

## تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی ریسک روگذری سد مارون با استفاده از روش مونت کارلو و روش مربع لاتین

جمال محمد ولی سامانی<sup>۱</sup> - حامد رادمهر<sup>۲</sup> - مجید دلآور<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۱۵

### چکیده

سد خاکی به دلایل نشست پی و خزش، روگذری، فرسایش سرریز، لغزش و غیره تخریب می‌شود که روگذری عمده‌ترین دلایل شکست سد می‌باشد. از طرفی طراحی سدها تحت تاثیر عدم قطعیت و پتانسیل شکست می‌باشد لذا آنالیز ریسک و عدم قطعیت در طراحی سدهای مخزنی از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف اصلی در این تحقیق ارائه روش‌هایی برای آنالیز عدم قطعیت و برآورد ریسک روگذری سد می‌باشد. از دبی ورودی سالانه به مخزن سد مارون جهت آنالیز هفت رخداد سیل حدی با دوره بازگشت‌های مختلف استفاده شده است. عدم قطعیت بالاترین ارتفاع سطح آب مخزن در این هفت سیل با استفاده از روندیابی مخزن و بررسی اثر چهار عامل غیرقطعی تاثیرگذار در آن محاسبه شد. آنالیز عدم قطعیت و ریسک روگذری در این مطالعه از با روش‌های: (۱) شبیه سازی مونت کارلو (MCS) (۲) شبیه سازی مربع لاتین (LHS)، صورت می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که عدم قطعیت ارتفاع آب در روش مونت کارلو بیشتر از روش مربع لاتین بوده از طرفی ریسک روگذری محاسبه شده در روش مربع لاتین بیشتر از روش مونت کارلو می‌باشد. همچنین افزایش دبی ورودی نسبت به افزایش دوره بازگشت در تغییرات ریسک روگذری سد مارون موثرتر است.

**واژه‌های کلیدی:** دوره بازگشت، سد خاکی، شبیه سازی، شکست سد

### مقدمه

از آن جایی که طراحی و عملکرد سدها همیشه تحت تاثیر عدم قطعیت و پتانسیل شکست هستند محاسبه ریسک شکست با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها لازم و ضروری خواهد بود. در این راستا محاسبه ریسک روگذری درسدها برای بدست آوردن ایمنی سد، از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد.

مطالعات مختلفی در زمینه ریسک روگذری صورت گرفته است: چنگ (۱) مدل سازی ریسک روگذری را با روش‌های انتگرال گیری مستقیم، روش شبیه سازی مونت کارلو، روش مرتبه اول-ممان دوم و روش پیشرفته مرتبه اول-ممان دوم انجام داد و به تاثیر بسزای دبی ورودی به مخزن در افزایش ریسک روگذری اشاره کرد. زاوو و همکاران (۷) در آنالیز اطمینان سازه‌های هیدرولیکی به بررسی عدم قطعیت هیدروگراف واحد با روش شبیه سازی مونت کارلو و تکنیک روندیابی پرداختند. کوون و مون (۵) سه روش جدید برای تحلیل ریسک روگذری ارائه کرده‌اند که عبارتند از روش‌های تقریب چگالی غیر پارامتریک، استفاده از روش مربع لاتین برای بهبود روش مونت کارلو و استفاده از نمونه سازی خودکار برای تعیین سطح آب اولیه مخزن. کاوو و همکاران (۳) از روش تقریبی رزنبولونت، روش تقریبی نقطه‌ای هار، روش شبیه سازی مونت کارلو، روش تقریبی مرتبه

شکست سازه‌هایی نظیر سد باعث از بین رفتن زندگی انسان‌ها و خسارات مالی زیاد می‌شود. اگر در ایمنی ساختاری سد، شک و تردیدی وجود داشته باشد، نمی‌توان ضمانتی برای جان مردمی که در پایین دست آن زندگی می‌کنند داشت. لذا تعیین و توجه به ایمنی سد در اولویت می‌باشد (۳).

شکست سد بواسطه عدم قطعیت عوامل طبیعی و محیطی، مشکلات طراحی و ساخت می‌باشد لذا شکست سد یک اتفاق قطعی نبوده و ارزیابی کمی ایمنی سد نیاز به یک تئوری احتمالاتی دارد. سد خاکی به دلایل نشست پی و خزش، روگذری، فرسایش سرریز، لغزش و غیره تخریب می‌شود که نشست پی و روگذری عمده ترین دلایل شکست سد می‌باشد (۱). روگذری زمانی رخ می‌دهد که سطح آب مخزن تا لبه سد بالا بیاید. این ممکن است ناشی از عدم تطبیق زمانی خارج شدن سیل از طریق سرریزها و خروجی‌ها باشد.

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استاد، دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی و استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس  
\* - نویسنده مسئول: (Email: m.delavar@modares.ac.ir)

مربع لاتین برای محاسبه ریسک روگذری سد و ارزیابی عدم قطعیت و همچنین محاسبه بیشترین ارتفاع سطح آب در طول رخ داد سیل‌های مختلف استفاده گردید. به منظور ارزیابی کاربرد روش‌های یاد شده نیز، سد مارون به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. شکل ۱ نشان دهنده روند کار در این مقاله می‌باشد که شامل پنج قسمت است: (۱) شناسایی و ارزیابی عوامل مهم و اثرگذار در روندیابی سیل و روگذری سد (۲) جمع‌آوری داده‌ها و تعیین توابع چگالی عوامل غیر قطعی (۳) روندیابی مخزن و آنالیز عدم قطعیت آن (۴) محاسبه تابع روگذری سیل (۵) تحلیل ریسک

### مواد و روش‌ها

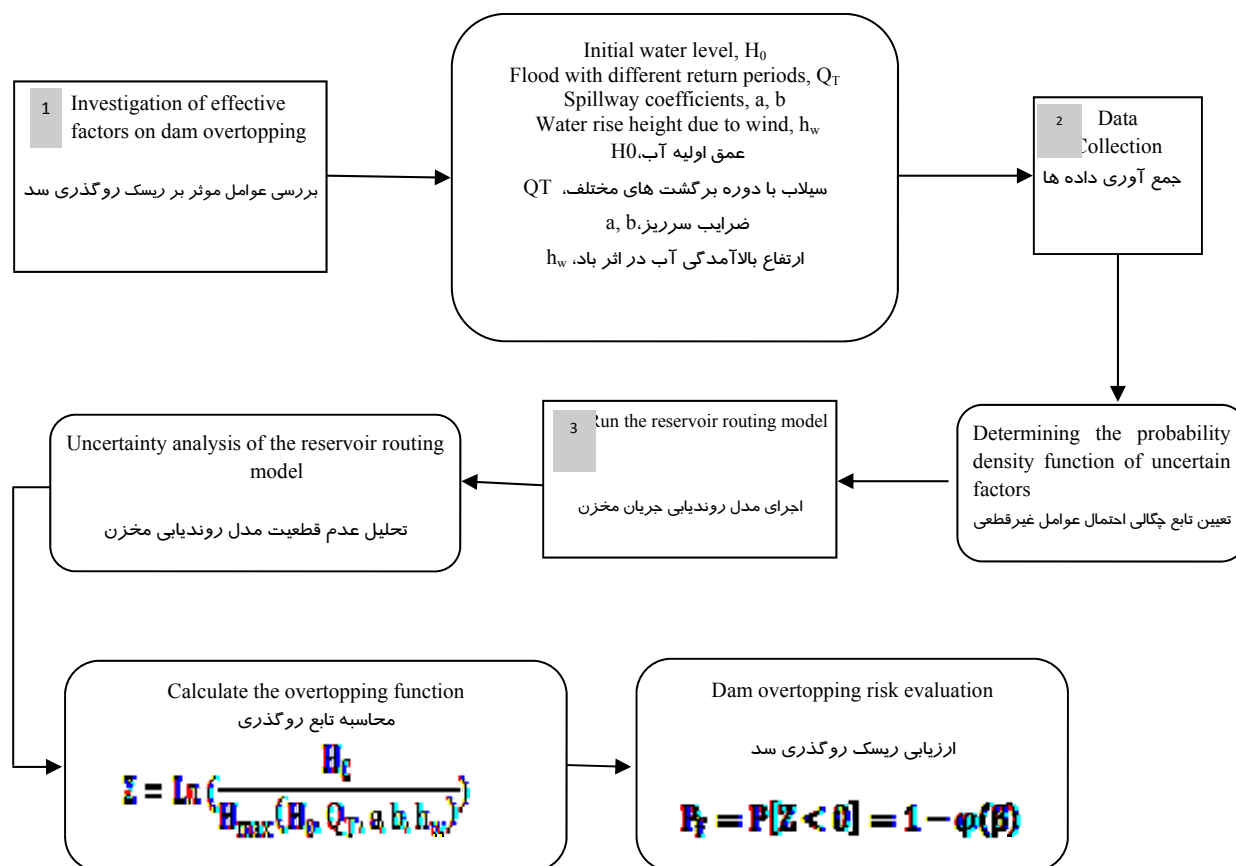
#### آنالیز ریسک

ریسک به عنوان عدم موفقیت در یک سیستم ناشی از عدم قطعیت‌های متغیرهای فشار (L) و مقاومت (R) می‌باشد. ابزار کلی برای تعیین ریسک بصورت ریاضی به شکل زیر می‌باشد:

اول-کمان دوم و روش شبیه‌سازی مربع لاتین برای بررسی ریسک روگذری استفاده کردند و بیان کردند روش‌های تقریبی مقادیر بیشتری نسبت به روش‌های شبیه‌سازی حاصل می‌کند. گودرزی و همکاران (۲) به بررسی ریسک روگذری در سد بر پایه آنالیز یک متغیره و دو متغیره دوره بازگشت سیل با روش‌های مونت کارلو و مربع لاتین پرداختند و بیان کردند سطح اولیه آب مخزن مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار در مقدار ریسک روگذری سد بوده است. منصوری (۸) به بررسی ریسک روگذری سد با روش‌های مونت کارلو و مربع لاتین پرداخته است و در نتیجه بیان نمود که سطح اولیه آب مخزن تاثیر چندانی در میزان ریسک روگذری سد و نک نداشته و مهم‌ترین عامل دبی ورودی به مخزن سد می‌باشد.

با توجه به طیف گسترده مطالعات در این زمینه ارزیابی سیستماتیک ریسک روگذری سد با لحاظ عوامل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی موثر کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

هدف این مقاله ارائه یک روش شناسایی عملی و مقایسه روش‌های مختلف آنالیز عدم قطعیت در ارزیابی ریسک روگذری سدها بوسیله سیل می‌باشد. بدین منظور روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و

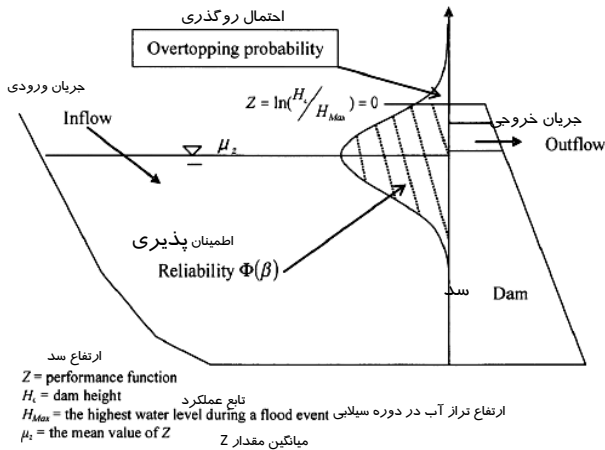


شکل ۱- روند نمای ارزیابی ریسک روگذری سد

Figure 1- Flowchart of Dam Overtopping Risk Evaluation

$Z = \ln(R/L)$  شاخص اعتمادپذیری است که عکس ضریب تغییرات  $Z$  است؛ و  $\Phi(\beta)$  احتمال نرمال تجمعی مربوط به  $\beta$  است (شکل ۳). ریسک روگذری شرطی،  $P(O_T|Q_T, H_0)$  را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$P(Q_T, H_0) = P[Z(Q_T, H_0) < 0] = 1 - \Phi[\beta(Q_T, H_0)] \quad (۹)$$



شکل ۲- برآورد ریسک روگذری سد (۳)  
Figure 2- Estimation of dam overtopping risk (3)

### آنالیز عدم قطعیت تابع ارزیابی روگذری

هدف آنالیز عدم قطعیت تعیین ویژگی‌های آماری خروجی‌های سیستم و یا بررسی اثر عوامل تغییر پذیر در عکس العمل سیستم می‌باشد. انتخاب روش مناسب آنالیز عدم قطعیت به ماهیت مسئله، اطلاعات در دسترس، پیچیدگی مسئله و نوع نتایج مورد نظر بستگی دارد (۶).

مرسوم ترین روش‌های مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی عبارتند از (۴): (۱) روش شبیه سازی مونت کارلو (۲) روش نمونه‌گیری مربع لاتین

### شبیه‌سازی مونت کارلو

یکی از روش‌های ارزیابی عدم قطعیت و آنالیز ریسک که کاربرد زیادی در علوم مختلف دارد روش شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد. در این روش برای تهیه اعداد تصادفی با حفظ توزیع آماری آن‌ها، از تابع تجمعی احتمال استفاده می‌شود. این تابع را با  $F_X(X)$  نشان می‌دهند که یک تابع صعودی و مقدار آن در بازه  $[0, 1]$  تغییر می‌کند (۳).

در این روش ابتدا توزیع آماری پارامترهای ورودی تعیین و تابع توزیع تجمعی آن‌ها همراه با احتمال‌های مربوطه بدست می‌آید و سپس اعداد تصادفی بین صفر تا ۱ تولید می‌شود. آنگاه به تعداد مورد نظر نمونه از تابع توزیع تجمعی پارامترها به ازای هر عدد تصادفی ایجاد می‌گردد. جهت ارزیابی ریسک از پارامترهای میانگین و ضریب

$$p_f = p[L > R] \quad (۱)$$

که ریسک سیستمی می‌باشد. معادله ۱ را می‌توان به شکل زیر نیز بیان نمود:

$$p_f = p[R - L < 0] \quad (۲)$$

که این معادله را می‌توان به حالت کلی زیر نوشت:

$$p_f = p[Z < 0] \quad (۳)$$

که  $Z$  به عنوان تابع ارزیابی تعریف می‌شود که تابعی از اجزاء متغیرهای مقاومت و فشار می‌باشد. این تابع بر اساس تابع توزیع آن می‌تواند به اشکال متفاوتی داشته باشد. به عنوان مثال در صورتی که تابع توزیع آن به صورت لوگ نرمال باشد تابع ارزیابی می‌تواند به صورت معادله ۴ بیان گردد:

$$Z = \ln(R/L) \quad (۴)$$

### تحلیل ریسک روگذری سد

روگذری به حالتی گفته می‌شود که بخش خروجی سیلاب قادر به تخلیه آب با سرعت کافی نباشد و سطح آب از ارتفاع تاج سد بالاتر بیاید. در بررسی ریسک روگذری سد متغیرهای فشار شامل ارتفاع اولیه آب مخزن و ارتفاع بالآمدهگی آب ناشی از وقوع سیل و متغیر مقاومت شامل ارتفاع تاج سد می‌باشد.

اگر  $H_f$  ارتفاع بالا آمده آب مخزن بوسیله اثر نیروی سیل ( $F$ ) و  $H_c$  ارتفاع تاج سد و  $H_0$  ارتفاع سطح اولیه آب مخزن قبل از وقوع  $F$  باشد آنگاه روگذری زمانی رخ می‌دهد که  $H_f + H_0 > H_c$  شود. لذا ریسک روگذری  $p_f$  بصورت زیر خواهد بود:

$$p_f = p[H_f + H_0 > H_c] = p[H_f > H_c - H_0] \quad (۵)$$

لذا تابع ارزیابی به این صورت تعریف می‌شود:

$$Z = \ln(H_c / H_{max}) \quad (۶)$$

که در آن،  $H_c$  ارتفاع تاج سد و  $H_{max}$  بالاترین ارتفاع آب در طی رویداد سیلاب است که می‌توان آن را با روندیابی مخزن با در نظر گرفتن فاکتورهای عدم قطعیت ارزیابی نمود.

تلفیق فاکتورهای عدم قطعیت مورد نظر در این تحقیق با تابع ارزیابی، که مشروط به سطح اولیه آب در پشت سد ( $H_0$ ) و دوره بازگشت سیلاب  $T$  ساله ( $Q_T$ ) می‌باشد را می‌توان به این صورت نشان داد:

$$Z(H_0, Q_T) = \ln(H_c / H_{max}[H_0, Q_T, a, b]) \quad (۷)$$

که در آن،  $H_c$  ارتفاع سد؛  $H_0$  سطح آب اولیه در مخزن؛  $Q_T$  حداکثر تخلیه در دوره بازگشت سیلاب  $T$  ساله و  $a$  و  $b$  ضرایب منحنی حجم مخزن می‌باشند. با فرض اینکه  $Z$  توزیع نرمال دارد، اعتمادپذیری  $\alpha$  از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \Phi(\mu_z / \sigma_z) = \Phi(\beta) \quad (۸)$$

که در آن،  $\mu_z$  و  $\sigma_z$  به ترتیب، میانگین و ضریب تغییرات  $Z$  هستند؛

تغییرات مدل خروجی استفاده می‌شود.

ورودی را در یک دوره بازگشت معین به دست آورد. در جدول ۱ مقادیر میانگین و انحراف معیار جریان در دوره بازگشت‌های مختلف آورده شده است.

### نمونه برداری مربع لاتین

روش نمونه برداری مربع لاتین یکی دیگر از روش‌های آنالیز عدم قطعیت می‌باشد و از جمله روش‌های نمونه برداری آماری بوده که توزیع احتمال پارامترهای ورودی را طبقه‌بندی کرده تا نمونه‌های تصادفی یکنواخت از مقادیر تصادفی متغیرها تولید کند (۳). در این روش تابع توزیع تجمعی پارامترها را با طبقه‌بندی کردن به بخش‌های مساوی با احتمال یکسان در نظر می‌گیرند و نمونه‌های مورد نظر نیز به همان مقدار ایجاد می‌شود. در این روش نیز جهت ارزیابی ریسک از پارامترهای میانگین و ضریب تغییرات مدل خروجی استفاده می‌شود.

### مطالعه موردی

سد مارون که از سال ۱۳۷۷ مورد استفاده می‌باشد و در پایین‌دست رودخانه مارون که انشعابی از رودخانه جراحی است قرار دارد. این سد به فاصله ۱۹ کیلومتری در شمال شرقی شهرستان بهبهان به مختصات ۵۰ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی و ۳۰ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی واقع شده است. سد مارون با ارتفاع ۱۶۵ متر، یکی از بلندترین سدهای سنگریزه‌ای در کشور می‌باشد. حوضه آبخیز بالادست آن ۳۸ هزار هکتار مساحت دارد و حجم کل مخزن  $1/2 \times 10^9$  متر مکعب است. کاربردهای اصلی این مخزن، تامین آب آشامیدنی، تولید برق آبی، و کنترل سیلاب‌ها می‌باشد.

### نتایج و بحث

#### تحلیل فراوانی سیلاب و تعیین عدم قطعیت حداکثر جریان ورودی به سد

همان‌طور که بیان شد روگذری سد ممکن است بر اثر یک یا ترکیبی از وقایع نظیر سیل، لغزش زمین، زلزله و بادهای شدید رخ دهد. سیل‌های بزرگ بیشترین تاثیر را بر روگذری داشته لذا آنالیز فراوانی سیلاب از اهمیت بسیاری در محاسبه ریسک روگذری برخوردار است. بدین منظور در این مطالعه از داده‌های حداکثر دبی سالانه طی دوره آماری ۱۳۴۴ تا ۱۳۸۵ در ایستگاه ایدنک استفاده گردید. به منظور تحلیل فراوانی سیلاب، ابتدا برآزش توزیع‌های چگالی احتمال نرمال، لوگ نرمال، پیرسون نوع ۳، لوگ پیرسون نوع ۳، گامبل و گاما به وسیله آزمون زیندگی مجذور کای بررسی شد که نتایج نشان داد که توزیع لوگ نرمال برای سیلاب برآزش بهتری نسبت به دیگر توزیع‌ها دارد. با توجه به تحلیل فراوانی داده‌های مشاهداتی می‌توان مقادیر میانگین و انحراف معیار حداکثر جریان

جدول ۱ - میانگین و انحراف معیار جریان در دوره بازگشت‌های مختلف

Table 1 - Mean and standard deviation of inflow in various return periods

سیلاب Flood		
دوره بازگشت (سال) Return Period (Year)	انحراف معیار Standard Deviation	میانگین Mean ( $m^3/s$ )
2	4	54
50	17	129
100	21	147
1000	38	210
2000	43	228
5000	49	252
10000	60	283

### فاکتورهای عدم قطعیت

از بین عوامل شناسایی شده در بررسی رفتار سیستم‌های تخلیه کننده طغیان نظیر سد، پارامترهایی چون دبی ورودی، تراز اولیه آب مخزن، منحنی تراز-حجم مخزن سد، ظرفیت سرریز و ... می‌توانند مشمول عدم قطعیت‌های گوناگون باشند. در این مطالعه، غیر از عدم قطعیت حداکثر دبی ورودی به مخزن، عدم قطعیت عواملی چون: تراز اولیه آب در مخزن و جریان خروجی از سرریز مد نظر قرار داده شد. سطح متوسط آب در مخزن سد مارون از روی داده‌های سطح آب مخزن که در فصل بارانی جمع آوری شده است تخمین زده می‌شود و برابر با ۴۷۰ متر از سطح دریا می‌باشد. این مطالعه به منظور بررسی عدم قطعیت تراز اولیه سطح آب در مخزن، پنج سطح آب اولیه برای مخزن در نظر گرفته شد: ۴۷۰، ۴۷۸، ۴۸۵، ۴۹۳ و ۵۰۴ متر از سطح دریا. جریان خروجی از سرریز تابعی از ارتفاع آب در روی سرریز می‌باشد، برای تعیین عدم قطعیت جریان خروجی از سرریز به عنوان عامل هیدرولیکی، روابط مختلف بین دبی خروجی سرریز و ارتفاع سطح آب روی آن از داده‌های موجود بررسی و نهایتاً با برآزش مناسب یک رابطه خطی ( $Q = a.H + b$ ) مقدار عدم قطعیت جریان خروجی از سرریز بیان گردید. در این رابطه مقدار پارامتر  $a$  برابر ۰/۲۱۵ با انحراف معیار ۰/۰۰۳۸ و مقدار  $b$  برابر ۱۰/۱۲ با انحراف معیار ۱/۲ می‌باشد. در جدول ۲ به طور خلاصه مشخصات آماری عوامل دارای عدم قطعیت آورده شده است.

جدول ۲ - مشخصات آماری عوامل عدم قطعیت

Table 2 – Statistical characteristics of uncertainty factors

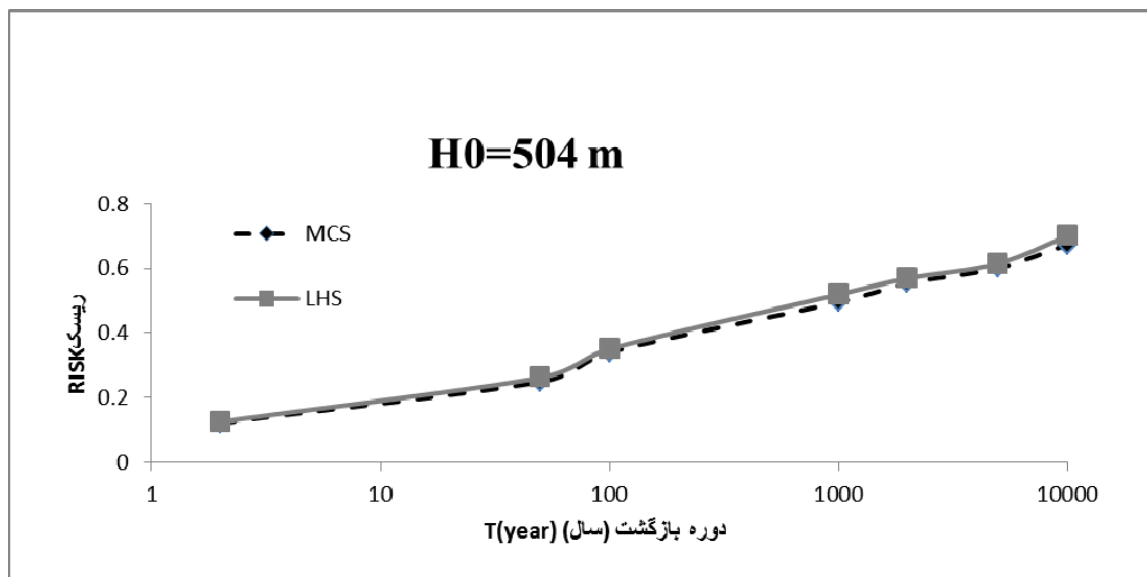
عوامل عدم قطعیت Uncertainty Factors	واحد Unit	میانگین Mean	انحراف از معیار Standard Deviation	نوع توزیع Distribution Type	توضیحات Description
سطح اولیه آب (H <sub>0</sub> ) Initial Water Level	m	470	5	نرمال Normal	از ارتفاع ۴۷۰ تا ۵۰۴ From high 470 to 504
سیلاب مربوط به دوره بازگشت T ساله (Q <sub>T</sub> ) Flood with T return period	m <sup>3</sup> /s	-	-	لوگ نرمال Log Normal	جدول ۱ Table 1
a	-	0.215	0.00038	نرمال Normal	
b	-	101.2	1.2	نرمال Normal	

روش پالس استفاده شد.

مقادیر آنالیز عدم قطعیت ارتفاع آب مخزن سد مارون در جدول ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مقادیر بدست آمده از روش مونت کارلو در نقاط مختلف بیشتر از مقادیر روش مربع لاتین می باشد و بازه تغییرات آن نیز در روش مونت کارلو بیشتر است. همچنین این مقادیر در هر دو روش برای یک ارتفاع اولیه سطح آب ثابت با افزایش دوره بازگشت، افزایش می یابد و برای سطوح مختلف آب مخزن در یک دوره بازگشت ثابت، انحراف معیار ثابت می باشد که این نشانه بی اثر بودن سطح اولیه آب مخزن در مقدار عدم قطعیت ارتفاع آب می باشد.

### نتایج و بحث

با در نظر گرفتن چهار فاکتور عدم قطعیت، دو روش آنالیز عدم قطعیت (مونت کارلو و مربع لاتین) جهت آنالیز عدم قطعیت و ارزیابی ریسک روگذری در سد مارون تحت پنج سطح اولیه آب مختلف و هفت دوره بازگشت مختلف سیلاب، بکار برده شد. برای این روش ها در این مقاله تعداد ۱۰۰۰ عدد نمونه تولید شد. پنج سطح اولیه آب مخزن برای روندیابی سیل برابر ۴۷۰، ۴۷۸، ۴۸۵، ۴۹۳ و ۵۰۴ متر بوده که دارای انحراف از معیار یکسان ۵ متر می باشند. دوره بازگشت های ۲، ۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ سال جهت مقادیر مختلف سیلاب در نظر گرفته شد. جهت روندیابی مخزن از



شکل ۳ - ریسک روگذری در تراز اولیه آب مخزن ۵۰۴ متر

Figure 3 – Overtopping risk for 504 meter initial water level of the reservoir

جدول ۳ - مقادیر عدم قطعیت ارتفاع آب مخزن سد مارون

Table 3 - Uncertainty of water elevation in Maroon dam

سطح اولیه مخزن (متر) Initial Reservoir Level (m) H0(m)	دوره بازگشت T(year)	انحراف معیار (MCS) Standard deviation (MCS)	انحراف معیار (LHS) Standard Deviation (LHS)
470	2	16.48	16.06
	50	16.87	16.29
	100	17.22	16.24
	1000	17.74	16.64
	2000	17.99	16.72
	5000	18.2	16.81
	10000	18.5	16.93
478	2	16.48	16.06
	50	16.87	16.29
	100	17.22	16.24
	1000	17.74	16.64
	2000	17.99	16.72
	5000	18.2	16.81
	10000	18.5	16.93
485	2	16.48	16.06
	50	16.87	16.29
	100	17.22	16.24
	1000	17.74	16.64
	2000	17.99	16.72
	5000	18.2	16.81
	10000	18.5	16.93
493	2	16.48	16.06
	50	16.87	16.29
	100	17.22	16.24
	1000	17.74	16.64
	2000	17.99	16.72
	5000	18.2	16.81
	10000	18.5	16.93
504	2	16.48	16.06
	50	16.87	16.29
	100	17.22	16.24
	1000	17.74	16.64
	2000	17.99	16.72
	5000	18.2	16.81
	10000	18.5	16.93

ریسک در دو روش مونت کارلو و مربع لاتین به جهت متفاوت بودن روش تولید نمونه در آن‌ها می‌باشد و همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر ریسک با روش مربع لاتین در دوره بازگشت‌های بالا مقادیر بیشتری نسبت به روش مونت کارلو نشان می‌دهد.

شکل ۳ نشان دهنده نتایج محاسبه شده ریسک روگذری سد مارون، برای سطح اولیه آب مخزن ۵۰۴ متر می‌باشد که به عنوان نمونه آورده شده و مقادیر ریسک آن و سایر سطوح اولیه سطح آب در جدول ۳ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که روند نمودارهای ریسک محاسبه شده با این دو روش تقریباً یکسان می‌باشد. تفاوت در مقادیر

جدول ۴ - ریسک روگذری برای ارتفاع‌های مختلف تراز اولیه سطح آب و دوره بازگشت‌های مختلف

Table 4 – Overtopping risk for various initial water levels and return periods

Return Period (years) دوره بازگشت (سال)	H0 سطح اولیه مخزن Initial Reservoir Level	MCS مونت کارلو	LHS مربع لاتین
2	470	0	0.001
50		0.005	0.006
100		1.00E-02	0.012
1000		0.028	0.03
2000		0.032	0.04
5000		0.049	0.056
10000		0.087	0.092
2		478	0.001
50	0.009		0.01
100	0.02		0.024
1000	0.043		0.052
2000	0.056		0.062
5000	0.083		0.096
10000	0.13		0.136
2	485		0.006
50		0.021	0.024
100		0.038	0.046
1000		0.085	0.098
2000		0.118	0.123
5000		0.145	0.156
10000		0.205	0.218
2		493	0.013
50	0.055		0.058
100	0.093		0.097
1000	0.17		0.176
2000	0.207		0.223
5000	0.256		0.266
10000	0.328		0.345
2	504		0.075
50		0.161	0.166
100		0.24	0.247
1000		0.368	0.38
2000		0.418	0.439
5000		0.475	0.509
10000		0.572	0.586

آب می‌باشد و  $Risk_{T=2, H_0=470}$  ریسک روگذری در دوره بازگشت ۲ سال و سطح اولیه آب ۴۷۰ متر است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دوره بازگشت در مقایسه با افزایش سطح اولیه آب در افزایش مقدار ریسک مهم‌تر است (جدول ۴). نسبت ریسک‌های روگذری در کارلو به عنوان نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است.

#### آنالیز حساسیت روش‌های ارزیابی ریسک روگذری سد

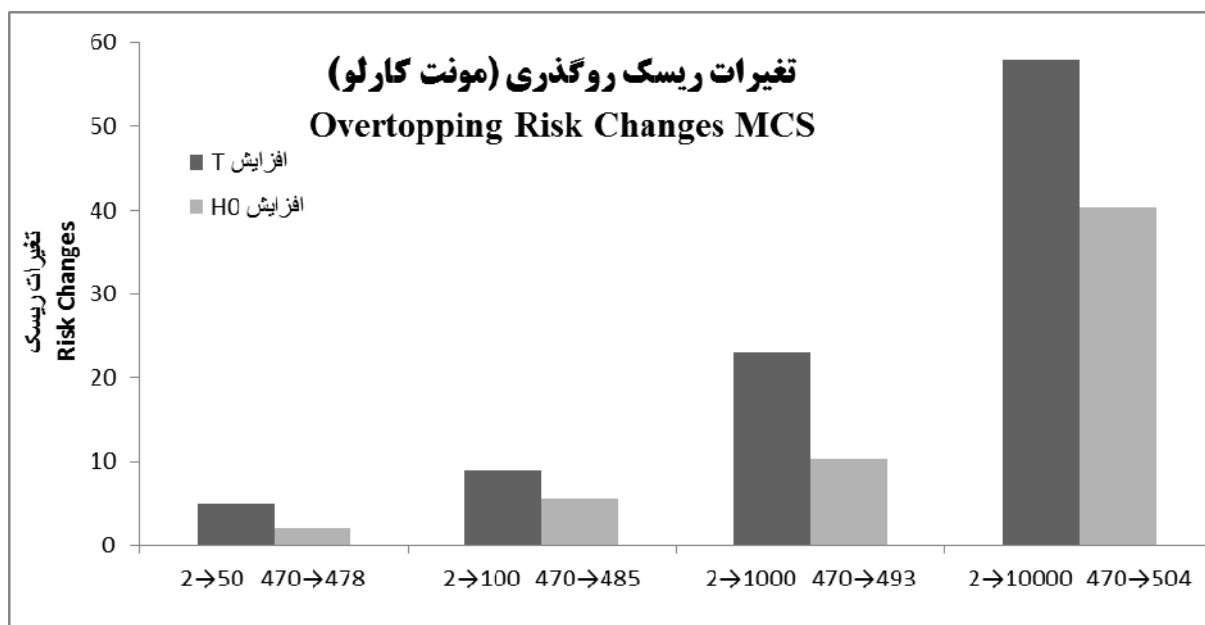
جهت بررسی نحوه تغییرات ریسک روگذری با افزایش سطح اولیه آب مخزن و دوره بازگشت و نیز مقایسه نتایج به‌دست آمده از نسبت زیر استفاده گردید:

$$\omega = Risk_{T, H_0} / Risk_{T=2, H_0=470} \quad (10)$$

که  $Risk_{T, H_0}$  ریسک روگذری در هر دوره بازگشت و هر سطح اولیه

جدول ۵- نسبت ریسک روگذری نسبت به ریسک در  $H_0=470$  و  $T=2$   
 Table 5 – Ratio of overtopping risk related to risk in  $T=2$  &  $H_0=470$

دوره بازگشت T Return period T سطح اولیه مخزن $H_0$ Initial Reservoir Level	روش Method	2→2	2→50	2→100	2→1000	2→2000	2→5000	2→10000
470→470	MCS	1	5	9	23	31.67	42.36	58
470→478		2	7	15.6	37	46.67	58.34	79
470→485		5.6	13.6	28.6	55.6	70.34	85.67	112.6
470→493		10.3	32.6	54	95.6	113	127.34	152
470→504		40.3	83	117.3	165	184.67	200.34	224.3
470→470	LHS	1	5.34	11	25.3	35.34	43	60.3
470→478		2.3	8.6	18	39.3	49.67	60.67	84
470→485		5.3	17.3	32.6	58.3	74.67	89	114.6
470→493		13.3	37.6	57.6	97	111.34	133.34	160.3
470→504		41.6	87.3	119.6	173	189.67	205	233.3



شکل ۴- تغییرات ریسک روگذری با افزایش دوره بازگشت و سطح اولیه مخزن (روش مونت کارلو)  
 Figure 4 – Overtopping risk changes with increasing return period and initial water level of the reservoir (Monte Carlo Method)

### نتیجه گیری کلی

آنالیز ریسک و عدم قطعیت می‌تواند برای محاسبه احتمال شکست سد در اثر روگذری و زلزله و ... بکار گرفته شود. این مقاله فرآیند ارزیابی ریسک روگذری در اثر سیل و آنالیز عدم قطعیت ارتفاع آب خروجی سد مارون را نشان می‌دهد.

در روش‌های نمونه‌گیری، روش مونت کارلو رایج‌ترین روش است اما شاخص اعتماد پذیری آن فقط زمانی که اندازه نمونه‌ها زیاد شود شروع به همگرایی و پایدار شدن می‌کند. روش مربع لاتین تابع توزیع تجمعی داده‌ها را به چند منطقه فرعی طبقه بندی می‌کند که از نظر

برنامه نویسی پیچیده‌تر از روش مونت کارلو بوده اما کارایی آن از نظر محاسباتی بیشتر است. در کل ممکن است دقت نتایج به دست آمده روش‌های نمونه‌گیری بسته به مورد متفاوت باشد. انتخاب و استفاده از روش‌های عدم قطعیت به دسترس بودن اطلاعات پارامترهای مدل و نیز پیچیدگی آن بستگی دارد.

نتایج نشان دهنده اینست که عدم قطعیت ارتفاع آب سد مارون قابل توجه بوده لذا ریسک روگذری در این سد مهم می‌باشد. روش مونت کارلو مقادیر بیشتری در آنالیز عدم قطعیت نسبت به روش مربع لاتین نشان می‌دهد ولی ریسک روگذری محاسبه شده در آن کمتر است. افزایش دوره بازگشت موثرتر از افزایش سطح اولیه آب در



سد مورد نظر است اما این امر از نظر اقتصادی بصرفه نیست لذا بایستی ارتفاع بهینه سطح آب در مخزن مشخص شود.

تغییرات ریسک می‌باشد که نشان دهنده اهمیت این پارامتر می‌باشد. همچنین مقدار ریسک در ارتفاع‌های بالای سطح اولیه آب بیشتر می‌باشد که جهت کاهش ریسک پایین نگه داشتن سطح آب پشت

## منابع

- 1- Cheng S.T. 1982. Overtopping Risk Evaluation for an Existing Dam. PhD Thesis, University of Illinois at Urbana Champaign, USA. p. 197.
- 2- Goodarzi E., Mirzaei L., Shui T., and Ziaei M. 2011. Evaluation Dam Overtopping Risk Based on Univariate and Bivariate Flood Frequency Analysis. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 8: 9757-9796.
- 3- Kuo J. T., Yen B.C., Hsu Y. C., and Lin H. F. 2007. Risk Analysis for Overtopping-Feitsui Reservoir as a Case Study. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE.
- 4- Melching C.S. 1995. Reliability Estimation. Computer Models of Watershed Hydrology, V. P. Singh, ed., Chap. 3, Water Resources Publication, Littleton, Colo., 69-118.
- 5- Kwon H.H., Moon Y. 2006. Improvement of Overtopping Risk Evaluations using Probabilistic Concepts for Existing Dams. Stochastic Environmental Research Risk Assessment, 20(4):223-237.
- 6- Tung Y.K., and Yen B.C. 2005. Hydro systems Engineering Reliability Assessment And Risk Analysis, McGraw-Hill Professional, New York.
- 7- 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 Hydraulic, 11(1): 33-50.
- 8- Mansouri N., and Kabiri Samani A. 2012. Risk Based Analysis Of Earth Overtopping (Vanak Dam As A Case Study). 9<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering, 8-10May. 2012. Isfahan University of Technology, Iran (in persian)

## Uncertainty Analysis and Overtopping Risk Evaluation of Maroon Dam with Monte Carlo and Latin Hypercube Methods

J. M. Vali Samani<sup>1</sup>- H. Radmehr<sup>2</sup>- M. Delavar<sup>3\*</sup>

Received: 16-12-2013

Accepted: 06-12-2014

**Introduction:** The greatest part of constructed dams belongs to embankment dams and there are many examples of their failures throughout history. About one-third of the world's dam failures have been caused by flood overtopping, which indicates that flood overtopping is an important factor affecting reservoir projects' safety. Moreover, because of a poor understanding of the randomness of floods, reservoir water levels during flood seasons are often lowered artificially in order to avoid overtopping and protect the lives and property of downstream residents. So, estimation of dam overtopping risk with regard to uncertainties is more important than achieving the dam's safety. This study presents the procedure for risk evaluation of dam overtopping due to various uncertainties in inflows and reservoir initial condition.

**Materials and Methods:** This study aims to present a practical approach and compare the different uncertainty analysis methods in the evaluation of dam overtopping risk due to flood. For this purpose, Monte Carlo simulation and Latin hypercube sampling methods were used to calculate the overtopping risk, evaluate the uncertainty, and calculate the highest water level during different flood events. To assess these methods from a practical point of view, the Maroon dam was chosen for the case study. Figure. 1 indicates the work procedure, including three parts: 1) Identification and evaluation of effective factors on flood routing and dam overtopping, 2) Data collection and analysis for reservoir routing and uncertainty analysis, 3) Uncertainty and risk analysis.

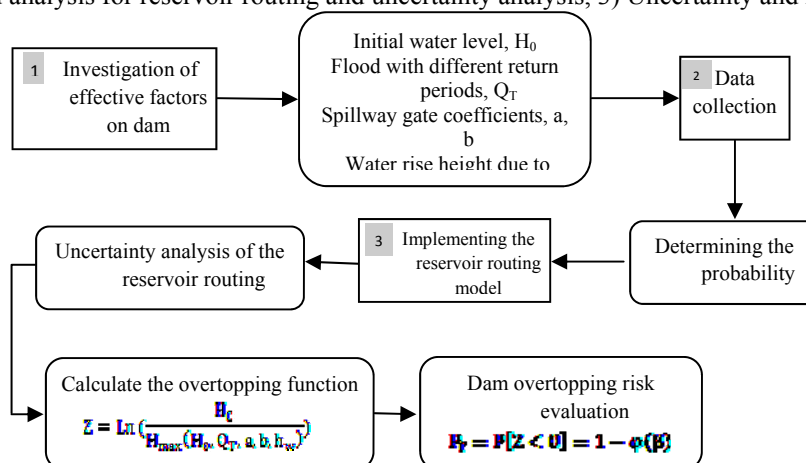
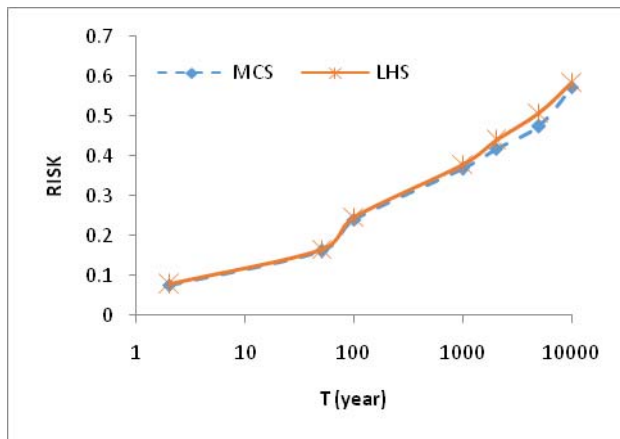


Figure 1- Diagram of dam overtopping risk evaluation

**Results and Discussion:** Figure 2 shows the results of the computed overtopping risks for the Maroon Dam without considering the wind effect, for the initial water level of 504 m as an example. As it is shown in Figure. 2, the trends of the risk curves computed by the different uncertainty analysis methods are similar. As it can be seen, the risk curves computed by the LHS are slightly higher than those curves computed by the MCS method. Also as it is observed, the differences between risk values of the two methods increase in longer return periods. Variations of overtopping risk with increasing the initial water level and return period related to overtopping risk in the 2-year return period for the initial water level of 470 m are shown in Table1. The results show that elongation of return period plays a more important role in increasing the risk, than the increase of initial water level.

1, 2, 3- Professor, MSc. Graduated of Water Structure and Assistant Professor of Water Resources Engineering. Department, Tarbiat Modares University, Respectiely  
(\*-Corresponding Author Email: m.delavar@modares.ac.ir)



**2ndHD = 470**

T	Method	2→2	2→50	2→100	2→1000	2→5000	2→10000
470→470		1	5	9	23	42.36	58
470→478		2	7	15.6	37	58.34	79
470→485	MCS	5.6	13.6	28.6	55.6	85.67	112.6
470→493		10.3	32.6	54	95.6	127.34	152
470→504		40.3	83	117.3	165	200.34	224.3
470→470		1	5.34	11	25.3	43	60.3
470→478		2.3	8.6	18	39.3	60.67	84
470→485	LHS	5.3	17.3	32.6	58.3	89	114.6
470→493		13.3	37.6	57.6	97	133.34	160.3
470→504		41.6	87.3	119.6	173	205	233.3

Figure 2- Overtopping risk in the initial water level of 504 m, without considering the wind effect

**Conclusions:** This study applies MCS and LHS methods to analyze the uncertainty and evaluate the dam overtopping risk considering the uncertainties in input variables, such as quintile of flood peak discharge, initial levels of water and spill coefficients. The results show that the uncertainty of water level calculated by MCS is higher than that calculated by LHS. In addition, the overtopping risk calculated by LHS is higher than that calculated by MCS. Furthermore, the increase of inflow rate influences the variations of the overtopping risk more than the increase of the return period. In addition, evaluation of the results indicates that the overtopping risk is an important issue in the Maroon dam. So, a comprehensive risk analysis procedure in conjunction with uncertainty gives very important information for decision makers to make better judgments in dam operation based on uncertainty in inputs.

**Keywords:** Latin Hypercube, Monte Carlo, Overtopping Risk, Uncertainty