



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۹ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۸

صفحه‌های ۲۵۰-۲۳۱

مدیریت ریسک روگذری سد حاجیلرچای با شبیه‌سازی مونت کارلو و پویایی سیستم‌ها

علی ابراهیم‌زاده^{۱*}، مهدی زرغامی^۲، وحید نورانی^۲

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۰

چکیده

سدها در مهار سیلاب و کاهش خسارت آن نقش مؤثری دارند و از طرف دیگر در خلال سیلاب، بروز پدیده روگذری و عبور آب از روی سد همواره آن را تهدید می‌نماید. بنابراین به منظور حفظ ایمنی سد در برابر سیلاب و همچنین حفظ کارایی سد، بایستی بین تراز آب مخزن سد و ریسک روگذری آن تعادل ایجاد نمود. با استفاده از پویایی سیستم‌ها می‌توان مجموعه‌ای از عوامل پیچیده، مرتبط و مؤثر در پدیده روگذری را در کنار یکدیگر قرار داده و تأثیر سناریوهای مختلف را بر روی ریسک روگذری بررسی نمود. در این تحقیق با استفاده از توسعه مدل پویایی سیستم‌ها، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی ریسک روگذری سد حاجیلرچای با شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی شده است. سپس با استفاده از یک استاندارد معتبر، تلفات ناشی از شکست سد مذکور به میزان ۴۴۱ و ۱۱۸ نفر به ترتیب برای حالت‌های بدون هشدار و با هشدار کافی تخمین زده شده و میزان ریسک روگذری قابل قبول $10^{-6} \times 2.27$ محاسبه شده است. بر مبنای این ریسک، تراز قابل اطمینان برای آب سد حدود ۱۰۴۰/۷۰ متر تعیین گردیده و سطح اراضی قابل توسعه در پایین دست سد حدود ۱۶۶۰ هکتار برآورد شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمر سد، مخصوصاً بعد از ۲۰ سال، با انباشت رسوب و نشست سد، میزان ریسک روگذری افزایش یافته و با عنایت به افزایش چشم‌گیر ریسک روگذری ناشی از تغییر نوع سرریز سد به منظور صرفه‌جویی در هزینه احداث آن، لزوم اقدام برای کاهش ریسک از جمله کنترل تراز آب مخزن سد ضروری می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ایمنی سد، تراز آب مخزن سد، تراز قابل اطمینان، سد حاجیلرچای، سیلاب.

Overtopping Risk Management by System Dynamics and Monte-Carlo Simulations, Hajilarchay Dam of Iran

Ali Ebrahimzadeh^{1*}, Mahdi Zarghami², Vahid Nourani²

1. Ph.D. Candidate in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Professor, Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, Excellency Center for Hydroinformatics, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Received: October 16, 2019

Accepted: December 11, 2019

Abstract

Dams are effective in controlling the flood and reducing its damage. But, during the flood, the overtopping and the flow of water from the dam is always threatening it. Therefore, in order to maintain the dam safety against flood and also to maintain the efficiency of the dam, it should be balanced between the water level in reservoir of dam and its overtopping risk. Using the system dynamics, a set of complex, relevant, and effective overtopping factors could be simulated to examine the impact of different scenarios. The current research investigated the effect of different parameters on the overtopping risk on Hajilarchay dam (Northwestern Iran) using the system dynamics and Monte Carlo simulations, and estimated the human losses caused by the dam failure using of 441 and 118 persons for two cases of without warning and adequate warning, respectively. The overtopping risk of 2.27×10^{-6} was calculated in accordance with the USACE method. Given this risk value, a reliable level for reservoir water is set to 1040.70 meters above sea level, and the agriculture area at the downstream is set 1660 hectares for development. The results also show that the overtopping risk will increase by increasing the life of the dam, especially after 20 years, due to accumulation of sediment and settlement of the dam, and considering too much increase in overtopping risk caused by the change of dam's spillway in order to save the cost of its construction, then adaptation strategies are provided including reservoir water level control.

Keywords: Dam safety, Flood, Hajilarchay dam, Reliable level, Reservoir water level

مقدمه

اصلی شکست سدهای خاکی بوده و به‌عنوان عامل مهمی می‌تواند ایمنی آنها را تهدید نماید.

ممکن است تصور گردد که برای مقابله با این پدیده می‌توان ارتفاع آب در مخزن سد را در تراز پایین‌تری نگهداری نمود. ولی از آنجایی که وقوع پدیده های جوی همچون بارش و متعاقب آن سیلاب دارای عدم قطعیت زیادی می‌باشد و در واقع با وجود همه مدل های پیشرفته در خصوص پیش‌بینی بارش و سیلاب، از چند هفته قبل نمی‌توان تخمین دقیقی از میزان بارش، توزیع زمانی و مکانی آن و نهایتاً سیلاب حاصل از بارش را داشته و بر مبنای آن اقدام به تخلیه سد نمود. از طرف دیگر در پایین‌دست سدها سرمایه‌گذاری‌های عظیمی در جهت ترویج کشاورزی صورت گرفته است و امرار معاش بسیاری از ساکنین پایین‌دست این سدها از طریق کشاورزی می‌باشد و سدها بایستی در زمان لازم جوابگوی نیاز آبی این افراد باشد. همچنین تأمین انرژی برق آبی مخصوصاً در زمان‌های مصرف حداکثر، به وجود آب در پشت سدها وابسته است. لذا به هیچ عنوان اقتصادی و منطقی نیست که برای مقابله با سیلابی که دارای عدم قطعیت زیادی می‌باشد، آب موجود در مخزن سد را همواره در تراز پایین‌تری نگهداری نماییم و بلکه بایستی بین ریسک روگذری آب از روی سد در اثر سیلاب و تراز آب در مخزن سد تعادل ایجاد نماییم تا سد در کنار ایفای نقش مهم خود در کنترل سیلاب و جلوگیری از بروز خسارت زیاد در اراضی، شهرها و روستاهای پایین‌دست، بتواند به هدف اصلی خود که همانا ترویج کشاورزی و ایجاد اشتغال برای مردم پایین‌دست سد و همچنین تولید برق آبی می‌باشد، برسد.

روند رو به افزایش سیل در بسیاری از مناطق جهان افزایش خسارت‌های ناشی از سیلاب در نقاط مختلف جهان، لزوم چاره‌اندیشی برای مقابله با این پدیده طبیعی را آشکار می‌نماید (۳) و در این میان نقش ارزشمند و مؤثر سدها در کنترل سیلاب‌های ویرانگر و کاهش خسارت آنها بر هیچ‌کس پوشیده نیست. در سیلاب‌های فروردین‌ماه سال ۱۳۹۸، نقش و تأثیر سدهای بزرگ در رودخانه‌های کارون، کرخه و دز بر کاهش شدت سیلاب و کاهش خسارت‌های مالی و جانی بر جمعیت تحت تأثیر در پایین‌دست به‌خوبی نمایان گردید. سدها با کاهش دبی اوج، خسارت سیلاب در پایین‌دست را کاهش داده و رواناب را با ایمنی بالاتری عبور می‌دهند. در سیلاب مذکور در استان خوزستان، دبی حداکثر ورودی به مخزن سد کرخه ۸۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است و این در حالی است که دبی حداکثر رها شده از مخزن این سد به پایین‌دست در خلال سیلاب، حدود ۲۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه بوده است که این امر نشانگر نقش سد کرخه در مهار سیلاب و کاهش خسارت آن در پایین‌دست سد بوده است (۱۳). از طرف دیگر اگر این سد نبود و سیلاب مستقیماً به سمت پایین‌دست حرکت می‌کرد، بسیاری از روستاها و شهرهای پایین‌دست زیر تلی از رسوبات باقیمانده از سیلاب مدفون می‌شدند.

یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین تهدیداتی که برای سدها مخصوصاً در مواقع سیلاب وجود دارد، پدیده روگذری و عبور آب از روی سد و در نهایت شکست سد می‌باشد. چانگ و زانگ (۹)، در تحقیقی مطابق جدول (۱) نشان دادند، پدیده روگذری^۱ یکی از دلایل

جدول ۱. درصد عوامل مؤثر در شکست سدهای خاکی (۹)

دلایل شکست سد خاکی	نشست پی و خزش	روگذری	فرسایش سرریز	تغییر شکل بیش از حد	لغزش	خرابی درپچه‌ها	زلزله
درصد	۳۵	۲۵	۱۴	۱۱	۱۰	۳	۲

1. Overtopping

روش تحلیل پویایی سیستم‌ها ابزار کارآمدی است که به‌وسیله آن می‌توان مجموعه‌ای از عوامل پیچیده، مرتبط به هم و احیاناً دارای عدم قطعیت که در پدیده روگذری مؤثر می‌باشند را در کنار یکدیگر قرار داده و تعاملات و بازخوردهای درون سیستم را بین آنها بررسی نموده و ضمن شبیه‌سازی سیستم، یک تقریب از آنچه در واقعیت روی داده یا خواهد داد را ارائه نمود و تأثیر هر یک از سناریوها و پارامترهای مختلف را بر روی مسأله مورد نظر بررسی نمود (۱۹).

در ادامه به بررسی برخی از تحقیقات انجام‌شده در زمینه مدل‌های پویا پرداخته خواهد شد. به‌عنوان مثال قشقایی و همکاران (۱۱)، تأثیر اولویت نیازها بر جریان پایین‌دست چهار سد: چراغ ویس، مرخز، کردکند و سنات در استان کردستان را به کمک مدل پویا مورد بررسی قرار دادند که در مدل ساخته شده آنها ۲۴ سناریوی تخصیص اعمال گردید. نتایج حاصل از اجرای مدل به‌صورت درصد تأمین هر یک از نیازها نشان داد که این مقادیر با تغییر اولویت‌ها به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای تغییر نخواهد کرد. در این بررسی تأثیر ساخت سد بوکان نیز مورد بررسی قرار گرفت به‌طوری‌که کاهش جریان پایین‌دست در بهترین و بدترین سیاست، تخصیص به مقدار قابل توجه ۱۸/۴۰ میلیون مترمکعب می‌رسد. ضرغامی و امیررحمانی (۳۴)، دیپلماسی مؤثر در عرصه مدیریت منابع آب را به کمک مدل پویای سیستم‌ها با هدف پیشنهاد مدیریت پایدار دریاچه ارومیه، به‌کار بردند. در این بررسی چهار طرح از قبیل افزایش راندمان آبیاری، کاهش سطح زیر کشت، بارورسازی ابرها و انتقال آب حوضه‌ای بررسی گردید. نتایج نشان داد که افزایش سالانه ۴ درصد راندمان آبیاری، کاراترین طرح برای احیای دریاچه می‌باشد. یانگ و همکاران (۳۲)، یک روش ارزیابی جهت تعیین ظرفیت حوضه آبریز بر مبنای پویایی سیستم‌ها در

شهر تیالینگ چین ارائه کردند که ترکیبی از اثرات و بازخوردهای مؤلفه‌های اقتصادی، اجتماعی و آب می‌باشد. مهرآذر و همکاران (۷)، در تحقیقی به مدل‌سازی یکپارچه سیستم‌های منابع آب، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی دشت هشتگرد با رویکرد پویایی سیستم‌ها پرداخته و توانایی مدل ساخته‌شده بر مبنای این رویکرد را در شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب دشت هشتگرد تحت سیاست‌های مختلف در دوره‌های آتی را نشان دادند. کوتیر و همکاران (۱۶)، از مدل پویایی سیستم‌ها در محیط نرم‌افزار STELLA در جهت مدیریت پایدار منابع آبی و توسعه کشاورزی حوزه رودخانه ولتا در کشور غنا استفاده نمودند. در مدل ساخته‌شده توسط آنها سه سناریو توسعه زیرساخت‌های آبی، توسعه زمین‌های کشاورزی و اعمال شرایط خشکسالی بررسی گردید. بر پایه نتایج این تحقیق، علی‌رغم تأثیر مثبت سناریوی اول، در نهایت همه سناریوها با محدودیت رشد مواجه خواهند شد. فتوکیان و همکاران (۲)، بهره‌برداری از مخزن سد یامچی را با مدل پویایی سیستم‌ها در محیط Vensim شبیه‌سازی کردند و الگوی بهینه کشت برای منطقه مورد مطالعه را پیشنهاد داده و عملکرد سد را با اعمال سیاست مدیریتی الگوی کشت بهینه و بر اساس سه شاخص آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که اعمال سیاست الگوی کشت بهینه پیشنهادی سبب کاهش مصرف آب بخش کشاورزی در منطقه مورد مطالعه گردیده و در نتیجه موجب کاهش کمبود کلی آب در حدود ۴۳ درصد در مقایسه با کمبود آب با ادامه روند بهره‌برداری کنونی خواهد شد.

بررسی تحقیقات انجام‌شده در چند دهه اخیر در رابطه با ارزیابی عدم قطعیت و ریسک سازه‌های هیدرولیکی، به‌ویژه ارزیابی ریسک روگذری سدها، حاکی از کاربرد روش‌های مختلف ریاضی، تخمینی و شبیه‌سازی در

به استفاده از روش مونت کارلو در تحلیل بهره‌برداری کیفی و کمی از سیستم مخازن بر مبنای عدم قطعیت جریان ورودی در سدهای کارون ۳، کارون ۴ و خرسان ۱ پرداختند. نتایج تحلیل آنها بر روی معیارهای بهره‌برداری و عملکرد کل سیستم نشان می‌دهد که عدم قطعیت جریان ورودی، در معیار قابلیت اطمینان کمی تأثیر حداقل و در معیار تاب‌آوری سیستم تأثیر حداکثر دارد. کیانلی (۲۲)، در تحقیق خود به منظور کاهش زمان و افزایش دقت محاسبات ریسک روگذری، از روش شبیه‌سازی بر مبنای نمونه‌گیری با اهمیت (IS) استفاده نمود. محمودیان شوشتری و همکاران (۴)، به ارزیابی ریسک ایمنی سدها پرداختند و ضمن محاسبه احتمال شکست سد گلستان با استفاده از روش ارزیابی درخت رویداد (ETA)^۱، تعداد تلفات جانی به علت سیل ناشی از شکست سد را از طریق روش رایج در اداره اصلاح اراضی آمریکا (USBR)^۲ موسوم به DS0-99-06 تخمین زده و نتیجه گرفتند که مقدار ریسک شکست سد گلستان بر اثر وقوع سیل در بالادست آن، غیرقابل قبول بوده و اقدام برای کاهش ریسک فوری ضروری است. ابراهیم‌زاده و همکاران (۱)، در تحقیقی به ارزیابی ریسک روگذری سد خاکی در حال ساخت حاجیلرچای با سرریز نیلوفری، با استفاده از مدل پویایی سیستم‌ها تحت مونت کارلو پرداختند. نتایج تحقیق ایشان ضمن نشان دادن توانایی پویایی سیستم‌ها در محاسبه ریسک روگذری، نشان داد که با تأثیر توأم سیلاب و باد، ریسک روگذری افزایش قابل توجهی می‌یابد. شرافتی و عظمت‌اله (۲۳)، در تحقیقی به ارزیابی قابلیت اطمینان سد جامیشان با استفاده از منحنی بارش آستانه روگذری بر مبنای SUFI^۳ پرداختند. نتایج نشان داد که روش معرفی شده در

این خصوص می‌باشد. کی‌یو و همکاران (۱۷)، در تحقیقی که بر روی مخزن سد فیتشو انجام دادند، با استفاده از پنج روش HPEM، RPEM، MFOSM، MCS و LHS تحلیل ریسک روگذری را برای چهار تراز اولیه سطح آب در مخزن سد و برای پنج دوره بازگشت سیلاب انجام نمودند. چانگچون و همکاران (۱۰)، در پژوهشی به بررسی ریسک روگذری در سدهای خاکی تحت اثر موج ناشی از باد و سیل به‌طور همزمان پرداختند. پارامترهایی که در تحقیق آنها به‌عنوان عدم قطعیت در نظر گرفته شده شامل ظرفیت مخزن و ظرفیت تخلیه سرریز می‌باشد که با روش آنالیز ریسک بررسی شدند. یوفنگ و همکاران (۳۳)، در تحقیق خود از روش‌های تحلیل ریسک مبتنی بر احتمال برای ارزیابی ریسک سد خاکی تحت تأثیر توأم سیلاب و باد استفاده نمودند. گودرزی و همکاران (۱۲)، در تحقیقی ضمن بررسی ریسک روگذری سد درودزن با روش‌های مونت کارلو و ابرمکعب لاتین، نشان دادند افزایش تراز سطح اولیه آب مخزن سد باعث افزایش ریسک روگذری می‌گردد. شرونک و یائوشنگ (۲۴)، یک سیستم ارزیابی جامع ریسک برای تحلیل روگذری سد ترتیب دادند. در مدل خرابی احتمالی ساخته شده توسط آنها اثرات مربوط به خرابی دریچه‌ها، تصادفی بودن سیلاب، ارتفاع اولیه آب مخزن سد و اثر گذشت زمان در نظر گرفته شده است. پان لیو و همکاران (۲۱)، در تحقیقی به معرفی یک روش دو مرحله‌ای در بهره‌برداری از مخزن بر پایه تحلیل کمی ریسک سیلاب پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی آنها می‌تواند میزان تولید انرژی برق‌آبی را تا حدود زیادی بهبود بخشد. ایشان نشان دادند که با کنترل ریسک سیلاب در میزان قابل قبول پنج درصد، می‌توان انرژی برق آبی تولیدی را به مقدار ۱/۶۰ میلیارد کیلووات ساعت افزایش داد. متولی و همکاران (۲۰)، در تحقیقی

1. Event Tree Analysis
2. United States Bureau of Reclamation
3. Sequential Uncertainty Fitting

می‌توان مجموعه‌ای از عوامل مؤثر در ریسک روگذری را در کنار هم قرار داده و ضمن بررسی رابطه بازخوردی بین آنها، تأثیر تک‌تک و همزمان آنها بر ریسک روگذری را بررسی کرده و تصمیمات لازم را در رابطه با مسائل ایمنی و اقتصادی در زمینه بهره‌برداری و مدیریت ریسک سدها اتخاذ نمود.

در این مقاله سعی شده است با استفاده از دیدگاه پویایی سیستم‌ها و شبیه‌سازی مونت کارلو، ریسک روگذری سد حاجیلرچای تحت تأثیر توأم سیلاب و باد مورد ارزیابی قرار گیرد. پارامترهایی که به‌عنوان پارامترهای عدم قطعیت در محاسبه ریسک روگذری مورد توجه قرار گرفته‌اند علاوه بر دوره بازگشت سیلاب و باد عبارتند از ارتفاع اولیه آب در مخزن سد و ارتفاع خود سد، که تمامی پارامترهای فوق‌الذکر به‌طور همزمان به‌منظور ارزیابی ریسک روگذری به مدل ساخته‌شده اعمال گردیده است. به‌عنوان مزیت و در مقایسه با تحقیق ابراهیم‌زاده و همکاران (۱)، در این مقاله سعی شده است با استفاده از معیار تعداد تلفات جانی به‌علت سیل ناشی از شکست سد، ارائه‌شده توسط USBR با عنوان DS0-99-06 (۳۰)، ضمن تخمین تلفات جانی سیلاب ناشی از شکست سد در اثر روگذری برای حالت‌های بدون هشدار و دارای هشدار، با توجه به دستورالعمل یادشده، میزان ریسک روگذری قابل قبول برای سد حاجیلرچای تخمین زده شده و بر مبنای این ریسک روگذری، تراز مناسب نگهداری آب در مخزن سد محاسبه و توصیه گردد که بر مبنای آن، میزان آبدهی مخزن سد و سطح مناسب اراضی توسعه برای سد ارائه شده است. در نهایت تأثیر گذشت زمان، انباشت رسوبات در مخزن سد و نشست سد در میزان ریسک روگذری مورد بررسی قرار گرفته است که موارد فوق‌الذکر از جمله نوآوری‌های این تحقیق می‌باشند.

این تحقیق دارای کارایی مناسب جهت ارزیابی ریسک روگذری سدها می‌باشد و همچنین عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی در مقایسه با عدم قطعیت‌های هیدرولیکی تأثیر بیشتری در قابلیت اطمینان روگذری سد دارند. ژانگجون و همکاران (۳۵)، در تحقیق دیگری کاربرد آنالیز دو متغیره فراوانی سیل در تحلیل ریسک روگذری سد گایان چین را نشان دادند. در تحقیق مذکور وابستگی بین حداکثر سیلاب و حجم آن با استفاده از تابع کوپلا مدل‌سازی شده است. در مطالعه دیگری خوان و همکاران (۱۵)، یک مدل ساخته‌شده از شبکه بیزین پویا را برای محاسبه ریسک عملکرد سازه‌های کنترل سیلاب سیستم چندمخزنه استفاده نمودند. مدل ساخته‌شده توسط آنها دارای سه مؤلفه شبیه‌سازی مونت کارلو، ایجاد شبکه بیزین پویا و بررسی ریسک‌پذیری به‌منظور اتخاذ تصمیم می‌باشد. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که ارتفاع اولیه آب مخزن سد تأثیر چشم‌گیری در میزان ریسک روگذری سد در اثر سیلاب دارد.

با توجه به مطالعات قبلی صورت‌گرفته توسط محققین می‌توان گفت که همواره تلاش گردیده تا به کمک ابزارهای مختلف تأثیر پارامترهای مختلف و عدم قطعیت آنها بر روی ریسک روگذری بررسی گردد و همواره محققین سعی داشته‌اند با بهبود مدل‌های ساخته‌شده در مطالعات مختلف، نتایج دقیق‌تر، قابل اتکاتر و سریع‌تری را استخراج نمایند. همچنین بررسی تحقیقات صورت گرفته در مورد ریسک روگذری سدها نشان می‌دهد علی‌رغم کارایی مدل پویایی سیستم‌ها در زمینه تحلیل ریسک روگذری، از این ابزار و قابلیت‌های آن استفاده چندانی در این خصوص صورت نگرفته و در صورت استفاده نیز صرفاً تعداد محدودی از پارامترهای مؤثر در روگذری به‌صورت یک‌جا مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که با استفاده از پویایی سیستم‌ها

مواد و روشها

تأثیر سیلاب بر پدیده روگذری

در تحلیل روگذری در اثر سیلاب، جهت تخمین ارتفاع آب مخزن سد در اثر ورود سیلاب به آن، بایستی سیلاب ورودی به مخزن سد روندیابی گردد. سادهترین روش در این خصوص استفاده از معادله پیوستگی به شرح زیر می باشد:

$$\frac{Q_{in_t} + Q_{in_{t+1}}}{2} - \frac{Q_{out_t} + Q_{out_{t+1}}}{2} = \frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} \quad (1)$$

که در آن Q_{in_t} و $Q_{in_{t+1}}$ جریان ورودی به مخزن سد (m^3/s) ، Q_{out_t} و $Q_{out_{t+1}}$ جریان خروجی از مخزن (m^3/s) ، S_t و S_{t+1} حجم ذخیره مخزن در زمانهای t و $t + 1$ و Δt بازه زمانی موردنظر می باشد (۱۲).

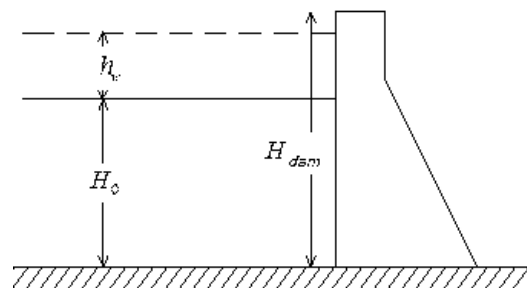
در این مقاله برای حل معادله فوق از نرم افزار Vensim استفاده شده است و پس از روندیابی سیلاب در مخزن، ارتفاع آب مخزن سد با ارتفاع سد مقایسه و ریسک روگذری محاسبه گردیده است.

تأثیر باد بر پدیده روگذری

روگذری در اثر باد زمانی رخ می دهد که افزایش ارتفاع آب دریاچه به دلیل وزش باد و ایجاد موج به علاوه تراز آب دریاچه سد، از ارتفاع سد بیش تر گردد.

$$P_f = P(h_w > H_{dam} - H_0) \quad (2)$$

در شکل ۱، H_{dam} ارتفاع سد، H_0 ارتفاع اولیه آب و h_w افزایش ارتفاع آب ناشی از باد می باشد..



شکل ۱. نمایی از ارتفاع سد، ارتفاع اولیه آب در مخزن سد و افزایش ارتفاع آب ناشی از باد

افزایش ارتفاع آب در مخزن سد تحت تأثیر باد (h_w) شامل سه قسمت زیر می باشد (۱).

ارتفاع موج ناشی از تنش باد در سطح مخزن (h_s)

USBR معادله زیر را برای محاسبه ارتفاع موج که همان ارتفاع بزرگترین موج ایجاد شده بر اثر وزش باد می باشد، ارائه نموده است (۲۶).

$$h_s = 0.00237V^{1.23}F^{0.5} \quad (3)$$

که در آن h_s ارتفاع موج (m)، F طول موج خیز (km) و V سرعت وزش باد (km/hr) می باشد. در صورتی که طول موج خیز کم تر از ۱/۵ کیلومتر و حداکثر سرعت باد نیز کم تر از ۸۰ کیلومتر بر ساعت باشد، ارتفاع موج حداقل ۰/۸۰ متر در نظر گرفته می شود.

ارتفاع خیزاب موج بر اثر باد (h_t)

وزش مداوم باد به سطح آب دریاچه سد، باعث بالا آمدن سطح آب در جهت بدنه سد می گردد. مقدار این بالا آمدگی تابع طول موج خیز، سرعت باد و عمق متوسط آب در امتداد طول موج خیز می باشد. USBR معادله زیر را جهت محاسبه ارتفاع بالا آمدگی آب در مخزن سد ارائه نموده است (۲۹).

$$h_t = \frac{v^2 F}{62772D} \quad (4)$$

که در آن h_t ارتفاع خیز آب بر اثر باد (m)، F طول موج خیز (km)، V سرعت باد (km/hr) و D متوسط عمق آب در طول خیز موج (m) می باشد.

ارتفاع خیز آب موج بر روی شیروانی بالادست سد (h_r)

پس از برخورد موج با بدنه سد، قسمتی از انرژی آن در اثر تخلخل و زبری شیروانی سد تلف شده و قسمت باقیمانده انرژی باعث بالا آمدن موج بر روی شیروانی سد می شود. هوگر معادله زیر را برای محاسبه پارامتر مذکور ارائه داده است (۱۴).

تغییرات Z هستند، $\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}$ شاخص اعتمادپذیری و $\varphi(\beta)$ احتمال نرمال تجمعی مربوط به β می‌باشند (۱۸).

مدل پویایی سیستم‌ها^۱

به دلیل پیچیدگی مسائل مربوط به سیستم‌های منابع آب و سیستم‌های دیگری که در تعامل با آنها هستند، برای تحلیل آنها نیاز به نگرشی سیستمی، جامع و آینده‌نگر می‌باشد، به طوری که بتواند تمام جنبه‌های اثرگذار و بازخوردهای اجزای مختلف سیستم بر یکدیگر را به خوبی شبیه‌سازی نموده و ضمن پایش وضعیت موجود، در استخراج راهبردها و اعمال گزینه‌های مدیریتی مؤثر واقع گردد. یکی از ابزارهای مفید در نگرش به هم پیوسته سیستم‌ها جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی آنها، روش پویایی سیستم‌ها می‌باشد (۷). این روش یک رویکرد شبیه‌سازی گرا بر پایه بازخورد می‌باشد که با شفافیت و وضوح به بررسی بازخوردهای حلقه‌های گوناگون می‌پردازد (۶). آنچه این روش را از سایر رویکردهای تفکر سیستمی برای مطالعه سیستم‌های پیچیده متمایز می‌سازد، استفاده از حلقه‌های بازخورد و متغیرهای انباشت و نرخ می‌باشد (۲۷). لحاظ نمودن پیوستگی جرم به عنوان یکی از مفاهیم اساسی پویایی سیستم، سادگی ایجاد تغییرات در مدل شبیه‌سازی، اصلاح آن در پاسخ به تغییرات و توانایی انجام آنالیز حساسیت از مزیت‌های روش پویایی سیستم می‌باشد که باعث استفاده از آن در مدل‌سازی بهره‌برداری از مخازن مخصوصاً در زمان سیلاب شده است (۵). روش تحلیل پویایی سیستم از چهار ابزار ذخیره، جریان، رابطه‌ها و تبدیل‌کننده‌ها استفاده کرده و به وسیله آنها ذهنیت کارشناس را به نمودارهای ذخیره و جریان تبدیل می‌نماید. ذخایر نمایانگر تجمع و به عنوان منشأ می‌باشند. آنها می‌توانند به عنوان محدودیت‌ها نیز عمل نمایند. جریان از اجزای ذخایر هستند که یکی بدون دیگری وجود نخواهد

$$\frac{h_r}{h} = 3.84 \times \tan \theta \left(\frac{M_F}{\rho g h^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن h_r ارتفاع بالا آمدگی موج بر روی شیروانی (m)، h عمق آب (m)، ρ چگالی آب و M_F سیلان لحظه‌ای موج در واحد عرض می‌باشد که از معادلات زیر محاسبه می‌گردد:

$$\left(\frac{M_F}{\rho g h^2} \right)_{Max} = A_0 \left(\frac{h}{g T^2} \right)^{-A_2} \quad (6)$$

$$A_0 = 0.6392 \times \left(\frac{h_s}{h} \right)^{2.0256} \quad (7)$$

$$A_1 = 0.1804 \times \left(\frac{h_s}{h} \right)^{-0.391} \quad (8)$$

و h_s ارتفاع موج (m) می‌باشد (۳۱).

با توجه به سه پارامتر فوق‌الذکر، ارتفاع بالا آمدگی آب ناشی از باد به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$h_w = h_s + h_t + h_r \quad (9)$$

تحلیل ریسک روگذری و شکست سد

شکست یک سیستم، از جمله سد، زمانی اتفاق می‌افتد که سیستم در برابر بارهای وارده عملکرد قابل انتظار خود را نداشته باشد و بار وارد بر سیستم L_F (از ظرفیت سیستم) R بیش‌تر باشد. در تحلیل پدیده روگذری و سرریز شدن آب از روی سد، بار و مقاومت سیستم به ترتیب ارتفاع آب در مخزن سد (H_{max}) و ارتفاع خود سد (H_{dam}) می‌باشند. به منظور محاسبه ریسک روگذری ناشی از سیلاب ورودی به مخزن سد و همچنین ریسک روگذری ناشی از سیلاب ورودی و باد، ابتدا بایستی تابع عملکرد سیستم به شرح زیر محاسبه گردد.

$$Z_{Flood} = \ln \frac{H_{dam}}{H_{max}} \quad (10)$$

$$Z_{Flood \& Wind} = \ln \frac{H_{dam}}{H_{max} + h_w} \quad (11)$$

در روابط فوق Z ، تابع عملکرد سیستم و h_w ارتفاع بالا آمدگی آب ناشی از باد می‌باشد. در نهایت ریسک روگذری سد به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Risk = 1 - \varphi \left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \right) = 1 - \varphi(\beta) \quad (12)$$

که در آن μ_Z و σ_Z به ترتیب، میانگین و ضریب

1. Overtopping

۳- شدت سیلاب ناشی از شکست سد

اداره ایمنی سد آمریکا وابسته به اداره اصلاح اراضی آمریکا با استفاده از داده‌های شکست سدهای رخ داده در آمریکا، روشی شامل هفت مرحله تحت عنوان DS0-99-06 جهت تخمین تلفات ناشی از شکست سد که از حاصل ضرب نرخ مرگ‌ومیر در تعداد جمعیت تحت ریسک به دست می‌آید، ارائه داده است (۴ و ۳۰). در روش فوق‌الذکر بر اساس شدت سیل، میزان هشدارها و نیز میزان درک از شدت سیل جدولی برای محاسبه نرخ مرگ‌ومیر ارائه شده است. در این روش سیلاب‌ها با توجه به شدتی که دارند به سه دسته شدت کم، متوسط و زیاد تقسیم می‌شوند. میزان هشدارها با توجه به زمان آغاز هشدارها و فاصله منطقه موردنظر از سد در سه دسته بدون هشدار، هشدار کم و هشدار کافی قرار می‌گیرند. درک شدت سیل نیز شامل دو گروه درک مبهم، که در آن مسئولین اعلام هشدار هنوز متوجه شکست سد نشده و یا از بزرگی واقعی سیل آگاه نیستند و درک دقیق، که در آن مسئولین اعلام هشدار از بزرگی سیل و خطرات آن اطلاع و درک کافی دارند، می‌باشد.

سنجش و تشخیص سطح ریسک

یکی از کاربردهای ارزیابی ریسک، سنجش آن و نتیجه‌گیری درباره اهمیت و سطح ریسک بالقوه می‌باشد. مراجع مختلف با توجه به میزان ریسک، اهمیت آن و هم‌چنین مقدار تلفات ناشی از پدیده موردنظر، ریسک وقوع پدیده را به سه دسته ریسک قابل قبول، ریسک قابل تحمل و ریسک غیرقابل قبول تقسیم‌بندی می‌نمایند. در این تحقیق از دستورالعمل ارائه‌شده توسط امور مهندسی ارتش ایالات متحده تحت عنوان دستورالعمل ایمنی سدها در زمینه تشخیص سطح ریسک شکست سد (روگذری) استفاده شده است. امور مهندسی ارتش ایالات متحده

داشت (۲۷). ذخایر و جریان‌ها تشکیل‌دهنده حداقل ساختار برای تعریف یک دینامیک می‌باشند. تبدیل‌کننده‌ها ورودی را به خروجی تبدیل می‌کنند آنها می‌توانند نماینده مقادیر یا اطلاعات باشند. اتصالات ذخایر را به تبدیل‌کننده‌ها، ذخایر را به جریان‌های تنظیم‌کننده و تبدیل‌کننده‌ها را به سایر تبدیل‌کننده‌ها متصل می‌نمایند. آنها مقادیر عددی نمی‌گیرند بلکه اطلاعات را انتقال می‌دهند (۲۶). به‌طور کلی، ذخیره‌ها اختلاف بین ورودی و خروجی را جمع می‌کنند و به‌صورت زیر فرموله می‌شوند (۲۵):

$$Stock(t) = \int_{t_0}^{t_n} [Inflow(t) -$$

$$Outflow(t)] \cdot dt + Stock(t_0)$$

که در آن $Stock(t)$ ، $Inflow(t)$ و $Outflow(t)$ به ترتیب مقادیر ذخیره، ورودی و خروجی در زمان t می‌باشند.

در این تحقیق از نرم‌افزار Vensim DSS برای شبیه‌سازی پویایی سیستم به‌همراه روش شبیه‌سازی مونت کارلو در مسأله روگذری سد خاکی استفاده شده است.

تخمین تلفات جانی ناشی از شکست سد

ارزیابی و سنجش پیامدهای ناشی از شکست سد، بخش مهمی از مطالعات ریسک و ایمنی سد می‌باشد. شکست هر سازه‌ای مخصوصاً سد، می‌تواند عواقب و پیامدهای مختلف اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و زیست‌محیطی دربر داشته باشد که مهم‌ترین و زیان‌بارترین پیامد شکست سد، مرگ‌ومیر و تلفات انسانی در پایین دست سد می‌باشد. این تلفات با شدت سیلاب و نبود سیستم هشدار ارتباط مستقیم دارد (۴). میزان تلفات جانی ناشی از شکست سد به عوامل مهم زیر بستگی دارد (۳۰).

- ۱- جمعیت مردمی که در پایین دست سد و تحت تأثیر سیلاب ناشی از شکست سد قرار دارند.
- ۲- میزان هشدارها به مردمی که در معرض سیلاب خطرناک ناشی از شکست سد قرار دارند.

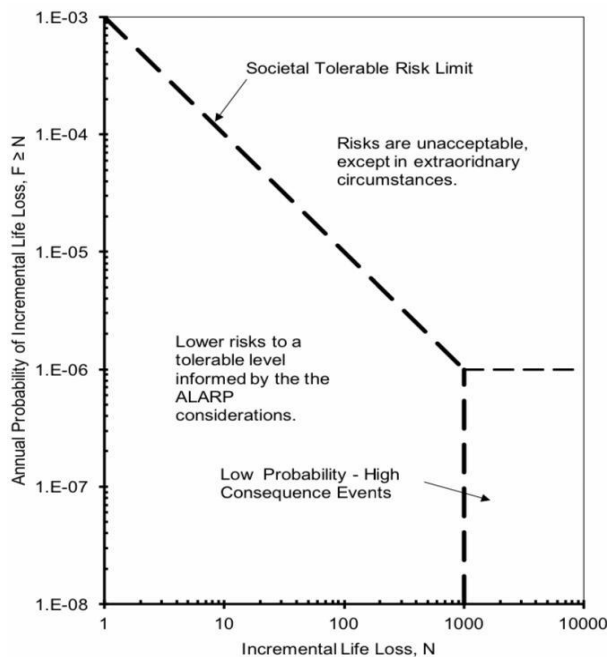
هکتار از اراضی دیمزار، نزدیک به ۴۰ میلیون مترمکعب آب نیز برای مصارف شرب و صنعت تأمین خواهد شد (۸). مشخصات سد حاجیلرچای در جدول ۲ آمده است.

شایان ذکر است که در ابتدای روند طراحی و احداث سد، سرریز نیلوفری برای سد حاجیلرچای پیشنهاد شده بود ولی در ادامه روند احداث سد با توجه به مطالعات مهندسی ارزش صورت گرفته و هم‌چنین با در نظر گرفتن ضوابط جدید انتخاب سیلاب طراحی سدهای بزرگ ایران، ابلاغی از طرف وزارت نیرو، سیلاب طراحی سرریز سد تقلیل یافته و سرریز آزاد برای سد حاجیلرچای طراحی و در حال ساخت می‌باشد (۸).

نموداری را مطابق شکل ۲ ارائه داده است که در آن سطح ریسک قابل تحمل داده شده است (۲۸).

سد مورد مطالعه

حوزه آبریز رودخانه حاجیلر از زیرحوزه‌های رودخانه ارس می‌باشد. این رودخانه از به هم پیوستن سه جریان اصلی مرزوات چای، حاجیلرچای و قوروچای تشکیل گردیده و پس از طی مسیر ۵۶ کیلومتر در جهت جنوبی- شمالی به رود ارس می‌ریزد. سد مخزنی حاجیلر در ۳۷ کیلومتر این مسیر، با اهداف کشاورزی، مصارف شهری و مصارف صنعتی طراحی گردیده و در حال احداث می‌باشد که ضمن توسعه کشاورزی حدود ۲۰۰۰



شکل ۲. نمودار دستورالعمل ارزیابی ریسک استفاده شده (۲۸)

جدول ۲. اطلاعات سد حاجیلرچای و سازه‌های وابسته

نوع سد	طول تاج (m)	عرض تاج (m)	ارتفاع از پی (m)	ارتفاع از بستر (m)	حجم مخزن در تراز نرمال (MCM)	حجم مفید (MCM)	نوع
خاکی با هسته رسی	۲۶۵	۱۰	۹۵	۷۱	۴۸/۹۰	۴۷/۳۰	سرریز آزاد

اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی

اطلاعات هواشناسی

حداکثر سرعت باد با دوره بازگشت مختلف در محل سد، به شرح جدول (۳) می‌باشد.

اطلاعات هیدرولوژیکی

آمار آبدهی رودخانه از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اخذ و در مدل‌سازی مخزن سد مورد استفاده قرار گرفته است. دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف مطابق جدول ۴ می‌باشد.

به‌منظور مدل‌سازی مخزن سد، دبی ویژه رسوب در محل سد حاجیلرچای برابر ۵۲۷ تن در سال در کیلومتر مربع و حجم رسوبات پنجاه ساله وارده به مخزن سد برابر ۱۱/۸ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است (۸).

نیازها و مصارف مختلف آب مخزن سد

اصلی‌ترین هدف احداث سد حاجیلرچای تأمین آب موردنیاز برای مصارف شهری (شرب و صنعت) می‌باشد. مقادیر ماهانه مصرف شرب و صنعت به شرح جدول (۵) در مدل Vensim اعمال گردیده است.

لزوم تأمین حداقل جریان در پایاب سد حاجیلرچای به‌منظور حفظ و بقای محیط زیست ضروری می‌باشد. در این راستا با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده، میزان نیاز آبی محیط زیست در پایین‌دست سد در جدول ۵ آمده است. یکی از اهداف اصلی احداث سد حاجیلرچای تأمین آب مورد نیاز برای توسعه کشاورزی منطقه طرح می‌باشد. توزیع ماهانه ناخالص آبی اراضی توسعه در مدل Vensim مطابق جدول ۵ منظور شده است. شایان ذکر است که راندمان طرح‌های توسعه آبیاری تحت فشار در پایاب سد حاجیلرچای برابر ۰/۶۳ در نظر گرفته شده است.

نشت و تبخیر

با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده، مقادیر متوسط تبخیر سالانه از سطح آزاد آب در محل سد حاجیلرچای برابر ۱۲۵۳/۸۰ میلی‌متر بوده و هم‌چنین میزان نشت آب در تراز حداکثر بهره‌برداری مخزن برابر ۲۰ لیتر در ثانیه در نظر گرفته شده است. توزیع ماهانه تبخیر که در مدل Vensim استفاده شده است مطابق جدول (۶) می‌باشد. در شکل‌های (۳) و (۴) نمایی از مدل ساخته‌شده برای مخزن سد به‌منظور بررسی بیلان آب و ریسک روگذری سد در محیط Vensim آمده است.

جدول ۳. حداکثر سرعت باد با دوره بازگشت‌های مختلف در محل سد (۸)

دوره بازگشت (سال)	۲	۵	۱۰	۲۰	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰
سرعت باد (km/h)	۷۴/۵۲	۹۱/۰۸	۱۰۱/۸۸	۱۱۲/۳۲	۱۱۵/۵۶	۱۲۵/۶۴	۱۳۱/۷۶	۱۳۵/۷۲	۱۴۷/۲۴	۱۶۱/۴۰

جدول ۴. دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف و دبی حداکثر سیلاب محتمل (PMF)

دوره بازگشت	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	PMF
دبی (m ³ /s)	۲۰۰	۳۰۵	۳۷۰	۵۱۰	۵۶۵	۹۰۰

جدول ۵. مقادیر میانگین نیازهای مختلف ماهانه از مخزن سد حاجیلرچای بر حسب میلیون مترمکعب

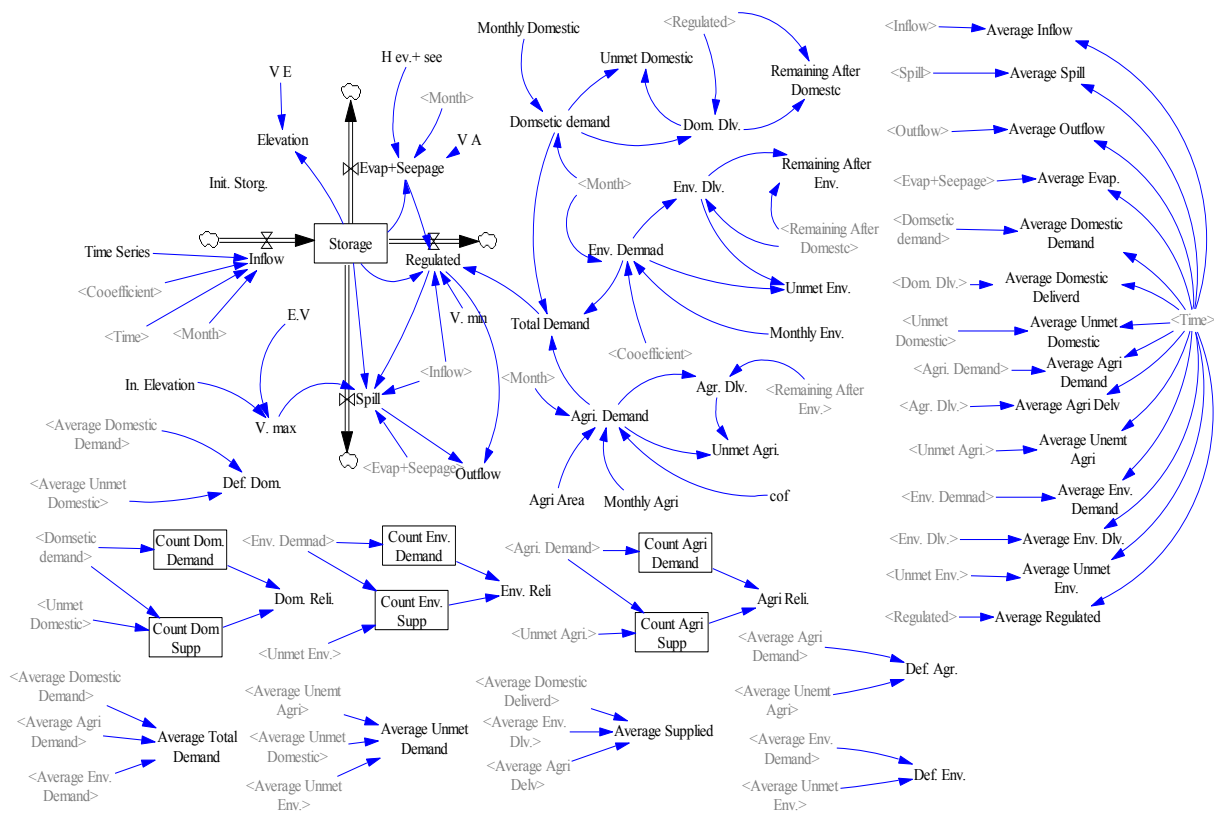
ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
نیاز شرب و صنعت	۳/۲۲	۳/۲۲	۳/۲۲	۳/۲۲	۳/۲۲	۳/۲۲	۳/۳۵	۳/۳۵	۳/۳۵	۳/۳۵	۳/۳۵	۳/۳۵
نیاز محیط زیست	۰/۴۳	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۳۷	۱/۰۶	۰/۱۷	۰/۴۷	۰/۵۱	۰/۲۷	۰/۳۱
نیاز اراضی توسعه	۶۶۰/۵۰	۱۱۹/۵۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۵/۵۰	۴۲۳/۹۰	۱۰۷۷/۲۰	۱۸۳۷/۸۰	۱۹۶۳/۰۰	۱۸۹۵/۵۰	۱۲۲۴/۲۰

تأمین گردد و در مورد نیاز کشاورزی نیز برنامه‌ریزی آبیاری تحت شرایط کم‌آبیاری در نظر گرفته شده است و این در حالی است که با توجه به جمع‌بندی تحقیقات انجام‌شده در زمینه کم‌آبیاری در کشور، در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد کم‌آبیاری برای گیاهان زراعی به‌جز مراحل رشد حساس به تنش آبی (نظیر مرحله گل‌دهی) توصیه شده است (۲). در این تحقیق فرض شده است که در ۸۰ درصد موارد آب مورد نیاز مزارع به‌طور کامل تأمین گردد و در ۲۰ درصد باقیمانده نیز آب مورد نیاز مزارع ۷۰ درصد تأمین گردد.

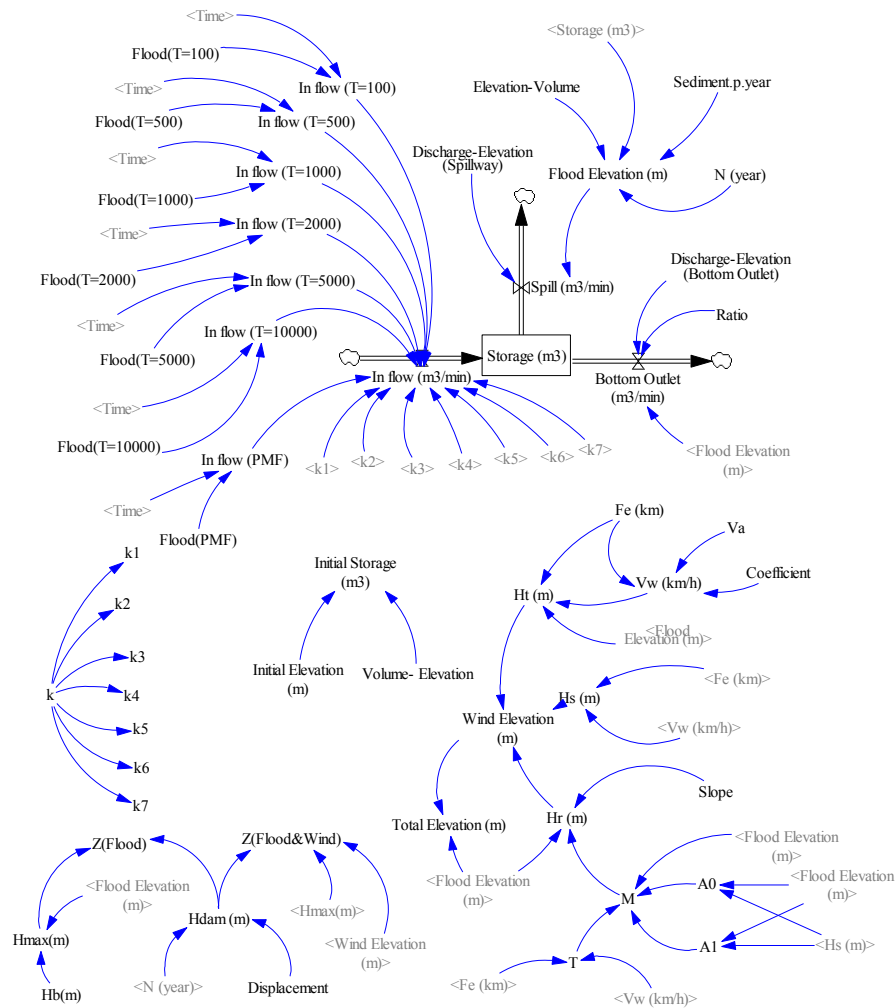
در شکل (۳)، متغیرهای *Domestic Demand*، *Agri. Demand*، *Env. Demand* و *Total Demand* به‌ترتیب نیازهای شرب و صنعت، نیاز محیط زیست، نیاز اراضی توسعه و نیاز کل از مخزن سد بوده و متغیرهای *Def. Dom.*، *Def. Env.* و *Def. Agri.* به‌ترتیب درصد کمبود آب برای مصارف شرب و صنعت، درصد کمبود آب برای مصرف کشاورزی می‌باشد. در مدل Vensim اشاره‌شده در شکل ۴ فرض شده است که نیاز شرب، صنعت و محیط زیست به‌طور کامل

جدول ۶. مقادیر میانگین ماهانه و سالانه تبخیر از سطح دریاچه سد حاجیلرچای بر حسب میلی‌متر

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
تبخیر	۱۲۱/۰۰	۳۳/۱۰	۲۵/۷۰	۲۰/۹۰	۳۵/۰۰	۴۷/۸۰	۱۰۳/۲۰	۱۳۹/۷۰	۱۷۵/۳۰	۱۸۹/۸۰	۱۹۴/۶۰	۱۷۶/۶۰



شکل ۳. نمایی از مدل Vensim ساخته‌شده به‌منظور بررسی بیلان آب در مخزن سد



شکل ۴. نمایی از مدل ساخته شده برای شبیه سازی سطح آب مخزن سد حاجیلرچای و محاسبه تابع عملکرد سیستم

نتایج و بحث

در این تحقیق برای محاسبه ریسک روگذری ناشی از اثر توأم سیلاب و باد، پارامترهایی که به عنوان عوامل عدم قطعیت در نظر گرفته شده اند عبارتند از: ارتفاع اولیه آب در مخزن سد، ارتفاع خود سد که می تواند تحت تأثیر نشست و یا رسوب گذاری مخزن سد قرار بگیرد، سرعت باد با دوره بازگشت های مختلف و همچنین سیلاب ورودی به مخزن سد با دوره بازگشت های مختلف از جمله حداکثر سیلاب محتمل.

با توجه به مدل سازی صورت گرفته برای مخزن سد

لازم به ذکر است که در مدل ارائه شده در شکل (۴)، متغیرهای Z_{Flood} و $Z_{Flood\&Wind}$ به ترتیب تابع عملکرد سیستم در اثر سیلاب و تابع عملکرد سیستم در اثر سیلاب و باد بوده و ضرایب k_1 تا k_2 برحسب مقادیر k حاصل از شبیه سازی مونت کارلو دارای مقادیر صفر و یک بوده و باعث اعمال عدم قطعیت مربوط به سیلاب ورودی به مخزن سد می گردند.

در شکل (۵) روند ارزیابی ریسک روگذری سد خاکی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است، نشان داده شده است.

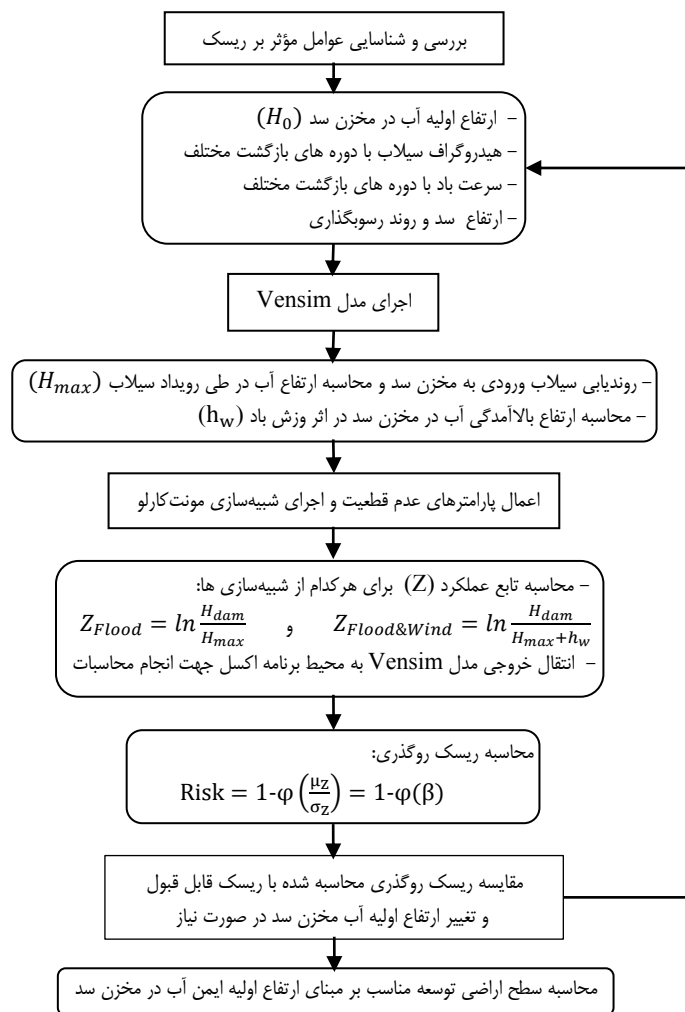
توزیع احتمالی مورد استفاده، توزیع نرمال با $\mu = ۱۲۶/۴۷۰$ و $\sigma = ۲۶/۱۸۰$ می‌باشد که توسط نرم‌افزار Easy Fit با $Statistic = ۰/۱۱۸۵۴$ و $P - Value = ۰/۹۸۲۸۹$ به‌عنوان بهترین توزیع قابل انتخاب تشخیص داده شده است. علاوه بر سرعت باد، عدم قطعیت‌های تغییرات ارتفاع خود سد از $۶۹/۵۲$ تا $۷۱/۰۰$ متر با توزیع احتمالاتی یکنواخت و سیلاب ورودی به مخزن سد با دوره‌های بازگشت مختلف نیز در شبیه‌سازی مونت‌کارلو مورد توجه قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و محاسبه ریسک روگذری در شکل (۶) آمده است.

نتایج حاصل از محاسبات نشان داده شده در شکل (۶) بیانگر این موضوع است که برای هر دو سرریز مورد نظر، بیش‌ترین مقدار ریسک روگذری برای تراز ۱۰۴۷ متر اتفاق می‌افتد و مقدار آن برای سرریز آزاد برابر $۰/۷۴۱۴۸۸$ و برای سرریز نیلوفری برابر $۰/۱۵۸۹۱۳$ می‌باشد و همچنین در ترازهای بالاتر از تراز ۱۰۴۳ متر، مقدار ریسک روگذری به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد که نشانگر قابلیت اطمینان پایین‌تر مخزن در هر دو سرریز برای ترازهای آب بالاتر از ۱۰۴۳ متر می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که متوسط ریسک روگذری برای سرریز آزاد تقریباً $۴/۰$ برابر متوسط ریسک روگذری برای سرریز نیلوفری می‌باشد. با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده هزینه اجرای سرریز نیلوفری بر مبنای گزارش‌های مهندسی مشاور طبق فهرست بهای سال ۱۳۹۴ مبلغ ۶۴ میلیارد ریال بوده است که با توجه به مهندسی ارزش صورت گرفته و انتخاب سرریز آزاد، هزینه اجرای سرریز به $۶/۵$ میلیارد ریال کاهش یافته است (۱). لذا می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با قبول چهار برابر ریسک روگذری بیش‌تر برای سد مورد مطالعه و استفاده از سرریز آزاد به جای سرریز نیلوفری، هزینه احداث سرریز سد به میزان ۹۰ درصد کاهش می‌یابد.

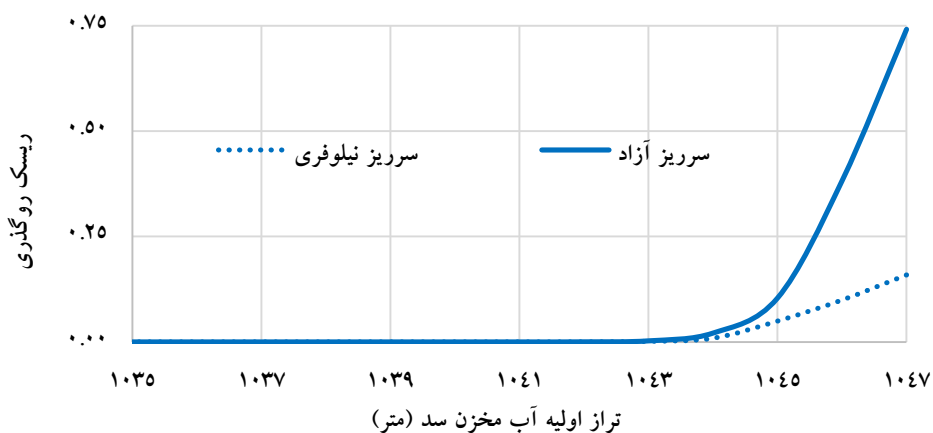
برای ۵۰ سال عمر مفید بهره‌برداری از سد، حداقل و حداکثر تراز اولیه آب مخزن سد قبل از ورود سیلاب به ترتیب ۱۰۰۵ و ۱۰۴۷ متر می‌باشد. همچنین با توجه به مشخصات سد و گزارش‌های شرکت مهندسی مشاور بند آب، ارتفاع سد برابر $۷۱/۰۰$ متر بوده و حداکثر مقدار نشست بلندمدت سد در ۵۰ سال عمر مفید سد برابر $۱/۴۸$ متر می‌باشد. بنابراین حداقل و حداکثر ارتفاع سد برابر $۶۹/۵۲$ و $۷۱/۰۰$ متر در نظر گرفته شده است. دبی ویژه رسوب در محل سد برابر ۵۲۷ تن در سال در کیلومتر مربع و حجم رسوبات پنجاه ساله وارده به مخزن سد برابر $۱۱/۸$ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است.

تأثیر ارتفاع اولیه آب مخزن سد بر روی ریسک روگذری

در این قسمت از تحقیق، تأثیر تغییرات تراز اولیه آب مخزن سد حاجیلرچای، بر ریسک روگذری ناشی از سیلاب و باد مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور مقایسه تأثیر تغییر نوع سرریز بر ریسک روگذری، مخزن سد مورد نظر یک بار با سرریز نیلوفری که طرح اولیه سد بر اساس آن بوده است مدل‌سازی گردیده است و در مرحله دوم، با استفاده از سرریز آزاد که در واقع سرریز اصلی سد بوده و پس از محاسبات مهندسی ارزش صورت گرفته، بر مبنای آن سد احداث شده و آماده بهره‌برداری می‌باشد، مخزن سد مدل‌سازی شده است. تعداد شبیه‌سازی در روش مونت‌کارلو برای این حالت برابر ۲۰۰۰۰۰ مرتبه بوده و بر مبنای آن ریسک‌های روگذری مربوطه تحت تأثیر توأم سیلاب و باد محاسبه گردیده است. به‌منظور وارد نمودن اثر عدم قطعیت سرعت باد بر ریسک روگذری در شبیه‌سازی مونت‌کارلو، حداقل سرعت باد برابر $۷۴/۲ \text{ km/h}$ برای باد با دوره بازگشت ۲ سال و حداکثر سرعت باد برابر $۱۶۱/۴۰ \text{ km/h}$ برای باد با دوره بازگشت ۵۰۰ سال در نظر گرفته شده است.



شکل ۵. روندنمای ارزیابی ریسک روگذری سد و محاسبه سطح اراضی توسعه مناسب بر مبنای ارتفاع اولیه ایمن آب در مخزن سد



شکل ۶. تأثیر تغییرات تراز اولیه آب در مخزن سد بر مقدار ریسک روگذری ناشی از سیلاب و باد

در مخزن سد در کم‌تر از این تراز نگه داشته شود میزان ریسک روگذری از حد قابل قبول کم‌تر خواهد بود.

مساحت اراضی قابل توسعه مناسب بر مبنای ریسک روگذری قابل قبول

در این قسمت از تحقیق با توجه به مقدار ریسک روگذری قابل قبول محاسبه شده و ارتفاع اولیه آب مخزن سد نظیر آن، با استفاده از مدل پویایی سیستم ساخته شده، مساحت اراضی قابل توسعه مطلوب در پایین‌دست سد محاسبه گردیده است.

شایان ذکر است که با پایین‌آوردن ارتفاع آب در مخزن سد به‌منظور حصول اطمینان از عدم وقوع پدیده روگذری، مساحت اراضی قابل توسعه در پایین‌دست سد کاهش یافته و باعث کاهش صرفه اقتصادی احداث سد می‌گردد. در شکل (۷) نمودار تغییرات سطح اراضی قابل توسعه در پایین‌دست سد حاجیلرچای نسبت به ارتفاع آب در مخزن سد آمده است.

با توجه به این‌که در قسمت قبلی به‌منظور تأمین ریسک روگذری قابل قبول، مقدار تراز اولیه مناسب آب در مخزن سد برابر $1040/70$ متر تعیین گردید، لذا با توجه به شکل (۷) سطح اراضی قابل توسعه مناسب حدود 1660 هکتار تعیین می‌گردد که در این حالت درصد کمبود آب برای مصارف مختلف، مطابق شکل ۸ می‌باشد که با توجه به این شکل و مطالب قبلی بیان‌شده، این میزان در حد قابل قبولی می‌باشد. این در حالی است که با توجه به مطالعات صورت‌گرفته توسط مهندسین مشاور بندآب، طراحی سد برای تراز نرمال 1047 متر و سطح اراضی 2000 هکتار صورت گرفته است. لذا مشاهده می‌گردد با لحاظ ایمنی سد در برابر روگذری به‌منظور کاهش تلفات و خسارت آن، میزان سطح اراضی قابل توسعه در پایین‌دست سد و به طبع آن بازدهی اقتصادی سد به مقدار 17 درصد کاهش می‌یابد.

تخمین تلفات جانی ناشی از سیلاب و ارزیابی ریسک روگذری

براساس نتایج ارائه‌شده توسط مهندسین مشاور بندآب، جمعیت تحت تأثیر سیلاب ناشی از روگذری و شکست سد حاجیلرچای برابر 2943 نفر می‌باشد (۸). هم‌چنین به‌منظور حصول شرایط بحرانی، فرض شده است که سیلاب مؤثر در روگذری در فصل تابستان و در ساعات شب اتفاق افتاده و مراقبین زیادی برای سد وجود ندارد. با توجه به فرضیات فوق و بر اساس جدول راهنمای روش DS0-99-06، زمان آغاز هشدار یک ساعت قبل از شروع روگذری و شکست خواهد بود. هم‌چنین طبق روش فوق‌الذکر نرخ مرگ‌ومیر برای حالت بدون هشدار برابر $0/15$ و برای حالت دارای هشدار برابر $0/04$ می‌باشد. لذا با توجه به مطالب فوق میزان تخمینی تلفات جانی بر اثر سیل ناشی از شکست (روگذری) سد حاجیلرچای به‌ترتیب برابر 441 نفر و 118 نفر برای حالت‌های بدون هشدار و دارای هشدار می‌باشد. لذا با توجه به دستورالعمل اشاره‌شده در نمودار شکل ۲ میزان ریسک روگذری قابل قبول برای سد حاجیلرچای مقدار $2/27 \times 10^{-6}$ می‌باشد.

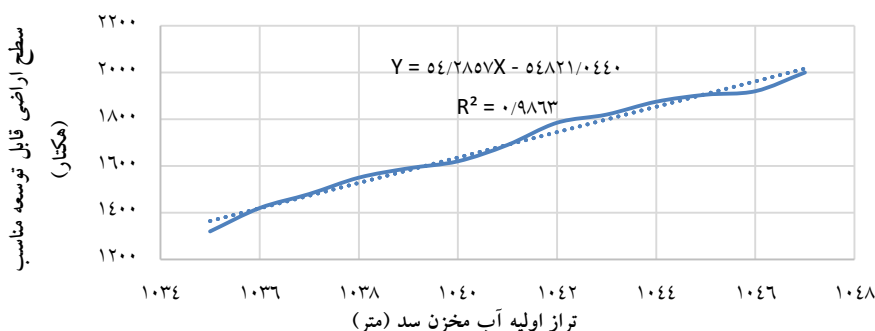
محاسبه تراز اولیه مناسب آب در مخزن سد بر مبنای ریسک روگذری قابل قبول

طبق محاسبات ریسک صورت‌گرفته در مدل ساخته‌شده برای مخزن سد حاجیلرچای و نمودار شکل (۶)، میزان ریسک روگذری برحسب تراز اولیه آب در مخزن سد مطابق جدول (۷) می‌باشد.

با توجه به جدول (۷)، نمودار شکل (۶) و هم‌چنین با توجه به این‌که طبق روش DS0-99-06 میزان ریسک روگذری قابل قبول برای سد حاجیلرچای مقدار $2/27 \times 10^{-6}$ به‌دست آمده است، لذا مقدار تراز اولیه مناسب آب در مخزن سد برابر $1040/70$ متر تعیین می‌گردد و چنانچه آب موجود

جدول ۷. مقادیر ریسک روگذری محاسبه‌شده بر حسب تراز اولیه آب در مخزن سد

تراز اولیه آب مخزن سد (m)	۱۰۴۰/۵۰	۱۰۴۰/۶۰	۱۰۴۰/۷۰	۱۰۴۰/۸۰	۱۰۴۰/۹۰	۱۰۴۱/۰۰
ریسک روگذری	$۸/۹۳ \times ۱۰^{-۷}$	$۱/۴۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۹۳ \times ۱۰^{-۶}$	$۲/۸۴ \times ۱۰^{-۶}$	$۴/۴۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۵/۹۶ \times ۱۰^{-۶}$



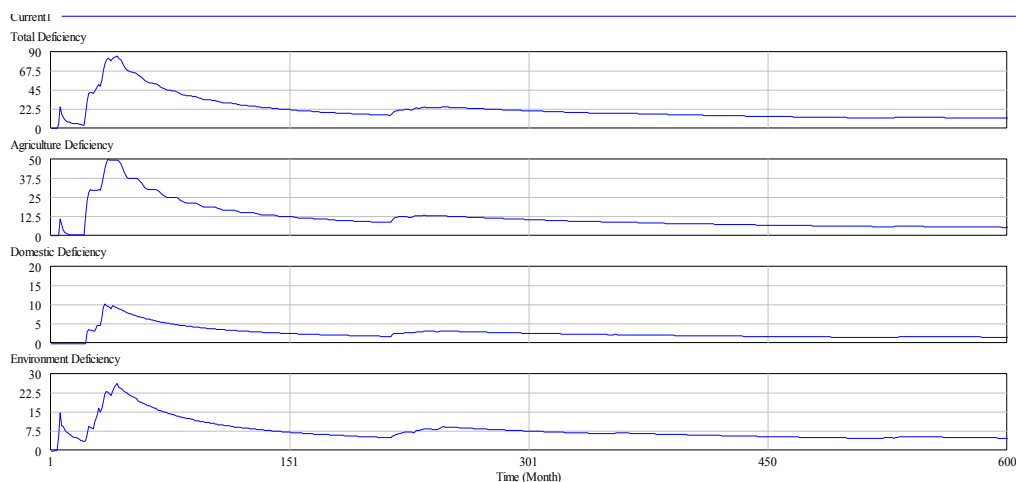
شکل ۷. تأثیر تغییرات تراز اولیه آب در مخزن سد حاجیلرچای بر سطح اراضی قابل توسعه مناسب پایین دست آن

شده است. در مورد عدم قطعیت تراز اولیه آب مخزن سد، تغییرات تراز اولیه آب مخزن از ۱۰۰۵ تا ۱۰۴۷ متر با توزیع احتمالاتی Beta با مشخصات $\alpha_1 = 1/4528$ ، $\alpha_2 = 0/7084$ ، $a = 1005$ و $b = 1047$ که توسط نرم‌افزار مذکور با $0/1089$ $P\text{-Value} = 1/1521 \times 10^{-6}$ و $Statistic =$ توزیع قابل انتخاب مشخص شده است، در شبیه‌سازی مونت کارلو مدنظر قرار گرفته‌است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در شکل (۹) آمده است.

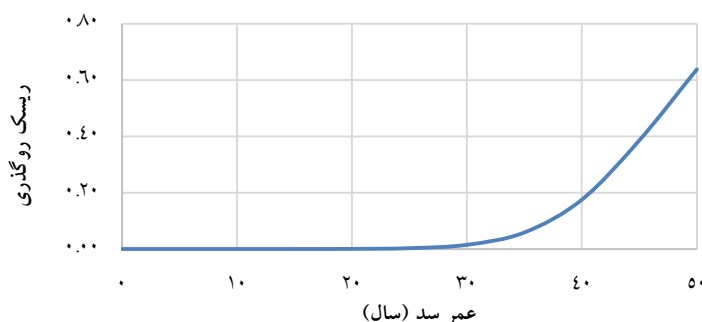
با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌گردد که با گذشت زمان و افزایش عمر سد حاجیلرچای، مقدار ریسک روگذری آن افزایش می‌یابد و حداقل مقدار ریسک روگذری برابر $0/066025$ و برای سال اول بهره‌برداری از سد بوده و حداکثر مقدار آن برابر $0/151195$ می‌باشد که برای عمر ۵۰ سال سد اتفاق می‌افتد و در طول ۵۰ سال عمر مفید سد ریسک روگذری حدود ۱۲۹ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده می‌گردد که از عمر ۲۰ سال سد به بعد شیب نمودار و در نتیجه نرخ افزایش ریسک روگذری بیش‌تر می‌شود و لزوم توجه به تمهیدات کاهش ریسک روگذری از جمله کنترل تراز آب مخزن سد ضروری می‌باشد.

تأثیر گذشت زمان و عمر سد بر ریسک روگذری ناشی از سیلاب و باد

به‌منظور بررسی اثر گذشت زمان و بهره‌برداری از سد و به موازات آن نشست سد و رسوب‌گذاری در مخزن سد، در مدل ساخته‌شده، شبیه‌سازی مونت کارلو با تعداد تکرار ۲۰۰۰۰۰ مرتبه صورت گرفته است. پارامترهای عدم قطعیت منظور شده عبارتند از سیلاب ورودی به مخزن سد با دوره‌های بازگشت مختلف، سرعت باد و رقوم اولیه آب مخزن سد. بنابراین در مدل شبیه‌سازی مونت کارلو ضمن اعمال و انتخاب دبی سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف با توزیع یکنواخت، به‌منظور وارد نمودن اثر عدم قطعیت سرعت باد بر ریسک روگذری در شبیه‌سازی مونت کارلو، حداقل سرعت باد برابر $74/2 \text{ km/h}$ برای باد با دوره بازگشت ۲ سال و حداکثر سرعت باد برابر $161/40 \text{ km/h}$ برای باد با دوره بازگشت ۵۰۰ سال در نظر گرفته شده است. توزیع احتمالی مورد استفاده نیز توزیع نرمال با $\mu = 126/470$ و $\sigma = 26/180$ می‌باشد که توسط نرم‌افزار Easy Fit با $Statistic = 0/11854$ و $P\text{-Value} = 0/98289$ به‌عنوان بهترین توزیع قابل انتخاب تشخیص داده



شکل ۸. درصد کمبود آب برای مصارف مختلف



شکل ۹. تأثیر گذشت زمان و عمر سد حاجیلرچای بر ریسک روگذری ناشی از سیلاب و باد

نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر ارتفاع اولیه آب مخزن سد حاجیلرچای بر روی ریسک روگذری سد مذکور ناشی از اثر توأم سیلاب و باد، با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها و شبیه‌سازی MCS مورد بررسی قرار گرفته‌است. پارامترهای عدم قطعیت مورد نظر در شبیه‌سازی مونت کارلو سرعت باد، هیدروگراف سیلاب ورودی به مخزن سد و ارتفاع خود سد می‌باشند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ضمن تأیید کارایی روش پویایی سیستم‌ها به‌همراه شبیه‌سازی MCS در ارزیابی ریسک روگذری سدها مطابق تحقیق قبلی ابراهیم‌زاده و همکاران (۱)، بیانگر این است که مطابق تحقیقات چانگ‌چون و همکاران (۱۰)، گودرزی و همکاران (۱۲) و خوان و همکاران (۱۵)، ارتفاع

اولیه آب در مخزن سد تأثیر قابل‌توجهی در میزان ریسک روگذری سد دارد و در سد حاجیلرچای، بیشینه مقدار ریسک روگذری در تراز ۱۰۴۷ متر اتفاق می‌افتد و بعد از تراز ۱۰۴۳ متر، مقدار ریسک روگذری به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد با تغییر نوع سرریز سد از سرریز نیلوفری به سرریز آزاد و کاهش ۹۰ درصدی هزینه احداث سرریز سد، میزان ریسک روگذری تقریباً به چهار برابر حالت قبل افزایش می‌یابد که این امر لزوم کنترل بیش‌تر در این خصوص به‌منظور جلوگیری از روگذری را نشان می‌دهد.

در ادامه این تحقیق از روش DS0-99-06 برای تخمین تلفات ناشی از سیلاب روگذری سد استفاده شده و مقدار آن برابر ۴۴۱ نفر برای حالت بدون هشدار و ۱۱۸ نفر برای

گسترش و ارتقای مطالعه انجام شده در این مقاله و توسعه مفاهیم استخراج شده به سایر زمینه‌های مدیریت مخزن سد و مدیریت ریسک و ایمنی سد، می‌توان پیشنهاداتی به شرح زیر جهت انجام مطالعات آتی بیان نمود:

- با لحاظ نمودن عدم قطعیت مربوط به پاره‌ای از متغیرها که در این مقاله از آنها صرف‌نظر شده است، از جمله عدم قطعیت مربوط به هندسه مخزن سد و پایداری شیروانی‌های خاکی موجود در مخزن سد، عدم قطعیت مربوط به خطای نسبی اندازه‌گیری خروجی مخزن سد و خطای اندازه‌گیری جریان خروجی از سرریز و سایر پارامترها می‌توان در مطالعات آتی نتایج دقیق‌تری را استخراج نمود.

- با توجه به قابلیت‌های مشاهده‌شده از روش پویایی سیستم‌ها و نرم‌افزار Vensim در محاسبه ریسک روگذری سد، پیشنهاد می‌گردد برای ارزیابی ریسک سایر عوامل تخریب سدها نیز قابلیت این روش مورد بررسی و استفاده قرار گیرد.

منابع

۱. ابراهیمزاده ع، ضرغامی م. و نورانی و. (۱۳۹۸). ارزیابی ریسک روگذری سدهای خاکی با مدل پویایی سیستم‌ها تحت شبیه‌سازی مونت کارلو و روش ابرمکعب لاتین، مطالعه موردی: سد حاجیلرچای. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۱): ۱۴-۳۱.
۲. فتوکیان م، صفاری ن. و ضرغامی م. (۱۳۹۶). مدل‌سازی پویای سیستم سد مخزنی یامچی با اعمال الگوی بهینه کشت جهت تدوین سیاست بهره‌برداری. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۳(۳): ۱-۱۶.
۳. کاراندیش ف، ابراهیمی ک. و برهمت ج. (۱۳۹۲). بررسی شدت سیل خیزی زیرخوضه‌های کارون و عوامل مؤثر بر آن در شبیه‌سازی مدیریت یکپارچه و نیمه‌توزیعی سیلاب. مدیریت آب و آبیاری. ۳(۲): ۱-۱۲.

حالت دارای هشدار کافی تخمین زده شده است که بر مبنای آن و طبق دستورالعمل ارزیابی ریسک توصیه‌شده توسط امور مهندسی ارتش آمریکا، میزان ریسک روگذری قابل قبول برای سد حاجیلرچای مقدار $10^{-6} \times 2/27$ محاسبه گردیده است که تراز اولیه آب مخزن سد متناظر با این ریسک مقدار $1040/70$ متر می‌باشد و چنانچه آب موجود در مخزن سد در تراز کم‌تری از این تراز نگهداری گردد، میزان ریسک روگذری از حد قابل قبول فوق‌الذکر کم‌تر خواهد بود. که این موضوع در تأیید نتایج تحقیقات پان لیو و همکاران (۲۱) می‌باشد و بیانگر این است که با کنترل میزان ریسک روگذری سد در حد قابل قبول، می‌توان مقدار بهره‌وری از مخزن سد را تا حدود زیادی افزایش داد.

در قسمت دیگری از این تحقیق، ضمن مدل‌سازی مخزن سد حاجیلرچای با استفاده از پویایی سیستم‌ها، اراضی قابل توسعه مناسب تراز $1040/70$ متر مورد محاسبه قرار گرفته است و بر مبنای محصولات مورد کشت منطقه، سطح اراضی قابل توسعه در پایین‌دست سد حدود 1660 هکتار برآورد شده است که حدود 17 درصد از مقدار 2000 هکتار در نظر گرفته‌شده در طراحی سد کم‌تر می‌باشد و به نوعی نشانگر کاهش 17 درصدی سود حاصل از احداث سد، در صورت توجه به ایمنی سد در برابر ریسک روگذری و کاهش تلفات آن می‌باشد.

در پایان تحقیق، تأثیر گذشت زمان و عمر سد حاجیلرچای بر روی ریسک روگذری آن مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که با افزایش عمر سد، ریسک روگذری افزایش می‌یابد، به طوری که بعد از گذشت 20 سال از عمر سد حاجیلرچای، روند افزایش ریسک روگذری شتاب گرفته و لزوم کنترل سد و ضرورت توجه ویژه به تمهیدات کاهش ریسک روگذری از جمله کنترل تراز آب مخزن سد را می‌طلبد.

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، با هدف

- Risk and Uncertainty Analysis for Dam Overtopping-Case Study: the Doroudzan Dam, Iran. *Journal of Hydro-Environment Research*, 8(1), 50-61.
13. <https://www.isna.ir/news>.
 14. Hughes, S. A. (2004). Estimation of Wave Run-up on Smooth, Impermeable Slopes Using the Wave Momentum Flux Parameter. *Journal of Coastal Engineering*, 51(11), 1085-1104.
 15. Juan, C., Ping, A. Z., Ru, A., Feilin, Z. & Bin, X. (2019). Risk analysis for real-time flood control operation of multi-reservoir systems using a dynamic Bayesian network. *Environmental Modeling & Software*, 111, 409-420.
 16. Kotir, J.H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N. & Johnstone, R. (2016). A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agriculture development in the Volta river basin, Ghana. *Science of the Total Environment*, 573, 444-457.
 17. Kuo, J. T., Yen, B. C., Hsu, Y. C., & Lin, H. F. (2007). Risk Analysis for Dam Overtopping Feitsui Reservoir as a Case Study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 955-963.
 18. Kwon, H. & Moon, Y. (2005). Improvement of Overtopping Risk Evaluations Using Probabilistic Concepts for Existing Dams. *Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 20(4), 223-237.
 19. Mays, L.W. (2000) The Role of Risk Analysis in Water Resources Engineering. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 103(1), 8-12.
 20. Motevalli, M., Zadbar, A., Elyasi, E. & Jalaal, M. (2015). Using Monte-Carlo approach for analysis of quantitative and qualitative operation of reservoirs system with regard to the inflow uncertainty. *Journal of African Earth Sciences*, 105, 1-16.
 21. Pan, L., Kairong, L. & Xiaojing, W. (2014). A two-stage method of quantitative flood risk analysis for reservoir real-time operation using ensemble-based hydrologic forecasts. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(3), 803-813.
 22. Qianli, D. (2016). Evaluating risks of dam-reservoir systems using efficient importance sampling. Phd. Thesis, university of Maryland.
 23. Sharafati, A. & Azamathulla, H.M. (2018). Assessment of Dam Overtopping Reliability using Overtopping Threshold Curve. *Water Resources Management*, 32(7), 2369-2383.
 24. Sherong, Z. & Yaosheng, T. (2014). Risk assessment of earth dam overtopping and its application research. *Natural Hazards*, 74 (2), 717-736.
 ۴. محمودیان شوشتری م.، ملک‌محمدی ب. و بنی‌هاشمی م. (۱۳۹۵). ارزیابی ریسک ایمنی سدها (مطالعه موردی: ریسک سیلاب در سد گلستان). مهندسی عمران امیرکبیر. ۴۸(۴): ۳۹۵-۴۰۶.
 ۵. ملاحسینی م.، موسوی س. و صلوی‌تبار ع. (۱۳۹۱). ارزیابی اثر ایجاد ظرفیت ذخیره در کاهش خسارت سیلاب با استفاده از مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان. ایران.
 ۶. مولوی ح.، لیاقت ع. و نظری ب. (۱۳۹۵). ارزیابی سیاست‌های اصلاح الگوی کشت و مدیریت کم‌آبایی با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم (مطالعه موردی: حوضه آبریز ارس). مدیریت آب و آبیاری. ۶(۲): ۲۱۷-۲۳۶.
 ۷. مهرآذر آ.، مساح بوانی ع.، مشعل م. و رحیمی‌خوب ح. (۱۳۹۵). مدل‌سازی یکپارچه سیستم‌های منابع آب، کشاورزی و اقتصادی- اجتماعی دشت هشتگرد با رویکرد دینامیکی سیستم‌ها. مدیریت آب و آبیاری. ۶(۲): ۲۶۳-۲۷۹.
 ۸. مهندسین مشاور بندآب. (۱۳۹۲). گزارش طرح سد مخزنی حاجیلرچای. جلد‌های اول تا نهم، شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی.
 9. Chang, D. S. & Zhang, L. M. (2010). Simulation of the Erosion Process of Landslide Dams Due to Overtopping Considering Variations in Soil Erodibility along Depth. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(4), 933-946.
 10. Chongxun, M., Fanggui, L., Mei, Y. & Guikai, S. (2008). Risk analysis for earth dam overtopping. *Journal of Water Science and Engineering*, 1(2), 76-87.
 11. Ghashghaie, M., Marofi, S. & Marofi, H. (2014). Using system dynamics method to determine the effect of water demand priorities on downstream flow. *Water Resource Management*, 28, 5055-5072
 12. Goodarzi, E., Shui, L. T. & Ziaei, M. (2014).

25. Simonovic, S. P. (2009). Managing water resources, methods and tools for a system approach. UNESCO Publishing, United Kingdom, 637pp.
26. Simonovic, S. P. & Ahmad, S. (2000). System Dynamics Modeling of Reservoir Operations for Flood Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(3), 190-198.
27. Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics System Thinking and Modeling for Complex World. Irwin, McGraw-Hill, MA, 982pp.
28. USACE. (2014). U.S. Army Corps of Engineers, Safety of Dams – Policy and Procedures, ER-1110-2-1156, March 31, 2014.
29. USBR. (1992). US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Freeboard Criteria and Guidelines for Computing Freeboard Allowances for Storage Dams, ACER Technical Memorandum No. 2, Denver, Colorado.
30. USBR. (1999). U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure, DSO-99-06, September 30, 1999.
31. Wang, Z. & Bowles, D. S. (2005). Dam Breach Simulations with Multiple Breach Locations under Wind and Wave Actions. *Journal of Advances in Water Resources*, 29, 1222-1237.
32. Yang, J., Lei, K., Khu, S. & Meng, W. (2015). Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model, *Water Resource Management*, 29, 885-899.
33. Yuefeng, S., Haotian, C., Zhengjian, M. & Denghua, Z. (2012). Solution method of overtopping risk model for earth dams. *Safety Science*, 50, 1906-1912.
34. Zarghami, M. & Amir Rahmani, M., (2015). Toward effective water diplomacy by using system dynamics: Case study, The 33rd International Conference of the System Dynamics Society, Cambridge, Massachusetts, USA.
35. Zhangjun, L., Xinfu, X., Jingqing, C., Tianfu, W. & Jiao, N. (2018). Hydrological risk analysis of dam overtopping using bivariate statistical approach: a case study from Geheyan Reservoir, China. *Stochastic Environment Research and Risk Assessment*, 32 (9), 2515-2525.