‌پذیری سازه‌های هیدرولیکی را افزایش می‌دهد. شکست یک سد خاکی، خسارت‌های فراوان مالی، جانی و محیط‌زیستی را در پایین‌دست ایجاد می‌کند (اسلامیان و همکاران، ۱۳۹۱؛ دهنوی و کوزه‌گر، ۱۳۹۸). به‌طور کلی، شکافت در یک سد خاکی به فرسایش در اثر روگذری جریان و یا رگاب مربوط می‌شود. ارزیابی وقوع و میزان آسیب‌پذیری پایین‌دست در اثر جریان ورودی به آن، ضرورت مطالعه شکست سد را افزایش داده است و بر این اساس، بسیاری از پژوهشگران به مطالعات مربوط به آن توجه کرده‌اند. خرابی در اثر روگذری جریان، متداول‌ترین حالت شکست است که بیشتر از ۴۶ درصد خرابی‌ها را دربرمی‌گیرد (اشرف و همکاران، ۲۰۱۸). هنگام شکست سد، جدا از نیروهای هیدرودینامیکی، نوع دانه‌بندی خاک، نقش اساسی در زمان تشکیل و تکامل شکافت، عرض متوسط، ارتفاع و دبی خروجی شکافت دارد (دیمن و پاترا، ۲۰۲۰). هوش مصنوعی به‌علت صرف هزینه و زمان اندک در محاسبه، ابزار مناسبی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی به شمار می‌رود. مدل‌سازی داده‌های آماری، رویکرد مناسبی برای تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به شکست‌های تاریخی است. در مطالعات اخیر، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) به‌عنوان یکی از روش‌های هوش مصنوعی، توانایی زیادی در ارزیابی فرایندهای هیدرولیکی دارد (فریرا، ۲۰۰۶؛ فرضی مرادی و همکاران، ۱۳۹۷). تاکنون استفاده کمتری از آن در مبانی فنی شکست سد مشاهده شده (ستار، ۲۰۱۳)؛ بنابراین، روش‌های رگرسیون چندمتغیره غیرخطی (MNL) نیز در این حوزه، بسیار به کار رفته است (نوری و همکاران، ۱۳۹۴). بررسی روگذری جریان در مدل‌های آزمایشگاهی همگن و غیرچسبنده نشان می‌دهد کانال شکافت، ابتدا در سطح پایین‌دست سد خاکی تشکیل می‌شود و آن را با شیب معکوسی موازی با سطح فرسایش می‌دهد. این شیب، درنهایت با چرخش پیرامون یک نقطه محوری ثابت در راستای پایه سد کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که موقعیت آن، تابعی از مقدار مصالح سد است (کلمان و همکاران، ۲۰۰۲). در مدل‌های فیزیکی، دانه‌بندی خاک، در سرعت فرسایش و افزایش ابعاد شکافت، تأثیرات عمده‌ای دارد (هانت و همکاران،

۲۰۰۵؛ موریس و همکاران، ۲۰۰۹). در سدهای خاکریزه‌ای غیرچسبنده، تنش‌های کششی موجب جابه‌جایی توده‌ها و لایه‌های خاکریزه می‌شود (چو و ژنگ، ۲۰۰۹). فرایند شکافت به‌طور کلی به دو بخش تقسیم می‌شود: مرحله آغاز شکافت و مرحله گسترش آن. در مرحله آغاز آن، جریان خروجی از سد، ناچیز و شامل روگذری اندک و یا کانال کوچکی در امتداد روزنه است؛ در حالی که در مرحله گسترش شکافت، جریان خروجی و گسترش فرسایش، زیاد و سریع است (واهل، ۱۹۹۸). پژوهش‌های زیادی درباره پدیده شکافت و دبی اوج حاصل ( $Q_p$ ) انجام شده و روابط مختلفی نیز بر مبنای ارتفاع جریان گذرنده از روی شکافت ( $H_w$ ) و حجم حاصل ( $V_w$ ) مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی و رگرسیونی توسعه داده شده است (هوشیاری‌پور و همکاران، ۲۰۱۴؛ کوستا، ۱۹۸۵؛ گوپتا و سینگ، ۲۰۱۲؛ مک‌دونالد و لانگریج مونوپولیس، ۱۹۸۴). همچنین، بررسی‌های تجربی گوناگونی برای تحلیل شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف شکافت و اجزای آن انجام شده است (تساکیریس و اسپیلیوتیس، ۲۰۱۳؛ دوریریک و همکاران، ۲۰۱۳؛ قربانی و همکاران، ۱۳۹۳؛ کریمی و اختری، ۱۳۹۵). در مطالعه‌های موردی نیز ضمن بررسی شکست فرضی، هیدروگراف‌های خروجی در پایاب رودخانه با استفاده از مدل‌های HEC-RAS و HEC-HMS روندیابی و آثار سیلاب بر پایین‌دست سد ارزیابی شده است (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۰). پژوهشگران مختلف، زمان تشکیل شکافت ( $t_f$ ) را با مربوط به عرض متوسط شکافت ( $B_{ave}$ ) (یواس‌بی‌آر، ۱۹۸۸)،  $H_w$  و یا ترکیبی از هر دو است؛ به‌گونه‌ای که در آن، فرسایش‌پذیری مصالح نیز نقش داشته است (وان‌دان و ژیلت، ۱۹۹۰)؛ هرچند ارتفاع شکافت ( $H_b$ ) و  $V_w$  نیز پارامترهای مهمی محسوب شده است (فرولیچ، ۲۰۰۸). برای تدقیق ویژگی‌های شکافت، محدوده‌هایی برای تغییرات  $B_{ave}$  به‌عنوان ارتفاع سد ( $H_d$ ) پیشنهاد شده (جانسون و ایلس، ۱۹۷۶؛ سینگ و اسنوراسون، ۱۹۸۴) و در مبانی فن،  $H_b$  نیز به‌عنوان تابعی مهم از ویژگی‌های هیدرولیکی و شکافت شناخته می‌شود (دیمن و پاترا، ۲۰۱۹؛ ونگ و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، با وجود بسیاری از مدل‌های ریاضی ارائه‌شده برای اهداف پژوهش،

## مواد و روش‌ها

### مدل‌های آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی سازوکارهای شکافت در سدهای خاکی و هیدروگراف خروجی حاصل انجام شده است. آزمایشگاه، یک مرکز تحقیقات هیدرولیک شکست سد واقع در ۴۵ کیلومتری غرب تبریز دارد. بر این اساس، محل احداث تپه‌های خاکی در آزمایشگاه از یک مجرای مستطیلی با دیواره‌های شیشه‌ای و بستر صاف سیمانی به ضرایب زبری مانینگ به ترتیب، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۱۳ ساخته شده است. مجرای مذکور، طول، عرض و ارتفاع به ترتیب، ۳/۲، ۱/۵ و ۰/۶ متر دارد و برای مطالعه دقیق فرایند فرسایش، شیشه‌های آن در تماس با مدل در ابعاد ۰/۰۵×۰/۰۵ مترمربع شبکه‌بندی شده است. مخزن بالادست نیز از کانال مستطیلی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب، ۱۰، ۲ و ۱/۲ متر (با ارتفاع عملیاتی ۰/۶ متر) تشکیل شده است. برای تنظیم جریان ورودی به بالادست از یک مخزن ذخیره کناری نیز بهره‌برداری شده و همسو با آن، دو پمپ شناور Tavan-TMR4 با مجموع دبی ۶ لیتر بر ثانیه برای تخلیه به بالادست به کار رفته است. به‌طور کلی، در فرایند آزمایش نرخ دبی ورودی، مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری سیلاب حاصل و دبی خروجی متناظر، سرریز مثلثی فلزی با برش صاف CNC، زاویه رأس ۹۰ درجه و ضخامت ۰/۰۱ متر در انتهای مخزن پایین‌دست قرار گرفته و برای تعیین تراز آب در این مخزن، سنسور اولتراسونیک Sick و دیتالاگر مربوط پیش از سرریز نصب شده است. براساس مطالعات چنسون و ونگ (۲۰۱۳)، دبی لحظه‌ای جریان ناشی از شکافت ( $Q_t$ ) با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$Q_t = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2gH^5} \quad (1)$$

که در این معادله،  $C_d$  ضریب دبی بدون بعد معادل با ۰/۵۷۷،  $g$  شتاب ثقل و  $H$  تراز آب روی سرریز خواهد بود. برای امکان مرور غیربرخط سازوکارهای فرسایش، تعداد ۴ عدد دوربین دیجیتالی Full-HD در موقعیت‌های ثابتی قرار گرفت. به‌طور کلی، روند پمپاژ، فیلم‌برداری و فرایند آزمایش از لحظه شروع روگذری جریان از تاج سد آغاز می‌شود و تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که کف شکافت بر تراز بستر منطبق شود و یا اینکه مشاهده شود تراز سرآب با تراز پایاب در یک سطح قرار گرفته است. شکل ۱، نمای جانبی تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

مدل ریاضی BREACH، که با سرویس آب‌وهوای ملی (NWS) توسعه داده شده است، یکی از کاراترین و پرکاربردترین مدل‌ها برای تعیین پارامترهای شکافت محسوب می‌شود (واهل، ۲۰۱۰)؛ به‌گونه‌ای که این مدل را تاکنون، پژوهشگران متعددی همچون حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۸)، حکیم‌زاده و همکاران (۲۰۱۴) و کوزه‌گر و همکاران (الف) (۲۰۲۱)، به‌طور موفقیت‌آمیزی برای مدل‌سازی و تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی و شکافت استفاده کرده‌اند.

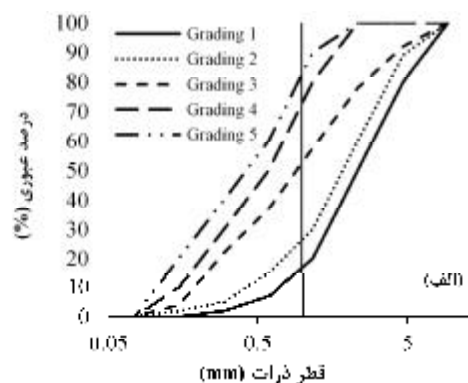
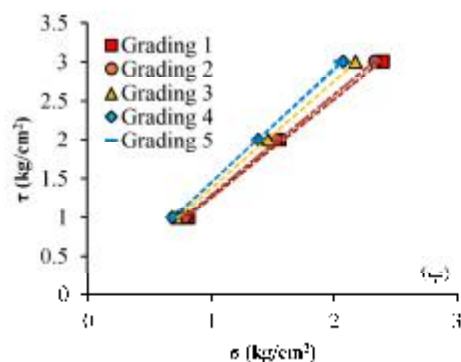
در این پژوهش به کمک تحلیل نتایج و فرایندهای آزمایشگاهی، سازوکارهای تشکیل شکافت، فرسایش و دبی خروجی مطالعه شده است. بر این اساس، چندین مدل فیزیکی در مشخصات و دانه‌بندی‌های مختلف، ساخته و ضمن اندازه‌گیری هندسه شکافت، نتیجه‌های آن در بخش‌های مختلف مقاله استفاده شده است. گفتنی است، دانه‌بندی‌های به‌کاررفته در مطالعه آزمایشگاهی حاضر در مطالعات پژوهشگران دیگر انعکاس نیافته است. همسو با این موضوع، نسبت اجزای هیدروگراف حاصل از شکافت مدل‌های آزمایشگاهی با شکافت فرضی برخی از پروتوتیپ‌های در دست بهره‌برداری و داده‌های تاریخی مقایسه شده است. برای تعیین دقیق‌تر  $Q_p$ ، از ترکیب داده‌های تاریخی، آزمایشگاهی و شکست فرضی سدهای موجود به‌عنوان مطالعه موردی به همراه مدل ریاضی BREACH استفاده شده است. وابستگی روابط مذکور در تعیین  $Q_p$  به ویژگی‌های شکافت برای اولین بار در مبانی فن مشاهده می‌شود. توسعه روابط پیشنهادی برای تعیین  $t_f$  از روی پارامترهای هیدرولیکی و شکافت، کارایی مناسب‌تری نسبت به روابط موجود دارد. در ادامه این پژوهش، محدوده تغییرات جدیدی برای  $B_{ave}$  معرفی شده است؛ به‌گونه‌ای که نقص‌های مطالعات پیشین را برطرف می‌کند. مطالعه  $H_b$  از روی پارامتر بدنه و مخزن، بیشترین دقت و کمترین خطا را به‌ازای بیشترین رکورد از داده‌های تاریخی ارائه می‌کند. همچنین، در این مطالعه از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، تحلیل‌های رگرسیونی و تلفیقی از هر دو بهره‌برداری شده؛ به‌گونه‌ای که کاربرد GEP، به‌ندرت در مطالعات شکست سد دیده شده است.

آزمایش پروکتور استاندارد، نرخ فرسایش را به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. در غیر این صورت، وقوع فرسایش پس‌رونده پلکانی حین آزمایش، پرهیزناپذیر است. در این پژوهش، عرض تاج در همه مدل‌ها، ۰/۱ متر و شیب‌های بالادست و پایین‌دست (۱ عمودی؛ ۲/۵ افقی) در نظر گرفته شده است. مطالعات گذشته نشان داد کاهش شیب در هر دو وجه، تأثیر زیادی در مقادیر  $Q_p$  یا هیدروگراف خروجی ندارد (والدر و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، برای تعیین موقعیت شروع فرسایش در تاج باید کانالی هادی به طول، عرض و عمق به ترتیب، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ متر در میانه تاج لحاظ شود. مدل‌های فیزیکی مذکور از پنج نوع ترکیب مختلف از سنگ‌دانه‌ها در سه ارتفاع ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ متر در آزمایشگاه ساخته شد. منحنی‌های دانه‌بندی مدل‌های آزمایشگاهی در شکل ۲ (الف) ارائه شده است. همچنین شکل ۲ (ب)، نتایج آزمایش‌های پروکتور استاندارد (ASTM-D698) را همراه با نتایج آزمایش برش مستقیم (ASTM-D3080) نشان می‌دهد. به این صورت، برای رسیدن به منحنی‌های دانه‌بندی این مطالعه، حدود ۱۶ تن مصالح دانه‌ای خشک از الک‌های آزمایشگاهی عبور داده شد و با دقت ۱۰ گرم توزین و دوباره مخلوط شد. جدول ۱، ویژگی‌های فنی مصالح را همراه با ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی در نظر می‌گیرد.



شکل ۱- اجزاء مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه، تعداد پارده مدل مختلف در آزمایشگاه ساخته شد و تحت روگذری جریان، مقادیر و اجزای هیدروگراف خروجی شکافت، دبی اوج به همراه سایر ویژگی‌های شکافت استخراج شد. هر آزمایش برای اطمینان از تکرارپذیری و دستیابی به نتایج یکسان، دو بار انجام شد. مشاهدات نشان داد شباهت زیادی بین اجزای هیدروگراف، سازوکارهای فرسایش و ویژگی‌های شکافت در بین دو آزمایش وجود دارد. برای رسیدن به تراکم استاندارد و رطوبت مطلوب، لایه‌های خاک در مدل‌های آزمایشگاهی با ضخامت ۰/۰۵ متر با غلتک دستی منطبق بر آزمایش استاندارد پروکتور متریک شد. براساس یافته‌های هانسون (۲۰۰۵)، رساندن تراکم خاک به نتایج



شکل ۲- نتیجه آزمایش‌های مکانیک خاک در نمونه‌های آزمایشگاهی: الف- منحنی دانه‌بندی، ب- برش مستقیم

توسط سرویس اب‌وهوای ملی ارائه شده و بر اصول هیدرولیک، هیدرولوژی و ژئوتکنیک مبنی است. مدل مذکور، شکن بازشدگی، زمان شکست، هیدروگراف‌های سیل خروجی و تراز پایاب را محاسبه می‌کند. نتایج حاصل

#### مدل ریاضی BREACH

مدل ریاضی BREACH، یکی از متداول‌ترین مدل‌های موجود برای ارزیابی پارامترهای شکافت و هیدروگراف خروجی در سدهای خاکی به شمار می‌رود. این مدل

و ذرات مصالح سد در عرض تاج سد به سمت شیب بالادست حرکت می‌کند (سینگ، ۲۰۱۳). با در نظر گرفتن نوع فرسایش در مدل BREACH، شکافت به صورت ذوزنقه‌ای است و یا اگر از روش فرسایش‌محور استفاده شود، به صورت یک شکست دوار جوشی شروع است (وزیری و ایزدی‌نیا، ۱۳۹۹). در این پژوهش، از این مدل برای تعیین هیدروگراف خروجی و پارامترهای حاصل از شکست فرسایشی سدهای تاریخی و فرضی سدهای به‌کاررفته به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شده است.

از مدل با مشاهدات برخی از شکست‌های معروف تاریخی مقایسه شده که نشان‌دهنده دقت زیاد مدل در محاسبات مربوط به شکافت است. جریان داخل کانال در حالت روگذری جریان با فرمول سرریز لبه‌پهن و در حالت رگاب با معادله روزنه شبیه‌سازی می‌شود. برای آغاز مدل‌سازی در اثر روگذری جریان باید تراز آب در مخزن پیش از شروع فرسایش در بالای سد باشد (حسن‌زاده، ۱۳۸۳). زمانی که کانال شکست، شیب پایین‌دست را فرسایش می‌دهد، تراز کف کانال شکست در بالای سد باقی می‌ماند

جدول ۱- مدل‌های آزمایشگاهی و مشخصات فنی آنها

ردیف آزمایش	شماره دانه‌بندی	$H_d$ (m)	$V_w$ (m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	$D_{50}$ (mm)
۱	۱	۰/۳	۶/۳۵۲۵	۳۸/۳	۰/۰۲	۲/۳۶۰۰
۲	۲	۰/۳	۶/۳۵۲۵	۳۷/۶	۰/۰۲	۱/۹۶۶۶
۳	۳	۰/۳	۶/۳۵۲۵	۳۵/۸	۰/۰۲	۰/۹۶۷۰
۴	۴	۰/۳	۶/۳۵۲۵	۳۴/۶	۰/۰۰	۰/۶۰۰۰
۵	۵	۰/۳	۶/۳۵۲۵	۳۴/۲	۰/۰۲	۰/۴۵۰۰
۶	۱	۰/۴	۸/۴۲	۳۸/۳	۰/۰۲	۲/۳۶۰۰
۷	۲	۰/۴	۸/۴۲	۳۷/۶	۰/۰۲	۱/۹۶۶۶
۸	۳	۰/۴	۸/۴۲	۳۵/۸	۰/۰۲	۰/۹۶۷۰
۹	۴	۰/۴	۸/۴۲	۳۴/۶	۰/۰۰	۰/۶۰۰۰
۱۰	۵	۰/۴	۸/۴۲	۳۴/۲	۰/۰۲	۰/۴۵۰۰
۱۱	۱	۰/۵	۱۰/۴۶۲۵	۳۸/۳	۰/۰۲	۲/۳۶۰۰
۱۲	۲	۰/۵	۱۰/۴۶۲۵	۳۷/۶	۰/۰۲	۱/۹۶۶۶
۱۳	۳	۰/۵	۱۰/۴۶۲۵	۳۵/۸	۰/۰۲	۰/۹۶۷۰
۱۴	۴	۰/۵	۱۰/۴۶۲۵	۳۴/۶	۰/۰۰	۰/۶۰۰۰
۱۵	۵	۰/۵	۱۰/۴۶۲۵	۳۴/۲	۰/۰۲	۰/۴۵۰۰

$H_d$  ارتفاع مدل،  $V_w$  حجم آب گذرنده از روی شکافت،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی، C چسبندگی مصالح و  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات

در معادلات اخیر،  $Q_{s,i}$  و  $Q_{o,i}$  به ترتیب، دبی محاسباتی و مشاهداتی،  $\bar{Q}_o$  و  $\bar{Q}_s$  به ترتیب، دبی میانگین محاسباتی و مشاهداتی،  $i$  گام زمانی و  $n$  تعداد گام‌های زمانی است.

### داده‌های تاریخی

داده‌های تاریخی حاصل از شکست سدهای خاکی، با وجود محدودیتشان، اطلاعات ارزشمندی درباره چگونگی فرسایش و خرابی ارائه می‌کند. در پژوهش حاضر، بیشترین تعداد داده تاریخی، شامل ۱۰۱ رکورد با پارامترهای معین مربوط به شکست در اثر روگذری جریان و رگاب از پایگاه‌های داده‌های گوناگون گردآوری و مطالعه شده است (واهل، ۱۹۹۸؛ چو و ژنگ، ۲۰۰۹؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۶).

### نتایج و بحث

### ارزیابی کارایی مدل

شاخص‌های آماری برای ارزیابی کارایی مدل به کار می‌رود. بدین منظور، از سه شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) به صورت معادلات (۲) تا (۴) در پژوهش حاضر استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2} \quad (2)$$

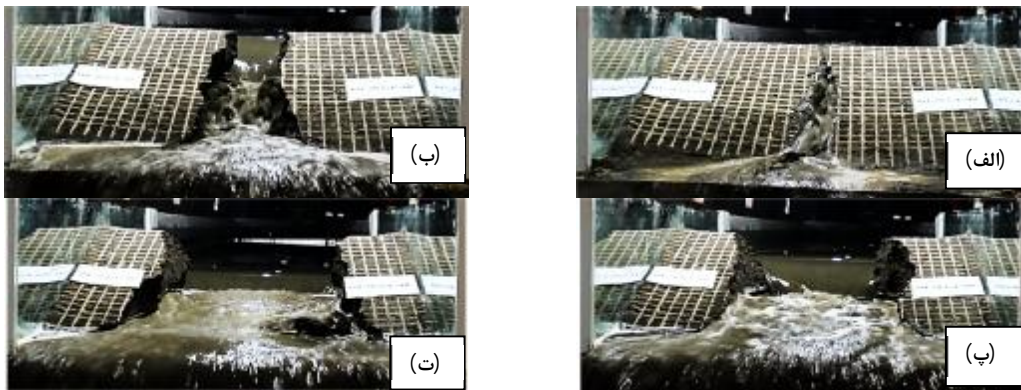
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)(Q_{o,i} - \bar{Q}_o)]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (4)$$

## یافته‌های آزمایشگاهی

مطابق آنچه در بخش «مدل‌های آزمایشگاهی» بیان شد، برای مطالعه سازوکار فرسایش، از نتایج آزمایشگاهی این پژوهش استفاده شده است. براساس این نتایج، افزایش قطر متوسط ذرات ( $D_{50}$ ) به کاهش زمان تغییر شکل شکافت منجر شد که این امر در تطابق با یافته‌های (چیناراسلی و همکاران، ۲۰۰۴؛ کلمان و همکاران، ۲۰۰۲) است؛ به‌عنوان نمونه، این زمان، که نقش مهمی در تکامل شکافت دارد (برای مدل‌هایی به ارتفاع ۰/۵ متر) در دانه‌بندی ۱ حدود ۲ دقیقه است؛ در حالی که مقدار آن در دانه‌بندی ۵ فراتر از ۵ دقیقه مشاهده شده است. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد به‌طور عمده، فرسایش در دو مرحله سطحی و آب‌کنندی انجام می‌شود. فرسایش از نقطه‌ای آغاز می‌شود که تنش کششی بیش از مقاومت بحرانی باشد که موجب نگهداری مصالح در موقعیت اصلی خود می‌شود. ابتدا، در پایین‌دست، شبکه‌ای از نهرها تشکیل می‌شود و با افزایش فرسایش‌پذیری خاک، تعداد این نهرها افزایش می‌یابد. در نهایت، این نهرهای کوچک، جریان به‌هم‌پیوسته و یک نهر اصلی را تشکیل می‌دهد. این مرحله از فرسایش، آهسته و در آن سطح فرسایش با راستای تاج و وجه پایین‌دست منطبق است. حرکت فرسایش به بالادست با مقطع هندسی ثابت انجام می‌شود و با حرکت شیب پایین‌دست و برخورد آن با لبه تاج در بالادست، علاوه بر گسترش جانبی و فرسایش به سمت پایین، به تشکیل جوی اصلی و فرسایش آب‌کنندی منجر می‌شود. این نوع فرسایش باعث پایین‌آوردن تراز تاج مخزن می‌شود که با یافته‌های هان و همکاران، ۲۰۰۰؛ هانسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ والدر و همکاران، ۲۰۱۵ مطابقت دارد. غیرچسبندگی سنگ‌دانه‌ها موجب ایجاد جریان تراوش در وجه پایین‌دست و از این‌رو، لغزش‌های سطحی تسریع می‌شود. این امر سبب می‌شود مصالح دانه‌ای به‌صورت لایه‌به‌لایه حذف شود. گفتنی است، تراکم استاندارد در این زمینه و کاهش فرسایش، نقش اساسی دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد افزایش تراکم از ۹۵ درصد به ۱۰۲ درصد مقدار استاندارد آن می‌تواند فرسایش را در نمونه‌های آزمایشگاهی به نصف تقلیل دهد (پاولج و دوج، ۱۹۸۵). پیش از گسترش عرض شکافت، مقدار  $H_b$  به سمت  $H_d$  میل می‌کند و تقریباً در تمام نمونه‌ها، اختلاف

اندکی بین این دو مشاهده شده است. همچنین،  $B_{ave}$  در نمونه‌های آزمایشگاهی بین ۲ تا ۴ برابر ارتفاع مدل در حالت روگذری جریان ارزیابی می‌شود. شیب دیواره‌های شکافت در بیشتر رویدادهای تاریخی بین مثلث تا دوزنقه متغیر است؛ هرچند در این مشاهدات آزمایشگاهی مقطع دوزنقه‌ای با شیب تند دیواره‌ها مستند شده است. به دنبال اولین شکست در سطح، حفره‌های آب‌شستگی در اثر فرسایش پس‌رونده شروع به ریزش می‌کند. تداوم این شرایط به افزایش سرعت جریان و تنش برشی در چاله فرسایشی منجر می‌شود. پایداری ذرات به‌طور مستقیم به قطر، جنس، میزان تراکم و مقاومت کف حفره آب‌شستگی بستگی دارد. شکل ۳، ویژگی‌های فرسایش در یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی به ارتفاع ۰/۵ متر (آزمایش شماره ۱۰) را به ترتیب در بازه‌های زمانی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ ثانیه از ابتدای فرسایش نمایش می‌دهد. هر کدام از شبکه‌های مربع‌شکل واقع در شیب پایین‌دست، نشان‌دهنده  $0.05 \times 0.05$  مترمربع است. مهاجرت در فرسایش پس‌رونده به مجموعه‌ای از خرابی جرمی گسسته اطلاق می‌شود (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸). گسترش جانبی شکافت به سمت دیواره‌های مجرای شیشه‌ای با جداسازی ذرات و توده‌های درشت همراه است و این ویژگی با خصوصیات مکانیکی خاک و ابعاد هندسی سد مرتبط است. سقوط این اجرام، تغییر محسوسی در دبی عبوری ایجاد نمی‌کند (شکل ۳ (ت)). سقوط این توده‌ها به درون جریان دوفازه حاصل از فرسایش متقارن نیست؛ اما تشکیل کانال فرسایشی و گسترش جانبی، تقارن مناسبی دارد. مشاهدات نشان می‌دهد گسترش عرض شکافت در هنگام رسیدن به دبی اوج هنوز به مقدار نهایی خود نرسیده است. پژوهش حاضر روی مدل‌های فیزیکی همگن با مصالح دانه‌ای نشان می‌دهد فرسایش در وجه پایین‌دست، نسبتاً یکنواخت است، سرعت جریان خروجی با کاهش قطر ذرات نسبت مستقیم دارد که در مصالح نفوذپذیر این نرخ افزایش می‌یابد. افزایش تراز مخزن،  $H_d$  و وزن مخصوص ماکزیمم ( $\gamma_{dmax}$ ) نیز تأثیر مستقیمی بر سرعت جریان خروجی در مدل‌های آزمایشگاهی داشته است که این مورد با یافته‌های موریس و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد.



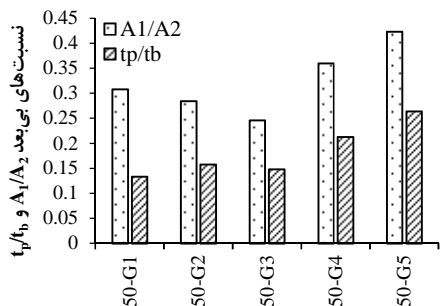
شکل ۳ - تکامل شکافت در بازه‌های زمانی مختلف در نمونه آزمایشگاهی شماره ۱۰: الف - ۵۰ ثانیه، ب - ۱۰۰ ثانیه، پ - ۱۵۰ ثانیه، ت - ۲۰۰ ثانیه

شکافت افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که در مصالح درشت‌دانه با کاهش  $A_1$ ، این عرض، تأثیر زیادی بر کاهش زمان تشکیل شکافت دارد. شکل ۵، نسبت‌های اخیر را در هیدروگراف حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی و پروتوتیپ‌های مختلف مقایسه می‌کند. کاهش مقادیر  $A_1$  و  $t_p$  در قیاس با  $A_2$  و  $t_b$  می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش زمان در برنامه‌های اقدام اضطراری (EAP) بگذارد و در پی آن، آسیب‌پذیری سازه‌های پایین‌دست را افزایش دهد. مقادیر اندک این نسبت‌ها در پوشش گیاهی متراکم، دما و نفوذپذیری اندک سطوح، کهولت و تجمع رسوبات در بستر رودخانه مشاهده می‌شود. همچنین، تحلیل رکوردهای تاریخی نشان می‌دهد افزایش حجم و ارتفاع مخزن و در نتیجه، افزایش  $H_w$  متناظر با آن، نسبت  $A_1/A_2$  را کاهش می‌دهد و از این‌رو، قابلیت نجات ساکنان پایین‌دست را، که در معرض خطر هستند، با دشواری مواجه می‌کند.

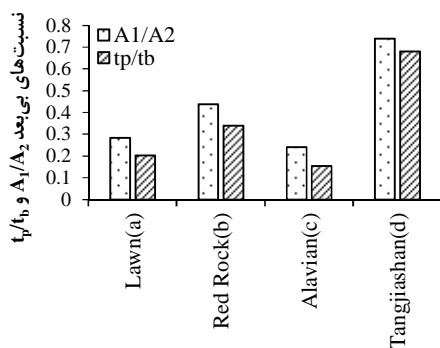
### شبیه‌سازی دبی اوج براساس ویژگی‌های شکافت و مطالعه موردی

در بررسی میزان دبی اوج در هنگام خرابی یک سد، که باعث خسارت‌های زیادی به سکونتگاه‌های پایین‌دست می‌شود و طراحی باید براساس معیارهای آن انجام شود، طیف گسترده‌ای از خرابی‌های سد را با ترکیب منابع مختلف داده باید بررسی کرد. استفاده از چندین مجموعه داده، ضمن پوشش‌دادن کاستی‌های هر روش، آن را به‌روزرسانی کرده، و بدین‌ترتیب، ارزیابی درستی از فرایند فرسایش ارائه می‌کند. گروه اول، داده‌های تاریخی را دربرمی‌گیرد؛ رکوردهای واقعی از خرابی سدهای خاکی

شکل ۴، هیدروگراف‌های حاصل از شکافت را در مدل‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. مقایسه نتایج بیان می‌کند کاهش چسبندگی (C) باعث افزایش دبی اوج و نیز فرایند فرسایش می‌شود که این امر در دانه‌بندی ۴ مشهود است؛ زیرا با کاهش چسبندگی به میزان  $0.2$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، هیدروگراف خروجی در دانه‌بندی ۴، افزایش زیادی پیدا می‌کند. در این دانه‌بندی، مقادیر  $H_b$  تقریباً منطبق بر  $H_d$  بوده است. همچنین، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) به میزان  $4/1$  درجه نرخ فرسایش، فرایند شکافت و عمق نهایی آن، به‌شدت دچار تأخیر می‌شود. براساس داده‌های آزمایش برش مستقیم، افزایش قطر  $D_{50}$  موجب افزایش تنش برشی  $\tau$  و کاهش زمان تغییر شکل شکافت می‌شود که مطالعات چیناراسلی و همکاران (۲۰۰۴) را تأیید می‌کند. تحلیل بازوهای صعودی و نزولی هیدروگراف‌های مختلف حاصل از شکافت مدل‌های آزمایشگاهی، برخی از رکوردهای معروف تاریخی در دسترس و نیز شکست فرضی سدهای در حال بهره‌برداری، که در این پژوهش با مدل ریاضی BREACH تولید شده است، نشان می‌دهد نسبت‌های  $A_1/A_2$  و  $t_p/t_b$  با کاهش قطر ذرات افزایش می‌یابد.  $A_1$  و  $A_2$  به‌ترتیب، مساحت زیرمنحنی (AUC) در بازوهای صعودی و نزولی است. با لحاظ‌کردن وزن مخصوص ماکزیمم در مدل‌های فیزیکی، نفوذپذیری کلی تقلیل می‌یابد و کاهش فاصله ذرات، به‌ویژه در خاک‌های ریزدانه موجب کاهش تخلخل مؤثر و آبدهی ویژه می‌شود. همچنین، این امر موجب می‌شود نیروهای بین ذرات و مقاومت چسبندگی سنگ‌دانه‌ها افزایش یابد که می‌تواند باعث افزایش نسبت  $t_p/t_b$  شود. نرخ دبی جریان با افزایش ناگهانی هندسه



الف) مدل‌های فیزیکی به ارتفاع 50 سانتی‌متر و به ترتیب شماره دانه‌بندی

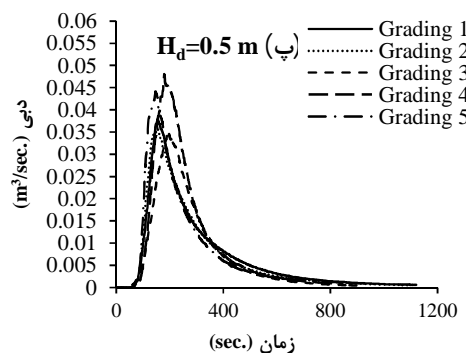
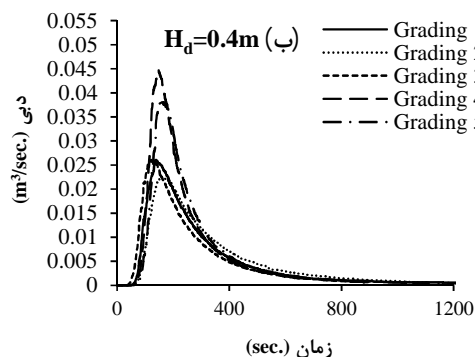
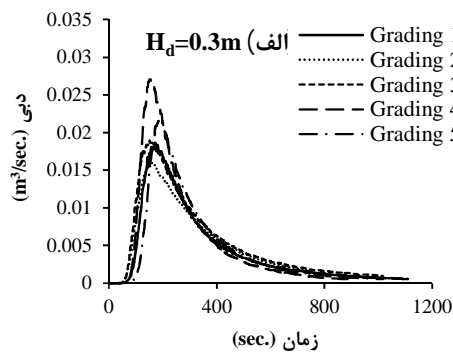


ب) پروتوتیپ‌های مطالعه موردی

حالت‌های شکست: (a) رگاب، (b) روگذری جریان، (c) شکست فرضی روگذری جریان و (d) روگذری جریان (سد طبیعی)  
 شکل ۵- نسبت‌های  $A_1/A_2$  و  $t_p/t_b$  در مدل‌های آزمایشگاهی و پروتوتیپ‌های مطالعه موردی

بررسی شکست فرضی یک سد به برآورد بهتر خصوصیت‌های جریان خروجی و ویژگی‌های شکافت کمک می‌کند؛ با این حال، این داده‌های شبیه‌سازی‌شده، مصنوعی و محدود است؛ اما در انطباق با رکوردهای تاریخی، تقریباً مشخصات فنی یکسانی دارد. پیش‌بینی حداکثر سیل احتمالی (PMF) در حوضه بالادست و هیدروگراف جریان ورودی مربوط نیاز دارد. این هیدروگراف جریان را با استفاده از یک مدل عددی و یا یک بسته نرم‌افزاری می‌توان تعیین کرد. در مطالعه موجود، هیدروگراف مربوط با HEC-RAS تعیین و به‌عنوان جریان ورودی به مدل ریاضی BREACH معرفی و سپس خصوصیات شکافت و هیدروگراف خروجی حاصل از شکست با استفاده از مدل ریاضی BREACH و در برخی از موارد با کاربرد روابط تجربی موجود استخراج شد.

موجود در سرتاسر گیتی با گستره‌های مختلف جغرافیایی. این داده‌ها، اطلاعات ارزشمندی درباره خصوصیت‌های هیدرولیکی، شکافت و ابعاد سد و نیز فرایندهای فرسایش ارائه می‌کند؛ ولی گاهی به‌علت نبود امکانات مناسب در لحظه فرسایش، محدود و ناقص ثبت می‌شود. گروه دوم، شامل بررسی شکست فرضی سدهای خاکی واقعی است که از سه استان اردبیل، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی واقع در شمال غرب ایران جمع‌آوری شده و به‌عنوان مطالعه موردی این پژوهش به کار رفته است. مشخصات مختصر این سدها در جدول ۲ بیان شده است.



شکل ۴- هیدروگراف‌های خروجی حاصل از شکافت مدل‌های آزمایشگاهی



دارد. تحلیل واریانس‌ها با روش اخیر در درک تفاوت بین گروه‌های آماری کمک زیادی می‌کند. برای این منظور از ابزار One-Way ANOVA برای بررسی همگنی واریانس‌ها و تحلیل متغیرهای کمی در نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. نتایج فرضیه تھی در واریانس‌های برابر، ارتباط مناسبی بین سه گروه از جامعه آماری ارائه و یک‌دست‌بودن مجموعه داده را تأیید می‌کند ( $p=0.06 > 0.05$ ). برای توسعه روابط تجربی و برآورد ویژگی‌های اصلی شکافت و جریان عبوری از مدل‌های GEP و MNLR استفاده شده است. بر این اساس، داده‌های گروه‌های مختلف به دو بخش آموزش و صحت‌سنجی تقسیم‌بندی شد. جدول ۳، اطلاعاتی کلی درباره خصوصیات آماری داده‌های کاربردی در مراحل آموزش و صحت‌سنجی ارائه می‌کند.

گفتنی است، مدل BREACH به علت ساده‌سازی‌هایی که در شبیه‌سازی فرایند فرسایش و انتقال رسوب ایجاد می‌کند، محدودیت‌هایی دارد (کوزه‌گر و همکاران، ۲۰۲۱). گروه سوم داده‌ها، دربردارنده مدل‌های فیزیکی است. این ساختارهای کوچک‌مقیاس، مدل‌های ساده‌شده‌ای از نمونه‌های اصلی است که مشخصات فنی آنها را دنبال می‌کند. همانگونه که پیش‌تر در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، مدل‌های مذکور در آزمایشگاه با مشخصات فنی مختلف و ارتفاع گوناگون ساخته می‌شود، تحت روگذری جریان قرار می‌گیرد و ویژگی‌های هیدرولیکی و شکافت به همراه هیدروگراف خروجی جریان در آنها اندازه‌گیری می‌شود. برای استفاده از مجموعه داده‌های سه گروه آماری مختلف، باید آزمون همگنی داده‌ها به کار برود. در این زمینه از آزمون Levene استفاده شد که برای سه جمعیت آماری یا بیشتر کاربرد

جدول ۲- نام و مشخصات پروتوتیپ‌های مطالعه موردی

ردیف	نام سد	رودخانه	$H_d$ (m)	$S$ ( $\times 10^6 m^3$ )
(استان اردبیل)				
۱	علمدار	ارس	۲۲	۰/۳۲
۲	خانقاه	بفراچرد	۳۰	۶/۹
۳	سرخاب	ارس	۱۵	۱/۵
(استان آذربایجان شرقی)				
۴	امند	آچی‌چای	۲۴	۲/۴
۵	اردلان	چکی‌چای	۱۹	۴/۵
۶	پارام	پارام‌چای	۳۴	۳/۶
۷	زنوز	زنوز‌چای	۶۰	۶
(استان آذربایجان غربی)				
۸	دانالو	ساری‌سو-ارس	۳۷	۲/۳
۹	جلدیان	جلدیان	۳۳	۱/۲
۱۰	کانسیبی	نازلو	۲۶	۰/۵۲

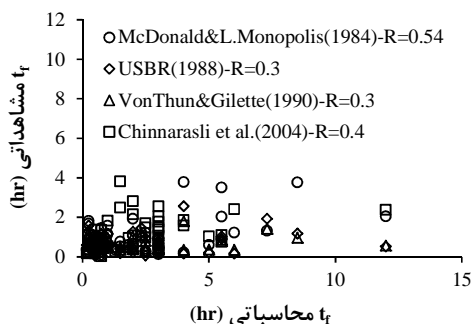
$H_d$  ارتفاع سد و  $S$  ذخیره مخزن بالادست

جدول ۳- توزیع‌های آماری ویژگی‌های شکافت و جریان در پروتوتیپ‌ها و مدل‌های فیزیکی

داده‌های آموزش (۷۵% کل)	$H_b$ (m)	$B_{ave}$ (m)	$Q_p$ ( $m^3/sec$ )
ماکزیمم	۵۶/۴	۱۸۶	۸۲۶۶/۳
مینیمم	۰/۲۵۸۰	۰/۷۵۶۳	۰/۰۱۵۹
میانگین	۱۳/۹۴	۴۵/۷۸	۱۵۲۴/۰۲
انحراف معیار	۱۲/۴۵	۴۶/۲۲	۲۰۴۷/۹۶
ضریب تغییرات	۰/۸۹۳۰	۱/۰۰۹۵	۱/۳۴۳۷
داده‌های صحت‌سنجی (۲۵% کل)	$H_b$ (m)	$B_{ave}$ (m)	$Q_p$ ( $m^3/sec$ )
ماکزیمم	۳۵	۱۶۸	۷۲۰۰
مینیمم	۰/۲۹	۰/۶۴۱۳	۰/۰۱۸۶
میانگین	۱۲/۹۴	۴۷/۶۱	۱۴۴۸/۹۳
انحراف معیار	۱۱/۰۷	۱۷/۸۵	۱۹۵۹/۸۲
ضریب تغییرات	۰/۸۵۵۸	۱/۰۰۵۱	۱/۳۵۲۵

$H_b$  عمق شکافت،  $B_{ave}$  عرض متوسط شکافت و  $Q_p$  دبی اوج شکافت

شکل ۷، میزان پراکندگی مقادیر مشاهداتی را در برابر مقادیر محاسباتی به‌زای ۵۱ رکورد از داده‌های تاریخی نشان می‌دهد.



شکل ۷- منحنی پراکندگی مقادیر مشاهداتی در برابر محاسباتی  $t_f$  ارائه‌شده توسط پژوهشگران مختلف

در این پژوهش، ارتباط ویژگی‌های شکافت، بدنه و جریان عبوری، به‌طور جداگانه و توأم روی تمام رکوردهای موجود بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد وابستگی این زمان به یک پارامتر مستقل، به‌تنهایی نمی‌تواند مبنای ارزیابی دقیقی قرار گیرد. براساس مشاهدات، کمترین وابستگی  $t_f$  به  $V_{er}$  و بیشترین آن مربوط به اثر توأم  $H_w$  و  $V_w$  بوده است؛ بنابراین، معادلات (۷) و (۸)، که از رگرسیون غیرخطی به دست آمده است، بیشترین همگرایی را در بین مجموعه داده‌های موجود ایجاد می‌کند. شکل ۸ نیز توزیع آماری مربوط به رابطه‌های اخیر را بیان می‌کند.

$$t_f = 0.001V_w^{0.967}H_w^{-0.781}B_{ave}^{-1.426} \quad (۷)$$

$$t_f = 0.001V_w^{0.896}H_w^{-0.977}H_b^{0.332}B_{ave}^{-1.317} \quad (۸)$$

مقدار ضرایب  $R^2$ ، NSE و RMSE برای معادله (۷) به ترتیب،  $۰/۸۶۸۸$ ،  $۰/۷۷۷۹$  و  $۰/۶۵۲۹$  و برای معادله (۸) به ترتیب،  $۰/۸۷۷۳$ ،  $۰/۸۳۹۴$  و  $۰/۵۵۵۳$  به دست می‌آید.

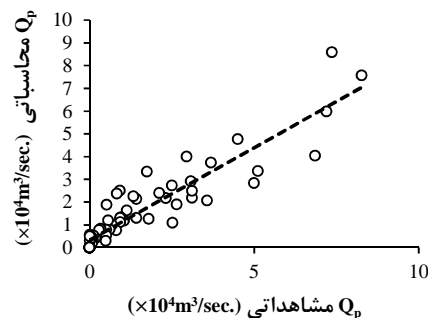
#### شبیه‌سازی عرض متوسط شکافت

عرض نهایی شکافت و نرخ گسترش عرض آن تا حد زیادی بر دبی اوج خروجی و در نتیجه، سیلاب پایین‌دست تأثیر می‌گذارد. در مطالعه حاضر برای تعیین  $B_{ave}$  براساس مجموعه دیتابیس موجود، مشخص شد  $۴۸/۹۳$  درصد داده‌ها در محدوده ارائه‌شده جانسون و ایلس (۱۹۷۶) قرار دارد که در آن،  $0.5H_d \leq B_{ave} \leq 3H_d$  است؛ در حالی که این مقادیر در محدوده توصیه‌شده سینگ و اسنوراسون (۱۹۸۴)، یعنی  $2H_d \leq B_{ave} \leq 5H_d$  معادل  $۴۸/۸$  بوده است

اگرچه پارامترهای مختلفی در زمینه شکافت و ویژگی‌های جریان حین خرابی یک سد دخیل است، مدل GEP به‌طور خودکار، متغیرهای ورودی را، که بیشترین تأثیر را بر مدل دارد، انتخاب می‌کند؛ از این‌رو، معادلات (۵) و (۶)، که به ترتیب با GEP و MNLر به دست آمده است،  $Q_p$  را تابعی از خصوصیات شکافت در نظر می‌گیرد. شکل ۶، توزیع آماری معادلات پیشنهادی را ارائه می‌کند و مقدار ضرایب  $R^2$ ، NSE و RMSE برای معادله (۵) به ترتیب،  $۰/۸۴$ ،  $۰/۸۴$  و  $۷۹۸/۳۵$  و برای معادله (۶) به ترتیب،  $۰/۸۴$ ،  $۰/۸۴$  و  $۷۹۴/۸۹$  و تعداد داده‌های پرت برای هر دو حالت، ۱۱ داده بیان می‌شود.

$$Q_p = 21.9522H_bB_{ave}^{0.4} \quad (۵)$$

$$Q_p = 18.461H_b^{1.038}B_{ave}^{0.408} \quad (۶)$$



شکل ۶- منحنی پراکندگی مقادیر مشاهداتی در برابر محاسباتی با معادلات (۵) و (۶) برای تعیین  $Q_p$

#### شبیه‌سازی زمان شکافت با استفاده از ابعاد سد و ویژگی‌های هیدرولیکی

زمان تشکیل شکافت، مدت‌زمان از آغاز اولین شکافت در بالادست تاج سد تا تکامل نهایی آن را تشکیل می‌دهد و یکی از مهم‌ترین خصوصیات شکست سد به شمار می‌آید، نقش مهمی در برنامه اقدام اضطراری و تخلیه ساکنان پایین‌دست دارد و در حالت روگذری جریان از شکل‌گیری فرسایش در پایین‌دست تا نفوذ شکافت به عرض تاج در نقطه بالادست تعریف می‌شود. چنانکه در مقدمه گفته شد، پژوهشگران مختلفی زمان شکافت را بررسی کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که برخلاف  $Q_p$ ، در هیچ‌کدام از پارامتر مشترک و یکسانی استفاده نشده است. هرچند مرور رکوردهای تاریخی نشان می‌دهد زمان خرابی در بسیاری از رویدادها ثبت نشده است، پژوهشگران مختلف، زمان مذکور را تابعی از ویژگی‌های هیدرولیکی و شکافت در نظر گرفته‌اند.

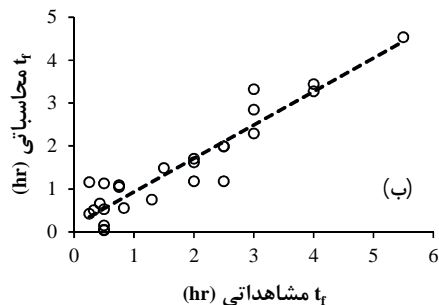
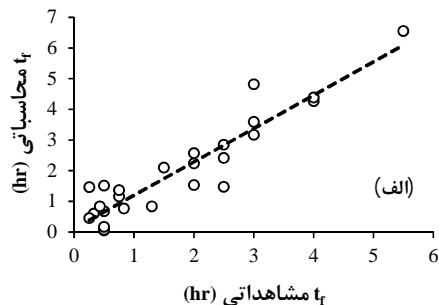
حالت رگاب، حدود ۱۸ درصد است. در پژوهش‌های دیمین و پاترا (۲۰۱۹) علاوه بر مطالعه حالت‌های مختلف فرسایش‌پذیری سد خاکی،  $H_b$  به‌عنوان تابعی از  $S$ ،  $H_d$  و  $E_w$  در نظر گرفته شده است و در پژوهش‌های ونگ و همکاران (۲۰۲۰)، ضمن طبقه‌بندی نوع شکافت، تابعی از  $H_w$  دانسته شد. معادلات مزبور به همراه شاخص‌های آماری در جدول ۴ انعکاس یافت.

در این پژوهش، معادلات (۱۰) و (۱۱)، که با GEP به دست آمده است، در مقایسه با رابطه‌های پیشنهادی قبلی، مقادیر معقولی را به‌ترتیب، برای ۴۸ و ۳۸ رکورد مطالعاتی موجود از حالت‌های روگذری جریان و رگاب به‌طور جداگانه پیشنهاد می‌کند. شکل ۹، شاخص‌های کارایی معادلات پیشنهادی اخیر را نشان می‌دهد.

$$H_b = 0.96052H_d^{179}S^{1/180} \quad (10)$$

$$H_b = 0.56608H_d^{0.85}S^{0.06} \quad (11)$$

مقدار ضرایب  $R^2$ ، NSE و RMSE برای معادله (۱۰) به‌ترتیب، ۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۱/۲۸ و برای معادله (۱۱) به‌ترتیب، ۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۲/۰۲ است.



شکل ۸- منحنی پراکندگی مقادیر مشاهداتی در برابر محاسباتی با روابط پیشنهادی برای تعیین  $t_r$ :  
الف- معادله (۷)، ب- معادله (۸)

(جانسون و ایلس، ۱۹۷۶؛ سینگ و اسنوراسون، ۱۹۸۴). یافته‌های پژوهش اخیر نشان می‌دهد مقادیر  $B_{ave}$  در بیشتر از ۹۲ درصد رکوردهای مطالعاتی برابر ۱۲/۶ درصد عرض تحتانی شکافت ( $B_b$ ) را تشکیل داده است؛ در حالی که این سهم برابر با ۶۳/۶ درصد عرض فوقانی شکافت ( $B_t$ ) در بیشتر از ۸۰ درصد داده‌های مطالعاتی است. رکوردهای به‌کاررفته، از «داده‌های تاریخی» موجود در مبانی فن به دست آمده است و این یافته‌ها با نتایج آزمایشگاهی نیز سازگاری دارد. همچنین، در بانک اطلاعاتی ارائه‌شده ژنگ و همکاران (۲۰۱۶)، فرسایش‌پذیری سدهای تاریخی نیز لحاظ شده است و بررسی این رکوردها نشان می‌دهد نسبت  $H_b$  به  $H_d$  در سدهای خاکی با فرسایش‌پذیری بالا (HE) در محدوده ۰/۹۱ تا ۱/۲۳ قرار دارد؛ در حالی که این نسبت برای سدهای با فرسایش‌پذیری متوسط (ME) در بازه ۰/۷۴ تا ۱/۱۲۵ و برای سدهای با فرسایش‌پذیری اندک (LE) بین ۰/۵۴ و ۱ متغیر است. همچنین، نسبت‌های مذکور بیان می‌کند در سدهای HE علاوه بر فرسایش بستر، فونداسیون نیز از جریان دوفازه متأثر است. سطح شکافت نیز از مقطع مثلثی تا ذوزنقه‌ای متغیر است؛ اما مقطع نهایی شکافت به‌جز سد سنگریزه‌ای Swift تقریباً در تمام نمونه‌ها ذوزنقه‌ای باقی مانده است. نسبت  $B_{ave}$  به  $H_d$  در سدهای HE در محدوده ۱/۱۲۹ تا ۱۱/۸۷ قرار دارد؛ در حالی که این نسبت در سدهای ME بین ۱/۲۴ و ۵/۹۹ و در سدهای LE بین ۰/۷ و ۴/۶۶ متغیر است و نشان داد  $B_{ave}$  عاملی تعیین‌کننده در فرایند فرسایش به شمار می‌رود. البته در سدهای خاکی با  $H_d$  کم، شیب تند دیواره‌ها را می‌توان با چسبندگی مرتبط دانست. براساس مشاهدات میدانی پژوهش حاضر و کاوش در مبانی فنی،  $B_{ave}$  در محدوده ذیل پیشنهاد می‌شود:

$$0.8H_w \leq B_{ave} \leq 10.4H_w \quad (9)$$

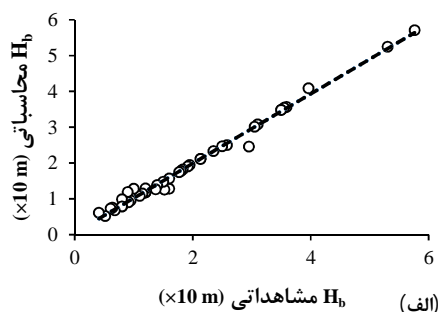
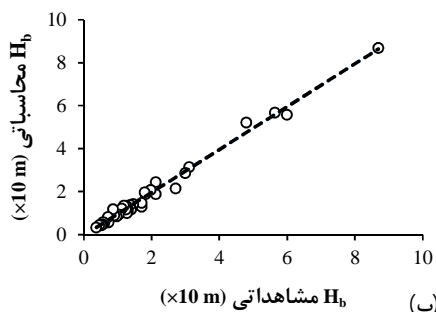
### شبیه‌سازی ارتفاع شکافت

ارتفاع شکافت ( $H_b$ ) به فاصله عمودی کف شکافت تا کم‌ارتفاع‌ترین تراز تاج اطلاق می‌شود. تعیین این ارتفاع از آن‌رو مهم است که رابطه تنگاتنگی با  $Q_p$  دارد و تکامل آن تا حد زیادی به  $H_d$  و  $S$  وابسته است. براساس مشاهدات این پژوهش در حالت روگذری جریان، مقدار  $H_b$  در حدود ۲ درصد بیشتر از  $H_w$  است؛ حال آنکه این مقدار برای

جدول ۴ - روابط ارائه شده برای تعیین ارتفاع شکافت

شماره معادله	پژوهشگران	رابطه	R <sup>2</sup>	RMSE
(۱۲)	دی‌من و پاترا (۲۰۱۹)	$H_b = 0.618H_d^{0.61} S^{0.05} E_w^{0.18}$	۰/۹۲	۵/۳۸
(۱۳)	ونگ و همکاران (۲۰۲۰)	$H_b = 0.9639H_w + 0.4377$ (overtopping)	۰/۹۸	۱/۶۰
(۱۴)	ونگ و همکاران (۲۰۲۰)	$H_b = 1.1469H_w + 1.1657$ (piping)	۰/۹۰	۲/۹۲

$H_b$  عمق شکافت،  $H_d$  ارتفاع سد،  $H_w$  ارتفاع جریان گذرنده از شکافت و  $E_w$  عرض متوسط سد



شکل ۹ - منحنی پراکندگی مقادیر مشاهداتی در برابر محاسباتی با روابط پیشنهادی برای تعیین  $H_b$ : الف - معادله (۱۰)، ب - معادله (۱۱)

### نتیجه‌گیری

با توجه به داده‌های پژوهش حاضر، نتایج ذیل به دست می‌آید:

- عرض متوسط شکافت، نقش مهمی در هیدروگراف خروجی و مؤلفه‌های آن دارد و تغییرات آن در محدوده  $0.8H_w$  و  $10.4H_w$  خواهد بود.

- دانه‌بندی خاک، عامل مهمی در افزایش نرخ فرسایش و کاهش زمان تشکیل شکافت است؛ بنابراین، سرعت تشکیل شکافت در ذرات درشت‌دانه به‌علت تنش‌های برشی کمتر نسبت به خاک‌های ریزدانه، به زمان کمتری نیاز دارد.

- مطالعه حاضر، نسبت‌های  $B_{ave}/B_t$  و  $B_{ave}/B_b$  را در رکوردهای خرابی به‌ترتیب برابر  $۰/۸۱۶$  و  $۰/۲۰۶$  ارزیابی کرد که نشان می‌دهد هندسه نهایی شکافت در سدهای خاکی همگن و ناهمگن، دوزنقه‌ای همراه با دیواره‌های جانبی تند خواهد بود. مقدار  $Z$  (شیب دیواره‌ها) در مدل‌های فیزیکی (۱ افقی:  $Z$  عمودی)، بین  $۱/۵$  تا  $۳$  متغیر بود.

- مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که ارتباط نزدیکی بین نرخ مهاجرت ذرات در فرسایش آبکندی و نرخ گسترش جانبی آن وجود دارد. رسیدن به تراکم استاندارد، تکامل فرسایش را تا حد زیادی افزایش می‌دهد.

- در حالت رگاب، مقدار  $H_b$  به میزان ۱۶ درصد بیشتر از  $H_w$  در مقایسه با حالت روگذری جریان ارزیابی شد.  
- فرسایش‌پذیری سد، نقش مهمی در هندسه شکافت و سیلاب حاصل در پایین‌دست دارد. نسبت  $H_b/H_d$  در سدهای HE بین  $۰/۹۱$  تا  $۱/۲۳$  متغیر بود؛ در حالی که این نسبت برای سدهای ME در محدوده  $۰/۷۴$  تا  $۱/۱۲۵$  و برای سدهای LE در محدوده  $۰/۵۴$  تا  $۱$  قرار داشت.  
- تحلیل و مقایسه هیدروگراف‌های آزمایشگاهی با داده‌های تاریخی نشان داد که افزایش قطر میانگین ذرات، نقش مؤثری در کاهش نسبت‌های  $A_1/A_2$  دارد.

### منابع

- اسلامیان س. فتحیان ف. و حسن‌زاده ه. ۱۳۹۱. ارزیابی مقایسه‌ای روش گشتاور خطی با روش‌های حداکثر درست‌نمایی و غیرپارامتری به‌منظور تحلیل فراوانی بارندگی در پنج ایستگاه ایران. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۴(۲): ۶۳-۷۲.
- حسن‌زاده ی. ۱۳۸۳. هیدرولیک شکست سد. نشریه شماره ۶۳. وزارت نیرو. کمیته ملی سدهای بزرگ. ۹۱-۱۱۴.
- حسن‌زاده ی. عبدی‌کردانی ا. حسن‌زاده م. و شفیعی‌نجد م. ۱۳۹۸. بررسی شکست سدهای

- scale physical modeling and statistical methods. *Water Science*. 32(2): 362-379.
12. Chanson H. and Wang H. 2013. Unsteady discharge calibration of a large V-notch weir. *Flow Measurement and Instrumentation* 29: 19-24.
13. Chinnarasri C. Jirakitlerd S. and Wongwises S. 2004. Embankment dam breach and its outflow characteristics. *Civil Engineering and Environmental Systems* 21(4): 247-264.
14. Coleman S. E. Andrews D. P. and Webby M. G. 2002. Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(9): 829-838.
15. Costa J.E. 1985. Floods from dam failures. U.S. Geological Survey. Report No. 85-560. USA.
16. Dhiman S. and Patra K. C. 2019. Studies of dam disaster in India and equations for breach parameter. *Natural Hazards*. 98(2): 783-807.
17. Dhiman S. and Patra K.C. 2020. Experimental study of embankment breach based on its soil properties. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 26(3): 247-257.
18. Duricic J. Erdik T. and van Gelder P. 2013. Predicting peak breach discharge due to embankment dam failure. *Journal of Hydroinformatics*. 15(4): 1361-1376.
19. Ferreira C. 2006. *Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Germany. 480 p.
20. Froehlich D. C. 2008. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(12): 1708-1721.
21. Gupta S.K. and Singh V.P. 2012. Discussion of Enhanced predictions for peak outflow from breached embankment dams by Christopher I. Thornton, Michael W. Pierce, and Steven R. Abt. *Journal of Hydrologic Engineering* 17(3): 463-466.
22. Hahn W. Hanson G.J. and Cook K.R. 2000. Breach morphology observations of embankment overtopping tests. *Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management*. Minneapolis. Minnesota. USA. July 30-August 2. 1-10.
23. Hakimzadeh H. Nourani V. and Babaeian Amini A. 2014. Genetic programming simulation of dam breach hydrograph and peak outflow discharge. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(4): 757-768.
24. Hanson G.J. 2005. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments. *Transactions of the ASAE*. 48(5): 1783-2005.
- خاکی، روندیابی و پهنه‌بندی سیلاب با اعمال مدل‌های ریاضی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: سد علویان). دانش آب و خاک. ۲۹(۳): ۱۲۱-۱۳۴.
۴. دهنوی ع. و کوزه‌گر ک. ۱۳۹۸. هم‌ارزسازی نتایج آیکولد اصلاح‌شده با هدف استفاده از مبانی تصمیم‌گیری روش لئوپولد ایرانی در طرح‌های توسعه منابع آب (مطالعه موردی: محیط فیزیکی سد پیغام‌چای کلیبر). ۲۱(۶): ۱-۱۵.
۵. فرضی مرادی آ. فرسادی‌زاده د. و عباسپور ا. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر شیب جانبی در دبی نشت از کانال‌های خاکی با استفاده از مدل آزمایشگاهی و برنامه‌ریزی بیان ژن. پژوهش آب ایران. ۱۲(۳): ۱-۸.
۶. قربانی م. حسن‌زاده ی. اسدی ح. و یوسفی پ. ۱۳۹۳. بررسی قابلیت مدل تابع انتقال در تخمین ابعاد هیدروگراف واحد. پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۳۹-۴۵.
۷. کریمی ر. و اختری ع. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در حوضه آبریز جنگ، با مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای گامای معکوس و بررسی روش‌های تخمین پارامتر آن. پژوهش آب ایران. ۱۰(۳): ۱۵۷-۱۶۱.
۸. کریمی م. ملکی‌نژاد ح. عبقری ه. و عزیزیان م. ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با استفاده از بسته نرم‌افزاری HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهل‌گری). پژوهش آب ایران. ۵(۹): ۲۹-۳۸.
۹. نوری م. خدانشناس س. و رضایی‌پزند ح. ۱۳۹۴. برآورد دبی اوج ناشی از شکست سدهای خاکی براساس الگوهای آماری چندمتغیره. مجله آب و خاک. ۲۹(۲): ۳۹۳-۴۰۵.
۱۰. وزیر ی. س. و ایزدی‌نیا ا. ۱۳۹۹. بررسی و مدل‌سازی شکست دو سد متوالی تحت رویکردهای متفاوت (مطالعه موردی: سدهای گلپایگان و کوچری). پژوهش آب ایران. ۱۴(۲): ۱۷۲-۱۵۹.
11. Ashraf M. Soliman A. H. El-Ghoraba E. and El Zawahry A. 2018. Assessment of embankment dams breaching using large

37. Tsakiris G. and Spiliotis M. 2013. Dam-breach hydrograph modelling: An innovative semi-analytical approach. *Water Resources Management*. 27(6): 1751-1762.
38. USBR 1988. Downstream hazard classification guidelines, ACER, Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Report No. 11.
39. Von Thun J. L. and Gillette D. R. 1990. Guidance on breach parameters. US Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Denver. USA.
40. Wahl T. L. 1998. Prediction of embankment dam breach parameters: A literature review and needs assessment. DSO-98-004, Dam safety research report. Denver. Colorado. USA.
41. Wahl T. L. 2010. Dam breach modeling-an overview of analysis methods. Joint federal interagency conference on sedimentation and hydrologic modeling. Las Vegas. USA.
42. Walder J. S. Iverson R. M. Godt J. W. Logan M. and Solovitz S. A. 2015. Controls on the breach geometry and flood hydrograph during overtopping of noncohesive earthen dams. *Water Resources Research*. 51(8): 6701-6724.
43. Wang B. Liu W. Zhang J. Chen Y. Wu C. Peng Y. Wu Z. Liu X. and Yang S. 2020. Enhancement of semi-theoretical models for predicting peak discharges in breached embankment dams. *Environmental Fluid Mechanics*. 20: 885-904.
44. Xu Y. and Zhang L. M. 2009. Breaching parameters for earth and rockfill dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 135(12): 1957-1970.
45. Zhang L. Peng M. Chang D. and Xu Y. 2016. Dam failure mechanisms and risk assessment. John Wiley and Sons. Singapore. 473 p.
25. Hanson G.J. Cook K.R. and Hahn W. 2001. Evaluating headcut migration rates of earthen embankment breach tests. *ASAE*. 48(5): 1783-2005. Sacramento. California. USA.
26. Hooshyaripor F. Tahershamsi A. and Golian S. 2014. Application of copula method and neural networks for predicting peak outflow from breached embankments. *Journal of Hydro-environment Research*. 8(3): 292-303.
27. Hunt S.L. Hanson G.J. Cook K.R. and Kadavy K.C. 2005. Breach widening observations from earthen embankment test. *Transactions of the ASAE*. 48(3): 1115-1120.
28. Johnson F.A. and Illes P. 1976. A classification of dam failures. *Water Power and Dam Construction*. 28(12): 43-45.
29. Kouzehgar K. Hassanzadeh Y. Eslamian S. Yousefzadeh Fard M. and Babaeian Amini A. 2021(a). Physical modeling into outflow hydrographs and breach characteristics of homogeneous earthfill dams failure due to overtopping. *Journal of Mountain Science* 18(2): 462-481.
30. Kouzehgar K. Hassanzadeh Y. Eslamian S. Yousefzadeh Fard M. and Babaeian Amini A. 2021(b). Experimental investigations and soft computations for predicting the erosion mechanisms and peak outflow discharge caused by embankment dam breach. *Arabian Journal of Geosciences*. 14(7): 1-19.
31. MacDonald T.C. and Langridge-Monopolis J. 1984. Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110(5): 567-586.
32. Morris M. Hassan M. Kortenhaus A. and Visser P. 2009. Breaching process: A state of the art review, Report No. T06-06-03. Retrieved from HRWallingford, Oxfordshire, UK. 70 p.
33. Powledge G. R. and Dodge R. A. 1985. Overtopping of small dams: An alternative for dam safety. Proceeding of Specialty Conference. Hydraulics and Hydrology in the Small Computer. Hydraulics Division. USA. 2: 1071-1076.
34. Sattar A. M. A. 2013. Gene expression models for prediction of dam breach parameters. *Journal of Hydroinformatics*. 16(3): 550-571.
35. Singh K. P. and Snorrason A. 1984. Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models. *Journal of Hydrology*. 68(1): 295-310.
36. Singh V. P. 2013. Dam breach modeling technology. Springer Netherlands. The Netherlands. 243 p.