شبیه‌سازی و ارزیابی ایمنی سناریوهای محتمل شکست سد مخزنی جره رامهرمز

غلامحسین کریمی
رئیس گروه هیدرولیک و رسوب، سازمان آب و برق خوزستان Karimi1925@gmail.com
کورش شفیعی بافتی
مدیریت فنی و مهندسی سد و نیروگاه، سازمان آب و برق خوزستان Kourosh.shafieibafti@yahoo.com

چکیده

شبیه‌سازی پدیده شکست سدها و سیلاب حاصل از آن در راستای کاستن از میزان تهدید این پدیده، به دلیل موقعیت مراکز جمعیتی مجاور و پایین‌دست سد امری بسیار ضروری بوده و پیش‌بینی دقیق‌تر از سیلاب و زمان رسیدن امواج آن به منطقه مورد نظر، یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای توسعه طرح‌های عملیاتی مدیریت بحران به شمار می‌رود. پایه و اساس این مطالعات تحلیل‌های هیدرولیکی شکست سد است که هسته اصلی مقاله پیش‌رو می‌باشد. از آنجا که یکی از مهمترین مراحل شبیه‌سازی شکست سد، تصمیم‌گیری درباره شرایط سد و تعریف سناریوهای گوناگون برای بدست آوردن برآورد اولیه‌ای از وضعیت سیلاب در پایین‌دست سد شکسته شده و اوضاع بحرانی متعاقب آن می‌باشد. در این مقاله سناریوهای شکست سد در دو بخش سناریو حالت سیلابی و سناریو روز آفتابی با تشریح پارامترها و جزئیات مختلف به همراه ارزیابی ایمنی سد ارائه گردید. برای شبیه‌سازی سناریوهای مذکور، مدل عملکرد مخزن با ملحوظ نمودن جریان ورودی به مخزن، حجم آب ذخیره شده و جریان خروجی از سامانه تخلیه سیلاب توسعه یافته است و با مشخص شدن امکان وقوع روگذری از تاج سد و یا ایجاد حفره و گسترش آن در بدنه و نهایتاً شکست سد، تغییرات لازم در مدل برای در نظر گرفتن گذر جریان در هر دو مرحله قبل و بعد از پدیدار شدن شکاف در بدنه اعمال گردیده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، ارزیابی ایمنی، سناریو، شکست سد، رخنه، شکاف، سد مخزنی جره

مقدمه

با شکست سد حجم عظیم آب انباشته شده در مخزن در زمان کوتاهی تخلیه و سیلاب ویران‌گر پایاب را در بر می‌گیرد. شکست سد می‌تواند به دلیل سرریز شدن آب از بدنه سد ناشی از افزایش سریع تراز آب دریاچه سد به علت بارش‌های حوضه بالادست، ناکافی بودن ظرفیت یا عدم کارآئی به موقع سیستم تخلیه‌کننده سیلاب در زمان گذر سیل از مخزن، نشست‌های بیش از حد، ناپایداری شیب‌های پایین‌دست بدنه یا غفلت در اجرای برنامه‌های نگهداری، بازرسی و بهره‌برداری نظیر انسداد مجرای تخلیه‌کننده‌ها بر اثر رسوب به وقوع پیوندد. تراوش کنترل نشده در بدنه سد به دلیل ضعف یا کیفیت پایین اجرا در مجاورت سازه‌های تعبیه شده در بدنه، خراب‌کاری در سد، زلزله و مخاطرات متعاقب آن از قبیل روانگرائی پی و ریزش توده‌های لغزشی در دریاچه پشت سد از دلایل دیگر خرابی سدها می‌باشد. تجزیه و تحلیل آمارهای شکست سدهای دنیا و آنالیز تطبیقی عوامل آن با سد اخیر می‌تواند در شناسائی نقاط ضعف و قوت راهگشا باشد:

- بیشترین تعداد سدهای شکسته شده مربوط به سدهای خاکی بوده است.
- ۷۰ درصد از شکست‌ها در یک دوره صفر تا ۱۰ ساله پس از ساخت سد رخ داده است. و از این تعداد ، چندین سد دقیقاً در همان سال اول بهره‌برداری شکسته شده‌اند.

- بیشترین حوادث مربوط به سدهای با ارتفاع کمتر از ۳۰ متر بوده است که در هر حال نسبت بزرگی از سدهای در حال بهره‌برداری می‌باشند. بیشتر شکست سدها در این گروه مربوط به سدهای با ارتفاع متوسط بوده است. حدود ۷۰ درصد از این سدها با ارتفاع کمتر از ۱۵ تا ۳۰ متر با حجم مخزن بیش از ۱ میلیون متر مکعب بوده‌اند.
- بیشتر حوادث در سدهای ساخته شده جدید رخ داده‌اند. جالب توجه اینکه ۷۰ درصد از شکست‌ها در یک دوره صفر تا ۱۰ ساله رخ داده است.
- در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، بیشترین عامل شکست، لبریزی از سدها و فرسایش در بدنهٔ سد بوده و ضعف در پی سدها در مرتبه بعدی قرار داشته است.
- عدم کفایت ظرفیت آبگذری سرریز سدها معمول‌ترین علت تخریب در سازه‌های جانبی گزارش شده است.

شکست آزمایشی سد مستلزم تعریف پارامترهای مختلف مانند نوع شکست، ابعاد مقطع شکاف، زمان شکل‌گیری و الگوی گسترش آن به منظور محاسبه و پیش‌بینی هیدروگراف دبی خروجی حاصل از شکست و مسیریابی آن در میان اراضی مجاور و پایین‌دست سد جهت تخمین پارامترهای سیلاب و زمان رسیدن امواج حاصل از آن به منطقه مورد نظر می‌باشد که از اهداف مورد بررسی در مقاله حاضر می‌باشند.

موقعیت، مشخصات و اهداف سد مخزنی جره

سد مخزنی جره از نوع خاکی با هسته ناتراوای رسی میانی می‌باشد که در ۳۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان رامهرمز بر روی رودخانه زرد، در طول جغرافیایی °۴۹ و ′42 شرقی و عرض جغرافیایی °31 و ′26 شمالی واقع شده است. سایر پارامترها نیز به شرح زیر می باشند:

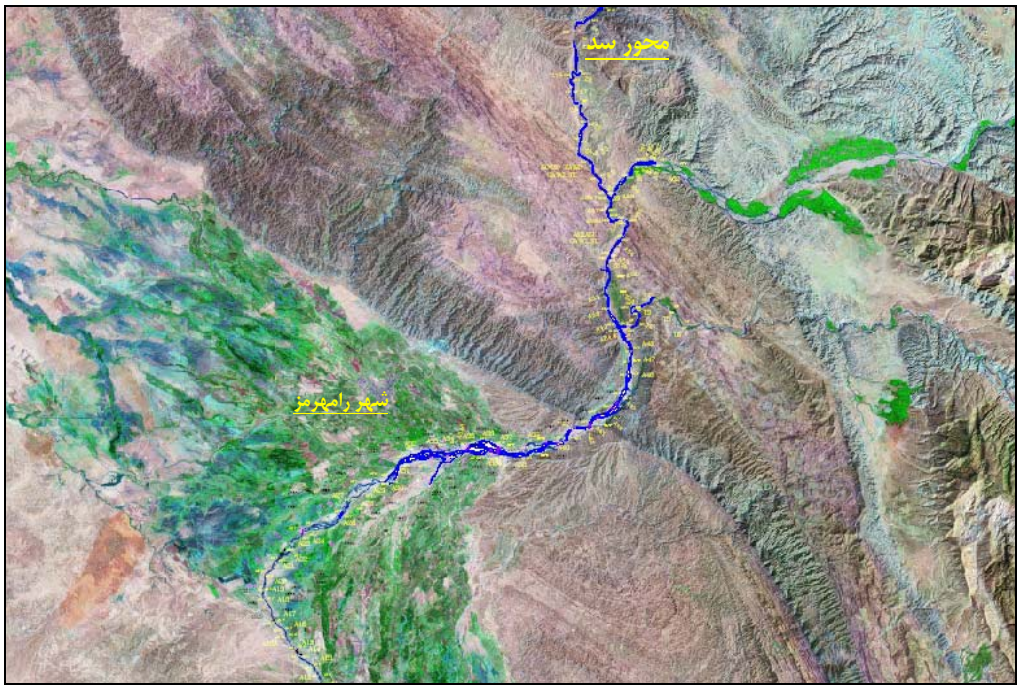
ارتفاع از بستر رودخانه: 108/5 متر
ارتفاع از پی: ۱۱۴ متر
طول تاج: 735/9 متر
تراز تاج: 507/5 متر از سطح دریا
عرض سد در تاج: ۱۲ متر
شیب وجه بالادست: 1 عمودی به 2/1 افقی
شیب وجه پایین دست: 1 عمودی به 1/9 افقی
حجم بدنه: 6/7 میلیون متر مکعب
تراز عادی بهره‌برداری: 502 متر
تراز حداقل بهره‌برداری: 453/3 متر از سطح دریا
حجم رسوب 50 ساله: 24 میلیون متر مکعب

حجم کل مخزن در تراز عادی: 254 میلیون متر مکعب
سیستم تخلیه سیلاب: سرریز دریچه‌دار + سرریز لبه‌پهن
نوع سرریز اصلی: سرریز دریچه‌دار، 3 دهانه 7 متری
تراز تاج سرریز اصلی: 490 متر از سطح دریا
تراز تاج سرریز کمکی: 502/5 متر از سطح دریا
طول تاج سرریز کمکی: 193 متر
تراز دهانه ورودی تخلیه‌کننده تحتانی: 431 متر از سطح دریا
حداکثر ظرفیت تخلیه‌کننده تحتانی: 90 مترمکعب درثانیه در تراز عادی
تراز دهانه ورودی آبگیر آبیاری: 448 متر از سطح دریا
ظرفیت تخلیه آبگیر آبیاری: 18 متر مکعب در ثانیه

تنظیم حدود ۲۹۶ میلیون متر مکعب از آورد سالانه رود زرد و احداث شبکه آبیاری و زهکشی در پایین دست سد به منظور بهبود و توسعه ۲۲۳۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی از اهداف اجرای سد جره می‌باشد. همچنین بهره‌برداری از ذخیره آب دریاچه در ارتفاع مؤثر در پشت سد به منظور تولید حدود ۳۸ گیگا وات ساعت انرژی برق‌آبی از دیگر اهداف احداث این سد بوده است. تصویر ماهواره‌ای محدوده مطالعاتی در شکل 1 نشان داده شده است.

ارزیابی ایمنی سناریوهای محتمل شکست سد جره

شکست سد یک امر احتمالی است بنابراین در شبیه‌سازی باید شرایط مختلف منظور گردد. یکی از مراحل مهم و حساس و به نوعی پیش‌نیاز سایر بخش‌های مطالعات شکست سد، طراحی سناریوهای مناسب برای مدل‌سازی شکست فرضی سد می‌باشد. معمولاً در ارزیابی نتایج شکست سد روی مناطق پایین‌دست، دو سناریو مختلف شکست شرایط سیلابی و روز آفتابی بررسی می‌شود که به ترتیب متناظر دو سناریوی فرسایش مصالح سد به وسیله عبور جریان آب از روی بدنه (روگذری) یا گسترش رخنه در میان سد (رگاب) می‌باشد. تفاوت اصلی این دو سناریو که شرایط کاملاً متفاوتی را از نظر خسارات مالی و جانی به ساکنین پایین‌دست تحمیل می‌کنند در الگوی بازشدگی ایجاد شده در بدنه سد می‌باشد که مستقیماً بر منحنی هیدروگراف سیلاب در ابتدای مسیر به عنوان شرط مرزی بالادست تأثیر می‌گذارد. صرف نظر از این بخش، سایر مراحل که در حقیقت روندیابی سیلاب در دره پایین‌دست است برای هر دو نوع حالت شکست یکسان است.



شکل(1) تصویر ماهواره‌ای از محدوده مطالعاتی

الف- سناریوی شکست حالت سیلابی

با توجه به آمارهای موجود، معمول‌ترین عامل شناخته شده تخریب سدهای خاکی سرریز شدن آب از تاج سد بوده است. شکست سد خاکی در اثر پدیده روگذری، با ایجاد و گسترش یک شکاف در رویه پایین‌دست سد آغاز می‌گردد. فرسایش در کانال شکست به صورت یک فرآیند فعل و انفعالی بین آب و رسوب در نظر گرفته می‌شود. آب سرازیر شده از تاج سد، باعث فرسایش مصالح بستر کف شکاف و فراهم شدن شرایط برای ریزش ناگهانی شیب‌های جانبی شده و به این ترتیب شرایط لازم برای گسترش کانال شکست فراهم می‌آید. بنابراین در سناریوهای روگذری قبل از هرگونه فرسایش باید تراز آب دریاچه از تراز تاج سد فراتر رود. در این فرآیند، کارکرد سامانه تخلیه سیلاب نقش اساسی ایفا می‌نماید چرا که با توجه به فرضیات زمان طراحی در صورت عملکرد صحیح باید سیلاب به طور ایمن به پایین دست منتقل گردد. با این حال به دلایل متعدد از جمله تغییر در آب‌نگاشت سیلاب ورودی به دلیل تغییر اقلیم، افزایش دوره آماری و ... یا بهره‌برداری دیر هنگام و نادرست ممکن است خللی در این روند ایجاد گردد که روگذری را به دنبال داشته باشد.

برای بررسی موضوع دو سناریو اصلی تعریف گردید. در سناریو اول با فرض تأخیر در بهره‌برداری از سرریز فرض بر این است که اپراتور مسئول موفق به بهره‌برداری به موقع از تأسیسات سرریز نگردد و کلیه دریچه‌ها بسته بمانند که بعضاً در مدیریت سدها رخ داده است. در سناریوی دیگر عدم عملکرد یکی از دریچه‌ها در نظر گرفته شده که این موضوع به دلایل نقص فنی چندان دور از ذهن نیست. این فرض در زمان طراحی سامانه تخلیه سیلاب نیز عموماً مد نظر قرار می‌گیرد با این تفاوت که در هنگام طراحی، سیلاب ۱۰۰۰ ساله در دریاچه روندیابی می‌شود و در این سناریو سیلاب حداکثر محتمل نیز مد نظر بوده است.

در دو حالت بالا بسته ماندن هر سه دریچه و یا خارج از رده بودن یک دریچه در نظر گرفته شده ولی امکان خراب شدن و خارج از سرویس بودن دو دریچه به طور همزمان نیز هر چند ناچیز ولی منتفی نیست. در زمان بهره‌برداری از یک دریچه تنها، به دلیل بینابین بودن دو حالت حدی مذکور، امکان درون‌یابی بین نتایج الگوهای پیشنهادی وجود دارد با این حال برای بررسی بیشتر این موضوع حالات مختلف بررسی و نتایج آن در جدول 1 آورده شده است. همان گونه که در این جدول نیز مشاهده می‌شود روگذری در برخی سناریوها به سرعت باد در زمان عبور بخش اوج هیدروگراف بستگی داشته و در صورت تداوم باد در سطح مخزن در این بازه زمانی امکان وقوع آن متصور است با این حال لحاظ نمودن سیلاب با احتمال وقوع پایین همزمان با وزش باد با دوره بازگشت بالا امر محتملی نیست. نکته قابل تأمل دیگر در این جدول بالا آمدن تراز آب از 506/5 متر از سطح دریا (رقوم هسته نفوذ ناپذیر میانی و نه رقوم تاج سد) و امکان

گذر جریان به صورت محدود در سناریوهای یک تا سه و به ویژه هنگام وقوع سیلاب حداکثر محتمل و عملکرد تنها یکی از دریچه‌ها یا سیل با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله و عدم بهره‌برداری از دریچه‌ها می‌باشد. در این گونه موارد بهره‌بردار باید بر اساس سرعت باد در منطقه نسبت به اقدامات پیشگیرانه برای افزایش تراز سیلاب در مخزن اقدام نماید.

جدول (1) ارزیابی ایمنی سد در برابر روگذری

ردیف	دوره بازگشت سیلاب	تراز دریاچه هنگام ورود سیلاب به مخزن (masl)	تعداد دریچه‌های قابل بهره‌برداری در زمان سیلاب	حداکثر جریان خروجی از سد (m^3/s)	زمان رسیدن به دبی پیک (ساعت)	تراز بیشینه مخزن (masl)	حجم آب تخلیه شده ($1000m^3$)
1	PMF	502	1	4944/7	18/5	507/4	۲۶۴۵۹۲
2	PMF	502	2	4966/7	18/5	506/6	۲۶۲۶۰۴
3	10000	502	0	3473/2	18/5	507/04	۱۷۹۳۸۲
4	10000	502	1	3441/6	18/5	506/1	۱۸۷۹۸۸
5	10000	502	2	3439/4	18/5	505/3	۱۸۷۵۷۱
6	100	502	0	2573/5	19	506/2	۱۳۴۷۸۷
7	100	502	1	2532/4	19	505/3	۱۴۲۵۴۳
8	100	502	2	2529/4	19	504/4	143022/8

از میان سناریوهای بحرانی تنها سناریویی که در جدول 1 به آن اشاره نشده، وقوع سیلاب حداکثر محتمل و بسته ماندن هر سه دریچه است که در روند شبیه‌سازی عملکرد مخزن مشخص گردید. در این حالت امکان روگذری و متعاقب آن در صورت تأمین معیارهای شروع و گسترش شکاف، شکست سد متصور است. قبل از بررسی بیشتر این سناریو خاطر نشان می‌سازد با توجه به احتمال بسیار ناچیز وقوع همزمان این شرایط آن هم با این شدت می‌توان از ایمنی بالای سد جره در برابر روگذری اطمینان حاصل نمود.

در این طرح برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، مدل عملکرد مخزن با ملحوظ نمودن جریان ورودی به مخزن، حجم آب ذخیره شده و جریان خروجی از سامانه تخلیه سیلاب توسعه داده شد. با مشخص شدن امکان وقوع روگذری از تاج سد، تغییرات لازم در مدل برای در نظر گرفتن گذر جریان در هر دو مرحله قبل و بعد از پدیدار شدن شکاف در بدنه اعمال گردید. عبور جریان از میان شکاف در هر لحظه با رابطه سرریز لبه پهن در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است در این مدل در هنگام شبیه‌سازی سناریوهای ارزیابی ایمنی سد در برابر روگذری جدول 1 کارکرد دریچه‌ها در زمان سرویس بر اساس تراز سطح آب می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش رقوم سطح آب از تراز نرمال، دریچه با سرعت از پیش تعیین شده تا بازگشائی کامل گشوده و با کاهش مجدد رقوم سطح آب و پس از رسیدن به تراز نرمال با همین سرعت بسته می‌شوند. سرعت باز و بسته شدن در این طرح یکسان و برابر 0/3 متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در زمان عبور سیل از مخزن چنانچه به هر دلیل دریچه‌ای بسته بماند با توجه به تراز تاج آنها (۵۰۲ متر از سطح دریا) روگذری از بخش بالای آن حتمی است. در مدل پخش سیلاب در مخزن، این بخش نیز شبیه‌سازی شده که دبی‌های کم در نمودارهای گذر جریان نشانگر لبریز شدن از تراز فوقانی دریچه بسته مانده می‌باشد.

اولین گام در مدل‌سازی شکست فرضی سد شبیه‌سازی ریاضی نحوه گسترش شکاف در بدنه سد است چرا که در روند مطالعات، نتایج این شبیه‌سازی عملاً پایه مدل پیشروی سیل ناشی از شکست قرار خواهد گرفت و تحلیل خسارت و مدیریت بحران نیز بر اساس آن انجام خواهد شد. همان‌گونه که پیشتر نیز بیان شد در سناریوهای سرریز شونده، شکاف از رویه پایین‌دست سد شروع و با گذشت زمان به تدریج در ارتفاع بدنه سد توسعه می‌یابد. شکل، اندازه و زمان لازم برای تشکیل و توسعه شکاف به فرسایش‌پذیری مصالح سد و مشخصه-

های جریان ایجاد کننده شکاف بستگی دارد. بر اساس هندسه‌های فرضی برای شکل شکاف، پارامترهای تعریف کننده شکل بازشدگی شامل شیب جانبی، عرض و عمق شکاف در نظر گرفته شده‌اند.

شیب جانبی دو سمت شکاف بین صفر و کمی بیشتر از واحد (افقی به یک قائم) تغییر می‌کند که به زاویه پایداری مصالح که شکاف در میان آن ایجاد می‌شود وابسته است. با انتخاب مقادیر مختلف عرض کف و شیب جانبی شکل‌های مختلف شکست از مثلثی، مستطیلی تا ذوزنقه‌ای شبیه‌سازی می‌شود. آیین‌نامه‌های مختلف که بر روی شکست سدهای خاکی ناشی از روگذری سیلاب مطالعه و اظهارنظر کرده‌اند به دلیل مکانیسم ریزش دیواره شیب‌ها، بازشدگی ناشی از این گونه شکست‌ها را به صورت ذوزنقه‌ای پیشنهاد نموده‌اند (شکل 1).

شکل (2) بدنه سد و گسترش شکاف در بدنه در سناریوی آزمایشی

در این مطالعات از روابط زیر برای شروع و توسعه تشکیل شکاف استفاده شده است:

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

$$h_b = h_d - (h_d - h_{bm})\left(\frac{\tau_b}{t}\right)^{\rho} \quad (2)$$

$$b_t = b\left(\frac{\tau_b}{t}\right)^{\rho} \quad (3)$$

در این روابط، b عرض نهائی شکاف در کف، $\bar{b}$ عرض متوسط، z شیب دیواره جانبی مقطع شکست، h_d و b_t به ترتیب عمق و عرض کف لحظه‌ای شکاف و h_b ارتفاع کف شکاف از یک سطح مبنا مانند کف مخزن یا کف کانال خروجی می‌باشد. در این مدل مقطع شکست از یک نقطه شروع و در مدت زمان t توسعه یافته و به عرض نهائی b در ارتفاع h_{bm} از سطح مبنا منتهی می‌گردد. τ_b زمان سپری شده از لحظه تشکیل مقطع شکست و ρ نحوه گسترش شکاف در بدنه است که در این طرح مطابق توصیه‌های مراجع معتبر برابر یک و به صورت خطی در نظر گرفته شده است. در این کار برای تخمین پارامترهای شکست از روابط برازش شده بر داده‌های بدست آمده از سدهای شکسته شده یا اطلاعات مشاهداتی سدهای مشابه که در گذشته این فرآیند را تجربه نموده‌اند استفاده شده که مقادیر آن در جداول 2 تا 4 آورده شده است.

در سناریوهای روگذری با فرض محل شروع گسیختگی در نقطه‌ای از تاج سد، شکاف در بدنه مدل می‌شود. از آنجا که تراز تاج سدهای خاکی هیچ وقت به لحاظ نشست یا دلایل دیگر یکسان نمی‌باشد، لبریز شدن جریان از قسمت نشست کرده می‌تواند نقطه شروع

فرسایش رویه پایین‌دست در آن منطقه باشد. بنابراین بهسازی تاج سد با تعبیه گرده یا آسفالت کف آن می‌تواند تأثیر عمده‌ای در افزایش مقاومت نسبت به فرسایش‌پذیری و بهبود ایمنی فراهم آورد.

جدول (2) برآورد متوسط عرض شکست سد خاکی جره (متر)

53/75 < & < 322/5	Johnson & llles (1976)
53/75 < & < 322/5	Singh & Snorrason (1982,1984)
53/75 < & < 322/5	Federal Energy Regulatory Commission (1987)
202/5	USBR(1988)
$1/06 < \frac{B_{top}}{B_{bottom}} < 1/74$	Singh & Scarlatos (1988)
223/65	Von Thun & Gillette (1990)
288/6	Froehlich (1995b)

جدول (3) برآورد شیب شکاف بدنه سد خاکی جره

0/25 ~ 1	Federal Energy Regulatory Commission (1987)
0/25 ~ 1	Singh & Scarlatos (1988)
1	Von Thun & Gillette (1990)
1/4	Froehlich (1995b): overtopping
0/9	Froehlich (1995b): piping

جدول (4) برآورد زمان شکست بدنه سد خاکی جره (ساعت)

0/25 < & < 1	Singh & Snorrason (1982,1984)
3/62	MacDonald & Langridge Monopolis (1984)
0/1 < & < 1	Federal Energy Regulatory Commission (1987)
2/23	USBR (1988)
< 3	Singh & Scarlatos (1988)
0/82 یا 1/6	Von Thun & Gillette (1990)
1/77	Froehlich (1995b)

تعریف سناریوهای شکست روگذری فرضی و نتایج برآورد پارامترهای سیلاب هر یک به ترتیب در جداول 5 و 6 آورده شده است. در این طرح تکیه‌گاه‌ها به صورت فرسایش‌ناپذیر در نظر گرفته شده و گسترش شکاف تنها در محدوده بدنه اجرا شده شبیه‌سازی شده است. بنابراین در تعیین اولیه ابعاد شکاف، محل شروع و شکل نهائی مد نظر بوده است. بر این اساس برای در نظر گرفتن بحرانی‌ترین حالت، محل شروع شکست در وسط محور سد (۴۰۰ متری) فرض شده که در این حالت با توجه به مقادیر مختلف شیب جانبی، کف نهائی بیش از تراز ۴۴۰ گسترش نمی‌یابد. این حالت در سناریوهای ۱ تا 8 مد نظر بوده است. برای تکمیل گزینه‌ها با تغییر محل شروع شکاف در تاج، تراز انتهائی کف شکاف به اندازه ۲۰ متر پایین‌تر نیز در نظر گرفته و سه سناریوی 9 تا 11 بر این اساس طرح شد که مشخصات بیشتر آن در جدول 5 آورده شده است.

در تحلیل شکست سد، درصد عدم اطمینان بالایی وجود دارد. در انتخاب ابعاد شکاف و مدت زمان تشکیل شکاف باید فرضیاتی صورت گیرد و پارامترهایی انتخاب شود که با بیشترین تطابق با وقایع پیش‌رو بتواند مقدار سیل حاصل از شکست سد را به درستی برآورد نماید. بر این اساس در سناریوهای تعریف شده با پارامترهای شکست متفاوت، اثرات تغییر پارامترها ارزیابی شده است. یکی از این موارد، تعریف زمان آغاز شکست می‌باشد. معیارهای مختلفی برای شروع شکست در فرآیند مدل‌سازی پیشنهاد شده است. در این طرح سه رویکرد مد نظر بوده است:

- تجاوز تراز آب مخزن از تراز تاج به مقدار مشخص
- رقوم سطح آب و تداوم روگذری شامل تراز آب و مدت سرریز شدن جریان روی دامنه پایین‌دست
- زمان شروع در بخشی از بازه روندیابی (این فرض عموماً در سناریوهای ایجاد رخنه در بدنه استفاده می‌شود)

جدول (5) تعریف سناریوهای روگذری فرضی

ردیف	هیدروگراف سیلاب ورودی به مخزن	تراز دریاچه هنگام ورود سیلاب به مخزن (mals)	تعداد دریچه های قابل بهره برداری در زمان سیلاب	محل شروع شکاف (در طول محور سد یا تاج) (متر)	عرضنهائی کف شکاف (متر)	عمق یا تراز نهائی شکاف (متر)	روند توسعه شکاف	شیب جانبی وجه راست و چپ شکاف [1]	ضریب آبگذری شکاف	تراز آغاز شکست (mals)	زمان تکمیل شکست (ساعت)	معیار شروع خرابی
1	PMF	502	0	400	300	440	خطی	1:1	1/5	507/6	1	تراز آب
2	PMF	502	0	400	300	440	خطی	1:1	1/5	507/6	1/5	تراز آب
3	PMF	502	0	400	300	440	خطی	1:1	1/5	507/6	2/5	تراز آب
4	PMF	502	0	400	300	440	خطی	1:1	1/5	507/7	1/5	تراز آب
5	PMF	502	0	400	300	440	خطی	1:1	1/5	+507/6 15	1/5	تراز آب+تداوم روگذری
6	PMF	502	0	400	300	440	خطی	1:1	1/5	+507/6 30	1/5	تراز آب+تداوم روگذری
7	PMF	502	0	400	300	440	خطی	0/6:1	1/5	507/6	1/5	تراز آب
8	PMF	502	0	400	300	440	خطی	1/4:1	1/5	507/6	1/5	تراز آب
9	PMF	502	0	395	110	420	خطی	1:1	1/5	507/6	1	تراز آب

تراز آب	1/5	507/6	1/5	1:1	خطی	420	110	395	0	502	PMF	10
تراز آب	2/5	507/6	1/5	1:1	خطی	420	110	395	0	502	PMF	11

H:V -1

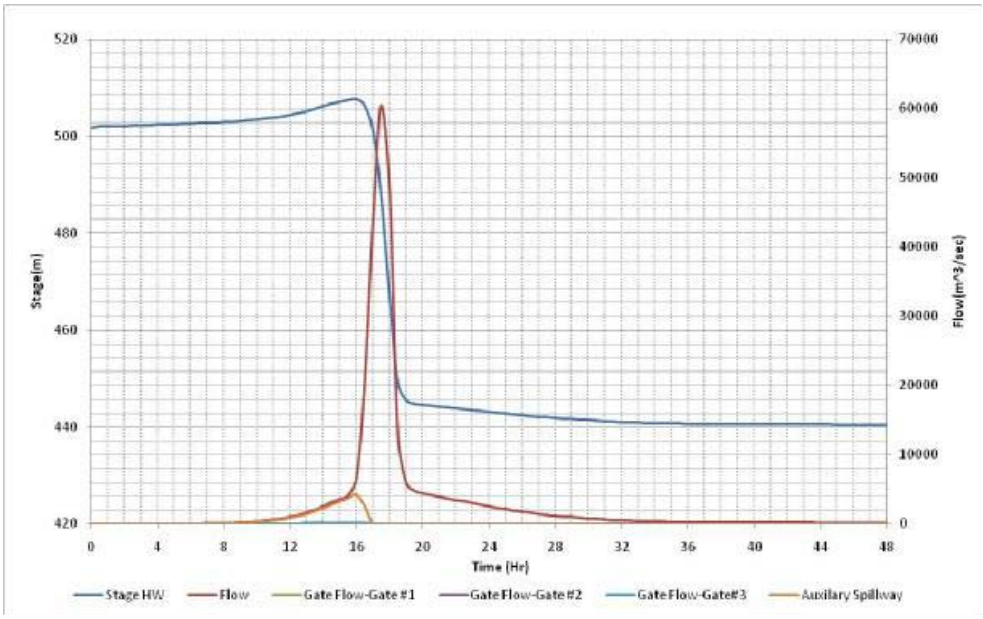
در این طرح دو مقدار 0/1 و 0/2 متر در سناریوهای ۲ و ۴ جدول 5 برای بررسی تأثیرات ارتفاع آب بالای تراز تاج در شروع شکست و حساسیت نتایج در نظر گرفته شده است. همان گونه که در جدول 6 نمایان است با افزایش 0/1 متر رقوم سطح آب در شروع شکست، دبی اوج حدود ۱۰۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد.

به طور کلی اولین مرحلهٔ خرابی در یک سد خاکی در نتیجه روگذری، تخریب لایه محافظ موجود در رویه پایین‌دست سد به دلیل عبور جریان پر سرعت آب از روی آن می‌باشد. چنانچه این سطوح بتوانند در این مدت پابرجا بمانند می‌توان از ایجاد شکاف و حتی شکست سد جلوگیری نمود. استفاده از قطعات سنگی بزرگ یا پوشش گیاهی مناسب برای محافظت از سطوح در برابر روگذری می‌تواند با افزایش فرصت اعلام اخطار و تخلیه مناطق مسکونی در معرض خطر پایاب، خسارات وارده را به طرز محسوسی کاهش دهد. این موضوع با معرفی زمان آغاز شکست به صورت فاصله زمانی بین اولین جریان عبوری از تاج سد تا آغاز زمان تشکیل شکست در مدل وارد گردید. خاطر نشان می‌سازد این زمان با زمان تکمیل شکست که مدت زمان بین ایجاد اولین شکاف در رویه پایین‌دست تا زمان رخ دادن شکست کامل سازه می‌باشد تفاوت دارد. برای بررسی تأثیر تغییر پارامترها دو گزینه بررسی گردید. در این دو حالت ابتدا ۱۰ دقیقه و سپس ۳۰ دقیقه تأخیر برای شروع فرسایش شیروانی پایین‌دست در نظر گرفته شد که همان‌گونه که در جدول 6 سناریو (۵ و ۶) نیز مشاهده می‌شود در حالت اولیه پیک هیدروگراف سیلاب نیز کاهش و در حالت دوم این تغییرات محسوس نمی‌باشد. علت این امر را می‌توان در شکل منحنی هیدروگراف در این بازه زمانی تفسیر نمود. در شکل 3 عملکرد سامانه تخلیه سیلاب، هیدروگراف خروجی از مقطع شکست سد و تغییر تراز دریاچه سد نسبت به زمان در سناریوی شماره ۳ روگذری و در شکل 4 عملکرد مخزن (رقوم سطح آب و جریان خالص ورودی به مخزن) در سناریوی مذکور نشان داده شده است.

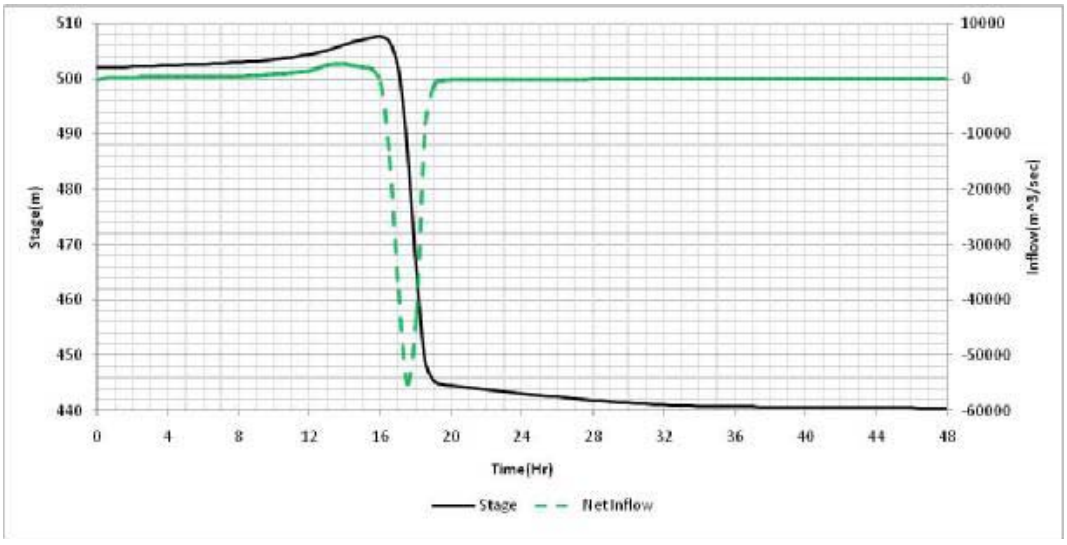
جدول (6) برآورد سیلاب ناشی از شکست سد در سناریوهای روگذری

ردیف	حداکثر جریان خروجی از سد (m^3/s)	زمان رسیدن به دبی اوج (ساعت)	حجم آب تخلیه شده ($1000m^3$)
1	120583	16/5	506402
2	93889	17	507789/6
3	60450/25	17/5	509065
4	83416/8	17	504882/4
5	82574/6	17	506115/8
6	93888/9	17	507789/6
7	94043	17	506684/4
8	93637/7	17	509016/7
9	101801/9	16/5	507275/8
10	93863/2	17	510868/5
11	61907/6	18	517602/2

شایان ذکر است انتخاب پارامترهای شکاف قبل از شکست سد و در غیاب نتایج مشاهداتی مشابه نتایج غیر قابل اطمینان و بعضاً اشتباهی را به دنبال دارد. با این حال خطاهای مختلف در برآورد این پارامترها و نتایج حاصل از روندیابی سیلاب ناشی از سناریوهای مختلف در پیش‌روی موج سیلاب در پایاب کاهش می‌یابند و هر چه فاصله از سد دورتر گردد، این مقادیر به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند در این طرح نیز به دلیل فاصله شهر رامهرمز و قرار گرفتن در دشت سیلابی، این موضوع بیشتر نمود داشته و بنابراین خطای برآورد پارامترهای شکست تا حد مناسبی پوشش داده می‌شود.



شکل (3) عملکرد سامانه تخلیه سیلاب، هیدروگراف خروجی از مقطع شکست سد و تغییر تراز دریاچه سد نسبت به زمان در سناریوی شماره ۳ روگذری



شکل (4) عملکرد مخزن (رقوم سطح آب و جریان خالص ورودی به مخزن) در سناریوی شماره ۳ روگذری

ب- سناریوی شکست روز آفتابی

در سناریو روز آفتابی یا زیرشوئی فرض بر این است که سد در وضعیت عادی در حال بهره‌برداری باشد. در این نوع شکست که در هر ارتفاعی از جسم سد محتمل است به دلایل سازه‌ای، بدنه سد از درون دچار تخریب و فروپاشی می‌گردد و از آنجا که هیچ نشانه‌ای از

شکسته شدن سد مشاهده نمی‌شود فرصت کافی برای پیش هشدار در اختیار نمی‌باشد هر چند که مدت زمان شکست در این سناریو به مراتب بیشتر از مدت مشابه شکست ناشی از سرریز شدن می‌باشد.

در این سناریو ابتدا حفره‌ای در بدنه سد ایجاد و با ادامه روند آبشستگی و تشکیل مسیرهای جریان در بدنه سد، نشست و فرار آب تشدید و با فرونشست قسمت بالائی، مقطع شکست گسترش و نهایتاً به شکست کامل سد منجر می‌شود. در این مدل، فرسایش بالارونده و پایین‌رونده رخنه در مراحل اولیه با نرخ یکسان فرض شده است. به محض ریزش سقف بین تراز بالایی رخنه تا تاج سد به داخل کانال شکاف ایجاد شده در بدنه، جریان از کنترل روزنه‌ای به جریان روی سرریز تغییر و سپس فرسایش کاملاً شبیه به حالت روگذری در بخش باقیمانده از کف شکاف تا بستر فرسایش ناپذیر سد ادامه می‌یابد.

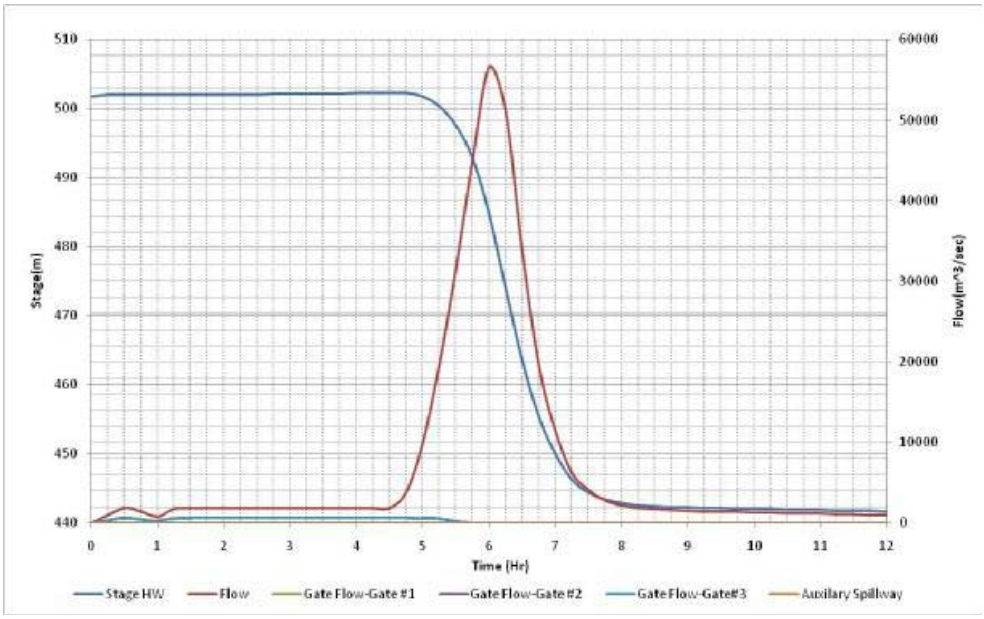
تفاوت این سناریو با سناریو روگذری در هیدروگراف سیلاب ورودی به مخزن می‌باشد که در سناریو زیرشوئی عموماً برابر سیلاب ۱۰۰ ساله،۱۰۰۰ ساله یا دبی پایه رودخانه در نظر گرفته می‌شود. تراز دریاچه هنگام ورود سیلاب به مخزن در بدترین حالت برابر تراز عادی بهره‌برداری فرض گردید. در این سناریو عملکرد سامانه تخلیه سیلاب مد نظر نبوده و در بخش مشخصه‌های شکست علاوه بر موارد مذکور در سناریو روگذری تراز اولیه حفره، ضریب زیرشوئی و زمان شروع در نظر گرفته می‌شود. تعریف سناریوهای زیرشوئی فرضی و جزئیات بیشتر آنها در جدول 7 و نتایج برآورد پارامترهای سیلاب مربوطه در جداول 8 آورده شده است. در شکل 5 عملکرد سامانه تخلیه سیلاب، هیدروگراف خروجی از مقطع شکست سد و تغییر تراز دریاچه سد نسبت به زمان در سناریوی شماره 1 زیرشویی و در شکل 6 عملکرد مخزن (رقوم سطح آب و جریان خالص ورودی به مخزن) در سناریوی مذکور نشان داده شده است.

جدول (7) تعریف سناریوهای زیرشوئی فرضی

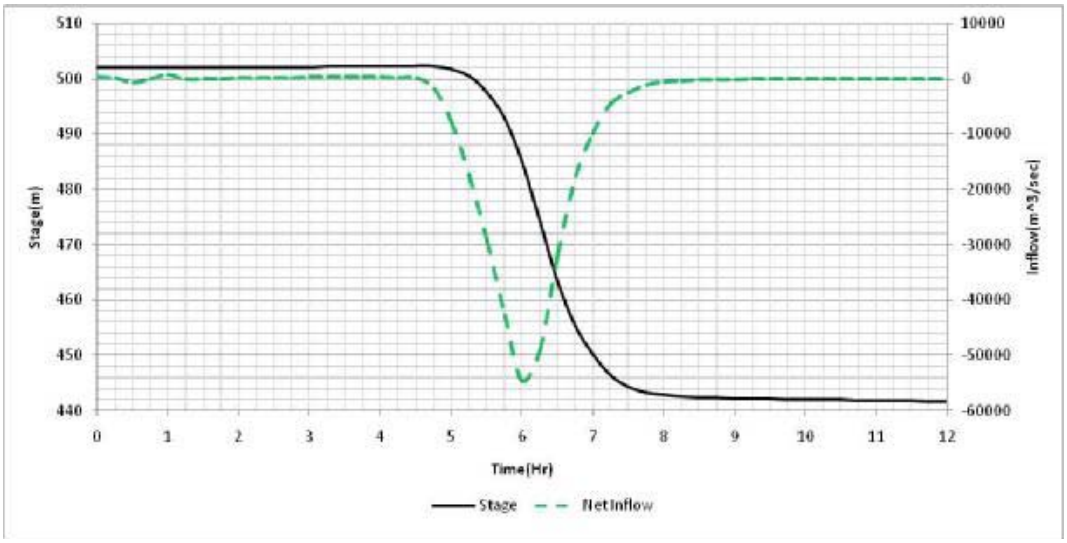
ردیف	هیدروگراف سیلاب ورودی به مخزن	تراز دریاچه هنگام ورود سیلاب به مخزن (mals)	تراز اولیه رخنه (mals)	محل شروع شکاف (در طول محور سد یا تاج) (متر)	عرضنهائی کف شکاف (متر)	عمق یا تراز نهائی شکاف (متر)	روند توسعه شکاف	شیب جانبی وجه راست و چپ شکاف ۱	ضریب آبگذری شکاف	زمان آغاز شکست (ساعت)	زمان تکمیل شکست (ساعت)	معیار شروع خرابی
1	100	502	460	400	300	440	خطی	1:1	1/5	4/5	3	زمان
2	100	502	460	400	300	440	خطی	1:1	1/5	3	6	زمان
3	100	502	460	400	300	440	خطی	1:1	1/5	1/5	9	زمان
4	100	502	460	400	300	440	خطی	1:1	1/5	0	12	زمان

جدول (8) برآورد سیلاب ناشی از شکست سد در سناریوهای زیرشوئی

ردیف	حداکثر جریان خروجی از سد (m^3/s)	زمان رسیدن به دبی اوج (ساعت)	حجم آب تخلیه شده ($1000m^3$)
1	56573	6	313183/4
2	37397	5/5	313970/9
3	30000	5	313982/8
4	25161	4/3	313636



شکل (5) عملکرد سامانه تخلیه سیلاب، هیدروگراف خروجی از مقطع شکست سد و تغییر تراز دریاچه سد نسبت به زمان در سناریوی شماره 1 زیرشویی



شکل (6) عملکرد مخزن (رقوم سطح آب و جریان خالص ورودی به مخزن) در سناریوی شماره ۱ زیرشوئی

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از دفتر پژوهش‌های کاربردی سازمان آب و برق خوزستان به خاطر حمایت و همکاری در ارائه این مقاله، تقدیر و تشکر بعمل می‌آید.

مراجع

[1] سازمان آب و برق خوزستان (1390). "گزارش مدل ریاضی شکست سد مخزنی جره و مدیریت ایمنی سد"، مهندسین مشاور زایندآب، جلد دوم، دی ماه.