Archive

دوازدهمین کنفرانس ملی شهرسازی ،معماری،عمران ومحیط زیست

بررسی ارزیابی ریسک روگذری به روش عدم قطعیت در سد خاکی جره رامهرمز

تورج ترکی مطلق[1]، انوش سادات امینی نسب [2]

۱- گروه مهندسی HSE ، موسسه آموزش عالی مهراروند ، آبادان ، ایران

۲- استادیار گروه HSE ، دانشکده فنی و مهندسی ، موسسه آموزش عالی مهراروند ، آبادان ، ایران

parsilia40@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش کاربرد تحلیل ریسک شکست سد خاکی بر اثر سرریز شدن آب از بدنه سد بر پایه تحلیل فراوانی یک متغیره و دو متغیره سیلاب با استفاده از توزیع لوگ نرمال برای سد خاکی جره در رامهرمز خوزستان بررسی شده است. فرضیه های پژوهشی در این مطالعه شامل تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی ریسک روگذری سد با تحلیل فراوانی سیلاب یک متغیره و دو متغیره در سد مورد مطالعه رابطه دارد ، تجزیه و تحلیل فراوانی سیلاب تک متغیره و دو متغیره در سد مورد مطالعه انجام می شود، محاسبه حداکثر ارتفاع آب حین وقوع سیلاب با مدنظر قرار دادن سه فاکتور غیرقطعی تراز اولیه سطح آب، هیدروگراف ورودی مخزن و ضریب دبی سرریز در سد مورد مطالعه رابطه دارد، تحلیل عدم قطعیت و احتمال وقوع شکست ناشی از سرریز شدن آب از بدنه سد با استفاده از روش های شبیه سازی مونتکارلو (MCS) و نمونه گیری لاتین هایپرکیوب (LHS) در سد مورد مطالعه رابطه دارد و مقایسه روش های شبیه سازی مونتکارلو (MCS) و نمونه گیری لاتین هایپرکیوب (LHS) با تحلیل فراوانی سیلاب تک متغیره و دو متغیره در سد مورد مطالعه رابطه دارد، می باشد. این مطالعه یک روش مبتنی بر احتمال برای برآورد ریسک روگذری سد با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از دبی اوج، سطح اولیه آب و ضریب تخلیه سرریز می باشد. شبیه سازی مونتکارلو(MCS) و نمونه گیری لاتین هایپرکیوب(LHS) ، به عنوان دو روش نمونه گیری موثر برای انجام تجزیه و تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. شبیه سازی روشی بر پایه تکرار است که تأثیر عوامل مختلف بر سیستم را نشان می دهد. در این تحقیق برای تحلیل ریسک روگذری سد، از روش شبیه سازی مونتکارلو استفاده می شود. نتایج تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب در شش هیدروگراف جریان ورودی و با در نظرگرفتن ترکیب V-Qp (دبی سیلاب حجم سیلاب) برای دوره بازگشت های توام ۵۰ ، ۱۰۰ ، ۲۰۰ و ۵۰۰ سال ارائه شده است. نهایتاً، نتایج بدست آمده با استفاده از هر دو روش تحلیل فراوانی سیلاب یک متغیره و دو متغیره در دوره بازگشت های مختلف با هم مقایسه و نتایج نشان داد که ریسک روگذری برآورد شده در همه ی دوره بازگشت ها بر اساس تحلیل فراوانی سیلاب دو متغیره بیشتر از روش تک متغیره بوده که باعث افزایش خطر سرریزشدن آب از بدنه سد می شود و خطرات بیشتری ایجاد می کند.

کلمات کلیدی: ریسک ، عدم قطعیت، تحلیل فراوانی ، شبیه سازی مونتکارلو، نمونه گیری لاتین هایپرکیوب

www.SID.ir

Archive

۱- مقدمه

توصیف پدیده های طبیعی در قالب مدل های ریاضی همواره با عدم قطعیت روبرو است. درک ناقص از ماهیت پدیده ها، پویایی هر پدیده، دانش ناکافی از نحوه ی اندازه گیری صحیح و خطاهای انسانی از عوامل ایجاد عدم قطعیت می باشند. به طور کلی در طراحی و تحلیل سیستم های مهندسی منابع آب در جنبه هایی چون هیدرولوژی، هیدرولیک، سازه و اقتصاد عدم قطعیت هایی وجود دارد. عدم قطعیت های هیدرولوژیکی بدلیل ماهیت تصادفی و مشاهده ای پدیده های هیدرولوژیکی، کمبود دانش و نقص در مدلسازی به وجود می آیند. این عدم قطعیت به همراه خطا در ساخت و ضعف مصالح از طریق به کار بردن مدل یا فرمول ساده سازی شده برای تعریف رفتار هیدرولیکی سازه، به سازه های هیدرولیکی منتقل می شود. عدم قطعیت اقتصادی ناشی از عدم قطعیت در هزینه های ساخت، خسارت، درآمد، اجرا و نگهداری، تورم و طول عمر پروژه است. هر یک از پارامترهای به کار رفته در طراحی و تحلیل سیستم های مهندسی منابع آب دارای درجه ای از عدم قطعیت است [1].

نخستین مطلب در بحث ریسک و اطمینان پذیری در مهندسی هیدروسیستم، بررسی عدم قطعیت و پارامترهای احتمالاتی و تصادفی است. عدم قطعیت اساساً به دلیل درک ناقص از پدیده ها و روند حاکم بر آنها ایجاد می شوند. هدف اصلی تحلیل عدم قطعیت، تعیین خصوصیات آماری خروجی یک مدل به عنوان تابعی از پارامترهای ورودی احتمالاتی است[2].

این مطالعه یک روش مبتنی بر احتمال برای برآورد ریسک روگذری سد با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از دبی اوج، سطح اولیه آب و ضریب تخلیه سرریز می باشد. شبیه سازی مونتکارلو(MCS) و نمونه گیری لاتین هایپرکیوب(LHS) ، به عنوان دو روش نمونه گیری موثر برای انجام تجزیه و تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. شبیه سازی روشی بر پایه تکرار است که تأثیر عوامل مختلف بر سیستم را نشان می دهد. در این تحقیق برای تحلیل ریسک روگذری سد، از روش شبیه سازی مونتکارلو استفاده می شود. نمونه گیری یک روش قابل اجرا برای ترکیب چندین مقدار ورودی تصادفی و به دست آوردن بهترین نتیجه است. روش نمونه برداری در این مطالعه به صورت میدانی و با استفاده از مشاهده و اطلاعات بدست آمده از محل مورد مطالعه می باشد.

۲- شکست سد

سد یک سازه کنترل برای ذخیره آب می باشد که برای کنترل سیل، آبیاری، نیروگاه برق آبی و غیره استفاده می شود. سد غیر از مفید بودنش پتانسیل ایجاد خطر برای زندگی اطرافش را دارد. طراحی نادرست، خطرات طبیعی غیر منتظره، اشتباه در اجرا و غیره ممکن است دلایل تخریب یک سد باشد.

در یک سیستم مهندسی، شکست به عنوان نقض در ایجاد رابطه ها و رسیدن به اهداف مطلوب است. شکست می تواند بـه دو صورت سازهای و عملکردی اتفاق بیافتد. یک مثال خوب در اینباره سیستم توزیع آب است. شکست سازهای مانند خرابی لوله یا پمپ باعث می شود، تقاضای آب ارضا نشود. از جنبه های شکست عملکردی سیستم توزیع آب، ناتوانی در تامین هد فشـار مورد نیاز در محل تقاضا بدون بروز هیچ گونه خرابی است. در چنین سیستمی، شکست وقتی رخ می دهد که بار موجـود (L) از ظرفیت مقاومت سیستم (R) بیشتر شود. منظور از بار تنش خارجی است، که بر سیستم اعمال می شود و مقاومت، ظرفیت سیستم برای غلبه بر بار است. بنابراین اعتمادپذیری سیستم (α) برابر با احتمال وقوع شرایطی است که در آن $R \geq L$ باشـد و به صورت زیر بیان می شود :

$$\alpha = P[R > L] \qquad (۱)$$

که در آن [P] احتمال است. به بیان دیگر، خطرپذیری به عنوان احتمال شکست (α') زیر بیان صورت به می شود :

$$\alpha' = 1 - \alpha \qquad (۲)$$

www.SID.ir

Archive

این پدیده ممکن است ناشی از عدم تطبیق زمانی خارج شدن سیل از طریق سرریزها و خروجی ها و یا در اثر موج های ناشی از بادهای قوی، زلزله و غیره باشد. لذا با توجه به آنچه در بالا ذکر شد، اهمیت بررسی دقیق ریسک سد به واسطه ی روگذری مشخص می شود [3].

۳- بررسی تحلیل فراوانی دو یا چند متغیره سیلاب

سیلاب یکی از مهمترین بلایای طبیعی است که سالانه خسارات مالی و جانی بسیاری را در نقاط مختلف دنیا ایجاد می کند، لذا پیش بینی و کنترل آن مورد توجه می باشد. سیلاب یک پدیده تک متغیره نبوده و دارای ماهیتی چند متغیره است که همین موضوع باعث پیچیده شدن این پدیده و دشواری تحلیل آن می شود. نظر به این که می توان سیلاب را یک پدیده با مشخصات تصادفی در نظر گرفت، استفاده از علم آمار و احتمالات کمک شایانی به تحلیل آن می نماید. سه متغیر مهم تشکیل دهنده مشخصات سیلاب دبی اوج، حجم رواناب و مدت سیلاب بوده که از روی هیدروگراف سیلاب قابل استخراج می باشند. غالباً در تحلیل های سیلاب، تنها یک متغیر در نظر گرفته می شود که در بسیاری از مواقع دبی اوج می باشد، این در حالی است که بسیاری از محققان هشدار داده اند که رویکردهای تک متغیره، یعنی رویکردهایی که در آنها اثرات یک متغیر به صورت جداگانه در نظرگرفته می شود، منجر به دست بالا گرفتن یا دست پایین گرفتن نتایج می شود [4] .

۴- عدم قطعیت

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، مفهومی است که بیان می‌کند چرا یک فیزیکدان نمی‌تواند به طور دقیق، کمیت‌های مرتبط با یک الکترون را اندازه‌گیری کند. تا قبل از ارائه کوانتوم مکانیک، تصور بر این بوده که تمامی ویژگی‌های یک جسم در لحظه را می‌توان با دقت قابل قبولی اندازه‌گیری کرد.

عدم قطعیت یک عامل همراه با نتیجه اندازه گیری است که محدوده مقادیری را معین می‌کند که نتیجه اندازه گیری می‌تواند داشته باشد و مقدار آن نشان‌دهنده سطح اطمینانی است که مقدار واقعی مورد اندازه گیری شده در محدوده تعیین شده، قرار می‌گیرد. مطابق با الزامات استاندارد بین‌المللی نظیر ISO/IEC17025، تمامی مراکز انجام کالیبراسیون و بسیاری از مراکز آزمایشگاهی در زمان صدور گواهینامه‌های کالیبراسیون و نتایج آزمون، باید عدم قطعیت مربوط به آن‌ها را گزارش نمایند. تحلیل عدم قطعیت مدل مفهومی معمولاً با فرموله کردن مفهومی مدل های جایگزین و ارزیابی احتمالات نسبی شان، با استفاده از رویکردهای مدل میانگین آماری همراه است [5].

۴-۱- آنالیز عدم قطعیت

مهمترین عامل در طراحی و تجزیه و تحلیل هیدروسیستم، شناسایی درست و صحیح، بارها (نیروهای خارجی) و مقاومت (ظرفیت) می باشد. مقاومت تحت عنوان توانایی هیدروسیستم برای دستیابی به اهداف تعیین شده بدون شکست، زمانی که تحت بار باشد، تعریف شده است. از این رو یک گام اساسی در ریسک و آنالیز اطمینان پذیری، شناخت بار، مقاومت و همه عوامل غیرقطعی مرتبط می باشد. مزایای اصلی به دست آوردن بار و مقاومت در مهندسی هیدروسیستم عبارتند از: پیش بینی شرایط آینده (ارزیابی کمیت و کیفیت بارهای احتمالی که ممکن است در آینده رخ دهد)، برآورد احتمال شکست، و کمک به گرفتن تصمیم مناسب.

روش های مختلفی برای اندازه گیری عدم قطعیت در مهندسی هیدروسیستم استفاده شده است. یکی از روش ها، اندازه گیری درجه عدم قطعیت با استفاده از گشتاور آماری در مرتبه های مختلف است[6].

گشتاورهای آماری پرکاربرد در این مورد، میانگین و واریانس متغیر تصادفی است. میانگین (μ_x) اولین گشتاور مرکزی است که امید ریاضی متغیر را نشان می دهد، در حالیکه واریانس (σ_x^2) گشتاور مرتبه دوم متغیر است و پراکندگی متغیر تصادفی را نشان می دهد. ضریب تغییرات که تحت عنوان نسبت انحراف معیار (σ_x) به میانگین متغیر ($\Omega_x = \sigma_x / \mu_x$) قطعیت به کاربرده می عدم سطح بیان شود، برای تعریف می شود. این ضریب به عنوان یک معیار استاندارد در عدم قطعیت برای مقایسه

www.SID.ir

Archive

در شرایط مختلف استفاده می شود و همچنین برای ترکیب عدم قطعیت متغیرهای مختلف مفید است. با این حال، کاملترین متغیرهای غیر قطعی مورد(PDF) رویکرد برای اندازه گیری عدم قطعیت استفاده از تابع چگالی احتمال(PDF) نظر می باشد. می توان اینگونه نتیجه گرفت که استخراج گشتاور آماری و تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی، مهمترین بخش تجزیه و تحلیل عدم قطعیت هستند[7].

۵- بررسی ریسک روگذری سد

از آنجایی که در طراحی و عملکرد سیستم های مهندسی همیشه عدم قطعیت وجود دارد، محاسبه ریسک شکست با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها، لازم و ضروری خواهد بود و تحلیل قابلیت اعتماد یک وظیفه اساسی در طراحی و تحلیل سیستم های آبی یا سازه های هیدرولیکی می باشد. به کمک نظریه قابلیت اطمینان و ریسک می‌توان عدم قطعیت پارامترهای تصادفی را به صورت روابط ریاضی در روند طراحی استفاده نمود. حالت ایده ال برآورد ریسک روگذری، در نظر گرفتن تمام متغیرهای تصادفی و موثر بر روگذری می باشد. البته در نظر گرفتن کلیه متغیرهای تصادفی موثر و برآورد ریسک روگذری با الگوریتم هایی مانند مونت کارلو بسیار زمان بر و بعضی مواقع غیرممکن است.

ارزیابی ریسک سازه‌ها مخصوصاً سدها، از موضوعاتی است که اخیراً مورد توجه محققین می‌باشد. برآورد ریسک روگذری سدهای خاکی از مسائل مهم و موثر در تعیین ارتفاع سد و ظرفیت آبگذری سیستم تخلیه سیلاب محسوب می شود. برآورد صحیح ریسک روگذری سد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های متغیرهای تصادفی مؤثر بر آن یکی از مباحث مهم در طراحی سدهای خاکی است. از این رو صرف‌نظر کردن از عدم قطعیت‌های متغیرهای تصادفی باعث برآورد کم و یا زیاد ارتفاع سد می‌شود. عدم قطعیت بارش و سیلاب از عوامل مؤثر در تحلیل ریسک روگذری سد هستند.

سد خاکی به دلایل نشست پی و خزش، روگذری، فرسایش سرریز، لغزش و غیره تخریب می شود که روگذری عمده ترین دلایل شکست سد می‌باشد. از طرفی طراحی سدها تحت تاثیر عدم قطعیت و پتانسیل شکست می باشد لذا آنالیز ریسک و عدم قطعیت در طراحی سدهای مخزنی از اهمیت خاصی برخوردار است.

سدها در مهار سیلاب و کاهش خسارت آن نقش موثری 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 موثر در پدیده روگذری را در کنار یکدیگر قرار داده و تأثیر سناریوهای مختلف را بر روی ریسک روگذری بررسی نمود[8].

۶- محدوده ی مورد مطالعه : سد جره

سد جره یکی از سدهای مخزنی در استان خوزستان می باشد. این سد دارای دو دوره می باشد که دوره اول در دوره ساسانیان بوده و در شهرستان کازرون، بخش حره و بالان - روستای جره واقع شده و به عنوان یکی از آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. [۹]

این اثر بر اثر آبگیری سد جره (دوران جدید) به طور کامل تخریب گردید. (شکل ۱).

www.SID.ir

Archive

شکل ۱ : سد جره رامهرمز

در جدول (۱) مشخصات کلی سد جره (دوران ساسانی) آمده است.

جدول ۱ : مشخصات کلی سد جره (دوران ساسانی)

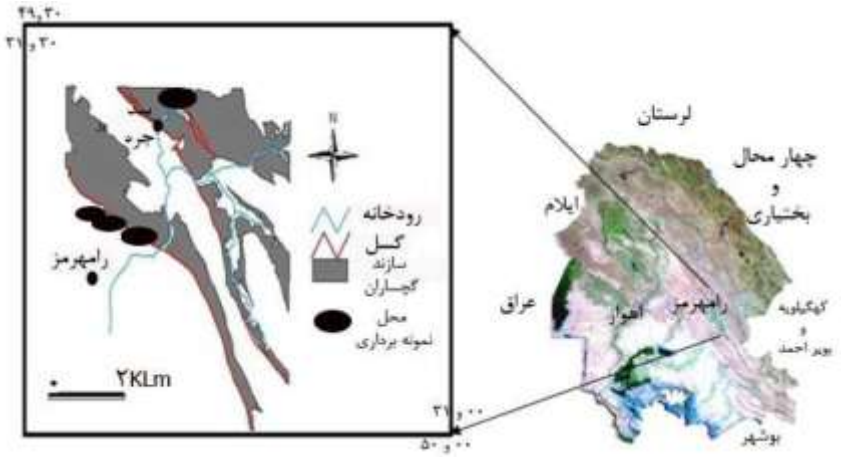
نام	سد جره
کشور	ایران
استان	استان فارس
شهرستان	شهرستان کازرون
اطلاعات اثر	
کاربری	سد
دیرینگی	دوره ساسانیان
دورهٔ ساخت اثر	دوره ساسانیان
اطلاعات ثبتی	
شمارهٔ ثبت	۲۵۴۲
تاریخ ثبت ملی	۸ دی ۱۳۷۸

این سد مخزنی جره در استان خوزستان و در ۳۵ کیلومتری شمال شرقی و غرب شهر رامهرمز و سد مخزنی جره به عنوان پنجمین سد بزرگ خاکی استان خوزستان و بر روی رودخانه زرد که یکی از شاخه های مهم رودخانه اله بوده و با شبکه رودخانه ای متراکم در بخش باغ ملک از شهرستان ایذه و در استان خوزستان و در موقعیت جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۲ دقیقه و ۲۲ ثانیه طول شمالی و ۳۱ درجه و ۲۶ دقیقه و ۳۸ ثانیه عرض شرقی (طول جغرافیایی ۵۰ °۴۹ - ۴۰ °۴۹ شرقی و عرض ۳۰ °۳۱ - ۲۵ °۳۱ شمالی) و در نزدیکی روستای جره با حجم مخزن معادل ۲۰۱۶ میلیون متر مکعب از جنس خاکی با هسته رسی با هدف کنترل سیلاب، تامین آب کشاورزی و تامین برق منطقه احداث گردیده است [۱۰].

حوضه آبریز سد مخزنی جره دارای مساحت ۸۲۹ کیلومترمربع می‌باشد و سازند گچساران تقریباً ۱۷۰ کیلومترمربع از حوضه آبریز سد مخزنی جره را تشکیل می دهد (شکل ۲).

www.SID.ir

Archive



شکل ۲ : موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکندگی سازند گچساران در منطقه

سد جرّه با ظرفیت ذخیره سازی ۲۳۱/۵۶ میلیون متر مکعب (در تراز نرمال) دارد و با هدف آبیاری ۲۲ هزار هکتار از اراضی دشت رامهرمز احداث شده است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۵۸۴ میلی متر، متوسط دمای سالیانه حدود ۲۱/۶ درجه سانتی گراد است. بر اساس آمار ثبت شده، متوسط جریان ورودی سالانه به سد ۲۴۶ میلیون متر مکعب بود. تقاضای تخصیص آب از سد جرّه به طور کلی در بخش کشاورزی و زیست محیطی دسته بندی می شود. نیاز سالیانه ای که سد بایستی تأمین کند در بخش کشاورزی ۲۹۴/۱۵ میلیون متر مکعب و زیست محیطی ۴۳/۹۵ میلیون متر مکعب است. اراضی کشاورزی در این منطقه شامل دو قسمت، ساحل سمت راست و سمت چپ رودخانه با سطح زیر کشت کنونی تقریبی ۳۵۰۰۰ هکتار است که در حال حاضر در حدود ۴۰ درصد توسط آب سد و ما بقی توسط آب رودخانه اعلاء و چاه های موجود در منطقه آبیاری می شوند. با توجه به روش آبیاری منطقه مورد مطالعه که به صورت سنتی و در کانال های خاکی صورت می گیرد، پرسشنامه هایی جهت تعیین میزان راندمان مصرف تهیه شد. براین اساس راندمان مصرف در این منطقه ۳۰/۴ درصد تعیین گردید[۱۰] .

۶-۱- اثرات زیست محیطی سد جره

احداث سد در یک منطقه به توسعه محلی کمک شایانی می کند. اما احداث این سازه ها که مانعی بر سر جریان طبیعی آب هستند، مسائل محیط زیستی زیادی را باعث می شوند. ساختگاه این سد سازند کنگلومرای بختیاری بوده و دو سوم از حجم مخزن را سازند گچساران در بر می گیرد. احداث این سد سبب ایجاد مسائل محیط زیستی در منطقه شده که از جمله این مسائل می توان به تغییر کیفیت آب مخزن سد در اثر انحلال ژیپس و نمک، وقوع زمین لغزش در سازندهای گچساران و کنگلومرای بختیاری، افزایش احتمال وقوع زمین لرزه القایی، فرار آب از محل فرونشست های کارستی، به زیر آب رفتن روستاهای رودزرد سادات و جره و مهاجرت ساکنین آنها و همچنین تخریب و به زیر آب رفتن آثار باستانی همچون سد تاریخی جره اشاره کرد[۱۱].

۷- ریسک و اطمینان پذیری

در سال های اخیر به علت افزایش مکرر خطرهای طبیعی و تاثیر آن بر سلامت و ایمنی و همچنین مشکلات زیست محیطی، اهمیت آنالیز ریسک و اطمینان پذیری در هیدروسیستم بیشتر شده است. به عبارت ساده، ریسک را می توان به عنوان احتمالی از یک رویداد نامطلوب که منجر به آسیب و یا خسارت می شود، بیان کرد[۱۲].

شکست سیستم زمانی رخ می دهد که سیستم در اجرای تابع هدفاش موفق نباشد و نیازهای سیستم برآورده نشود. همانطور که در فصل اول به آن اشاره شد، شکست عملکردی و شکست سازهای، دو شکست رایج در پروژه های مختلف مهندسی می باشند. شکست در عملکرد، زمانی که سیستم در دستیابی به هدف خود ناتوان باشد، ماندگار می شود و ممکن است به عواقب ناخوشایندی منجر شود. با توجه به این نوع شکست، ساختار سیستم نابود نخواهد شد. نمونه هایی از شکست در عملکرد شامل

www.SID.ir

Archive

ناتوانی در کنترل سیلاب سازه برای کنترل سیل و حفاظت از منطقه پایین دست، و ناتوانی سیستم فاضلاب سطحی برای عبور رواناب شهری می باشد. از سوی دیگر، شکست سازهای موجب بروز خسارات اساسی و یا تغییر در شکل سازه می شود. به عنوان یک مثال معروف برای این نوع شکست، می توان از بین رفتن تاج سد به علت روگذری که می تواند به فروپاشی و شکست سد منجر شود، نام برد [۱۳].

اطمینان پذیری هیدروسیستم به عنوان توانایی سیستم برای انجام دادن وظیفه ی از پیش تعیین شده برای مدت زمان مشخص طبق شرایط موجود تعریف شده است. با توجه به رابطه معکوس بین ریسک و اطمینان پذیری، افزایش احتمال شکست منجر به کاهش اطمینان پذیری سیستم و در نتیجه، بالابردن توجه و نگرانی عمومی در مورد ایمنی سیستم می شود. لازم به ذکر است که اطمینان پذیری اغلب در فرم احتمال گزارش می شود، و داشتن دانش کافی دربارهی ویژگی های مختلف آماری متغیرهای تصادفی به شدت مورد نیاز است[14]. از اینرو، هدف اصلی از آنالیز ریسک و اطمینان پذیری، محاسبه احتمال شکست یا عدم شکست در مورد بارهای پتانسیل و مقاومت است. بار و مقاومت را می توان به طور متفاوت بسته به نظر تحلیلگر، نوع سیستم، هدف آنالیز و اهداف مورد نظرهیدروسیستم بیان کرد.

اطمینان پذیری یا احتمال بدون شکست تحت عنوان توانایی سیستم برای انجام دادن وظیفه ی منظور شده برای آن تعریف شده است و معمولاً بر اساس تجزیه و تحلیل احتمالاتی با بررسی اثر متقابل بارگذاری ها و مقاومت اندازه گیری می شود. هنگامی که مقاومت سیستم (R) از بار (L) تجاوز کند، سیستم قابل اطمینان است، و اگر بار بیش از مقاومت باشد، سیستم نمی تواند به اهداف تعریف شده اش دست یابد و آن را غیر قابل اطمینان گویند. از نظر ریاضی، اطمینان پذیری سیستم Ps به صورت زیر بیان می شود :

$$Ps = 1- Pf = P (L\leq R) \quad (۳)$$

که در آن P(۰) احتمال Pf(۰) احتمال شکست و Ps احتمال اطمینان پذیری است[14] .

۷-۱- شاخص اطمینان پذیری[1]

شاخص اطمینان پذیری به عنوان نسبت میانگین تابع عملکرد Z به انحراف معیار استاندارد به صورت زیر تعریف می شود :

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (۴)$$

که در آن μ_z و σ_z به ترتیب میانگین و انحراف معیار تابع عملکرد Z هستند . از آنجا که در معمولاً مهندسی هیدروسیستم، توزیع نرمال برای تابع عملکرد Z(X) به کار گرفته می شود، اطمینان پذیری (PS) و ریسک (Pf) به صورت زیر برآورد می شود[15] :

$$P_s = 1-\Phi(-\beta) = \Phi(\beta) \quad (۵)$$

و

$$P_f = 1-\Phi(\beta) \quad (۶)$$

که در آن $\Phi(0)$، CDF متغیر نرمال استاندارد است. بر این اساس، احتمال شکست به صورت زیر نوشته می شود[15] :

$$P_f = P[Z<0] = \int_{-\infty}^{0} f_z(Z)dZ = \int_{-\infty}^{0} \frac{1}{\sigma(Z)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu(Z)}{\sigma(Z)}\right)^2\right] \quad (۷)$$

اگر تابع عملکرد Z، به صورت، Z = R - L در نظر گرفته شود، میانگین و واریانس به ترتیب عبارتند از :

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_L \quad (۸)$$

[1] Reliability Index

www.SID.ir

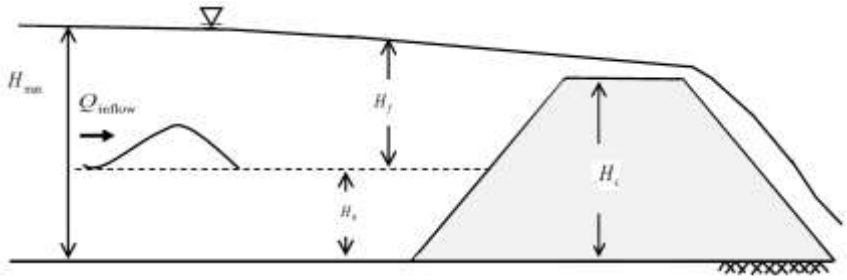
Archive

و

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_L^2 - 2Cov(R,L) \quad (۹)$$

۸- مدلسازی ریسک روگذری سد

روگذری به حالتی گفته می شودکه بخش خروجی سد قادر به تخلیه آب با سرعت کافی نباشد و سطح آب از ارتفاع تاج سد بالاتر بیاید. در تجزیه و تحلیل روگذری، حداکثر ارتفاع آب در مخزن (Hmax) و ارتفاع سازه ای سد (Hc) به ترتیب می توانند بار و مقاومت سیستم در نظر گرفته شوند. اگر (H f) ارتفاع بالا آمده آب مخزن به وسیله نیروی سیل (F) و Hc ارتفاع تاج سد وH0 ارتفاع سطح اولیه آب مخزن قبل از وقوع F باشد آنگاه روگذری زمانی رخ می دهد کهHf + H0> Hc شود (شکل ۳)[16] .



شکل ۳ : نمای شماتیک روگذری سد[16]

لذا ریسک روگذریPf به صورت زیر خواهد بود.

$$P_f = P[H_f + H_0 > H_c] = P[H_f > H_c - H_0] \quad (۱۰)$$

از اینرو تابع عملکرد به صورت زیر نوشته می شود:

$$Z_f = \ln\left(\frac{H_c}{H_{max}}\right) \quad (۱۱)$$

که در آن Zf تابع عملکرد سیل و Hmax بالاترین سطح آب طول در یک رویداد سیل، بر اساس روندیابی مخزن محاسبه شده است. در نهایت، ریسک روگذری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Risk = 1 - \varphi\left(\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = 1 - \varphi(\beta) \quad (۱۲)$$

که در آن β نشان دهنده شاخص اطمینان پذیری است و به عنوان نسبت میانگین تابع عملکرد μ_z به انحراف معیار استاندارد σ_z تعریف می شود. همچنین $\varphi(\beta)$ احتمال نرمال تجمعی مربوط به β است [17].

۹- نتایج

از بین عوامل شناسایی شده اثرگذار در رفتار سیستم های آبگیری و طغیان سد، پارامترهایی چون دبی ورودی، تراز اولیه آب مخزن، منحنی تراز حجم مخزن سد، ظرفیت سرریز و ... می توانند مشمول عدم قطعیت های گوناگون باشند .

۹-۱- تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب

تجزیه و تحلیل فراوانی سیلاب دو متغیره نیز با استفاده از توزیع لوگ نرمال صورت گرفت . علت انتخاب توزیع لوگ نرمال دو متغیره این است که مطابق با نتایج بخش قبل مناسبترین توزیع برای متغیر دبی اوج بوده و بر متغیر حجم رواناب برازش خوبی یافته است (جدول ۲).

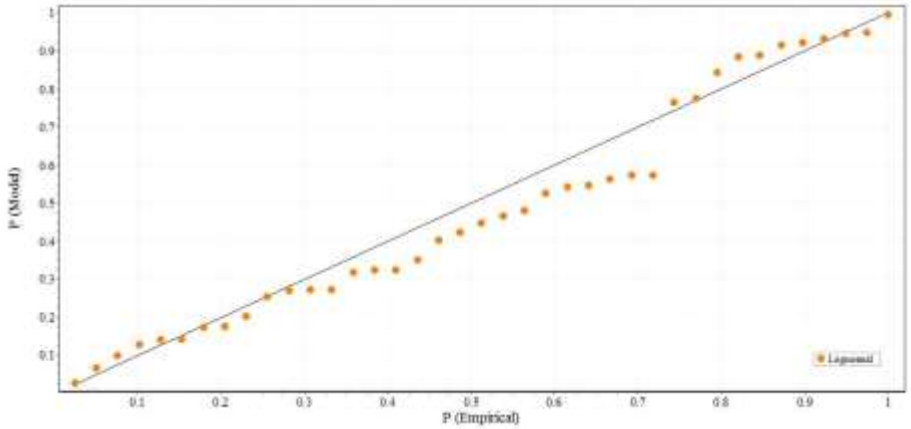
www.SID.ir

Archive

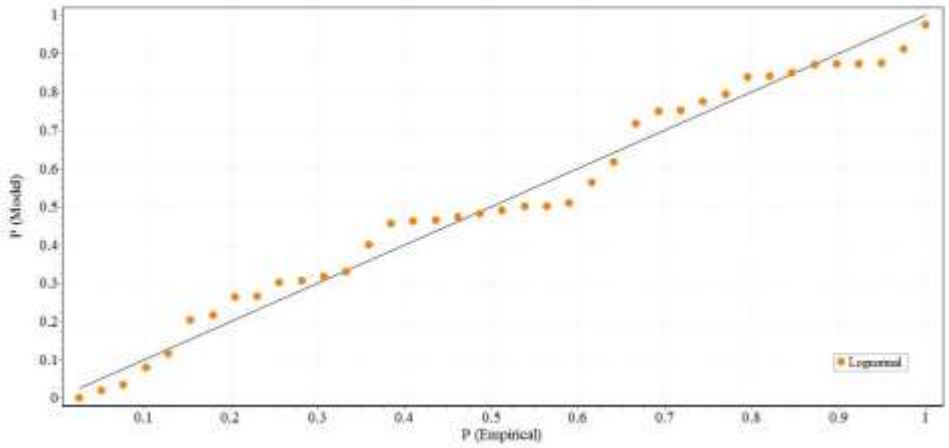
جدول ۲ : برازش توزیع های مختلف آماری بر حداکثر مقادیر سیلاب سالانه و حجم سیلاب

متغیرها	توزیع لوگ نرمال		
	مقادیر آماری	مقادیر بحرانی	نتیجه
Qp	۰/۸۰۵۱	۹/۴۸۷	مطلوب
V	۱/۱۵۰۵	۱۱/۰۷۷	مطلوب

علاوه بر این، شکل (۴) نمودار P-P[1] را بر اساس توزیع احتمال اتخاذ شده به ترتیب برای Qp و V نشان می دهد.



الف) دبی پیک سیلاب



ب) حجم سیلاب

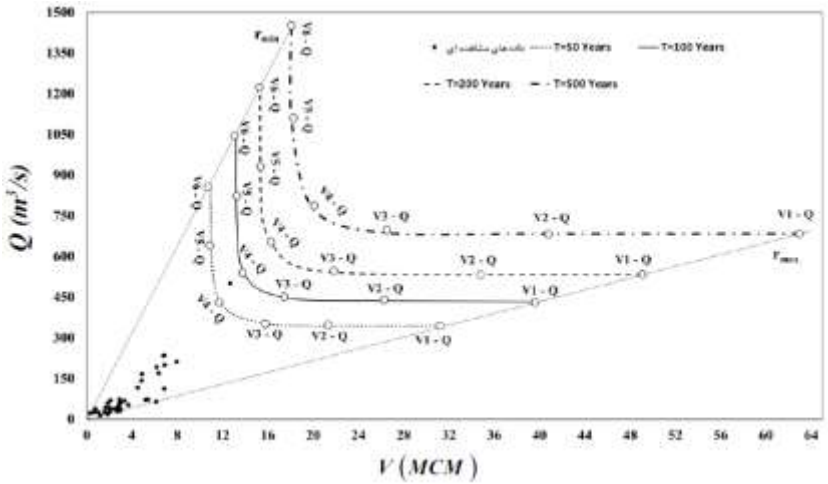
شکل ۴ : نمایش**P-P** برای عوامل سیلاب بر اساس توزیع لوگ نرمال

نمودار P-P نمودار احتمال - احتمال و یا درصد - درصد است. نمودارP-P با استفاده از تابع توزیع تجمعیF(x) ساخته شده است. اگر روند نمودار خطی باشد بدان معنی است که مدل از توزیع در نظرگرفته شده پیروی می کند. به عبارت دیگر برای برازش مناسب باید نقاط حول نیمساز ربع اول قرار گیرند. تحلیل های توام بر خلاف تحلیل های تک متغیره که تنها یک عدد را به ازای هر دوره بازگشت در اختیار قرار می دهند، بازهای از مقادیر را برای هر متغیر به ازای هر دوره بازگشت در اختیار قرار می دهند. مجموعه ای از دبی اوج و حجم سیلاب با دوره بازگشت توام محاسبه شده و در شکل (۵) رسم شده است.

1 Probability -Plot

www.SID.ir

Archive



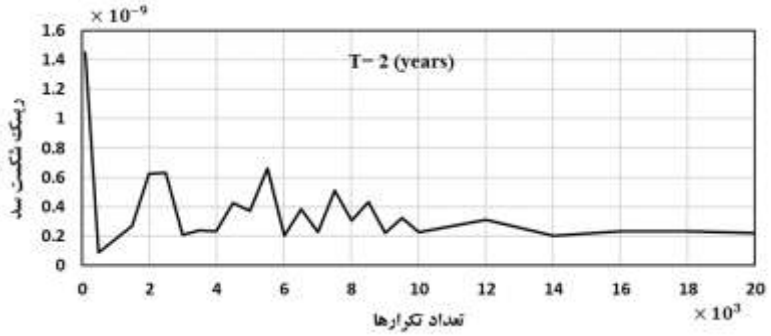
شکل ۵ : منحنی دوره بازگشت توام حجم سیلاب -دبی اوج سیلاب

در این مطالعه از دوره بازگشت توام" یا "برای دبی اوج و حجم سیلاب استفاده شده است. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می شود، منحنی دوره بازگشت توام می تواند به طور جانبی در امتداد محورها گسترش یابد، در حالی که، بر اساس اهمیت داده ها، فرمت متناهی قابل قبول است و آنها باید توسط حدود پایین و بالا محدود شوند. از اینرو، بر اساس روش پیشنهادی Hable ، منحنی ها با خطوط عبوری از مبدا با شیب های حداکثر و حداقل (Qp/V(rmin ، (Qp/V(r max محدود می شوند[18].

همانطور که در شکل مشخص است rmax و rmin که به ترتیب شیب حداکثر و حداقل نامیده می شوند، خطوط ماکزیمم و مینیمی هستند که از میان داده های مشاهداتی عبور کرده اند. به عبارت دیگر خط های عبوری از مبدا از کمترین و بیشترین مقدار نسبت Qp/V به ترتیب های مشاهداتی، داده rmax وrmin نامیده می شوند.

۹-۲- ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی تک متغیره سیلاب

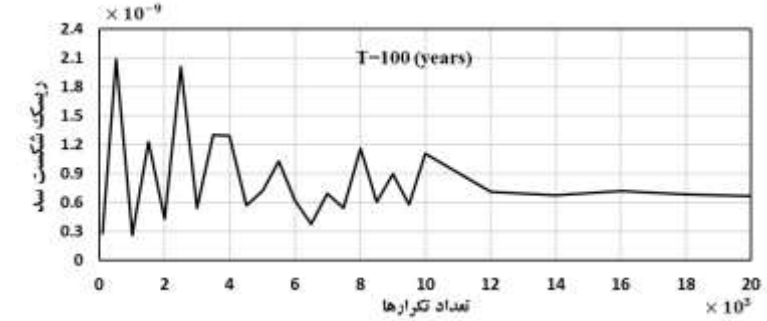
بر اساس معادلات فوق، احتمال روگذری در اثر سیلاب با دوره بازگشت ۲، ۵۰ ،۱۰۰ ، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ سال با در نظر گرفتن سه متغیر غیرقطعی شامل دبی اوج، سطح اولیه آب و ضریب تخلیه سرریز محاسبه شده است . تمام متغیرهای غیرقطعی، مستقل در نظر گرفته شده، و برای شبیه سازی، روش مونتکارلو با حجم نمونه ۲۰۰۰۰ و نمونه گیری لاتین هایپرکیوب با حجم نمونه ۱۰۰۰۰ استفاده شده است. شکل ۶ مربوط به اجرای مدل با دوره بازگشت های ۲ ،۱۰۰ ،۵۰۰ ، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ سال با تراز اولیه آب در مخزن ۵۰/۱ متر می باشد .



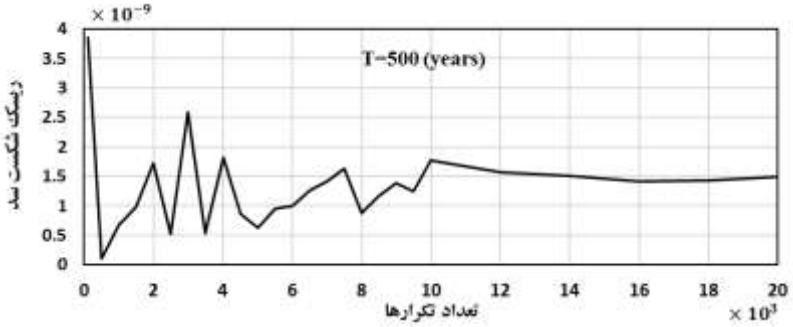
۲ سال

www.SID.ir

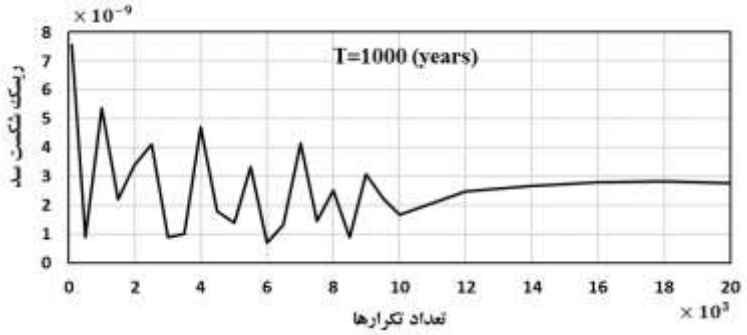
Archive



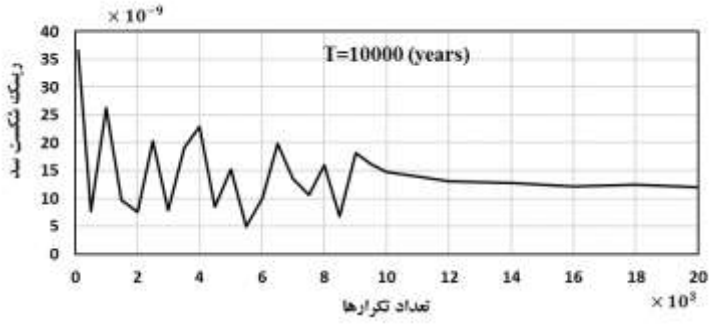
۱۰۰ سال



۵۰۰ سال



۱۰۰۰ سال



۱۰۰۰۰ سال

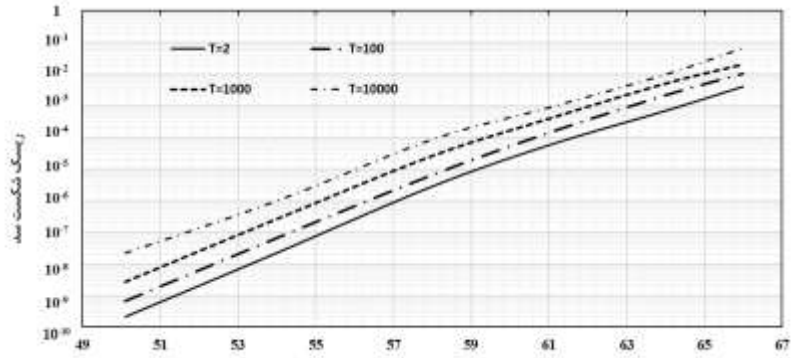
شکل ۴ : نمودار تغییرات ریسک روگذری سد در برابر تعداد تکرارها برای سیل با دوره های بازگشت

www.SID.ir

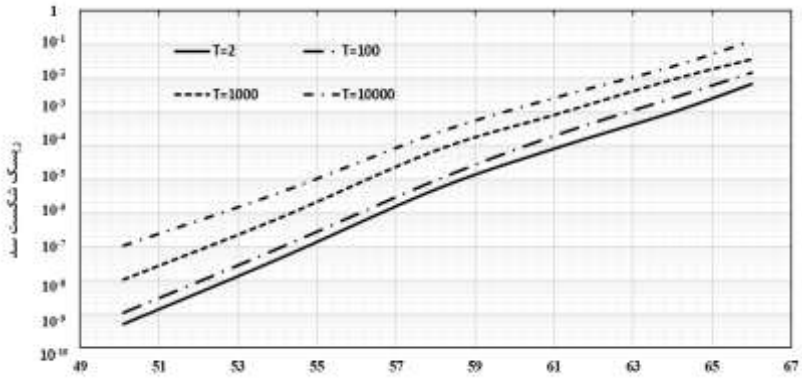
Archive

در این نمودارها، اثر افزایش تعداد تکرار در همگرا شدن به مقدار واقعی ریسک نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در تعداد تکرارهای کم مقدار ریسک از نوسان بالایی برخوردار است و با افزایش تعداد تکرارها به تدریج از دامنه نوسانات کاسته می شود.

مقادیر ریسک روگذری در برابر مقادیر مختلف سطح اولیه آب برای دوره بازگشت های ۲، ۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ سال با دو روش مونتکارلو و لاتین هایپرکیوب به ترتیب در شکل ۷ نشان داده شده است.



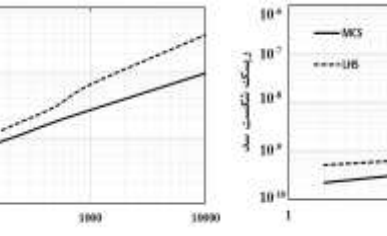
روش مونتکارلو



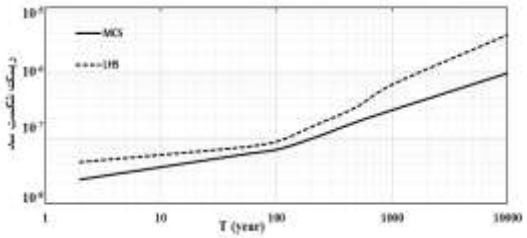
روش لاتین هایپرکیوب

شکل ۷ : تغییرات ریسک روگذری در مقابل ارتفاع آب

همانطور که ملاحظه می شود با افزایش ارتفاع اولیه آب در مخزن (در دوره بازگشت ثابت)، مقدار ریسک در هر دو روش افزایش می یابد. همچنین با افزایش دوره بازگشت نیز در هر دو روش MCS وLHS مقدار ریسک افزایش یافته است. در شکل ۸ ریسک روگذری برای تمام ارتفاع های اولیه آب در دوره بازگشت های مختلف نشان داده شده است.



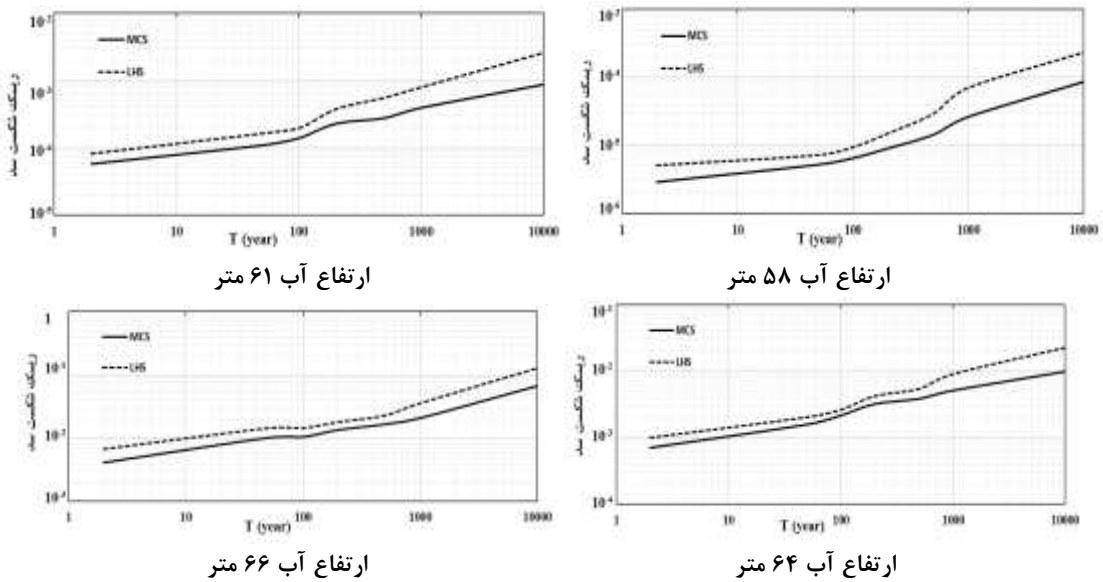
ارتفاع آب ۵۰/۱ متر



ارتفاع آب ۵۴ متر

www.SID.ir

Archive



ارتفاع آب ۵۸ متر — ارتفاع آب ۶۱ متر

ارتفاع آب ۶۴ متر — ارتفاع آب ۶۶ متر

شکل ۸ : نمودار ریسک دوره بازگشت

مقایسه(LHS) و لاتین هایپرکیوب(MCS) و با دو روش شبیه سازی مونت کارلو این دو روش در تحلیل فراوانی تک متغیره نشان می دهد که مقادیر ریسک با روش لاتین هایپرکیوب در همهی ارتفاع ها کمی بیشتر از مونتکارلو می باشد.

۹-۳- ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب

تجزیه و تحلیل فراوانی سیلاب تک متغیره اغلب بر مقدار اوج سیل تمرکز دارد و یک ارزیابی محدود از سیل فراهم می کند. به عبارت دیگر، این روش یک هیدروگراف واحد ایجاد می کند که تنها یکی از بسیار هیدروگراف های ممکن حوضه سد را نشان می دهد. از این رو، تجزیه و تحلیل دو متغیره برای ارزیابی توزیع توام دبی اوج و حجم سیلاب و در نظر گرفتن هیدروگراف جریان بیشتر برای تجزیه و تحلیل ریسک و عدم قطعیت به کار گرفته شده است. ریسک روگذری به علت سیل های مختلف برای دوره بازگشت های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ سال در شش سطح اولیه آب ۵۰/۱، ۵۴، ۵۸، ۶۱، ۶۴ و ۶۶ متر، با دو روش عدم قطعیت مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب بررسی شده است.

ریسک محاسبه شده برای هیدرورگراف های V1-Q تا V6-Q دارای روند تغییرات یکسان نمی باشد. به عنوان مثال در دوره بازگشت ۵۰ سال در روش مونتکارلو ریسک محاسبه شده برای هیدروگراف های V1-Q تا V5-Q در همه ی ارتفاع ها به جز ارتفاع ۶۶ متر روند نزولی داشته اما در روش لاتین هایپرکیوب ریسک محاسبه شده برای هیدروگراف های V1-Q تا V3-Q روند نزولی داشته است.

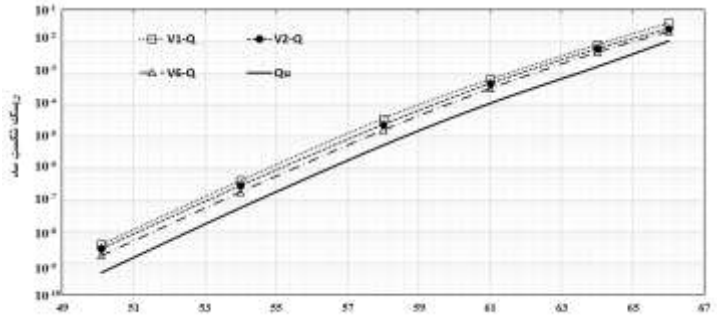
در نتیجه نمی توان قانون کلی برای روند تغییرات ریسک در هر روش در نظر گرفت و به همین ترتیب در دوره بازگشت های دیگر نیز روند تغییرات مقدار ریسک در هیدروگراف ها متفاوت می باشد. این نکته قابل ذکر است به دلیل اینکه هیدروگراف V1-Q دارای بیشترین حجم سیلاب بوده است در نتیجه در همه ی ارتفاع ها از ریسک بیشتری نسبت به بقیه هیدروگرافها برخوردار است . همچنین هیدروگراف V6-Q به دلیل اینکه بیشترین دبی را داراست، مقدار ریسک در همه ی ارتفاع ها نسبت به هیدروگراف V5-Q افزایش می یابد. همچنین همانطور که مشاهده می شود در همهی دوره بازگشت ها با افزایش ارتفاع مقدار ریسک نیز افزایش یافته است و در ارتفاع ۶۶ متر مقدار ریسک روگذری برای سد بسیار بالا می باشد.

شکل ۹ روند تغییرات ریسک روگذری در مقابل عمق اولیه آب برای دوره بازگشت های ۵۰ ، ۱۰۰ ، ۵۰۰ و ۲۰۰ سال به ترتیب برای روش مونت کارلو برای هیدروگراف جریان تک متغیره (Qu) و دومتغیره V1-Q، V2-Q و V6-Q و لاتین

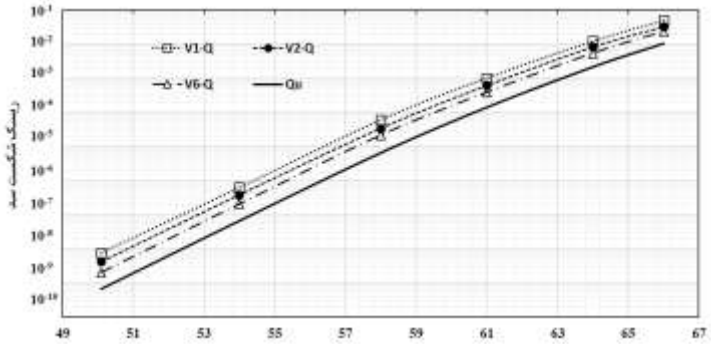
www.SID.ir

Archive

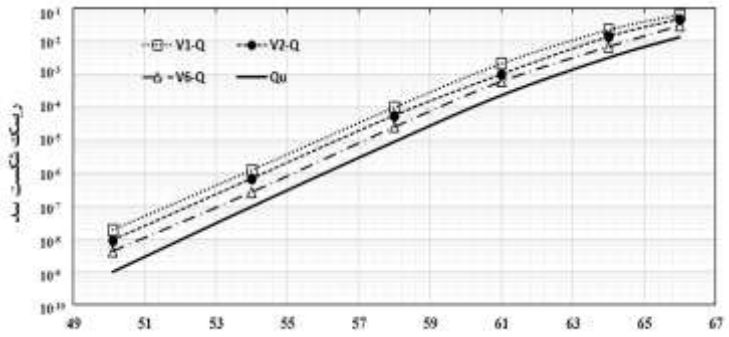
هایپرکیوب برای هیدروگراف جریان تک متغیره (Qu) و هیدروگراف جریان دومتغیره V1-Q، V2-Q و V5-Q نشـان مـی دهند .



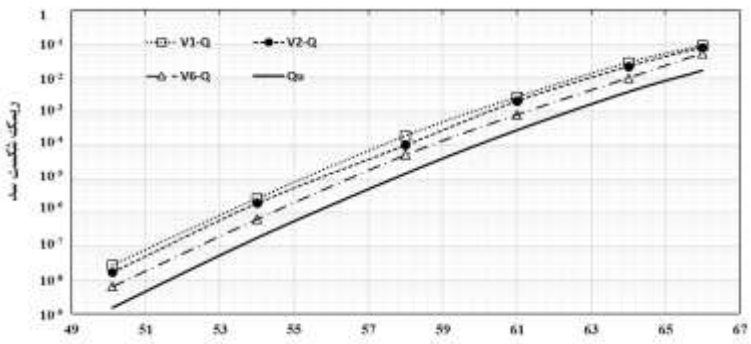
۵۰ سال



۱۰۰ سال



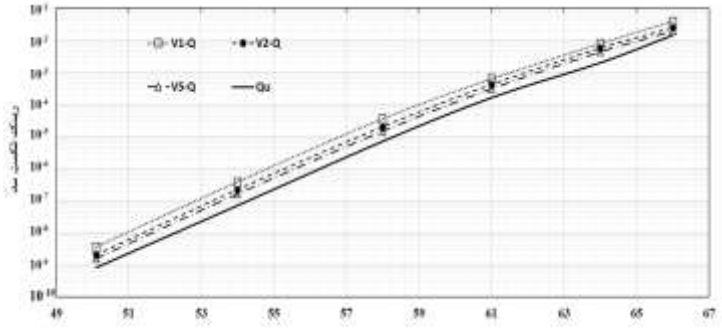
۲۰۰ سال



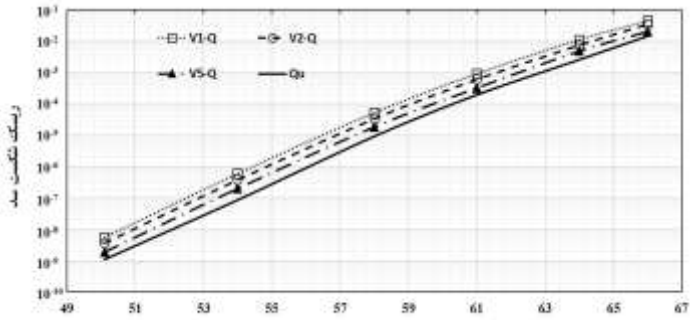
۵۰۰ سال

www.SID.ir

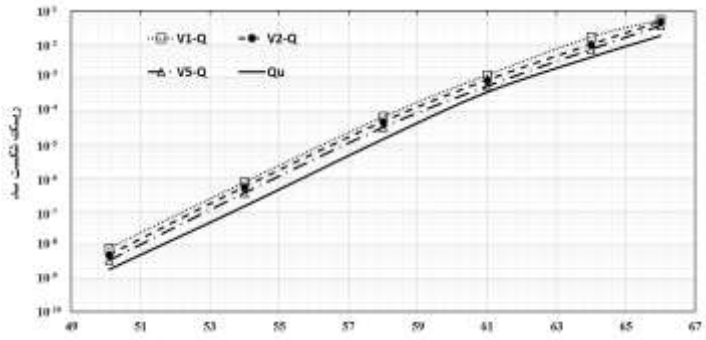
Archive



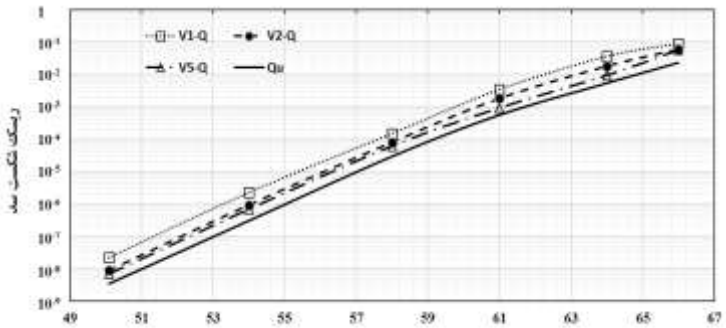
۵۰ سال



۱۰۰ سال



۲۰۰ سال



۵۰۰ سال

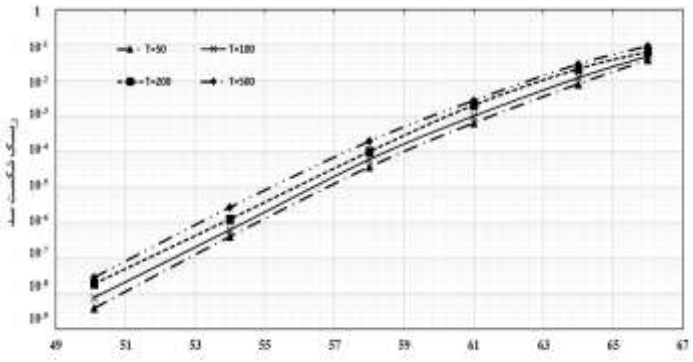
شکل ۹ : تغییرات ریسک روگذری در برابر ارتفاع اولیه سطح آب به روشLHS برای دوره بازگشت مختلف

www.SID.ir

Archive

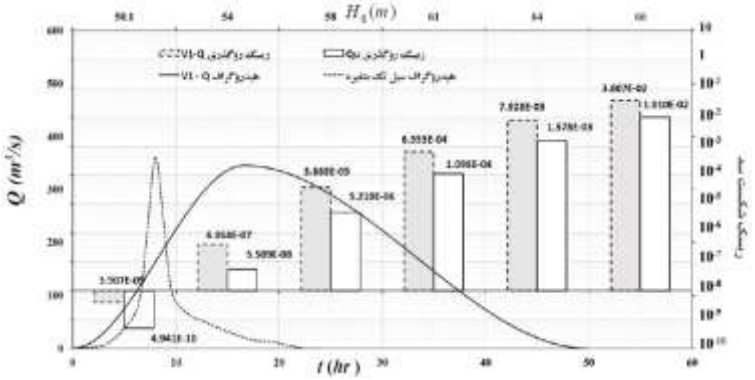
همانطور که از شکل ها مشاهده می شود. در هر دوره بازگشت هیدروگراف سیل تک متغیره (Qu) نسبت به هیدروگراف های V1-Q، V2-Q، V6-Q و V5-Q دارای ریسک کمتری می باشد، و با افزایش ارتفاع مقدار ریسک افزایش می یابد. همچنین هیدروگراف های با حجم رواناب بیشتر (V1-Q و V2-Q) ریسک بیشتری نسبت به دیگر هیدروگراف های جریان دارند و خطر سرریز شدن آب از بدنه سد خاکی در این حالت ها بیشتر می باشد.

بنابراین در هر دوره بازگشت مقادیر محاسبه شده ریسک با استفاده از تجزیه و تحلیل فراوانی سیل دو متغیره بیشتر از نتایج تک متغیره است و به همین دلیل تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب دارای اهمیت می باشد . همچنین با افزایش دوره بازگشت نیز مقدار ریسک در هر دو روش مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب افزایش می یابد. شکل (۱۰) ریسک روگذری هیدروگراف ورودی V1-Q را برای دوره بازگشت های ۵۰ ، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ سال در مقابل ارتفاع اولیه سطح آب به روش مونت کارلو نشان می دهد .



شکل ۱۰ : ریسک شکست سد هیدروگراف جریان V1-Q برای دوره بازگشت های مختلف به روش مونت کارلو

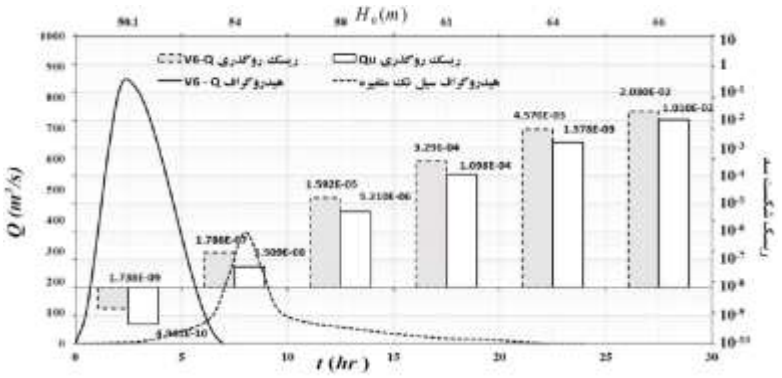
همانطور مشاهده می شود با افزایش ارتفاع اولیه سطح آب و افزایش حجم سیلاب و دبی ورودی به مخزن، ریسک شکست سد برای هیدروگراف V1-Q افزایش می یابد. همچنین همانطور که مشاهده می شود همانند حالت تک متغیره سیلاب، تغییرات سطح آب در افزایش مقدار ریسک محسوستر از تغییرات دوره بازگشت می باشد. برای بیان و نمایش بهتر مطالب و نتایج گفته شده در قسمت های قبل، شکل های (۱۱) تا (۱۹) رسم شده است.



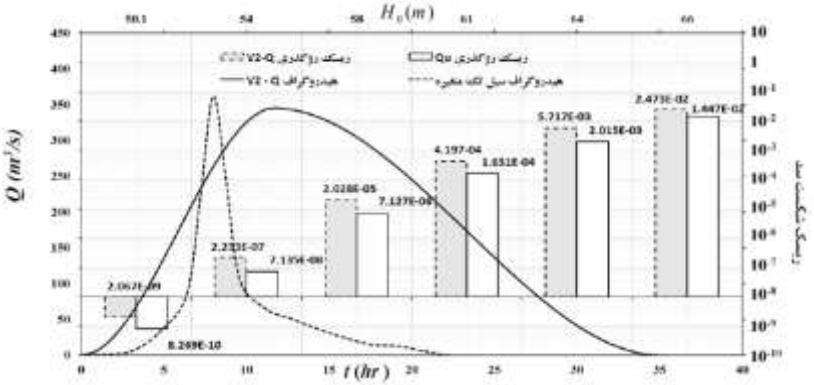
شکل ۱۱: ریسک روگذری Q_u و V1-Q بر اساس روش MCS برای دوره بازگشت ۵۰ سال

www.SID.ir

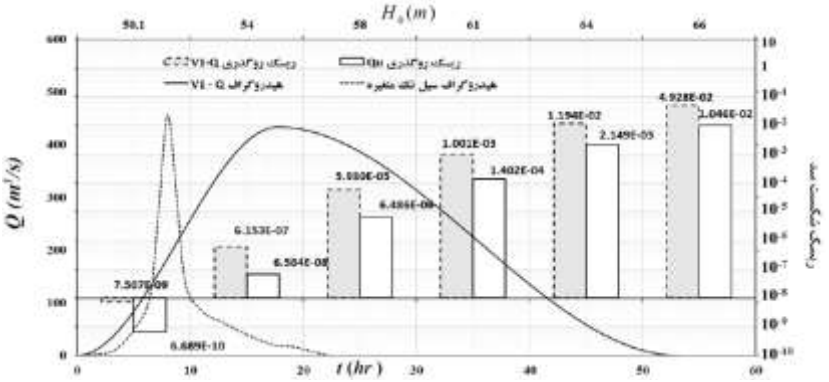
Archive



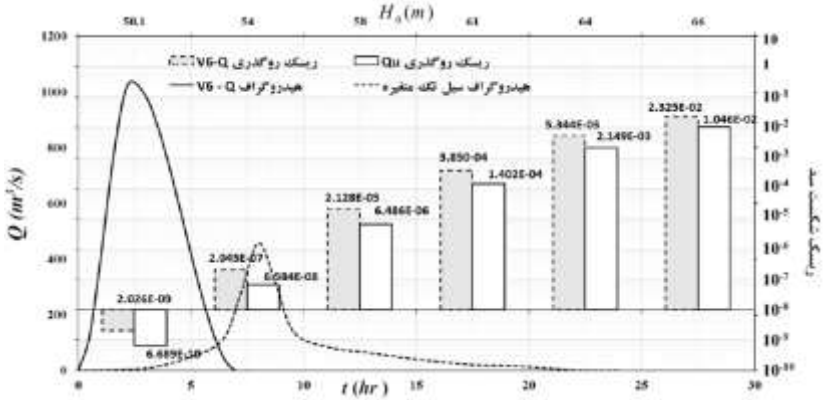
شکل ۱۲ : ریسک روگذری Q_u و V6-Q بر اساس روش MCS برای دوره بازگشت سال ۵۰



شکل ۱۳ : ریسک روگذری Qu و V2-Q بر اساس روشLHS برای دوره بازگشت ۵۰ سال



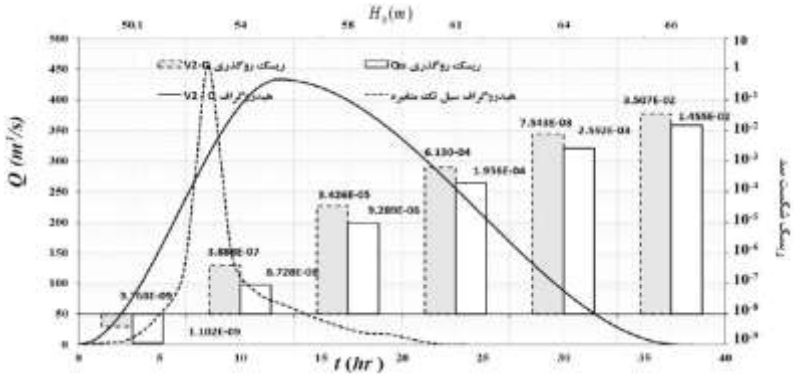
شکل ۱۴ : ریسک روگذری Qu و V1-Q بر اساس روش MCS برای دوره بازگشت سال ۱۰۰



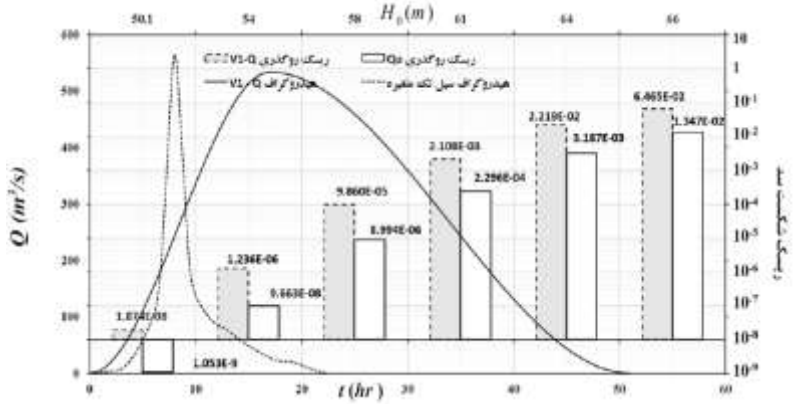
شکل ۱۵ : ریسک روگذری Qu و V6-Q بر اساس روش MCS برای دوره بازگشت سال ۱۰۰

www.SID.ir

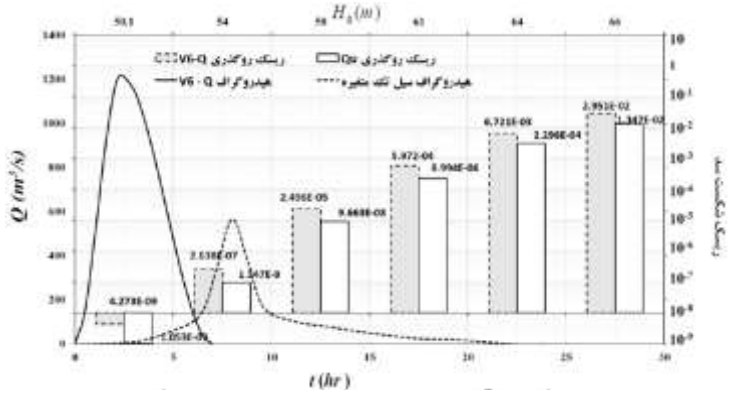
Archive



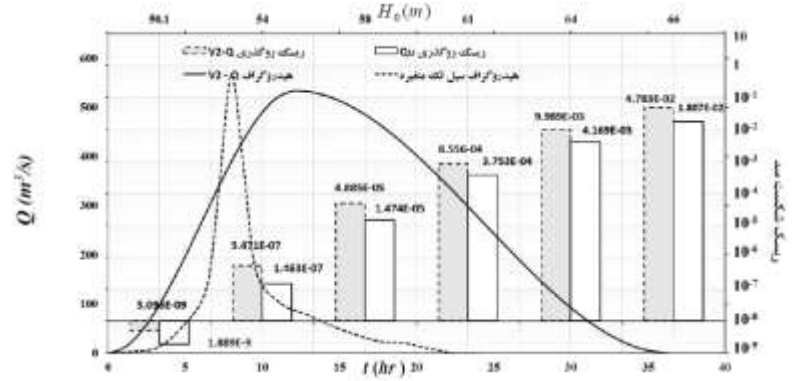
شکل ۱۶ : ریسک روگذری Qu و V2-Q بر اساس روش LHS برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال



شکل ۱۷ : ریسک روگذری Qu و V1-Q بر اساس روش MCS برای دوره بازگشت سال ۲۰۰



شکل ۱۸ : ریسک روگذری Qu و V6-Q بر اساس روش MCS برای دوره بازگشت سال ۲۰۰



شکل ۱۹ : ریسک روگذری Qu و V2-Q بر اساس روش LHS برای دوره بازگشت ۲۰۰ سال

www.SID.ir

این شکل ها هیدروگراف جریان تک متغیره و دو متغیره و ریسک روگذری را به ترتیب برای هیدروگراف جریان V1-Q، V2-Q و V6-Q برای دوره بازگشت های ۵۰ ، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال نشان می دهد. نمودارهای میله ای نشان دهنده مقایسه ریسک روگذری محاسبه شده هیدروگراف سیل ورودی تک متغیره (Qu) و دو متغیره است. همچنین مقایسه صورت گرفته برای هیدروگراف های V1-Q و V6-Q بر اساس روش مونت کارلو و هیدروگراف جریان V2-Q بر اساس روش لاتین هایپرکیوب می باشد. همانطور که قبلاً بیان شد و از این اشکال به خوبی مشاهده می شود مقدار ریسک روگذری در تمام ترازهای اولیه آب و در تمام دوره بازگشت ها با استفاده از تجزیه و تحلیل فراوانی تک متغیره در هر دو روش مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب کمتر از نتایج حاصل از تحلیل فراوانی دو متغیره می باشد که اهمیت آنالیز دو متغیره سیلاب برای روگذری سد را نشان می دهد. همچنین افزایش دوره بازگشت نیز باعث افزایش ریسک می گردد. در مقادیر ریسک برآورده شده، تغییرات ارتفاع نسبت به تغییرات دوره بازگشت براساس هر دو تحلیل فراوانی سیلاب (تک متغیره و دو متغیره) کاملاً مشهود می باشد.

۱۰- نتیجه گیری

این مطالعه، ریسک روگذری سد خاکی جهره واقع در خوزستان را بر اساس تحلیل فراوانی سیلاب تک متغیره و دو متغیره با توجه به متغیرهای عدم قطعیت مختلف که شامل دبی پیک سیلاب، ارتفاع اولیه آب و ضریب تخلیه سرریز می باشد، ارزیابی کرد. همانطور که مشاهده شد در ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی تک متغیره در هر دو روش به کار رفته مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب، با افزایش سطح اولیه آب و افزایش دوره بازگشت مقدار ریسک افزایش می یابد. همچنین مقدار ریسک برآورد شده از روش لاتین هایپرکیوب بیشتر از مونتکارلو می باشد. همچنین تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب با استفاده از توزیع لوگ نرمال دو متغیره با در نظرگرفتن شش هیدروگراف ورودی V1-Q تا V6-Q برای دوره بازگشت های توام ۵۰ ، ۱۰۰ ، ۲۰۰ و ۵۰۰ سال انجام شد. نتایج نشان داد حجم سیلاب بیشتر باعث افزایش خطر روگذری می شود و همچنین نتایج تایید کرد که ریسک روگذری برآورد شده بر اساس فراوانی سیلاب دو متغیره بیشتر از روش تک متغیره بوده و تولید خطرات بیشتری نیز می کند.

نتایج ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی تک متغیره نشان می دهد که در هر دو روش مونتکارلو و لاتین هایپرکیوب، نتایج از یک روند یکسان پیروی می کنند و ریسک شکست سد با بالا رفتن سطح اولیه آب و دبی های ورودی به مخزن افزایش می یابد. همچنین مقدار ریسک در ارتفاع های بالای سطح اولیه نشان می دهد که ریسک محاسبه شده بر اساس روش MCS و LHS آب بیشتر می باشد. مقایسه نتایج LHS کمی بالاتر از روش MCS بوده است.

نتایج ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب برای دوره بازگشت توام ۵۰ ، ۱۰۰ ، ۲۰۰ و ۵۰۰ سال و با در نظرگرفتن شش هیدرورگراف احتمالی سیل ورودی با استفاده از روش پیشنهاد شده Aldama و Ramirez و در نظر گرفتن ترکیب دبی پیک سیل و حجم سیلاب با استفاده از توزیع لوگ نرمال انجام شد. نتایج نشان داد مقادیر محاسبه شده ریسک در تمام ترازهای اولیه آب در هر دو روش مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب با استفاده از تجزیه و تحلیل فراوانی سیل دو متغیره بیشتر از نتایج تک متغیره است. از اینرو، ریسک روگذری برآورد شده بر اساس فراوانی سیلاب دو متغیره تولید خطرات بیشتری نسبت به روش تک متغیره می کند. علاوه بر این، هیدروگراف ها با حجم رواناب بیشتر (V1-Qو V2-Q) ریسک بیشتری نسبت به دیگر هیدروگراف های جریان دارند.

همانطور که مشاهده شد با بالارفتن تراز آب در مخزن، در برآورد ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی تک متغیره و دو متغیره به مراتب از افزایش بیشتری نسبت به زمانی که سیلاب های با دوره بازگشت های طولانی تر اتفاق میافتد، برخوردار است. مقادیر ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب مانند حالت تک متغیره، در روش لاتین هایپرکیوب بیشتر از مونت کارلو نبوده، در نتیجه نمی توان این نتیجه را به صورت یک قانون کلی بیان نمود.

www.SID.ir

Archive

منابع و ماخذ

۱. Hsu YC, Tung YK, Kuo JT . Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind . Stochastic Environmental Research and Risk Assessment . 2011 Jan 1;25(1):35-49.

۲. Goodarzi E, Ziaei M, Shui LT. Introduction to risk and uncertainty in hydrosystem engineering. Springer Science & Business Media; 2013 Jan 12 .

۳. Cheng ST, Yen BC, Tang WH . Overtopping Risk for an Existing Dam (HES 37) . 1982 .

۴. گزارشات سد تبارک آباد، شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، ۱۳۸۵.

۵. Nazemi A, Elshorbagy A. Application of copula modelling to the performance assessment of reconstructed watersheds. Stochastic environmental research and risk assessment. 2012 Feb 1;26(2):189-205.

۶. De Michele C, Salvadori G, Canossi M, Petaccia A, Rosso R. Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway. Journal of Hydrologic Engineering. 2005 Jan;10(1): 50-7 .

۷. Zhang L, Singh VP. Bivariate flood frequency analysis using the copula method. Journal of hydrologic engineering 2006 Mar;11(2):150-64 .

۸. Sraj M, Bezak N, Brilly M. Bivariate flood frequency analysis using the copula function: a case study of the Litija station on the Sava River. Hydrological Processes. 2015 Jan 15;29(2): 225-38 .

۹. «دانشنامهٔ تاریخ معماری و شهرسازی ایران‌شهر». وزارت راه و شهرسازی. بایگانی‌شده از روی نسخه اصلی در ۶ اکتبر ۲۰۱۹. دریافت‌شده در ۱۰ اکتبر ۲۰۱۹.

۱۰. «تخریب ۴۰ اثر و محوطه تاریخی ثبت ملی». بایگانی‌شده از اصلی در ۲۳ اکتبر ۲۰۱۷. دریافت‌شده در ۱۲ ژوئیه ۲۰۱۱.

۱۱. شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس ، سیمای طرح مطالعات سد مخزنی جره

۱۲. درفشانی، م.، احمدی، ب.، و فلاح، م . ارزیابی قابلیت اعتماد و تحلیل ریسک روگذری سیل برای سدها . دانشکده فنی و مهندسی گروه عمران . دانشگاه یزد . مهر ۱۳۸۹ .

۱۳. منصوری، ن.، کبیری سامانی، ع . تحلیل ریسک روگذری سیل در سد با در نظرگرفتن عدم قطعیت های مختلف به کمک روش شبیه سازی مونت کارلو . ششمین کنگره ملی مهندی عمران . دانشگاه سمنان . اردیبهشت ۱۳۹۰.

۱۴. Yanmaz AM, Gunindi ME. Assessment of overtopping reliability and benefits of a flood detention dam. Canadian Journal of Civil Engineering . 2008 Oct 7;35(10):1177-82 .

۱۵. Goodarzi E, Mirzaei M, Ziaei M. Evaluation of dam overtopping risk based on univariate and bivariate flood frequency analyses. Canadian Journal of Civil Engineering. 2012 Mar 13; 39(4) : 374-87.

۱۶. Yue S. A bivariate gamma distribution for use in multivariate flood frequency analysis . Hydrological Processes. 2001 Apr 30;15(6):1033-45 .

۱۷. صفوی، ح.ر . هیدرولوژی مهندسی (ویرایش دوم).اصفهان، انتشارات ارکان دانش، ۱۳۹۳.

۱۸. Singh VP, Jain SK, Tyagi A. Risk and reliability analysis: a handbook for civil and environmental engineers. American Society of Civil Engineers.

www.SID.ir