ارزیابی و مقایسه پارامترهای ناشی از شکست سد قره آقاچ با استفاده از رابطه Froehlich و مدل BREACH

سیدعلی شاهرضائی[1*]، مهدی رادفر[2]، الهام قنبری عدیوی[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، ایران. sayyed.ali.shahrezaie@gmail.com

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، ایران.

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷**

چکیده

سد نیز مانند سایر سازه‌های ساخت بشر ممکن است دچار شکست شده و خسارات فراوانی به وجود آورد. در تحقیق حاضر به ارزیابی پارامترهای ناشی از شکست سد قره آقاچ از نوع نشت شریانی در ترازهای ۲۴۴۴ و ۲۴۴۸ از بدنه سد با استفاده از رابطه Froehlich و مدل BREACH پرداخته شده است. نتایج نشان داد در صورتی‌که از رابطه Froehlich جهت بررسی پارامترهای ناشی از شکست سد استفاده شود و روزنه در تراز ۲۴۴۴ ایجاد گردد شاهد دبی اوجی معادل ۲۳۸۳/۴ متر مکعب بر ثانیه خواهیم بود این درحالیست‌که در صورتی‌که روزنه در تراز ۲۴۴۸ ایجاد گردد شاهد دبی اوجی معادل ۳۲۵۴/۹ متر مکعب بر ثانیه خواهیم بود. در صورتی‌که از مدل BREACH جهت بررسی شکست سد استفاده شود و روزنه در تراز ۲۴۴۴ از بدنه سد ایجاد گردد شاهد دبی اوجی معادل ۱۷۲۲/۳ متر مکعب بر ثانیه خواهیم بود این در حالیست‌که اگر در تراز ۲۴۴۸ روزنه ایجاد گردد شاهد دبی اوجی معادل ۲۵۹۵/۹ متر مکعب بر ثانیه خواهیم بود. هرچند مدل BREACH دقیق‌تر است، اما با توجه به اینکه دبی اوج حاصل شده از روش Froehlich به میزان ۰/۹۹۷۸ با دبی اوج مشاهده شده از مدل BREACH همبستگی دارد؛ بنابراین از دقت قابل قبولی برخوردار است. در صورتی‌که روزنه‌ای در تراز ۲۴۴۸ از بدنه سد ایجاد گردد نسبت به زمانی‌که روزنه‌ای در تراز ۲۴۴۴ از بدنه سد ایجاد می‌گردد دارای دبی اوج بیشتر بوده و در نتیجه شاهد خسارات مالی و همچنین تلفات جانی بیشتری در مناطق پایین‌دست سد خواهیم بود.

واژه‌های کلیدی: ***شکست سد، پارامترهای ناشی از شکست سد، رابطه Froehlich، مدل BREACH***

مقدمه

شکست سد و رها شدن حجم عظیم آب ذخیره شده پشت سد را می‌توان به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه طراحی سدها نام برد و لازم است به وقوع و عواقب آن توجه گردد. بنابراین سیلاب خروجی حاصل از شکست سد چه بسا سد کوچک باشد می‌تواند بسیار بزرگ‌تر از سیلاب‌های طبیعی رودخانه باشد (۱۱). حوادث مربوط به سدها از جمله شکست سد و همچنین عدم کنترل سیلاب ناشی از آن به دلیل انرژی زیاد در مخزن، تأثیرات بسیار مخربی در پایین‌دست منطقه خواهد گذاشت (۱۲). از پیشگامان تحقیق و مطالعه در زمینه‌ی شکست سد، می‌توان به فِرید اشاره نمود که بخشی از مطالعات خود را در سال ۱۸۹۱ در قالب مدل DAMBRK و تکمیل شده این مدل یعنی BREACH ارائه نمود این مدل به صورت فیزیکی و بر پایه اصول هیدرولیکی، انتقال رسوب، مکانیک خاک، خصوصیات هندسی و خصوصیات مصالح سد و ویژگی‌های مخزن شامل حجم ذخیره، خصوصیات سرریز و نرخ خروجی از مخزن می‌باشد. این مدل بر مبنای در نظر گرفتن هم‌زمان بقای جرم جریان ورودی به مخزن، جریان خروجی از سرریز و جریان خروجی شکست با ظرفیت انتقال رسوب جریان غیریکنواخت و غیرماندگار در طول کانال شکسته شده، توسعه یافته است. فِرید روشی جهت انجام محاسبات و پهنه‌بندی سیلاب ناشی از شکست سد به صورت یک بعدی ارائه نمود (۸). شاهرضائی و همکاران به بررسی پارامترهای ناشی از شکست سد خاکی قره آقاچ با استفاده از نرم‌افزار breach gui تحت ۴ سناریوی مختلف پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتندکه اگر سد از نوع جریان روگذری[۱] دچار شکست گردد شاهد بیشترین دبی اوج و در صورتی‌که نشت[۲] در فاصله ۰/۲۵ درصد از ارتفاع سد نسبت به کف ایجاد شود شاهد کمترین دبی اوج خواهند بود (۵). سیفی زاده و همکاران به کمک مدل breach gui به معرفی و همچنین کاربرد مدل فرسایش شکست سد را مورد بررسی قرار داده‌اند (۳). موسوی و موسوی به بررسی پارامترهای ناشی از شکست سد آیدوغموش و علویان از نوع نشت به کمک نرم‌افزار breach gui پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتندکه روابط تجربی پیشنهاد شده از داده‌های بیشتری استفاده شده بنابراین نسبت به روابط قبلی ارائه شده دقیق‌تر می‌باشد و آن‌ها نتیجه گرفتندکه تغییر شرایط ژئوتکنیکی در مشخص نمودن زمان ریزش نشت شریانی ایجاد شده در بدنه سد، در مدل BREACH نتایج دقیق‌تری را با توجه به سدهای واقعی شکسته شده در جهان محاسبه خواهد نمود (۶). جودی ثانی و پرویشی با استفاده از مدل کامپیوتری breach gui به ارزیابی پارامترهای ناشی از شکست سد خاکی کاظمی بوکان پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتندکه با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه و شیب زیاد رودخانه، باید برای تعدادی از مقاطع رودخانه تراز سطح آب برای سیلاب‌های مختلف تمهیداتی بیندیشند (۲). بهادری و همکاران به بررسی پارامترهای ناشی از شکست سد خاکی چالیدره واقع در استان خراسان رضوی با

[۱] Overtopping

[۲] Piping

استفاده از مدل breach gui پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدندکه در صورتی‌که سد از نوع نشت دچار شکست شود ۰/۸۵ ساعت پس از شروع شکست شاهد دبی اوجی معادل ۶۴۷/۴۹ متر مکعب بر ثانیه خواهند بود (۱). نوری و همکاران به بررسی پارامتر-های ناشی از شکست سد خاکی تبارک آباد در استان خراسان رضوی حوالی شهرستان قوچان به کمک نرم‌افزار breach gui پرداخته‌اند. آن‌ها نتیجه گرفتندکه ۱ ساعت و ۴۰ دقیقه پس از شروع شکست سد دبی خروجی از ناحیه بازشدگی به بیشترین مقدار خود رسیده و معادل ۱۰۶۱/۴۹ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد و همچنین اولین ترک ۳۰ دقیقه بعد از شروع تحلیل اتفاق خواهد افتاد (۷). فرولیچ در سال ۲۰۰۸ روابط به دست آمده از مطالعات قبلی خود را به کمک آمار و اطلاعات موجود از ۷۴ سد در جهان بروزرسانی نمود و روابط جدیدتری را ارائه نمود (۹). شاهرضائی و همکاران به ارزیابی پارامترهای ناشی از شکست سد خاکی قره آقاج به کمک رابطه فرولیچ ۱۹۹۵ در ۴ حالت متفاوت پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند: در صورتی‌که سد از نوع جریان روگذری شکسته شود شاهد بیشترین دبی اوج نسبت به سایر حالات خواهند بود (۴). مکدونالد و لانگریج – مونوپولیس با بررسی آمار و اطلاعات مربوط به ۴۲ مورد سد شکسته شده که اکثراً از نوع خاکی با هسته رسی بودند روابطی ارائه نمودند آن‌ها به فاکتوری بین شکل‌گیری شکست سد و حجم مصالح فرسایش یافته از خاکریز سد دست یافتند (۱۰). در این مقاله به ارزیابی و مقایسه پارامترهای ناشی از شکست سد قره آقاج با استفاده از رابطه فرولیچ و مدل BREACH پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سد قره آقاج در ۱۵۰ کیلومتری شهر اصفهان و ۱۳ کیلومتری شمال شهرستان سمیرم بر روی رودخانه قره آقاج در حوضه آبریز خلیج فارس–کارون بزرگ واقع گردیده است. سد قره آقاج از نوع خاکی با هسته رسی دارای طولی معادل ۶۴۵ متر، عرض تاج ۱۱ متر، حداکثر عرض سد روی بستر ۲۵۰ متر و حداکثر ارتفاع آن از بستر برابر ۴۳/۵ متر می‌باشد. سرریز سد قره آقاج به طول تاج ۱۵ متر و از نوع آزاد می‌باشد. تراز نرمال سد قره آقاج هم تراز سرریز و معادل ۲۴۶۶/۲۵ متر و تراز ماکزیمم آب سیلاب برابر ۲۴۶۹/۳ متر می‌باشد.

روستاهای نسبتاً پر جمعیتی در پایین‌دست منطقه سد قره آقاج ساکن هستند لذا موضوع ارزیابی شکست احتمالی سد بسیار مهم است‌که با استفاده از رابطه فرولیچ ۱۹۹۵ و مدل BREACH GUI به بررسی پارامترهای ناشی از شکست این سد پرداخته شده است.

مدل BREACH

مدل BREACH پدیده شکست در سدهای خاکی را با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولوژیکی، هیدرولیک، انتقال و فرسایش رسوبات و لحاظ نمودن خصوصیات مصالح به کار رفته در بدنه سد، شبیه-سازی می‌نماید.

در صورتی‌که شکست سد مورد بررسی از نوع نشت شریانی باشد از سیلابی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله استفاده می‌شود این در حالیست‌که اگر شکست مورد بررسی از نوع جریان روگذری باشد از سیلاب PMF استفاده شده و اطلاعات سرریز تخلیه نیز وارد می‌گردد. مقدار سیلاب PMF در سد قره آقاج معادل ۵۴۶ متر مکعب بر ثانیه، سیلاب با دوره بازگشت‌های

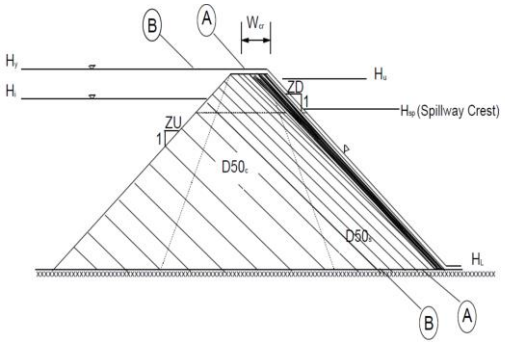
۱۰۰۰۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب معادل ۲۸۴/۲ و ۱۰۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

مکانیزم شکست سد از نوع جریان روگذری

جهت آغاز شبیه‌سازی شکست سد از نوع جریان روگذری باید قبل از اینکه هر گونه فرسایشی رخ دهد، تراز سطح آب در مخزن سد (H) از قسمت تاج سد تجاوز نموده و طبق شکل ۱ مرحله اولیه فرسایش در راستای خط $A-A$ اتفاق می‌افتد. در صورت عدم پوشش گیاهی شاهد شکافی به شکل مستطیل در قسمت پایین‌دست خواهیم بود. بنابراین با گذر زمان عمق و عرض ناحیه بازشدگی به صورت تدریجی به سمت پایین فرسایش خواهد یافت. از رابطه ۱ جهت محاسبه جریان به داخل کانال در صورتی‌که سرریز مستطیل لبه پهن باشد استفاده می‌شود.

$$Q_b = 3B_0\left(H - H_c\right)^{1.5} \qquad (۱)$$

در این رابطه: Q_b: دبی ورودی به کانال بر حسب فوت مکعب بر ثانیه، B_0: عرض اولیه کانال مستطیل شکل بر حسب فوت و H_c: تراز کف ناحیه بازشدگی بر حسب فوت می‌باشد.



شکل ۱- نمائی از شکست سد از نوع جریان روگذری

هنگامی‌که ناحیه شکاف به سمت پایین گسترش می‌یابد تراز کف ناحیه بازشدگی (H_c) در ناحیه تاج سد (H_u) باقی خواهد ماند بنابراین مصالح تشکیل دهنده بدنه سد در عرض تاج سد به طرف جلو و به سمت پایین‌دست حرکت می‌نماید. همان طورکه در شکل ۱ نشان داده شده است زمانی‌که کف کانال فرسایشی به امتداد تراز خط $B-B$ برسد فرسایش عمودی در پایین‌دست آغاز خواهد شد. این پروسه تا مدتی‌که کف کانال (H_L) به تراز بستر سد برسد ادامه خواهد داشت. این در حالیست‌که اگر شاهد پوشش گیاهی در ناحیه پایین‌دست سد یا به بیانی در زیر خط $A-A$ باشیم با استفاده از رابطه شزی مانینگ سرعت جریان روگذری (V) در طول ناحیه پایین‌دست به همراه پوشش گیاهی برای هر گام زمانی قابل محاسبه می‌باشد. بنابراین سرعت به دست آمده با بیشترین سرعت مجاز (VMP) با کانال‌های همراه با پوشش گیاهی مقایسه خواهد شد. در صورتی‌که سرعت جریان از بیشترین سرعت مجاز تجاوز نماید فرسایش شیروانی پایین‌دست شروع می‌شود. لذا فرسایش در کانال تا قسمتی‌که پوشش گیاهی وجود نداشته باشد امتداد خواهد یافت. سرعت (V) در طول ناحیه پایین‌دست از رابطه ۲ قابل محاسبه می‌باشد.

$$V = \frac{q}{y} \qquad (۲)$$

در این رابطه: q: دبی جریان روگذری بر حسب فوت مربع بر ثانیه می‌باشد. دبی جریان روگذری از رابطه ۳ قابل محاسبه می‌باشد.

$$q = 3\left(H - H_c\right)^{1.5} \qquad (۳)$$

در این رابطه: $(H - H_c)$: ارتفاع هیدرواستاتیک بالای قسمت تاج سد بر حسب فوت می‌باشد. در رابطه ارائه شده جهت محاسبه سرعت، y از رابطه ۴ قابل محاسبه می‌باشد.

$$y = \left[\frac{qn'}{1.49\left(1/ZD\right)^{0.5}} \right]^{0.6} \quad (۴)$$

در این رابطه: n' ضریب مانینگ برای کانال‌های با پوشش گیاهی می‌باشد. n' را می‌توان از رابطه ۵ محاسبه نمود.

$$n' = aq^b \quad (۵)$$

در این رابطه a و b ضرایبی هستند که با استفاده از گراف‌های ارائه شده توسط چاو قابل تعیین می‌باشند.

مکانیزم شکست سد از نوع نشت شریانی

در صورتی‌که شکست از نوع نشت شریانی باشد قبل از اینکه محل دیواره‌های روزنه شروع به فرسایش کند باید تراز آب در مخزن سد (H) از تراز خط مرکزی (H_p) بیشتر شود تا کانال نشت شریانی به شکل مستطیل شروع شود. لذا کف روزنه به سمت پایین به شکل قائم فرسایش خواهد یافت و همچنین ناحیه بالائی آن به صورت قائم و به طرف بالا به میزان یکسانی فرسایش خواهد یافت. جهت محاسبه دبی جریان به داخل روزنه می‌توان از رابطه ۶ استفاده نمود.

$$Q_b = A\left[2g\left(H - H_p\right) \Big/ \left(1 + f_L/D\right) \right]^{0.5} \quad (۶)$$

در این رابطه Q_b: دبی جریان از میان روزنه بر حسب فوت مکعب بر ثانیه، $(H - H_p)$: ارتفاع هیدرواستاتیکی بالای روزنه بر حسب فوت، L: طول کانال روزنه ایجاد شده بر حسب فوت، D: عرض و یا قطر روزنه ایجاد شده بر حسب فوت، f: ضریب اصطکاک دارسی می‌باشد. ضریب اصطکاک دارسی در صورتی‌که عدد رینولدز بیشتر یا مساوی ۲۰۰۰ باشد از رابطه ۷ و در صورتی‌که عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰ باشد از رابطه ۸ که از نمودار مودی به دست آمده‌اند قابل محاسبه می‌باشد.

$$f = 0.105\left(\frac{D_{50}}{D}\right)^{0.167} \quad (۷)$$

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (۸)$$

در این رابطه: N_R: عدد رینولدز می‌باشد که از رابطه ۹ قابل محاسبه می‌باشد.

$$N_R = 83333 Q_b D/A \quad (۹)$$

با توجه به اینکه تراز قسمت بالای روزنه ایجاد شده (H_{pu}) به شکل قائم و به سمت بالا فرسایش خواهد یافت لذا هنگامی‌که ارتفاع آب روی روزنه کمتر از قطر روزنه باشد جریان از وضعیت کنترل روزنه‌ای به وضعیت کنترل سرریز تغییر می‌کند و به این گونه نقاط گسترش خواهد یافت. در این مدل فرض بر این است‌که اگر نامساوی رابطه ۱۰ بر قرار باشد انتقال رخ خواهد داد.

$$H < H_p + 2\left(H_{pu} - H_p\right) \quad (۱۰)$$

در این رابطه: H_p: تراز خط مرکزی و H_{pu}: تراز بالای روزنه ایجاد شده می‌باشد.

بنابراین جریان سرریز با رابطه ۱ کنترل خواهد شد که در آن (H_c) تراز کف روزنه (H_0) عرض روزنه در زمان انتقال و به بیانی دیگر تغییر وضعیت می‌باشد. به محض رسیدن زمان انتقال از وضعیت روزنه‌ای به وضعیت سرریز، فرض بر آن است‌که مصالح بین بالای روزنه و ناحیه پایین تاج سد فرو خواهد ریخت و در راستای کانال شکاف با نرخ رایج انتقال رسوب پیش از اینکه فرسایش توسعه یابد، رخ خواهد داد. لذا فرسایش به حالت کانال موازی در قسمت باقیمانده از ناحیه پایین‌دست سد بین تراز کف روزنه و کف سد یا به بیانی دیگر تا بستر سد ادامه خواهد یافت. مابقی مراحل فرسایش به طور کامل مشابه توضیحاتی که در قسمت جریان روگذری داده شد خواهد بود. لازم به ذکر است مراحل گفته شده

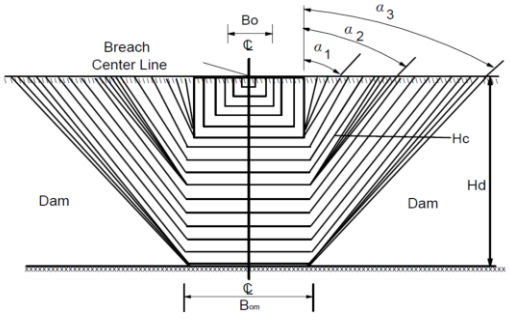
مشروط به آن است‌که سد توسط بشر ساخته شده باشد مدل BREACH قادر است شکست در سد-هائی که توسط زمین لغزه ایجاد شده‌اند را نیز در حالت نشت شریانی و همچنین در حالت جریان روگذری شبیه‌سازی نماید.

عرض شکاف

شیوه مشخص نمودن عرض ناحیه بازشدگی از مؤلفه‌های بسیار مهم در مدل‌های شکست می‌باشد. لذا در این مدل عرض ناحیه بازشدگی به صورت دینامیکی توسط ۲ مکانیزم کنترل می‌شود. در مکانیزم اول فرض بر این است‌که ناحیه اولیه شکاف به صورت مستطیل شکل رخ دهد. شکل ۲ نشان دهنده نمای رو به رو از توالی تشکیل شکاف در بدنه سد در مدل BREACH می‌باشد. عرض شکاف (B_0) در این حالت از رابطه ۱۱ قابل محاسبه می-باشد.

$$B_0 = B_r y \qquad (۱۱)$$

که در آن: B_r: عامل یا فاکتوری است‌که مبتنی‌بر بهترین مقطع هیدرولیکی می‌باشد در صورتی‌که شکست از نوع جریان روگذری باشد معادل ۲ و در صورتی‌که شکست از نوع نشت شریانی باشد معادل ۱ در نظر گرفته می‌شود و y: عمق جریان در ناحیه شکاف می‌باشد.



شکل۲- نمای رو به رو از توالی تشکیل شکاف در بدنه سد در مدل BREACH

در مدل BREACH فرض بر این است‌که y عمق بحرانی در قسمت ورودی ناحیه شکاف می‌باشد که از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$y = 2/3\left(H - H_c\right) \qquad (۱۲)$$

دومین مکانیزم‌که موجب کنترل عرض شکاف می‌باشد از پایداری شیب خاک نتیجه می‌شود. زمانی-که شیب جانبی ناحیه بازشدگی فرو می‌ریزد کانال از شکل مستطیل به شکل ذوزنقه تغییر می‌نماید بنابراین در راستای قائم زاویه α تشکیل می‌دهد. ریزش زمانی اتفاق می‌افتدکه عمق کانال ناحیه بازشدگی $\left(H_c^{'}\right)$ به عمق بحرانی $\left(H_k^{'}\right)$ برسد که تابعی از ویژگی‌های مصالح از جمله چسبندگی (c)، وزن مخصوص (γ) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) می‌باشد. عمق بحرانی با استفاده از رابطه ۱۳ قابل محاسبه می‌باشد.

$$H_k^{'} = \frac{4C\cos\phi\sin\theta_{k-1}^{'}}{\gamma\left[1-\cos\left(\theta_{k-1}^{'}-\phi\right)\right]} \qquad (۱۳)$$

که در این رابطه: k: ۳ حالت ریزش متوالی را مشخص می‌نماید که معادل ۱، ۲ و ۳ می‌باشد و در شکل ۲ نشان داده شده است. θ: زاویه شیب شکاف ایجاد شده در راستای افق می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. زاویه θ یا α برای هر زمان در لحظه تشکیل ناحیه بازشدگی به حالت روابط زیر ارائه گردیده است.

$$\theta = \theta_{k-1}^{'} \quad \text{if} \quad H_k \le H_k^{'} \qquad (۱۴)$$

$$\theta = \theta_k^{'} \quad \text{if} \quad H_k > H_k^{'} \qquad (۱۵)$$

$$B_0 = B_r y \quad \text{if} \quad k = 1 \qquad (۱۶)$$

$$B_0 = B_{om} \quad \text{if} \quad k > 1 \qquad (۱۷)$$

$$B_{om} = B_r y \quad \text{if} \quad H_1 > H_1^{'} \qquad (۱۸)$$

$$\alpha = 0.5\pi - \theta \qquad (۱۹)$$

در حالی‌که

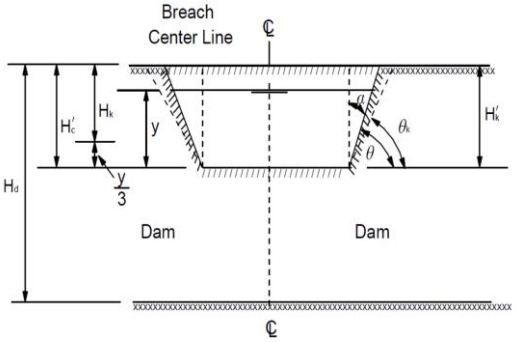
$$\theta_0^{'} = 0.5\pi \qquad (۲۰)$$

$$\theta_k^{'} = \left(\theta_{k-1}^{'} + \phi\right)/2 \qquad k = 1,2,3 \qquad (۲۱)$$

$$H_k = H_c^{'} - y/3 \qquad (۲۲)$$

اندیس k زمانی‌که $H_k > H_k^{'}$ باشد بزرگتر از ۱ می‌گردد. در رابطه ۲۲ عبارت $y/3$ از مقدار $H_c^{'}$ جهت محاسبه عمق حقیقی ایستایی آب در کانال ناحیه بازشدگی کم شده است و به بیانی دیگر اثر آب بر روی پایداری دیواره جانبی ناحیه بازشدگی می‌باشد. بنابراین توسط این مکانیزم عریض‌تر شدن ناحیه بازشدگی بعد از آن‌که بیشترین جریان از بین ناحیه بازشدگی اتفاق افتاده باشد، ممکن خواهد بود و همچنین عمق جریان در راستای فروکش شدن جریان کاهش خواهد یافت.

فرض بر این است‌که فرسایش به صورت یکسان در راستای کف و دیواره‌های کانال ناحیه بازشدگی رخ خواهد داد. به جزء وقتی‌که کناره‌های ناحیه بازشدگی فرو ریخته باشد. بنابراین کف و دیواره‌های شکاف به فرسایش خود ادامه می‌دهند. نمائی رو به رو از شکاف ایجاد شده در بدنه سد در مدل BREACH در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل۳- نمائی رو به رو از شکاف ایجاد شده در بدنه سد در مدل BREACH

در صورتی‌که ناحیه شکاف به سمت پایین تا بستر دره اصلی فرسایش یابد، فرسایش بیشتر به سمت پایین در مدل متوقف خواهد شد هر چند که کانال قسمت شکست به فرسایش خود ادامه داده و عریض‌تر خواهد شد. لذا ممکن است بیشترین جریان خروجی هم‌زمان با رسیدن به کف ناحیه بازشدگی به بستر دره اصلی یا در برخی مواقع کناره‌های ناحیه بازشدگی به فرسایش خود ادامه می‌دهند اتفاق خواهد افتاد. بیشترین دبی از بین ناحیه بازشدگی بستگی به نرخ توسعه شکاف به واسطه فرسایش و همچنین سرعت کاهش تراز در مخزن سد دارد به گونه‌ای که باعث افزایش جریان به کمک ناحیه بازشدگی کانال شکست می‌شود. در این مدل بیشترین مقدار عرض مجاز کف و عرض بالائی در تاج سد ناحیه بازشدگی به کمک کاربر انجام می‌گیرد که این مقدار به صورت تقریبی به وسیله توپوگرافی دره اصلی که فرض بر فرسایش ناپذیر بودن آن می‌باشد محاسبه می‌گردند.

در صورتی‌که سدهای زمین لغزه‌ای شبیه‌سازی گردند، طول ناحیه بازشدگی در مقابل سدهائی که توسط بشر ساخته شده است بزرگ‌تر می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌گرددکه عرض کانال به صورت جدا از قسمت ورودی عرض کانال ناحیه بازشدگی محاسبه گردد. در این زمینه y در رابطه‌های ۱۱، ۱۶، ۱۸ و ۲۲ به کمک عمق نرمال (y_n) محاسبه می‌گردد که بزرگتر از عمق بحرانی داده شده در رابطه ۱۲ می‌باشد.

روابط تجربی فرولیچ ۱۹۹۵

فرولیچ در سال ۱۹۹۵ به ارزیابی آمار و اطلاعات موجود از ۶۳ سد شکسته شده پرداخته است و روابطی را جهت تخمین پارامترهای ناشی از شکست سد مانند دبی اوج، زمان شکست، شیب شکست و متوسط

عرض ناحیه بازشدگی ارائه نموده است. فرولیچ بازه-های زیر را در مطالعات خود مد نظر قرار داد که شامل موارد ذیل می‌باشد.

ارتفاع سدها در محدوده ۳/۶۶ تا ۹۲/۹۶ متر قرار داشت این در حالیست‌که حدود ۹۰٪ سدها ارتفاعی کمتر ۳۰ متر و حدود ۷۶٪ از سدها دارای ارتفاعی کمتر از ۱۵ متر داشته‌اند. حجم آب در مخزن سد در آغاز فرآیند شکست در محدوده ۰/۰۱۳ تا ۶۶۰ میلیون متر مکعب قرار داشت این در حالیست‌که حدود ۸۷٪ از سدها دارای حجم مخزن کمتر از ۲۵ میلیون متر مکعب و ۷۶٪ از سدها دارای حجم مخزن کمتر از ۱۵ میلیون متر مکعب داشته‌اند.

دبی اوج ناشی از شکست سد

دبی اوج ناشی از شکست سد با استفاده از رابطه ۲۳ قابل محاسبه می‌باشد.

$$Q_P = 0.607\left(H_w^{1.24} V_w^{0.295}\right) \qquad (۲۳)$$

در این رابطه: Q_P: دبی اوج ناشی از شکست سد بر حسب متر مکعب بر ثانیه، H_w: عمق آب در بالای کف شکاف بر حسب متر و V_w: حجم آب در بالای کف نقطه شکاف بر حسب متر مکعب می‌باشد.

متوسط عرض ناحیه بازشدگی

متوسط عرض ناحیه بازشدگی با استفاده از رابطه ۲۴ قابل محاسبه می‌باشد.

$$B_{avg} = 0.1803 k V_w^{0.32} H_b^{0.19} \qquad (۲۴)$$

در این رابطه: B_{avg}: متوسط عرض ناحیه بازشدگی بر حسب متر، k: ضریب ثابت در صورتی‌که شکست از نوع جریان روگذری باشد معادل ۱/۴ در صورتی‌که شکست از نوع نشت شریانی باشد معادل ۱ می‌باشد، V_w: حجم آب در بالای کف نقطه شکاف بر حسب متر مکعب و H_b: عمق ناحیه بازشدگی بر حسب متر می‌باشد.

زمان شکست سد

زمان ناشی از شکست سد با استفاده از رابطه ۲۵ قابل محاسبه می‌باشد.

$$T_f = 0.00254 V_w^{0.53} H_b^{-0.9} \qquad (۲۵)$$

در این رابطه: T_f: زمان ناشی از شکست سد بر حسب ساعت، V_w: حجم آب در بالای کف نقطه شکاف بر حسب متر مکعب و H_b: عمق ناحیه شکاف که بر حسب متر می‌باشد.

شیب ناحیه شکاف

در صورتی‌که شکست از نوع جریان روگذری باشد شیب ناحیه شکاف معادل ۱/۴ و در غیر این صورت معادل ۰/۹ می‌باشد.

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر به بررسی پارامترهای ناشی از شکست سد خاکی قره آقاج در حالت نشت شریانی ناشی از ایجاد روزنه‌ای در ترازهای ۲۴۴۴ و ۲۴۴۸ از بدنه سد پرداخته شده است.

نتایج شکست سد در مدل BREACH

الف- شکست سد در تراز ۲۴۴۴

بر اساس مدل BREACH در صورتی‌که شکست از نوع نشت شریانی و در تراز ۲۴۴۴ از بدنه سد خاکی قره آقاج روزنه‌ای ایجاد شود، پارامترهای ناشی از شکست سد به شرح ذیل می‌باشد.

دبی اوج ناشی از شکست سد: ۱۷۲۲/۳ متر مکعب بر ثانیه.

زمان رسیدن به اوج جریان خروجی: ۴/۶۵ ساعت.

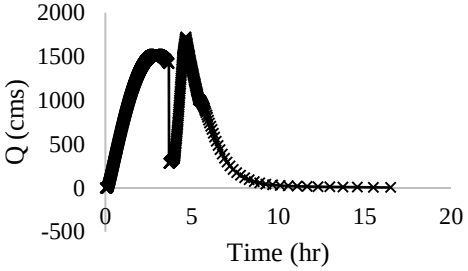
عمق ناحیه شکاف: ۳۹/۲ متر.

عرض بالای ناحیه بازشدگی در زمان حداکثر جریان خروجی: ۵۷/۳ متر.

زاویه تند کناره ناحیه شکاف با عمود در حداکثر جریان خروجی: ۵۰/۲۵ درجه.
شیب جانبی شکاف در لحظه اوج جریان خروجی از ناحیه بازشدگی (افق به قائم): ۰/۶۶.
زمان شکست سد: ۵/۶۸ ساعت.

هیدروگراف جریان ناشی از شکست سد

هیدروگراف جریان خروجی ناشی از شکست سد در حالت نشت شریانی در تراز ۲۴۴۴ مطابق شکل ۴ می‌باشد.

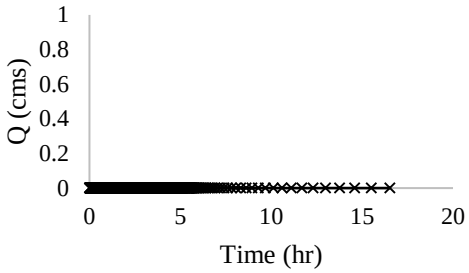


شکل۴- هیدروگراف جریان ناشی از شکست سد از نوع نشت شریانی در تراز ۲۴۴۴

باتوجه به این نمودار بیشترین دبی خروجی ناشی از شکست سد معادل ۱۷۲۲/۳ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد که در لحظه ۴/۶۵ ساعت اتفاق افتاده است.

هیدروگراف جریان خروجی از سرریز

هیدروگراف جریان خروجی از سرریز زمانی‌که در تراز ۲۴۴۴ از بدنه سد روزنه‌ای ایجاد گردد مطابق شکل ۵ می‌باشد.

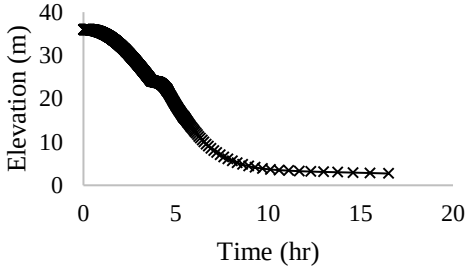


شکل۵- هیدروگراف جریان خروجی از سرریز زمانی‌که در تراز ۲۴۴۴ روزنه ایجاد شود

باتوجه به این نمودار هیچگونه دبی خروجی از قسمت سرریز سد نخواهد بود.

تغییرات ارتفاع آب در بالادست سد

تغییرات ارتفاع آب در بالادست سد در حالت نشت شریانی زمانی‌که در تراز ۲۴۴۴ روزنه ایجاد گردد مطابق شکل ۶ می‌باشد.

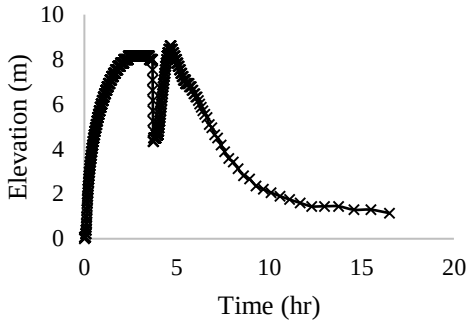


شکل۶- تغییرات ارتفاع آب در بالادست ناشی از شکست سد از نوع نشت در تراز ۲۴۴۴

باتوجه به این نمودار بیشترین تغییرات ارتفاع آب در بالادست سد مربوط به لحظات اولیه شکست سد و معادل ۳۶ متر خواهد بود.

تغییرات ارتفاع آب پایین‌دست سد

تغییرات ارتفاع آب پایین‌دست سد مطابق شکل ۷ می‌باشد.

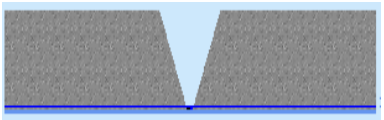


شکل۷- تغییرات ارتفاع آب پایین‌دست ناشی از شکست سد از نوع نشت شریانی در تراز ۲۴۴۴

با توجه به این نمودار بیشترین تغییرات ارتفاع آب پایین‌دست مربوط به لحظات ۴/۶۳ تا ۴/۶۹ ساعت بوده و معادل ۸/۶ متر می‌باشد.

مقطع شکاف

مقطع شکاف ایجاد شده در حالت نشت شریانی در تراز ۲۴۴۴ مطابق شکل ۸ می‌باشد.



شکل۸- شکاف ایجاد شده دربدنه سد از نوع نشت شریانی در تراز ۲۴۴۴

ب- شکست سد در تراز ۲۴۴۸

بر اساس مدل BREACH در صورتی‌که شکست از نوع نشت شریانی و در تراز ۲۴۴۸ از بدنه سد خاکی قره آقاج روزنه‌ای ایجاد شود، پارامترهای ناشی از شکست سد به شرح ذیل می‌باشد.

دبی اوج ناشی از شکست سد: ۲۵۹۵/۹ متر مکعب بر ثانیه.

زمان رسیدن به اوج جریان خروجی: ۴/۶۵ ساعت.

عمق ناحیه شکاف: ۴۰ متر.

عرض بالای ناحیه بازشدگی در زمان حداکثر جریان خروجی: ۵۸/۸ متر.

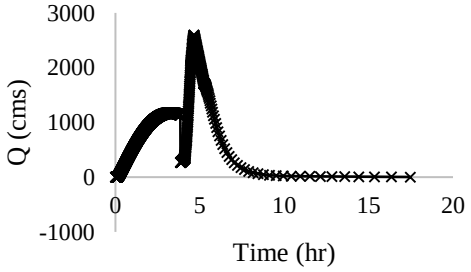
زاویه تند کناره ناحیه شکاف با عمود در حداکثر جریان خروجی: ۵۰/۲۵ درجه.

شیب جانبی شکاف در لحظه اوج جریان خروجی از ناحیه بازشدگی (افق به قائم): ۰/۶۶.

زمان شکست سد: ۴/۱۳ ساعت.

هیدروگراف جریان ناشی از شکست سد

هیدروگراف جریان خروجی ناشی از شکست سد از نوع نشت شریانی در تراز ۲۴۴۸ مطابق شکل ۹ می‌باشد.

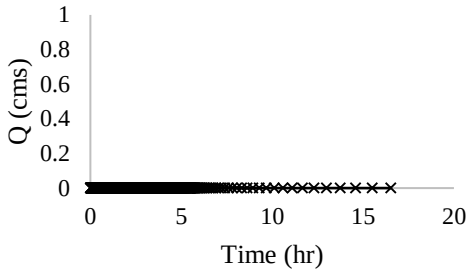


شکل۹- هیدروگراف جریان ناشی از شکست سد از نوع نشت شریانی در تراز ۲۴۴۸

باتوجه به این نمودار بیشترین دبی خروجی ناشی از شکست سد معادل ۲۵۹۵/۹ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد که در لحظه ۴/۶۵ ساعت اتفاق افتاده است.

هیدروگراف جریان خروجی از سرریز

هیدروگراف جریان خروجی از سرریز زمانی‌که در تراز ۲۴۴۸ از بدنه سد روزنه‌ای ایجاد گردد مطابق شکل ۱۰ می‌باشد.

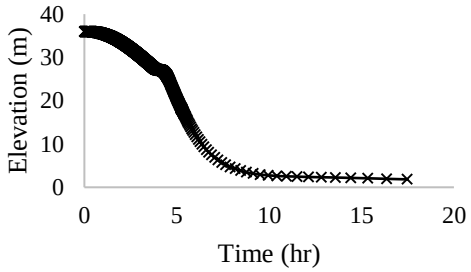


شکل ۱۰- هیدروگراف جریان خروجی از سرریز زمانی‌که در تراز ۲۴۴۸ روزنه ایجاد شود

باتوجه به این نمودار هیچگونه دبی خروجی از قسمت سرریز سد نخواهد بود.

تغییرات ارتفاع آب در بالادست سد

تغییرات ارتفاع آب در بالادست سد در حالت نشت شریانی زمانی‌که در تراز ۲۴۴۸ از بدنه سد روزنه‌ای ایجاد گردد مطابق شکل ۱۱ می‌باشد.

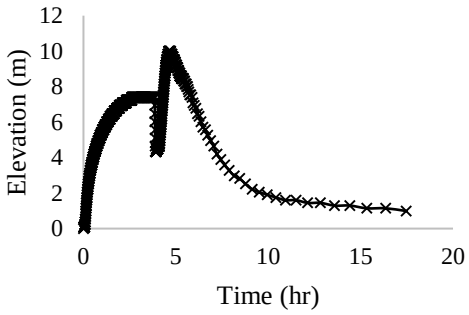


شکل ۱۱- تغییرات ارتفاع آب در بالادست ناشی از شکست سد از نوع نشت در تراز ۲۴۴۸

باتوجه به این نمودار بیشترین تغییرات ارتفاع آب بالادست سد مربوط به لحظات اولیه شکست و معادل ۳۶ متر خواهد بود.

تغییرات ارتفاع آب پایین‌دست سد

تغییرات ارتفاع آب پایین‌دست سد مطابق شکل ۱۲ می‌باشد.

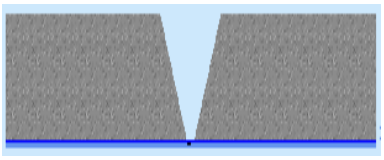


شکل ۱۲- تغییرات ارتفاع آب پایین‌دست ناشی از شکست سد از نوع نشت در تراز ۲۴۴۸

با توجه به این نمودار بیشترین تغییرات ارتفاع آب پایین‌دست مربوط به لحظات ۴/۶۰۴ تا ۴/۷۱۹ ساعت بوده و معادل ۹/۹۸ متر می‌باشد.

مقطع شکاف

مقطع شکاف ایجاد شده از نوع نشت شریانی در تراز ۲۴۴۸ مطابق شکل ۱۳ می‌باشد.



شکل ۱۳- شکاف ایجاد شده دربدنه سد از نوع نشت شریانی در تراز ۲۴۴۸

نتایج شکست سد با استفاده از روابط فرولیچ

آ- نتایج شکست سد از نوع نشت در تراز ۲۴۴۴

در صورتی‌که شکست از نوع نشت شریانی و در تراز ۲۴۴۴ رخ دهد در نتیجه پارامترهای ناشی از شکست سد خاکی قره آقاج به شرح ذیل می‌باشد.

دبی اوج ناشی از شکست سد: ۲۳۸۳/۴ متر مکعب بر ثانیه.

میانگین عرض ناحیه بازشدگی: ۸۲/۳ متر.
زمان شکست سد: ۰/۷۴۹ ساعت.
شیب جانبی شکاف (افق به قائم): ۰/۹.

ب- نتایج شکست سد از نوع نشت در تراز ۲۴۴۸

در صورتی‌که در تراز ۲۴۴۸ از بدنه سد روزنه‌ای ایجاد شود، پارامترهای ناشی از شکست سد به شرح ذیل خواهد بود.

دبی اوج ناشی از شکست سد: ۳۲۵۴/۹ متر مکعب بر ثانیه.
میانگین عرض ناحیه بازشدگی: ۸۲/۷ متر.
زمان شکست سد: ۰/۷۳۵ ساعت.
شیب جانبی شکاف (افق به قائم): ۰/۹.

مقایسه دبی اوج ناشی از شکست سد

دبی اوج ناشی از شکست سد خاکی قره آقاج از نوع نشت شریانی در ترازهای ۲۴۴۴ و ۲۴۴۸ با استفاده از رابطه فرولیچ ۱۹۹۵ و مدل BREACH مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- تخمین دبی اوج ناشی از شکست سد

R^2	تراز شکست		روش محاسبه
	۲۴۴۸	۲۴۴۴	
	۲۵۹۵/۹	۱۷۲۲/۳	BREACH GUI
	۳۲۵۴/۹	۲۳۸۳/۴	Froehlich 1995

با توجه به این جدول زمانی‌که نشت در تراز ۲۴۴۸ از بدنه سد ایجاد می‌گردد هم در مدل BREACH و هم در رابطه Froehlich شاهد دبی اوج بیشتری نسبت به زمانی‌که نشت در تراز ۲۴۴۴ از بدنه سد ایجاد گردد خواهیم بود.

کالیبره و واسنجی مدل

واسنجی و صحّت سنجی یکی از مهم‌ترین عوامل در به کارگیری مدل‌های فیزیکی و ریاضی برای شبیه‌سازی پدیده‌های مورد مطالعه می‌باشد. شبیه-سازی رودخانه و تغییرات رفتاری مربوط به آب بر اساس نیروهای محیطی و تکاملی یکی از موضوعات در زمینه‌ی تحقیقات رودخانه‌ای می‌باشد. آنالیز حساسیت معمولاً در فعالیت‌های مهندسی و به عنوان بهینه‌سازی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر از خطای نسبی جهت بررسی دقت مدل استفاده شده است. هرچه مقدار عدد حاصل شده به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان از دقت بالای مدل می‌باشد. لذا دبی اوج محاسباتی از طریق رابطه فرولیچ ۱۹۹۵ و دبی اوج مشاهداتی با استفاده از مدل BREACH مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به جدول ۱ دبی حاصل شده از روش فرولیچ نسبت به مقادیر دبی مشاهده شده از مدل BREACH به میزان ۰/۹۹۷۸ دارای همبستگی مناسب و قابل قبولی می-باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاکی از آن است‌که اگر از رابطه فرولیچ جهت محاسبه پارامترهای ناشی از شکست سد استفاده شود و روزنه در تراز ۲۴۴۴ ایجاد گردد شاهد دبی اوج ناشی از شکست سد معادل ۲۳۸۳/۴ متر مکعب بر ثانیه، میانگین عرض ناحیه بازشدگی معادل ۸۲/۳ متر، زمان شکست معادل ۰/۷۴۹ ساعت و شیب جانبی شکاف معادل ۰/۹ افق به قائم خواهیم بود. این در حالیست‌که اگر از مدل BREACH GUI جهت محاسبه پارامترهای ناشی از شکست سد استفاده شود شاهد دبی اوج ناشی از شکست سد معادل ۱۷۲۲/۳ متر مکعب بر ثانیه، عمق ناحیه شکاف معادل ۳۹/۲ متر، زمان شکست معادل ۵/۶۸

ساعت و شیب جانبی شکاف در لحظه اوج جریان خروجی از ناحیه بازشدگی معادل ۰/۶۶ خواهیم بود. در صورتی‌که در تراز ۲۴۴۸ از بدنه سد روزنه‌ای ایجاد گردد و از رابطه فرولیچ جهت بررسی پارامترهای ناشی از شکست سد استفاده گردد شاهد دبی اوجی معادل ۳۲۵۴/۹ متر مکعب بر ثانیه، میانگین عرض ناحیه بازشدگی معادل ۸۲/۷ متر، زمان شکست سد معادل ۰/۷۳۵ ساعت و شیب جانبی شکاف معادل ۰/۹ افق به قائم خواهیم بود. این درحالیست‌که اگر از مدل BREACH GUI جهت بررسی پارامترهای ناشی از شکست سد استفاده گردد شاهد دبی اوجی معادل ۲۵۹۵/۹ متر مکعب بر ثانیه، عمق ناحیه شکاف معادل ۴۰ متر، زمان شکست معادل ۴/۱۳ ساعت و شیب جانبی شکاف در لحظه اوج جریان خروجی از ناحیه بازشدگی معادل ۰/۶۶ خواهیم بود. با توجه به میزان همبستگی حاصل شده از رابطه فرولیچ و مدل BREACH به میزان ۰/۹۹۷۸ و یا به بیانی دیگر خطای نسبی در حدود ۱٪ نشان از دقت بالای مدل ارائه شده می‌باشد. در نهایت جدا از اینکه ازکدام روش جهت محاسبه پارامترهای ناشی از شکست سد استفاده شود، در صورتی‌که در تراز ۲۴۴۸ از بدنه سد روزنه‌ای ایجاد گردد نسبت به حالتی‌که روزنه در تراز ۲۴۴۴ از بدنه سد ایجاد شود دبی اوج بیشتر و در نتیجه شاهد خسارات مالی و همچنین تلفات جانی بیشتری در مناطق پایین‌دست خواهیم بود.

منابع

۱- بهادری، ف.، فغور مغربی، م و رضازاده، آ. (۱۳۹۵). پیش‌بینی پارامترهای شکست سد خاکی در اثر پدیده رگاب و روندیابی سیل ناشی از شکست با استفاده از مدلهای HEC-RAS و BREACH GUI مطالعه موردی: سد چالیدره. پانزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران. قزوین.

۲- جودی ثانی، ر، پرویشی، ع.ر. (۱۳۹۷). بررشی شکست سد خاکی ناشی از فرسایش با استفاده از نرم‌افزار Breach-GUI و پهنه‌بندی سیلاب پایین دست با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS. اولین کنفرانس ملی مهندسی زیر ساخت‌ها. ۱۸ و ۱۹ مهرماه. دانشگاه ارومیه.

۳- سیفی زاده، م.، عمادی، ع.ر و فضل اولی، ر. (۱۳۹۱). معرفی و کاربرد مدل فرسایشی شکست سد (BREACH GUI). دومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست. تهران.

۴- شاهرضائی، س.ع.، رادفر، م و قنبری عدیوی، ا. (۱۳۹۹). ارزیابی پارامترهای ناشی از شکست سد خاکی قره آقاج با استفاده از رابطه فرولیچ(۱۹۹۵). نوزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه فردوسی مشهد.

۵- شاهرضائی، س.ع.، رادفر، م.، قنبری عدیوی، ا.، موسوی، ش و شومالی، ج. (۱۳۹۹). ارزیابی پارامترهای شکست سد خاکی قره آقاج در حالت نشت شریانی و جریان روگذری با استفاده از مدل breach gui. نوزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه فردوسی مشهد.

۶- موسوی، ش و موسوی، ش. (۱۳۹۲). بررسی شکست ناشی از پدیده ایجاد لوله (piping) در سدهای خاکی (مطالعه موردی: سد علویان و سد آیدوغموش). نهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن ایران. بیرجند.
۷- نوری، م.، خداشناس، س.ر.، ضیایی، ع.ن و رضایی پژند، ح. (۱۳۹۲). مدلسازی شکست سد خاکی و روندیابی سیلاب ناشی از آن با لستفاده از مدل‌های HEC-RAS و BREACH (مطالعه موردی سد تبارک آباد). پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. تهران.
8- Fread, D.L. (1978). DAMBRK: the NWS Dam-Break Flood Forecasting Model. Office of Hydrology National Weather Servicesces. Silver Spring. Maryland. 559p.
9- Froehlich, D.C., (2008). Embankment dam breach parameters and their uncertainties. ASCE Journnal of Hydraulic. Engineering. 134, 1708-1721.
10- MacDonald, Thomas C. and Langridge – Monopolis, J. (1984). Breaching Characteristics of dam failures. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, PP 567 - 586.
11- Polglase, L. (2000). Meadowbank dam early evacuation plan – Interim non-structural solution to low spill capacity", Proc.20 th ICOLD congress, Vol. 1 ,Q76,P303 - 312.
12- Sidek, L.M., Ros, F.C. and Aziz, N.H.A. (2011). Numerical modelling of dam failure for hydropower development in Cameron highlands. batang padang scheme. Pahang Malaysia. student conference on research and development 2 November author H.A book New York publisher.

Evaluation and comparison of parameters due to failure of Ghare Aghach dam using Froehlich method and BREACH model

Sayyed Ali Shahrezaie[1*], Mahdi Radfar[2], Elham Ghanbari Adivi[3]

1- Master's degree, Water Science and Engineering, Shahrekord Unyversity of Shahrekord, Iran.
2- Assistant Professor, Faculty of Water Engineering, Shahrekord Unyversity of Shahrekord, Iran.
3- Assistant Professor, Water Science and Engineering, Shahrekord Unyversity of Shahrekord, Iran.

Abstract

The dam, like other man-made structures, may fail and cause extensive damage. In research The parameters resulting from the failure of Ghare Aghach dam of piping at levels 2444 and 2448 of the dam body have been evaluated using Froehlich method and BREACH model. The results showed that if the Froehlich method is used to investigate the parameters resulting from the failure of the dam and the orifice is created at the level of 2444, we will see a peak flow of 2383.4 cubic meters per second, while if the orifice If it is created at the level of 2448, we will see a peak flow equivalent to 3254.9 cubic meters per second. If the BREACH model is used to investigate the failure of the dam and an orifice is created at the level of 2444 from the dam body, we will see a peak flow equal to 1722.3 cubic meters per second, while if an orifice is created at the level of 2448 The peak will be equivalent to 2595.9 cubic meters per second. Although the BREACH model is more accurate, but considering that the peak flow obtained from Froehlich method by 0.9978 is correlated with the observed peak flow of the BREACH model; so it has acceptable accuracy. If an orifice is created at level 2448 of the dam body, it has a higher peak flow than when an orifice is created at level 2444 from the dam body, resulting in financial losses as well as more casualties. We will be downstream of the dam.

Keywords*: Dam failure, parameters due to dam failure, Froehlich method, BREACH model*