



Estimation and comparison of the probable maximum flood entering the Latian dam using bayesian theory and HEC-HMS model

Ahmad Agheshlouei¹ | Mojtaba Shourian^{2✉} | Amir Alizadefard³

1. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a.agheshlouei@mail.sbu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Resource Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_shourian@sbu.ac.ir
3. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a_alizadefard@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 16 November 2023

Received in revised form

27 January 2024

Accepted 14 February 2024

Published online 14 March 2024

Keywords:

Bayesian theory

HEC-HMS model

Latyan Dam

Probable maximum flood (PMF)

ABSTRACT

In the pursuit of efficient drainage basin management, examining the extreme event of flooding due to its high frequency and resulting life and financial damages holds particular significance. Considering the water crisis and flood management in agricultural usage, investigating floods becomes imperative. Therefore, this research focuses on estimating the probable maximum flood (PMF) of the Latyan Dam drainage basin using Bayesian theory and HEC-HMS models. Initially, the probability maximum precipitation (PMP) of the drainage basin was calculated using a 70-year statistical dataset. Subsequently, employing the Bayesian theory as a stochastic model, the maximum drainage basin flood was determined by examining five discrete values of coefficient of variation and four flood scenarios of annual maximum, daily maximum, annual and instantaneous maximum, daily and instantaneous maximum. In the second phase of the study, an HEC-HMS model for the Latyan Dam drainage basin was developed, and by applying the PMP, the drainage basin's peak flow was determined. Considering error values, a coefficient of variation of 0.4 was adopted. Two scenarios emerged as selected options: daily maximum and daily and instantaneous maximum flooding, with their respective posterior estimates averaging at 1532 and 1577 m³/s. The HEC-HMS model results indicated a drainage basin peak flow of 1025 m³/s, 34 percent lower than the Bayesian theory's calculated value. Based on these outcomes and the available regional data, the Bayesian theory demonstrates superior results in this particular study area.

Cite this article: Agheshlouei, A., Shourian, M., & Alizadefard, A. (2024). Estimation and comparison of the probable maximum flood entering the Latian dam using bayesian theory and HEC-HMS model. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (1), 235-248. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.368218.1115>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.368218.1115>



بر آورد و مقایسه حداکثر سیلاب محتمل ورودی به سد لتیان با استفاده از تئوری بیزین و مدل HEC-HMS

احمد آغشلویی^۱ | مجتبی شوریان^۲ | امیر علیزاده فرد^۳

۱. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a.agheshlouei@mail.sbu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_shourian@sbu.ac.ir

۳. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_alizadehfard@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

کلیدواژه‌ها:

تئوری بیزین

حداکثر سیلاب محتمل (PMF)

سد لتیان

مدل HEC-HMS

در راستای مدیریت کارآمد حوضه آبریز، بررسی رویداد حدی سیل به دلیل فراوانی بالا و ایجاد خسارت‌های جانی و مالی اهمیت ویژه‌ای دارد. از طرفی با توجه به بحران آبی و مدیریت سیلاب در مصارف کشاورزی، بررسی سیل امری ضروری است. بنابراین در این پژوهش به برآورد حداکثر سیلاب محتمل (PMF) حوضه آبریز سد لتیان با استفاده از تئوری بیزین و مدل HEC-HMS پرداخته شده است. در این راستا در گام نخست، بیش‌ترین بارش محتمل (PMP) حوضه آبریز با به‌کارگیری آمار ۷۰ ساله محاسبه شده است. سپس با استفاده از تئوری بیزین، به‌عنوان مدلی تصادفی، حداکثر سیلاب حوضه با بررسی پنج مقدار گسسته ضریب تغییرات و چهار سناریوی دبی حداکثر سالیانه، حداکثر فراز روزانه، حداکثر سالیانه و لحظه‌ای، حداکثر فراز روزانه و لحظه‌ای تعیین شد. در گام دوم پژوهش نیز مدل HEC-HMS حوضه آبریز سد لتیان ایجاد شده و با اعمال PMP محاسبه شده، PMF حوضه تعیین شد. پس از بررسی نتایج با توجه به مقادیر خطا، ضریب تغییرات ۰/۴ در نظر گرفته شد و دو سناریو حداکثر فراز روزانه و حداکثر فراز روزانه با سیلاب لحظه‌ای به‌عنوان سناریوهای منتخب انتخاب شدند که میانگین برآورد پسین آن‌ها به ترتیب ۱۵۲۳ و ۱۵۷۷ مترمکعب بر ثانیه می باشد. نتایج مدل HEC-HMS نیز حاکی از آن است که مقدار PMF حوضه آبریز سد لتیان ۱۰۲۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که ۳۴ درصد کمتر از مقدار محاسبه شده با استفاده از تئوری بیزین است. براساس نتایج با توجه به داده‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، استفاده از تئوری بیزین نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

استناد: آغشلویی، احمد؛ شوریان، مجتبی و علیزاده فرد، امیر (۱۴۰۳). برآورد و مقایسه حداکثر سیلاب محتمل ورودی به سد لتیان با استفاده از تئوری بیزین و مدل HEC-HMS. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۱)، ۲۳۵-۲۴۸. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.368218.1115>



۱. مقدمه

آب به عنوان منبع حیات، نقشی تأثیرگذار در توسعه پایدار هر منطقه ایفا می‌کند، بنابراین مدیریت منابع آب با هدف بررسی چالش‌های موجود و پیشگیری از وقوع نتایج نامطلوب امری ضروری می‌باشد. به منظور مدیریت منابع آب هر منطقه نیز باید اطلاعات جامعی از وضعیت حوضه آبریز در دسترس باشد که این امر رابطه مستقیمی با میزان موفقیت برنامه مدیریتی مطرح شده دارد. از طرفی در میان سایر اطلاعات هیدرولوژیکی حوضه آبریز، رویدادهای حدی مانند سیل به دلیل ایجاد خسارت‌های جانی و مالی نقش مهم‌تری در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ایفا می‌کنند. در واقع رویدادهای حدی^۱ مهم‌ترین مؤلفه در تعیین بقای یک سامانه می‌باشند و شرایط معمول در این موضوع اهمیتی ندارند، بنابراین سامانه‌های موجود در حوضه آبریز باید در برابر رویدادهای حدی و حوادث نادر مقاومت کافی داشته باشند (Kottegoda and Rosso, 2008).

در میان رویدادهای حدی، بررسی حداکثر سیلاب حوضه آبریز به منظور مدیریت منابع آب، طراحی بناهای آبی و سرریز سدها و کنترل سیل در مخازن سدها ضروری می‌باشد. هم‌چنین به دلیل بحران آب در سال‌های اخیر، مدیریت سیلاب برای آبیاری زمین‌های کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است که این موضوع اهمیت بررسی حداکثر سیلاب محتمل^۲ را بیش از پیش کرده است. در این راستا، رویکردهای مختلفی استفاده شده که یکی از مهم‌ترین آن‌ها به کارگیری مدل‌های هیدرولوژیکی است. به عنوان مثال، Pistocchi and Mazzoli (2002) به بررسی تأثیرات سیل در مدیریت خطر هیدرولوژیکی رودخانه رامباجا هند با به کارگیری مدل‌های HEC-RAS^۳ و HEC-HMS^۴ پرداختند. براساس نتایج این پژوهش‌گران مدل‌سازی و تحلیل سیلاب حوضه آبریز می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد تا با دیدی جامع از نتایج هر سناریو به مدیریت منطقه بپردازند. Ros et al. (2008) نیز ایمنی سد کنیر مالزی را در برابر PMF ورودی به مخزن مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش‌گران از مدل HEC-HMS به منظور تبدیل حداکثر بارش محتمل^۵ به PMF استفاده کرده و بر کارایی این مدل تأکید کردند.

در پژوهشی دیگر، Kim et al. (2013) طغیان رودخانه ساچئون را واقع در Gangneung-si مورد بررسی قرار دادند. در این راستا، این پژوهش‌گران از مدل HEC-GeoRAS استفاده کرده و مشخصات سیل محاسبه شده را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که این مدل به پیش‌بینی سیل و مشخصات آن با استفاده از داده‌های هواشناسی واقعی کمک خواهد کرد. Hashemyan et al. (2015) با ترکیب مدل‌های HEC-RAS و HEC-HMS در فضای GIS به بررسی رفتار طغیان رودخانه خشکه رودان واقع در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. این پژوهش‌گران بر کارایی بالای این ترکیب تأکید کرده و استفاده از آن را در برنامه‌ریزی و مدیریت مناطق مسکونی و کشاورزی توصیه می‌کنند. Thakur et al. (2017) نیز با ترکیب مدل‌های HEC-RAS و HEC-HMS و استفاده از ARCGIS، گستردگی دشت‌های سیلابی منطقه‌ای در ایلینویز را مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج این پژوهش، استفاده از این مدل می‌تواند به سیستم‌های هشدار سیل کمک کند. در چین Kabeja et al. (2013) تأثیر تغییرات پوشش دو منطقه کوهستانی در چین و ارتباط آن‌ها با دبی پیک سیلاب را بررسی کردند. به این منظور از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های HEC-RAS و HEC-HMS استفاده شده است. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که در دو منطقه، در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۶-۲۰۱۷ درصد مناطق شهری و جنگلی افزایش و مناطق کشاورزی کاهش یافته است که بر اثر این موضوع دبی پیک دو منطقه ۱۴ و ۶ درصد کاهش پیدا کرده است. Janicka and Kanclerz (2023) نیز با استفاده از مدل HEC-HMS به بررسی تأثیرات شهرسازی بر جریان آب و سیل در منطقه‌ای واقع در لهستان پرداختند. براساس نتایج این پژوهش شهرنشینی سریع بر فرایندهای

هیدرولوژیکی تأثیر منفی می‌گذارد و موجب کاهش ظرفیت نفوذ و افزایش رواناب می‌شود که این موضوع افزایش خطر سیل را به دنبال دارد.

با وجود کاربرد گسترده مدل‌های هیدرولوژیکی، به دلیل ناهمگونی حوضه بالادست و محدودیت‌های روش‌های اندازه‌گیری، عدم قطعیت بالایی در نتایج این مدل‌ها وجود دارد (Pechlivanidis, 2011). به همین دلیل پژوهش‌گران در رویکردی دیگر از روش‌های آماری به منظور تحلیل و بررسی رویدادهای هیدرولوژیکی استفاده کردند. تا جایی که Dawdy and Lettenmaier (1987) برآورد حداکثر سیلاب محتمل را شبه قطعی می‌دانند. در همین راستا، Kavetski *et al.* (2006) با استفاده از مدل تحلیل خطای کل بیزین به بررسی مدل‌های هیدرولوژیکی و پارامترهای آن‌ها پرداختند. براساس نتایج این پژوهش‌گران، خطای پدیده بارش تأثیر قابل توجهی بر هیدروگراف‌های پیش‌بینی و کالیبراسیون پارامترها دارد. در پژوهشی دیگر، Biondi *et al.* (2012) یک روش مبتنی بر سیستم پیش‌بینی بیزی را با هدف ارزیابی عدم قطعیت کل بررسی کردند. این روش به منظور پیش‌بینی بارش و ایجاد مدل بارش - رواناب منطقه کالابریا واقع در جنوب ایتالیا مورداستفاده قرار گرفت و مقادیر خطا نیز براساس دو قسمت عدم قطعیت هیدرولوژیکی و پارامترهای ورودی بررسی شد. به منظور بررسی کاربرد ساختار بیزین در ارزیابی شبیه‌سازی جریان حوضه، Achieng and Zhu (2019) از مدل‌های آب‌وهوایی متعدد استفاده کردند. براساس نتایج این پژوهش، عملکرد مدل‌های اقلیمی در چهارچوب بیزین و خارج از آن می‌تواند متفاوت باشد و نتایج هر دو مورد باید بررسی شود. Ossandón *et al.* (2022) نیز در راستای پیش‌بینی شدت جریان فصلی حوضه رودخانه کلرادو یک ساختار برای مدل فضا- زمان ارائه کردند که غیرایستایی بودن و وابستگی فضا- مکان جریان‌ها بالا را در نظر می‌گیرد. مطابق نتایج این پژوهش، ساختار مدل‌سازی فضا- زمان ارائه شده به اعمال اقدامات پیشگیرانه کمک خواهد کرد، زیرا جریان‌های شدید بهار را دو ماه قبل از وقوع سیل ارائه خواهد داد.

باتوجه به مطالب ارائه شده، در پژوهش‌های گذشته به منظور برآورد حداکثر سیلاب محتمل حوضه آبریز، از مدل‌های قطعی و تصادفی استفاده شده است. در این پژوهش نیز از دو رویکرد مذکور استفاده شده و موردبررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. در همین راستا، در گام نخست حداکثر سیلاب محتمل حوضه آبریز سد لتیان با استفاده از روش بیزین بررسی شده است. در گام دوم نیز منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل HEC-HMS مدل‌سازی شده و مقدار حداکثر سیلاب محتمل محاسبه شده است. در انتها به مقایسه این دو رویکرد و بررسی معایب و مزایای هر یک پرداخته شده است. به عبارت دیگر، در این پژوهش دو رویکرد استفاده از مدل قطعی HEC-HMS و تصادفی بیزین، به منظور برآورد حداکثر سیلاب محتمل حوضه آبریز سد لتیان موردبررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد لتیان با مساحت ۶۹۸ کیلومترمربع در ۲۵ کیلومتری شمال شرق تهران واقع شده است. سد لتیان بر روی رودخانه جاجرود قرار گرفته و ۳۰ درصد آب شرب تهران را تأمین می‌کند. این رودخانه از کوه‌های البرز سرچشمه گرفته و به دریاچه نمک در مرکز ایران می‌ریزد. جریان آب سالانه حوضه سد لتیان معادل ۳۵۰ میلیون مترمکعب است و میزان بارندگی سالانه ورودی به سد در حدود ۳۳۴ میلیون مترمکعب و میزان خروجی از آن حدود ۳۰۷ میلیون مترمکعب می‌باشد. در شکل (۱) موقعیت حوضه آبریز سد لتیان نشان داده شده است.

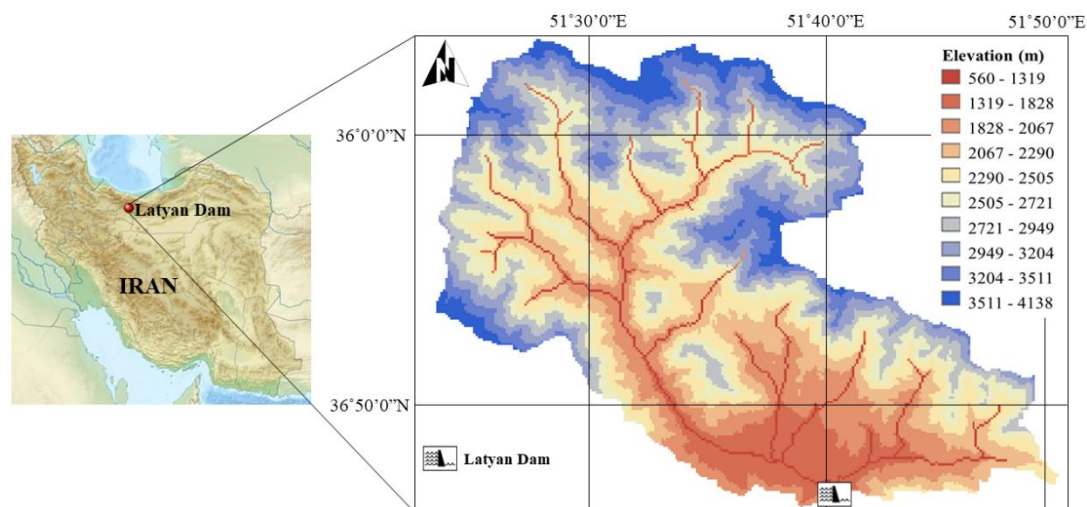


Figure 1. The location of the Latyan Dam drainage basin

۲.۲. برآورد حداکثر بارش محتمل

مطابق تعریف سرویس ملی هواشناسی آمریکا، حداکثر بارش محتمل، بزرگ‌ترین ارتفاع بارشی است که به لحاظ فیزیکی، در یک مدت مشخص، در یک حوضه آبریز خاص و در یک‌زمان خاص از سال اتفاق می‌افتد. پیش از بررسی حداکثر بارش محتمل، جریان پایه از داده‌های مشاهداتی باید حذف شود. به این منظور از نرم‌افزار BFI+ استفاده شده است. برای محاسبه حداکثر بارش محتمل نیز روش‌های متفاوتی وجود دارد که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارد. در پژوهش حاضر به دلیل کمبود داده‌های در دسترس، از روش مدل‌های توفان (حداکثر کردن مدل‌های کوه‌شناسی و همرفتی) استفاده شده است. با به‌کارگیری توزیع نوع یک حدی یا گامبل، عمق بارش برای دوره بازگشت T مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Chow *et al.*, 1988).

$$x_{T,T_d} = \bar{x}_{T_d} + K_T SD \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، \bar{x}_{T_d} میانگین، SD انحراف معیار استاندارد عمق بارش و K_T عامل تکرار است که مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left(0.5772 + \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه، T نیز به‌عنوان دوره بازگشت تعریف شده و نیاز به ضریب تصحیح دارد. در همین راستا مقادیر ۰/۹۶ برای دو سال، ۰/۹۸ برای پنج سال و ۰/۹۹ برای ۱۰ سال در نظر گرفته شده است. بدیهی است برای برآوردهای بالاتر نیازی به این ضریب تصحیح نمی‌باشد. به‌منظور بررسی ارتباط میان ایستگاه‌های باران‌سنجی نیز، ضریب همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از رابطه (۳) استفاده شد.

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[X,Y] - E[X]E[Y]}{\sqrt{E[X^2] - (E[X])^2} \times \sqrt{E[Y^2] - (E[Y])^2}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، $\rho_{X,Y}$ ماتریس همبستگی دو بردار X و Y می‌باشد.

مطابق تعریف کلاسیک، زمانی که دبی جریان تمامی مسیل را پر کرده و در سیلاب‌دشت جریان پیدا می‌کند، سیل اتفاق افتاده است. در این پژوهش با بررسی داده‌های موجود، دوره بازگشت ۲۵ سال به‌عنوان آستانه تعریف سیل تعریف

شده است. با توجه به این که وقوع سیل یک رویداد حدی محسوب می‌شود، به منظور تحلیل و بررسی آن از استنباط آماری در حالت‌های حدی^۶ استفاده شد. برای حدس اولیه PMP0 با فرض حداکثر فراوانی ۲۰ خواهیم داشت:

$$PMP0 = Q_{max}^{Annual} + K_T \times SD_{max}^{Annual} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه، Q_{max}^{Annual} حداکثر دبی سالانه و SD_{max}^{Annual} حداکثر انحراف معیار سالانه است.

۳.۲. تئوری بیزین

مقدار حداکثر سیلاب محتمل مبنایی برای طراحی سرریز سد می‌باشد. در واقع PMF پاسخ حوضه آبریز به حداکثر بارش محتمل است. در این پژوهش به منظور ایجاد تئوری بیزین حوضه سد لتیان، ایستگاه هیدرومتری نزدیک سد با بیش از ۷۰ سال داده به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. در همین راستا، دو سناریو حداکثر دبی‌های حداکثر سالانه و سیل‌های فراتر از آستانه با استفاده از نرم‌افزار OpenBUGS مدل‌سازی شد. در این راستا تابع توزیع پسین با استفاده از روش MCMC، الگوریتم متروپولیس - هاستینگز و با نمونه‌گیری Gibbs برآورد شد (Geweke and Tanizaki, 2001).

به‌طور خلاصه، مدل بیزی را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) نشان داد:

$$\pi(\theta|x, \Omega) = \frac{(x|\theta, \Omega)\pi(\theta|\Omega)}{f(x|\Omega)} \quad \text{or Posterior PDF} = \frac{\text{Likelihood Function} \times \text{Prior PDF}}{\text{Marginal Probability}} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن، θ ، x و Ω به‌ترتیب پارامتر، مقادیر مشاهداتی و داده‌های قبلی در مورد پارامتر θ هستند (Naghattini, 2017). تابع توزیع با کران بالای LN4 نیز به‌عنوان تابع توزیع پیشین انتخاب شد. تابع توزیع احتمالی^۷ و تابع توزیع تجمعی^۸ برای LN4 به‌ترتیب در روابط (۶) و (۷) نشان داده شده است.

$$f_x(x|\theta) = \frac{\alpha}{x(\alpha-x)\sigma_Y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma_Y^2}(\ln(\frac{x}{\alpha-x})-\mu_Y)^2}, 0 \leq X \leq \alpha \quad \text{رابطه ۶}$$

$$F_x(x|\theta) = \phi\left(\frac{1}{\sigma_Y} \ln\left(\frac{x}{\alpha-x}\right) - \frac{\mu_Y}{\sigma_Y}\right) \quad \text{رابطه ۷}$$

برای ارزیابی صحت برآوردهای پسین از دو معیار ضریب تغییرات و خطای مونت کارلو استفاده شده است. براساس پژوهش Fernandes et al. (2010) حدود ضریب تغییرات از ۰/۳۳ تا ۰/۶۶ با میانگین ۰/۴۳ است. بر همین اساس، در این پژوهش مقدار ضریب تغییرات در پنج سناریو از ۰/۳ تا ۰/۷ گسسته‌سازی شد. همچنین برای ایجاد تئوری بیزین نیز چهار سناریوی حداکثر سالیانه (A)، حداکثر فراز روزانه (P)، حداکثر سالیانه و لحظه‌ای (AI)، حداکثر فراز روزانه و لحظه‌ای (PI) در نظر گرفته شد که آمار توصیفی آن‌ها به‌همراه داده‌های مشاهداتی (I) در جدول (۱) نشان داده شده است.

Table 1. Comparison of observational data scenarios

Scenarios	I	A	P	AI	PI
Count	35	70	139	105	174
Sum (mm)	2834.65	3753.49	7122.50	6588.14	9957.15
Avg (mm)	80.99	53.62	51.24	62.74	57.22
Max (mm)	206.30	187.00	187.00	206.30	206.30
Min (mm)	31.00	2.71	30.20	2.71	30.20
S.D. (mm)	44.60	37.29	27.08	41.72	33.45
C.V.	0.55	0.70	0.53	0.66	0.58
Skew	0.98	1.17	2.06	1.09	1.84
K	20	20	20	20	20
PMF-0 (mm)	973.01	799.39	592.78	897.22	726.20

برای هر کدام از این چهار سناریو و به تعداد سه گسست روی ضریب تغییرات برنامه OpenBUGS اجرا شده و نتایج آن مورد بحث قرار گرفته است.

۴.۲ مدل HEC-HMS

به منظور تعیین پارامتر تجربی CN از افزونه ArcCN-Runoff برای برآورد اولیه استفاده شد و کالیبراسیون آن در محیط نهایی HEC-HMS که توسط مرکز هیدرولوژی انجمن مهندسين ارتش امریکا ارائه شده است، انجام شد. این نرم افزار به دلیل رایگان بودن و قابلیت واسنجی آسان نسبت به سایر نرم افزارها برتری دارد. همچنین در مدل HEC-HMS پدیده سیلاب به صورت تک واقعه در نظر گرفته شده و به منظور ایجاد مدل، به مؤلفه های کمتری نسبت به سایر مؤلفه ها نیاز دارد. نرم افزار HEC-HMS به منظور انجام محاسبات بارش - رواناب از مدل های ریاضی متنوعی استفاده می کند. با بررسی داده های بارش ۱۴ ایستگاه باران سنجی حوضه آبریز لتیان، در نهایت پنج رویداد برای کالیبراسیون انتخاب شد. در گام دوم به منظور بررسی سیلاب حوضه آبریز سد لتیان نیز، از مدل HEC-HMS استفاده شد. این مدل یک مدل مفهومی و تجمعی است که به صورت رخداد مبنا و یا سری زمانی قابل استفاده است. مدل HEC-HMS با شبیه سازی رفتار حوضه، می تواند مؤلفه های مختلفی مانند حجم، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج را محاسبه کند. این مدل از سه بخش اصلی مدل حوضه، هواشناسی و شاخص کنترل ایجاد شده است. در بخش اول حوضه آبریز تعریف شده و داده های جغرافیایی، هندسی و فیزیکی وارد می شوند، سپس نحوه پیکره بندی و ارتباط زیرحوضه ها نیز مشخص شده و المان ها و خصوصیات آن ها تعیین می شود. در بخش دوم مدل HEC-HMS داده های هواشناسی شامل بارش، تبخیر و تعرق و ذوب برف وارد می شوند. در بخش انتهایی نیز بازه زمانی برای شبیه سازی تنظیم و کنترل می شود. پس از انجام موارد ذکر شده مدل واسنجی می شود.

۳. نتایج

۳.۱. تئوری بیزین

در گام نخست به بررسی حداکثر سیلاب محتمل حوضه آبریز سد لتیان با رویکرد آماری و احتمالاتی و استفاده از روش بیزین پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا PMP محاسبه شده و عدد ۲۰ به عنوان حداکثر مقدار K_T مطابق نشریه ۷۱۶ در نظر گرفته شد. مشخصات آماری داده های ۱۴ ایستگاه باران سنجی و PMP محاسبه شده برای آن ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

Table 2. Statistical characteristics and PMP in the Latyan Dam drainage basin

Station	Count	Sum (mm)	Avg (mm)	Max (mm)	Min (mm)	S.D. (mm)	PMP (mm)
Latyan	47	1746	37.15	87	4	13.37	304.54
Lavasan-e Bozorg	44	1893	43.02	75	27	11.81	279.12
Niknam Deh	32	1386	43.31	73	23	11.5	273.23
Afje	44	2071	47.06	79	27	13.72	321.45
Barg-e Jahan	27	1185	43.89	83	6	15.44	352.65
Hamamak	35	849	24.26	50	15	7.38	171.81
Kand-e Sofla	45	1939	43.09	64	20	12.3	289.11
Rahat Abad	20	1038	51.89	89	28	17.32	398.19
Ammameh	38	2060	54.21	95	30	16.36	381.37
Kolugan	24	1251	52.11	79	30	13.59	323.82
Fasham	44	2129	48.39	86.5	25	13.17	311.76
Ahar	45	2306	51.24	129	24	18.92	429.67
Garmabdar	43	2200	51.16	154	29	20.17	454.63
Shemshak	32	1671	52.22	88	31	14.27	337.56

به منظور بررسی ارتباط میان ایستگاه‌های هواشناسی از ضریب هم‌بستگی استفاده شد. به علت عدم وجود تعداد زیادی از داده‌ها، ضرایب هم‌بستگی برای بسیاری از ایستگاه‌ها تعریف نمی‌شود. در سایر موارد نیز ضرایب هم‌بستگی بین ۰/۶۳۷ و ۰/۹۳ با میانگین ۰/۷۸۷۸ محاسبه شده است. همچنین، تمامی ضرایب مثبت هستند که بیانگر این موضوع است که در صورت پیشینه‌شدن مقادیر یک ایستگاه، سایر ایستگاه‌ها نیز به مقدار پیشینه خود نزدیک می‌شوند، بنابراین در مدل HEC-HMS و شبیه‌سازی حداکثر سیلاب محتمل، تمامی ایستگاه‌های باران‌سنجی باید در حالت حداکثر بارش ممکن قرار گیرند.

در این پژوهش از داده‌های ایستگاه هیدرومتری سد لتیان واقع در حوضه رودخانه جاجرود استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، به دلیل سابقه طولانی ۷۰ ساله داده‌های این ایستگاه، تابع درست‌نمایی مناسبی ایجاد می‌شود. تحلیل فراوانی با اختصاص رتبه مربوطه، به عنوان رتبه‌بندی ویبول به هر دبی انجام می‌شود. با توجه به آستانه دوره بازگشت ۲۵ ساله و یا احتمال تجاوز از $Pr=0/04$ ، مقدار سیلاب معادل دبی ۳۰ مترمکعب در ثانیه به دست می‌آید. در میان آمار ۷۰ ساله ۱۰۰۶ روز سیل طغیانی با دبی بیش‌تر از ۳۰ مترمکعب در ثانیه و ۶۹۲ روز با دوره بازگشت بزرگ‌تر از ۲۵ سال و کم‌تر از ۸۰ سال ثبت شده است. همچنین، تنها ۳۱۴ داده با دوره بازگشت بیش‌تر از ۸۰ سال یا $Pr < 0/0125$ مشاهده شده است. جریان اوج روزانه هر سیلاب به عنوان اولین سناریو برای مرحله بعد با عنوان دبی اوج^۷ ذخیره می‌گردد که شامل ۱۳۹ سیل می‌باشد.

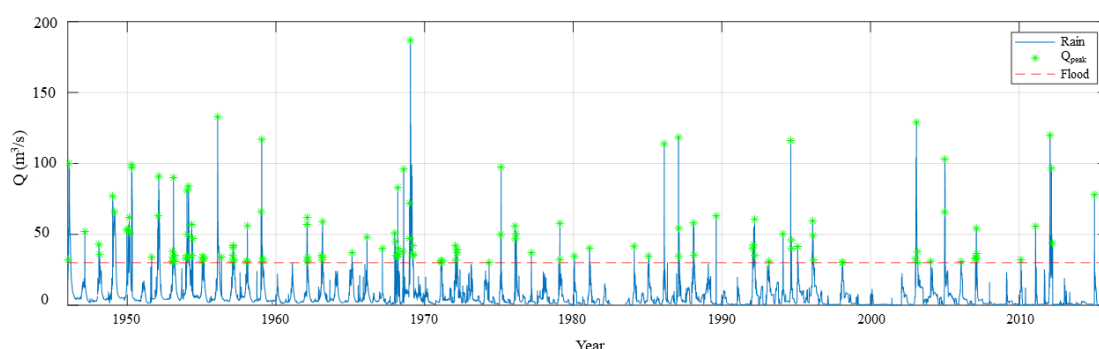


Figure 2. Data from the Latyan hydrometric station

سناریوی دوم شامل حداکثر دبی‌های سالانه در ایستگاه هیدرومتری می‌باشد که با عنوان دبی سالانه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، این سناریو شامل ۷۰ سیل می‌باشد و برخی از آن‌ها کم‌تر از آستانه ۳۰ مترمکعب بر ثانیه هستند.

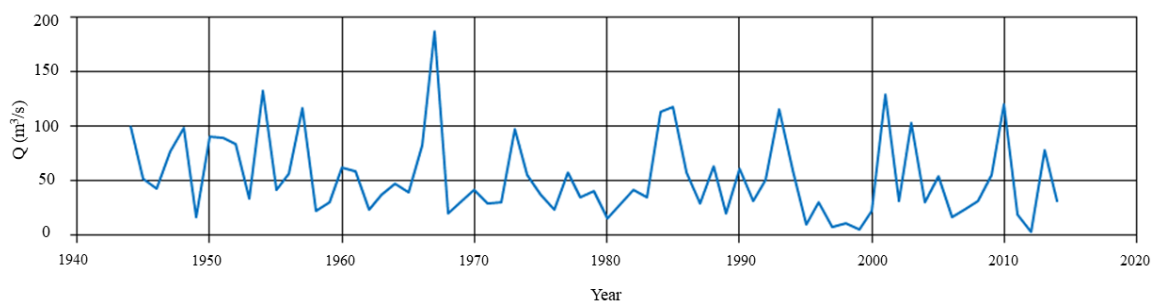


Figure 4. Maximum annual flow scenario

همچنین با افزودن سیل لحظه‌ای دو سناریو دیگر نیز در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر، در این پژوهش چهار سناریو حداکثر سالیانه (Annual)، حداکثر فراز روزانه (Peak)، حداکثر سالیانه و لحظه‌ای (Anunual+)، حداکثر فراز روزانه و لحظه‌ای (Peak+) و با پنج مقدار گسسته ضریب تغییرات مورد بررسی قرار گرفته و تابع پسین آن‌ها مشخص می‌شود. براساس تحلیل فراوانی سیلاب حوضه آبریز لتیان و به کارگیری رابطه (۴)، مقدار PMF0 معادل ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه به دست می‌آید. از طرفی ظرفیت سد لتیان معادل ۱۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، بنابراین در این پژوهش مقدار PMF0 معادل ۱۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد که ۱۰ درصد بیش‌تر از ظرفیت سرریز بوده و حدود ۱/۵ برابر برآورد تحلیل فراوانی می‌باشد.

براساس نتایج مندرج در شکل (۵)، در سناریوهای سالانه با افزایش ضریب تغییرات برآورد حداکثر سیلاب محتمل روند نزولی داشته و در سناریوهای فراز این روند به صورت صعودی است. همچنین، با افزایش ضریب تغییرات، میانگین برآورد حداکثر سیلاب محتمل در سناریوهای سالانه کم‌تر از PMF0 یعنی ۱۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، در صورتی که در سناریوهای فراز برآورد PMF0 از PMF0 بیش‌تر است. همچنین، افزودن سیلاب‌های لحظه‌ای، مقادیر سناریوی سالانه را کم‌تر کرده و اختلاف میان سناریوی فراز و PMF0 را افزایش داده است. موارد گفته شده در رابطه با سناریوهای سالانه و فراز با سیلاب و عدم در نظرگیری آن تغییری نمی‌کند.

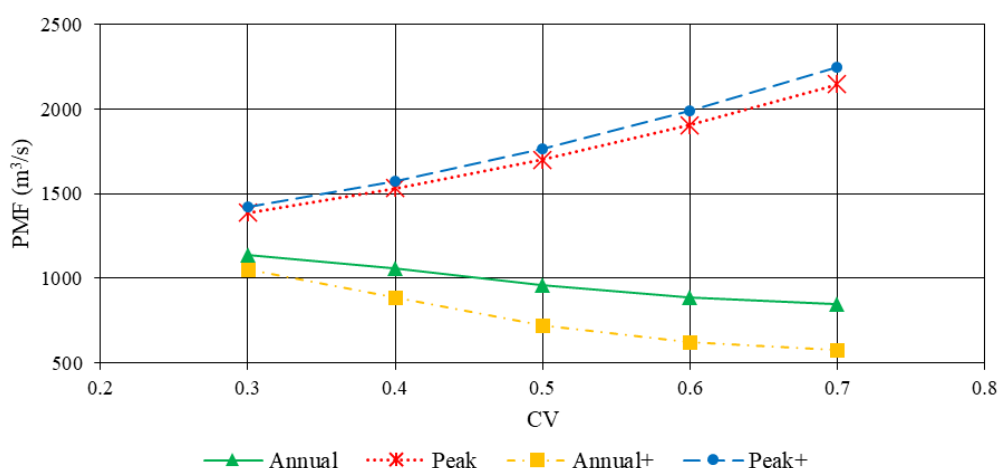


Figure 5. PMF mean values with different S.D.

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، خطای مونت کارلو برای چهار سناریو مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر خطا در تمامی مقادیر انحراف معیار و سناریوهای مورد بررسی کم‌تر از ۴ درصد است. با افزایش ضریب تغییرات پیشین، خطای مدل افزایش می‌یابد. به صورتی که، تا ضریب تغییرات ۰/۵ مقادیر خطا نزدیک به هم بوده و تغییرات کمی دارند و در ضرایب تغییرات بالای ۰/۵ این تغییرات افزایش می‌یابد. میانگین خطای مونت کارلو نیز برای سناریوهای سالانه، فراز، سالانه لحظه‌ای و فراز لحظه به ترتیب ۲/۱، ۲/۴، ۱/۹ و ۲/۳ درصد می‌باشد.

در شکل (۷) نیز مقادیر ضریب تغییرات پیشین در برابر ضریب تغییرات پسین نشان داده شده است. نتایج مندرج در این شکل حاکی از آن است که در تمامی سناریوهای مورد بررسی این دو پارامتر با یکدیگر رابطه مستقیم داشته و با افزایش ضریب تغییرات پیشین، ضریب تغییرات پسین نیز افزایش می‌یابد. همچنین، در سناریوهای دبی سالانه ضریب

تغییرات پسین بیش‌تر از ضریب تغییرات پیشین است، در صورتی که این رابطه در سناریوهای دبی فراز برعکس بوده و ضریب تغییرات پسین کم‌تر از ضریب تغییرات پیشین است.

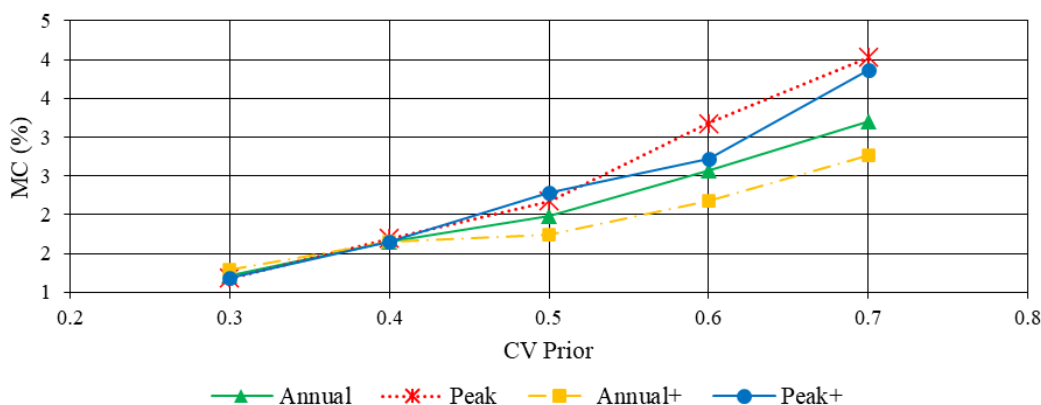


Figure 6. Monte Carlo error values with different S.D.

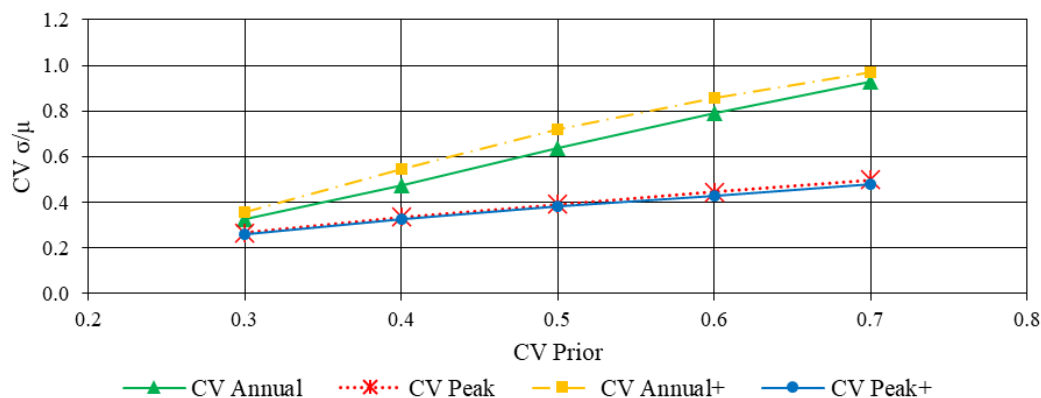


Figure 7. Variation coefficient values with different S.D.

پس از بررسی نتایج با انحراف معیارهای مختلف، در نهایت با توجه مقدار خطا، ضریب تغییرات ۰/۴ انتخاب شد. لازم به ذکر است *Fernandes et al.* (2010) نیز در پژوهشی مشابه میانگین ضریب تغییرات را معادل ۰/۴۳ در نظر گرفته است. اجرای مدل‌ها، منتج به تابع توزیع احتمال هم‌زمان پسین برای پارامترهای LN4 می‌شود. در این پژوهش به منظور ایجاد مدل بیزی در OpenBUGS از توزیع پسین با 10^6 بار نمونه‌برداری پارامترها استفاده شد که از هر ۱۰ نمونه، یک نمونه برای جلوگیری از ایجاد هم‌بستگی کنار گذاشته می‌شود، هم‌چنین 10^4 نمونه اول نیز برای انجام تنظیمات اولیه در نظر گرفته شدند. در انتها ۹۹۰۰۰ نمونه برای ایجاد مجموعه داده‌های پسین استفاده شد. سپس برای سناریوی فراز با سیلاب لحظه‌ای با استفاده از روش گشتاورها پارامترهای توزیع گاما مشخص شدند که در رابطه (۸) نشان داده شده است.

$$\text{Gamma}(\alpha = 9.47573, \beta = 0.00600) \quad (\text{رابطه ۸})$$

برای سناریو دبی‌های فراز نیز با استفاده از روش گشتاورها پارامترهای توزیع گاما مشخص شدند که در رابطه (۹) نشان داده شده است.

Gamma($\alpha = 8.99631, \beta = 0.00587$) (رابطه ۹)

نتایج حاکی از آن است که انحراف معیار پسین در حالت دبی فراز تقریباً همان انحراف معیار پیشین است، درحالی که در سناریوی سالیانه، انحراف معیارهای پسین بیش تر شده و پراکنش و تغییرات بیش تری را نشان می دهد. بنابراین سناریوهای دبی فراز و دبی فراز با سیلاب لحظه ای به عنوان سناریوهای منتخب انتخاب می شوند که میانگین برآورد پسین آن ها به ترتیب ۱۵۳۲ و ۱۵۷۷ مترمکعب بر ثانیه می باشد.

۲.۳ مدل HEC-HMS

همان طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، در گام دوم این پژوهش، حوضه آبریز سد لتیان با به کارگیری مدل HEC-HMS شبیه سازی شد. در این راستا، پارامترهای هیدرولوژیکی تعریف شده و تلفات و جریان پایه هر زیرحوضه مشخص شده است. لازم به ذکر است در این مرحله از فرایند تبخیر و تعرق به دلیل زمان کوتاه سیل صرف نظر شده است. برای مدل بارش رواناب نیز از روش هیدروگراف واحد SCS^۱ استفاده شده است.

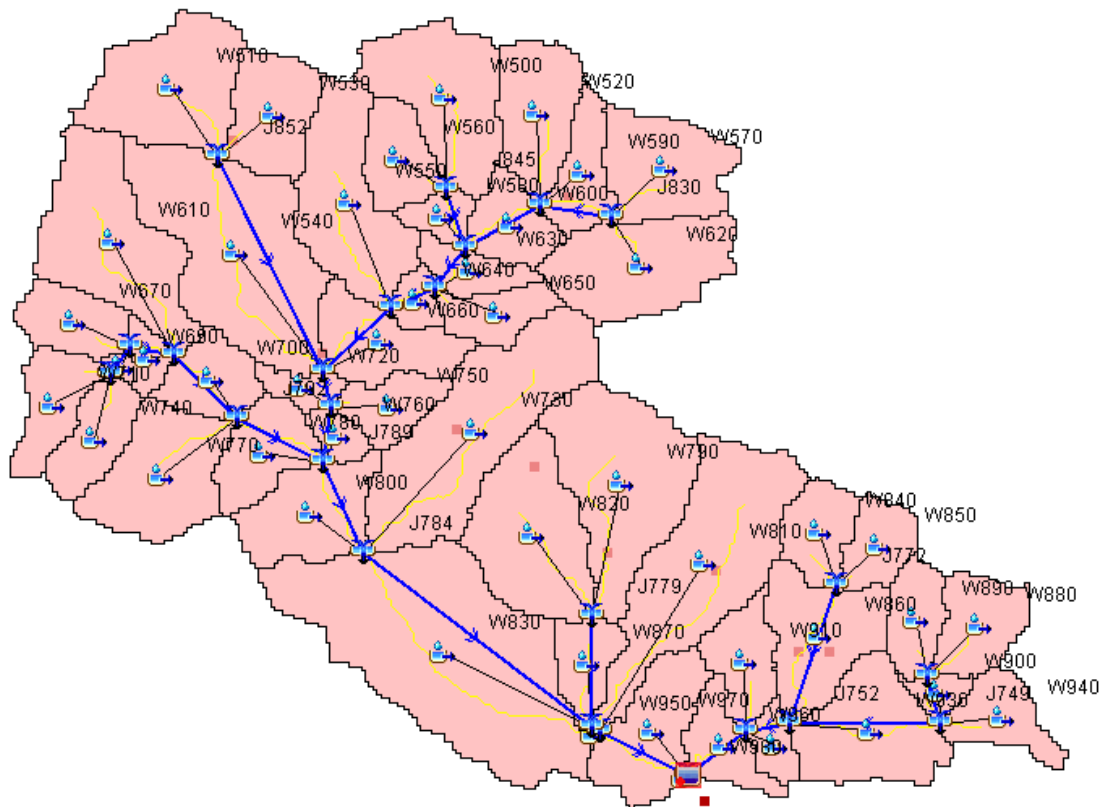


Figure 8. Latyan dam Letyan Dam drainage basin model in HEC-HMS

پس از ساخت مدل، ایستگاه واقع در سد لتیان به عنوان نقطه واسنجی انتخاب شده و پارامترهای مختلف کالیبره شدند. در این راستا از تابع Peak-Weighted RMSE استفاده شده است. شکل (۹) نمودار هیدروگراف محاسباتی کالیبره شده را در قیاس با هیدروگراف مشاهداتی برای پنج رویداد منتخب نشان می دهد.

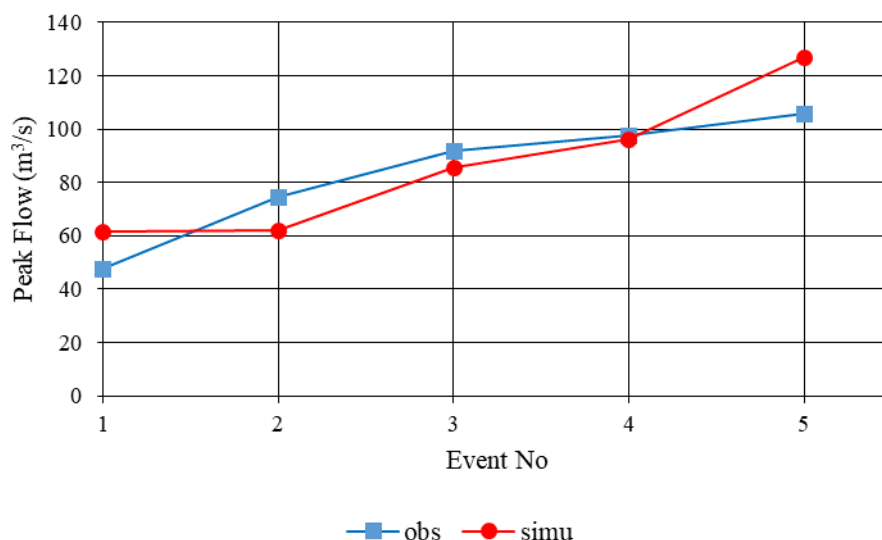


Figure 9. Calibration graph-observations versus modeled

در جدول (۳) نیز مقادیر معیارهای سنجش و ارزیابی مدل سازی نشان داده شده است. براساس این نتایج مقادیر PSR، NSE و MBE در محدوده مطلوبی قرار دارند و معیار MBE بیانگر این موضوع است که برآورد مدل کمی کمتر از مقدار واقعی خواهد بود.

Table 3. HEC-HMS model evaluation criteria

PSR	NSE	MBE	R ²
0.6836	0.5323	-4.811	73%

پس از مدل سازی حوضه آبریز سد لتیان با استفاده از مدل HEC-HMS، PMP محاسبه شده در مدل اعمال شد و مقدار PMF معادل ۱۰۲۵ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. درحالی که دانش اولیه و حدس اولیه PMF0 در حدود ۱۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه بوده است. در ادامه به بررسی عوامل مختلف این اختلاف پرداخته خواهد شد. به منظور تعیین مقدار CN در این پژوهش به دلیل عدم وجود داده های دقیق از نوع پوشش، جنس خاک و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، تنها به فرایند کالیبراسیون اتکا شده است؛ از طرفی عموماً مقادیر CN برای زمین های کشاورزی و کم شیب استفاده می شود. درحالی که حوضه آبریز سد لتیان شیب زیادی دارد. همچنین ایستگاه های هواشناسی منطقه در تراز ۱۱۵۰ تا ۲۵۰۰ متر واقع شده اند. در صورتی که تراز حوضه آبریز سد لتیان از ۵۶۰ تا ۲۵۰۰ متر می باشد؛ به عبارت دیگر، در تراز بالای ۲۵۰۰ متر هیچ ایستگاه باران سنجی وجود ندارد.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش مقدار PMF حوضه آبریز سد لتیان با دو رویکرد استفاده از مدل تصادفی و قطعی محاسبه شده است. در این راستا، به منظور استفاده از رویکرد تصادفی، تئوری بیزین به کار گرفته شد و چهار سناریوی حداکثر سالیانه، حداکثر فراز روزانه، حداکثر سالیانه و لحظه ای، حداکثر فراز روزانه و لحظه ای مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین مقدار ضریب تغییرات در پنج سناریو از ۰/۳ تا ۰/۷ گسسته سازی شد. براساس نتایج و مقادیر خطا، ضریب تغییرات ۰/۴ و سناریوهای

حداکثر فراز روزانه و حداکثر فراز روزانه و لحظه‌ای به‌عنوان سناریوهای منتخب انتخاب شدند که میانگین برآورد پسین آن‌ها به‌ترتیب ۱۵۳۲ و ۱۵۷۷ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. در گام دوم با استفاده از مدل HEC-HMS حوضه آبریز سد لتیان مدل‌سازی شد و PMF ناشی از PMP محاسبه‌شده به‌دست آمد. براساس معیارهای سنجش و ارزیابی مدل‌سازی و مقدار MBA، برآورد مدل ایجادشده کم‌تر از مقدار واقعی خواهد بود. نتایج مدل HEC-HMS نیز حاکی از آن است که حداکثر سیل محتمل حوضه آبریز سد لتیان ۱۰۲۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، در صورتی که در تئوری بیزین مقدار PMF0 معادل ۱۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است. به‌عبارت دیگر، نتایج مدل HEC-HMS، ۳۴ درصد کم‌تر از مقدار محاسبه‌شده با استفاده از تئوری بیزین می‌باشد.

مطابق نتایج این پژوهش، استفاده از دو رویکرد قطعی HEC-HMS و مدل تصادفی بیزین به‌منظور برآورد حداکثر سیلاب محتمل باید براساس داده‌های موجود منطقه مورد مطالعه انجام شود. مدل بیزین براساس داده‌های تاریخی حداکثر سیلاب محتمل عمل می‌کند، در صورتی که مدل HEC-HMS به سایر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه نیز نیاز دارد. بنابراین، با توجه به داده‌های موجود در حوضه آبریز سد لتیان استفاده از مدل بیزین نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Extreme Event
2. Probable Maximum Flood - PMF
3. Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
4. Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
5. Probability Maximum Precipitation -PMP
6. Extreme Method of Statistical Interferences
7. Probability Distribution Function - PDF
8. Cumulative Distribution Function - CDF
9. Soil Conservation Service (SCS) Unit Hydrograph

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Achieng, K. O., & Zhu, J. (2019). Application of Bayesian framework for evaluation of streamflow simulations using multiple climate models. *Journal of Hydrology*, 574, 1110-1128.
- Biondi, D., & De Luca, D. L. (2012). A Bayesian approach for real-time flood forecasting. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 42, 91-97.
- Dawdy, D. R., & Lettenmaier, D. P. (1987). Initiative for risk-based flood design. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(8), 1041-1051.
- Fernandes, W., Naghettini, M., & Loschi, R. (2010). A Bayesian approach for estimating extreme flood probabilities with upper-bounded distribution functions. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24, 1127-1143.
- Geweke, J., & Tanizaki, H. (2001). Bayesian estimation of state-space models using the Metropolis-Hastings algorithm within Gibbs sampling. *Computational statistics & data analysis*, 37(2), 151-170.
- Hashemyan, F., Khaleghi, M. R., & Kamyar, M. (2015). Combination of HEC-HMS and HEC-RAS models in GIS in order to Simulate Flood (Case study: Khoshke Rudan river in Fars province, Iran). *Research Journal of Recent Sciences*, 4(8), 122-127.
- Janicka, E., & Kanclerz, J. (2023). Assessing the Effects of Urbanization on Water Flow and Flood Events Using the HEC-HMS Model in the Wiryńka River Catchment, Poland. *Water*, 15(1), 86.

- Kabeja, C., Li, R., Guo, J., Rwatangabo, D. E. R., Manyifika, M., Gao, Z., ... & Zhang, Y. (2020). The impact of reforestation induced land cover change (1990–2017) on flood peak discharge using hec-hms hydrological model and satellite observations: a study in two mountain basins, china. *Water*, 12(5), 1347.
- Kavetski, D., Kuczera, G., & Franks, S. W. (2006). Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 2. Application. *Water resources research*, 42(3).
- Kim, S. J., Kim, G. T., Jeong, J. H., & Han, S. O. (2013). Flood inundation scenario development and analysis using HEC-HMS/RAS and HEC-GeoRAS models. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(4), 199-206.
- Kottegoda, N. T., & Rosso, R. (2008). *Applied statistics for civil and environmental engineers*.
- Naghetini, M. (2017). *Fundamentals of statistical hydrology*.
- Affairs of the country's technical and executive system of the office of standards and projects of water and water supply. (2015). *Methods for calculating maximum probable precipitation (PMP) and depth, area, duration curves of precipitation (DAD)*. Regulation No. 716. (in persian).
- Ossandón, Á., Brunner, M. I., Rajagopalan, B., & Kleiber, W. (2022). A space–time Bayesian hierarchical modeling framework for projection of seasonal maximum streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(1), 149-166.
- Pechlivanidis, I. G., Jackson, B. M., McIntyre, N. R., & Wheater, H. S. (2011). Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST journal*, 13(3), 193-214.
- Pistocchi, A., & Mazzoli, P. (2002). Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management. *1st International Congress on Environmental Modelling and Software - Lugano, Switzerland - June 2002*.
- Ros, F. C., Sidek, L. M., Ibrahim, N. N. N., & Razad, A. A. (2008, October). Probable maximum flood (PMF) for the Kenyir Catchment, Malaysia. *In International conference on construction and building technology*, 31, 325-334.
- Te Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*.
- Thakur, B., Parajuli, R., Kalra, A., Ahmad, S., & Gupta, R. (2017, May). Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in precipitation runoff modelling and evaluating flood plain inundation map. *In World Environmental and Water Resources Congress*, 240-251.