

تحلیل ریسک روگذری سد جامیشان با استفاده از منحنی بارش آستانه روگذری و شبیه‌سازی مونت کارلو

احمد شرافتی

استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

asharafati@srbiau.ac.ir

چکیده - برآورد ریسک روگذری سدهای خاکی از مسائل مهم و مؤثر در تعیین ارتفاع سد و ظرفیت آبگذری سیستم تخلیه سیلاب محسوب می‌شود. حالت ایده‌آل برآورد ریسک روگذری، در نظر گرفتن تمام متغیرهای تصادفی و مؤثر بر روگذری می‌باشد. البته در نظر گرفتن کلیه متغیرهای تصادفی مؤثر و برآورد ریسک روگذری با الگوریتم‌هایی مانند مونت کارلو بسیار زمان‌بر و بعضی مواقع غیرممکن است. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از تئوری بارش آستانه و تلفیق آن با روش مونت کارلو شرطی، گام مهمی در کاهش زمان شبیه‌سازی‌ها برداشته شود. نتایج این تحقیق نشان داد با پذیرش 6 درصد خطا در محاسبه ریسک روگذری سد جامیشان، زمان محاسبات در حدود 29 ساعت کمتر می‌شود و یا به عبارت دیگر راندمان الگوریتم شرطی معرفی شده در این تحقیق 7 برابر بیشتر از روش مونت کارلو معمولی در تحلیل ریسک روگذری سد جامیشان می‌باشد.

کلیدواژگان: ریسک، روگذری سد، عدم قطعیت، منحنی بارش آستانه.

1- مقدمه

جلوگیری از تخریب سدهای خاکی بر اثر روگذری آن همواره یکی از مسائل چالشی در تعیین ارتفاع سد و ظرفیت آبگذری سیستم تخلیه سیلاب محسوب می‌شود. بر اساس آمار کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ¹ (1973)، 35 درصد تخریب سدها در جهان بر اثر روگذری آنها به وقوع پیوسته است. با توجه به اینکه متغیرهای مؤثر بر تعیین ارتفاع سدا از نوع تصادفی هستند، از این رو همواره ارتفاع سد با پذیرش ریسک تخریب آن تعیین و طراحی می‌شود. از این رو تحلیل ریسک روگذری سد یکی از مسایل مهم در تعیین ارتفاع سد و ظرفیت آبگذری سیستم تخلیه سیلاب می‌باشد.

Zhao et al. (1997) ریسک روگذری یک سد تأخیری را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از سیلاب ورودی

به مخزن سد و همچنین اثر روندیابی مورد بررسی قرار دادند. Thompson et al. (1997) نیز ریسک شکست سد تحت تأثیر عدم قطعیت‌های هیدرولیکی (سیستم تخلیه سیلاب) و عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی سیلاب ناشی از مدل بارش-رواناب را با استفاده از روش مونت کارلو مورد بررسی قرار دادند. Kwon and Moon, (2006) ریسک روگذری آب از سد (ریسک هیدرولوژیکی) را بررسی کردند. در این تحقیق عوامل مهم در تحلیل ریسک، عدم قطعیت مقادیر پارامترهای تصادفی شامل نوع روش تحلیل عدم قطعیت (LHS, MCS, ...) و نوع توزیع احتمالاتی پارامترهای تصادفی فرض شده است. Kuo et al. (2007) با تحلیل اعتمادپذیری شرطی به بررسی ریسک روگذری سد فیتسوهی² پرداختند. شروط تحلیل اعتمادپذیری تعیین مقدار دوره بازگشت سیلاب طراحی و تعداد

2. Feitsui

1. ICOLD

شبیه‌سازی⁴ می‌باشد. یکی از ضعف‌های اساسی روش مونت کارلو زمان‌بر بودن محاسبات آن است. اهمیت این ضعف در تحلیل ریسک شکست سد با در نظر گرفتن تعداد زیاد متغیرهای تصادفی مشهودتر است.

با توجه به زمان‌بر بودن شبیه‌سازی مونت کارلو معمولی، در این تحقیق سعی شده است با استفاده از تئوری منحنی بارش آستانه تعداد شبیه‌سازی مونت کارلو کاهش یابد. به‌طور کلی منحنی‌های بارش آستانه مشخص‌کننده مقادیر بارش حدی می‌باشند که برای پیش‌بینی رانش زمین (Neary and Swift, 1987; Annunziati et al., 1999; Crosta and Frattini, 2000; Bacchini and Zannoni, 2003; Dahal and Hasegawa, 2008) برای هشدار وقوع سیلاب استفاده می‌شوند (Alfieri et al., 2011; Montesarchio et al., 2011; Javelle et al., 2010; Golian et al., 2010; Norbiato et al., 2008; Collier, 2007; Mendicino, 2006; Georgakakos, 2006; Martina et al., 2005; Amadio et al., 2003; Carpenter et al., 1999; Sharafati and Zahabiyou, 2014).

استفاده از منحنی‌های بارش آستانه برای حوضه‌های آبریز کوچکتر از 600 کیلومترمربع نتایج بهتری ارائه می‌دهد. (Montesarchio et al. 2009; Borga et al. 2007; Martina et al. 2005; Amadio et al. 2003).

در این تحقیق سعی شده است با تهیه منحنی بارش آستانه که منجر به روگذری سد می‌گردد و با استفاده از داده‌های این منحنی در شبیه‌سازی مونت کارلو از شبیه‌سازی کلیه وقایع جلوگیری شود. به عبارت دیگر در ابتدای هر شبیه‌سازی عمق بارش تولیدی با منحنی بارش آستانه کنترل می‌شود و در صورتی که این واقعه شرط روگذری سد را داشت، ادامه شبیه‌سازی انجام می‌شود. از این رو سعی شده است با استفاده از تئوری منحنی بارش آستانه و تلفیق آن با شبیه‌سازی مونت کارلو مشکل زمان‌بر بودن تحلیل ریسک روگذری سد مرتفع شود.

2- مواد و روش‌ها

2-1- تحلیل ریسک روگذری سد با استفاده روش

مونت کارلو معمولی

برای تحلیل ریسک روگذری سد، در ابتدا بارش که عامل

دریچه‌های غیرفعال در نظر گرفته شده بود.

(Yenigun and Erkek, 2007) به معرفی یک برنامه کامپیوتری به نام DAM-RISK پرداخته‌اند. این برنامه قادر به تحلیل ریسک تعیین ارتفاع سد با استفاده از روش‌های MFOSM¹ و AFOSM می‌باشد. این برنامه قابلیت بررسی ابعاد سرریز را براساس سطح معین ریسک دارد. (Paik, 2008) یک رابطه تحلیلی برای روندیابی در یک مخزن با سطح ثابت در ترازهای مختلف را ارائه داده است. با این رابطه تحلیلی، می‌توان تحلیل ریسک هیدرولوژیکی برای یک سد تأخیری (احتمال افزون بودن اوج دبی خروجی سد از دبی مجاز پهنه‌بندی سیلاب در پایین دست) را انجام داد. در این تحقیق تحلیل ریسک با استفاده از روش‌های MFOSM و AFOSM انجام گردید. (Kuo et al., 2008) بازه زمانی بهینه بازدید سد برای سد شپهن² با در نظر گرفتن عدم کارکرد دریچه‌ها در محاسبه ریسک روگذری سد را تعیین کردند. Hsu et al. (2011) بر پایه یک روش آماری توزیع احتمالاتی روگذری سد را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های اوج سیلاب و موج ناشی از باد ارائه کردند. در این تحقیق با استفاده از آنالیز فراوانی اوج سیلاب و ارتفاع موج، احتمال روگذری سد شپهن در تایوان محاسبه گردید.

(Goodarzi et al., 2011) با استفاده از تحلیل فراوانی و توزیع احتمالاتی گامبل لاجستیک³ دومتغیره و شبیه‌سازی مونت کارلو، احتمال روگذری سد درودزن در جنوب ایران را بررسی کردند. در این تحقیق متغیرهای تصادفی شامل اوج سیلاب، تراز اولیه مخزن و ضریب آبگذری سرریز می‌باشند. شرافتی و ذهیون (1392) نیز با تهیه مدل استوکستیک تولید وقایع بارش و شبیه‌سازی مونت کارلو و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی ریسک روگذری سد جامیشان را بررسی کردند.

روش مونت کارلو دقیق‌ترین روش محاسبه ریسک شکست در مقایسه با سایر روش‌های مبتنی بر منطق نمونه‌گیری-

1- روش‌های MFOSM و AFOSM از روش‌های تقریبی برای برآورد آمارهای خروجی مدل نظیر میانگین و انحراف معیار هستند.

2. Shihmen

3. Logistic

4. Sampling and Simulation

اصلی و مولد سیلاب می باشد، در نظر گرفته شده است. برای اعمال عدم قطعیت بارش و لحاظ کردن عدم قطعیت‌های متغیرهای تأثیرگذار بر آن، از یک مدل تولید کننده تصادفی وقایع بارش به نام RPG^1 استفاده شده است (شرافتی و ذهبیون 1392). این مدل امکان تولید وقایع بارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مدت بارش و الگوی بارش را دارد. در ادامه برای تکمیل فرایند تولید سیلاب، مدل بارش-رواناب HEC-1 انتخاب شده است. با استفاده از تلفیق مدل RPG و HEC-1 و تولید تصادفی پارامترهای مدل HEC-1، سیلاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بارش و پارامترهای مدل بارش-رواناب تولید گردیده است (شرافتی و ذهبیون 1392). در ادامه شبیه‌سازی مونت کارلو پس از تولید تصادفی سیلاب، هر واقعه سیلاب وارد مخزن سد جامیشان می‌شود، که در این تحقیق به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. پس از روندیابی سیلاب و محاسبه تراز سیلابی در شبیه‌سازی‌های مونت کارلو، تراز سیلابی به عنوان بارگذاری سیستم (L) در نظر گرفته می‌شود و با مقاومت سیستم، R که در این جا ارتفاع سد است، مقایسه می‌شود. در صورتی که $L > R$ باشد، یک شکست² رخ می‌دهد. از این رو بر اساس تابع عملکرد $W = L - R$ و تعداد زیادی شبیه‌سازی مونت کارلو می‌توان احتمال ریسک شکست سد ($P(W > 0)$) و یا اعتماد پذیری سد ($P(W \leq 0)$) را محاسبه کرد (شرافتی و ذهبیون 1392).

2-1-1-2 مدل RPG

مدل RPG یک مدل آماری مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد. سه متغیر مهم در تولید الگوی توزیع زمانی بارش شامل عمق بارش، مدت بارش و نوع الگوی بارش می‌باشند. در مدل RPG در هر شبیه‌سازی مونت کارلو بر اساس عمق بارش مشخص و تولید تصادفی احتمال وقوع، مدت بارش به صورت تصادفی تولید می‌شود. همچنین بر اساس عمق بارش مذکور و با استفاده از توزیع احتمالاتی تجربی نوع بارش (نوع الگوی توزیع

زمانی بارش)، به صورت تصادفی تولید می‌شود. بر اساس عمق بارش، مدت بارش و نوع الگوی بارش تعیین شده و با استفاده از روش نمونه‌گیری مجدد³ نمونه‌هایی از ماتریس الگوی توزیع زمانی بارش بدون بعد تولید می‌شوند. پس از مشخص شدن ماتریس بدون بعد الگوی توزیع زمانی بارش، با استفاده از توزیع احتمالاتی یکنواخت برای گام‌های زمانی الگوی بارش، الگوی زمانی بارش برای یک عمق مشخص بارش تولید می‌شود. این عمل بر اساس تعداد شبیه‌سازی‌های مونت کارلو انجام شده و در نهایت میانگین الگوهای بارش حاصل از شبیه‌سازی‌ها به عنوان الگوی بارش با احتمال وقوع مد نظر تعیین می‌شود.

برای تعیین توزیع احتمالاتی‌های مورد استفاده در مدل RPG، از اطلاعات 2658 واقعه بارش 7 ایستگاه مجهز به باران سنج ثبات با گام‌های زمانی 10 دقیقه استفاده شده است. از میان بارش‌های مورد مطالعه بر اساس 2 معیار حداقل عمق بارش 2 میلی‌متر و حداقل زمان 100 دقیقه تعداد 1784 بارش انتخاب گردید. همچنین در یک رخداد بارندگی در صورتی که شکاف زمانی میان دو گام زمانی بارش بیش از یک ساعت بود، بارش‌های قبل از این شکاف با شرط اینکه حداقل مدت بارش آن بیشتر یا مساوی حداقل زمان مجاز بارش (100 دقیقه) باشد، به عنوان یک واقعه بارش برای تحلیل‌های بعدی انتخاب گردید. الگوریتم تولید الگوهای بارش در مدل RPG در شکل 1 ارائه شده است (شرافتی و ذهبیون 1392).

2-1-2-2 مدل HEC1

مدل بارش-رواناب مورد استفاده در این تحقیق مدل HEC1 می‌باشد (اداره ارتش آمریکا⁴ 1998). این مدل از نوع توده‌ای⁵ می‌باشد و برای شبیه‌سازی جریان‌های تک واقعه⁶ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق از معادلات تلفات گرین آمپ، جریان پایه نمایی و هیدروگراف واحد مصنوعی SCS برای شبیه‌سازی رواناب استفاده شده است.

3. Bootstrap resampling

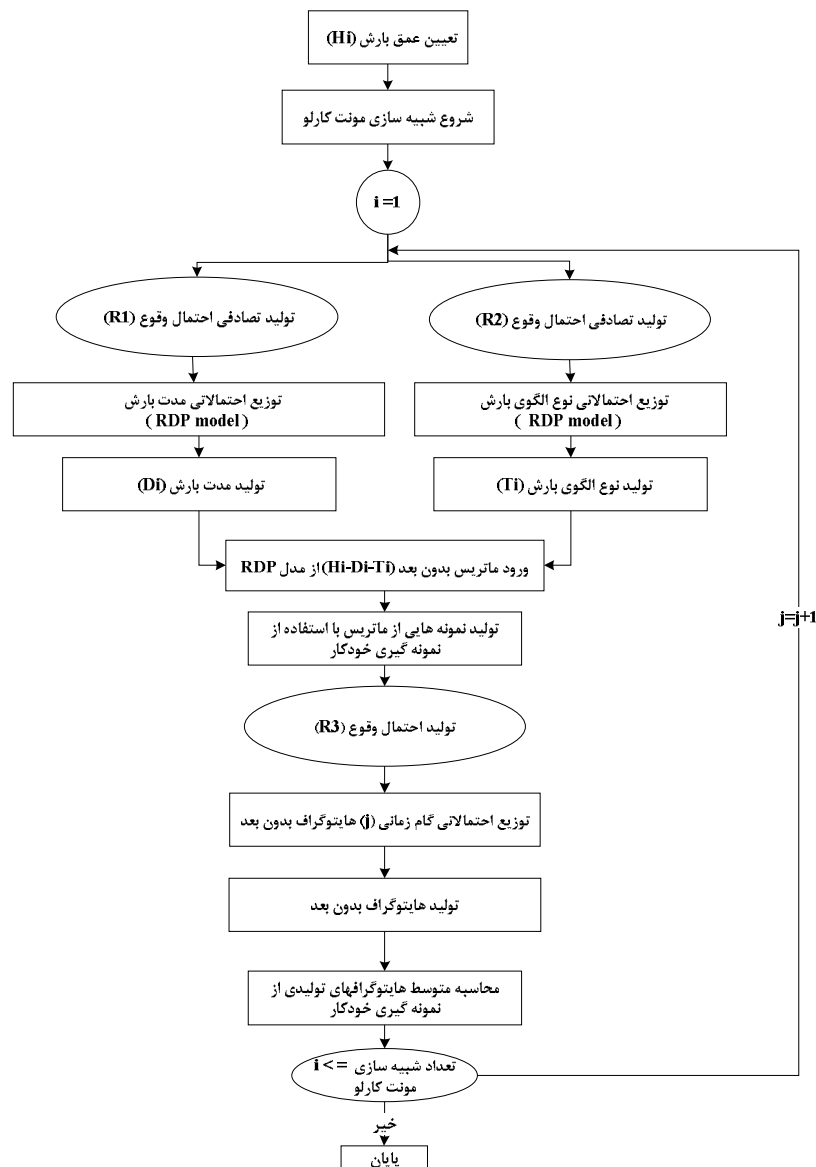
4. USACE

5. Lump

6. Single event

1. Rain Pattern Generator

2. Failure



شکل 1 الگوریتم تولید الگوهای بارش در مدل RPG (شرافتی و ذهبیون 1392)

الگوی بارش با استفاده از اتصال مدل RPG و مدل HEC1 در محیط برنامه نویسی Matlab به عنوان متغیرهای ورودی تعریف می شوند. اولین مرحله در تولید تصادفی سیلاب توسط مدل بارش-رواناب HEC1، استخراج توزیع چگالی احتمال پارامترهای مدل HEC1 می باشد. با توجه به خاصیت فیزیکی پارامترهای مدل HEC1 که محدود می باشند، از توزیع احتمالاتی مثلثی استفاده شده است. مقادیر پارامترهای توزیع احتمالاتی مثلثی با استفاده از واسنجی ده واقعه مشاهداتی تعیین شده است. مشخصات توزیع احتمالاتی پارامترهای مدل HEC 1 در جدول 1

پارامترهای مدل HEC1 که شامل تلفات اولیه¹، کمبود رطوبت²، مکش مرطوب³، هدایت هیدرولیکی⁴، درصد سطح نفوذناپذیر، دبی رودخانه در ابتدای واقعه، دبی حدی در شروع شاخه نزولی، ضریب کاهش دبی و زمان تاخیر می باشند، در جدول 1 ارائه شده اند. متغیرهای تصادفی ورودی مدل HEC1 در این تحقیق مرتبط با بارش می باشند. عمق بارش، مدت بارش و

1. Initial loss
2. Moisture deficit
3. Wetting front suction
4. Hydraulic conductivity

در شکل 2 ارائه شده است. با توجه به شکل 2، در هر شبیه‌سازی مونت‌کارلو، مقادیر عمق بارش، مدت بارش و الگوی توزیع زمانی بارش توسط مدل RPG و مقادیر پارامترهای تصادفی مدل HEC1 با استفاده از تولید تصادفی احتمال وقوع و توزیع احتمالاتی پارامترها، تولید می‌گردند.

2-2- تحلیل ریسک روگذری سد با استفاده روش

مونت‌کارلو شرطی

در این تحقیق سعی شده است با تهیه منحنی بارش آستانه‌ای که منجر به روگذری سد می‌گردد و با استفاده از داده‌های این منحنی در شبیه‌سازی مونت‌کارلو از شبیه‌سازی کلیه وقایع جلوگیری شود. به عبارت دیگر در ابتدای هر شبیه‌سازی عمق بارش تولیدی با منحنی بارش آستانه کنترل می‌شود و در صورتی که این واقعه شرط روگذری سد را داشت، ادامه شبیه‌سازی انجام می‌شود. روش تهیه منحنی‌های بارش آستانه به شرح ذیل می‌باشد.

1- در ابتدا مقادیر تراز هدف¹ (تراز تاج سد) (Et) و حداکثر مدت بارش مدنظر (T_{max}) تعیین می‌گردد.

2- اولین مدت بارش (T_j) مشخص می‌شود. در این تحقیق اولین مدت بارش برابر 3 ساعت در نظر گرفته شده است.

3- در این مرحله شبیه‌سازی مونت‌کارلو آغاز می‌گردد و مقدار اولیه برای عمق بارش، $P(i,j)$ ، در نظر گرفته می‌شود.

4- براساس $P(i,j)$ و T_j و با استفاده از مدل RPG الگوی توزیع زمانی بارش تولید می‌شود.

5- مقادیر پارامترهای مدل HEC1 با استفاده از توزیع احتمالاتی آنها تولید می‌گردند.

6- بر اساس نتایج استخراج شده از مراحل 4 و 5 مدل HEC1 اجرا شده و هیدروگراف سیلاب تولید می‌گردد.

7- سیلاب ورودی به مخزن سد با لحاظ شدن عدم قطعیت‌های هیدرولیکی روندیابی می‌شود و تراز آب در مخزن سد تعیین می‌گردد.

ارائه شده است. در جدول 1، پارامترهای a ، b و c پارامترهای توزیع احتمالاتی مثلثی هستند که به ترتیب حد پایین، حد بالا و ارتفاع مثلث هستند.

جدول 1 مشخصات توزیع احتمالاتی پارامترهای مدل HEC1

پارامترهای توزیع احتمالاتی مثلثی			واحد	پارامترهای مدل HEC1
c	b	a		
0/5	1/35	0	mm	تلفات اولیه (Initial loss)
0/17	0/45	0/06	-	کمبود رطوبت (Moisture deficit)
440	2000	200	mm	مکش رطوبت (Wetting front suction)
0/07	3/5	0/07	Mm/hr	هدایت هیدرولیکی (Hydraulic conductivity)
7/65	12	1/8	%	درصد سطح نفوذناپذیر
463	900	150	Min	زمان تأخیر
3/55	19	0/5	Cms	دبی رودخانه در ابتدای واقعه
19/38	35	2/5	Cms	دبی حدی در شروع شاخه نزولی
1/19	7/56	1/01	-	ضریب کاهش دبی

پس از تعیین توزیع احتمالاتی پارامترهای تصادفی و استفاده از مدل RPG جهت کمی کردن رفتار تصادفی بارش، شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب با استفاده از پارامترها و متغیرهای تصادفی به تعداد تعریف شده توسط کاربر با استفاده از فرایند مونت‌کارلو انجام می‌پذیرد.

2-1-3- شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب

مراحل شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب و تولید هیدروگراف سیلاب بر اساس روش شناسی این تحقیق به شرح موارد ذیل می‌باشند (شرافتی و ذهبیون 1392).

- تولید متغیرهای تصادفی مدل بارش-رواناب شامل عمق بارش، مدت بارش و الگوی زمانی بارش توسط مدل RPG.

- تولید پارامترهای تصادفی مدل بارش-رواناب شامل پارامترهای تلفات، جریان پایه و هیدروگراف واحد بر اساس توزیع احتمالاتی استخراج شده برای پارامترهای مذکور.

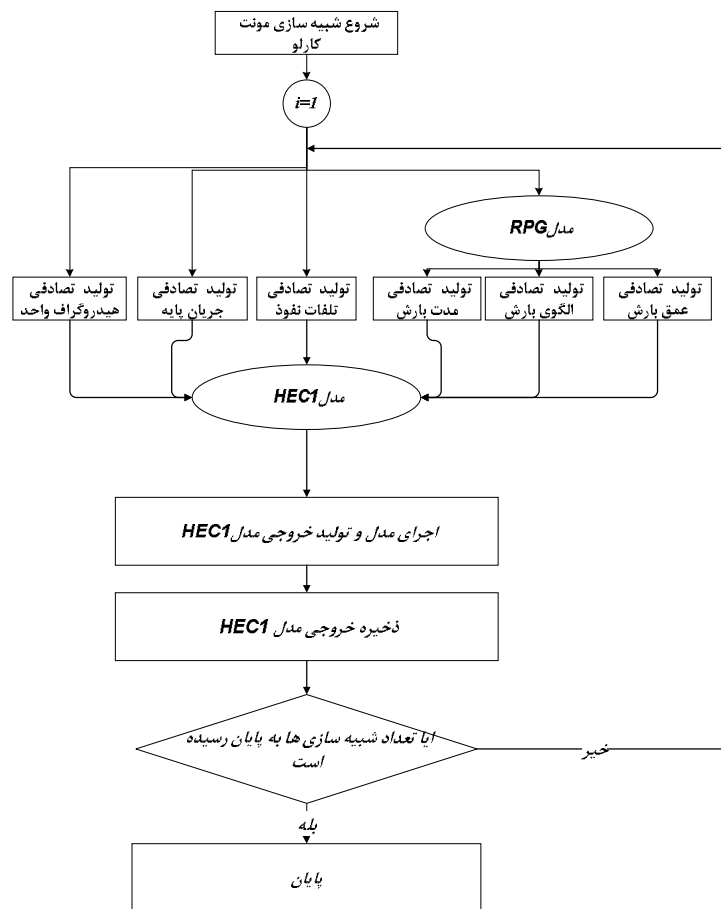
- اجرای مدل HEC1 و ذخیره سیلاب خروجی

- کنترل تعداد شبیه‌سازیهای انجام شده با تعداد

شبیه‌سازی‌های مدنظر در مونت‌کارلو

الگوریتم شبیه‌سازی مدل HEC1 توسط فرایند مونت‌کارلو

1. Target elevation



شکل 2 شبیه سازی استوکستیک مدل HEC1 توسط فرایند مونت کارلو

$$p(i+1, j) = \begin{cases} p(i, j) \times (1 - \beta) & \text{if } E(i, j) > E_t(1 + \alpha) \\ p(i, j) / (1 - \beta) & \text{if } E(i, j) < E_t(1 - \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، β درصد تغییرات ارتفاع بارش در هر شبیه سازی و α درصد اختلاف از دبی هدف می باشند. در این تحقیق β و α برابر 5 درصد (0/05) در نظر گرفته شده است. اگر $E(i, j)$ در هیچ یک از شروط رابطه (1) نباشد یعنی $E_t(1 - \alpha) \leq E(i, j) \leq E_t(1 + \alpha)$ در این حالت $P(i, j)$ به عنوان بارش آستانه دبی هدف برای یک واقعه بارش با مدت T_j انتخاب می شود.

9- پس از اتمام شبیه سازی های مونت کارلو برای وقایع مختلف بارش با مدت T_j ، بر اساس افزایش یک گام زمانی (Δt) مدت بارش جدید، $T(j+1)$ ، مطابق رابطه (2) محاسبه می شود. در ادامه شبیه سازی مونت کارلو مطابق

برای اعمال عدم قطعیت هیدرولیکی در روندیابی سیلاب، عدم قطعیت های عرض خالص سرریز و ضریب آبگذری سرریز در نظر گرفته می شود. عدم قطعیت عرض خالص ناشی از ضریب تأثیر شکل پایه (Kp) و ضریب تأثیر شکل کناره های ورودی سرریز (Ka) است. عدم قطعیت آبگذری سرریز نیز ناشی از ضریب اولیه تخلیه سیلاب ($C0$)، اثر تراز انرژی در مخزن سد (He)، و شیب وجه بالادست سرریز (Sp) است. برای تأثیر عدم قطعیت های مذکور در روندیابی سیلاب با استفاده از محدوده تغییرات پارامترهای مذکور طبق استاندارد USBR، توزیع احتمالاتی آنها استخراج شد.

7- تراز آب تولیدی، $E(i, j)$ ذخیره شده و با تراز هدف مقایسه می شود.

8- بر اساس مقایسه $E(i, j)$ و E_t رابطه (1) عمق بارش برای شبیه سازی بعدی $P(i+1, j)$ اصلاح می شود.

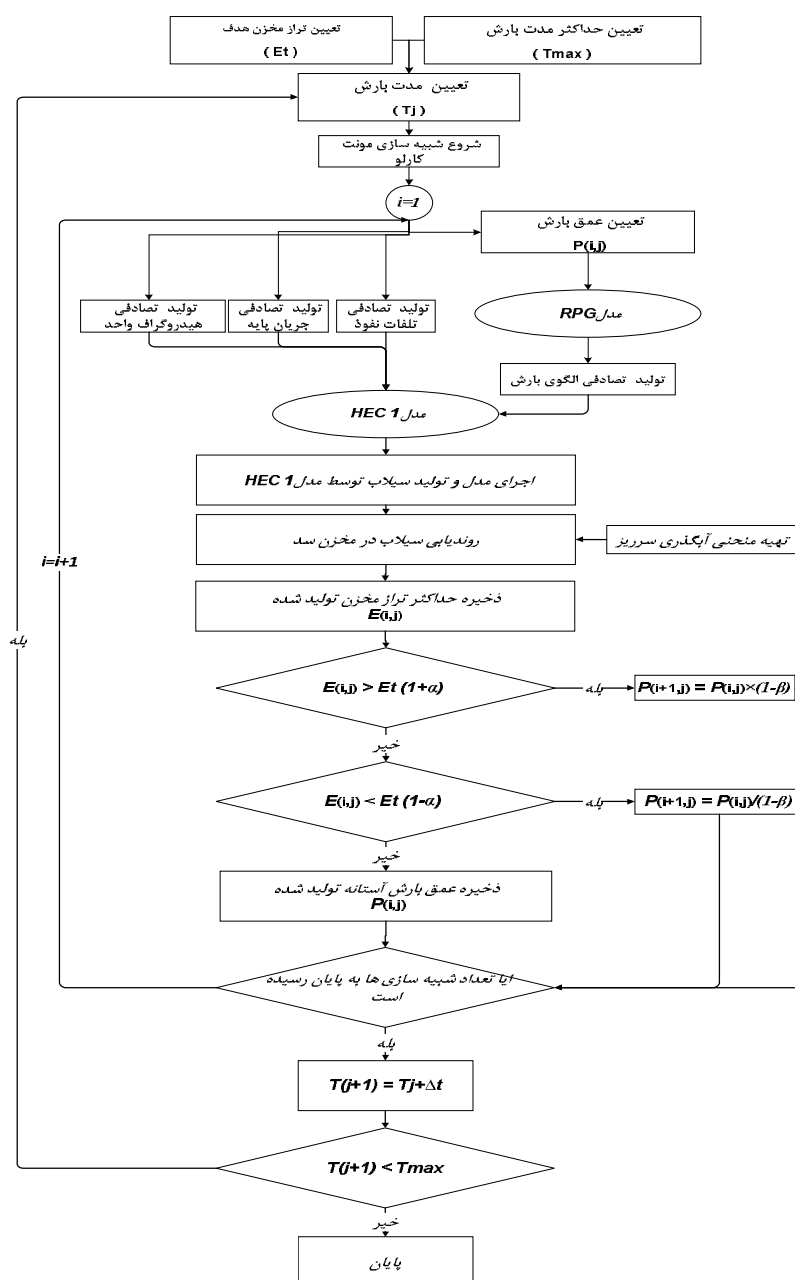
10- تمام مراحل فوق برای استخراج نقاط مختلف منحنی بارش آستانه تا مدت بارش T_{max} انجام می پذیرد.

11- در پایان حد بالا (90%) و حد پایین (10%) و حد میانه (50%) منحنی های بارش آستانه با استفاده از آنالیز رتبه بندی محاسبه می گردد (اوستربان 1994). الگوریتم تهیه منحنی های بارش آستانه در شکل 3 ارایه شده است.

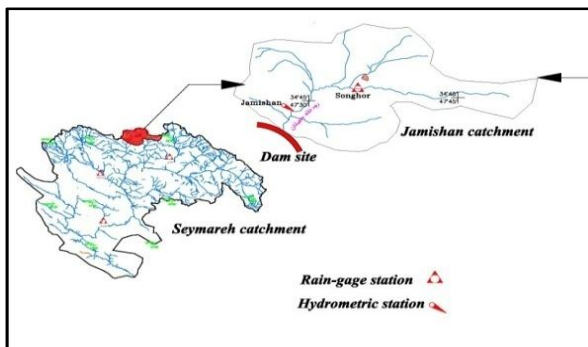
مراحل 2 تا 8 برای مدت بارش جدید انجام می گیرد. در این تحقیق تعداد شبیه سازی های مونت کارلو برای استخراج منحنی بارش آستانه برابر 1200 در نظر گرفته شده است.

$$T(i+1, j) = T(i, j) + \Delta t \quad (2)$$

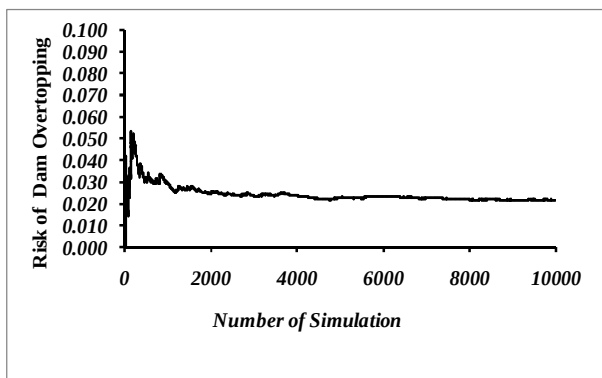
که در رابطه فوق Δt گام زمانی افزایش مدت بارش می باشد که در این تحقیق 3 ساعت در نظر گرفته شده است.



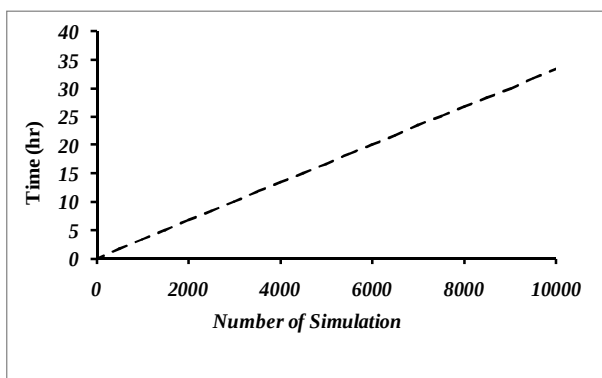
شکل 3 الگوریتم تهیه منحنی بارش آستانه روگذری سد



شکل 4 موقعیت حوزه آبریز سد جامیشان در حوزه آبریز سیمره



شکل 5 تغییرات ریسک روگذری سد جامیشان (مونت کارلو معمولی)



شکل 6 تغییرات زمان اجرای برنامه به ازای تعداد شبیه سازی ها (مونت کارلو معمولی)

با توجه به الگوریتم ارایه شده در شکل 3 و مشخصات فیزیکی سد جامیشان، منحنی های بارش آستانه روگذری سد جامیشان به ازای احتمال های مختلف استخراج گردید. منحنی بارش آستانه روگذری سد جامیشان در شکل 7 و جدول 2 ارایه شده است. با ملاحظه منحنی های بارش آستانه روگذری سد

2-3- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق از داده های حوزه آبریز سد جامیشان با مساحت 524/07 کیلومتر مربع استفاده شده است. این حوزه آبریز از نظر تقسیمات کشوری جزو استان کرمانشاه و بخشی از سرشاخه های حوزه رودخانه سیمره محسوب می شود. حوزه آبریز مورد استفاده در این تحقیق در حد فاصل 32° - 34° تا 53° - 34° عرض شمالی و 22° - 47° تا 52° - 47° طول شرقی می باشد. ارتفاع بلندترین نقطه آن 3000 متر از سطح دریا، متوسط بارندگی سالانه آن 441 میلی متر، متوسط تبخیر از سطح آزاد آن 1534 میلی متر و متوسط دمای سالانه آن 10 درجه سانتی گراد می باشد. در این تحقیق از ایستگاه باران سنجی سنقر و ایستگاه هیدرومتری جامیشان استفاده است. موقعیت این حوزه آبریز در شکل 4 ارایه شده است.

3- نتایج و بحث

بر اساس روش شناسی این تحقیق تحلیل ریسک روگذری سد با استفاده از روش مونت کارلو معمولی سد جامیشان با ارتفاع 53 متر و سرریزی به عرض 35 متر انجام گرفت. منحنی تغییرات ریسک روگذری سد جامیشان به ازای تعداد شبیه سازی های انجام شده در شکل 5 ارایه شده است.

با ملاحظه شکل 5 مشخص می شود که ریسک شکست سد جامیشان پس از 10000 شبیه سازی مونت کارلو معمولی برابر 2/16 درصد می باشد. برای بررسی زمان انجام محاسبات لازم تحلیل ریسک روگذری بر اساس الگوریتم شبیه سازی مونت کارلو تغییرات زمان اجرای برنامه به ازای تعداد شبیه سازی ها در شکل 6 ارایه شده است.

با ملاحظه شکل 6 مشخص می گردد که زمان لازم برای انجام 10000 شبیه سازی مونت کارلو معمولی در حدود 34 ساعت می باشد. با توجه به این که محاسبات انجام شده با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو معمولی بسیار زمان بر است، از این رو با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو شرطی سعی در کاهش زمان تحلیل ریسک روگذری سد جامیشان گردید.

آن وقایع را بیش از بارش آستانه پیش‌بینی کرده است. C تعداد وقایعی است که در آن سیلاب هدف ایجاد نشده است و منحنی بارش آستانه روگذری سد عمق بارش متناظر با آن وقایع را کمتر از بارش آستانه پیش‌بینی کرده است. با توجه به تقسیم بندی فوق، شبیه‌سازی مونت کارلو شرطی، در حالت f و m با هشدار غلط و یا خطای هشدار¹ مواجه می‌باشد. از این رو از میان منحنی‌های بارش آستانه، منحنی‌ای دقت بیشتر دارد که دارای درصد f و m کمتری باشد. از این رو شاخصی به نام Wr یا خطای هشدار برای انتخاب دقیق‌ترین منحنی بارش آستانه به صورت رابطه ذیل تعریف گردید.

$$Wr = \frac{f + m}{f + c + h + m} \quad (3)$$

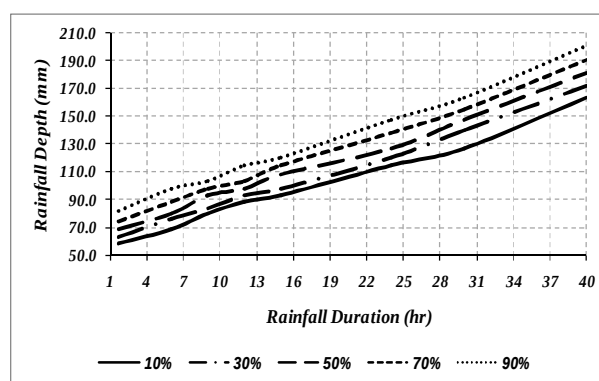
برای محاسبه شاخص Wr و انتخاب دقیق‌ترین منحنی بارش آستانه روگذری برای هر یک از گزینه‌های تحلیل ریسک روگذری سد جامیشان، ده هزار شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گردید. در هر شبیه‌سازی تمام فرایندها از تولید تصادفی بارش، هیدروگراف سیلاب و روندیابی تصادفی سیلاب در مخزن انجام گردید. در نهایت در انتهای هر شبیه‌سازی تراز آب در مخزن سد محاسبه گردید. بر اساس مقایسه عمق بارش در هر شبیه‌سازی مونت کارلو با عمق بارش بحرانی تعداد وقایع f, m, c, h به ازای هر منحنی بارش آستانه محاسبه و در جدول 3 و شکل 8 ارایه شده است. با ملاحظه نتایج از حاصل شکل 8 و جدول 3 مشخص گردید که منحنی بارش آستانه به ازای احتمال وقوع 30 درصد دقیق‌ترین منحنی برای استفاده در تحلیل اعتمادپذیری ارتفاع سد جامیشان می‌باشد.

جدول 3 مشخصات دقت منحنی‌های بارش آستانه روگذری سد جامیشان

عرض سرریز (متر)	احتمال وقوع	h	c	f	m	$Wr(\%)$
35	10%	235	9385	248	132	3/800
	30%	203	9429	280	88	3/680
	50%	173	9458	310	59	3/690
	70%	148	9479	335	38	3/730
	90%	113	9497	370	20	3/900

1. Error of warning

جامیشان مشخص می‌شود که در تمام گزینه‌ها، منحنی‌های بارش آستانه در دستگاه مختصات (مدت بارش-عمق بارش) روندی صعودی دارند، به عبارت دیگر عمق بارشی که منجر به روگذری سد جامیشان می‌شود با افزایش مدت بارش، افزایش می‌یابد.



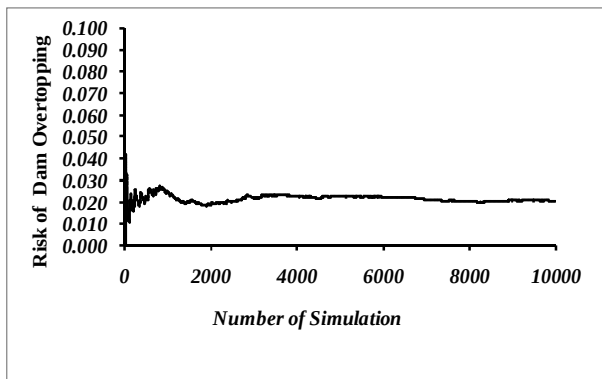
شکل 7 منحنی بارش آستانه روگذری سد جامیشان

جدول 2 مقادیر منحنی بارش آستانه روگذری سد جامیشان بر حسب میلی‌متر

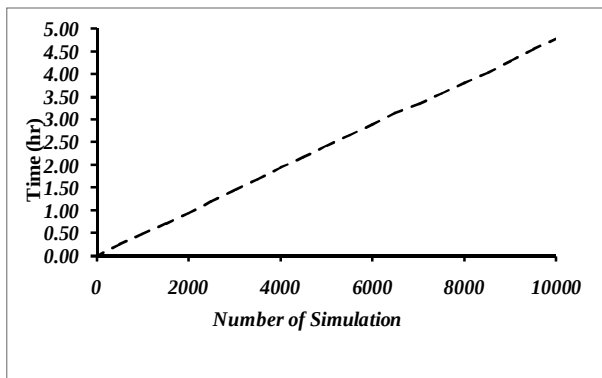
احتمال	مدت بارش (ساعت)							وقوع
	40	30	24	15	12	9	6	1/7
10	163/6	126/6	114/2	93/1	88/4	79/8	68/4	58/5
30	172/2	140/3	120/3	97/9	93/1	84/0	75/8	62/6
50	181/3	147/6	126/6	108/5	97/9	93/1	79/8	68/8
70	190/8	155/4	138/2	114/2	103/1	97/9	88/4	74/4
90	200/8	163/6	147/6	120/3	114/2	103/1	97/9	82/1

در ادامه تحقیق این سوال مطرح شد که کدام منحنی بارش آستانه به ازای چه درصد از احتمال وقوع انتخاب شود؟

برای پاسخ از تقسیم‌بندی وقایع سیلاب استفاده گردید. که در این تقسیم‌بندی h تعداد وقایعی است که در آن سیلاب هدف ایجاد شده است و منحنی بارش آستانه روگذری سد نیز عمق بارش متناظر با آن وقایع را بیش از بارش آستانه پیش‌بینی کرده است. f تعداد وقایعی است که در آن سیلاب هدف ایجاد شده است ولی منحنی بارش آستانه روگذری سد عمق بارش متناظر با آن وقایع را کمتر از بارش آستانه پیش‌بینی کرده است. m تعداد وقایعی است که در آن سیلاب هدف ایجاد نشده است ولی منحنی بارش آستانه روگذری سد عمق بارش متناظر با



شکل 10 تغییرات ریسک روگذری سد جامیشان (مونت کارلو شرطی)

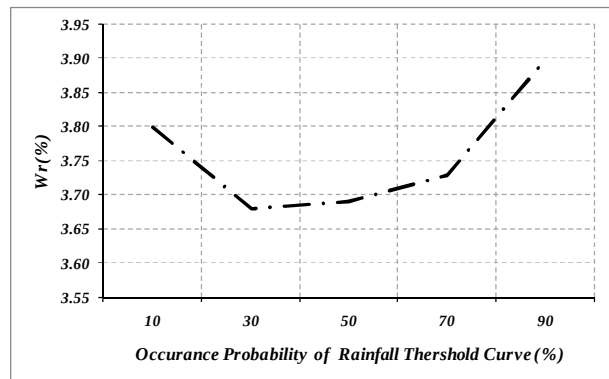


شکل 11 تغییرات زمان اجرای برنامه به ازای تعداد شبیه‌سازی‌ها (مونت کارلو شرطی)

با ملاحظه شکل 11 مشخص می‌شود که زمان لازم برای انجام 10000 شبیه‌سازی مونت کارلو معمولی در حدود 4/8 ساعت می‌باشد. از این رو ملاحظه می‌گردد با پذیرش 6 درصد خطا در محاسبه ریسک روگذری سد جامیشان، زمان محاسبات در حدود 29 ساعت کمتر می‌شود و یا به عبارت دیگر راندمان الگوریتم شرطی معرفی شده در این تحقیق 7 برابر روش مونت کارلو معمولی برای تحلیل ریسک روگذری سد جامیشان است.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به ضعف اصلی روش مونت کارلو معمولی یعنی زمان‌بر بودن آن، سعی گردید با استفاده از تئوری آستانه بارش و تدوین الگوریتم مونت کارلو شرطی این ضعف مرتفع شود. با بررسی نتایج حاصل از تحقیق مشخص شد که با افزایش مدت بارش، عمق بارشی که

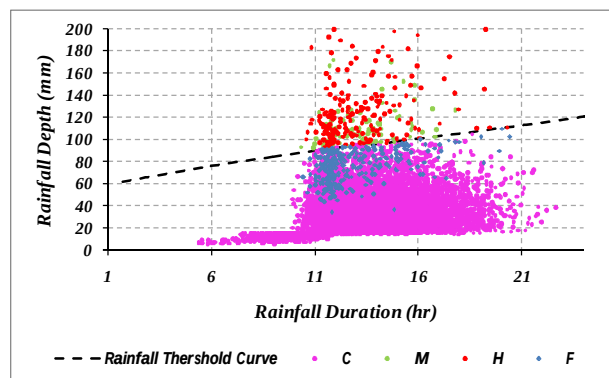


شکل 8 تغییرات شاخص W_r منحنی بارش آستانه به ازای احتمالات وقوع مختلف

تقسیم‌بندی وقایع بر اساس منحنی بارش آستانه لبریز شدن به ازای احتمال وقوع 30 درصد در شکل 9 ارایه شده است.

با استفاده از منحنی بارش آستانه روگذری سد جامیشان به ازای وقوع 30 درصد و تلفیق آن با شبیه‌سازی مونت کارلو معمولی، ریسک روگذری سد جامیشان به ازای 10000 شبیه‌سازی محاسبه و در شکل 10 ارایه شده است.

با ملاحظه شکل 10 مشخص می‌شود که ریسک شکست سد جامیشان پس از 10000 شبیه‌سازی مونت کارلو معمولی برابر 2/03 درصد می‌باشد. برای بررسی زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات لازم تحلیل ریسک روگذری بر اساس الگوریتم شبیه‌سازی مونت کارلو شرطی تغییرات زمان اجرای برنامه به ازای تعداد شبیه‌سازی‌ها در شکل 11 ارایه شده است.



شکل 9 تقسیم‌بندی وقایع بر اساس منحنی بارش آستانه لبریز شدن

α درصد اختلاف از دبی هدف
 β درصد تغییرات ارتفاع بارش در هر شبیه‌سازی

6- منابع

شرافتی، ا. و ذهبیون، ب. (1392). تحلیل ریسک روگذری سد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی. مجله هیدرولیک. دوره 8، شماره 1، ص.ص. 1-17

Alfieri, L., Velasco, D. and Thielen, J. (2011). "Flash flood detection through a multi-stage probabilistic warning system for heavy precipitation events". *Adv. Geosci.* 29, 69–75.

Amadio, P., Mancini, M., Menduni, G., Rabuffetti, D. and Ravazzani, G. (2003). "A real time flood forecasting system based on rainfall thresholds working on the Arno watershed: definition and reliability analysis". *Proceedings of the 5rd EGS Plinius Conference held at Ajaccio, Corsica, France.*

Annunziati, A., Focardi, A., Focardi, P., Martello, S., and Vannocci, P. (1999). "Analysis of the rainfall thresholds that induced debris flows in the area of Apuan Alps-Tuscany", Italy, *Plinius Conference '99: Mediterranean Storms*, Ed. Bios., 485–493.

Bacchini, M. and Zannoni, A. (2003). "Relations between rainfall and triggering of debris-flow: a case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy)". *Nat. Hazard Earth. Sys.* 3: 71–79.

Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F. and Sangati, M., (2007). "Hydrometeorological analysis of the August 29, 2003 flash flood in the eastern Italian Alps". *Journal of Hydrometeorology* 8 (5), 1049–1067.

Carpenter, T. M., Sperflage J. A., Georgakakos K. P., Sweeney, T., and Fread, D. L. (1999). "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems", *J. Hydrol.*, 224, 21–44.

Collier, C. G. (2007). "Flash flood forecasting: What are the limits of predictability?", *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 3–23.

Dahal, R.K. and Hasegawa, S., (2008). "Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya", *Geomorphology*, 100 (3-4), 429-443.

Georgakakos, K. P. (2006). "Analytical results for operational flash flood guidance", *J. Hydrol.*, 317,

منجر به روگذری سد جامیشان می‌شود، افزایش می‌یابد. همچنین بر اساس نتایج شاخص خطای هشدار (Wr) مشخص شد، منحنی بارش آستانه به ازای احتمال وقوع 30 درصد دقیق‌ترین منحنی برای استفاده در تحلیل اعتمادپذیری ارتفاع سد جامیشان است. همچنین در حالتی که از روش مونت‌کارلو معمولی با ده هزار شبیه‌سازی برای تحلیل ریسک روگذری استفاده شد، مقدار ریسک روگذری برابر 2/16 درصد و مدت زمان اتمام شبیه‌سازی‌ها 34 ساعت بود. سپس با استفاده از روش مونت‌کارلو شرطی با همان تعداد شبیه‌سازی، ریسک روگذری برابر 2/03 درصد و زمان اتمام شبیه‌سازی‌ها 4/8 ساعت برآورد گردید. از این رو ملاحظه می‌گردد با پذیرش 6 درصد خطا در محاسبه ریسک روگذری سد جامیشان، زمان محاسبات در حدود 29 ساعت کمتر می‌شود و یا به عبارت دیگر راندمان الگوریتم شرطی معرفی شده در این تحقیق 7 برابر بیشتر از روش مونت‌کارلو معمولی در تحلیل ریسک روگذری سد جامیشان است.

5- فهرست علائم

a	پارامتر ابتدایی تابع مثلی
b	پارامتر انتهایی تابع مثلی
c	پارامتر ارتفاعی تابع مثلی
CO	ضریب اولیه تخلیه سیلاب
$E(i,j)$	تراز آب تولیدی
Et	تراز هدف
He	تراز انرژی در مخزن سد
Ka	ضریب تأثیر شکل کناره‌های ورودی سرریز
Kp	ضریب تأثیر شکل پایه
L	بارگذاری سیستم
$P(i,j)$	عمق بارش
R	مقاومت سیستم
$RTIOR$	ضریب کاهش دبی
Sp	شیب وجه بالادست سرریز
Tj	مدت بارش
$Tmax$	حداکثر مدت بارش مدنظر
W	تابع عملکرد سیستم

- an operative case study", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 135–144.
- Montesarchio, V., Ridolfi, E., Russo, F. and Napolitano, F. (2011). "Rainfall threshold definition using an entropy decision approach and radar data". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 2061–2074.
- Neary, D. G. and Swift, L. W. (1987). "Rainfall thresholds for triggering a debris flow avalanching event in the southern Appalachian Mountains", *Rew. Eng. Geol.*, 7, 81–95.
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E. and Anquetin, S., (2008). "Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins". *Journal of Hydrology* 362 (3-4), 274–290.
- Oosterbaan, R.J. (1994). *Frequency and regression analysis. drainage principles and applications*, Chapter 6. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen
- Paik, K (2008). "Analytical derivation of reservoir routing and hydrological risk evaluation of detention basins", *Journal of Hydrology* 352, pp. 191– 201.
- Sharafati, A., and Zahabiyou, B. (2014). "Rainfall threshold curves extraction by considering rainfall-runoff model uncertainty". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(10), 6835-6849.
- USACE (1998). HEC-1 flood hydrograph package user's manual. Davis, CA: Hydrologic Engineering Centre.
- Thompson K.D., Stedinger, J.R. and Heath. D.C. (1997). "Evaluation and presentation of dam failure and flood risks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123 (4), pp. 216-227.
- Yanmaz, A.M. (2000). "Overtopping risk assessment in river diversion facility design", *Canadian Journal of Civil Engineering* 27(2). PP.319-326
- Yenigun, K. and Erkek, C. (2007). "Reliability in dams and the effects of spillway dimensions on risk levels". *Water Resources Management* , Vol. 21, No. 4, pp. 747-760.
- Zhao, B., Tung, Y.K., Yeh, K.C. and Yang, J.C., (1997). "Reliability analysis of hydraulic structures considering unit hydrograph uncertainty", *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 11, pp. 33-50.
- 81–103.
- Golian S., Saghaian B. and Maknoon R. (2010). "Derivation of probabilistic thresholds of spatially distributed rainfall for flood forecasting", *Water Resources Management*, Vol. 24, No. 13, pp. 3547-3559.
- Goodarzi E., Mirzaei M., Shui, L.T. and Ziaei, M. (2011). "Evaluation dam overtopping risk based on univariate and bivariate flood frequency analysis. *Hydrol". Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 9757–9796.
- Crosta, G. B. and Frattini, P. (2000). "Rainfall thresholds for soil slip and debris flow triggering", *Proceedings of the EGS 2nd Plinius Conference on Mediterranean Storms*, Ed. Bios.
- Hsu, Y.C, Tung, Y.K. and Kuo, J.T. (2011). "Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind". *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 25:35–49.
- International Commission on Large Dams (ICOLD). (1973). *Lessons from dam incidents (reduced edition)*. ICOLD, Paris.
- Javelle, P., Fouchier, C., Arnaud, P., and Lavabre, J.(2010). "Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations", *J. Hydrol.*, 394, 267–274.
- Kuo, J.T., Yen, B.C., Hsu, Y.C, and Lin, H.F. (2007). "Risk analysis for dam overtopping—Feitsui reservoir as a case study". *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (8), PP. 955–963
- Kuo, J.T., Hsu, Y.C., Tung, Y.K., Yeh, K.C., and Wu, J.D., (2008). "Dam overtopping risk assessment considering inspection program", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22 (3), PP. 303–313.
- Kwon, H.H. and Moon, Y. (2006). "Improvement of overtopping risk evaluations using probabilistic concepts for existing dams", *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 20, PP. 223–237.
- Martina, M. L. V., Todini, E., and Libralon, A. (2005). "A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 413–426.
- Mendicino, G. (2006). "Rainfall and hydrometric thresholds for flood warning. the Esaro river case study", *Proceedings of the Amhy-Friend International Workshop on Hydrological Extremes*, University of Calabria, Cosenza (Italy), May 3-4.
- Montesarchio, V., Lombardo, F., and Napolitano, F. (2009). "Rainfall thresholds and flood warning: