

تحلیل پدیده شکست در سدهای خاکی

با توجه به مشخصات شکاف

محمدرضا پایا**

ابوالفضل شمسایی*

(دریافت ۸۲/۸/۷ پذیرش ۸۳/۲/۱۰)

چکیده

مطالعه شکست سد مستلزم تعریف پارامترهای متغیری مانند علت شکست، نوع شکست، ابعاد شکاف ایجاد شده و زمان توسعه شکاف می باشد. پیش بینی دقیق مشخصات شکاف یکی از مهم ترین مباحث برای تحلیل مسأله شکست در سدهای خاکی می باشد. پارامترهای شکاف و تعیین میزان حساسیت هر کدام از آنها بیشترین تأثیر را بر امواج حاصل از شکست دارند. با بررسی های انجام شده، مشخصات پارامترهای شکاف در سد خاکی سیلوه به کمک مناسب ترین مدل تعیین گردیده است. در سد خاکی سیلوه، شکاف از نوع ذوزنقه ای با شیب جانبی $(m) = 0.1/z$ و قاعده $(m) = 80$ محاسبه شده است. زمان توسعه شکاف در این سد معادل $1/90$ ساعت می باشد. با استفاده از نتایج فوق و به کمک نرم افزار **DAM BREAK** عواقب حاصل از شکست احتمالی سد سیلوه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. تحلیل نتایج، حاکی از آب گرفتگی شهر پیرانشهر واقع در ۱۲ کیلومتری پایین دست سد، بعد از گذشت ۳ ساعت و تا رقوم ۱۴۲۵ متر می باشد. واژه های کلیدی: شکست سد، شکاف یا گسیختگی، پدیده ایجاد لوله در سد خاکی.

Dam Break Analysis of Embankment Dams Considering Breach Characteristics

*Shamsaei, A. (Ph.D), Dept. of Civil Eng., Sharif Univ. of Technology
Paya, M.R. (M.Sc.), Abgeer Consulting Engineers*

Abstract

The study of dam's break, needs the definition of various parameters such as the break cause, its type, its dimension and the duration of breach development. The precise forecast for different aspects of the breach is one of the most important factors for analyzing it in embankment dam. The characteristics of the breach and determination of their vulnerability has the most effect on the waves resulting from dam break. Investigating, about the parameters of the breach in "Silveh" earth dam have been determined using the suitable model. In Silve dam a trapezoid breach with side slope $z=0.01m$ and the average base line $b=80m$ was computed. The duration of the breaches development is 1.9 hour. Regarding the above results and the application of DAM Break software the consequences of the probable break of the dam was determined. The analysis of the results of water covering of the city of Piranshahr located 12km from silve dam confirms that in 3 hours the water will reach the height (level) of 1425 meters.

* استاد دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف

** کارشناس ارشد شرکت مهندسان مشاور آبگیر

شکل شکاف انتهایی (شکل ۱)، به وسیله (Z) که معرف شیب جانبی شکاف می‌باشد (۱ عمودی به Z افقی)، و پارامتر (b) که عرض انتهایی کف آن است، مشخص می‌گردد.

پارامتر شیب جانبی (Z)، بین صفر تا ۲ قرار دارد و مقدار آن، به زاویه پایداری مواد متراکم و مرطوبی بستگی دارد که شکاف در میان آن ایجاد می‌شود. به این طریق با استفاده از ترکیبات مختلف مقادیر Z و b، می‌توان شکل‌های مختلف مستطیلی، مثلثی و یا دوزنقه‌ای را مشخص کرد. برای مثال $Z=0$ و $b>0$ بیانگر یک شکاف مستطیلی شکل می‌باشد. به همین ترتیب $Z>0$ و $b=0$ نشان‌دهنده یک شکاف مثلث شکل است.

عرض شکاف انتهایی (b) به عرض متوسط شکاف (\bar{b})، عمق شکاف (hd)، و شیب جانبی شکاف (Z) بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$b = \bar{b} - zh_d \quad (1)$$

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مدل مورد نظر، عرض کف شکاف را در یک نقطه فرض می‌کند و سپس آن را با توجه به فواصل زمانی گسیختگی و در طول زمان، به صورت خطی یا غیرخطی تا رسیدن به عرض انتهایی (b) بزرگ می‌کند. عرض انتهایی نیز، معمولاً در جایی است که کف شکاف تا رقوم ارتفاعی h_{bm} ، با پدیده فرسایش مواجه می‌گردد. h_{bm} ، معمولاً ولی نه الزاماً، عبارت از ارتفاع کف نهایی مخزن یا مجرا است. اگر t کمتر از یک دقیقه باشد، عرض کف شکاف به جای این که از صفر شروع شود، از مقدار b آغاز می‌گردد. چنین حالتی معمولاً به جای گسیختگی فرسایشی عنوان گسیختگی واژگونی تلقی می‌گردد [۱ و ۱۰].

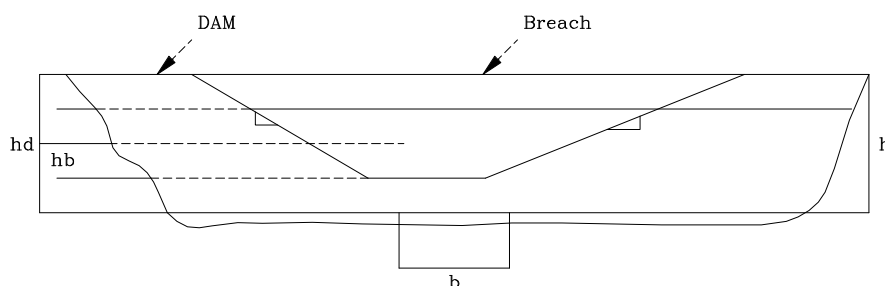
شکاف، نوعی بازشدگی در سد است که در هنگام شکست سد ایجاد می‌شود. مکانیک واقعی شکست در مورد سدهای خاکی و یا بتنی، هنوز به خوبی استنباط نگردیده است. در تلاش‌های قبلی، برای پیش‌بینی سیلاب پایین دست ناشی از شکست سدها، معمولاً فرض بر این بوده است که سد به طور کل و در یک لحظه شکسته می‌شود. محققین امواج سیلابی شکست سد، فرض کرده‌اند که شکاف ایجاد شده در جسم سد تمام سد را در بر می‌گیرد و در یک لحظه به وقوع می‌پیوندد [۱، ۲، ۳، ۶ و ۱۰]. برخی دیگر، بر این باورند که شکاف به طور جزئی در قسمتی از سد به وقوع می‌پیوندد و پس از مدت زمان (Δt) کامل می‌شود [۹ و ۱۰]. ولی به هر حال آن‌ها نیز وقوع شکاف را لحظه‌ای فرض کرده‌اند [۵ و ۸]. فرضیات شکاف لحظه‌ای و کامل و تحلیل امواج شکست سد به خاطر راحتی در به کارگیری روش‌های ریاضی تدوین شده‌اند. این فرضیات تا حدودی برای سدهای نوع بتنی قوسی مناسب هستند ولی برای سدهای خاکی و بتنی وزنی مناسب نمی‌باشند.

انواع گسیختگی (شکاف)

گسیختگی سرریز شونده^۱

شکست یا گسیختگی سرریز شونده، به صورت یک شکاف مستطیل، مثلث و یا دوزنقه‌ای شکل شبیه‌سازی می‌شود که در اثر گذشت زمان به تدریج، از تاج سد به سمت پایین دست، ادامه می‌یابد (شکل ۱). جریان در میان شکاف، در هر لحظه، با استفاده از معادله سرریز لبه پهن، محاسبه می‌شود.

¹ Overtopping breach



شکل ۱- نمای سد از جلو به منظور نشان دادن تشکیل شکاف سرریز شونده

ارتفاع کف شکاف طبق رابطه زیر به عنوان تابعی از زمان (t) شبیه‌سازی می‌شود:

$$h_b = h_d - (h_d - h_{bm}) \left(\frac{t_b}{t} \right) \rho \quad 0 < t_b \leq t \quad (2)$$

در این رابطه :

h_{bm} = ارتفاع نهایی کف شکاف؛ t_b = زمان سپری شده از ابتدای شروع شکاف به بعد؛ و ρ = نمای شکل غیر خطی شکاف، می‌باشد.

باید توجه داشت که نمای شکل غیر خطی بین ۱ تا ۴ تغییر می‌نماید. مقدار یک، مقدار مربوط به درجه خطی بودن و عدد دو، مربوط به درجه ربعی شکاف غیر خطی می‌باشد. ضمناً ذکر این نکته لازم است که درجه تشکیل شکاف معمولاً به صورت خطی فرض می‌شود.

عرض کف لحظه‌ای شکاف (b_i) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$b_i = b \left(\frac{t_b}{t} \right) \rho \quad 0 < t_b \leq t \quad (3)$$

در حین شبیه‌سازی شکست سد، تشکیل واقعی شکاف از زمانی آغاز می‌گردد که ارتفاع سد آب مخزن (h) بیش از مقدار مشخص h_f می‌گردد. این ویژگی موجب می‌شود که بتوان سرریز شدن آب از روی سدی را که هنوز شکاف در آن ایجاد نشده است، شبیه‌سازی نمود.

شکست ناشی از پدیده ایجاد لوله^۱ در جسم سد

شکست از نوع ایجاد لوله، یک شکاف روزنه‌ای مستطیلی است که در طول زمان توسعه می‌یابد و می‌توان در هر ارتفاع از جسم سد ایجاد گردد. با فرض فوق، می‌توان این نوع گسیختگی را شبیه‌سازی نمود. جریان لحظه‌ای در میان شکاف، با توجه به رابطه بین ارتفاع استخر و بالای روزنه، محاسبه می‌گردد.

مشخصات شکاف در سدها

سدهای وزنی بتنی نیز، نظیر یک یا چند مقطع یکپارچه که در حین ساخت سد الزاماً در اثر فرار آب از هم جدا می‌شوند، تمایل به ایجاد شکاف جزئی (قسمتی) دارند. زمان تشکیل شکاف فقط در حد چند دقیقه است.

پیش‌بینی تعداد قطعات یکپارچه، که ممکن است در اثر شکست سد وزنی بتنی جابه‌جا شده، و یا از بین بروند، مشکل است. در هر حال با استفاده از DAMBRK و کاربرد متعدد و جداگانه آن در شرایطی که عرض شکاف (b) بیانگر طول‌های مرکب و متناوب قطعات یکپارچه مفروض باشد، ارتفاعات سطح آب حاصله و سرعت‌های شکاف‌برداری را می‌توان برای نشان دادن کاهش فشار بار روی سد نشان داد. با توجه به این که فشار بار در اثر افزایش عرض (b) کاهش می‌یابد، لذا بدین وسیله می‌توان شرایط حد ایمنی بارگذاری را که موجب گسیختگی بیشتر نمی‌گردد، برآورد نمود.

سدهای قوسی بتنی، تمایل دارند که به طور کامل شکسته شوند و زمان مورد نیاز برای تشکیل شکاف در آنها فقط در حد چند دقیقه است. پارامتر شیب جانبی فشار (Z) برای سدهای بتنی معمولاً صفر فرض می‌شود. (شکاف مستطیلی).

سدهای خاکی، که بیش از انواع دیگر سدها به وفور یافت می‌شوند، نه تنها به طور کامل بلکه لحظه‌ای نیز از هم گسیخته نمی‌شوند. عرض متوسط (\bar{b}) شکاف کامل سدهای خاکی معمولاً در محدوده بین ($3h_d < \bar{b} < h_d$) قرار دارند. در اینجا، h_d عبارت از ارتفاع سد می‌باشد. بنابراین عرض شکاف در سدهای خاکی، معمولاً کمتر از طول سد در عرض دره، است. همچنین، برای تشکیل شکاف در میان مواد فرسایش یافته ناشی از فرار آب، به یک فاصله زمانی محدود، نیاز هست. زمان کل شکست با توجه به ارتفاع سد، نوع مصالح به کار رفته در سد، شرایط تراکم مصالح و تداوم (اندازه و مدت) سرریز شدن جریان فرار آب، ممکن است در محدوده بین چند دقیقه تا چند ساعت باشد.

زمان شکست، به گونه‌ای که در DAMBRK به کار می‌رود، عبارت از فاصله زمانی بین اولین شکاف در سطح بالادست سد تا تشکیل کامل شکاف است. تشکیل شکاف در مورد شکست‌های ناشی از سرریز شدن، از شست و شوی سطح پایین دست سد، آغاز می‌گردد. پیشرفت شکاف و عمیق شدن آن به سمت عقب عرض تاج، نهایتاً به سطح بالادست، می‌رسد و به شکست نهایی منجر می‌گردد.

شکست‌های ناشی از رگابزایی یا ایجاد لوله در جسم سد، وقتی به وقوع می‌پیوندد که، شکاف اولیه در نقطه‌ای زیر قسمت بالای سد، به علت فرسایش و ایجاد مجرای داخلی (لوله) در میان سد، در اثر فرار آب، به وجود می‌آید. زمان

¹ Piping

شکست در اثر رگابزایی، در مقایسه با شکست ناشی از سرریز شدن، معمولاً خیلی طولانی تر است، زیرا سطح بالادست، در مراحل اولیه توسعه رگابزایی، به کندی شسته می شود. روزنه در حین پیشرفت گسیختگی در سد هر چه بیشتر و بیشتر باز می شود و در نهایت با سرعت به حفره ای در بالادست سد منجر می گردد. سدهای خاکی با تراکم ضعیف، و یا با مصالح ضایعات معادن، دارای عرض متوسط شکاف بزرگ تر از محدوده عرض شکاف در سدهای خاکی معمولی مورد بحث در قسمت فوق، می باشند.

اخیراً برخی از پیش بینی کنندگان توانسته اند با روش های آماری مقادیری را برای \bar{b} و t ارائه دهند. معادلات زیر با استفاده از خصوصیات شکاف های ۴۳ سد شکسته شده و تحقیقات محققین حاصل گردیده اند. محدوده ارتفاعی سدهای مذکور بین ۱۵ تا ۲۸۵ فوت قرار داشته است و فقط ارتفاع ۶ سد آن ها بین ۱۵ تا ۱۰۰ فوت بوده است [۷، ۴ و ۱۰].

$$\bar{b} = 9.5K_0 [(V_r h_d)]^{0.25} \quad (4)$$

$$t = 0.8 \left[\frac{V_r}{h_d^2} \right]^{0.50} \quad (5)$$

در این روابط :

\bar{b} = عرض متوسط شکاف (فوت) و t = زمان شکست (ساعت)

K_0 = برای رگابزایی برابر با ۱ و برای سرریز شدن برابر با ۱/۴

V_r = حجم مخزن (ایکر فوت)

h_d = ارتفاع (فوت) آب روی کف انشعاب (معمولاً حدود ارتفاع سد)

هدف دیگر از مشخص کردن خصوصیات شکاف، استفاده از مشخصات فیزیکی و نحوه فرسایش شکاف ایجاد شده توسط مدل، می باشد. این تحقیق، نیازمند فرض حالت بحرانی و تشخیص مشخصات مخزن و جریان در بیشترین حالت است [۱ و ۹]. این روش نیازمند تشخیص دقیق شکل و اندازه شکاف است. در این روش شکل و اندازه شکاف دو عامل مهم و بحرانی برای نحوه حرکت و توسعه شکاف است [۷ و ۱۰].

دانشمندان، با ارائه یک روش محاسبات عددی سریع از مدل فرسایش، که از به هم پیوست معادلات مایر-پتیر و مولر در حرکت رسوبات حاصل شده بود، به کمک روش های عددی

تفاضل های محدود در جریانات متغیر همراه رسوبات، پدیده تشکیل شکاف و شسته شدن جسم سد را شبیه سازی کردند. نتایج حاصله، با مشاهدات عملی توسعه یک شکاف در سدی روی رودخانه مانتارو در پرو مقایسه شد. در نهایت، با تطابق مدل محاسباتی با مشاهدات عملی، مشخص شد که توسعه شکاف به طور قابل ملاحظه ای به مقدار n مانینگ، وسعت جریان از داخل شکاف (شکل فیزیکی و نحوه توسعه شکاف) و یک ضریب از مقدار رسوب موجود در جریان بستگی دارد [۸].

مدل ریاضی شکاف

اخیراً، فرید^۱، مدل گسترش شکاف در سدهای خاکی را توسعه بخشید [۱۰]. مدل ارائه شده توسط فرید، اساساً با مدل های قبلی تفاوت دارد. مدل فرید، یک مدل ریاضی بر پایه فیزیک شکاف می باشد، که می تواند پارامترهای متغیر شکاف را پیش بینی نماید (سایز، ابعاد، زمان توسعه) و در نهایت، هیدروگراف دبی حاصل از شکاف را تحلیل می کند. این مدل، با استفاده از بهم پیوستن قسمت عمده جریان ورودی به مخزن، حجم آب ذخیره شده در مخزن، جریان خروجی از سرریز سد، جریان خروجی از شکاف با در نظر گرفتن مقدار رسوبات حمل شده و میزان تغییرات جریان در هر شکلی از فرسایش شکاف، توسعه پیدا کرد.

رشد و توسعه شکاف، بستگی به مصالح به کار رفته (دانه بندی خاک، وزن واحد حجم، زاویه اصطکاک و قدرت چسبندگی مواد) در سد دارد. حالات زیر می تواند در حمل ذرات خاک، نحوه ایجاد شکاف و زمان توسعه آن مؤثر واقع شوند.

- ماهیت مصالح می تواند دارای خواصی باشد که در قسمت خاصی از سد ایجاد شکاف نماید.

- احتمال ایجاد پدیده لوله در جسم سد نسبت به حالت عبور آب از روی تاج سد^۲ بیشتر می باشد.

- می توان با ایجاد پوشش گیاهی (مثلاً چمن) در ضلع پایین دست و یا استفاده از موادی با دانه بندی درشت و مناسب در قسمت های پایین دست به صورت پوششی، از ایجاد شکاف و توسعه آن جلوگیری کرد.

¹ Fread, 1984-87

² Over topping

- مکانیسم توسعه شکاف، هنگام ایجاد یک یا چند فروریختگی در بخش‌های یک سد، به فشار هیدرواستاتیکی خیلی زیاد و نیروی چسبندگی مواد تشکیل دهنده سد، بستگی دارد.

- توسعه پهنای شکاف، در اثر فرو ریختن دو طرف شکاف سد، مطابق قانون پایداری شیب انجام می‌شود. مقایسه پیش‌بینی‌های مدل، با موارد مشاهداتی در شکست از نوع رگبزدگی یا ایجاد لوله، در سد تیون در آیداهو و شکست رگبزدگی در سد دریاچه لون در کلرادو، و شکست از نوع سرریز شدن از تاج سد و ایجاد لغزش در بدنه سد در سد پرو، مطلوب و قابل قبول بوده است.

حساسیت این مدل به پارامترهای عمومی، حداقل است. این مدل حتی به زاویه اصطکاک داخلی مواد تشکیل دهنده سد و پوشش گیاهی خارجی بدنه سد و قدرت چسبندگی مواد تشکیل دهنده سد، حساس می‌باشد.

تعیین پارامترهای شکاف در سدهای خاکی

با بررسی کلیه مدل‌ها و انجام تحقیقات آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای شکاف (b و t) استفاده از معادلات زیر پیشنهاد می‌شود:

$$Q_p^* = 370 (V_r h_d)^{0.5} \quad (6)$$

$$Q_p = 3/1b \left[\frac{C}{t + \frac{c}{(h_d)^{0.5}}} \right]^3 \quad (7)$$

$$C = 23/4 \frac{A_s}{b} \quad (8)$$

$$Q_p^* = \text{دبی پیک مورد انتظار در هنگام شکاف برداشتن}$$

$$Q_p = \text{دبی پیک مورد انتظار در هنگام شکاف برداشتن}$$

$$V_r = \text{حجم مخزن}$$

$$A_s = \text{سطح مخزن در بالاترین رقوم آب در پشت سد}$$

معادله ۶ برای ۱۴ سد که در گذشته شکسته شده بودند، آزمایش شد و حداکثر تطابق بین نتایج مشاهداتی و دبی عبوری مشاهده گردید. روابط ۷ و ۸ توسط فرید در سال

۱۹۸۱ ارائه شده‌اند و مورد تأیید و استفاده سرویس هواشناسی و هیدرولوژی ایالت متحده^۱، در مدل کردن شکست و شکاف برداشتن سدها، می‌باشند [۱۰].

با انتخاب دو مقدار فرضی با توجه به مختصات و شرایط فیزیکی سد برای \bar{b} و t می‌توان در معادله ۷ مقدار Q_p را محاسبه نمود، سپس با مقدار Q_p^* که از معادله ۶ به دست آمده، مقایسه کرد. اگر $Q_p \gg Q_p^*$ بود، یا \bar{b} خیلی بزرگ انتخاب شده است، و یا t خیلی کوچک می‌باشد. اگر $Q_p \ll Q_p^*$ ، آنگاه یا \bar{b} خیلی کوچک انتخاب شده، و یا t خیلی بزرگ است. با ایجاد تغییراتی در \bar{b} و t و انجام مقایسه فوق، می‌توان مقدار واقعی \bar{b} و t را در هنگام ایجاد شکاف واقعی در حالت بحرانی، پیش‌بینی نمود.

در این تحقیق، با استفاده از معادله ۶ و محاسبه میزان دبی پیک در ۲۱ سد شکسته شده و مقایسه نتایج با مقادیر مشاهداتی، مشخصات شکاف با خطایی کمتر از $\pm 20\%$ درصد به دست آمد.

حساسیت پارامترها

انتخاب پارامترهای شکاف، قبل از شکافتن سد، یا در غیاب نتایج مشاهداتی مشابه، نتایج غیر مشخص و بعضاً غیر قابل اطمینان، از سیلاب شکست در پایین‌دست را، موجب می‌شود. با این حال، خطاهای پارامترهای شکاف و تأثیر آن در میزان جریان خروجی پیک و نتایج حاصل از مدل، در موج پیشرو سیلاب شکست در پایین‌دست، مستهلک می‌شود. میزان استهلاک، به وسعت دشت سیلابی پایین‌دست بستگی دارد. دشت‌های وسیع‌تر، میزان استهلاک بیشتری خواهند داشت و هرچه از مقطع سد به سمت پایین‌دست پیش می‌رویم، درصد خطا کاهش خواهد یافت.

مقادیر b و z ، باید با توجه به نوع خاص سد و با توجه به مقدار متوسط \bar{b} شکاف در بیشترین حالت ممکن، انتخاب شوند. زمان شکست (t)، باید در کمترین میزان ممکن انتخاب شود، تا بیشترین حجم جریان خروجی در بحرانی‌ترین حالت را نشان دهد. مقادیر تخمینی برای \bar{b} و t ، باید قابلیت تطابق با شرایط موجود در سد را داشته باشند تا بتوان زمان رسیدن

¹ Nws

سیلاب به مسافت‌های دور پایین دست سد را با دقت بیشتری پیش‌بینی نمود.

نرخ متوسط حرکت موج سیلاب (سرعت متوسط) در دره پایین دست، اغلب بین ۲ تا ۱۰ مایل بر ساعت می‌باشد. در ادامه با معرفی سد مخزنی سیلوه، مسأله شکست در این سد، با توجه به مشخصات فیزیکی و موقعیت استراتژیک آن در بحرانی‌ترین حالت تحلیل می‌شود.

مطالعه موردی

سد مخزنی سیلوه، به صورت خاکی با هسته رسی و به حجم مخزن ۲۲۵ میلیون مترمکعب، می‌باشد. این سد بر روی رودخانه لاوین چای و در بالادست شهر پیرانشهر واقع شده است. وجود شهر پیرانشهر در فاصله ۱۲ کیلومتری پایین دست این سد، اهمیت بررسی نتایج حاصل از شکست این سد را دو چندان می‌کند. مقادیر و پارامترهای زیر، براساس داده‌های سازه‌ای و زمین‌شناسی مهندسی، هیدرولوژی حوضه آبریز رودخانه و نقشه‌های توپوگرافی منطقه و با کمک مهندسیین طراح و مشاور سد استخراج شد. این سد در رقوم پایه (بستر رودخانه) ۱۵۰۰ متر واقع شده و با ارتفاع ۸۷ متر قدرت آبیگری حداکثر ۲۲۵۴۶۳۸۳۲ مترمکعب را دارد. طول تاج ۳۶۰ متر و عرض تاج سد ۱۲ متر می‌باشد. تاج سد در رقوم ۱۵۸۹ و تاج سرریز در رقوم ۱۵۸۴ واقع شده. حداکثر ارتفاع آب در هنگام سیلاب PMF بر روی سرریز ۱/۸ متر است که با توجه به طول ۸۰ متری سرریز مقدار ۴۴۳ مترمکعب بر ثانیه آب را از خود عبور می‌دهد. سطح مخزن سد در حجم حداکثر برابر با ۱۰۴۲۲۶۸۸ مترمربع می‌باشد. تخلیه مخزن سد در حجم حداکثر توسط خروجی‌های سد (سرریز و دریچه خروجی آب کشاورزی) ۱۵/۱۲ روز به طول می‌انجامد.

شکست آزمایشی و تحقیقاتی سد مستلزم تعریف پارامترهای متغیری مانند علت شکست، نوع شکست، ابعاد شکاف، زمان ایجاد و توسعه شکاف می‌باشد. برای تعریف این پارامتر متغیر و استخراج نتیجه با کمترین درصد خطا موارد زیر در نظر گرفته شد.

۱- هدف نهایی از بررسی فاجعه شکستن یک سد

۲- استفاده از آمار سدهای شکسته شده و مقایسه مشخصات سد سیلوه با موارد مشابه آن که در گذشته شکسته شده‌اند.

هدف نهایی این تحقیقات، به حداقل رساندن خسارت جانی و مالی در پایین دست سد است و این هدف مستلزم تصور شکست سد در بدترین حالت ممکن می‌باشد. از این رو علت شکست سد پر شدن مخزن و سرریز شدن آب از تاج سد انتخاب شد.

تعیین پارامترهای شکاف سد سیلوه

برای تعیین پارامترهای شکاف مثل نوع شکاف، ابعاد شکاف و زمان ایجاد و توسعه شکاف از آمار سدهای مشابه که در گذشته شکسته شده‌اند، و هم‌چنین روش‌ها و مدل‌های مختلف که توسط دانشمندان پیشنهاد شده و توضیح آن در قسمت‌های گذشته آمده است، استفاده شد. در نهایت با مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های گوناگون و کالیبره کردن آن‌ها با شرایط مشاهداتی، مقادیر زیر برای پارامترهای شکاف پیش‌بینی شد.

نوع شکاف ذوزنقه‌ای با شیب جانبی $z=0/1m$ و قاعده متوسط $b=80m$ و قاعده ابتدایی تشکیل شکاف (m) $b=0/30$ فرض شد.

بعد از انتخاب مشخصات شکاف، برای تعیین مدت زمان توسعه شکاف به حداکثر مقدار زمان آن، از فرمول تجربی زیر استفاده شد. این فرمول با توجه به مشخصات شکاف‌ها در سدهایی که در گذشته شکسته شده و با در نظر داشتن فاکتورهای سطح مخزن در حجم حداکثر، قاعده متوسط شکاف، حجم کل مخزن، حداکثر ارتفاع آب در پشت سد و دبی پیک سیلاب شکست به صورت تجربی توسط مهندسیین ارتش آمریکا پیشنهاد شده است^۱ [۱].

$$t = C \left[\left(3.1 \frac{\bar{b}}{Q_p} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{1}{\sqrt{h_d}} \right] \quad (9)$$

در این فرمول:

t = زمان شکست (hr) و Q_p : دبی پیک سیلاب شکست (cfs) که توسط فرمول ۶ محاسبه می‌شود

\bar{b} = عرض متوسط شکاف (ft)

و h_d = ارتفاع سد (ft)

¹ US Army Corps of Engineers, Breach Model, 1987

با استفاده از مدل ریاضی BREACH پارامترهای شکاف به شرح زیر برای سد مخزنی سیلوه به دست آمده است:

$$\begin{aligned} z &= 0.01(m) & b &= 0.30(m) & t &= 1.90(hr) \\ \bar{b} &= 80(m) & h_d &= 88(m) & h_{bm} &= 0 \\ Q_p &= 76114.22(m^3/s) \end{aligned}$$

لازم به یادآوری است که با توجه به توضیحات هیدرولیکی در قسمت‌های قبل جریان در میان شکاف در هر لحظه با استفاده از معادله سرریز لبه پهن محاسبه می‌شود. برای توصیف مشخصات رودخانه در پایین دست سد از ۲۲ مقطع عرضی استفاده به عمل آمده است.

نتایج

نتایج به دست آمده در این تحقیق عبارتند از:

- ایجاد شکاف در سدها به دو صورت طبقه‌بندی می‌شوند؛ شکاف‌های ایجاد شده ناشی از سرریز شدن آب از تاج لوله که معمولاً به شکل‌های مستطیلی، مثلثی و ذوزنقه‌ای ایجاد می‌شوند و شکاف‌های ایجاد شده به علت پدیده ایجاد لوله در جسم سد.

- با توجه به خصوصیات فیزیکی سد سیلوه، شکاف در این سد به صورت ذوزنقه‌ای با شیب جانبی $z=0/0.1(m)$ می‌باشد. (در حالت عبور آب از روی تاج سد). قاعده متوسط شکاف ایجاد شده در بدنه سد سیلوه $\bar{b}=80(m)$ و قاعده شکاف تشکیل شده در تاج سد در ابتدای گسیختگی $b=0/30(m)$ می‌باشد. زمان توسعه شکاف از ابتدای ایجاد در

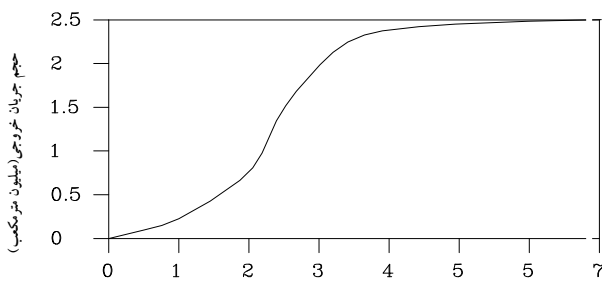
تاج سد تا تکمیل شکاف، معادل یک ساعت و پنجاه و چهار دقیقه محاسبه شده است.

- مقدار پیک سیلاب شکست برابر با $76114/22$ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد و جریان خروجی حائز اهمیت که تقریباً بیش از ۹۰ درصد حجم مخزن را شامل می‌شود، در مدت ۸ ساعت از محل تشکیل شکاف به پایین دست جریان می‌یابد (شکل ۱).

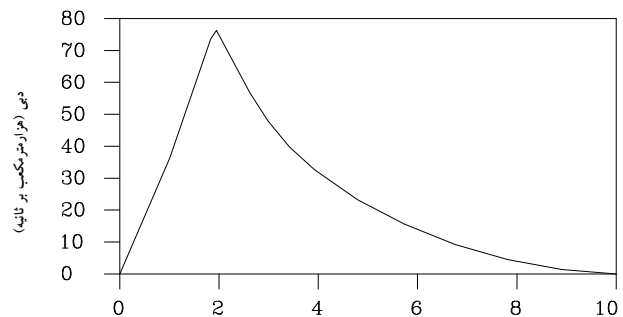
- ۶۰ درصد حجم مخزن در طی تقریباً دو ساعت و نیم بین ساعت‌های $1/2$ الی $3/6$ بعد از شکاف برداشتن سد، تخلیه می‌شود. مقدار پیک جریان شکست تقریباً دو ساعت بعد از عمل شکاف برداشتن سد به وقوع می‌پیوندد (شکل ۲).

- به دلیل خاکی بودن سد و زمان نسبتاً طولانی ایجاد شکاف در سد (حدود دو ساعت)، از توسعه موج منفی در مخزن سد صرف‌نظر گردیده است و از آنجا که جریان‌های ورودی به مخزن حائز اهمیت نمی‌باشد، سطح مخزن در حین تخلیه با روند ثابتی افت می‌کند.

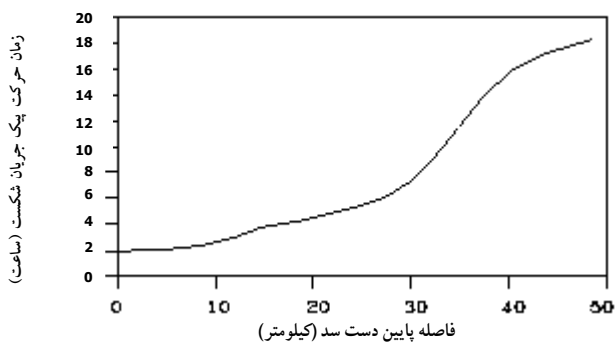
- نمودار پروفیل ارتفاع سیلاب در شکست سد سیلوه، بیانگر رقوم مختلف سیلاب شکست در فواصل پایین دست سد می‌باشد (شکل ۳). با استفاده از این نمودار نقشه پهنه خیس شدگی در اثر سیلاب شکست در پایین دست سد ترسیم گردیده است. براساس محاسبات انجام شده، شهر پیرانشهر که در فاصله ۱۲ کیلومتری پایین دست سد واقع است، تا رقوم ۱۴۲۵ متر به زیر آب خواهد رفت.



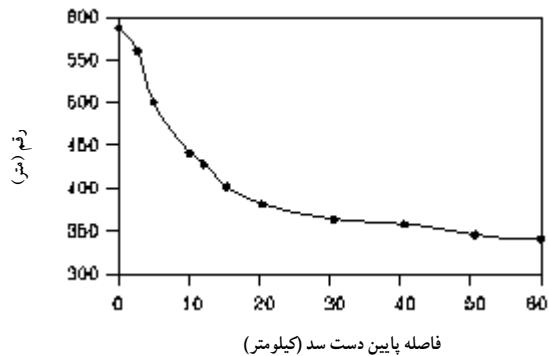
شکل ۲- حجم جریان خروجی شکست نسبت به زمان



شکل ۱- هیدروگراف جریان خروجی شکاف



شکل ۴- حرکت پیک جریان شکست در دشت پایین دست سد سیلوه



شکل ۳- پروفیل رقوم پیک جریان شکست در پایین دست سد سیلوه

- با در نظر گرفتن ضریب زبری مانینگ متوسط در پایین دست سد و با توجه به نوع پوشش منطقه (مقدار متوسط ۰/۰۴۵) نتایج به دست آمده، حاکی از اختلاف نیم تا یک درصد برای زمان حرکت پیک سیلاب می‌باشد. این امر تأثیر بسیار کمی بر ارتفاع پیک سیلاب دارد که به عنوان خطای جزئی قابل صرف نظر کردن است.

- مدت زمان سیلاب به نقاط مختلف پایین دست سد، در شکل ۴ مشخص شده است. به این ترتیب نزدیک به ۳ ساعت طول خواهد کشید تا موج سیلاب شکست به شهر پیرانشهر برسد و این زمان برای انجام اقدامات و عملیات هشدار و امداد رسانی مناسب است.

منابع

- 1- DE SAINT – VENANT B. "Theorie du mouvement non permanent des eaux. Comptes Rendus de l'Academic des Sciences". 187;73:147.
- 2- RITTER, A., (1961). "Eie Fortpflanzung der Wesser Wellen. Z. des Ver. Deutsch Ing", 36(33): 947.
- 3- DRESSLER R.F. (1972). "Hydraulic Resistance Effects upon the Dam Break Function", Journal of Research of the National Bureau of Standards, 49(3) 217.
- 4- WHITHAM, G.B., (1974). "The Effects of Hydraulic Resistance in Dam Break Function", Journal of Research of the Royal Society of London, A(227):399.
- 5- SU, S. and BARNES, A.H., (1970). "Geometric and Frictional Effect on Sudden Releases", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 96, 2185.
- 6- SAKKAS, J.G., and STREKOFF, R., (1983). "Dam Break Flood in a Prismatic Dry Channel", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 99:2195.
- 7- SMITH, P.C.A., (1973). "Similarity Solution for Slow Viscous Flow Down an Inclined Plane", Journal of Fluid Mechanics, 58(2): 275.
- 8- WILSON, S., (1998) "Dam BURGESS S.L. The Steady Spreading Flow of a Rivulet of Mud", Journal of Non Newtonian Fluid Mechanics, 79:77.
- 9- SCHWARTZ, L.W., (1989). "Viscous Flows Down an Inclined Plance: Instability and Finger Formation Physics of Fluids", A(1) : 443
- 10- Manual of Dam BREAK Software, (1998). [Boss dbk. Com] internet.