

تعیین ارتفاع و ریسک روگذری سدهای مخزنی بر مبنای تحلیل قابلیت اطمینان (مطالعه موردی: سد نمرود)

خشایار بهادری*^۱

مجتبی کریمایی طبرستانی^۲

چکیده

عموماً طراحی سدها و سازه‌های هیدرولیکی وابسته به صورت قطعی انجام می‌گیرد. درحالی‌که عدم قطعیت‌های زیادی در برآورد پارامترهای طراحی نظیر ارتفاع سدها و ابعاد سرریز وجود دارد. در تحقیق حاضر بعد از مطالعه بر روی عدم قطعیت‌های مختلف در طراحی، تعیین ارتفاع و همچنین ریسک روگذری ناشی از سیلاب حدی بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان موردتوجه قرار گرفت. برای این منظور از روش شبیه‌سازی مونت کارلو که یک روش معروف در تحلیل قابلیت اطمینان است، استفاده می‌گردد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در صورتی‌که ارتفاع سد نمرود به‌عنوان مطالعه موردی برابر با ۷/۷۸ متر در نظر گرفته شود، سد ۱۰۰ درصد در برابر سیلاب طراحی ایمن است و در این حالت ریسک روگذری از روی سد ناشی از سیلاب کنترل برابر با ۶۴ درصد است. همچنین محاسبات فوق در شرایط تغییر طول سرریز اوجی و تغییر سرریز اوجی به سرریز نیلوفری نیز تکرار گردید. نتایج نشان داد که میزان تغییرات احتمال شکست با تغییر طول آبگذری در سرریز نیلوفری بیشتر از سرریز اوجی است.

واژه‌های کلیدی:

ارتفاع سد، ریسک روگذری، روندیابی مخزن، تحلیل قابلیت اطمینان، روش شبیه‌سازی مونت کارلو

۱. کارشناس ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی. دانشگاه علم و فرهنگ تهران. khashayarbahadori@yahoo.com

۲. استادیار دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

مقدمه

سدهای مخزنی به علت نگهداری حجم زیاد آب برای مصارفی چون تأمین آب آشامیدنی، آب کشاورزی، پرورش آبزیان و... دارای اهمیت زیادی در طراحی می‌باشند. یکی از موارد مهم در طراحی سدها، تعیین ارتفاع مناسب برای سد می‌باشد. به این دلیل که عامل روگذری یکی از مهم‌ترین عوامل در تخریب سدها هست. به‌طوری‌که بیش از یک‌سوم شکست سدها در جهان به علت روگذری رخ داده است (چنگ^۱ و همکاران، ۱۹۸۲). عمده روش‌های ارائه شده برای محاسبه ارتفاع سدها به صورت قطعی است و عدم قطعیت پارامترهای مؤثر بر آن در نظر گرفته نشده است. به همین دلیل از سطح ایمنی ارتفاع سدها اطلاعاتی در دسترس نیست. اخیراً استفاده از روش‌های قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک با توجه به قابلیت بالای آن‌ها در بهینه نمودن طرح‌های مهندسی و بالا بردن توان مدیریتی پروژه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به ساخت و ساز گسترده‌ای که در کشور وجود دارد، کاربردی نمودن این روش‌ها در طراحی سازه‌های مختلف می‌تواند بسیار مفید باشد. در مسائل مهندسی هیدرولیک عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها و تئوری‌ها، هم در مرحله تحلیل و هم طراحی، منجر به لزوم استفاده از روش‌های احتمالاتی می‌شود. شکست در سازه‌های هیدرولیکی از جمله تخریب سد-ها و تأسیسات در اثر روگذری، نتیجه تأثیرات متقابل اتفاقی بودن بار خارجی و عدم قطعیت‌های مختلف در تحلیل، طراحی، ساخت و به‌کارگیری سازه است. آنالیزهای قابلیت اطمینان یک چهارچوب منظم و سازمان‌دهی شده را برای کمی کردن عدم قطعیت‌های مدل فراهم می‌کند (نواک و کالینز^۲، ۲۰۰۰). علاوه بر این به طراح اجازه می‌دهد تا نقش هرکدام از پارامترهای ورودی مسئله را در عدم قطعیت خروجی مدل مشخص کند. این آگاهی برای تشخیص پارامترهای مهم به‌منظور توجه بیشتر به آن‌ها برای دستیابی دقیق‌تر به اندازه و تأثیر آن‌ها و در نهایت کاهش عدم قطعیت‌های خروجی بسیار مهم است. در گذشته مطالعاتی جهت لحاظ نمودن تحلیل ریسک و

قابلیت اطمینان در ایمنی سدها انجام شده است. وود^۳ (۱۹۷۵) با استفاده از روش تبدیل انتگرال، ریسک روگذری را برای یک سد خاکی بررسی نمود. چنگ و همکاران (۱۹۸۲) ریسک روگذری سد را با استفاده از روش‌های مختلف از جمله روش انتگرال مستقیم، روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۴، روش مقدار میانگین مرتبه اول ممان دوم^۵ و روش مرتبه اول ممان دوم پیشرفته^۶ ارزیابی کردند. کو^۷ و همکاران (۲۰۰۷) با در نظر گرفتن پنج روش که عبارت‌اند از روش تقریبی روزنبلوئت^۸، روش تقریب نقطه‌ای هار^۹، روش مقدار میانگین مرتبه اول ممان دوم، روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش نمونه‌گیری لاتین هاپیرکیوب^{۱۰} و در نظرگیری چهار تراز اولیه سطح آب در مخزن سد فیتسوی^{۱۱}، تحلیل ریسک انجام دادند. فاکتورهای عدم قطعیت در این تحقیق شامل تراز اولیه سطح آب، هندسه مخزن، روندیابی مخزن، رهاسازی آب از مخزن، دبی پیک و زمان اوج سیلاب بودند. هسو^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۱) بر اساس یک روش آماری، توزیع احتمالاتی روگذری سد را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پیک سیلاب و موج ناشی از باد ارائه کردند. در آن تحقیق با استفاده از آنالیز فراوانی پیک سیلاب و ارتفاع موج، احتمال روگذری سد شیهمن^{۱۳} در تایوان محاسبه شد. منصوری و کبیری سامانی^{۱۴} (۲۰۱۲) با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و نمونه‌گیری لاتین هاپیرکیوب به بررسی ریسک روگذری سد ونک پرداختند و بیان نمودند که سطح اولیه آب مخزن تأثیر چندانی بر ریسک روگذری نداشته و مهم‌ترین عامل دبی ورودی به مخزن سد است. گودرزی^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۴) ریسک شکست سد بر اثر متغیرهای دبی ورودی و سرعت باد در مخزن را با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و نمونه‌گیری لاتین

۳. Wood

۴. Monte Carlo Simulation Techniques

۵. Mean Value First Order Second Moment

۶. Advanced First Order Second Moment

۷. Kuo

۸. Rosenblueth's Point Estimation Method

۹. Harr's Point Estimation Method

۱۰. Latin Hypercube Sampling

۱۱. Feitsui

۱۲. Hsu

۱۳. Shihmen

۱۴. Mansouri and Kabiri Samani

۱۵. Goodarzi

۱. Cheng

۲. Nowak and Collins

یک بخش مهم از طراحی سازه‌های هیدرولیکی مطرح است. همچنین عمده مطالعاتی که در گذشته انجام شده است به صورت تعیین ریسک روگذری سدهای مخزنی موجود می‌باشند و کمتر تعیین ارتفاع سد و همچنین اثر سازه‌های جنبی نظیر سرریزها بر ارتفاع و ریسک روگذری سدها بر اساس تحلیل قابلیت اطمینان مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، ابتدا مفاهیم قابلیت اطمینان تعیین ارتفاع سدها و پارامترهای تأثیرگذار بر آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه پس از انجام تحلیل قابلیت اطمینان با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو اقدام به برآورد احتمالاتی ارتفاع سد نمود در استان تهران به عنوان مطالعه موردی می‌گردد. در ادامه ریسک روگذری ناشی از سیلاب بزرگتر از سیلاب طراحی برای ارتفاع برآورد شده تعیین می‌گردد. در نهایت اثرات سرریز بر ارتفاع و ریسک روگذری شامل تغییر طول سرریز اوجی و تغییر نوع سرریز از اوجی به نیلوفری بر روی ارتفاع سد بررسی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از روابط آیین‌نامه USBR^۸ جهت محاسبه ارتفاع سد استفاده خواهد شد. طبق معیارهای آیین‌نامه، ارتفاع سد بر اساس بیشترین مقدار دو رابطه زیر تعیین می‌گردد (USBR، ۲۰۱۲):

$$H_C = H_N + H_{W_{100}} \quad (۱)$$

(۲)

$$H_C = H_N + H_F + H_{W_{10}}$$

که در آن H_C ارتفاع تاج سد، H_N ارتفاع نرمال آب^۹، $H_{W_{100}}$ ارتفاع خیزش^{۱۰} و خیزاب موج^{۱۱} ناشی از باد با دوره بازگشت صدساله، H_F ارتفاع آب بالآمده مخزن ناشی از سیلاب و $H_{W_{10}}$ ارتفاع خیزش و خیزاب موج ناشی از باد با دوره بازگشت دهساله است. برای محاسبه ارتفاع نرمال آب از مدل SOP یا رویکرد بهره‌برداری استاندارد^{۱۲}

هایپرکیوب، برای سد خاکی درودزن ارائه کردند. نتایج نشان داد که در هر دو روش، ریسک شکست سد با بالا رفتن سطح اولیه آب، دوره بازگشت‌های سیلاب ورودی به مخزن و سرعت باد در مخزن افزایش می‌یابد. لیو^۱ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از رویکرد آماری دو متغیره^۲، ضمن لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی ناشی از سیلاب طراحی، ریسک روگذری مربوط به آن را در سد گهمیان^۳ چین بررسی نمودند.

همان‌طور که مشاهده گردید، در مطالعات فوق تنها به ارزیابی ریسک روگذری سدها پرداخته شده است. علاوه بر مطالعات مربوط به ریسک روگذری ناشی از سیلاب، مطالعات دیگری هم بر روی بخش‌های دیگر طراحی در سدهای خاکی با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان انجام گرفته است. سیواکومار و سریواستاوا^۴ (۲۰۱۰) یک تحقیق قابلیت اطمینان بر روی پایداری سدهای خاکی انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق از روش تحلیل قابلیت اطمینان مرتبه اول و تحلیل عددی برای محاسبه پارامتر قابلیت اطمینان در سدهای خاکی استفاده نموده و نتایج تحقیق خود را با روش‌های سنتی تعیین پایداری بر اساس ضریب اطمینان مقایسه نمودند. تحقیق مشابه‌ای نیز توسط یی^۵ و همکاران (۲۰۱۵) انجام گرفت. ایشان از یک برنامه تحلیل عددی شامل تحلیل پایداری شیروانی و تحلیل قابلیت اطمینان برای تعیین سطح اعتماد پایداری در یک سد خاکی سنگریزه‌ای با هسته رسی به عنوان مطالعه موردی استفاده نمودند. حکمت زاده و همکاران (۲۰۱۸) یک تحلیل قابلیت اطمینان برای محاسبه پایداری یک سد انحرافی در برابر پدیده پایپینگ^۶ و لغزش ارائه نمودند. ایشان در تحقیق خود از تکنیک تبدیل چولسکی^۷ به همراه سه نوع تابع وابستگی برای تولید میدان احتمالاتی استفاده نمودند. بر این اساس به نظر می‌رسد در سال‌های آینده استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان با توجه به قابلیت‌های منحصربه‌فرد آن در تعیین سطح ایمنی سازه‌ها به عنوان

۱. Liu

۲. Bivariate Statistical Approach

۳. Geheyen

۴. Sivakumar Bubo and Srivastava

۵. Yi

۶. Piping

۷. Cholesky Decomposition Technique

۸. United States Bureau of Reclamation

۹. Normal Water Level

۱۰. Wave Runup

۱۱. Wave Setup

۱۲. Standard Operation Policy

می‌توان با حل معادله فوق به صورت گام به گام حداکثر ارتفاع آب مخزن ناشی از ورود سیلاب را محاسبه کرد. برای حل معادله روندیابی مخزن از روش رانگ-کوتا^۲ مرتبه چهارم (ژانگ و تان^۳، ۲۰۱۴) استفاده شده است. در این روش، گام‌های زمانی با توجه به تعداد داده‌ها در بازه زمانی سیلاب‌ها انتخاب شده‌اند.

لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر جهت طراحی و تحلیل داده‌های مربوط به سرریزهای اوجی و نیلوفری نظیر محاسبه ضریب سرریز آن‌ها، از آیین‌نامه USBR استفاده شده است. جهت محاسبه جریان خروجی از سرریز اوجی، از رابطه زیر استفاده می‌گردد (USBR، ۱۹۸۷):

$$Q = C_0 L H_0^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

که در آن C_0 ضریب سرریز، L طول تاج سرریز و H_0 تراز سطح آب در دریاچه نسبت به تراز تاج سرریز است. با توجه به اینکه طول تاج در سرریزهای نیلوفری برابر با محیط آن است، در نتیجه رابطه (۱۱) برای سرریز نیلوفری به صورت زیر نوشته می‌شود (USBR، ۱۹۸۷):

$$Q = C_0 (2\pi R_s) H_0^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

که R_s شعاع سرریز نیلوفری است.

تحلیل قابلیت اطمینان

به طور کلی هدف از قابلیت اطمینان به کمیت درآوردن عدم قطعیت‌ها در پدیده‌هاست. کامل‌ترین توصیف را می‌توان در تابع چگالی احتمال^۴ (PDF) ترکیبی حاصل از تابع چگالی احتمال کمیت‌هایی که در پدیده دارای عدم قطعیت می‌باشند، یافت؛ اما در بیشتر مسائل عملی چنین تابع چگالی احتمالی را نمی‌توان به دست آورد. اولین قدم در ارزیابی قابلیت اطمینان، تعیین رفتار پاسخ سیستم و پیدا کردن رابطه‌ای بین پارامترهای دخیل در آن است. متغیرهای پایه که X_i نامیده می‌شوند، درواقع تشکیل‌دهنده تابعی هستند که معیار عملکرد صحیح سیستم خواهد بود:

$$(13) \quad Z = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

استفاده می‌گردد که مطابق با رابطه زیر است (لوکس^۱ و همکاران، ۱۹۸۱):

$$(4) \quad S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - E_t$$

که در آن S_{t+1} حجم مخزن در ابتدای دوره $t+1$ ، S_t حجم مخزن در ابتدای دوره t ، I_t حجم جریان ورودی به مخزن (آورد ماهیانه) در دوره t ، O_t حجم جریان خروجی از مخزن (تأمین نیازها) در دوره t و E_t حجم تبخیر از مخزن در دوره t می‌باشد. پس از محاسبه S_{t+1} ، با استفاده از منحنی حجم-ارتفاع مخزن سد، ارتفاع نرمال آب به دست می‌آید.

جهت محاسبه خیزش و خیزاب موج نیز از روابط آیین‌نامه USBR استفاده می‌گردد که به شرح زیر است (USBR، ۱۹۹۲):

$$(5) \quad R = \frac{H_s}{0.4 + \left(\frac{H_s}{L}\right)^{0.5}} \times \cot g \theta$$

$$(6) \quad S = \frac{V^2 F}{4850 D}$$

که در آن R خیزش موج، S خیزاب موج، V سرعت باد، F طول بادگیر، D عمق متوسط مخزن و θ زاویه شیب با افق می‌باشد. همچنین پارامتر H_s که ارتفاع موج تعریف می‌شود، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (USBR، ۱۹۹۲):

$$(7) \quad H_s = 0.011452 V^{1.23} F^{0.5}$$

پارامتر L که طول موج تعریف می‌شود، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (USBR، ۱۹۹۲):

$$(8) \quad L = 1.56 T^2$$

که در آن T زمان تناوب موج است که از رابطه زیر به دست می‌آید (USBR، ۱۹۹۲):

$$(9) \quad T = 0.556 V^{0.41} F^{0.333}$$

جهت محاسبه حداکثر ارتفاع آب بالاآمده مخزن ناشی از سیلاب، می‌بایست روندیابی سیلاب انجام شود که ساده-ترین فرم آن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(10) \quad \frac{dV}{dt} = I(t) - Q(t)$$

که در آن $I(t)$ دبی ورودی به مخزن، $Q(t)$ دبی خروجی از مخزن، V حجم آب در مخزن و t زمان است.

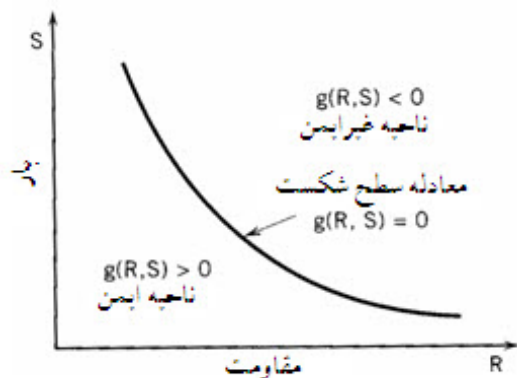
۲. Runge-Kutta

۳. Zhang and Tan

۴. Probability Density Function

۱. Loucks

روش قابلیت اطمینان مرتبه اول^۳ (FORM) و روش قابلیت اطمینان مرتبه دوم^۴ (SORM) و همچنین روش-های شبیه‌سازی^۵ نظیر روش شبیه‌سازی مونت کارلو تقسیم می‌شوند (هالدر و مهادهوان، ۲۰۰۰).



شکل (۱): نمایش منحنی سطح شکست برای یک پدیده

همان‌گونه که بیان شد، در حالت کلی معادله سطح شکست ممکن است تابعی خطی یا غیرخطی از متغیرهای پایه باشد. اگر سطح شکست تابع خطی از متغیرهای غیرهمبسته نرمال و یا یک تابع غیرخطی ولی با تقریب خطی (درجه اول) قابل قبول از متغیرهایی شبیه نرمال باشد، روش FORM در محاسبه انتگرال اساسی قابلیت اطمینان مناسب خواهد بود (هالدر و مهادهوان، ۲۰۰۰). در این روش ضمن استفاده از تقریب مرتبه اول سری تیلور برای تابع سطح شکست، از اطلاعات ممان‌های اول و دوم آمار (میانگین و واریانس) استفاده می‌شود. نسل اول این روش صرفاً با در نظر گرفتن ممان‌های آماری و بدون توجه به توزیع متغیرها تنها از توزیع نرمال برای هر متغیر استفاده می‌نمود که روش مرتبه اول ممان دوم^۶ (FOSM) نامیده می‌شود. درحالی‌که در روش مرتبه اول ممان دوم پیشرفته (AFOSM) با به‌کارگیری توزیع متغیرها به‌صورت تبدیل توزیع هر متغیر تصادفی به توزیع نرمال معادل به حل مسئله می‌پردازد. درهرحال استفاده از این روش برای بررسی قابلیت اطمینان پدیده‌هایی که تابع سطح شکست در آن‌ها غیرخطی بوده و توزیع متغیرها در آن‌ها توزیع نرمال نباشد می‌تواند خطاهای بزرگی را ایجاد

سطح شکست، حالت حدی و یا تابع رفتار بسته به مورد می‌تواند به‌صورت رابطه (۱۴) تعریف شود:

$$Z = g(x) = R(x) - S(x) \quad (14)$$

در این رابطه $R(x)$ مقدار مقاومت یک سیستم و $S(x)$ مقدار بار سیستم است. این رابطه مرز ناحیه ایمن طراحی را مشخص می‌کند (شکل (۱)). معادله سطح شکست که مرز ناحیه ایمن طراحی را مشخص می‌کند، می‌تواند با توجه به شرایط مسئله تعریف شود. این معادله، می‌تواند یک معادله ساده و یا تابعی صریح و یا غیرصریح از متغیرهای تصادفی پایه باشد. به‌عنوان نمونه در مورد تعیین ارتفاع سدها، معادله سطح شکست و یا تابع Z در معادله (۱۳) می‌تواند اختلاف ارتفاع سد (R) و ارتفاع حداکثر آب (S) به‌صورت $Z = R - S$ باشد؛ بنابراین با توجه به معادله (۱۳) در تابع g مقادیر کم‌تر از صفر شکست تابع و خرابی سد ناشی از روگذری را منجر می‌شوند و مقادیر بیشتر از صفر نشان‌دهنده پایداری ایمنی سد است (شکل (۱)). بر این اساس با توجه به رابطه (۱۴)، شکست وقتی اتفاق می‌افتد که $Z < 0$ باشد و وضعیت حدی وقتی اتفاق می‌افتد که $Z = 0$ باشد. لذا احتمال شکست به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (هالدر و مهادهوان^۱، ۲۰۰۰):

$$P_f = \iiint_{g(x) < 0} f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) dx_1 dx_2 dx_3 \dots dx_n \quad (15)$$

که در آن $f_X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ تابع چگالی احتمال ترکیبی برای متغیرهای پایه $X_1, X_2, \dots, X_n$ است و انتگرال‌گیری روی تمام سطح شکست انجام شده است. اگر متغیرهای تصادفی غیر همبسته باشند، تابع چگالی احتمال ترکیبی به حاصل ضرب توابع چگالی احتمال به وجود آمده از تک‌تک متغیرها تبدیل می‌شود (هالدر و مهادهوان، ۲۰۰۰). معادله فوق یک معادله عمومی برای حل تمامی مسائل قابلیت اطمینان است و به نام معادله اساسی قابلیت اطمینان شناخته می‌شود. در عمل به دست آوردن تابع چگالی احتمال ترکیبی غیرممکن است. همچنین انتگرال-گیری موردنظر نیز چندان ساده نخواهد بود. برای رفع این مشکل، از روش‌های تقریبی استفاده می‌شود. این روش‌ها به دو نوع کلی روش‌های تحلیلی تقریبی^۲ به‌عنوان نمونه

۳. First Order Reliability Method

۴. Second Order Reliability Method

۵. Simulation Methods

۶. First Order Second Moment

۱. Haldar and Mahadevan

۲. Analytical Approximation Methods

مطالعه موردی (سد مخزنی نمرود)

سد مخزنی خاکی-سنگریزه‌ای نمرود با هسته رسی و ارتفاع ۸۲ متر از کف رودخانه، در حدود ۱۰۰ کیلومتری تهران و ۱۶ کیلومتری باختر-جنوب باختری شهرستان فیروزکوه و در طول جغرافیایی ۳۲' و ۵۲° و عرض جغرافیایی ۴۳' و ۳۵° بر روی رودخانه نمرود واقع شده است. سد نمرود به منظور تأمین سالیانه در حدود ۱۳۰ میلیون مترمکعب آب کشاورزی و شرب دشت‌های گرمسار و ایوانکی، احداث شده است. شکل (۲) موقعیت جغرافیایی و عکس هوایی سد نمرود را نشان می‌دهد.

سرریز سد نمرود، از نوع اوجی آزاد بدون پایه به طول خالص ۲۳ متر و ارتفاع ۴/۵ متر است. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مشخصات اصلی سد نمرود نشان داده شده است.

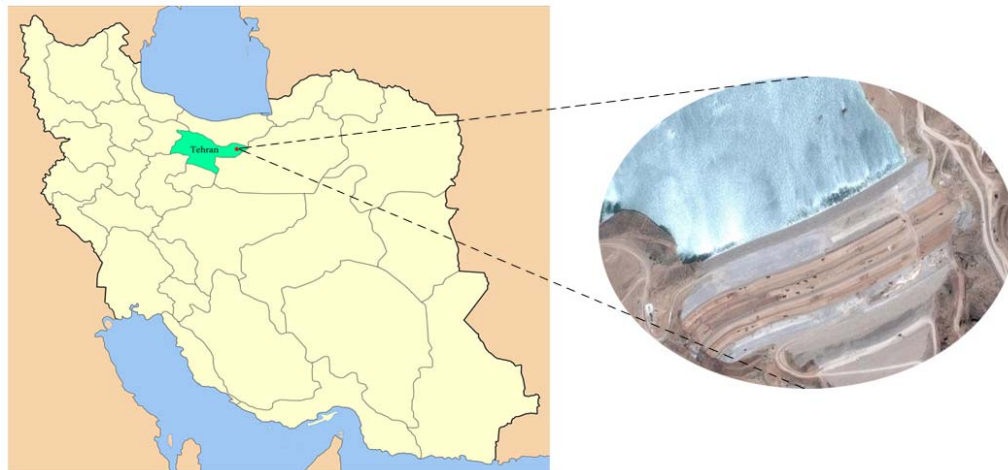
جدول (۱): مشخصات سد نمرود

مشخصات سد	مقدار یا کمیت
مساحت حوضه	۵۶۱ کیلومتر مربع
تراز تاج از سطح دریا	۲۰۲۲ متر
تراز نرمال از سطح دریا	۲۰۱۴ متر
تراز حداقل از سطح دریا	۱۹۷۵ متر
حجم مخزن در تراز نرمال	۱۳۳/۵۴ میلیون مترمکعب
طول تاج	۶۵۰ متر
عرض تاج	۱۲ متر
نوع سرریز	اوجی آزاد
ظرفیت سرریز	۱۰۱۷/۵ مترمکعب بر ثانیه
طول تاج سرریز	۲۳ متر

نماید (جانسون و داک^۱، ۱۹۹۸). روش SORM احتمال شکست را با تقریب مرتبه دوم بسط تیلور برای تابع سطح شکست محاسبه می‌کند. در این روش تابع سطح شکست می‌تواند غیرخطی باشد و همچنین توزیع متغیرها در محاسبات به صورت دلخواه در نظر گرفته شود (نواک و کالینز، ۲۰۰۰). البته این روش تحلیل علاوه بر محاسبات ریاضی پیچیده و گسترده، نیاز به اطلاعات زیادی در مورد پدیده دارد.

در تمام روش‌های تحلیلی تقریبی نیاز به وجود معادله صریح سطح شکست است. محاسبه احتمال شکست با استفاده از این روش‌ها نیاز به اطلاعات زیادی از آمار و روش‌های احتمالاتی دارد. درحالی‌که در روش‌های شبیه‌سازی، برای هر دو حالت صریح و یا غیرصریح سطح شکست و با در دسترس داشتن اطلاعات اندکی از آمار و احتمال، می‌توان احتمال شکست را برآورد کرد. در روش‌های شبیه‌سازی نظیر روش شبیه‌سازی مونت کارلو، از هر متغیر تصادفی چندین بار نمونه‌برداری می‌شود تا توزیع واقعی آن مطابق با ویژگی‌های آماری به دست آید. برای این منظور، در هر نوبت یک سری اعداد تولید خواهند شد که تا حدودی مشخص‌کننده ویژگی‌های آماری هستند. سپس مسئله در هر نوبت به صورت محاسباتی حل می‌شود. به این عمل چرخه شبیه‌سازی گویند. با استفاده از چندین چرخه شبیه‌سازی، ویژگی‌های آماری مسئله به دست می‌آید. مسئله مهم در به کارگیری روش‌های شبیه‌سازی به عنوان نمونه روش مونت کارلو، میزان دقت آن است. تعداد نمونه‌گیری‌ها و یا همان اعداد تولیدشده در تعیین سطح اعتمادپذیری شبیه‌سازی، مؤثر است. درواقع اگر تعداد نمونه‌ها از هر متغیر مؤثر به اندازه کافی انتخاب شود، روش شبیه‌سازی مونت کارلو یک روش دقیق است. در بعضی موارد نیز از این روش برای ارزیابی دقت روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان دیگر استفاده می‌شود (هالدر و مه‌ادوان، ۲۰۰۰).

بر این اساس در تحقیق حاضر از روش شبیه‌سازی مونت کارلو جهت تحلیل قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.



شکل (۲): موقعیت جغرافیایی و عکس هوایی سد نمرد

روش انجام تحقیق

در تحقیق حاضر از داده‌های ارائه‌شده برای سد نمرد که در جدول (۱) ارائه‌شده است برای برآورد احتمالاتی ارتفاع سد استفاده می‌گردد. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های مربوط به سطح زیر کشت، نیاز آبی و محیط زیستی و ... از این موارد در بررسی عدم قطعیت تعیین تراز نرمال صرف- نظر شد و این پارامتر به‌عنوان پارامتری قطعی در نظر گرفته شد. همچنین محاسبه ضریب سرریز اوجی نیز با استفاده از نمودار آیین‌نامه USBR انجام گرفت. ضریب سرریز در این نمودار با توجه به نسبت ارتفاع سرریز و ارتفاع آب روی سرریز (P/H_d) محاسبه می‌گردد که محدوده آن، در معادله ۱۱، از $1/66$ الی $2/21$ است (USBR، ۱۹۸۷). از طرفی با توجه به خطا در ثبت داده- ها، پارامتر سیلاب به‌عنوان یکی از پارامترهای دارای عدم- قطعیت در نظر گرفته شد و سیلاب‌های طراحی و آزمون ایمنی با توجه به نشریه ۳۷۸-الف وزارت نیرو انتخاب گردیدند. با توجه به نشریه ذکرشده، برای سد مخزنی نمرد، سیلاب با دوره بازگشت ده‌هزارساله به‌عنوان سیلاب طراحی و حداکثر سیلاب محتمل^۱ (PMF) به‌عنوان سیلاب آزمون ایمنی انتخاب گردید (وزارت نیرو، ۱۳۹۳). تابع بار سیستم مطابق رابطه (۱۶) است:

$$S = H_N + H_F \quad (16)$$

همچنین تابع حالت حدی مربوط به شکست سد نیز مطابق رابطه (۱۷) است:

$$Z = H_N + H_F - H_C \quad (17)$$

که در آن H_C ارتفاع تاج سد یا همان تابع مقاومت سیستم است که با توجه به توضیحات داده‌شده از معادلات (۱) و (۲) به دست می‌آید. بعد از تعیین تابع هدف، دومین گام در تحلیل قابلیت اطمینان، برآورد مشخصات احتمالاتی پارامترهای مؤثر در پدیده نظیر نوع توزیع، مقدار میانگین و واریانس یا ضریب تغییرات پارامتر است. این مشخصات باید با توجه به اطلاعات مربوط به پروژه محاسبه گردند. جدول (۲) مشخصات احتمالاتی پارامترهای مؤثر بر تعیین ارتفاع سد نمرد را نشان می‌دهد. طبق این جدول برای متغیر سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله توزیع مثلثی متقارن با حد پایین $11/32$ و حد بالای $797/91$ و میانگین $208/92$ و برای متغیر حداکثر سیلاب محتمل توزیع مثلثی متقارن با حد پایین $6/32$ و حد بالای 1400 و میانگین $349/19$ در نظر گرفته‌شده است. برای متغیرهای سرعت باد و شیب بدنه نیز توزیع یکنواخت در نظر گرفته شده است. به‌این‌ترتیب تمامی پارامترهای مؤثر بر ارتفاع سد نظیر F و H_W که در بخش "مواد و روش‌ها" ارائه شدند، به‌غیر از H_N ، به‌صورت غیرقطعی و احتمالاتی در نظر گرفته شدند. به‌گونه‌ای که تعیین محدوده آن‌ها با توجه به داده‌های جدول (۲) امکان‌پذیر است. به‌وسیله روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای هر یک از متغیرهای درگیر در روابط (۱) و (۲) می‌بایست N عدد تصادفی تولید شود و سپس N داده از ارتفاع سد با توجه به روابط (۱) و (۲) محاسبه گردد که همان مقدار بار سیستم است. با آگاهی از

^۱. Probable Maximum Flood

میانگین، انحراف معیار و توزیع داده‌ها به راحتی می‌توان به تعداد مشخص از داده‌ها با همان مشخصات آماری تولید نمود.

$$P_f = \frac{N_f}{N}$$

(۱۸)

که در آن N_f تعداد حالاتی است که مقدار بار از مقاومت بیشتر است. یا به عبارت دیگر تعداد حالاتی که ارتفاع آب بیشتر از ارتفاع سد شده باشد که از طریق رابطه (۱۷) قابل محاسبه و شمارش است و N تعداد کل چرخه شبیه سازی است. جهت محاسبه پایداری نیز از رابطه (۱۹) استفاده می‌گردد.

$$R = 1 - P_f$$

(۱۹)

در این مقاله تولید آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار EasyFit 5.0 انجام شده است. این نرم افزار یکی از قوی ترین نرم افزارهای تحلیل احتمالاتی است که قابلیت شناسایی بهترین توزیع های احتمالاتی را متناسب با داده های موردنظر دارد. همچنین این نرم افزار با در دست داشتن یک بانک قوی اطلاعاتی، از توزیع های مختلف آماری پشتیبانی می کند که جهت انجام تحلیل های قابلیت اطمینان بسیار مناسب است.

در نهایت پس از تعیین داده های مربوط به ارتفاع سد برای سیلاب ده هزار ساله، میزان احتمال شکست سد ناشی از

جدول (۲): محدوده تغییرات پارامترهای مختلف تعیین ارتفاع سد

پارامتر	واحد	توزیع	میانگین	حد بالایی	حد پایینی
ارتفاع نرمال	متر	معین	۷۴	-	-
سیلاب ده هزار ساله	مترمکعب بر ثانیه	مثلی متقارن	۲۰۸/۹۲	۷۹۷/۹۱	۱۱/۳۲
حداکثر سیلاب محتمل	مترمکعب بر ثانیه	مثلی متقارن	۳۴۹/۱۹	۱۴۰۰	۶/۳۲
سرعت باد ده ساله	متر بر ثانیه	یکنواخت	-	۲۰/۷۸	۱۷/۸۱
سرعت باد صد ساله	متر بر ثانیه	یکنواخت	-	۲۳/۷۵	۱۷/۸۱
شیب بدنه	-	یکنواخت	-	۲/۶	۲/۲

به عنوان مبنای توصیف نتایج در نظر گرفته شد. نتایج

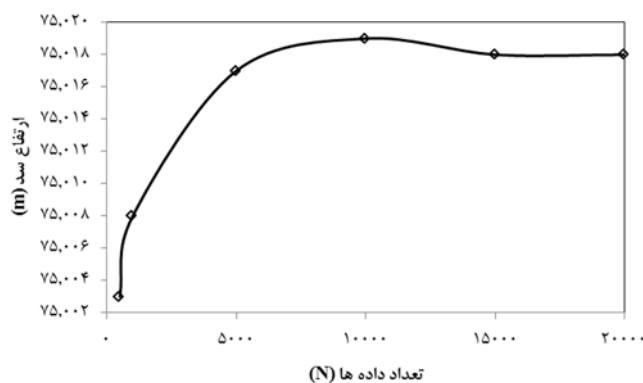
تحلیل حاضر برای سیلاب ده هزار ساله به عنوان سیلاب طراحی نشان داد که ارتفاع سد در شرایط نرمال ۷۵/۰۱۸ متر و در شرایط سیلاب با عملکرد سرریز، ۷۸/۷ متر است که می‌بایست بیشترین مقدار به عنوان ارتفاع سد انتخاب گردد. لذا ارتفاع سد ۷۸/۷ متر در نظر گرفته می‌شود تا بتواند در مقابل سیلاب طراحی، ۱۰۰ درصد ایمن باشد.

در صورتی که ارتفاع سد از این مقدار کمتر انتخاب شود، احتمال شکست سد افزایش یافته و یا مقدار ایمنی کاهش می‌یابد. جدول (۳) تغییرات احتمال پایداری (ایمنی) را در مقابل ارتفاع سد انتخاب شده ارائه می‌دهد. همان گونه که مشخص است با انتخاب ارتفاع سد به میزان ۷۸ متر، مقدار احتمال پایداری سد تنها ۳۸/۵ درصد است و اگر ارتفاع سد کمی بالاتر از ارتفاع سرریز یعنی ۷۴/۵ متر انتخاب شود، احتمال پایداری نزدیک به صفر است.

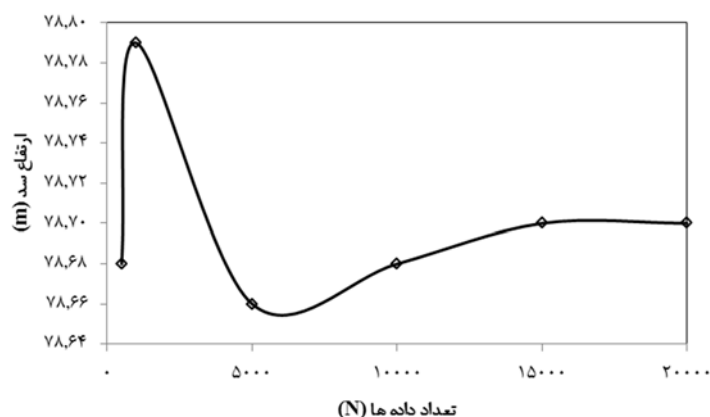
نتایج و بحث

محاسبه ارتفاع سد در شرایط موجود

با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان و استفاده از جدول (۲)، اعداد تصادفی برای متغیرهای درگیر در روابط (۱) و (۲) به صورت تصادفی بر اساس اطلاعات آماری موجود تولید شد. برای بررسی تأثیر تعداد داده های شبیه سازی بر محاسبه ارتفاع سد، تعداد ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ داده مورد تحلیل قرار گرفت. شکل های (۳) و (۴) نتایج به دست آمده جهت محاسبه ارتفاع سد با استفاده از روابط (۱) و (۲) را نشان می‌دهند. همان گونه که از این شکل ها مشخص است، پس از ۱۵۰۰۰ داده مقدار ارتفاع سد ثابت مانده است و در نتیجه تعداد ۱۵۰۰۰ داده



شکل (۳): تغییرات ارتفاع سد نسبت به تعداد داده‌های شبیه‌سازی در شرایط نرمال (رابطه ۱)



شکل (۴): تغییرات ارتفاع سد نسبت به تعداد داده‌های شبیه‌سازی در شرایط سیلاب (رابطه ۲)

سیستم، تعداد ۵۰۰ تا ۲۰۰۰۰ داده مورد تحلیل قرار گرفت. شکل (۵) نتایج به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، پس از ۱۵۰۰۰ داده مقدار شکست سیستم ثابت مانده است و در نتیجه تعداد ۱۵۰۰۰ داده مبنای توصیف نتایج گردید. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که احتمال شکست سد ناشی از حداکثر سیلاب محتمل در این ارتفاع (۷۸/۷ متر) برابر با ۶۴ درصد است.

اثر تغییر طول سرریز اوجی موجود بر ریسک روگذری

در گام بعدی، با توجه به اینکه سرریز سد نمرود از نوع اوجی است، ارتفاع سد و احتمال شکست در شرایط تغییر طول سرریز اوجی تعیین می‌گردد. از جدول (۲) به‌عنوان پارامترهای دارای عدم قطعیت و رابطه (۲) به‌عنوان تابع هدف استفاده شد. با توجه به همگرایی نتایج در تعداد ۱۵۰۰۰ داده، این تعداد داده برای شبیه‌سازی انتخاب

جدول (۳): احتمال پایداری سد نمرود ناشی از سیلاب ده هزار ساله با توجه به ارتفاع‌های انتخابی مختلف برای سد

ارتفاع سد (متر)	میزان پایداری (درصد)
۷۸/۷	۱۰۰
۷۸	۳۸/۵
۷۷	۱۹
۷۶	۸/۹
۷۵	۱/۵
۷۴/۵	۰

ریسک روگذری ناشی از حداکثر سیلاب محتمل در شرایط موجود

در ادامه با انتخاب ارتفاع سد به میزان ۷۸/۷ متر، اقدام به محاسبه پاسخ سیستم یعنی احتمال شکست ناشی از حداکثر سیلاب محتمل با استفاده از معادله (۱۶) گردید. برای بررسی تأثیر تعداد داده‌های شبیه‌سازی بر پاسخ

اقتصادی کنار گذاشته شد)، در این بخش مقایسه ریسک روگذری حاصل از انتخاب هر یک از سرریزهای نیلوفری و یا اوجی ارائه می‌گردد. نکته مهم اینکه مقایسه انجام شده تنها بر مبنای عوامل و پارامترهای هیدرولیکی است و اثر عوامل اقتصادی با توجه به کمبود اطلاعات لازم منظور نشده است. این موضوع می‌تواند به عنوان یک تحقیق پژوهشی جدید در ادامه تحقیق حاضر مطرح باشد. به این ترتیب، در ادامه ارتفاع و احتمال شکست سد نمرود برای حالت تغییر سرریز اوجی به سرریز نیلوفری محاسبه می‌گردد. با استفاده از آیین نامه USBR، از نسبت $P/R_S = 2$ که در آن P ارتفاع سرریز نیلوفری و R_S شعاع سرریز نیلوفری است، برای طراحی سرریز نیلوفری به عنوان پیش فرض استفاده شده و در ادامه اقدام به محاسبه ضریب سرریز، ارتفاع سد و ریسک روگذری سد نمرود می‌گردد. جهت محاسبه ضریب سرریز نیلوفری از نمودار آیین نامه USBR استفاده گردید. ضریب سرریز در این نمودار با توجه به نسبت ارتفاع آب روی سرریز و شعاع سرریز (H_0/R_S) محاسبه می‌گردد که محدوده آن، در رابطه (۱۲)، از ۰/۵۵ الی ۲/۳۲ است (USBR، ۱۹۸۷). همچنین از جدول (۲) به عنوان پارامترهای دارای عدم قطعیت و رابطه (۲) به عنوان تابع هدف استفاده گردید. با توجه به همگرایی نتایج در تعداد ۱۵۰۰۰ داده، این تعداد داده برای شبیه سازی انتخاب گردید. ارتفاع و احتمال شکست سد در شرایط استفاده از سرریز نیلوفری به جای سرریز اوجی، با توجه به مقادیر مختلف ارتفاع و شعاع سرریز، مطابق جدول (۵) است.

جدول (۵): مقادیر ارتفاع و احتمال شکست سد در شرایط استفاده از سرریز نیلوفری به جای سرریز اوجی موجود

ارتفاع سرریز (متر)	شعاع سرریز (متر)	ارتفاع سد (متر)	احتمال شکست (%)
۷	۳/۵	۸۱/۷۴	۵۱/۷۷
۸	۴	۸۰/۴۴	۵۷/۱۷
۹	۴/۵	۷۹/۴	۶۲/۲۵
۱۰	۵	۷۸/۶	۶۶/۵۶
۱۱	۵/۵	۷۸/۰۵	۶۹/۶۸
۱۲	۶	۷۷/۷	۷۱/۰۶

گردید. طبق نظر طراحان سد، طول خالص سرریز اوجی سد نمرود ۲۳ متر است. جهت بررسی اثر تغییر طول سرریز اوجی بر احتمال شکست سد نمرود، مقادیر ۲۰ تا ۳۸ متر برای طول سرریز انتخاب و ارتفاع سد ناشی از سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله برای هر یک از طول های انتخابی با استفاده از روش آیین نامه USBR و روندیابی مخزن تعیین شد. در ادامه احتمال شکست سد ناشی از حداکثر سیلاب محتمل برای هر یک از ارتفاع های سد به دست آمده محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴): مقادیر ارتفاع و احتمال شکست سد در طول های مختلف سرریز اوجی

طول سرریز (متر)	ارتفاع سد (متر) (سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله)	احتمال شکست (%) (حداکثر سیلاب محتمل)
۲۰	۷۹	۶۳/۶
۲۴	۷۸/۶	۶۴/۴
۲۸	۷۸/۲	۶۶/۳
۳۰	۷۸/۱	۶۶/۳
۳۴	۷۷/۸	۶۶/۷
۳۸	۷۷/۶	۶۶/۷

همان طور که جدول (۴) نشان می‌دهد، ارتفاع سد با طول سرریز رابطه عکس دارد. بدین معنی که با کاهش طول سرریز، ارتفاع سد افزایش و با افزایش طول سرریز، ارتفاع سد کاهش می‌یابد. همچنین افزایش طول سرریز سبب افزایش ناچیز احتمال شکست سد می‌شود. به طور مثال با افزایش طول سرریز از ۲۳ متر به ۳۸ متر، ارتفاع سد به میزان ۱/۴ درصد کاهش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش احتمال شکست سد ناشی از روگذری به میزان ۲/۷ درصد می‌شود.

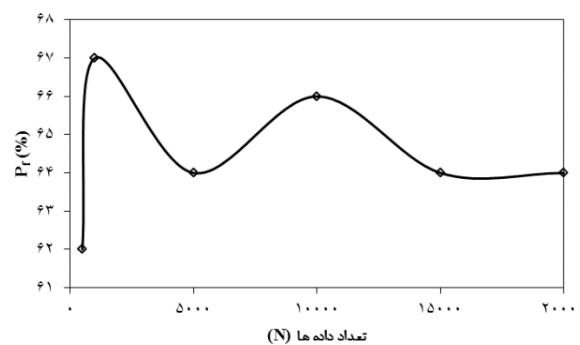
اثر تبدیل سرریز اوجی موجود به سرریز نیلوفری بر ریسک روگذری

با توجه به اینکه در مرحله مطالعات پایه سد نمرود، سرریز نیلوفری هم در کنار سرریز اوجی موجود به عنوان یک گزینه جایگزین مطرح بود (که بعدها با توجه به عوامل

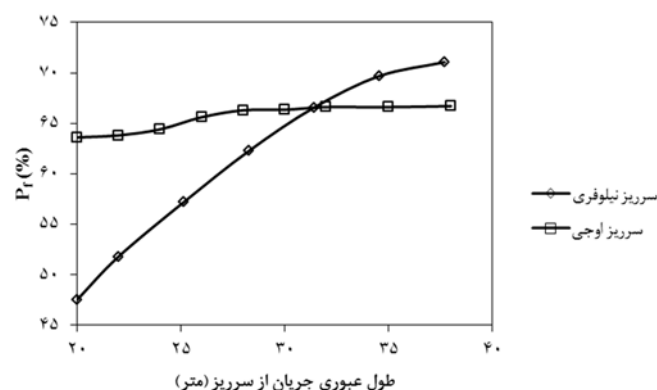
اوجی و نیلوفری با افزایش طول عبور جریان، افزایش می-یابد؛ اما نرخ تغییر احتمال شکست در سرریز نیلوفری بیشتر از سرریز اوجی است. به طوری که با افزایش طول سرریز از ۲۳ متر به ۳۸ متر، احتمال شکست در سرریز اوجی ۲/۷ درصد و در سرریز نیلوفری ۱۷/۵ درصد افزایش می یابد که نشان دهنده میزان تغییرات زیاد در سرریز نیلوفری نسبت به سرریز اوجی است. بدیهی است جهت انتخاب بهینه سرریز لازم است پس از انجام تحلیل قابلیت اطمینان حاضر، تحلیل های تکمیلی اقتصادی و اجرایی صورت گیرد تا بهترین گزینه سرریز از بین سرریز اوجی و یا نیلوفری انتخاب گردد.

همان طور که جدول (۵) نشان می دهد، ارتفاع سد با افزایش ارتفاع و شعاع سرریز، کاهش می یابد. همچنین احتمال شکست نیز با افزایش ارتفاع و شعاع سرریز، افزایش می یابد. به طور مثال با افزایش شعاع سرریز از ۵ متر به ۶ متر، ارتفاع سد به میزان ۱/۲ درصد کاهش می-یابد که این موضوع باعث افزایش احتمال شکست سد ناشی از روگذری به میزان حدود ۴/۵ درصد می شود.

شکل (۶) مقایسه بین تأثیر مقادیر طول سرریز اوجی و محیط سرریز نیلوفری بر احتمال شکست ناشی از روگذری حداکثر سیلاب محتمل را نشان می دهد. همان طور که از شکل مشخص است، احتمال شکست در هر دو سرریز



شکل (۵): تغییرات احتمال شکست برای پدیده روگذری ناشی از حداکثر سیلاب محتمل نسبت به تعداد داده های شبیه سازی



شکل (۶): احتمال شکست سد در طول های مختلف عبور جریان از سرریزهای اوجی و نیلوفری

شیب بدنه لحاظ شده است. در تحقیق حاضر از روش شبیه سازی مونت کارلو جهت تحلیل قابلیت اطمینان مربوط به ارتفاع سد و ریسک روگذری ناشی از سیلاب استفاده شده است. در این روش که بر اساس توزیع آماری هر یک از پارامترهای ذکر شده است، به اندازه کافی داده تولید شد و سپس با استفاده از روابط تجربی یک سری داده (دیتا) برای ارتفاع سد به دست آمد و در نهایت مقدار احتمال

نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی قابلیت اطمینان تعیین ارتفاع سدهای مخزنی و احتمال شکست آن ها در اثر پدیده روگذری و با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو پرداخته شده است. در این روش عدم قطعیت های موجود در برآورد ارتفاع سد ناشی از پارامترهای مؤثر بر این پدیده، مانند سیلاب ورودی به مخزن، ضریب سرریز، سرعت باد و

نسبت به سرریز اوجی کمتر است؛ اما با افزایش محیط سرریز از ۲۳ متر به ۳۸ متر (۶۵ درصد افزایش محیط سرریز)، احتمال شکست ۴/۵ درصد نسبت به سرریز اوجی با طول ۳۸ متر، افزایش می‌یابد.

منابع

- ۱- وزارت نیرو. (۱۳۹۳). "ضوابط انتخاب سیلاب طراحی سدهای بزرگ ایران"، نشریه ۳۷۸-الف.
- 2- Cheng, S.T., Yen B.C., Tang W.H. (1982). "Overtopping Risk for an Existing Dam", Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- 3- Goodarzi, E., Shui, L.T., Ziaei M. (2014). "Risk and uncertainty analysis for dam overtopping-Case study: The Doroudzan Dam", Journal of Hydro-environment Research, 20(4): 223.
- 4- Haldar A., Mahadevan S. (2000). "Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design", John Wiley and Sons, New York.
- 5- Hekmatzadeh A.A., Zarei F., Johari A., Haghighi A.T. (2018). "Reliability analysis of stability against piping and sliding in diversion dams, considering four cutoff wall configurations", Computers and Geotechnics, 217-231.
- 6- Hsu Y.C., Tung Y.K., Kuo J.T. (2011). "Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind", Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 25(1): 35-49.
- 7- Johnson P.A., Dock D.A. (1998). "Probabilistic Bridge Scour Estimates", Journal of Hydraulics Engineering, 124(7): 750-754.
- 8- 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 Hydraulics Engineering, 133(8): 955-963.
- 9- Liu Z., Xu X., Cheng J., Niu J. (2018). "Hydrological risk analysis of dam overtopping using bivariate statistical approach: a case study from Geheyan Reservoir, China", Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.
- 10- Loucks D.P., Stedinger J.R., Haith D.A. (1981). "Water resources systems planning and analysis", Prentice Hall, New Jersey.
- 11- Mansouri N., Kabiri Samani A. (2012). "Risk Based Analysis Of Earth Overtopping (Vanak Dam As A Case Study)", 9th International Congress on Civil Engineering, 8-10 May, Isfahan University of Technology, Iran.
- 12- Nowak A.S., Collins K.R. (2000). "Reliability of Structures", McGraw Hill, Singapore.
- 13- Sivakumar Babu G.L., Srivastava A. (2010). "Reliability analysis of earth dams", Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 136(7): 995-997.
- 14- USBR. (1987). "Design Of Small Dams", Washington DC: Water Resources Technical Publication, 3rd Edition, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

شکست سازه و پارامتر پایداری محاسبه گردید. همچنین برای معرفی جزئیات این روش از داده‌های مربوط به سد مخزنی نمرود و سرریز آن که به صورت اوجی است، استفاده شد. تحلیل‌ها و محاسبات ذکر شده برای تعیین ارتفاع سد و ریسک روگذری در سه حالت شرایط موجود، تغییر طول سرریز اوجی و تغییر سرریز اوجی موجود به سرریز نیلوفری انجام گرفت. نتایج تحلیل نشان داد که در شرایط موجود ارتفاع سد با استفاده از سیلاب طراحی ده هزار ساله، ۷۸/۷ متر به دست می‌آید که احتمال پایداری سد با این ارتفاع برابر با ۱۰۰ درصد است. در حالی که با کاهش ارتفاع سد، احتمال پایداری در برابر سیلاب طراحی کاهش چشمگیری خواهد داشت. محاسبه ارتفاع سد در گذشته بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، ۸۲ متر محاسبه شده بود که مشخص است این مقدار بسیار بیشتر از مقدار قابل قبول انتخاب شده است. در ادامه احتمال شکست نیز برای ارتفاع ۷۸/۷ متر و با استفاده از حداکثر سیلاب محتمل به عنوان سیلاب آزمون ایمنی، ۶۴ درصد محاسبه گردید که این موضوع می‌تواند مبنای ارائه راهکار مهندسی برای حفاظت از سد در برابر سیلاب آزمون ایمنی باشد. در شرایط تغییر طول سرریز اوجی، نتایج نشان داد که ارتفاع سد با طول سرریز رابطه عکس دارد. بدین معنی که با کاهش طول سرریز، ارتفاع سد افزایش و با افزایش طول سرریز، ارتفاع سد کاهش می‌یابد. همچنین در محاسبه احتمال شکست، نتایج نشان داد که افزایش طول سرریز موجب افزایش ناچیز احتمال شکست سد می‌شود. به گونه‌ای که با افزایش طول سرریز از ۲۳ متر (مقدار پیشنهادی توسط طراحان سد در شرایط طراحی قطعی) به ۳۸ متر (۶۵ درصد افزایش طول سرریز)، ارتفاع سد ۱/۴ درصد کاهش و احتمال شکست ۲/۷ درصد افزایش می‌یابد. در انتها نیز ارتفاع سد و ریسک روگذری با استفاده از یک سرریز جایگزین از نوع نیلوفری به جای سرریز اوجی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که به طور کلی در بیشتر محدوده مورد مطالعه در تحقیق حاضر، احتمال شکست روگذری ناشی از وجود سرریز نیلوفری با نرخ بیشتری نسبت به سرریز اوجی افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه در شرایط استفاده از سرریز نیلوفری با محیط ۲۳ متر (مشابه با طول سرریز اوجی)، احتمال شکست به میزان ۱۰/۵ درصد

- 15- USBR. (2012). "Embankment Dams", U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, No.13, Ch.6.
- 16- USBR. (1992). "Freeboard Criteria And Guidelines For Computing Freeboard Allowance For Storage Dams", Denver, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- 17- Wood E.F. (1977). "The analysis of flood levee reliability", Water Resources Research, 13(3): 665.
- 18- Yi P., Liu J., Xu Ch. (2015). "Reliability Analysis of High Rockfill Dam Stability", Mathematical Problems in Engineering, Volume 2015, 8 pages.
- 19- Zhang S., Tan Y. (2014). "Risk assessment of earth dam overtopping and its application research", Natural Hazards, 74(2): 717-736.

Determination of the Height and Overtopping failure of Reservoir Dams by Using Reliability Analysis (Case Study: Namrood Dam)

Khashayar Bahadori*^{۴۲}

Mojtaba Karimaei Tabarestani^{۴۳}

Abstract

Generally, the design of dams and other hydraulic structures is carried out based on deterministic approaches. However, there are many uncertainties in the estimation of different effective parameters in hydraulic structures design. The inherent uncertainties in these parameters necessitate reliability analysis to ensure the structure stability. In this study, after investigating various uncertainties in design, the height and overtopping failure of Namrood dam as a case study was calculated based on reliability analysis. For this purpose, the Monte Carlo Simulation Technique that is a well-known method for reliability analysis, was used. Results showed that to get 100% safety from design flood, the height of Namrood dam should be considered as 78.7 m. However, in this case the probability of overtopping failure due to control flood was 64%. Moreover, similar analysis was carried out to investigate the effect of spillway type on overtopping probability of failure. Results showed that by increasing the spillway crest length, the probability of failure in the case of Morning glory spillway increased more rapidly than ogee spillway.

Keywords:

Dam Height, Risk of Overtopping, Reservoir Routing, Reliability Analysis, Monte Carlo Simulation

42. * Master of Water and Hydraulic Structures. University of Science and Culture. khashayarbahadori@yahoo.com
43. Assistant Professor of Civil Engineering Faculty. Shahid Rajaee Teacher Training University. karimaei@sru.ac.ir