



## Evaluation of Earth Dam Overtopping Risk by System Dynamics, Monte-Carlo Simulation and Latin Hypercube Sampling Methods (Case Study: Hajilarchay Dam, Iran)

A. Ebrahimzadeh<sup>1\*</sup>, M. Zarghami<sup>2</sup> and V. Nourani<sup>2</sup>

### Abstract

Risk assessment of structures, especially dams, has recently been one of the main topics considered by researchers. Risk analysis makes it possible to estimate uncertainties coming up from randomness of parameters in the models which are applicable in designing process. In this paper, different uncertainties along with flood and wind with various return periods segregated and simultaneously were exploited to mitigate the overtopping risk of Hajilarchay earth dam. To assess the risk in the proposed model, we used Monte-Carlo simulation (MCS) and Latin hypercube sampling (LHS) method with different iterations through system dynamics approach. The results proved the effectiveness of system dynamics approach in assessing the overtopping risk for earth dams which showed the influences of different parameters besides flood and wind on overtopping risk. Furthermore, the results showed that opening the bottom outlet of Hajilarchay Dam may reduce the average overtopping risk as much as 9.20 and 4.10 percent when incorporating the effects of just flood and flood and wind, respectively. In addition results showed that the average overtopping risk owing to just flood and to flood and wind estimated from MCS method were respectively about 4.30 and 3.50 percent more than corresponding results obtained by the LHS method. Also the reliability index obtained by the MCS method was higher than LHS method and MCS method has less calculation time compared to the LHS. Finally, we could conclude that system dynamics approach along with MCS is a very effective tool to estimate the overtopping risk in earth dams.

**Keywords:** Overtopping Risk, System Dynamics, Uncertainty, Monte-Carlo Simulation, Latin Hypercube Sampling.

Received: November 14, 2017

Accepted: July 27, 2018

## ارزیابی ریسک روگذری سدهای خاکی با مدل پویایی سیستم‌ها تحت شبیه‌سازی مونت کارلو و روش ابرمکعب لاتین، مطالعه موردی: سد حاجیلرچای

علی ابراهیم‌زاده<sup>۱\*</sup>، مهدی ضرغامی<sup>۲</sup> و وحید نورانی<sup>۲</sup>

### چکیده

ارزیابی ریسک سازه‌ها مخصوصاً سدها، از موضوعاتی است که اخیراً مورد توجه محققین می‌باشد. به کمک نظریه قابلیت اطمینان و ریسک می‌توان عدم قطعیت پارامترهای تصادفی را به صورت روابط ریاضی در روند طراحی استفاده نمود. در این مقاله عدم قطعیت‌های مختلف به همراه سیلاب و باد با دوره‌های بازگشت مختلف به طور مجزا و همزمان در مدل پویایی سیستم‌ها برای ارزیابی ریسک روگذری سد خاکی حاجیلرچای مورد استفاده قرار گرفته است تا بتوان تمهیدات لازم را برای کاهش ریسک روگذری سد مذکور اتخاذ نمود. به منظور برآورد ریسک در مدل مدنظر از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و نمونه‌گیری ابرمکعب لاتین با تعداد تکرار مختلف استفاده شده است. نتایج ضمن نشان دادن توانایی پویایی سیستم‌ها در محاسبه ریسک روگذری و افزایش آن در شرایط توأم سیلاب و باد، نشان می‌دهد که باز بودن دریچه تخلیه‌کننده تحتانی سد حاجیلرچای به طور متوسط باعث کاهش ۹/۲۰ درصد ریسک روگذری در اثر سیلاب و ۴/۱۰ درصد در اثر سیلاب و باد می‌گردد. همچنین میانگین ریسک روگذری محاسبه شده به روش مونت کارلو در اثر سیلاب حدوداً ۴/۳۰ درصد و در اثر توأم سیلاب و باد حدوداً ۳/۵۰ درصد از میانگین مقادیر روش ابرمکعب لاتین بیشتر می‌باشد. در شرایط مشابه، شاخص اعتمادپذیری نتایج روش مونت کارلو از روش ابرمکعب لاتین بیشتر بوده و زمان لازم برای شبیه‌سازی آن کمتر می‌باشد. بر پایه این نتایج، روش پویایی سیستم‌ها با مونت کارلو ابزار کارآمدی در محاسبه ریسک روگذری سدهای خاکی می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** ریسک روگذری، پویایی سیستم‌ها، عدم قطعیت، شبیه‌سازی مونت کارلو، نمونه‌گیری ابرمکعب لاتین.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۸/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۵/۵

1- Ph.D. Student in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: a-ebrahimzadeh@tabrizu.ac.ir

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

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- استاد و عضو قطب هیدروانفورماتیک دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

الف- اثر سیلاب بر پدیده روگذری: برای محاسبه ریسک روگذری از سد تحت اثر سیلاب متغیرهای فراوانی از جمله ارتفاع سد، تراز اولیه آب مخزن سد، مدت زمان بارندگی، شدت بارندگی، ضریب رواناب در حوزه، زمان پیک سیلاب و غیره وجود دارند.

ب- اثر باد بر پدیده روگذری: در بررسی ریسک روگذری ناشی از باد متغیرهای تصادفی اصلی مؤثر شامل ارتفاع سد، تراز آب مخزن سد، راستای باد، سرعت باد، طول موج خیز مخزن، شیب بالادست بدنه سد و غیره خواهند بود.

به دلیل اهمیت سد از نظر اقتصادی و کارایی آن و البته خطرات شکست و خرابی آن، ایمنی و ریسک خرابی سدها از دیرباز مورد توجه پژوهشگران و مهندسين قرار گرفته است. با پیشرفت دانش و تکنولوژی و گسترش روشهای کامپیوتری، امروزه از روشها و الگوریتمهای مختلف ریاضی در این زمینه استفاده گسترده‌ای می‌شود. (2001) Khakbaz et al. در تحقیقی روشی برای برآورد ریسک روگذری مربوط به باد ارائه نمودند. در این روش هر دو ارتفاع بالاروی و خیزاب بر روی شیب در نظر گرفته شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقدار ریسک روگذری مربوط به باد به تنهایی (بخصوص هنگامی که رقوم آب در رودخانه پایین باشد) به نسبت کم و در مقایسه با ریسک روگذری مربوط به سیل ناچیز است. (2002) Wou et al. در پژوهشی تحلیل ریسک برای ارزیابی احتمال خرابی سازه‌های کنترل سیلاب را در خاکریز رودخانه کلونگ به منظور بررسی پارامترهای عدم قطعیت هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و ژئومورفولوژیکی بررسی کردند. آنها در پژوهش خود احتمال روگذری برای ماکزیمم سطح آب را مطالعه کردند و مدل گشتاور مرتبه اول و دوم پیشرفته را پیشنهاد دادند. (2011) Hsu et al. پارامترهای عدم قطعیت ناشی از دو پدیده اثرگذار اصلی باد و سیلاب بر روگذری سد را بررسی کردند. آنها احتمال روگذری را بر اساس دو مدل ماکزیمم داده‌های ماهانه و سالانه بررسی و مقایسه نمودند. (2012) Goodarzi et al. به بررسی ریسک روگذری سد بوسیله تحلیل فرکانس یک و دو متغیره سیلاب پرداخته و بیان کردند که در ارزیابی خطرات سد، دو تحلیل ریاضیاتی عدم اطمینان و ریسک دارای اهمیت می‌باشند. در مطالعات آنها کاربرد پنج فرکانس یک و دو متغیره سیلاب با اعمال توزیع لاجستیک گامبل برای سد درودزن مورد ارزیابی قرار گرفته است. (2012) Mansouri and Kabiri به بررسی ریسک روگذری سد ونک با روش مونت کارلو پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که سطح اولیه آب مخزن تأثیر چندانی در میزان ریسک روگذری این سد نداشته و عامل مهم در این خصوص دبی آب ورودی به مخزن سد می‌باشد. (2012) Gebregiorgis and Hossain به ارزیابی ریسک هیدرولوژیکی سد قدیمی ویلسون پرداختند. این محققان به ارزیابی

در کنار تمام منافعی که سدها دارند، شکست آنها می‌تواند خطرات و مشکلات زیادی برای جان و مال انسانها بوجود آورد. از میان تمام عواملی که باعث شکست سدها می‌شوند، روگذری<sup>۱</sup> از مهم‌ترین آنها می‌باشد؛ به طوری که از سال ۱۹۵۰ تا سال ۱۹۹۰ حدود ۱۱۴۷ سد در جریان سیلاب، در معرض پدیده روگذری بوده است. طبق بررسی‌های به عمل آمده، خرابی حدود یک سوم از سدهای جهان در اثر پدیده روگذری اتفاق افتاده است و در کشور چین این مقدار به ۴۶/۶۰ درصد می‌رسد (Zhang and Wen, 1992). آمار فوق نشان می‌دهد که روگذری از سدها می‌تواند به عنوان عاملی مهم ایمنی سدها را تحت تأثیر قرار دهد. به منظور کاهش ریسک روگذری مخصوصاً در فصول سیلاب، در بعضی از سدها سطح آب مخازن سد را در تراز کمتری نگه می‌دارند که این امر علاوه بر کاهش میزان ذخیره آب مخازن سدها، باعث کاهش میزان آبدهی و میزان تولید انرژی برق آبی و در نتیجه سود حاصل از بهره‌برداری مخازن می‌گردد. از این رو حل مسأله ناسازگاری بین ایمنی سد و سود آن، یک مسأله دائمی مهم و پیچیده می‌باشد و در این بین روش تحلیل ریسک می‌تواند یک راه حل برای مشکل فوق باشد (Chongxun et al., 2008). از آنجایی که در طراحی و عملکرد سیستم‌های مهندسی<sup>۲</sup> همیشه عدم قطعیت<sup>۳</sup> وجود دارد، محاسبه ریسک شکست با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها لازم و ضروری خواهد بود. به کمک نظریه قابلیت اطمینان و ریسک می‌توان عدم قطعیت‌های ناشی از طبیعت تصادفی پارامترها را بصورت روابط ریاضی درآورده و ملاحظات ایمنی و عملکرد را بطور کمی وارد روند طراحی نمود (Mays, 2000). مدیریت ریسک سدهای خاکی به علت زیادی مدها<sup>۴</sup> و عوامل مؤثر خرابی، از اهمیت و پیچیدگی زیادی برخوردار است. برای اینکه بتوان مجموعه‌ای از عوامل پیچیده و مرتبط به هم را در کنار یکدیگر قرار داده و بین آنها ارتباط برقرار کرد، روش تحلیل پویایی سیستم به عنوان ابزاری کارآمد می‌باشد. این روش که بر مبنای تفکر سیستمی بنا نهاده شده است، روشی برای مطالعه و بهبود یادگیری در ارتباط با سیستم‌های پیچیده می‌باشد. هدف اصلی استفاده از این روش فهم چرایی و چگونگی یک رخداد دینامیکی و تلاش برای اجرای سیاست‌ها و مدیریت آن می‌باشد.

شکست بسیاری از سدها نتیجه طراحی نادرست سرریز و وجود سرریزی با ظرفیت ناکافی گزارش شده است. خصوصاً در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای که امکان انهدام سد در نتیجه عبور آب از روی تاج سد بسیار زیاد است. دو پارامتر مهم در ایجاد روگذری از سد، وقوع سیلاب و باد می‌باشد. هر یک از این دو پدیده از متغیرهای مختلفی از جمله موارد زیر تأثیرپذیر هستند (Kuo et al., 2007):

دوباره تحلیل ریسک سد توسط داده‌های جریان پرداخته و از داده‌های پیک جریان قدیمی به جای توزیع مقادیر تعمیم یافته و برای ماکزیمم حجم سالانه مخزن از روش L-moment استفاده نمودند. Mollahosseini et al. (2012). به ارزیابی اثر ایجاد ظرفیت ذخیره در کاهش خسارت سیلاب با استفاده از مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم‌ها پرداختند. در مطالعه مذکور مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی PSO-VENSIM به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن در حین سیلاب و تخصیص بهینه حجم کنترل اولیه سیلاب به مخازن حوضه توسعه یافته است. نتایج تحقیق نشان داد که در کنار بهبود شرایط بهره‌برداری از منظر معیار بهینگی کاهش پیک سیلاب، توزیع حجم کنترل اولیه سیل میان مخازن حوضه نسبت به حالت عدم ساخت سد گراش، مزیت دیگر احداث این سد مخزنی می‌باشد. (Goodarzi et al. (2012). با بررسی ریسک روگذری سد از جنبه‌های احتمالی، به مطالعه موردی سد میجران پرداختند و بیان کردند که ارزیابی ریسک هیدرولوژیکی و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت با روش‌های ریاضی و آماری اطلاعات مفید برای تصمیم گیرندگان فراهم می‌کند. (Sharafati and Zahabiyoun (2014). در تحقیق دیگری به تحلیل ریسک روگذری سد با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که متوسط تغییرات ریسک شکست سد جامیشان به ازای یک واحد تغییرات عرض سرریز، تراز نرمال و تراز تاج سد به ترتیب برابر  $0.3/0$ ،  $1/3$  و  $56/1$  درصد می‌باشد. (Goodarzi et al. (2014). در تحقیقی دیگر ضمن بررسی ریسک روگذری سد درودزن با روش‌های مونت کارلو و ابرمکعب لاتین، نشان دادند افزایش تراز سطح اولیه آب مخزن سد باعث افزایش ریسک روگذری می‌گردد. (Behroz et al. (2014). در تحقیقی به تحلیل حساسیت عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی در طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که اعمال عدم قطعیت هیدرولوژیکی در طراحی، مؤثرتر از عدم قطعیت اقتصادی و آن هم مهم‌تر و مؤثرتر از عدم قطعیت هیدرولیکی است. (Vali Samani et al. (2015). به بررسی عدم قطعیت‌ها و ارزیابی ریسک روگذری سد مارون پرداختند. ایشان در تحقیق خود از روش مونت کارلو و روش مربع لاتین در تحلیل ریسک روگذری استفاده نموده و ضمن مقایسه نتایج این دو روش نشان دادند که افزایش دبی ورودی نسبت به افزایش دوره بازگشت در تغییرات ریسک روگذری این سد مؤثرتر می‌باشد. (Sharafati (2015). در تحقیقی دیگر به بررسی ریسک روگذری سد جامیشان پرداخت. این محقق در تحقیق مذکور با استفاده از تئوری بارش آستانه و تلفیق آن با روش مونت کارلو شرطی، زمان شبیه‌سازی را کاهش داد. (Ganji Nowrouzi et al. (2016). در تحقیقی به تحلیل تأثیر عدم قطعیت تابع دبی- احتمال در برآورد ریسک زمانی و مکانی سیل

برای منطقه آزارود در حوالی تنکابن مازندران با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که خسارت سالانه مورد انتظار کشاورزی با در نظر گرفتن عدم قطعیت تابع دبی- احتمال از  $1/8$  درصد به  $1/9$  درصد تغییر می‌کند و عدم قطعیت ناشی از تابع مزبور برابر  $5/5$  درصد می‌باشد. (Mahmoudian Shoushtari et al. (2016). به ارزیابی ریسک ایمنی سدها پرداختند. ایشان ضمن محاسبه احتمال شکست سد گلستان با استفاده از روش ارزیابی درخت رویداد (ETA)، تعداد تلفات جانی به علت سیل ناشی از شکست سد را از طریق روش رایج در اداره اصلاح اراضی آمریکا (USBR) موسوم به DS0-99-06 تخمین زدند و با مقایسه مقدار ریسک بدست آمده با معیارهای مختلف برای سطح ریسک قابل قبول، نتیجه گرفتند که مقدار ریسک شکست سد گلستان بر اثر وقوع سیل در بالادست آن، غیر قابل قبول بوده و اقدام برای کاهش ریسک فوری ضروری می‌باشد.

با مراجعه به مطالعات قبلی صورت گرفته می‌توان دریافت که از پویایی سیستم‌ها استفاده چندانی در مورد ارزیابی و مدیریت ریسک روگذری سدها نشده است و در صورت استفاده صرفاً یک یا تعداد محدودی از پارامترهای مؤثر در روگذری به صورت یکجا مدنظر قرار گرفته شده است. مدیریت ریسک سدهای خاکی به علت زیادی مدهای خرابی گوناگون از اهمیت و پیچیدگی زیادی برخوردار است و همچنین در زمینه ریسک روگذری سد با توجه به تعداد زیاد عوامل عدم قطعیت، پارامترها و مدهای مؤثر در روگذری و از آنجایی که روابط این مدها دارای بازخورد هستند، دیدگاه پویایی سیستم‌ها می‌تواند به عنوان یک ابزار شبیه‌سازی مدیران را در زمینه مدیریت ریسک یاری نماید. با استفاده از دیدگاه پویایی سیستم‌ها و تعاملات و بازخوردهای درون سیستم می‌توان مجموعه‌ای از این عوامل پیچیده و مرتبط به هم را در کنار یکدیگر قرار داده و بین آنها ارتباط برقرار کرد و ضمن شبیه‌سازی سیستم یک تقریبی از آنچه در واقعیت روی داده یا خواهد داد را ارائه نموده و تأثیر سناریوهای مختلف را بر روی ریسک روگذری سد بررسی نمود که باعث خواهد شد ذینفعان طرح بتوانند در ارتباط با مباحث ایمنی و اقتصادی به خوبی تصمیم‌گیری نمایند.

در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها و همچنین با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و نمونه‌گیری ابرمکعب لاتین، ریسک روگذری سد خاکی حاجیلرچای در اثر سیلاب و همچنین تحت تأثیر توأم سیلاب و باد مورد بررسی و محاسبه قرار گرفته است. به منظور محاسبه ریسک روگذری، علاوه بر در نظر گرفتن دوره بازگشت و شدت سیلاب و باد به عنوان پارامترهای تأثیرگذار در ریسک روگذری از سد، ارتفاع اولیه آب در مخزن سد و همچنین ارتفاع

خود سد نیز به عنوان پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. در ادامه مقاله، ضمن محاسبه ریسک روگذری با استفاده از دو روش فوق‌الذکر، نتایج حاصل از آنها و همچنین میزان اعتمادپذیری نتایج و زمان لازم برای شبیه‌سازی پویایی سیستم به دو روش مذکور با یکدیگر مقایسه گردیده است. موارد فوق می‌توانند به عنوان نوآوری این تحقیق مطرح گردند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)<sup>۵</sup>

شبیه‌سازی به روش MCS یکی از قویترین ابزارهای مهندسی است که امکان تحلیل آماری عدم قطعیت‌های موجود در مسائل مهندسی را دارد. این روش به خصوص در مسائل پیچیده‌ای که متغیرهای تصادفی زیادی توسط معادلات غیر خطی به یکدیگر مرتبط شده‌اند، مفید می‌باشد. تحلیل MCS را می‌توان مانند آزمایشی تصور نمود که به جای اجراء در آزمایشگاه، توسط کامپیوتر انجام می‌پذیرد. اساس این روش، تولید مجموعه‌ای از اعداد تصادفی است که به طور مکانیکی یا الکترونیکی تولید می‌شوند. نخست  $n$  عدد تصادفی برای هر یک از پارامترهای تصادفی موجود تولید می‌شود، سپس با توجه به توزیع احتمالی مناسب،  $n$  عدد تصادفی با چگالی احتمال معین بدست می‌آید و نهایتاً  $n$  مقدار برای تابع عملکرد  $Z$  خواهیم داشت و با استفاده از اطلاعات آماری و هیستوگرام فراوانی برای نتایج بدست آمده، احتمال خرابی و قابلیت اعتماد سیستم قابل ارزیابی خواهد بود (Ghias, 2014).

### ۲-۲- روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین (LHS)<sup>۶</sup>

این روش بر اساس روش لایه لایه شده، به تقسیم محدوده تغییرات هر متغیر به صورت احتمال مساوی می‌پردازد. بدین ترتیب فضای متغیرها عملاً به صورت ابرمکعب‌ایی تقسیم می‌شود. سپس نمونه‌گیری از محدوده هر یک از این ابرمکعب‌ها به عمل آمده و بر اساس قضیه احتمال کل  $P_f$  بدست می‌آید. در بعضی مواقع به سازه‌های پیچیده‌ای بر می‌خوریم که زمان محاسبه فقط یک نمونه شبیه‌سازی آن ممکن است بسیار زیاد باشد. روش LHS جهت کاهش تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی شده مورد نیاز برای به دست آوردن نتایج قابل قبول است. در این روش تعدادی از مقادیر ممکن هر متغیر که به لایه‌های جزء تقسیم شده است، انتخاب گشته و یک مقدار از هر لایه به طور تصادفی به عنوان مقدار نماینده انتخاب می‌گردد. تابع حالت حدی  $Y$  با  $K$  متغیر تصادفی زیر را در نظر بگیرید:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_K) \quad (1)$$

برای شبیه‌سازی تابع فوق به روش LHS، در ابتدا هر کدام از  $X_i$ ها را به فواصل معینی تقسیم‌بندی می‌شود. این تقسیم‌بندی باید به نحوی باشد که احتمال پیشامد هر کدام از آنها برابر با  $\frac{1}{N}$  باشد. سپس برای هر متغیر  $X_i$ ، به طور تصادفی یک مقدار به عنوان نماینده انتخاب می‌شود. اگر تعداد فواصل زیاد و یا فواصل بزرگی انتخاب شده باشند، می‌توان نقطه مرکزی هر فاصله را به جای نمونه‌های تصادفی مورد استفاده قرار داد. بعد از انجام این مراحل،  $N$  مقدار نماینده برای هر کدام از  $K$  متغیر تصادفی بدست می‌آید. در کل،  $N^K$  ترکیب محتمل از این مقادیر می‌تواند وجود داشته باشد. هدف روش LHS، این است که با انتخاب  $N$  ترکیب از این مقادیر نماینده، یکی و تنها یک مقدار از  $N$  ترکیب را به دست آورد.

برای به دست آوردن اولین ترکیب، از هر متغیر تصادفی  $K$ ، یکی به طور تصادفی انتخاب می‌گردد. برای به دست آوردن دومین ترکیب، یکی به طور تصادفی از  $N - 1$  مقدار باقیمانده هر متغیر تصادفی  $K$ ، انتخاب می‌شود و برای به دست آوردن سومین ترکیب نیز یکی به طور تصادفی از  $N - 2$  مقدار باقیمانده هر متغیر تصادفی  $K$ ، انتخاب می‌شود. این مراحل تا به دست آوردن  $N$  ترکیب از متغیرهای تصادفی ادامه می‌یابد. تابع حالت حدی برای هر کدام از  $N$  ترکیب ناشی از متغیرهای ورودی تولید شده، تشکیل می‌یابد، در نتیجه  $N$  تابع حالت حدی به صورت  $Y_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$  تشکیل خواهد شد. در نهایت می‌توان از مقادیر به دست آمده پارامترهای آماری را محاسبه و در نتیجه میزان احتمال خرابی با استفاده از تابع چگالی تخمینی به دست می‌آید (Shayanfar et al., 2004). روش LHS در مقایسه با MCS رویکرد منظم‌تری را جهت نمونه‌گیری به کار می‌برد و از این رو سرعت همگرایی آن از MCS بیشتر می‌باشد (Kwon and Moon, 2005).

### ۲-۳- تأثیر سیلاب بر پدیده روگذری

سیل به وضعیتی گفته می‌شود که در آن جریان رودخانه و سطح آب بصورت غیر منتظره افزایش پیدا کرده و باعث خسارت مالی و جانی گردد. در این مقاله هیدروگراف سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف که احتمال دارد وارد مخزن سد گردد، مد نظر قرار گرفته و پس از روندیابی سیلاب در مخزن بوسیله نرم‌افزار Vensim و محاسبه ارتفاع آب در مخزن سد و مقایسه آن با ارتفاع سد، ریسک روگذری محاسبه گردیده است.

### ۲-۴- تأثیر باد بر پدیده روگذری

سرعت باد و طول مسیری از مخزن سد که در معرض وزش شدید باد قرار گرفته است، از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که در وقوع پدیده

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

### ج- ارتفاع خیزاب موج بر روی شیروانی بالادست سد ( $h_r$ )

به هنگام برخورد موج با بدنه سد، قسمتی از انرژی موج به واسطه تخریب و زبری پوشش شیروانی سد تلف می‌شود و قسمت باقیمانده انرژی باعث بالا آمدن موج بر روی شیروانی بالادست سد می‌شود. هوگز معادله زیر را برای محاسبه پارامتر مذکور ارائه نموده است (Hugh, 2008):

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

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

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

که در آن:

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

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

و  $h_s$  ارتفاع موج ( $m$ ) می‌باشد (Wang and Bowles, 2005). در نهایت ارتفاع بالا آمدگی آب ناشی از باد به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

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

### ۲-۵- تحلیل ریسک روگذری و شکست سد

شکست یک سیستم زمانی اتفاق می‌افتد که سیستم در برابر بارهای وارده عملکرد قابل انتظار خود را نداشته باشد. به عبارت دیگر شکست سیستم زمانی اتفاق می‌افتد که بار وارده بر سیستم ( $L_F$ ) از ظرفیت سیستم ( $R$ ) فراتر رود. در تحلیل پدیده روگذری و سرریز شدن آب از روی سد، ارتفاع آب در مخزن سد ( $H_{\text{dam}}$ ) و ارتفاع سد ( $H_{\text{max}}$ ) به ترتیب به عنوان بار و مقاومت سیستم در نظر گرفته می‌شوند. ریسک روگذری ناشی از سیلاب ورودی به مخزن سد و سرعت باد را می‌توان توسط توابع کاربردی زیر بیان کرد:

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

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

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

روگذری تأثیر زیادی دارند و روگذری تحت تأثیر بادهای شدید حتماً بایستی مدنظر قرار گیرد. برای اعمال اثر این پدیده، معمولاً به طور سنتی یک ارتفاع آزاد را به طور دلخواه به ارتفاع سد یا سیل بند اضافه می‌نمایند. پدیده روگذری ناشی از باد به صورت زیر تعریف می‌شود که در آن روگذری هنگامی رخ خواهد داد که افزایش ارتفاع آب دریاچه به دلیل وزش باد به علاوه تراز آب دریاچه سد بیشتر از ارتفاع سد گردد (Khakbaz et al., 2001):

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

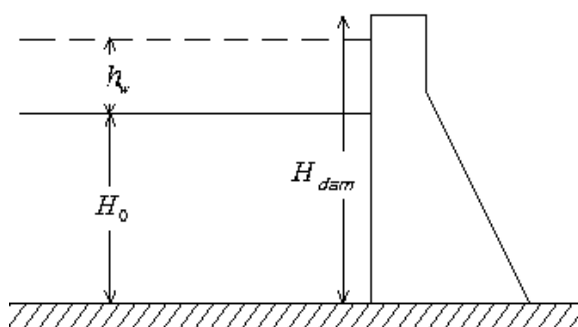


Fig. 1- A view of dam height, initial height of water in dam reservoir and increasing water height due to the wind

شکل ۱- نمایشی از ارتفاع سد، ارتفاع اولیه آب در مخزن سد و افزایش ارتفاع آب ناشی از باد

در شکل ۱،  $H_{\text{dam}}$ : ارتفاع سد،  $H_0$ : ارتفاع اولیه آب و  $h_w$ : افزایش ارتفاع آب ناشی از باد می‌باشد. افزایش ارتفاع آب مخزن سد ناشی از باد  $h_w$  معمولاً به سه فاکتور زیر تقسیم می‌شود:

### الف- ارتفاع موج ناشی از تنش باد در سطح مخزن ( $h_s$ )

ارتفاع بزرگترین موج ایجاد شده بر اثر وزش بادهای غالب منطقه، ارتفاع موج نام دارد. (USBR (1992)، برای محاسبه ارتفاع موج حاصل از وزش باد معادله زیر را ارائه نموده است که در آن  $h_s$ : ارتفاع موج ( $m$ )،  $F$ : طول موج خیز ( $km$ ) و  $V$ : سرعت وزش باد ( $km/hr$ ) می‌باشد:

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

### ب- ارتفاع خیزاب موج بر اثر باد ( $h_t$ )

بر اثر وزش مداوم باد به سطح آب دریاچه سد، سطح آب در جهت بدنه بالا می‌آید. مقدار این بالا آمدگی تابع طول موج خیز، سرعت باد و عمق متوسط آب در امتداد طول موج خیز می‌باشد و طبق معادله USBR (1992)، به صورت زیر محاسبه می‌گردد که در آن  $h_t$  ارتفاع خیزاب بر اثر باد ( $m$ )،  $F$  طول موج خیز ( $km$ )،  $V$  سرعت وزش باد ( $km/hr$ ) و  $D$  متوسط عمق آب در طول موج خیز ( $m$ ) می‌باشد:

$$\text{Stock}(t) = \int_{t_0}^{t_n} [\text{Inflow}(t) - \text{Outflow}(t)].dt + \text{Stock}(t_0) \quad (13)$$

که در آن  $\text{Stock}(t)$ ،  $\text{Inflow}(t)$  و  $\text{Outflow}(t)$  به ترتیب مقدار ذخیره، مقدار ورودی و مقدار خروجی در زمان  $t$  می‌باشند. در این تحقیق از نرم‌افزار Vensim DSS برای شبیه‌سازی پویایی سیستم‌ها به همراه روش MCS و روش LHS در مساله روگذری سد خاکی استفاده شده است.

#### ۴- سد مورد مطالعه

حوزه آبریز رودخانه حاجیلر در استان آذربایجان شرقی در مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳۱ تا ۵۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۱ تا ۳۵ دقیقه طول شرقی قرار دارد و از زیر حوزه‌های رودخانه مرزی ارس می‌باشد. محور سد در فاصله ۳ کیلومتری پایین دست روستای قره‌قیه، ۵۰ کیلومتری شمال غربی ورزقان و ۱۳۵ کیلومتری شمال تبریز واقع است و راه دسترسی به آن از طریق جاده آسفالت تبریز- ورزقان- خاروانا می‌باشد. با احداث سد در حال ساخت حاجیلر، ضمن توسعه کشاورزی در نزدیک به ۲۰۰۰ هکتار از اراضی دیمزار کم‌بازده کنونی، نزدیک به ۴۰ میلیون متر مکعب آب نیز برای مصارف شهری (شرب و صنعت در منطقه طرح) تامین و در مجموع از هدر روی سالانه نزدیک به ۶۵ میلیون متر مکعب آورد رودخانه جلوگیری خواهد شد (Bandab, 2013). در شکل ۳ موقعیت سد مورد مطالعه و محدوده حوضه آبریز آن نشان داده شده است. مشخصات سد مخزنی حاجیلر جای در جدول شماره ۱ آمده است.

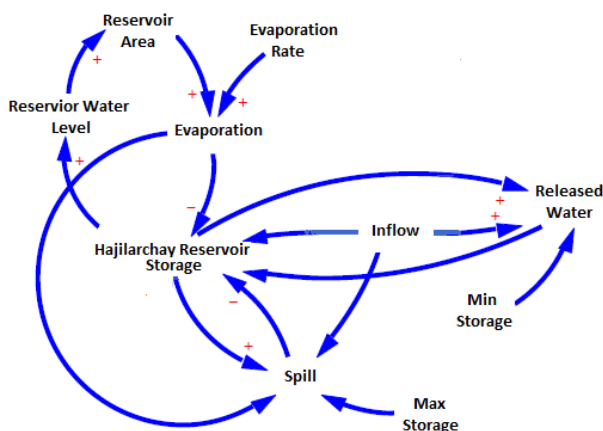


Fig. 2- Causal loop diagram for the Hajilarchay Dam Reservoir

شکل ۲- حلقه علت معلولی برای مخزن سد حاجیلرچای

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

که در آن  $\mu_Z$  و  $\sigma_Z$  به ترتیب، میانگین و ضریب تغییرات  $Z$  هستند،  $\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}$  شاخص اعتمادپذیری و  $\varphi(\beta)$  احتمال نرمال تجمعی مربوط به  $\beta$  می‌باشند و هر چه مقدار  $\beta$  بزرگتر باشد، اعتمادپذیری نتایج بیشتر خواهد بود (Kwon and Moon, 2005).

#### ۳- مدل پویایی سیستم<sup>۸</sup>

روش‌های سیستمی از الگوهای مبتنی بر تفکر سیستمی استفاده می‌کنند. این روش‌ها با در نظر گرفتن روابط بین اجزای سیستم، رفتار سیستم را پیش‌بینی می‌کنند. چیزی که روش پویایی سیستم‌ها را از روش‌های دیگر متمایز می‌سازد استفاده از حلقه‌های بازخورد و متغیرهای جریان و حالت است که در شناخت رفتار سیستم کمک می‌کنند. نظریه پویایی سیستم‌ها با مشخص کردن رابطه بازخوردی میان پدیده‌ها و شبیه‌سازی این روابط قادر است کمک مؤثری برای تصمیم‌گیری‌های بلند مدت داشته باشد. این متدولوژی توسط Forrester (1961) مورد استفاده قرار گرفت و در طول دهه‌های گذشته اصلاح گردید و ابتدا برای مدیریت منابع و تجارت مورد بهره‌برداری واقع گردید. شبیه‌سازی پویا به ما اجازه می‌دهد تا رفتار سیستم مدل شده و پاسخ آن را در مواجهه با عوامل و تغییرات خارجی در طی زمانی مشخص مشاهده کنیم. اساس این روش شبیه‌سازی بر پایه بازخورد و اتفاقات شیء‌گرا می‌باشد. ذخایر و جریان اصول تشکیل دهنده مدل پویایی سیستم می‌باشند. ذخایر عبارت است از مواد و جریان پارامتر یا عمل است. ذخایر نمایانگر تجمع و به عنوان منشاء می‌باشند. آنها می‌توانند به عنوان محدودیت‌ها نیز عمل نمایند. جریان‌ها از اجزاء ذخایر هستند که یکی بدون دیگری وجود نخواهد داشت (Sterman, 2000). اگر چیزی تجمع یابد (مانند آب در مخزن)، این تجمع می‌بایستی منجر به یک فعالیت گردد (جریان ورودی به مخزن). ذخایر<sup>۹</sup> و جریان‌ها<sup>۱۰</sup> تشکیل دهنده حداقل ساختار برای مدل پویایی سیستم می‌باشند. دو عنصر دیگر این ساختار تبدیل‌کننده‌ها<sup>۱۱</sup> و اتصالات<sup>۱۲</sup> می‌باشند. تبدیل‌کننده‌ها ورودی را به خروجی تبدیل می‌نمایند. آنها می‌توانند نماینده مقادیر مواد یا اطلاعات باشند. اتصالات ذخایر را به تبدیل‌کننده‌ها، ذخایر را به جریان‌های تنظیم‌کننده و تبدیل‌کننده‌ها را به سایر تبدیل‌کننده‌ها متصل می‌نمایند. آنها مقادیر عددی نمی‌گیرند، بلکه آنها را انتقال می‌دهند (Simonovic and Ahmad, 2000). در شکل ۲ نمونه‌ای از مدل علت معلولی که برای مخزن حاجیلرچای ساخته شده نشان داده شده است. بطور کلی، ذخیره‌ها اختلاف بین ورودی و خروجی را جمع می‌کنند و می‌توان به صورت زیر آنها را فرموله کرد:

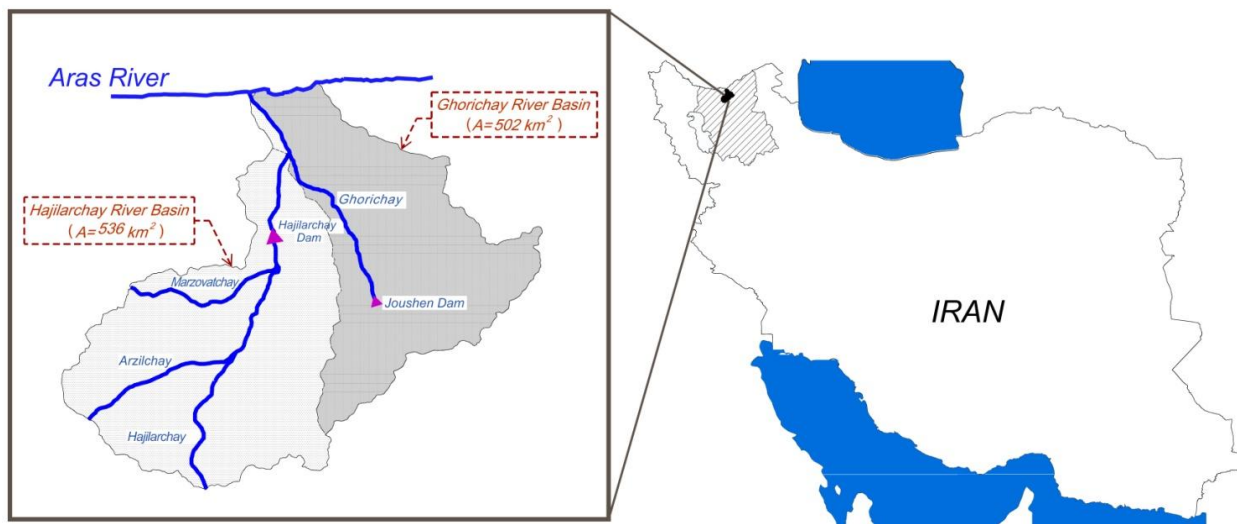


Fig. 3- The location of Hajilarchay dam and its river basin area (Bandab, 2013)  
 شکل ۳- نمایشی از موقعیت سد حاجیلر چای و محدوده حوضه آبریز رودخانه (Bandab, 2013)

Table 1- Hajilarchay dam information and appurtenant structures

جدول ۱- اطلاعات سد حاجیلر چای و سازه‌های وابسته

Dam type	Crest length (m)	Crest width (m)	Height above foundation (m)	Height from bed (m)	Reservoir volume in normal level (MCM)	Active volume (MCM)	Type of spillway
Earth dam with clay core	265	10	95	71	48.90	47.30	Morning glory spillway

سیلاب با دوره بازگشت مختلف می‌باشد. آمار آبدهی رودخانه از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اخذ و در مدل‌سازی مخزن سد مورد استفاده قرار گرفته است. دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف که در مدل‌سازی مخزن سد و بررسی ریسک روگذری مورد استفاده قرار گرفته است مطابق جدول ۳ می‌باشد.

در شکل‌های ۴ و ۵ نمایشی از مدل ساخته شده برای مخزن سد به منظور بررسی بیلان آب و ریسک روگذری سد در محیط Vensim آمده است. در شکل ۶ روند ارزیابی ریسک روگذری سد خاکی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است، نشان داده شده است.

#### ۱-۴- اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی

اطلاعات بکار رفته در طراحی سازه‌های آبی سد که برای بررسی ریسک روگذری سد در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است به شرح زیر می‌باشد:

#### الف- اطلاعات هواشناسی

حداکثر سرعت باد با دوره بازگشت‌های مختلف در محل سد به شرح جدول ۲ می‌باشد.

#### ب- اطلاعات هیدرولوژی

اطلاعات هیدرولوژی مورد استفاده در بررسی روگذری سد حاجیلر چای شامل دو بخش عمده آمار آبدهی متوسط رودخانه و هیدروگراف‌های

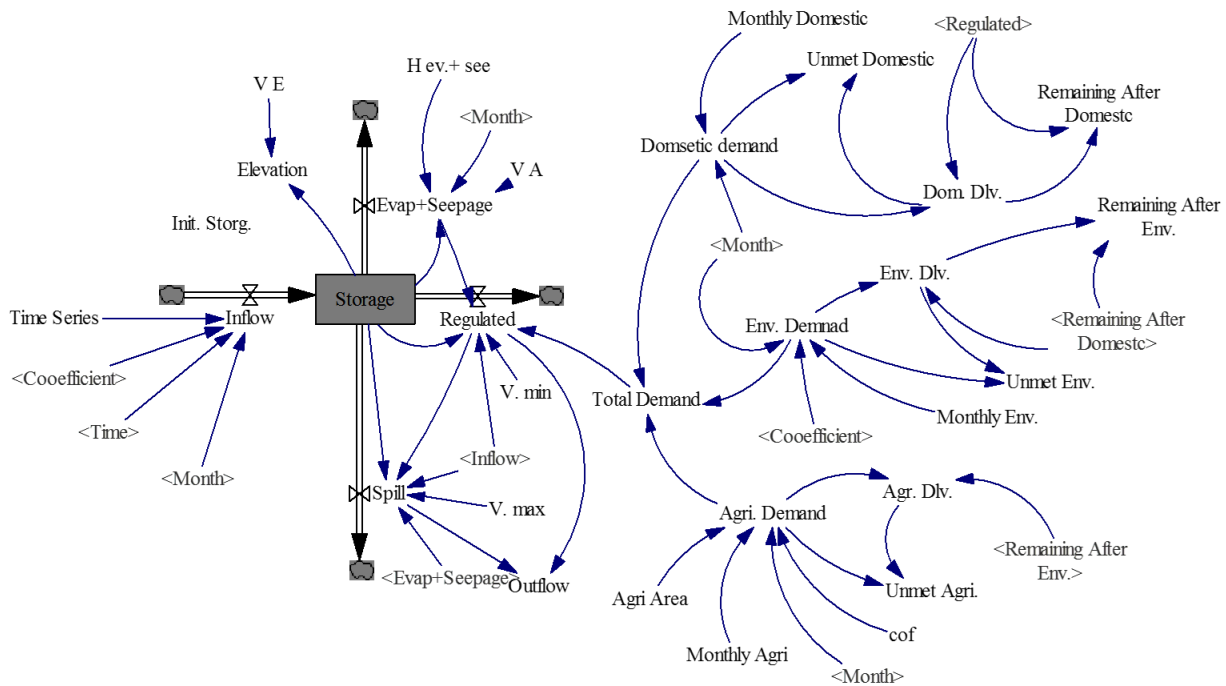
Table 2- The maximum wind speed at different return periods at dam site

جدول ۲- حداکثر سرعت باد با دوره بازگشت‌های مختلف در محل سد

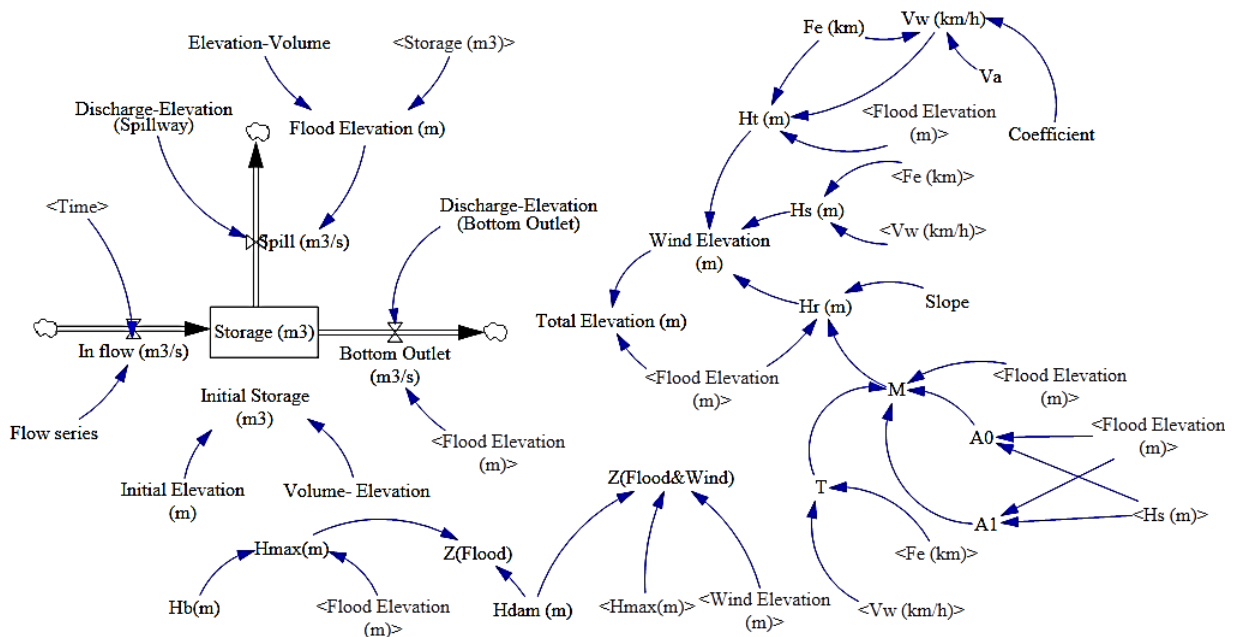
Return period (year)	2	5	10	20	25	50	75	100	200	500
Wind velocity (Km/h)	74.52	91.08	101.88	112.32	115.56	125.64	131.76	135.72	147.24	161.40

**Table 3- The peak flood discharge with different return periods and the (PMF) discharge**  
 جدول ۳- دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف و دبی حداکثر سیلاب محتمل (PMF)

Return period (year)	100	500	1000	2000	5000	10000	PMF
Peak discharge (m <sup>3</sup> /s)	200	305	370	430	510	565	900



**Fig. 4- A view of Vensim model for simulating water balance in reservoir**  
 شکل ۴- نمایی از مدل ساخته شده به منظور بررسی بیلان آب در مخزن سد



**Fig. 5- A view of system dynamics model made for simulation of water level and calculating performance function (Z) in Vensim environment**

شکل ۵- نمایی از مدل ساخته شده برای شبیه‌سازی سطح آب در مخزن سد حاجیلرچای و محاسبه تابع عملکرد سیستم در محیط Vensim



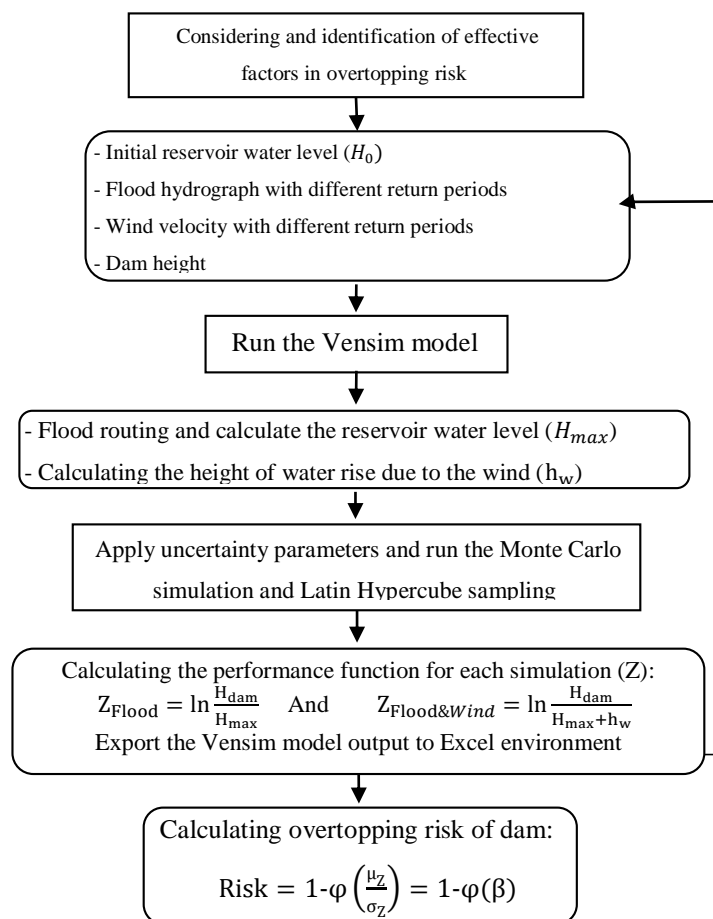


Fig. 6- Flowchart of Hajilarchay dam overtopping risk evaluation

شکل ۶- روندنمای ارزیابی ریسک روگذری سد حاجیلرچای

## ۵- نتایج و بحث

در این تحقیق پارامترهای ارتفاع اولیه آب در مخزن سد و ارتفاع خود سد به عنوان عوامل عدم قطعیت در کنار سرعت باد و سیلاب ورودی با دوره‌های بازگشت‌های مختلف به همراه حداکثر سیلاب محتمل در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که تخلیه‌کننده تحتانی سد در خلال سیلاب و احتمالاً وقوع روگذری بسته می‌باشد. با توجه به مدل‌سازی صورت گرفته برای مخزن سد حداقل و حداکثر تراز اولیه آب مخزن سد قبل از ورود سیلاب به ترتیب ۱۰۰۵ و ۱۰۴۷ متر در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به مشخصات سد و گزارشات شرکت مهندسین مشاور بند آب ارتفاع سد برابر ۷۱/۰۰ متر بوده و حداکثر مقدار نشست بلند مدت سد در ۵۰ سال عمر مفید سد برابر ۱/۴۸ متر می‌باشد. بنابراین حداقل و حداکثر ارتفاع سد برابر ۶۹/۵۲ و ۷۱/۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

## ۵-۱- تأثیر دوره بازگشت باد و سیلاب بر روی ریسک روگذری

در این قسمت از تحقیق، تأثیر دوره بازگشت باد و سیلاب بر روی ریسک روگذری مورد بررسی قرار گرفته است و در حالت اول عدم قطعیت مورد نظر، تغییرات تراز اولیه آب مخزن از ۱۰۰۵ تا ۱۰۴۷ متر با توزیع احتمالاتی Beta با مشخصات  $\alpha_1 = 1/4528$ ،  $\alpha_2 = 0.7084$ ،  $a = 1005$  و  $b = 1047$  که توسط نرم‌افزار Easy Fit با  $P - Value = 1/15210 \times 10^{-6}$  و  $Statistic = 0.10899$  به عنوان بهترین توزیع قابل انتخاب مشخص شده، در نظر گرفته شده است. در حالت دوم علاوه بر تغییرات تراز اولیه مخزن، عدم قطعیت تغییرات ارتفاع خود سد از ۶۹/۵۲ تا ۷۱/۰۰ متر با توزیع احتمالاتی یکنواخت در نظر گرفته شده است. تعداد شبیه‌سازی در روش MCS برای این حالت‌ها برابر ۲۰۰۰۰۰ مرتبه بوده و با در نظر گرفتن این تغییرات، ریسک روگذری در حالت بدون تأثیر باد و همچنین در حالت تأثیر باد و سیلاب بطور همزمان محاسبه شده است. نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد در حالت بدون تأثیر باد، حداکثر مقدار ریسک

## ۲-۵- تأثیر تعداد شبیه‌سازی با روش MCS در مقدار ریسک روگذری

در این قسمت از تحقیق تأثیر تعداد تکرارهای شبیه‌سازی بر روی ریسک روگذری ناشی از سیلاب و همچنین ریسک روگذری ناشی از سیلاب و باد مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت برای محاسبات ریسک روگذری از حداکثر سیلاب محتمل (PMF) و همچنین باد با دوره بازگشت ۱۰۰ سال استفاده شده است. نتایج حاصل از این محاسبات در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آمده است.

با توجه به نمودار شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌گردد که در هر دو حالت مقادیر ریسک روگذری محاسبه شده بعد از تعداد تکرار شبیه‌سازی ۲۰۰۰۰۰ مرتبه به مقدار تقریباً یکسانی همگرا می‌شوند.

روگذری برای حداکثر سیلاب محتمل (PMF) بوده و مقدار آن برابر ۰/۰۳۸۸۹۵ در حالت عدم قطعیت تغییرات ارتفاع اولیه آب مخزن سد و ۰/۰۴۴۳۷۲ برای حالت عدم قطعیت تغییرات ارتفاع اولیه آب مخزن سد و ارتفاع خود سد می‌باشد. همچنین برای حالت تأثیر توأم باد و سیلاب، حداکثر مقدار ریسک روگذری برای حداکثر سیلاب محتمل (PMF) و باد با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله بوده و مقدار آن برابر ۰/۰۹۹۶۸۳ در حالت عدم قطعیت تغییرات ارتفاع اولیه آب مخزن سد و ۰/۱۱۲۹۳۱ برای حالت عدم قطعیت تغییرات ارتفاع اولیه آب مخزن سد و ارتفاع خود سد می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند با در نظر گرفتن عدم قطعیت تغییرات ارتفاع سد افزون بر تغییرات تراز اولیه آب مخزن سد مقدار ریسک روگذری بطور متوسط در حدود ۸/۹ درصد افزایش می‌یابد. نتایج این محاسبات در نمودار شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ آمده است.

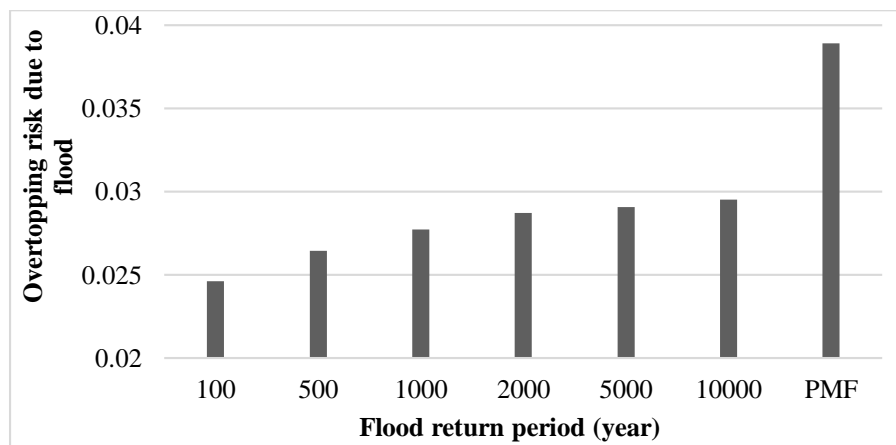


Fig. 7- The effect of flood return period on overtopping risk by considering uncertainty of initial water level

شکل ۷- تأثیر تغییرات دوره بازگشت سیلاب بر روی ریسک روگذری با در نظر گرفتن عدم قطعیت تراز اولیه آب

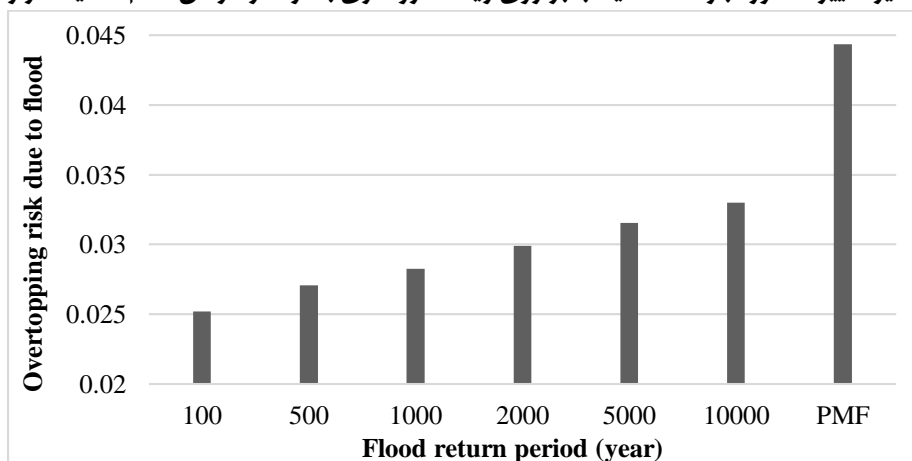


Fig. 8- The effect of flood return period on overtopping risk by considering uncertainty of initial water level and dam height

شکل ۸- تأثیر تغییرات دوره بازگشت سیلاب بر روی ریسک روگذری با در نظر گرفتن عدم قطعیت تراز اولیه آب و ارتفاع سد

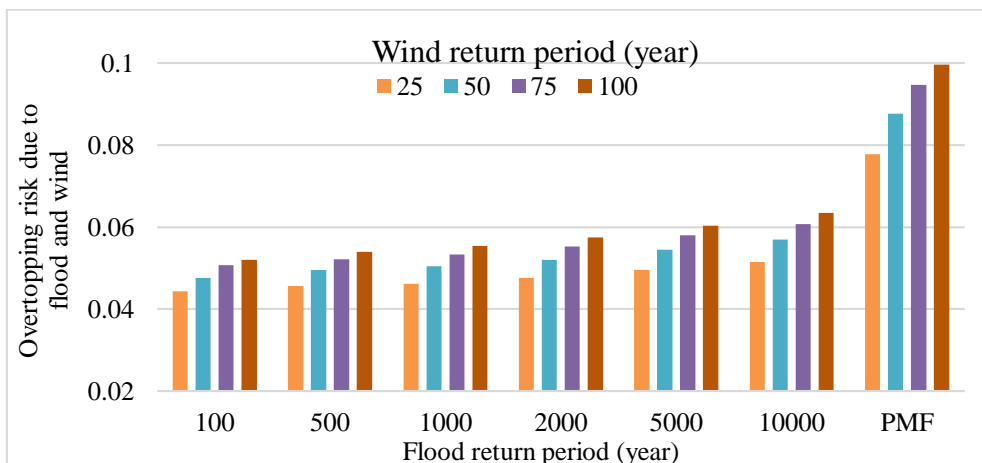


Fig. 9- The effect of flood and wind return period on overtopping risk by considering uncertainty of initial water level

شکل ۹- تأثیر تغییرات دوره بازگشت سیلاب و باد بر روی ریسک روگذری با در نظر گرفتن عدم قطعیت تراز اولیه آب

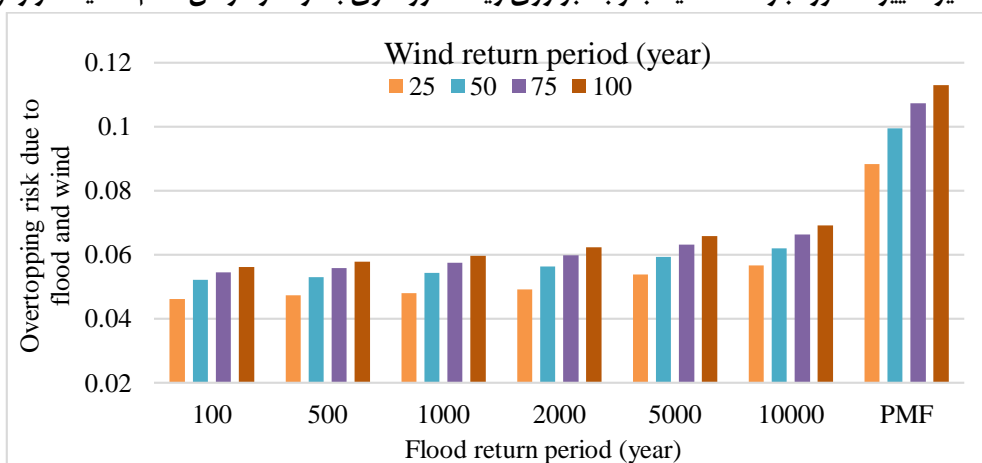


Fig. 10- The effect of flood and wind return period on overtopping risk by considering uncertainty of initial water level and dam height

شکل ۱۰- تأثیر تغییرات دوره بازگشت سیلاب و باد بر روی ریسک روگذری با در نظر گرفتن عدم قطعیت تراز اولیه آب و ارتفاع سد

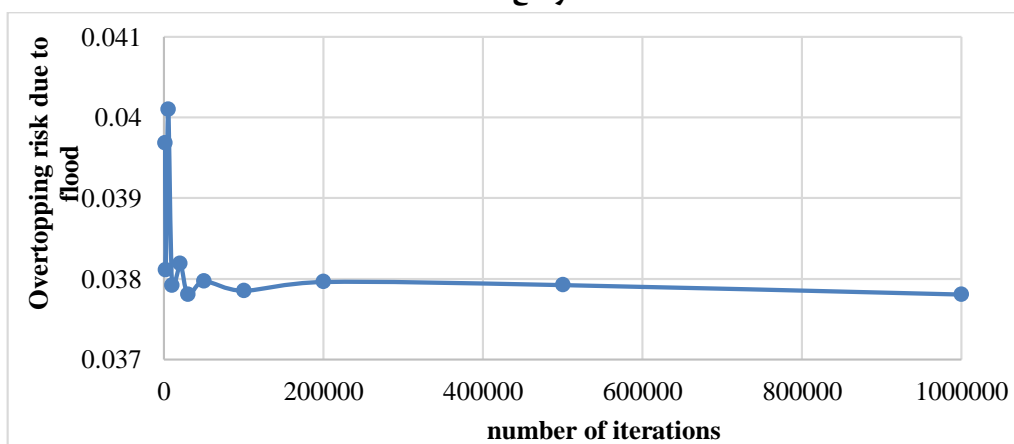


Fig. 11- The effect of simulation iterations on overtopping risk due to flood

شکل ۱۱- تأثیر تعداد تکرار شبیه سازی بر روی ریسک روگذری ناشی از سیلاب

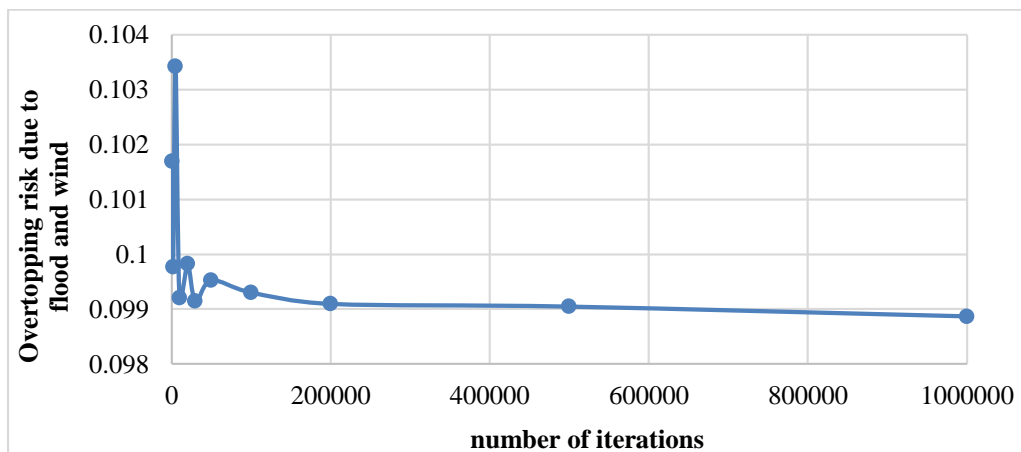


Fig. 12- The effect of simulation iterations on overtopping risk due to simultaneous effect of wind and flood  
 شکل ۱۲- تأثیر تعداد تکرار شبیه‌سازی بر روی ریسک روگذری ناشی از اثر همزمان سیلاب و باد

با توجه به شکل ۱۳ که در آن ریسک روگذری تحت اثر سیلاب محاسبه شده و از اثر باد صرف نظر شده است مشاهده می‌گردد با باز شدن تخلیه کننده تحتانی بطور متوسط از مقدار ریسک روگذری به میزان ۹/۲۰ درصد کاسته شده است. شایان ذکر است که در این حالت مقدار کاهش ریسک روگذری برای حداکثر سیلاب محتمل (PMF) برابر ۹/۶۰ درصد می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۱۴ که در آن ریسک روگذری تحت تأثیر دو عامل سیلاب و باد برای حالتی که دریچه تخلیه کننده تحتانی بسته است با حالت باز دریچه مقایسه شده است، مشاهده می‌گردد در این حالت نیز با باز شدن دریچه تخلیه کننده تحتانی مقدار ریسک روگذری بطور متوسط به میزان ۴/۱۰ درصد کاهش یافته و مقدار کاهش آن برای حداکثر سیلاب محتمل (PMF) و باد ۱۰۰ ساله برابر ۳/۰ درصد می‌باشد. مقایسه نتایج فوق نشان می‌دهد در صورت بسته بودن تخلیه کننده تحتانی، در مقایسه با حالت باز آن، تأثیر شدت سیلاب بر مقدار ریسک روگذری از تأثیر سرعت باد بیشتر می‌باشد.

### ۳-۵- تأثیر بازشدگی تخلیه کننده تحتانی در میزان ریسک روگذری

به منظور بررسی تأثیر باز بودن تخلیه کننده تحتانی سد در میزان ریسک روگذری، یک بار مخزن سد در حالت بسته بودن تخلیه کننده تحتانی شبیه‌سازی شده و میزان ریسک روگذری محاسبه گردیده است و بار دیگر ضمن شبیه‌سازی مخزن سد در حالت باز بودن تخلیه کننده تحتانی، میزان ریسک روگذری محاسبه شده و نتایج حاصله در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آمده است. شایان ذکر است که در هر دو حالت تراز اولیه سطح آب مخزن سد با مقدار حداقل و حداکثر به ترتیب ۱۰۰۵ و ۱۰۴۷ متر و همچنین ارتفاع سد با مقدار حداقل و حداکثر به ترتیب ۶۹/۵۲ و ۷۱ متر طبق توزیع‌های احتمالاتی یاد شده به عنوان پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته شده و در هر دو مورد روش MCS با تعداد تکرار ۲۰۰۰۰۰ صورت گرفته است.

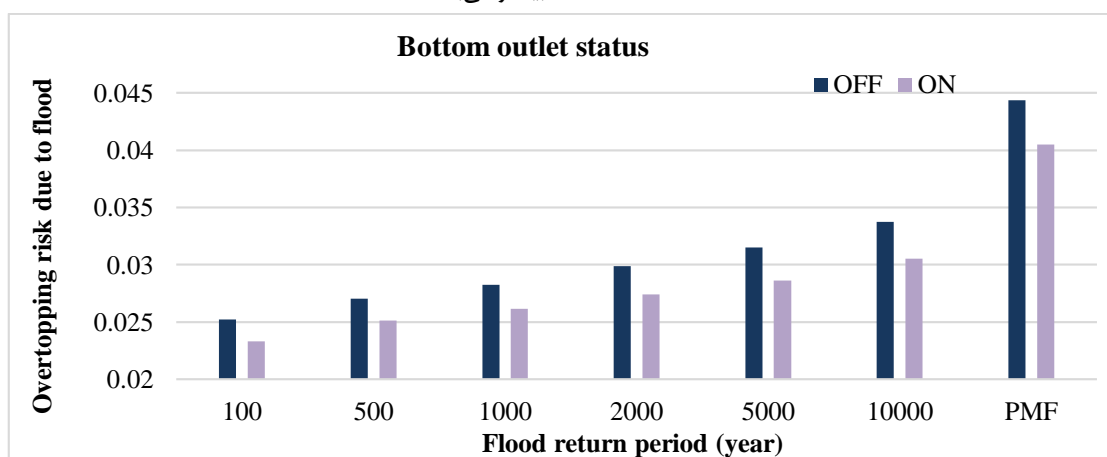


Fig. 13- The comparison of overtopping risk due to flood for closed and open bottom outlet  
 شکل ۱۳- مقایسه ریسک روگذری ناشی از اثر سیلاب برای حالت بسته دریچه تخلیه کننده تحتانی با حالت باز دریچه

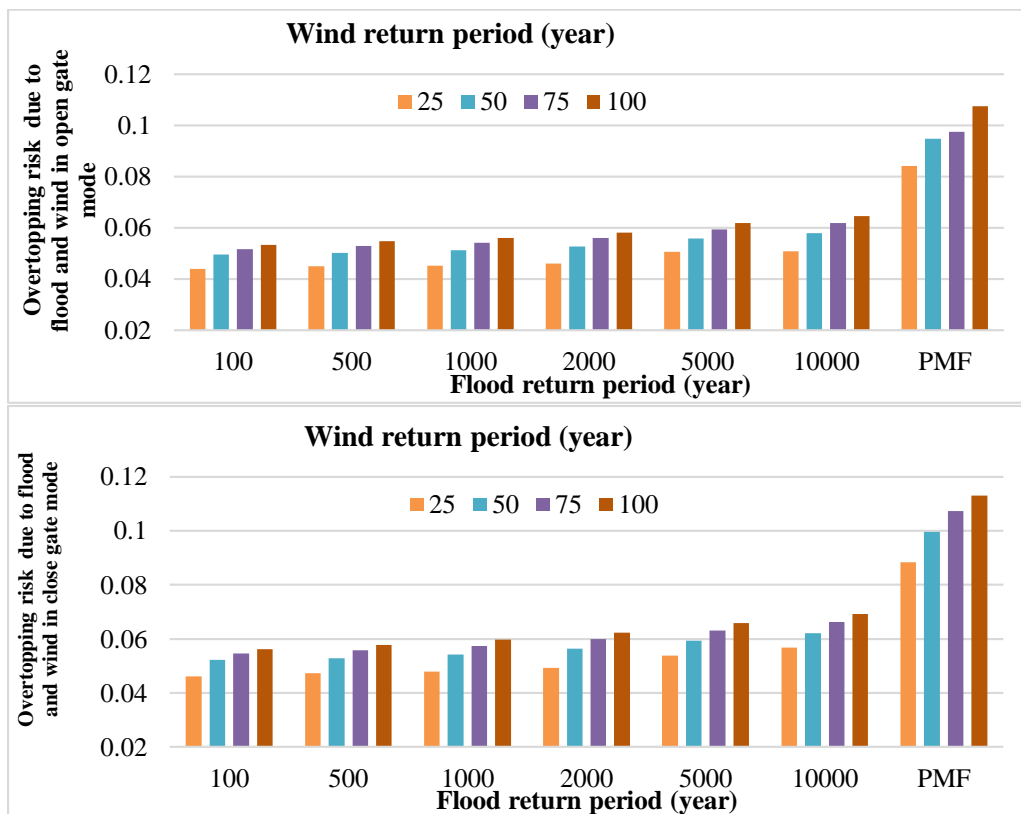


Fig. 14- The comparison of overtopping risk due to flood and wind for closed and open bottom outlet  
 شکل ۱۴- مقایسه ریسک روگذری ناشی از اثر سیلاب و باد برای حالت بسته دریاچه تخلیه کننده تحتانی با حالت باز دریاچه

مقدار ریسک روگذری در این حالت در مقایسه با حالت مشابه و سرعت باد با دوره بازگشت ۱۰۰ سال به میزان ۴۱ درصد افزایش یافته است.

#### ۵-۵- مقایسه نتایج ریسک روگذری حاصل از شبیه سازی با روش MCS و روش LHS

در این قسمت از تحقیق، ریسک های روگذری محاسبه شده با روش MCS و روش LHS با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. تعداد شبیه سازی در هر دو روش برابر ۲۰۰۰۰۰ مرتبه می باشد. در هر دو روش برای دوره بازگشت های مختلف سیلاب و باد، مقدار ریسک روگذری برای هر دو حالت تاثیر سیلاب به صورت مجزا و همچنین اثر توأم سیلاب و باد محاسبه گردیده و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مورد هم پارامترهای عدم قطعیت تراز اولیه سطح آب مخزن سد با مقدار حداقل و حداکثر به ترتیب ۱۰۰۵ و ۱۰۴۷ متر و همچنین ارتفاع سد با مقدار حداقل و حداکثر به ترتیب ۶۹/۵۲ و ۷۱ متر با توزیع های احتمالی یاد شده می باشند. در شکل ۱۶ نتایج حاصل از ریسک روگذری محاسبه شده ناشی از سیلاب با دوره بازگشت های مختلف با هر دو روش MCS و روش LHS با یکدیگر مقایسه شده است.

#### ۵-۴- تأثیر عدم قطعیت سرعت باد بر ریسک روگذری

به منظور بررسی اثر عدم قطعیت سرعت باد بر میزان ریسک روگذری از سد، در مدل ساخته شده شبیه سازی به روش MCS با تعداد تکرار ۲۰۰۰۰۰ مرتبه صورت گرفته است. پارامترهای عدم قطعیت منظور شده علاوه بر دوره بازگشت سیلاب عبارتند از رقوم اولیه آب در مخزن سد، ارتفاع خود سد و عدم قطعیت سرعت باد. به منظور وارد نمودن اثر عدم قطعیت سرعت باد بر ریسک روگذری از سد در روش MCS، حداقل سرعت باد برابر ۷۴/۲۰ km/h برای باد با دوره بازگشت ۲ سال و حداکثر سرعت باد برابر ۱۶۱/۴۰ km/h برای باد با دوره بازگشت ۵۰۰ سال در نظر گرفته شده است. توزیع احتمالی مورد استفاده نیز توزیع نرمال با  $\mu = ۱۲۶/۴۷۰$  و  $\sigma = ۲۶/۱۸۰$  در نظر گرفته شده است که توسط نرم افزار Easy Fit با  $P - Value = ۰/۹۸۲۸۹$  و  $۰/۱۱۸۵۴$  به عنوان بهترین توزیع قابل انتخاب تشخیص داده شده است.

نتایج حاصل از شبیه سازی و محاسبه ریسک مطابق شکل ۱۵ نشان می دهد که حداکثر مقدار ریسک روگذری برای سیلاب PMF بوده و مقدار آن برابر ۰/۱۵۷۷۱۷ می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد که

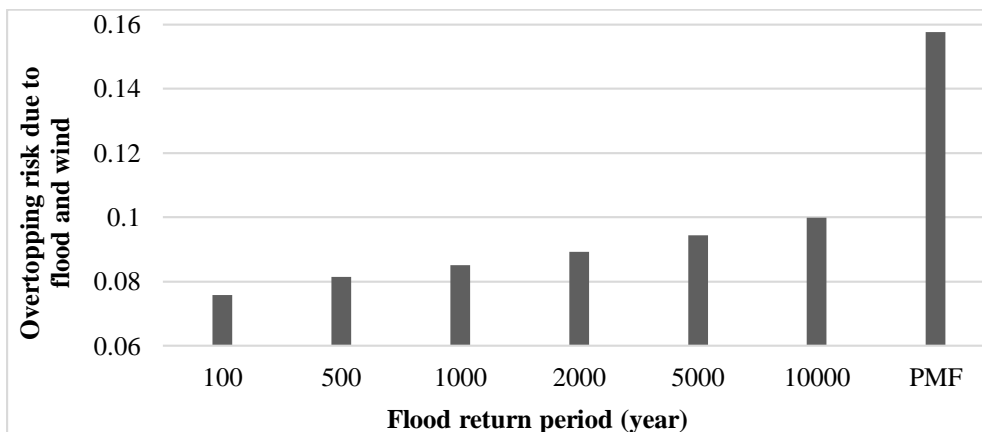


Fig. 15- The effect of wind velocity uncertainty on overtopping risk

شکل ۱۵- تأثیر عدم قطعیت سرعت باد بر ریسک روگذری

روش LHS رویکرد منظم‌تری را نسبت به روش MCS در جهت اتخاذ نمونه‌ها به کار می‌برد.

نتایج نشان می‌دهد در این حالت از شبیه‌سازی میانگین ریسک روگذری محاسبه شده برای سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف با روش MCS در حدود ۴/۳ درصد از میانگین ریسک روگذری محاسبه شده با روش LHS بیشتر است.

#### ۵-۶- مقایسه شاخص اعتمادپذیری نتایج روش MCS و روش LHS

به منظور بررسی و مقایسه کارایی هر دو روش MCS و LHS در محاسبه ریسک روگذری، در این قسمت از مقاله برای هر دو حالت اثر سیلاب و همچنین اثر توأم سیلاب و باد، شاخص اعتمادپذیری ( $\beta$ ) برای دو روش فوق‌الذکر به ازای دوره‌های مختلف بازگشت سیلاب محاسبه شده و در نمودار شکل‌های ۱۸ و ۱۹ آمده است. پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته شده ارتفاع اولیه آب در مخزن سد و ارتفاع خود سد می‌باشند و محاسبات برای سرعت باد با دوره بازگشت ۱۰۰ سال انجام شده است.

در شکل ۱۷ مقدار ریسک روگذری محاسبه شده تحت تأثیر توأم سیلاب و باد با روش‌های MCS و LHS آمده است. نتایج حاصل از شکل ۱۷ نشان می‌دهد در حالت اثر توأم سیلاب و باد، میانگین مقدار ریسک روگذری محاسبه شده با روش MCS در حدود ۳/۵۰ درصد از میانگین ریسک روگذری محاسبه شده با روش LHS بیشتر است.

تفاوت در مقادیر ریسک روگذری به دست آمده در دو روش MCS و LHS به جهت متفاوت بودن روش تولید نمونه در آنها می‌باشد که

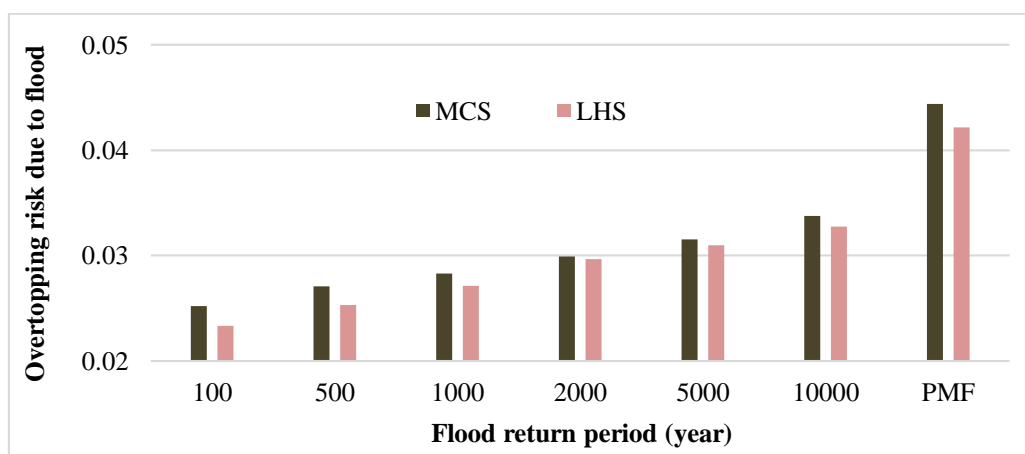


Fig. 16- Comparison of the overtopping risk due to flood in MCS and LHS methods

شکل ۱۶- مقایسه ریسک روگذری ناشی از سیلاب در روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش نمونه‌گیری ابرمکعب لاتین

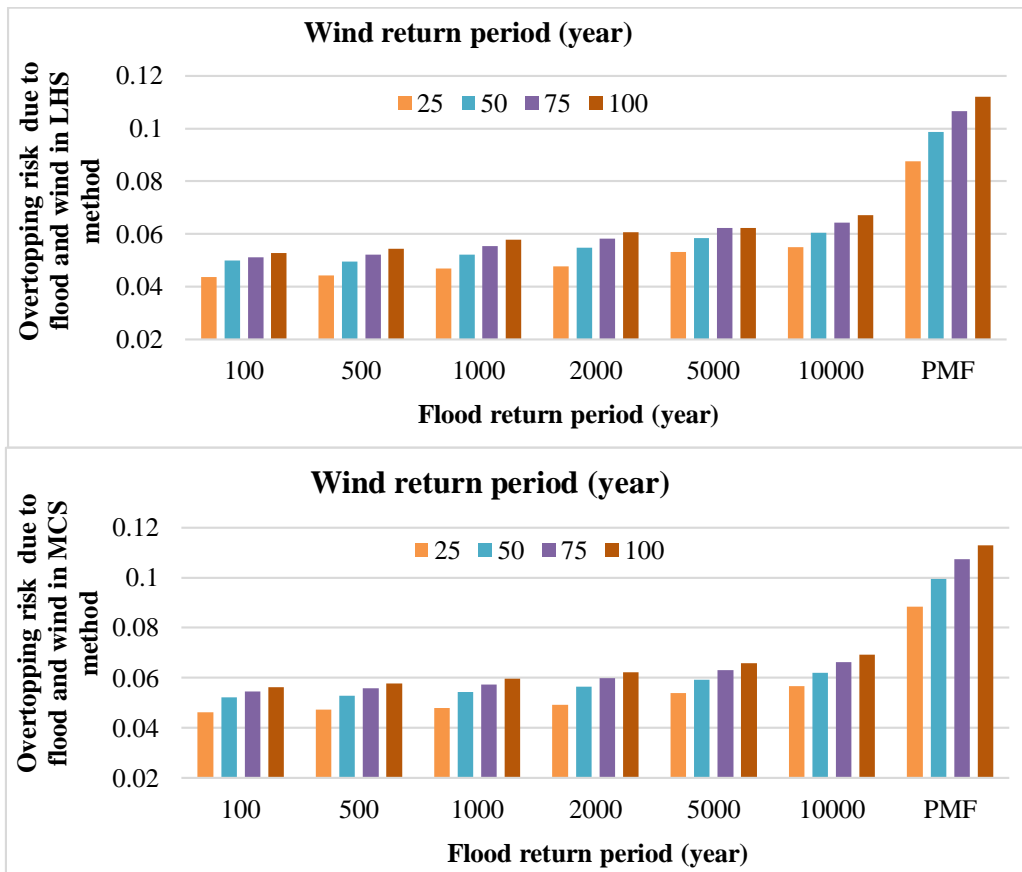


Fig. 17- Comparison of the overtopping risk due to flood and wind in MCS and LHS methods  
 شکل ۱۷- مقایسه ریسک روگذری ناشی از سیلاب و باد در روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش نمونه‌گیری ابرمکعب لاتین

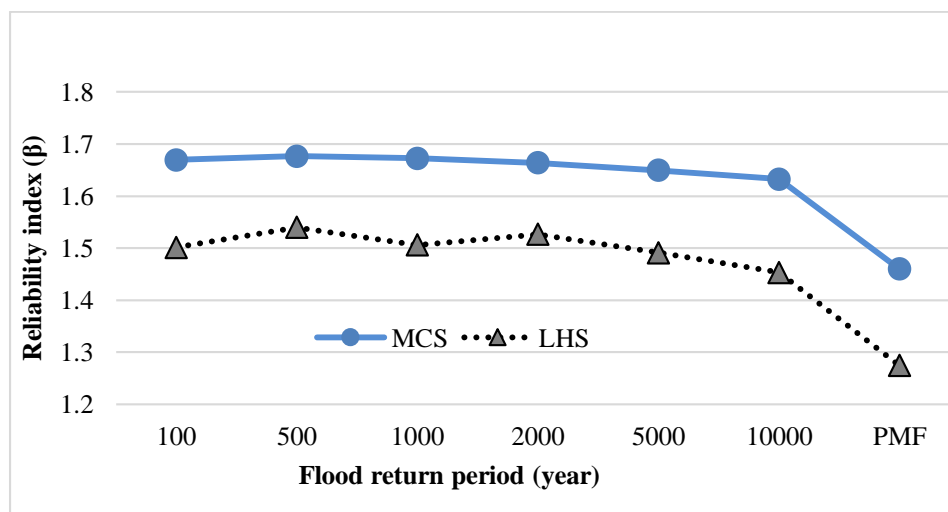


Fig. 18- Comparison of the reliability index obtained by the MCS and LHS methods considering flood  
 شکل ۱۸- مقایسه شاخص اعتمادپذیری به دست آمده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش نمونه‌گیری ابرمکعب لاتین در حالت سیلاب

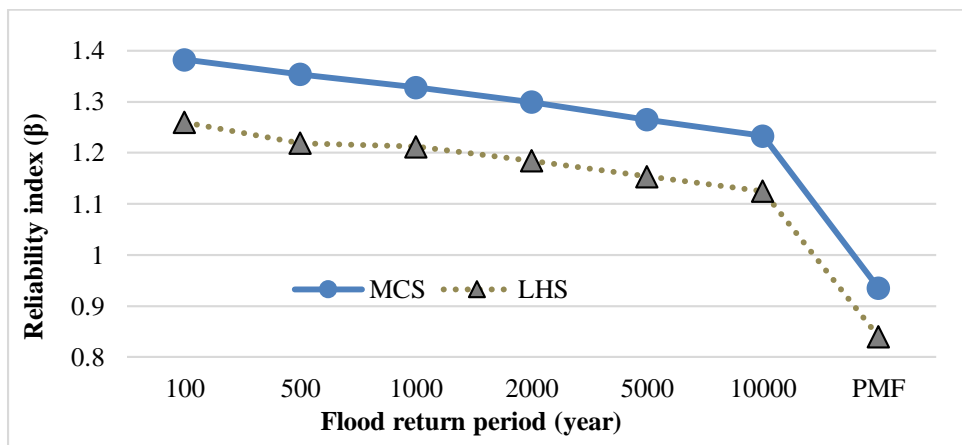


Fig. 19- Comparison of the reliability index obtained by the MCS and LHS methods considering flood and wind

شکل ۱۹- مقایسه شاخص اعتمادپذیری به دست آمده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش نمونه‌گیری ابرمکعب لاتین در حالت سیلاب و باد

با توجه به شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌گردد که میانگین شاخص اعتمادپذیری به دست آمده برای روش MCS حدوداً ۱۱ درصد در حالت اثر سیلاب و باد از میانگین شاخص اعتمادپذیری روش LHS بیشتر می‌باشد که نشانگر این است که هر چند نمونه‌گیری در روش LHS منظم‌تر می‌باشد و این روش با وجود پیچیدگی با تعداد نمونه کمتری همگرا می‌شود، ولی اعتمادپذیری نتایج مربوط به روش MCS بیشتر بوده و در مورد ارزیابی ریسک روگذری سدهای خاکی نتایج MCS نسبت به LHS قابل اعتمادتر می‌باشند.

با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌گردد که علیرغم همگرایی نتایج روش LHS در تعداد تکرار کمتر، در شرایط مشابه و به ازای تعداد تکرار یکسان، زمان لازم برای شبیه‌سازی در روش MCS از روش LHS کمتر است که علت آن را در پیچیدگی نمونه‌گیری با روش LHS نسبت به MCS می‌توان جستجو نمود.

۷-۵- مقایسه زمان شبیه‌سازی روش MCS با روش LHS  
به منظور مقایسه مدت زمان لازم برای شبیه‌سازی مدل ساخته شده

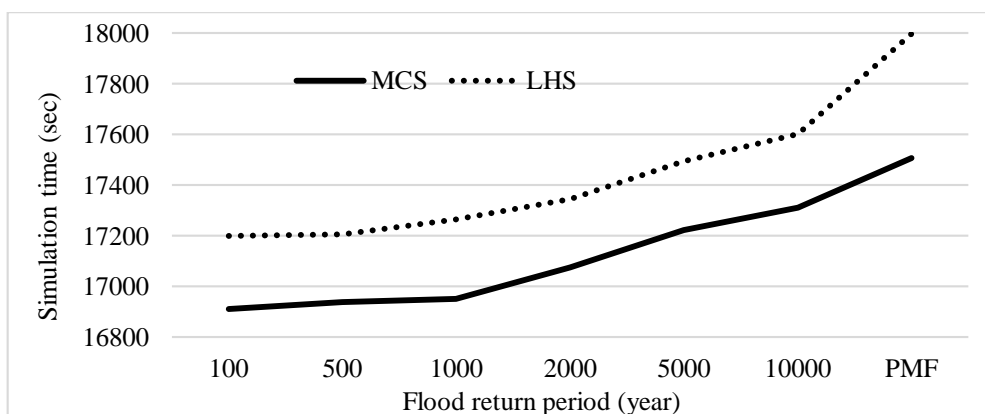


Fig. 20- Comparison reservoir simulation time with MCS and LHS methods

شکل ۲۰- مقایسه زمان شبیه‌سازی مخزن سد با روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش نمونه‌گیری ابرمکعب لاتین



## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، ریسک روگذری سد حاجیلرچای برای دوره‌های بازگشت مختلف سیلاب و باد با استفاده از مدل سازی مخزن سد به روش پویایی سیستم‌ها در شرایط عدم قطعیت محاسبه گردید. بدین منظور با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تراز اولیه آب مخزن سد و ارتفاع خود سد و بکارگیری روشهای MCS و روش LHS در مدل پویایی سیستم ساخته شده برای مخزن سد، مقدار ریسک روگذری در حالت تأثیر سیلاب و همچنین تأثیر توأم سیلاب و باد مورد محاسبه قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد افزودن تأثیر باد به میزان قابل توجهی باعث افزایش مقدار ریسک روگذری نسبت به حالتی که تنها اثر سیلاب در نظر گرفته شده است می‌گردد. علاوه بر این در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت ارتفاع خود سد باعث افزایش قابل توجه در میزان ریسک روگذری محاسبه شده نسبت به حالتی که صرفاً عدم قطعیت تراز اولیه سطح آب مخزن سد در نظر گرفته شده است، می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مخزن نشان می‌دهد در حالتی که درجه تخلیه کننده تحتانی سد باز است میزان ریسک روگذری به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که مقدار متوسط کاهش آن برای ریسک روگذری ناشی از اثر سیلاب برابر ۹/۲۰ درصد و برای ریسک روگذری ناشی از اثر سیلاب و باد برابر ۴/۱۰ درصد می‌باشد و همچنین با اعمال عدم قطعیت سرعت وزش باد بر سطح مخزن سد میزان متوسط ریسک روگذری به میزان ۴۱ درصد نسبت به حالت مشابه و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت مذکور افزایش می‌یابد. همچنین با مراجعه به نتایج و نمودارهای مربوطه مشخص گردید میانگین مقادیر ریسک روگذری در اثر سیلاب محاسبه شده به روش MCS در حدود ۴/۳۰ درصد از میانگین ریسک روگذری محاسبه شده به روش LHS بیشتر بوده و در حالت اثر توأم سیلاب و باد مقدار این اختلاف برابر ۳/۵۰ درصد می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد در شرایط مشابه، شاخص اعتمادپذیری نتایج حاصل از MCS نسبت به روش LHS بیشتر بوده و زمان لازم برای شبیه‌سازی به روش MCS از روش LHS کمتر می‌باشد. لذا استفاده از پویایی سیستم و شبیه‌سازی به روش MCS نسبت به روش LHS سریع‌تر، قابل اعتمادتر و راحت‌تر بوده و از این روش می‌توان به عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی و محاسبه ریسک روگذری از سدها استفاده نمود.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Overtopping
- 2- Engineering Systems
- 3- Uncertainty
- 4- Modes
- 5- Monte Carlo Simulation
- 6- Latin Hypercube Sampling

- 7- United States Bureau of Reclamation
- 8- System Dynamics Model
- 9- Stocks
- 10- Flows
- 11- Converters
- 12- Connectors

## ۷- مراجع

- Bandab Consulting Engineers (2013) Hajilarchay storage dam project report volumes 1 to 9. East Azerbaijan Regional Water Management Company, Iran (In Persian)
- Behrooz M, Alimohammadi S, Atari J (2014) Sensitivity analysis of hydrologic, hydraulic and economic uncertainties in design of flood control systems. Journal of Iran Water Resources Research 10(2):69-81 (In Persian)
- Chongxun M, Fanggui L, Mei Y, Guikai S (2008) Risk analysis for earth dam overtopping. Journal of Water Science and Engineering 1(2):76-87
- Forrester J W (1961) Industrial dynamics. MIT Press, Cambridge, MA. 464 pp
- Ganji Nowrouzi Z, Shokoohi A, Singh V P (2016) Evaluating the effect of discharge- probability function uncertainty on the risk of agricultural loss due to flood using Monte Carlo method. Journal of Iran Water Resources Research 12(2):13-23 (In Persian)
- Gebregiorgis A, Hossain F (2012) Hydrological risk assessment of old dams: case study on Wilson dam of Tennessee River Basin. Journal of Hydrologic Engineering 17(1):201-212
- Ghias M (2014) An introduction to the Monte Carlo simulation methods. Journal of Polymerization 4(1):67-77 (In Persian)
- Goodarzi E, Mirzaei M, Ziaei M (2012) Evaluation of dam overtopping risk based on univariate and bivariate flood frequency analyses. Canadian Journal of Civil Engineering 39(4):374-387
- Goodarzi E, Shui L T, Ziaei M (2014) Risk and uncertainty analysis for dam overtopping- case study: the Doroudzan Dam, Iran. Journal of Hydro-Environment Research 8(1):50-61
- Goodarzi E, Shui L T, Ziaei M (2012) Dam overtopping risk using probabilistic concepts-case study: The Meijaran dam, Iran. Ain Shams Engineering Journal 4(2):185-197
- Hsu Y C, Tung Y K, Kuo J T (2011) Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind. Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 25(1):35-49

- uncertainties. *Journal of Hydraulics* 8(1):1-18 (In Persian)
- Sharafati A (2015) Jamyshan dam overtopping risk analysis using Monte Carlo simulation and precipitation threshold curve. *Journal of Hydraulics* 10(3):15-26 (In Persian)
- Shayanfar M, Sanaee E, Mohammadzadeh S (2004) Reliability analysis of structures using the hybrid simulation models. *Journal of School of Engineering* 16(1):19-35 (In Persian)
- Simonovic S P, Ahmad S (2000) System dynamics modeling of reservoir operations for flood management. *Journal of Computing in Civil Engineering* 14 (3):190-198
- Sterman J D (2000) *Business dynamics System thinking and modeling for complex world*. Irwin, McGraw-Hill, MA, 982p
- USBR (1992) Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowance for storage dams. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 47p
- Vali Samani J M, Radmehr H, Delavar M (2015) Uncertainty analysis and overtopping risk evaluation of Maroon dam with Monte Carlo and latin hypercube methods. *Journal of Water and Soil* 29(3):517-527 (In Persian)
- Wang Z, Bowles D S (2005) Dam breach simulations with multiple breach locations under wind and wave actions. *Journal of Advances in Water Resources* 29:1222-1237
- Wu S j, Yang J C, Tung Y K (2011) Risk analysis for flood-control structure under consideration of uncertainties in design flood. *Journal of Natural Hazards* 58:117-140
- Zhang X L, Wen M X (1992) Statistical analysis of China's reservoir failure and discussion on its security strategy. *The Proceedings of Water Management, Beijing, Water Management Department of Ministry of Water Resources*
- Hughes S A (2004) Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter. *Journal of Coastal Engineering* 51(11):1085-1104
- Khakbaz B, Tajrishi M, Abrishamchi A (2001) Risk and reliability analysis of dam overtopping due to wind. *Proceedings of the 3rd Iranian Hydraulic Conference, 6-8 November 2001, Tehran University, Iran, 445-453 (In Persian)*
- Kuo J T, Yen B C, Hsu Y C, Lin H F (2007) Risk analysis for dam overtopping Feitsui reservoir as a case study. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(8):955-963
- Kwon H, Moon Y (2005) Improvement of overtopping risk evaluations using probabilistic concepts for existing dams. *Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 20(4):223-237
- Mahmoudian Shoushtari M, Malekmohammadi B and Banihashemi M (2016) Dam safety risk assessment (Case study: flood risk for Golestan Dam). *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering* 48(4):395-405 (In Persian)
- Mansouri N, Kabiri Samani A (2012) Risk based analysis of earth dam overtopping (Vanak dam as a case study). *Proceedings of the 9th International Congress on Civil Engineering, 8-10 May 2012, Isfahan University of Technology, Iran, 324-333 (In Persian)*
- Mays LW (2000) The role of risk analysis in water resources engineering. *Journal of Contemporary Water Research and Education* 103(1):8-12
- Mollahosseini M, Mousavi S J, Salavitarab A (2012) Evaluation the effect of storage capacity creation to reduce flood damage using optimization-simulation system dynamics based model. *Proceedings of the 9th International Congress on Civil Engineering, 8-10 May 2012, Isfahan University of Technology, Iran, 237-245 (In Persian)*
- Sharafati A, Zahabiyoun B (2014) Dam overtopping risk analysis considering hydrologic and hydraulic