

## ارزیابی ریسک روگذری سد تبارک آباد بر پایه تحلیل فراوانی یک متغیره و دو متغیره سیلاب\*

آتوسا رضازاده عنبرانی<sup>(۱)</sup> محمود فغفور مغربی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** از میان دلایل مهم شکست سد خاکی روگذری عمده ترین دلیل است. در تحلیل شکست سد به علت روگذری تحلیل عدم قطعیت و محاسبه ریسک ضروری است. در این پژوهش کاربرد تحلیل ریسک شکست سد خاکی بر اثر سرریز شدن آب از بدنه سد بر پایه تحلیل فراوانی یک متغیره و دو متغیره سیلاب با استفاده از توزیع لوگ نرمال برای سد خاکی تبارک آباد واقع در خراسان رضوی بررسی شده است. نتایج تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب در شش هیدروگراف جریان ورودی و با در نظر گرفتن  $Q_p-V$  (ترکیب دبی و حجم سیلاب) برای دوره بازگشت های توأم ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال ارائه شده است. ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی تک متغیره سیلاب و برای همه هیدروگراف های حاصل از تحلیل فراوانی دو متغیره و شش تراز اولیه آب در مخزن با در نظر گرفتن دبی اوج سیل، تراز اولیه آب و ضریب دبی سرریز به عنوان متغیرهای غیرقطعی ارزیابی شده است. برای انجام تحلیل عدم قطعیت از روش شبیه سازی مونت کارلو و تکنیک نمونه گیری لاتین هایپرکیوب استفاده شده است. نهایتاً، نتایج به دست آمده با استفاده از هر دو روش تحلیل فراوانی سیلاب یک متغیره و دو متغیره در دوره بازگشت های مختلف با هم مقایسه گردید. نتایج نشان داد که ریسک روگذری برآورد شده در همه دوره بازگشت ها بر اساس تحلیل فراوانی سیلاب دو متغیره بیشتر از روش تک متغیره بوده که خطرات بیشتری به همراه دارد. همچنین هیدروگراف  $V1-Q$  که دارای بیشترین حجم سیلاب بوده، در همه ارتفاع ها از ریسک بیشتری نسبت به بقیه هیدروگراف ها برخوردار است. در برآورد ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی یک متغیره و دو متغیره، بالاترین تراز آب در مخزن، نسبت به استفاده از سیلاب های با دوره بازگشت طولانی تر، منجر به روند افزایش ریسک محسوس تری خواهد شد، به طوری که در ارتفاع ۶۶ متری تراز سطح آب، مقدار ریسک روگذری برای سد بسیار بالا است.

**واژه های کلیدی** عدم قطعیت، ریسک روگذری، تحلیل فراوانی یک متغیره و دو متغیره سیلاب، شبیه سازی مونت کارلو، نمونه گیری لاتین هایپرکیوب.

## Overtopping Risk Evaluation of Tabarak-Abad Dam based on Univariate and Bivariate Flood Frequency Analysis

A. Rezazadeh Anbarani

M. Faghfour Maghrebi

**Abstract** Among the most important causes of dam failure, overtopping is the main causes. Analysis of dam failure due to overtopping is essential to calculate the failure risk considering the uncertainties. In this study, the application of risk analysis for earth dam failure due to overtopping based on univariate and bivariate flood frequency analysis has been investigated using log-normal distribution for the Tabarak-Abad earth-fill dam located in Khorasan Razavi province of Iran. Considering  $Q_p-V$  combinations (flood peak discharge - flood volume) for the joint return periods of 50, 100 and 200 years, the results of the bivariate flood frequency analysis have been proposed in the form of six inflow hydrographs. The overtopping risk has been evaluated based on the univariate flood frequency analysis for all hydrographs resulted from bivariate frequency analysis with different return periods and six initial depth of water in the reservoir, considering quantile of flood peak discharge, initial depth of water in the reservoir and discharge coefficient of spillway as uncertain variables. Uncertainty analysis is conducted using Monte Carlo simulation method and Latin hypercube sampling technique. Finally, comparison of univariate and bivariate flood frequency analysis within different periods indicates that bivariate flood frequency analysis method resulted in greater estimated overtopping risk values in all return periods which is accompanied with higher degree of risk. Also, the  $V1-Q$  hydrograph, which has the highest volume of flood, is associated with a higher risk in all waterlevels in comparison to other hydrographs. Moreover, to evaluate overtopping risk based on univariate and bivariate frequency analyses, the increasing trend of risk values for rising water level in the reservoir is more tangible than that of increasing return periods. So that at the water level of 66 meters, overtopping risk for the dam is very high.

**Key Words** Uncertainty, Overtopping risk, Univariate and bivariate flood frequency analysis, Monte Carlo Simulation, Latin Hypercube Sampling.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۸/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۱/۳۱ می باشد.

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد آب و سازه های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: magherebi@um.ac.ir

(۲) نویسنده مسئول: استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

## مقدمه

از حجم سیلاب، دبی اوج و تداوم جریان با استفاده از توزیع نرمال تحلیل کردند. Yue [6] از توزیع نرمال دو متغیره برای تحلیل توزیع احتمال همبسته توأم دبی پیک و حجم و توزیع احتمال همبسته توأم حجم و مدت زمان سیل استفاده کرد. Yue [7] با استفاده از توزیع لوگ نرمال دو متغیره، روشی برای توزیع احتمال همبسته توأم دبی پیک و حجم و توزیع احتمال همبسته توأم حجم و مدت زمان ارائه کرد. همچنین توزیع‌های توأم، توزیع‌های شرطی و دوره بازگشت‌های مرتبط با این متغیرهای تصادفی از توزیع‌های حاشیه‌ای به دست آمد. De Michele و همکاران [8] یک توزیع احتمالی دو متغیره را با استفاده از تابع مفصل و توزیع مقدار حدی تعمیم یافته دو متغیره برای دو پارامتر دبی سیل و حجم ارائه کردند. مفصل‌ها توابعی هستند که توزیع‌های چند متغیره را به توزیع‌های حاشیه‌ای یک متغیره پیوند می‌دهند. همچنین، رفتار مخزن با استفاده از تعداد زیادی از هیدروگراف‌های سیل برای بررسی ایمنی هیدرولوژیکی مخازن و کفایت سرریز سد، در نظر گرفته شده بود.

Yanmaz و Gunindi [9] اطمینان‌پذیری روگذری یک سد را با استفاده از تحلیل فراوانی سیلاب دو متغیره ارزیابی کردند. تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب با در نظر گرفتن ترکیب دبی پیک سیلاب و حجم رواناب و برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال و با استفاده از توزیع گاما دو متغیره انجام شد. از طریق مطالعه آن‌ها، حداکثر ارتفاع مخزن و ریسک روگذری با انجام احتمالاتی روند یابی مخزن بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین شد. منصور و همکاران [۱۰] به منظور توسعه کاربرد آنالیز ریسک در تحلیل ایمنی سدها، به محاسبه خطر روگذری سد خاکی ونک با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در این پدیده با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب پرداختند. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن عدم قطعیت این پارامترها در احتمال شکست سد مؤثر بوده است. همچنین دقت در برآورد بزرگی بی پیک سیلاب نقش بسزایی در کاهش ریسک روگذری سد دارد. درحالی‌که تأثیر تراز اولیه آب بر میزان خطرپذیری سد قابل اغماض

در سدها یا سازه‌های کنترل سیلاب برای جلوگیری از هرگونه فروپاشی و یا شکست ناگهانی سازه، باید توجه ویژه‌ای به دبی سیلاب شود. به‌عنوان مثال، با طراحی مناسب سرریز سد و ظرفیت کنترل سیلاب یک مخزن می‌توان ایمنی سد را اطمینان بخشید و از هرگونه مشکلات نامطلوب مانند روگذری جلوگیری کرد. از این رو، برآورد دقیق دبی طراحی سیلاب و هیدروگراف جریان برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی مورد نیاز است. دبی طراحی سیلاب به‌عنوان حداکثر جریان سیل که یک سازه می‌تواند با اطمینان عبور دهد، تعریف می‌شود [1]. در ارزیابی ریسک سیلاب از آنالیز تک متغیره استفاده می‌شود که تنها متغیر دبی اوج سیلاب مدنظر قرار می‌گیرد اما این روش یک تکنیک خیلی دقیق نیست و موجب دستیابی به اطلاعات محدود در زمینه ریسک سیلاب می‌گردد، درحالی‌که در برنامه‌ریزی و طراحی‌های هیدرولوژیکی مرتبط با مدیریت سیلاب تنها آگاهی نسبت به متغیر دبی اوج سیلاب کافی نیست و نیاز به اطلاعات و آگاهی در زمینه سایر متغیرهای مهم یعنی تداوم و حجم سیلاب نیز است. برای دسترسی به اطلاعات در زمینه متغیرهای سیلاب با استفاده از تحلیل‌های آماری چند متغیره، نیاز به توابع توزیع تجمعی و توابع چگالی احتمال توأم متغیرهای سیلاب است [۲].

بسیاری از تلاش‌ها برای تحلیل فراوانی دو متغیره و چند متغیره سیلاب با در نظر گرفتن ارتباط بین متغیرهای مختلف سیلاب از جمله دبی اوج، حجم سیلاب و مدت زمان سیل انجام شده است. Bobee و Cunnane [3] و Rasmussen [4] مطالعات جامعی درباره‌ی استفاده از تحلیل فراوانی سیلاب تک متغیره ارائه دادند و به این نتیجه رسیدند که تحلیل فراوانی تک متغیره نمی‌تواند ارزیابی دقیقی از پارامترهای سیل ارائه دهد. از این رو، باید تحلیل فراوانی دو متغیره یا چند متغیره سیلاب برای مشخص کردن بهتر هیدروگراف جریان با در نظر گرفتن سایر عوامل مهم مانند حجم رواناب و یا مدت زمان سیل به کار گرفته شود. Goel و همکاران [5] فراوانی سیلاب سه متغیره را که عبارت‌اند

سیلاب برای سد تبارک آباد واقع در خراسان رضوی ارائه شده است. عوامل اصلی غیرقطعی در تحلیل فراوانی تک متغیره سیلاب عبارت اند از: دبی اوج سیل (Qp)، عمق اولیه آب در مخزن (H0) و ضریب تخلیه سرریز (Cd) و عوامل غیرقطعی در تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب، عمق اولیه آب در مخزن و ضریب تخلیه سرریز می باشند.

### توزیع دو متغیره لوگ نرمال

در توزیع لوگ نرمال دو متغیره، تابع چگالی احتمال (PDF: Probability Density Function) لوگ نرمال دو متغیره به صورت زیر تعریف می شود:

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(-\frac{q}{2}\right) \quad (1)$$

که در آن:

q =

$$\frac{1}{1-\rho^2} \left[ \left( \frac{\ln(x_1) - \mu_{Y_1}}{\sigma_{Y_1}} \right)^2 - 2\rho \left( \frac{\ln(x_1) - \mu_{Y_1}}{\sigma_{Y_1}} \right) \left( \frac{\ln(x_2) - \mu_{Y_2}}{\sigma_{Y_2}} \right) + \left( \frac{\ln(x_2) - \mu_{Y_2}}{\sigma_{Y_2}} \right)^2 \right]$$

$\sigma_{Y_i}$  و  $\mu_{Y_i}$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی در حالت لگاریتمی ( $Y_i = \ln X_i, i=1,2$ ) که از فرمول های (۲) و (۳) به دست می آیند [13]:

$$\sigma_{Y_i} = \left[ \ln \left( 1 + \frac{\sigma_{X_i}^2}{\mu_{X_i}^2} \right) \right] \quad (2)$$

$$\mu_{Y_i} = \ln(\mu_{X_i}) - \frac{\sigma_{Y_i}^2}{2} \quad (3)$$

که در آن ها  $\mu_{X_i}$  و  $\sigma_{X_i}$  میانگین و انحراف معیار متغیر تصادفی  $X_i$  برای  $i=1,2$  بوده و  $\rho$  برابر با ضریب همبستگی دو متغیر تصادفی  $Y_1$  و  $Y_2$  است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\rho = \frac{E[(Y_1 - \mu_{Y_1})(Y_2 - \mu_{Y_2})]}{\sigma_{Y_1}\sigma_{Y_2}} \quad (4)$$

است. بر اساس نتایج آنالیز ریسک، با تلفیق اثر باد و سیل میزان ریسک سد به طور محسوسی افزایش می یابد. گودرزی و همکاران [11] با استفاده از تحلیل فراوانی سیلاب تک متغیره و توزیع احتمالاتی گامبل لاجستیک دو متغیره برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال و با استفاده از شبیه سازی مونت-کارلو و لاتین هایپرکیوب، احتمال روگذری سد درودزن در جنوب ایران را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ریسک روگذری با افزایش سطح اولیه آب در هر دو روش عدم قطعیت افزایش می یابد. ذهبیون و شرافتی [۱۲] ریسک روگذری سد را با در نظر گرفتن عدم قطعیت بارش و سیلاب تحلیل کردند. آنها با استفاده از مدل های RPG (Rain Pattern Generator) و HEC1، سیلاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت های بارش و پارامترهای مدل بارش - رواناب تولید نمودند. همچنین با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو تحلیل ریسک روگذری سد جامیشان در استان کرمانشاه انجام شده که اثرات ابعاد سرریز، ارتفاع سد و تراز نرمال بر ریسک بررسی شده است. نتایج نشان داد که در مقایسه دو عامل هیدرولیکی مؤثر بر سرریز شدن سد، حجم کنترل سیلاب بر ریسک شکست آن تأثیر بیشتری دارد.

سالاری و همکاران [۲] از توابع مفصل برای مدل بندی ساختار همبستگی و همچنین برآورد توابع توزیع تجمعی شرطی و نیز دوره های بازگشت توأم ترکیب های مختلف متغیرهای سیلاب در ایستگاه هیدرومتری اهواز بر روی رودخانه کارون استفاده کردند. آنها همچنین بیان کردند که طرح این سناریو های متفاوت می تواند برای ارزیابی ریسک مرتبط با مسائل هیدرولوژیکی از قبیل طراحی سرریز و کنترل سیلاب مفید باشد. نتایج نشان دهنده کارایی و انعطاف پذیری کاربرد توابع مفصل در تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب بود.

همان طور که گفته شد بیشتر مباحث مطرح شده در زمینه ریسک روگذری سدها، استفاده از تحلیل فراوانی تک متغیره سیلاب بر اساس دبی اوج برای تولید هیدروگراف ورودی به عنوان پارامتر عدم قطعیت بوده است. در این مطالعه، ریسک روگذری و تحلیل عدم قطعیت بر اساس مفهوم فراوانی تک متغیره و دو متغیره

$$\frac{dV}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (۹)$$

که در آن  $I(t)$  دبی ورودی به مخزن،  $Q(t)$  دبی خروجی از مخزن،  $V$  حجم آب در مخزن و  $t$  زمان است. می توان با حل معادله (۹) با استفاده از روش رانگ-کوتا (Rung-Kutta) مرتبه چهارم، حداکثر ارتفاع آب در مخزن را محاسبه کرد. می دانیم:

$$dV = A(H) \times dH \quad (۱۰)$$

که در آن  $A(H)$  سطح پلان مخزن در رقوم  $H$  است. با جایگزینی معادله (۱۰) در معادله پیوستگی (معادله ۹) نتیجه زیر حاصل می شود:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I(t)-Q(t)}{A(H)} \quad (۱۱)$$

با در نظر گرفتن رابطه سرریز به جای  $Q(t)$  حاصل می شود:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I(t)-C_d L H^{3/2}}{A(H)} \quad (۱۲)$$

که در آن  $L$  به عنوان طول تاج و  $H$  تراز سطح آب در دریاچه سد نسبت به تراز تاج و  $C_d$  ضریب تخلیه سرریز است، همچنین سمت راست معادله اخیر تابعی از  $H$  و  $t$  است؛ بنابراین:

$$\frac{dH}{dt} = f(t, H) \quad (۱۳)$$

حال با استفاده از ضرایب رانگ-کوتا که به صورت زیر هستند و معلوم بودن  $H_i$  که ارتفاع آب در مخزن در گام زمانی  $i$  ام است، می توان  $H_{i+1}$  مخزن را در گام زمانی  $i+1$  به دست آورد:

$$H_{i+1} = H_i + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (۱۴)$$

که در آن:

$$K_1 = \Delta t \times f(t_i, H_i)$$

$$K_2 = \Delta t \times f(t_i + \frac{\Delta t}{2}, H_i + \frac{1}{2}K_1)$$

$$K_3 = \Delta t \times f(t_i + \frac{\Delta t}{2}, H_i + \frac{1}{2}K_2)$$

$$K_4 = \Delta t \times f(t_i + \Delta t, H_i + K_3)$$

$$(۱۵)$$

تابع توزیع تجمعی (CDF: Cumulative Distribution Function) توزیع دو متغیره لوگ نرمال  $F(X_1, X_2)$  به صورت آنالیتیک قابل حل نیست و باید به صورت انتگرال عددی محاسبه شود. دوره بازگشت برای دو متغیر  $X_1$  و  $X_2$  که به ترتیب با  $T_{x1}$  و  $T_{x2}$  نشان داده می شوند، می توان به صورت زیر نوشت:

$$T_{x1} = \frac{1}{1-F(x_1)} (F(x_1) = P[X_1 \leq x_1]) \quad (۵)$$

$$T_{x2} = \frac{1}{1-F(x_2)} (F(x_2) = P[X_2 \leq x_2]) \quad (۶)$$

دوره بازگشت توأم به دو حالت "یا" و "و" و دوره بازگشت شرطی با توجه به هدف طراحی تقسیم می شوند. محاسبات مربوط به دوره بازگشتی که به "یا" معروف است که در آن یکی از متغیرهای تصادفی  $X_1$  یا  $X_2$  یا هر دو از حدود آستانه  $x_1$  یا  $x_2$  بیشتر شوند، که به صورت زیر نوشته می شود:

$$T_{x1,x2} = \frac{1}{1-F(x_1,x_2)} \quad (۷)$$

دوره بازگشتی که به "و" معروف است یکی از متغیرهای تصادفی  $X_1$  و  $X_2$  از حدود آستانه  $x_1$  و  $x_2$  بیشتر شوند که به شکل زیر بیان می گردد [14]:

$$T_{x1,x2} = \frac{1}{1-F_{x1}(x_1)-F_{x2}(x_2)-F_{x1,x2}(x_1,x_2)} \quad (۸)$$

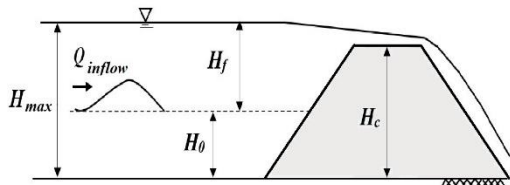
شرایط انواع دیگر دوره بازگشت دو متغیره توسط Yue [14] و Salvadori و De Michele [8] ارائه شده است. در این پژوهش، نوع "یا" دوره بازگشت توأم در تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب استفاده شده است.

### روند یابی مخزن

هدف اصلی از تحلیل پدیده شکست ناشی از سرریز شدن آب از بدنه سد خاکی، تخمین ارتفاع آب در مخزن با توجه به دبی ورودی و مقایسه با ارتفاع تاج است. در این راستا، سیلاب درون مخزن روند یابی می شود که ساده ترین فرم آن به صورت زیر نوشته می شود:

روگذری  $P_f$  به صورت زیر خواهد بود:

$$P_f = P[H_f + H_0 > H_c] = P[H_f > H_c - H_0] \quad (18)$$



شکل ۱ نمای شماتیک روگذری سد

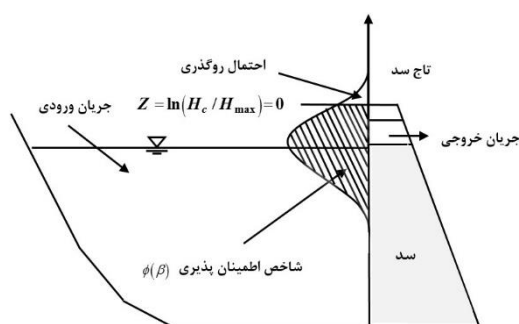
از این رو تابع عملکرد به صورت زیر نوشته می شود:

$$Z_f = \ln\left(\frac{H_c}{H_{max}}\right) \quad (19)$$

که در آن تابع عملکرد سیل و  $H_{max}$  بالاترین سطح آب در طول یک رویداد سیل، بر اساس روند یابی مخزن محاسبه شده است. در نهایت، ریسک روگذری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Risk = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = 1 - \Phi(\beta) \quad (20)$$

که در آن  $\beta$  نشان دهنده شاخص اطمینان پذیری بوده و به عنوان نسبت میانگین تابع عملکرد  $\mu_z$  به انحراف معیار استاندارد  $\sigma_z$  تعریف می شود. همچنین  $\Phi(\beta)$  احتمال نرمال تجمعی مربوط به  $\beta$  است (شکل ۲) [18].



شکل ۲ برآورد ریسک روگذری سد [18]

### آنالیز عدم قطعیت

هدف از آنالیز عدم قطعیت تعیین ویژگی های آماری خروجی های سیستم و یا بررسی اثر عوامل تغییرپذیر در

با معلوم شدن  $H_{i+1}$  مقدار  $Q_{i+1}$  از رابطه سرریز محاسبه می شود. به همین ترتیب می توان  $H$  ها و دبی های خروجی را برای گام های زمانی بعدی به دست آورد [15]. برای افزایش دقت نتایج و همچنین کاهش اثر غیر قطعی بودن  $\Delta t$  می توان فاصله زمانی را کاهش داد. از این رو در این مقاله، گام زمانی ۳۰ دقیقه ای انتخاب شده است.

### مدل سازی ریسک سد

شکست یک سیستم زمانی به وقوع می پیوندد که سیستم قادر به انجام عملکرد قابل انتظار نباشد، شکست می تواند باری ( $L$ ) تعریف شود که از مقاومت و یا ظرفیت سیستم ( $R$ ) فراتر رود. شناسایی بار وارده و مقاومت، اساس آنالیز ریسک بوده و به نوع ساختار هیدرولیکی و فیزیک مسئله بستگی دارد. احتمال شکست به صورت  $P(L > R)$  تعریف می شود [16].

ریسک نیز می تواند به شرح زیر نشان داده شود:

$$\alpha = Risk = P(Z < 0) \quad (16)$$

که در آن  $Z$  تابع عملکرد است که تابعی از اجزا متغیرهای بار و مقاومت است. این تابع بر اساس تابع توزیع آن می تواند اشکال متفاوتی داشته باشد که در زیر آمده است [17]:

$$Z = R - L; Z = \ln\left(\frac{R}{L}\right); Z = \left(\frac{R}{L}\right) - 1 \quad (17)$$

### مدل سازی ریسک برای روگذری سیل

روگذری به حالتی گفته می شود که بخش خروجی سد قادر به تخلیه آب با سرعت کافی نباشد و سطح آب از ارتفاع تاج سد بالاتر بیاید. در تجزیه و تحلیل روگذری، حداکثر ارتفاع آب در مخزن ( $H_{max}$ ) و ارتفاع سازه ای سد ( $H_c$ ) به ترتیب می توانند بار و مقاومت سیستم در نظر گرفته شوند. اگر ارتفاع بالا آمده آب مخزن به وسیله 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 می دهد که  $H_f + H_0 > H_c$  شود (شکل ۱) [18]. لذا ریسک

شرایط همگرایی بهبود می یابد، ولی تعداد شبیه سازی های انجام گرفته در فرآیند تحلیل افزایش می یابد و بدین ترتیب مدت زمان اجرای فرایند MCS طولانی تر می شود. از این رو، تعیین و انتخاب مقدار مناسب برای تعداد تکرارها به منظور دستیابی به همگرایی، یکی از عوامل مهم در اجرای فرآیند MCS محسوب می شود [۱۹].

### نمونه گیری لاتین هایپرکیوب

#### (Latin Hypercube Sampling)

برای افزایش دقت خروجی های شبیه سازی مونت کارلو، روش های کاهش واریانس مختلفی وجود دارد که بدون افزایش حجم نمونه این کار را انجام می دهد [16]. LHS یکی از روش های عمده کاهش واریانس است که کارایی پارامترهای آماری خروجی را افزایش می دهد. در روش LHS، هنگام نمونه گیری از یک تابع  $n$  متغیره، تقسیم بندی محدوده ها با احتمال وقوع  $1/n$  صورت می گیرد که البته این محدوده ها با یکدیگر همپوشانی ندارند. برای یک توزیع احتمال مطلوب، LHS یک مقدار تصادفی از هر یک از محدوده متغیرهای بدون تکرار را استخراج می کند. سرعت همگرایی LHS از روش شبیه سازی مونت کارلو بیشتر است [17]. الگوریتم نمونه گیری متغیرهای تصادفی مستقل ( $k$ ) با استفاده از تکنیک LHS را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

مرحله ۱: تقسیم بندی محدوده متغیرهای ورودی به مقدار  $n$

مرحله ۲: تولید متغیرهای یکنواخت  $u_k \sim u(0,1)$

مرحله ۳: محاسبه  $P_k$  از معادله زیر:

$$P_k = \frac{1}{n} u_k + \left(\frac{k-1}{n}\right) k = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

مرحله ۴: تعیین متغیرهای تصادفی  $x_k$  از CDF معکوس به شرح زیر است [20]:

$$x_k = F^{-1}[P_k] \quad (22)$$

عکس العمل سیستم است. انتخاب روش مناسب آنالیز عدم قطعیت به ماهیت مسئله، اطلاعات در دسترس، پیچیدگی مسئله و نوع نتایج مورد نظر بستگی دارد. متداول ترین روش های مورد استفاده برای آنالیز عدم قطعیت در مدل های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی روش شبیه سازی مونت کارلو و روش نمونه گیری لاتین هایپرکیوب است.

### شبیه سازی مونت کارلو

#### (Monte Carlo Simulation)

یکی از روش های ارزیابی عدم قطعیت و آنالیز ریسک که کاربرد زیادی در علوم مختلف دارد روش شبیه سازی مونت کارلو است. فرآیند تولید ورودی های تصادفی متعدد برای انجام شبیه سازی های متعدد برای تعیین خروجی های تصادفی متعدد، شبیه سازی مونت کارلو (MCS) نامیده می شود. با افزایش قابل توجه در قابلیت های کامپیوتری و توسعه تکنیک های کاهش واریانس در سال های اخیر، استفاده از این روش در زمینه های مختلف علمی افزایش یافته است. فرآیند مونت کارلو یک شبیه سازی عددی برای برگرداندن متغیرهای آماری بر اساس یک توزیع آماری مشخص است. در این روش بعد از شناسایی متغیرهای غیرقطعی مؤثر در عملکرد سامانه، با توجه به تغییرات طبیعی این متغیرها، یک توزیع احتمالاتی برای هر یک در نظر گرفته می شود. برای استفاده از هر توزیع احتمالاتی باید پارامترهای آن مشخص شوند. بعد از تعیین پارامترهای توزیع های مورد نظر، برای هر متغیر غیرقطعی، در هر تکرار از این روش یک سری اعداد تصادفی برای هر یک از متغیرها در سامانه تولید می شود و سامانه با استفاده از هر ترکیب از اعداد تولید شده شبیه سازی می شود. روند اجرای MCS زمانی به پایان می رسد که همگرایی لازم برای خروجی مدل شبیه سازی حاصل شده باشد. میزان همگرایی در این روش به تعداد تکرارها و همچنین تعداد متغیرهایی که به طور تصادفی تولید می شوند، بستگی دارد. به طوری که هر چه تعداد متغیرها بیشتر باشد، مدل با تکرار بیشتر به جواب همگرا می شود. همچنین با افزایش تعداد تکرارها

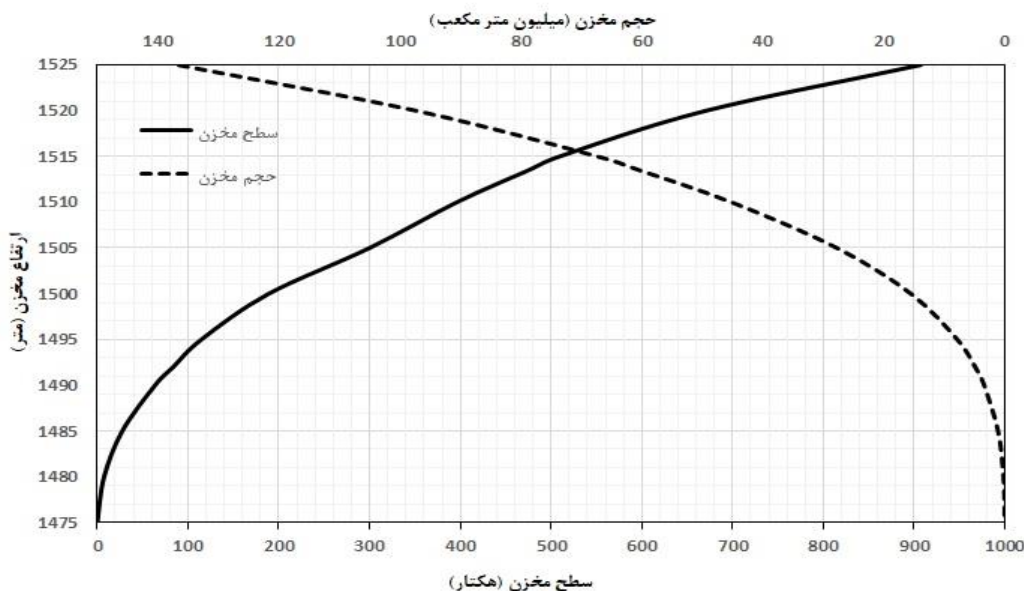
**محدوده مورد مطالعه (سد تبارک آباد)**

سد مخزنی خاکی - سنگریزه‌ای تبارک‌آباد در ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر قوچان در ۱/۵ کیلومتری پایین‌دست رو ستای تبارک‌آباد که یکی از سرشاخه‌های فرعی رودخانه اترک است، احداث گردیده است. ساختگاه سد تبارک در مختصات جغرافیایی "30'42°58 طول شرقی و "30'10°37 عرض شمالی، در مجاورت رو ستای تبارک‌آباد واقع گردیده است. تبارک‌آباد تأمین و تنظیم آب مورد نیاز را برای ۱۶۵۰ هکتار از اراضی پایاب

و همچنین تأمین قسمتی از نیاز آب شرب درازمدت قوچان به میزان ۱۴ میلیون متر مکعب در سال در صورتی که تأمین آب شرب درازمدت شهر قوچان از منابع آب‌های زیرزمینی و آهکی امکان‌پذیر نباشد، فراهم می‌کند. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مشخصات اصلی سد تبارک‌آباد نشان داده شده است، همچنین شکل (۱) بیانگر منحنی‌های حجم - ارتفاع مخزن سد و سطح - ارتفاع مخزن تبارک‌آباد است.

جدول ۱ مشخصات سد تبارک‌آباد

مشخصات سد	توضیحات	مشخصات سد	توضیحات
نوع سد	خاکی سنگریزه‌ای با هسته رسی	حجم آب قابل تنظیم	۲۷/۵ میلیون متر مکعب
مساحت حوضه	۵۶۰ کیلومتر مربع	حجم مخزن در تراز نرمال	۶۰ میلیون متر مکعب
نام رودخانه	تبارک‌آباد	حجم مرده	۱۳ میلیون متر مکعب
تراز نرمال از سطح دریا	۱۵۱۳/۵ متر	نوع سرریز	آزاد با تبدیل نوع بادبزی
تراز تاج	۱۵۲۱/۵ متر از سطح دریا	ظرفیت سرریز	۱۱۰۷ متر مکعب بر ثانیه
عرض تاج	۱۰ متر	طول تاج سرریز	۴۵ متر
طول تاج	۱۹۸ متر	ارتفاع سد	۷۴ متر



شکل ۳ تغییرات سطح و حجم مخزن سد تبارک‌آباد در برابر تراز ارتفاعی

جدول ۲ میانگین و انحراف معیار  $Q_p$  در دوره بازگشت‌های مختلف

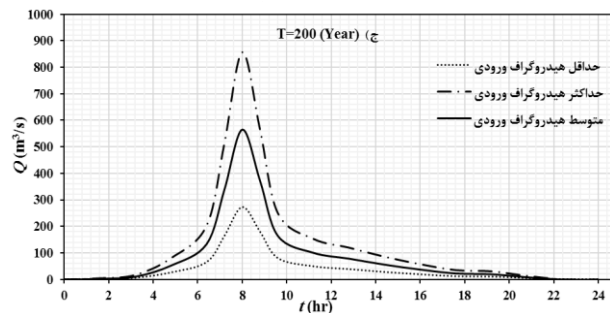
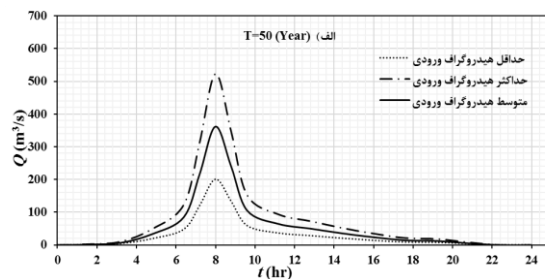
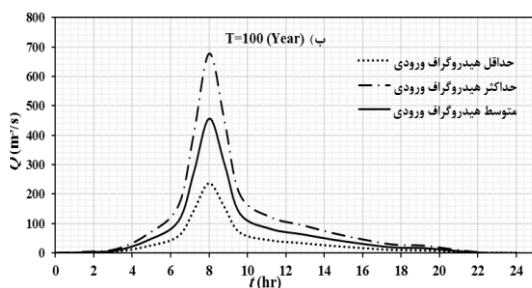
$Q_p (m^3/s)$		دوره بازگشت (سال)
انحراف معیار	میانگین	
۸۱/۷۶۸	۳۶۲/۰۴۴	۵۰
۱۱۲/۳۰۵	۴۵۶/۷۳۸	۱۰۰
۱۴۹/۲۱۶	۵۶۵/۲۹۴	۲۰۰

۲. تراز اولیه سطح آب ( $H_0$ ): متوسط تراز سطح آب در مخزن سد بر اساس سطح آب مشاهده شده و ثبت شده در مدت ۱۳ سال (۱۳۸۰-۱۳۹۳) محاسبه شده است. میانگین و انحراف معیار استاندارد عمق آب به ترتیب ۵۰/۱ متر و ۳/۲۸ متر بودند. علاوه بر این، پنج عمق دیگر به عنوان عمق اولیه و به منظور در نظر گرفتن اثر تغییرات عمق اولیه بر احتمال روگذری فرض شده‌اند (جدول ۳).

جدول ۳ مقادیر حداقل عمق اولیه آب

عمق میانگین (m)	۵۰/۱	۵۴	۵۸	۶۱	۶۴	۶۶
-----------------	------	----	----	----	----	----

۳. ضریب تخلیه سرریز ( $C_d$ ): بر اساس گزارش‌های فنی سد تبارک‌آباد میانگین و انحراف معیار استاندارد ضریب تخلیه به ترتیب ۲/۰۸ و ۰/۰۶۹ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴ حداقل، حداکثر و متوسط هیدروگراف ورودی برای دوره بازگشت‌های الف) ۵۰، ب) ۱۰۰ و ج) ۲۰۰ سال

### تعیین عوامل عدم قطعیت

از بین عوامل شناسایی شده اثرگذار در رفتار سیستم‌های آبیگری و طغیان سد، پارامترهایی چون دبی ورودی، تراز اولیه آب مخزن، منحنی تراز حجم مخزن سد، ظرفیت سرریز و... می‌توانند مشمول عدم قطعیت‌های گوناگون باشند. پارامترهای غیرقطعی در نظر گرفته شده در این مطالعه عبارت‌اند از:

۱. سیلاب حداکثر با دوره بازگشت‌های مختلف ( $Q_p$ ): مهم‌ترین دلایل برای انتخاب این پارامتر به عنوان متغیر عدم قطعیت خطا در ثبت داده‌ها، فقدان داده و وجود دبی‌های جانبی ورودی به مخزن است. این متغیر تنها در تحلیل فراوانی سیلاب تک متغیره، غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود. همچنین با استفاده از تحلیل فراوانی سیل، مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد دبی اوج برای سیل با دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار Hyfran Plus در جدول (۲) ارائه شده است.

برای سیل با دوره بازگشت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال، حداقل، حداکثر و متوسط هیدروگراف ورودی به مخزن سد تبارک‌آباد به ترتیب در شکل (۴) نشان داده شده است.



تیپ پنج سه پارامتره، لگاریتم پیرسون تیپ III، لوگ نرمال سه پارامتره، پیرسون تیپ پنج، گامبل حداکثر، لوگ - لوجستیک و مقداری حدی تعمیم یافته هستند.

نتایج آزمون نکویی برازش با استفاده از نرم افزار Easy Fit برای انتخاب توزیع مناسب بر اساس آزمون کای مربع در جدول (۵) آمده است. نتیجه آزمون نشان می دهد که همه توزیع ها برای داده های سیل مطلوب هستند و هیچ گونه اختلاف معناداری بین توزیع تئوری و توزیع داده های تجربی وجود ندارد اما همان طور که مشاهده می شود توزیع لوگ نرمال برای سیلاب برازش بهتری نسبت به دیگر توزیع ها دارد.

تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب نیز با استفاده از توزیع لوگ نرمال صورت گرفت. علت انتخاب توزیع لوگ نرمال دو متغیره این است که مناسب ترین توزیع برای متغیر دبی اوج بوده و بر متغیر حجم سیلاب نیز برازش خوبی یافته است. نتایج آزمون نکویی برازش برای پارامتر حجم سیلاب نیز بر اساس آزمون کای مربع در جدول (۶) ارائه شده است.

مشخصات پارامترهای ورودی مانند میانگین ( $\mu$ )، انحراف معیار استاندارد ( $\sigma$ ) و تابع توزیع احتمال (PDF) که مناسب برای داده تصادفی غیرقطعی بودند، در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴ خصوصیت آماری پارامترهای متغیر

متغیر	نوع	PDF	میانگین	انحراف معیار
$H_0$ (m)	تصادفی	نرمال	جدول (۳)	۳/۲۸
$Q_p$ ( $m^3/s$ )	تصادفی	لوگ نرمال	جدول (۲)	جدول (۲)
$C_d$	تصادفی	نرمال	۲/۰۸	۰/۰۶۹

### تحلیل فراوانی سیلاب

برای تخمین حداکثر دبی سیل در دوره بازگشت های مختلف در تحلیل فراوانی تک متغیره سیلاب، توزیع های آماری مختلفی بر مقادیر حداکثر سیلاب سالانه برای یک دوره ۴۹ ساله (از سال ۱۳۴۴ تا ۱۳۹۲) برازش داده شده است. توزیع های مورد استفاده لوگ نرمال، پیرسون

جدول ۵ برازش توزیع های مختلف آماری بر حداکثر مقادیر سیلاب سالانه ( $m^3/s$ )

آزمون کای مربع				توزیع احتمال
رتبه	نتیجه	مقادیر بحرانی	مقادیر آماری	
۷	مطلوب	۹/۴۸۷	۱/۷۰۳۳	پیرسون تیپ V
۱	مطلوب	۹/۴۸۷	۰/۸۰۵۱	لوگ نرمال
۶	مطلوب	۹/۴۸۷	۱/۷۰۱۷	پیرسون V سه پارامتره
۲	مطلوب	۹/۴۸۷	۰/۸۱۳۴۴	مقداری حدی تعمیم یافته
۳	مطلوب	۹/۴۸۷	۰/۸۱۵۳	لوگ - لوجستیک
۴	مطلوب	۹/۴۸۷	۰/۹۴۸۴	لوگ نرمال سه پارامتره
۵	مطلوب	۹/۴۸۷	۱/۰۴۹۱	لگاریتم پیرسون تیپ III
۸	مطلوب	۹/۴۸۷	۷/۳۳۱۳	گامبل حداکثر

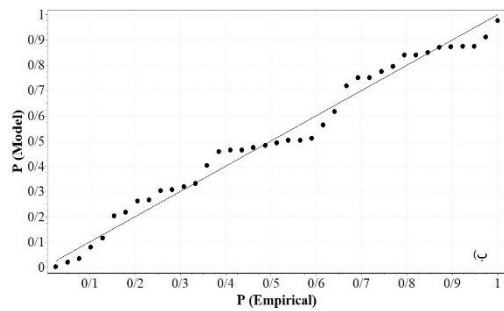
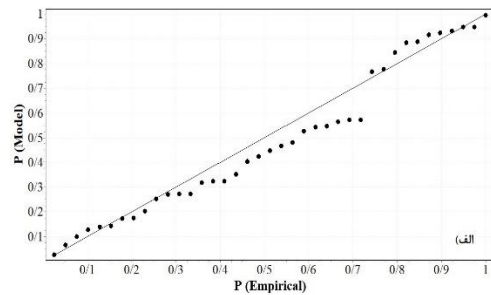
جدول ۶ نتایج آزمون نکویی برازش بر حداکثر مقادیر سیلاب سالانه و حجم سیلاب

توزیع لوگ نرمال			متغیر
نتیجه	مقادیر بحرانی	مقادیر آماری	
مطلوب	۱۱/۰۷۷	۱/۱۵۰۵	حجم سیلاب ( $m^3$ )

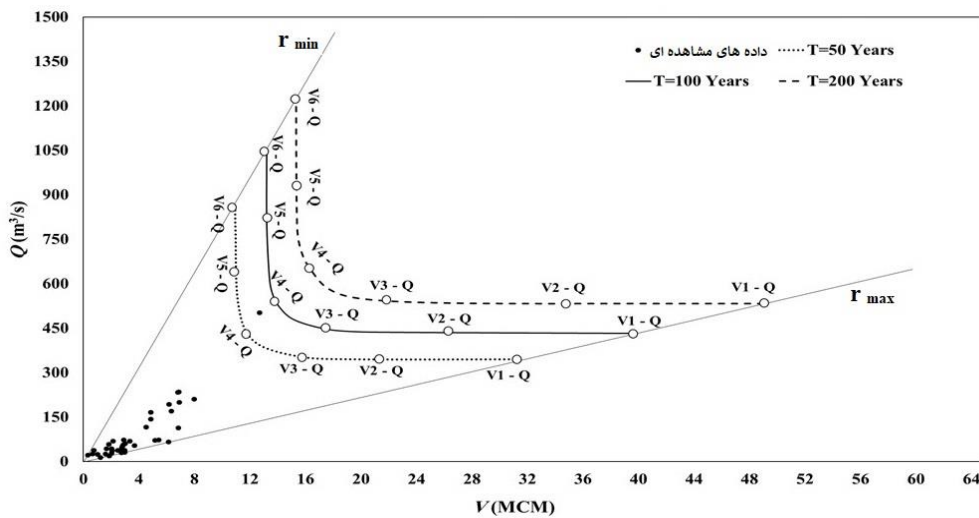
**تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب**

تحلیل‌های توأم بر خلاف تحلیل‌های تک متغیره که تنها یک عدد را به ازای هر دوره بازگشت در اختیار قرار می‌دهند، بازه‌ای از مقادیر را برای هر متغیر به ازای هر دوره بازگشت در اختیار قرار می‌دهند. مجموعه‌ای از دبی اوج و حجم سیلاب با دوره بازگشت توأم محاسبه شده و در شکل (۷) رسم شده است. در این مطالعه از دوره بازگشت توأم "یا" برای دبی اوج و حجم سیلاب استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، منحنی دوره بازگشت توأم می‌تواند به‌طور جانبی در امتداد محورهای گسترش یابد، درحالی‌که بر اساس اهمیت داده‌ها، فرمت متناهی قابل قبول است و باید توسط حدود پایین و بالا محدود شوند. از این رو، بر اساس روش پیشنهادی Hable [21]، منحنی‌ها با خطوط عبوری از مبدأ با شیب‌های حداکثر  $Q_p/V$  ( $r_{max}$ ) و حداقل  $Q_p/V$  ( $r_{min}$ ) محدود می‌شوند. همان‌طور که در شکل مشخص است  $r_{min}$  و  $r_{max}$  که به ترتیب شیب حداکثر و حداقل نامیده می‌شوند، خطوط ماکزیمم و مینیمم هستند که از میان داده‌های مشاهداتی عبور کرده‌اند. برای دوره بازگشت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال شش نقطه (V1-Q) تا (V6-Q) با مقادیر مشخص حجم و دبی در نظر گرفته شده‌اند.

علاوه بر این، شکل (۵) نمودار P-P (Probability - Plot) را بر اساس توزیع احتمال اتخاذ شده به ترتیب برای  $Q_p$  و  $V$  نشان می‌دهد. نمودار P-P نمودار احتمال - احتمال و یا درصد - درصد است. نمودار P-P با استفاده از تابع توزیع تجمعی  $F(x)$  ساخته شده است. اگر روند نمودار خطی باشد بدان معنی است که مدل از توزیع در نظر گرفته شده پیروی می‌کند.



شکل ۵ نمایش P-P بر اساس توزیع لوگ نرمال الف) دبی پیک سیلاب ب) حجم سیلاب



شکل ۶ منحنی دوره بازگشت توأم حجم سیلاب - دبی اوج سیلاب

همان‌طور که می‌توان از شکل (۷) مشاهده کرد، تفاوت‌های اصلی میان هیدروگراف‌های VI-Q تا V6-Q در هر دوره بازگشت، در دبی اوج خود و زمان پایه هیدروگراف است. برای مثال، هیدروگراف VI-Q که کمترین دبی اوج با حجم سیل نسبتاً بزرگ است، در نتیجه با زمان پایه طولانی‌تری است، درحالی‌که هیدروگراف V6-Q دارای بالاترین دبی اوج با زمان پایه نسبتاً کوتاه و حجم سیل کمتری است. در بخش زیر، احتمال روگذری برای همه هیدروگراف تولید شده از تحلیل فراوانی سیلاب تک متغیره و دو متغیره و بدترین شرایطی که می‌تواند برای سد تبارک-آباد رخ دهد، ارائه شده است.

جدول ۷ دبی اوج سیلاب و حجم سیلاب بر اساس تحلیل فراوانی دو متغیره

V (MCM)	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> / s)	T (year)
۱۰/۹۴ - ۳۱/۵۷	۳۴۵/۵ - ۸۵۶/۴۴	۵۰
۱۳/۲۱ - ۴۰/۲۲	۴۳۳/۳ - ۱۰۳۸/۹۲	۱۰۰
۱۵/۳۳ - ۴۸/۹۶	۵۳۳/۶ - ۱۲۱۰/۷۳	۲۰۰

حال با استفاده از روش پیشنهادی Aldama و Ramirez [22] هیدروگراف‌های مربوط به آن‌ها با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند:

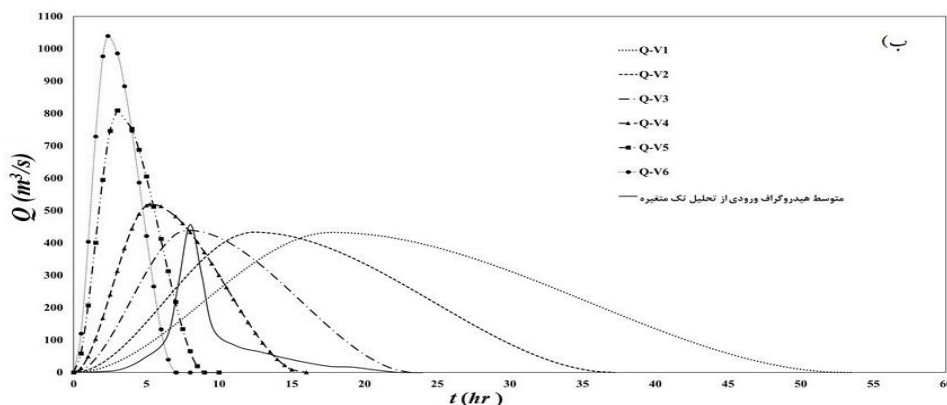
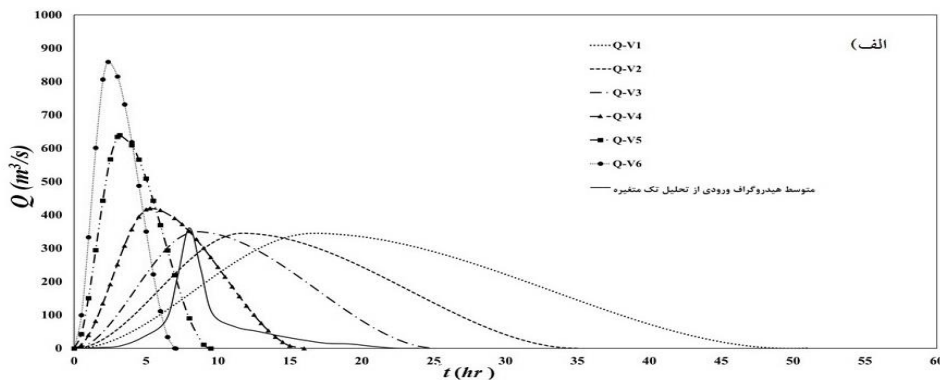
$$Q(t, Q_p, t_p, V) = \begin{cases} Q_p \left[ 3\left(\frac{t}{t_p}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{t_p}\right)^3 \right] & t \in [0, t_p] \\ Q_p \left[ 1 - \frac{3(t-t_p)^2}{(2VQ^{-1} - t_p)^2} + \frac{2(t-t_p)^3}{(2VQ^{-1} - t_p)^3} \right] & t \in [t_p, t_b] \\ 0 & t \in (-\infty, 0) \cup (t_b, \infty) \end{cases} \quad (23)$$

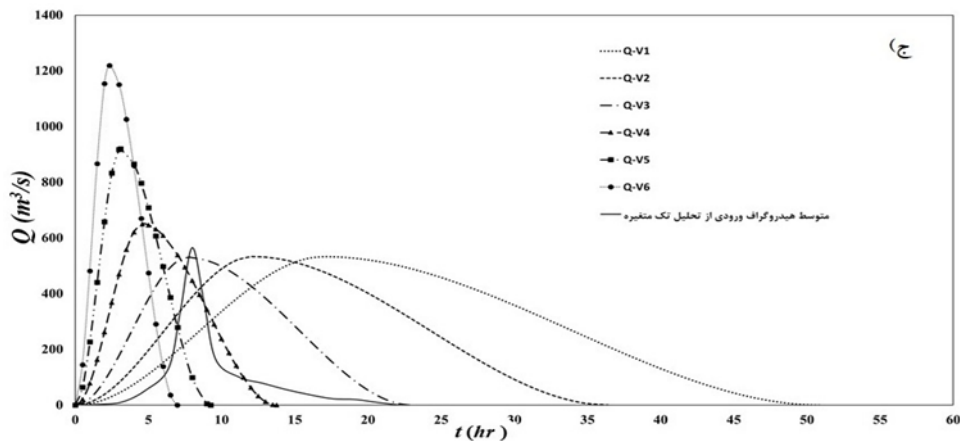
در آن  $t_p$  و  $t_b$  به ترتیب زمان اوج و زمان پایه هیدروگراف بوده که می‌توانند به صورت زیر محاسبه شوند:

$$t_p = \frac{2V}{3Q_p} \quad (24)$$

$$t_b = 3t_p \quad (25)$$

هیدروگراف‌های حاصل توسط معادلات بالا از تحلیل فراوانی دو متغیره دبی اوج و حجم سیلاب به دست آمده برای دوره بازگشت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال به ترتیب در شکل (۷) و همچنین جدول (۷) ارائه شده‌اند.





شکل ۷ هیدروگراف ورودی بر اساس تحلیل فراوانی تک متغیره و دو متغیره برای دوره بازگشت‌های الف) ۵۰، ب) ۱۰۰ و ج) ۲۰۰ سال

جدول ۸ ریسک روگذری برای ارتفاع‌های مختلف تراز اولیه سطح آب و دوره بازگشت‌های مختلف

تراز اولیه سطح آب $H_0$ (m)						روش شبیه‌سازی	دوره بازگشت
۶۶	۶۴	۶۱	۵۸	۵۴	۵۰/۱		
$1/0.108 \times 10^{-10}$	$1/0.576 \times 10^{-10}$	$1/0.784 \times 10^{-10}$	$5/2632 \times 10^{-10}$	$5/5172 \times 10^{-10}$	$4/9532 \times 10^{-10}$	MCS	۵۰
$1/4.483 \times 10^{-10}$	$2/0.174 \times 10^{-10}$	$1/6334 \times 10^{-10}$	$7/1294 \times 10^{-10}$	$7/1472 \times 10^{-10}$	$8/2739 \times 10^{-10}$	LHS	
$1/0.673 \times 10^{-10}$	$2/1589 \times 10^{-10}$	$1/4166 \times 10^{-10}$	$7/5092 \times 10^{-10}$	$7/5973 \times 10^{-10}$	$7/6951 \times 10^{-10}$	MCS	۱۰۰
$1/4573 \times 10^{-10}$	$2/5836 \times 10^{-10}$	$1/9564 \times 10^{-10}$	$9/2984 \times 10^{-10}$	$8/394 \times 10^{-10}$	$1/1038 \times 10^{-10}$	LHS	
$1/3264 \times 10^{-10}$	$3/1821 \times 10^{-10}$	$2/2958 \times 10^{-10}$	$8/9836 \times 10^{-10}$	$9/6253 \times 10^{-10}$	$1/0548 \times 10^{-10}$	MCS	۲۰۰
$1/8072 \times 10^{-10}$	$4/1692 \times 10^{-10}$	$3/7533 \times 10^{-10}$	$1/4748 \times 10^{-10}$	$1/4673 \times 10^{-10}$	$1/894 \times 10^{-10}$	LHS	

با بالا رفتن تراز اولیه سطح آب، مقدار ریسک شکست سد افزایش می‌یابد به طوری که در حداکثر ارتفاع ۶۶ متر احتمال روگذری بسیار بالاست. همچنین با افزایش دوره بازگشت نیز مقدار ریسک افزایش یافته است.

### ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب

تحلیل فراوانی سیلاب تک متغیره اغلب بر مقدار اوج سیل تمرکز دارد و یک ارزیابی محدود از سیل فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، این روش یک هیدروگراف واحد ایجاد می‌کند که تنها یکی از بسیار هیدروگراف‌های ممکن حوضه سد را نشان می‌دهد. از این رو، تحلیل دو متغیره سیلاب برای

### ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی یک-متغیره سیلاب

احتمال روگذری در اثر سیلاب با دوره بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال با در نظر گرفتن سه متغیر غیرقطعی شامل دبی اوج، سطح اولیه آب و ضریب تخلیه سرریز محاسبه شده است. تمام متغیرهای غیرقطعی، مستقل در نظر گرفته شده و برای شبیه‌سازی، روش‌های مونت کارلو با حجم نمونه ۲۰۰۰۰ و نمونه‌گیری لاتین هاپرکیوب با حجم نمونه ۱۰۰۰۰۰ استفاده شده‌اند. ریسک روگذری در دوره بازگشت‌های مختلف و مقادیر مختلف سطوح اولیه آب برای هر دو روش شبیه‌سازی مونت کارلو و لاتین هاپرکیوب در جدول (۸) ارائه شده است. از این جداول می‌توان نتیجه گرفت که

افزایش می‌یابد. همچنین هیدروگراف‌های با حجم رواناب بیشتر ( $V_1 - Q$  و  $V_2 - Q$ ) ریسک بیشتری نسبت به دیگر هیدروگراف‌های جریان دارند و خطر سرریز شدن آب از بدنه سد خاکی در این حالت‌ها بیشتر است؛ بنابراین در هر دوره بازگشت مقادیر محاسبه شده ریسک با استفاده از تحلیل فراوانی سیل دو متغیره بیشتر از نتایج تک متغیره است. همچنین با افزایش دوره بازگشت نیز مقدار ریسک افزایش می‌یابد.

شکل (۹) ریسک روگذری هیدروگراف ورودی- $V_1 - Q$  را برای دوره بازگشت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در مقابل ارتفاع اولیه سطح آب به روش مونت کارلو نشان می‌دهد. همان‌طور مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع اولیه سطح آب و افزایش حجم سیلاب و دبی ورودی به مخزن، ریسک شکست سد برای هیدروگراف  $V_1 - Q$  افزایش می‌یابد.

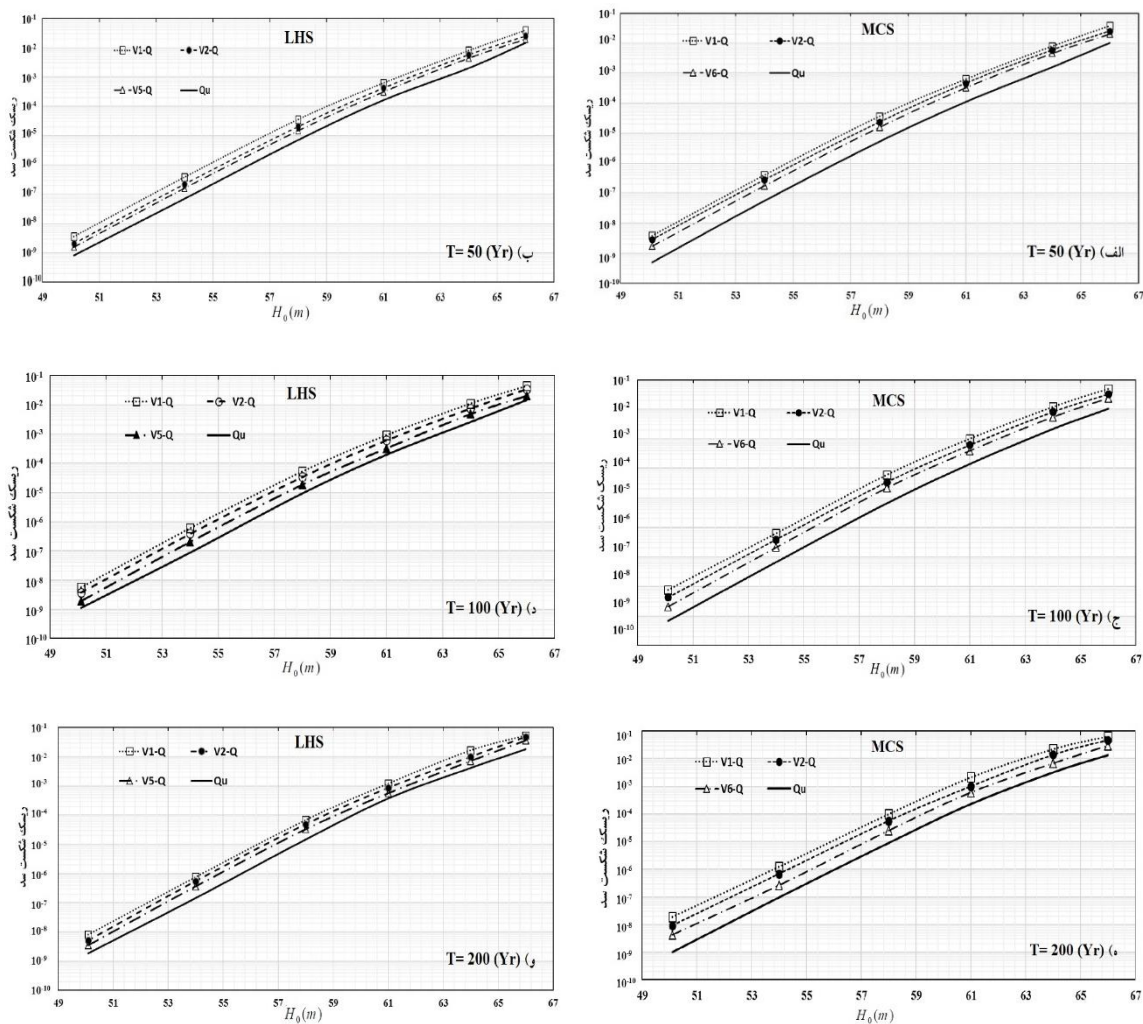
شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) هیدروگراف جریان تک متغیره و دو متغیره و ریسک روگذری را به ترتیب برای هیدروگراف جریان  $V_1 - Q$ ،  $V_6 - Q$  و  $V_2 - Q$  برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال نشان می‌دهد. نمودارهای میله‌ای نشان دهنده مقایسه ریسک روگذری محاسبه شده هیدروگراف سیل ورودی تک متغیره ( $Q_{II}$ ) و دو متغیره است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار ریسک روگذری در تمام ترازهای اولیه آب با استفاده از تحلیل فراوانی تک متغیره در هر دو روش مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب کمتر از نتایج حاصل از تحلیل فراوانی دو متغیره است که اهمیت آنالیز دو متغیره سیلاب برای روگذری سد را نشان می‌دهد.

ارزیابی توزیع توأم دبی اوج و حجم سیلاب و در نظر گرفتن هیدروگراف جریان بیشتر برای تجزیه و تحلیل ریسک و عدم قطعیت به کار گرفته شده است. ریسک روگذری به علت سیل‌های مختلف برای دوره بازگشت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال در شش سطح اولیه آب، با دو روش عدم قطعیت مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب بررسی شده و نتایج در جدول (۹) ارائه شده است. ریسک محاسبه شده برای هیدروگراف‌های  $V_1 - Q$  تا  $V_6 - Q$  دارای روند تغییرات یکسان نیست. به‌عنوان مثال در دوره بازگشت ۵۰ سال در روش مونت کارلو ریسک محاسبه شده برای هیدروگراف‌های  $V_1 - Q$  تا  $V_5 - Q$  در همه ارتفاع‌ها به جز ارتفاع ۶۶ متر روند نزولی داشته اما در روش لاتین هایپرکیوب ریسک محاسبه شده تنها برای هیدروگراف‌های  $V_1 - Q$  تا  $V_3 - Q$  روند نزولی داشته است. در نتیجه نمی‌توان قانون کلی برای روند تغییرات ریسک در هر روش در نظر گرفت؛ و به همین ترتیب در دوره بازگشت‌های دیگر نیز روند تغییرات مقدار ریسک در هیدروگراف‌ها متفاوت است. این نکته قابل ذکر است به دلیل اینکه هیدروگراف  $Q_{IV} -$  دارای بیشترین حجم سیلاب بوده، در نتیجه در همه ارتفاع‌ها از ریسک بیشتری نسبت به بقیه هیدروگراف‌ها برخوردار است. همچنین همان‌طور که در ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی تک متغیره نیز مشاهده شد در همه دوره بازگشت‌ها با افزایش ارتفاع مقدار ریسک نیز افزایش یافته است و در ارتفاع ۶۶ متر مقدار ریسک روگذری برای سد بسیار بالا است.

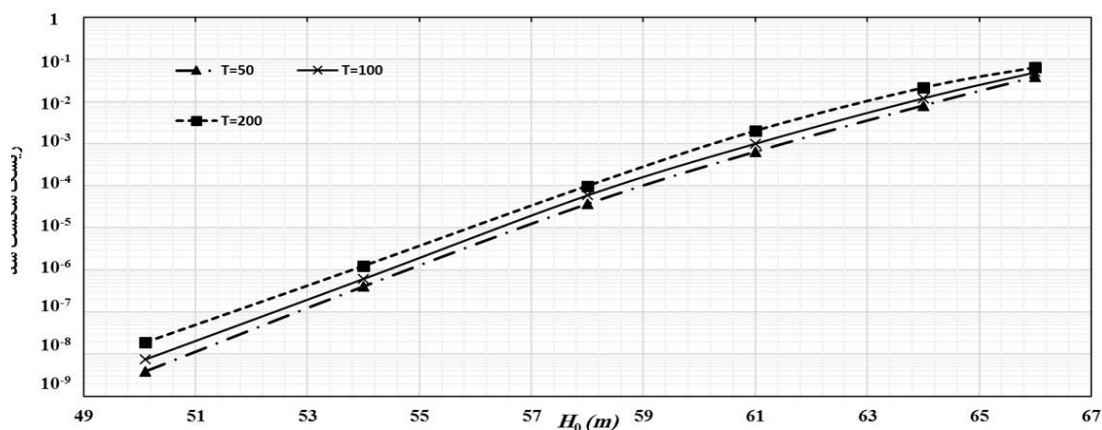
شکل (۸) روند تغییرات ریسک روگذری در مقابل عمق اولیه آب برای دوره بازگشت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال به ترتیب برای روش مونت کارلو برای هیدروگراف جریان تک متغیره ( $Q_{II}$ ) و دو متغیره  $V_1 - Q$ ،  $V_2 - Q$  و  $V_6 - Q$  و لاتین هایپرکیوب برای هیدروگراف جریان تک متغیره ( $Q_{II}$ ) و هیدروگراف جریان دو متغیره  $V_1 - Q$ ،  $V_2 - Q$  و  $V_5 - Q$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع آب در مخزن مقدار ریسک

جدول ۹ ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی دو متغیره برای دوره بازگشت‌های مختلف

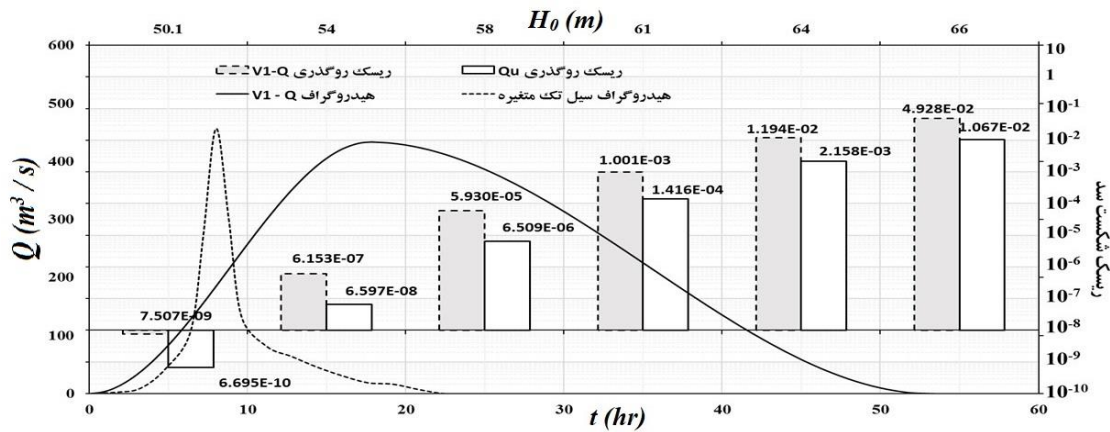
تراز اولیه سطح آب $H_0$ (m)						روش شبیه‌سازی	دوره بازگشت
۶۶	۶۴	۶۱	۵۸	۵۴	۵۰/۱		
$3/8071 \times 10^{-10}$	$7/9298 \times 10^{-10}$	$7/3033 \times 10^{-10}$	$3/7687 \times 10^{-10}$	$4/0764 \times 10^{-10}$	$3/9071 \times 10^{-10}$	MCS	T= 50 Years
$3/9182 \times 10^{-10}$	$7/9096 \times 10^{-10}$	$7/2270 \times 10^{-10}$	$3/0678 \times 10^{-10}$	$3/8421 \times 10^{-10}$	$3/0911 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/4976 \times 10^{-10}$	$0/8031 \times 10^{-10}$	$4/7348 \times 10^{-10}$	$2/3429 \times 10^{-10}$	$2/7990 \times 10^{-10}$	$2/8970 \times 10^{-10}$	MCS	
$2/4730 \times 10^{-10}$	$0/7170 \times 10^{-10}$	$4/1970 \times 10^{-10}$	$2/0288 \times 10^{-10}$	$2/2339 \times 10^{-10}$	$2/0777 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/2026 \times 10^{-10}$	$0/2149 \times 10^{-10}$	$3/8727 \times 10^{-10}$	$1/9041 \times 10^{-10}$	$2/3307 \times 10^{-10}$	$2/2439 \times 10^{-10}$	MCS	
$2/1493 \times 10^{-10}$	$4/8642 \times 10^{-10}$	$3/4871 \times 10^{-10}$	$1/7079 \times 10^{-10}$	$1/8226 \times 10^{-10}$	$1/7011 \times 10^{-10}$	LHS	
$1/9908 \times 10^{-10}$	$4/0433 \times 10^{-10}$	$3/3318 \times 10^{-10}$	$1/7176 \times 10^{-10}$	$1/9093 \times 10^{-10}$	$1/9714 \times 10^{-10}$	MCS	
$2/2763 \times 10^{-10}$	$0/2129 \times 10^{-10}$	$3/7939 \times 10^{-10}$	$1/8337 \times 10^{-10}$	$2/0468 \times 10^{-10}$	$1/9130 \times 10^{-10}$	LHS	
$1/9949 \times 10^{-10}$	$4/4838 \times 10^{-10}$	$3/2331 \times 10^{-10}$	$1/0434 \times 10^{-10}$	$1/7133 \times 10^{-10}$	$1/7827 \times 10^{-10}$	MCS	
$1/9704 \times 10^{-10}$	$4/3897 \times 10^{-10}$	$3/1127 \times 10^{-10}$	$1/4778 \times 10^{-10}$	$1/7292 \times 10^{-10}$	$1/0700 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/0308 \times 10^{-10}$	$4/0700 \times 10^{-10}$	$3/2978 \times 10^{-10}$	$1/0927 \times 10^{-10}$	$1/7871 \times 10^{-10}$	$1/7382 \times 10^{-10}$	MCS	
$2/0237 \times 10^{-10}$	$4/0006 \times 10^{-10}$	$3/2020 \times 10^{-10}$	$1/0003 \times 10^{-10}$	$1/7227 \times 10^{-10}$	$1/7634 \times 10^{-10}$	LHS	
$4/9279 \times 10^{-10}$	$1/1943 \times 10^{-10}$	$1/0007 \times 10^{-10}$	$0/9300 \times 10^{-10}$	$7/1031 \times 10^{-10}$	$7/0073 \times 10^{-10}$	MCS	T= 100 Years
$4/3208 \times 10^{-10}$	$1/0898 \times 10^{-10}$	$9/0408 \times 10^{-10}$	$0/2018 \times 10^{-10}$	$7/0303 \times 10^{-10}$	$0/7427 \times 10^{-10}$	LHS	
$3/2430 \times 10^{-10}$	$8/2240 \times 10^{-10}$	$7/1731 \times 10^{-10}$	$3/4370 \times 10^{-10}$	$3/8782 \times 10^{-10}$	$4/2777 \times 10^{-10}$	MCS	
$3/0073 \times 10^{-10}$	$7/0534 \times 10^{-10}$	$7/1305 \times 10^{-10}$	$3/4271 \times 10^{-10}$	$3/8880 \times 10^{-10}$	$3/7679 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/4776 \times 10^{-10}$	$7/0177 \times 10^{-10}$	$4/2301 \times 10^{-10}$	$2/3478 \times 10^{-10}$	$2/8908 \times 10^{-10}$	$2/8749 \times 10^{-10}$	MCS	
$2/0764 \times 10^{-10}$	$0/8329 \times 10^{-10}$	$4/0374 \times 10^{-10}$	$2/0742 \times 10^{-10}$	$2/2827 \times 10^{-10}$	$2/1339 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/0193 \times 10^{-10}$	$4/1810 \times 10^{-10}$	$3/9924 \times 10^{-10}$	$2/0282 \times 10^{-10}$	$1/7210 \times 10^{-10}$	$2/2879 \times 10^{-10}$	MCS	
$2/1739 \times 10^{-10}$	$4/9074 \times 10^{-10}$	$3/2929 \times 10^{-10}$	$1/8730 \times 10^{-10}$	$2/0300 \times 10^{-10}$	$1/9181 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/2767 \times 10^{-10}$	$0/0142 \times 10^{-10}$	$3/0907 \times 10^{-10}$	$1/0714 \times 10^{-10}$	$2/0049 \times 10^{-10}$	$1/4209 \times 10^{-10}$	MCS	
$2/0308 \times 10^{-10}$	$4/8090 \times 10^{-10}$	$3/2600 \times 10^{-10}$	$1/8320 \times 10^{-10}$	$2/0730 \times 10^{-10}$	$1/9380 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/3201 \times 10^{-10}$	$0/3447 \times 10^{-10}$	$3/8003 \times 10^{-10}$	$2/1281 \times 10^{-10}$	$2/0407 \times 10^{-10}$	$2/0277 \times 10^{-10}$	MCS	
$2/2484 \times 10^{-10}$	$0/0219 \times 10^{-10}$	$3/0099 \times 10^{-10}$	$1/9029 \times 10^{-10}$	$2/1118 \times 10^{-10}$	$2/1007 \times 10^{-10}$	LHS	
$7/4707 \times 10^{-10}$	$2/2197 \times 10^{-10}$	$2/1083 \times 10^{-10}$	$9/8601 \times 10^{-10}$	$1/2309 \times 10^{-10}$	$1/8739 \times 10^{-10}$	MCS	T= 200 Years
$0/4012 \times 10^{-10}$	$1/7014 \times 10^{-10}$	$1/2342 \times 10^{-10}$	$7/9379 \times 10^{-10}$	$7/7137 \times 10^{-10}$	$8/2190 \times 10^{-10}$	LHS	
$4/7012 \times 10^{-10}$	$1/3784 \times 10^{-10}$	$9/9777 \times 10^{-10}$	$0/0782 \times 10^{-10}$	$7/8911 \times 10^{-10}$	$9/1064 \times 10^{-10}$	MCS	
$4/7837 \times 10^{-10}$	$9/9890 \times 10^{-10}$	$8/0072 \times 10^{-10}$	$4/8808 \times 10^{-10}$	$0/4710 \times 10^{-10}$	$0/0922 \times 10^{-10}$	LHS	
$3/4000 \times 10^{-10}$	$7/4787 \times 10^{-10}$	$7/4374 \times 10^{-10}$	$2/8372 \times 10^{-10}$	$3/8274 \times 10^{-10}$	$0/2397 \times 10^{-10}$	MCS	
$3/9011 \times 10^{-10}$	$7/9000 \times 10^{-10}$	$7/2723 \times 10^{-10}$	$3/7309 \times 10^{-10}$	$3/9777 \times 10^{-10}$	$3/7827 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/8987 \times 10^{-10}$	$0/8017 \times 10^{-10}$	$0/3700 \times 10^{-10}$	$2/1398 \times 10^{-10}$	$2/4800 \times 10^{-10}$	$0/3424 \times 10^{-10}$	MCS	
$3/0137 \times 10^{-10}$	$7/8087 \times 10^{-10}$	$0/3710 \times 10^{-10}$	$3/1408 \times 10^{-10}$	$3/4148 \times 10^{-10}$	$3/2840 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/8092 \times 10^{-10}$	$7/1807 \times 10^{-10}$	$0/7130 \times 10^{-10}$	$2/4200 \times 10^{-10}$	$2/4407 \times 10^{-10}$	$4/0703 \times 10^{-10}$	MCS	
$3/7010 \times 10^{-10}$	$7/0900 \times 10^{-10}$	$0/0893 \times 10^{-10}$	$3/2783 \times 10^{-10}$	$3/7072 \times 10^{-10}$	$3/4891 \times 10^{-10}$	LHS	
$2/9014 \times 10^{-10}$	$7/7211 \times 10^{-10}$	$0/9721 \times 10^{-10}$	$2/4977 \times 10^{-10}$	$2/7388 \times 10^{-10}$	$4/2731 \times 10^{-10}$	MCS	
$3/7129 \times 10^{-10}$	$7/4107 \times 10^{-10}$	$7/8787 \times 10^{-10}$	$2/4407 \times 10^{-10}$	$2/8234 \times 10^{-10}$	$2/7247 \times 10^{-10}$	LHS	



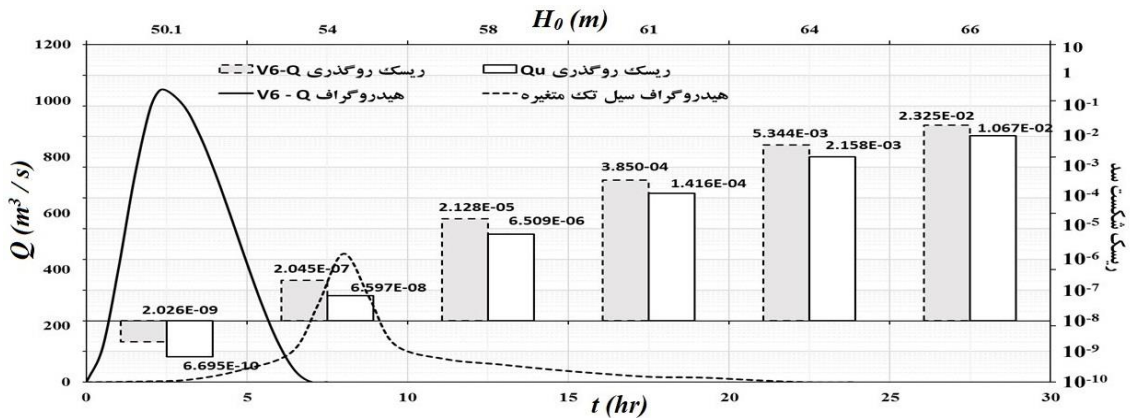
شکل ۸ تغییرات ریسک روگذری در برابر ارتفاع اولیه سطح آب برای دوره بازگشت های مختلف



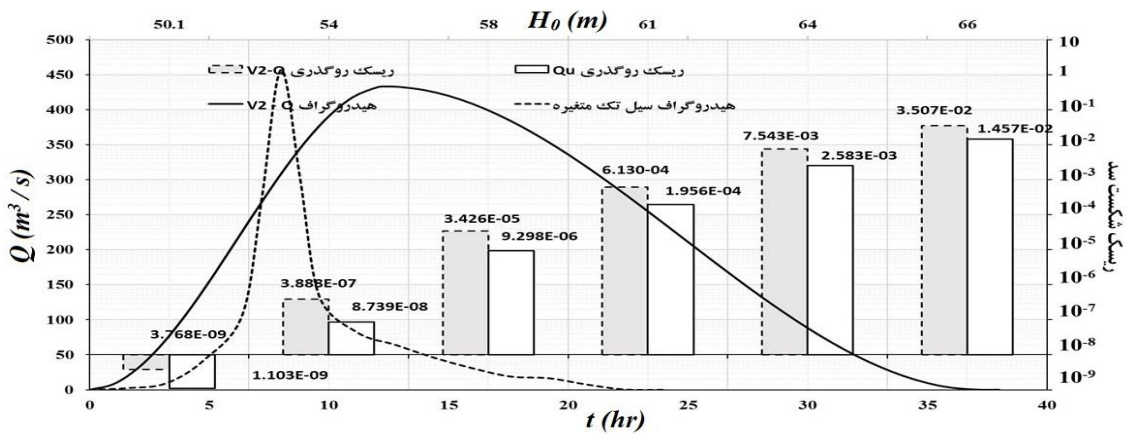
شکل ۹ ریسک شکست سد هیدروگراف جریان V1 - Q برای دوره بازگشت های مختلف به روش مونت کارلو



شکل ۱۰ ریسک روگذری  $Q_u$  و  $V1-Q$  بر اساس روش MCS برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال



شکل ۱۱ ریسک روگذری  $Q_u$  و  $V6-Q$  بر اساس روش MCS برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال



شکل ۱۲ ریسک روگذری  $Q_u$  و  $V2-Q$  بر اساس روش LHS برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال

### بحث و نتیجه‌گیری

متغیره و دو متغیره با توجه به متغیرهای عدم قطعیت مختلف که شامل دبی پیک سیلاب، تراز اولیه آب در مخزن و ضریب تخلیه سرریز است، ارزیابی کرد. نتایج

این مطالعه ریسک روگذری سد خاکی تبارک‌آباد واقع در خراسان رضوی را بر اساس تحلیل فراوانی سیلاب تک



دومتغیره نیز نشان داد حجم سیلاب کمتر باعث اطمینان پذیری روگذری سد است.

همچنین مقادیر محاسبه شده ریسک در تمام ترازهای اولیه آب در هر دو روش مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب با استفاده از تجزیه و تحلیل فراوانی سیل دو متغیره بیشتر از نتایج تک متغیره است. همان طور که مشاهده شد در برآورد ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی تک متغیره و دو متغیره با بالا رفتن تراز آب در مخزن، به مراتب از افزایش بیشتری نسبت به زمانی که سیلاب های با دوره بازگشت های طولانی تر اتفاق می افتد، روبرو خواهد بود.

نتایج تحقیق انجام شده توسط گودرزی [11] که ریسک روگذری را توسط تحلیل فراوانی دو متغیره با توزیع احتمالاتی گامبل لاجستیک برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال محاسبه کرد، نتایج کار حاضر را مورد تأیید قرار می دهد.

ریسک روگذری بر اساس تحلیل فراوانی تک متغیره نشان می دهد که هر دو روش مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب، از یک روند یکسان پیروی می کنند و ریسک شکست سد با بالا رفتن سطح اولیه آب و دبی های ورودی به مخزن افزایش می یابد. همچنین مقدار ریسک در ترازهای بالاتر آب بیشتر است.

تحلیل فراوانی دو متغیره سیلاب با استفاده از توزیع لوگ نرمال دو متغیره با در نظر گرفتن شش هیدروگراف ورودی V1-Q تا V6-Q برای دوره بازگشت های توأم ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال انجام شد. هیدروگراف های با حجم رواناب بیشتر (V1-Q و V2-Q) ریسک بیشتری نسبت به دیگر هیدروگراف های جریان دارند و حجم سیلاب بیشتر باعث افزایش خطر روگذری می شود. نتایج حاصل از روش Yanmaz و Gunindi [9] بر اساس تحلیل فراوانی

## مراجع

1. Goodarzi, E., Shui, L.T, and Ziaei, M., "Risk and uncertainty analysis for dam overtopping—Case study: The Doroudzan Dam, Iran", *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 8, pp. 50-61, (2014).
۲. سالاری، م.، آخوندعلی، ع. م.، ادیب، آ.، و دانشخواه، ع. "تحلیل فراوانی سیلاب دو متغیره با استفاده از توابع مفصل"، علوم و مهندسی آبیاری، ۳۷، صص ۲۹-۳۸ (۱۳۹۳).
3. Cunnane, C., "Methods and merits of regional flood frequency analysis", *Journal of Hydrology*, Vol. 100, pp. 269-290, (1988).
4. Bobee, B. and Rasmussen, P., "Statistical analysis of annual flood series", *Trends in Hydrology* (1). Council of Scientific Research Integration, India, pp. 117-135, (1994).
5. Goel, N., Seth, S. and Chandra, S., "Multivariate modeling of flood flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, pp. 146-155, (1998).
6. Yue, S., "Applying bivariate normal distribution to flood frequency analysis", *Water International*, Vol. 24, pp. 248-254, (1999).
7. Yue, S., "The bivariate lognormal distribution to model a multivariate flood episode", *Hydrological Processes*, Vol. 14, pp. 2575-2588, (2000).
8. De Michele, C., Salvadori, G., Canossi, M., Petaccia, A. and Rosso, R., "Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 10, pp. 50-57, (2005).
9. Yanmaz, A. M. and Gunindi, M. E., "Assessment of overtopping reliability and benefits of a flood detention dam", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35, pp. 1177-1182, (2008).

۱۰. منصوری، ن.، کبیری سامانی، ع. "تحلیل ریسک روگذری سیل در سد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف به کمک روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، (۱۳۹۰).
11. Goodarzi, E., Mirzaei, M. and Ziaei, M., "Evaluation of dam overtopping risk based on univariate and bivariate flood frequency analyses", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 39, pp. 374-387, (2012).
۱۲. شرافتی، ا.، ذهبیون، ب. "تحلیل ریسک روگذری سد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی"، مجله علمی - پژوهشی هیدرولیک، صص ۱۷-۱، (۱۳۹۳).
13. Zhang, L. and Singh, V., "Bivariate flood frequency analysis using the copula method", *Journal of hydrologic engineering*, Vol. 11, pp. 150-164, (2006).
14. Yue, S., "A bivariate gamma distribution for use in multivariate flood frequency analysis", *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 1033-1045, (2001).
15. Chongxun, M., Fanggui, L., Mei, Y., Rongyong, M. and Guikai, S., "Risk analysis for earth dam overtopping", *Water Science and Engineering*, Vol. 1, pp. 76-87, (2008).
16. Tung, Y. K., Yen, B. C. and Melching, C. S., "Hydrosystems engineering reliability assessment and risk analysis", (2006).
17. Singh, V.P., Jain, S.K. and Tyagi, A. "Risk and reliability analysis: a handbook for civil and environmental engineers", American Society of Civil Engineers., (2007).
18. Kuo, J.T., Yen, B.C., Hsu, Y.C. and Lin, H.F. "Risk analysis for dam overtopping—Feitsui reservoir as a case study", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, pp. 955-963, (2007).
۱۹. بزرگ حداد، ا. مقدمه‌ای بر تحلیل عدم قطعیت در سامانه‌های منابع آب، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۹۲).
20. Goodarzi, E., Ziaei, M. and Shui, L.T. "Introduction to risk and uncertainty in hydrosystem engineering", Springer Science & Business Media, (2013).
21. Hable, O., "Multidimensional probabilistic design concept for the estimation of the overtopping probability of dams", Verlag d. Techn. Univ. Graz, (2001).
22. Aldama, A. and Ramirez, A., "A new approach for dam design flood estimation", Proceedings of the IAHR Congress, Graz, Austria, pp. 22-27, (1999).
23. Chow, V.T., "Handbook of applied hydrology: A compendium of water-resources technology", McGraw-Hill, (1964).