

## Parameters Uncertainty Analysis in Estimating Probable Maximum Flood in Bakhtiary Dam Basin by Monte Carlo Method

HOSEIN FATHIAN<sup>1\*</sup>, ALI MOHAMMAD AKHONDALI<sup>1</sup>, MOHAMMAD REZA SHARIFI<sup>1</sup>

1. Department of Hydrology and Water Resources, Collage of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

(Received: Oct. 31, 2019- Revised: Jan. 2, 2020- Accepted: Jan. 7, 2020)

### ABSTRACT

The reliability and validity of extreme floods, especially the probable maximum flood (PMF), requires to consider uncertainty sources in flood estimation. Parameters uncertainty of rainfall-runoff models are the main sources of uncertainty in flood estimation. In this paper, the Monte Carlo method has been used to estimate the PMF hydrograph uncertainty due to uncertainty in the calibration parameters of the rainfall-runoff model in Bakhtiary Basin in southwestern of Iran. The HEC-HMS hydrologic model was used to estimate the PMF hydrograph resulted by the probable maximum precipitation (PMP). The SCS curve number, Clark's unit hydrograph and Muskingum methods were used to model losses, rainfall-runoff transform and river flood routing, respectively. The results show that the uncertainty in peak discharge and volume of PMF hydrograph due to the uncertainty of all parameters are 17.13 and 6.79%, respectively. The results showed that the uncertainty in peak discharge and PMF hydrograph volume due to uncertainty of all parameters are 17.13 and 6.79 percent respectively. The uncertainty in peak discharge of PMF hydrograph due to curve number, initial losses, concentration time, Clark's storage coefficient, Muskingum K and Muskingum X parameters are 5.05, 0.4, 3.78, 3.85, 4.05 and 0.01 percent respectively. Also, the uncertainty in the PMF hydrograph volume due to the uncertainty of the curve number, initial losses, concentration time, Clark's storage coefficient, Muskingum K and Muskingum X parameters were 4.46, 0.332, 0.328, 1.6, 0.08 and 0.0002 percent respectively. Therefore, in order to reduce the uncertainty in estimating PMF hydrograph, it is necessary to be more precise in estimating the parameters of curve number, Muskingum K, Clark's storage coefficient and concentration time, respectively.

**Keywords:** Parameters Uncertainty, PMF, HEC-HMS Model, Monte Carlo Simulation Method.

---

\*Corresponding Author's Email: [fathian.h58@gmail.com](mailto:fathian.h58@gmail.com)

## تحلیل عدم قطعیت پارامترها در برآورد حداکثر سیلاب محتمل در حوضه سد بختیاری با روش مونت کارلو

حسین فتحیان<sup>۱\*</sup>، علی محمد آخوندعلی<sup>۱</sup>، محمدرضا شریفی<sup>۱</sup>

۱. گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷)

### چکیده

اطمینان و اعتبار سیل‌های حدی مخصوصاً حداکثر سیلاب محتمل (PMF)، مستلزم در نظر گرفتن منابع عدم قطعیت در برآورد سیل است. عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های بارش-رواناب، از جمله منابع اصلی عدم قطعیت در برآورد سیل می‌باشند. در این پژوهش از روش مونت کارلو برای برآورد عدم قطعیت هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در پارامترهای واسنجی مدل بارش-رواناب در حوضه بختیاری در جنوب غربی ایران استفاده شده است. برای برآورد هیدروگراف PMF ناشی از حداکثر بارش محتمل (PMP)، از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده شد. برای مدل‌سازی تلفات، تبدیل بارش به رواناب و روندیابی جریان در آبراهه‌ها به ترتیب از روش‌های شماره منحنی SCS، هیدروگراف واحد کلارک و ماسکینگام استفاده شد. نتایج نشان داد که عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت تمام پارامترها به ترتیب برابر با ۱۷/۱۳ و ۶/۷۹ درصد است. عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تمرکز، ضریب ذخیره کلارک، K ماسکینگام و X ماسکینگام به ترتیب برابر با ۵/۰۵، ۰/۴، ۳/۷۸، ۳/۸۵، ۴/۰۵ و ۰/۰۱ درصد است. همچنین عدم قطعیت در حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تمرکز، ضریب ذخیره کلارک، K ماسکینگام و X ماسکینگام به ترتیب برابر با ۴/۴۶، ۰/۳۳۲، ۰/۳۲۸، ۱/۶، ۰/۰۸ و ۰/۰۰۲ درصد است. بنابراین برای کاهش عدم قطعیت در برآورد هیدروگراف PMF باید به ترتیب در برآورد پارامترهای شماره منحنی، K ماسکینگام، ضریب ذخیره کلارک و زمان تمرکز دقت بیشتری کرد.

واژه‌های کلیدی: عدم قطعیت پارامترها، PMF، مدل HEC-HMS، روش شبیه‌سازی مونت کارلو.

### مقدمه

اطمینان و اعتبار سیل‌های حدی مخصوصاً حداکثر سیلاب محتمل<sup>۱</sup> (PMF)، مستلزم در نظر گرفتن منابع عدم قطعیت در برآورد سیل است. از آنجایی که در واقع عدم قطعیت در تمام وضعیت‌ها وجود دارد، معنای آن به وضوح درک می‌شود. ممکن است مفهوم دریافتی هر کسی از عدم قطعیت متضاد قطعیت باشد. یعنی هر چیزی که قطعی نیست، غیرقطعی است. Zimmermann (1997a, 1997b) عدم قطعیت را با توجه به قطعیت چنین تعریف کرده است. «قطعیت یعنی اینکه فردی از نظر کمی و کیفی، اطلاعات صحیح برای توصیف، توصیه یا پیش‌بینی قطعی و عددی یک سیستم، رفتار آن و یا پدیده‌های دیگر را دارد». وضعیت‌هایی که با تعریف بالا شرح داده نمی‌شوند، بایستی عدم قطعیت نامید. منابع عدم قطعیت عواملی هستند که منجر به افزایش عدم قطعیت در پیش‌بینی یک سیستم مدل‌سازی شده می‌شوند (Maskey et al., 2003). در زمینه پیش‌بینی و برآورد سیل منابع عدم قطعیت مربوط به عدم قطعیت

مدل، ورودی‌ها و پارامترها می‌باشند. عدم قطعیت مدل به دلیل فرضیات در نظر گرفته‌شده در معادلات مدل، ساخت مدل و نقص در تفهیم سیستم واقعی است. عدم قطعیت ورودی‌ها به دلیل پیش‌بینی‌های غیردقیق در ورودی‌های مدل مانند میزان بارندگی، دمای هوا، آب معادل برف و غیره است. عدم قطعیت پارامترها نیز به دلیل تعیین نادرست پارامترهای واسنجی مدل است (Maskey et al., 2004).

PMF عبارت است از سیلابی که ناشی از ترکیب بحرانی عوامل هواشناسی و هیدرولوژیکی است که در یک منطقه به طور منطقی احتمال وقوع دارند. PMF یک مفهوم قطعی و خاص است و احتمال وقوع آن به صراحت تعریف نشده است. از لحاظ تئوری، PMF حد بالای سیل در یک حوزه آبخیز معین و در یک فصل خاص را نشان می‌دهد. در واقعیت، برآوردهای PMF معمولاً با مقدار تغییر وابسته به داده‌های موجود، روش انتخاب شده و رویکرد تحلیل‌گر برای به‌دست آوردن تخمین، از حد بالایی نظری پایین‌تر هستند (Micovic et al., 2015).

\* نویسنده مسئول: fathian.h58@gmail.com

افزایش ۴۰ و کاهش ۳۰ درصدی در مقدار حاصل از واسنجی آن می‌باشد. (Karimi *et al.*, 2018) با استفاده از داده‌های کیفیت آب، کاربری/پوشش زمین، نقشه قابلیت سرزمین و زمین‌شناسی مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در حوضه غربی دریای خزر، مدل‌سازی با روش گام به گام رگرسیون خطی انجام دادند. سپس عدم قطعیت مدل‌ها با شبیه‌سازی مونت کارلو تحلیل کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزایش در زمین‌های کشاورزی یا کاهش در مناطق جنگلی در نهایت منجر به افت کیفیت آب خواهد شد. علاوه بر این، بررسی منحنی‌های تابع توزیع تجمعی نشان داد که مدل‌های  $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$  و EC عدم قطعیت بالاتری از لحاظ پیش‌بینی در مقایسه با مدل  $Na^{+}$  دارند.

(Karami cheme and Mazaheri 2018) یک روش جدید برای تعیین موقعیت‌هایی است که ضریب پراکندگی تأثیر معنی‌داری بر حمل و نقل مواد آلاینده رودخانه دارد، ارائه کردند که مبتنی بر روش شبیه‌سازی مونت کارلو است. نتایج نشان داد که الگوی زمانی منبع آلودگی، عامل اصلی در تأثیر ضریب پراکندگی در حمل و نقل مواد آلاینده است. (Fathabadi *et al.*, 2018) روش‌های ناپارامتریک<sup>۴</sup> LEC، رگرسیون چندک<sup>۵</sup> و جنگل تصادفی<sup>۶</sup> در برآورد عدم قطعیت مدل یکپارچه<sup>۷</sup> HBV در حوضه چهل‌چای استان گلستان بررسی کردند. نتایج برآورد عدم قطعیت نشان داد که بزرگترین و کوچکترین مقدار دامنه عدم قطعیت به ترتیب توسط روش‌های LEC در حالتی که توسط ماشین بردار رگرسیون آموزش دیده باشد و روش جنگل تصادفی، به دست می‌آید. در مقایسه با روش‌های ناپارامتریک، روش<sup>۸</sup> GLUE با توجه به مقادیر شاخص‌های ارزیابی<sup>۹</sup> MPI، PICP<sup>۱۰</sup> و<sup>۱۱</sup> ARIL عملکرد مناسبی نداشت. (Micovic *et al.*, 2015) عدم قطعیت مرتبط با برآورد PMP مشتق شده از تحلیل هواشناسی در حوضه سد LaJoie در بریتیش کلمبیا را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که برآورد PMP تک مقداره که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند بیشتر از ۴۰٪ زمانی باشد که تغییرات ممکن در متغیرهای مختلف هواشناسی برای برآورد PMP در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، برآوردهای PMP باید همیشه به صورت یک دامنه مقادیر که بیانگر عدم قطعیت‌های قابل توجه در مقدار PMP است، ارائه شود.

(Wang *et al.*, 2017) روش بیزین با به‌کارگیری الگوریتم مونت کارلو زنجیره مارکوف متروپولیس-هستینگس را معرفی

کرده‌اند که حداکثر بارش محتمل<sup>۱</sup> (PMP) و PMF به تغییر شرایط آب و هوایی حساس هستند (Kunkel *et al.*, 2013; Stratz and Beauchamp *et al.*, 2013; Rousseau *et al.*, 2014; Hossain, 2014; Klein *et al.*, 2016; Rastogi *et al.*, 2017; Gangrade *et al.*, 2018) و برخورد قطعی با PMP / PMF را به چالش کشیدند.

(Vrugt *et al.*, 2008) یک نمونه‌گیر مونت کارلو زنجیره مارکوف (MCMC) تحت عنوان متروپولیس تطبیقی تکاملی تفاضلی<sup>۲</sup> (DREAM) را ارائه دادند که به طور خاص برای برآورد تابع چگالی احتمال پسین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی در مسائل نمونه‌برداری پیچیده و با ابعاد زیاد به صورت موثر طراحی شده است. آن‌ها نشان دادند که خطای بارش در طی واسنجی مدل هیدرولوژیکی نه تنها به طور صریح موجب دامنه عدم قطعیت در پیش‌بینی جریان می‌شود بلکه به طور قابل توجهی توزیع پسین پارامترهای مدل حوضه را تغییر می‌دهند. (Dotto *et al.*, 2011) با کمک تئوری بیز، تحلیل عدم قطعیت پارامترهای دو مدل بارش-رواناب تک‌واقع را در پنج زیرحوضه کوچک در استرالیا مورد ارزیابی قرار داده و توابع پسین توزیع پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی را تعیین کردند. آن‌ها همچنین پارامتر درصد مساحت نفوذناپذیر حوضه را به عنوان مهمترین پارامتر در هر دو مدل معرفی کردند. (Kabir and Bahremand 2013) عدم قطعیت پارامترهای مدل WetSpa را با روش مونت کارلو در حوضه آبخیز گرگان‌رود در استان گلستان بررسی کردند. نتایج بیانگر این بود که فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق کوتاه‌ترین دامنه را دارا بوده و در نتیجه از حساسیت بالایی برخوردار است؛ در حالی که عامل آب زیرزمینی اولیه دارای بیشترین عدم قطعیت می‌باشند و از حساسیت کمی برخوردارند.

(Kahe *et al.*, 2017) عدم قطعیت پارامتر هدایت هیدرولیکی را برای تحلیل عدم قطعیت مدل جریان آب زیرزمینی دشت علی آباد قم بررسی کردند. آن‌ها باندهای مختلف عدم قطعیت در خصوص پارامتر هدایت هیدرولیکی برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در محدوده اطمینان ۹۱ درصد با استفاده از روش مونت کارلو بررسی کردند. به منظور کاهش حجم محاسبات و صرفه‌جویی در زمان از روش<sup>۳</sup> RPEM استفاده کردند. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین باند غیرقطعی در تحلیل عدم قطعیت نوسانات سطح آب زیرزمینی با لحاظ نمودن پارامتر غیرقطعی هدایت هیدرولیکی با استفاده از هر دو روش مونت کارلو و RPEM،

7. Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning  
8. Generalized Likelihood Uncertainty Estimation  
9. Mean Prediction Interval  
10. Prediction Interval Coverage Probability  
11. Average Relative Interval Length

1. Probable Maximum Precipitation  
2. Differential Evolution Adaptive Metropolis  
3. Rosenblueth's Point Estimation Method  
4. Local Errors and Clustering  
5. Quantile Regression  
6. Random Forest

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

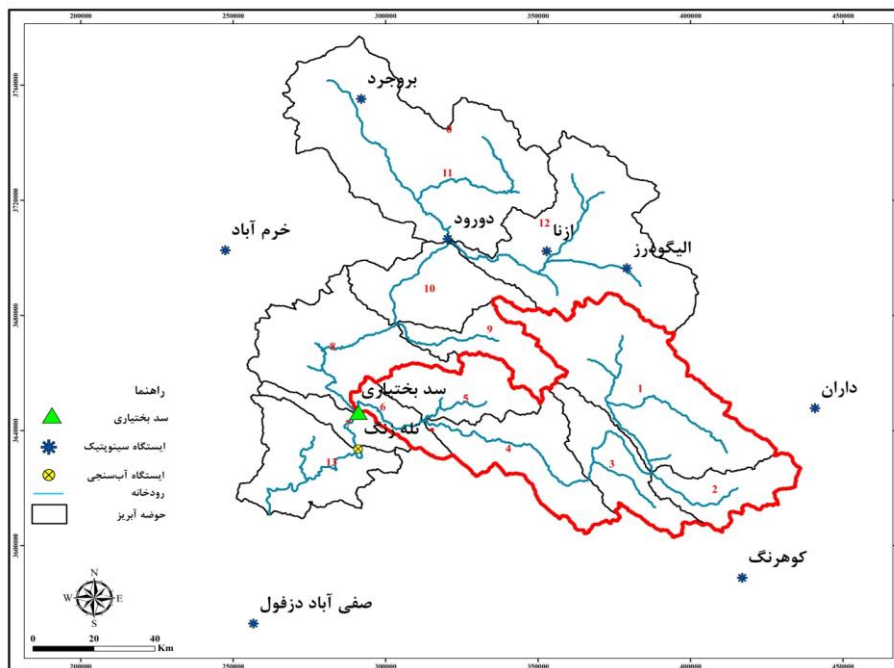
حوضه آبریز رودخانه بختیاری با مساحت ۶۳۸۸ کیلومترمربع در جنوب غربی ایران، در شمال استان خوزستان و در محدوده‌ای بین چهار استان لرستان، خوزستان، چهارمحال و بختیاری و اصفهان واقع شده است. حوضه بختیاری در محدوده حوضه دز می‌باشد که به دلیل کوهستانی بودن، برف‌گیر می‌باشد. حوضه سد بختیاری بر اساس نقشه‌های پایه توپوگرافی، شبکه رودخانه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری به شش زیرحوضه تقسیم شده است. شکل (۱) نقشه زیرحوضه‌بندی حوضه دز و حوضه بختیاری بر مبنای نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ و شماره مربوط به هر زیرحوضه را نشان می‌دهد. در شکل (۱) زیرحوضه‌های یک تا شش مربوط به حوضه بختیاری می‌باشند. خلاصه مشخصات فیزیوگرافی و ارتفاعی حوضه سد بختیاری و زیرحوضه‌های آن در جدول (۱) آمده است. جدول (۲) مقادیر PMP با تداوم سه روزه در سطح زیرحوضه‌ها و حوضه سد بختیاری که به روش سینوپتیکی به دست آمده را نشان می‌دهد (Iran Power and Water Resources Development Company, 2006a). مشخصات ایستگاه‌های همدیدی و هیدرومتری مورد استفاده در جدول (۳) نشان داده شده است. ایستگاه آب‌سنجی در محل سد بختیاری، ایستگاه تنگ‌پنج بختیاری بوده که به علت وجود مشکل در مقادیر دبی ثبت‌شده در این ایستگاه از ایستگاه آب‌سنجی تله‌زنگ برای واسنجی مدل بارش-رواناب استفاده شد. شکل (۲) هیدروگراف PMF نهایی در محل سد بختیاری با زمان پایه ۱۰ روزه را نشان می‌دهد (Iran Power and Water Resources Development Company, 2006b). دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF نهایی به ترتیب برابر با ۱۲۴۰۰ مترمکعب در ثانیه و ۲۸۰۰ میلیون مترمکعب است.

کردند و از این روش برای کمی‌سازی عدم‌قطعیت در رودخانه ژوجیاچن در چین استفاده کرده و با روش مرسوم برآورد حداکثر درست‌نمایی برای برآورد پارامترها و کمی‌سازی عدم‌قطعیت مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روش بیزین مشابه روش حداکثر درست‌نمایی در برآورد مقدار میانگین جریان روزانه بوده و در کمی‌سازی عدم‌قطعیت دقیق‌تر از روش حداکثر درست‌نمایی است. (Liu *et al.*, 2017) یک روش تحلیل فاکتوریل چندسطحی بر مبنای تئوری بیز (BMFA<sup>1</sup>) برای ارزیابی عدم‌قطعیت پارامتر و اثرات آن بر پاسخ مدل هیدرولوژیکی توسعه دادند. در BMFA، الگوریتم DREAM برای تقریب‌سازی توزیع پسین پارامترهای مدل با استنتاج بیزین به کار برده می‌شود. عدم‌قطعیت چهار پارامتر حساس شامل شماره منحنی رواناب سازمان حفاظت خاک در شرایط رطوبتی متوسط (CN2)، ضریب هدایت هیدرولیکی خاک (SOL-K)، ظرفیت آب قابل دسترس گیاه (SOL-AWC) و عمق خاک (SOL-Z) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که CN2 سهم قابل توجهی بر ایجاد دبی اوج در این حوضه دارد و SOL-K منجر به ظرفیت نفوذ عمقی متوسط می‌شود. SOL-AWC و SOL-Z نیز اثر قابل توجهی بر دبی اوج داشته و اثرات آن‌ها وابسته به یکدیگر می‌باشد. (Zischg *et al.*, 2018) از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو نشان دادند که توزیع مکانی PMP اثرات قابل توجهی در نقشه‌های سیلاب‌گرفتنی PMF دارد. فاکتورهای دیگری مانند عوامل هواشناسی، رطوبت پیشین خاک، شرایط پوشش کاربری اراضی و بهره‌برداری از مخزن ممکن است موجب عدم‌قطعیت بیشتری در برآورد PMF و در نتیجه مناطق سیلاب‌گرفتنی سطحی حاصل از آن شوند.

هدف از این پژوهش، تحلیل عدم‌قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم‌قطعیت در پارامترهای واسنجی مدل HEC-HMS است. همچنین سهم هریک از زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های حوضه در عدم‌قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF تعیین خواهند شد.

جدول ۱- خلاصه مشخصات فیزیوگرافی و ارتفاعی زیرحوضه‌های حوضه سد بختیاری

زیر حوضه	مساحت (km <sup>2</sup> )	محیط (km)	ضریب گراولوس	حداقل ارتفاع (m)	حداکثر ارتفاع (m)	ارتفاع متوسط (m)	شیب متوسط (%)	طول آبراهه اصلی (km)	شیب (%)	شیب خالص آبراهه اصلی (%)
۱	۲۴۹۰/۵	۳۹۳/۴	۲/۲	۱۵۱۴	۴۰۲۰	۲۵۵۲	۲۶/۶	۱۱۲/۶	۰/۹۸	
۲	۶۷۱/۱	۱۹۱/۸	۲	۱۵۱۳	۳۹۰۰	۲۶۷۲	۳۵/۲	۶۳/۳	۱/۹	
۳	۸۶۶/۲	۲۴۰/۴	۲/۲	۱۱۲۴	۳۷۱۰	۲۲۳۴	۴۳/۸	۵۵/۷	۲/۳۳	
۴	۱۲۱۵/۲	۲۸۴/۸	۲/۲	۶۸۹	۳۷۱۵	۱۸۵۷	۴۲/۷	۹۳/۷	۱	
۵	۸۱۹/۱	۲۰۸/۲	۲	۶۹۴	۳۱۳۴	۱۶۷۹	۳۷/۱	۵۵/۹	۱/۹۳	
۶	۳۲۶/۸	۱۳۲/۲	۲	۵۳۹	۲۴۹۹	۱۲۷۹	۴۵/۳	۵۰/۳	۱/۰۱	



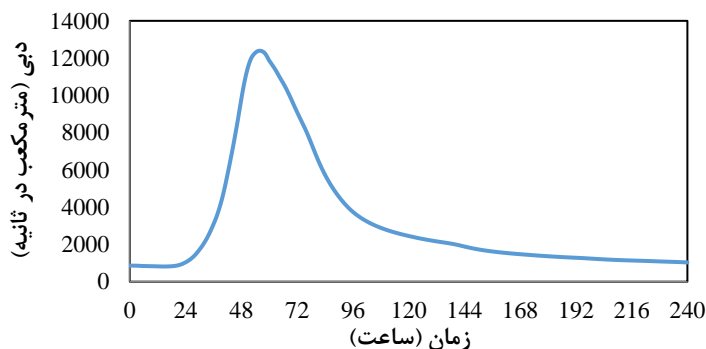
شکل ۱- مرز زیرحوضه‌های بختیاری و دز (کل حوضه با شماره‌های یک تا ۱۲ مربوط به حوضه دز است. زیرحوضه‌های با شماره‌های یک تا شش مربوط به حوضه بختیاری هستند)

جدول ۲- مقادیر PMP در سطح زیرحوضه‌ها و حوضه سد بختیاری

حوضه بختیاری	۶	۵	۴	۳	۲	۱	زیر حوضه
مساحت (km <sup>2</sup> )	۶۳۸۸/۸	۳۲۶/۸	۱۲۱۵/۲	۸۶۶/۲	۶۷۱/۱	۲۴۹۰/۵	
PMP (mm)	۲۷۳	۵۱۲/۶	۳۰۳/۱	۲۵۸/۷	۲۱۱	۲۰۸/۵	

جدول ۳- مشخصات ایستگاه‌های همدیدی و هیدرومتری مورد استفاده

ایستگاه	نوع ایستگاه	عرض جغرافیایی (دقیقه/درجه)	طول جغرافیایی (دقیقه/درجه)	ارتفاع (متر)
خرم آباد	سینوپتیک	۳۳ ۲۶	۴۸ ۱۷	۱۱۴۷/۸
الیگودرز	سینوپتیک	۳۳ ۲۴	۴۹ ۴۲	۲۰۲۲
دورود	سینوپتیک	۳۳ ۲۹	۴۹ ۰۴	۱۵۲۶/۷
ازنا	سینوپتیک	۳۳ ۲۷	۴۹ ۲۵	۱۸۷۱/۹
بروجرد	سینوپتیک	۳۳ ۵۵	۴۸ ۴۵	۱۶۲۹
کوه‌رنگ	سینوپتیک	۳۲ ۲۶	۵۰ ۰۷	۲۲۸۵
صفی‌آباد دزفول	سینوپتیک	۳۲ ۱۶	۴۸ ۲۵	۸۲/۹
داران	سینوپتیک	۳۲ ۵۸	۵۰ ۲۲	۲۲۹۰
تله‌زنگ	هیدرومتری	۳۲ ۴۹	۴۸ ۴۶	۴۸۰



شکل ۲- هیدروگراف PMF نهایی در محل سد بختیاری

## معرفی مدل HEC-HMS

در تحقیق حاضر از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS با توجه به سوابق طولانی کاربرد در مطالعات برآورد سیلاب PMF و قابلیت‌های نسبتاً متنوع و نیز مقبولیت عام در بین مهندسين هیدرولوژی، برای شبیه‌سازی انتخاب شد. از این مدل می‌توان برای تحلیل سیلاب‌های شهری، پیش‌بینی جریان، ظرفیت سرریز مخزن سد، احیای آبراهه‌ها، فرسایش و انتقال رسوب و ارزیابی عدم‌قطعیت مدل استفاده نمود (Hydrologic Engineering Center, 2018). به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی تبدیل بارش به رواناب، تلفات نفوذ، جریان پایه و ذوب برف در زیرحوضه‌ها به ترتیب از روش هیدروگراف واحد کلارک، روش شماره منحنی (CN) سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)، روش فروکش و روش درجه-روز استفاده شد. همچنین برای روندیابی جریان در آبراهه‌ها از مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام استفاده شد. روش SCS-CN شامل دو پارامتر CN و تلفات اولیه ( $I_a$ ) است.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$I_a = aS \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $S$  پتانسیل نگهداشت آب در حوضه به میلی‌متر، CN شماره منحنی متوسط حوضه و  $I_a$  تلفات اولیه به میلی‌متر و  $a$  ضریبی است که بر اساس تجربیات SCS، برابر با  $0.2$  است. ضریب  $a$  در تحقیقات مختلف مقادیر کمتر و بیشتر از آن گزارش شده است (Gao et al., 2012).

روش هیدروگراف واحد کلارک شامل دو پارامتر زمان تمرکز ( $t_c$ ) و ضریب ذخیره ( $R$ ) است. زمان تمرکز یکی از مهمترین پارامترهای هیدرولوژیکی در روندیابی زیرحوضه‌ها است. مقدار اولیه زمان تمرکز زیرحوضه‌ها با تقسیم طول آبراهه اصلی هر زیرحوضه به سرعت متوسط موج در آبراهه اصلی محاسبه شد. سرعت متوسط موج در آبراهه اصلی هر زیرحوضه از حاصل ضرب جذر نسبت شیب آبراهه اصلی هر زیرحوضه به بیشترین شیب آبراهه، در سرعت متوسط موج در آبراهه با بیشترین شیب در نظر گرفته شد. سرعت متوسط موج در روند واسنجی برای تطبیق بیشتر با هیدروگراف مشاهده‌ای در صورت نیاز تغییر داده شد. فرمول مورد استفاده برای برآورد زمان تمرکز و سرعت متوسط موج در آبراهه اصلی هر زیرحوضه به ترتیب در روابط (۳) و (۴) نشان داده شده است.

$$t_c = \frac{L}{3600C} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$C = \left(\frac{S}{S_{\max}}\right)^{0.5} C_{S_{\max}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن  $t_c$  زمان تمرکز بر حسب ساعت،  $L$  طول آبراهه اصلی بر حسب متر،  $C$  سرعت متوسط موج در آبراهه اصلی بر حسب متر بر ثانیه،  $S$  شیب آبراهه اصلی،  $S_{\max}$  بیشترین شیب آبراهه در کل حوضه و  $C_{S_{\max}}$  سرعت متوسط موج در آبراهه با بیشترین شیب است. برای برآورد زمان تمرکز، ابتدا سرعت متوسط موج در آبراهه با بیشترین شیب فرض می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۴)، سرعت متوسط موج در آبراهه‌های اصلی زیرحوضه‌ها محاسبه می‌شود. با به‌کارگیری رابطه (۳)، زمان تمرکز در زیرحوضه‌ها برآورد می‌شود. سپس با توجه به مقایسه تغییرات شکل هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و مقادیر دبی اوج و زمان دبی اوج در مرحله واسنجی مدل، مقدار سرعت متوسط موج در آبراهه با بیشترین شیب با سعی و خطا آنقدر تغییر داده می‌شود تا واسنجی مدل در حد قابل قبول باشد. ضریب ذخیره یکی دیگر از پارامترهای واسنجی است که بیانگر خصوصیات ذخیره شبکه رودخانه در هر زیرحوضه است. در این مطالعه از منابع استرالیا برای محاسبه ضریب ذخیره استفاده شد که فرمول پیشنهادی آن به شکل زیر است:

$$R = 0.7L^{0.57} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن  $R$  ضریب ذخیره بر حسب ساعت و  $L$  طول آبراهه اصلی در هر زیرحوضه بر حسب کیلومتر است (Australian Bureau of Meteorology, 1996). روش روندیابی ماسکینگام شامل دو پارامتر  $X$  و  $K$  است.  $K$  برابر با مدت زمان پیمایش موج سیل در آبراهه است.  $X$  پارامتر بدون بعدی است که بیانگر ذخیره موقت جریان در آبراهه است. محدوده تغییرات پارامتر  $X$  برای آبراهه‌ها معمولاً بین  $0.2$  تا  $0.45$  است. مقدار پارامتر  $K$  از رابطه زیر بدست آمد:

$$K = \frac{L}{3600C} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن  $K$  بر حسب ساعت،  $C$  سرعت موج بر حسب متر بر ثانیه و  $L$  طول آبراهه بر حسب متر است.

### معیارهای ارزیابی

برای مقایسه هیدروگراف مشاهداتی با هیدروگراف شبیه‌سازی شده، از شاخص‌های آماری سنجش خطا شامل ضریب نش-ساتکلیف<sup>۱</sup> (NS)، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE)، میانگین قدرمطلق درصد خطا<sup>۳</sup> (MAPE) و درصد خطای حجمی کل<sup>۴</sup> (PTVE) استفاده شده است که به ترتیب در روابط (۷) تا

شبیه‌سازی شده در ایستگاه آبسنجی تل‌زنگ برای وقایع 26 Mar 1998 و 1 Feb 1993 به ترتیب برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل را نشان می‌دهد. به منظور صحت‌سنجی مدل واسنجی شده HEC-HMS، شبیه‌سازی بارش-رواناب برای دوره زمانی صحت‌سنجی با مقادیر پارامترهای نهایی حاصل از واسنجی انجام شد. با توجه به شکل (۴) می‌توان دریافت که تغییرات هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS برای واقعه 26 Mar 1998 در ایستگاه آبسنجی تل‌زنگ نزدیک به هیدروگراف سیلاب مشاهداتی است و مدل HEC-HMS از لحاظ شبیه‌سازی بارش-رواناب بخوبی واسنجی شده است. همچنین با توجه به شکل (۴) می‌توان دریافت که تغییرات هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS برای واقعه 1 Feb 1993، تقریباً نزدیک به هیدروگراف مشاهداتی است.

جدول (۴) معیارهای ارزیابی نیکویی برازش برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در ایستگاه آبسنجی تل‌زنگ را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۴)، مقادیر ضریب نش-ساتکلیف، درصد خطای حجمی کل و میانگین قدر مطلق خطا بین هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۳/۳۲- درصد و ۸/۰۷ درصد است. علاوه بر این مقدار منفی PTVE بیانگر برآورد کم حجم رواناب با مدل HEC-HMS است. با توجه به ضریب نش-ساتکلیف برابر با ۰/۸۸ در مرحله صحت‌سنجی مدل HEC-HMS می‌توان دریافت که مدل به خوبی واسنجی شده است.

(۱۰) آمده است (Nash and Sutcliffe, 1970; Abrahart *et al.*, 2004). ضریب نش-ساتکلیف بیانگر راندمان مدل بوده که می‌تواند مقادیری از منفی بی‌نهایت تا یک را به خود اختصاص دهد که عدد یک نشان‌دهنده برازش کامل بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد.

$$NS = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - O_i}{O_i} \right| * 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

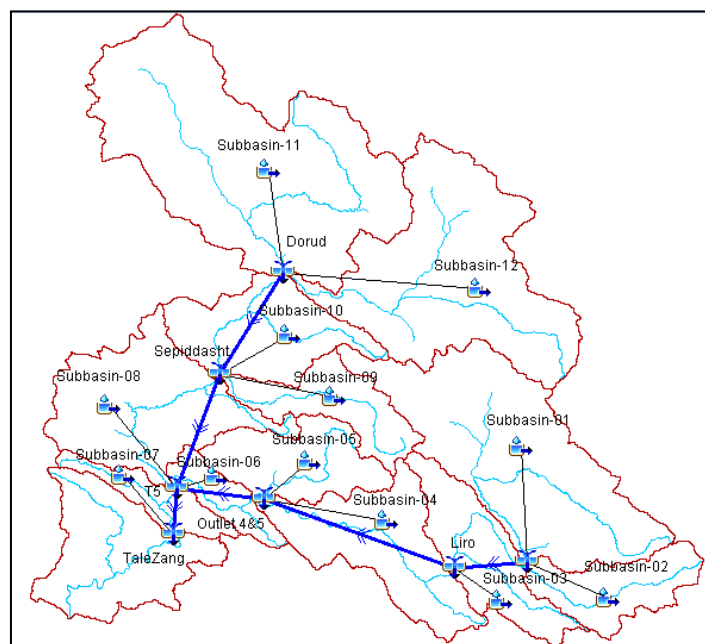
$$PTVE = \frac{\sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن  $S_i$  مقادیر دبی جریان شبیه‌سازی شده در گام زمانی  $t_i$ ،  $O_i$  مقادیر دبی جریان مشاهداتی در گام زمانی  $t_i$ ،  $\bar{O}$  میانگین دبی‌های مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌های جریان است.

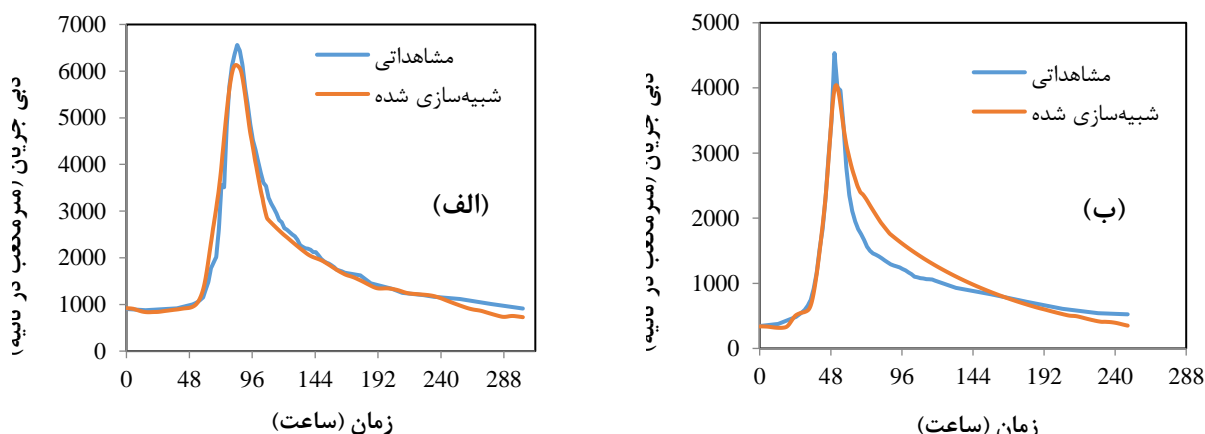
### واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS

در ابتدا قبل از به‌کارگیری مدل HEC-HMS برای برآورد هیدروگراف PMF، اقدام به واسنجی و صحت‌سنجی آن شد. با توجه به اینکه آمار دبی جریان اندازه‌گیری و ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری تنگ‌پنج بختیاری در محل سد بختیاری، مورد تأیید نبود، بنابراین واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS برای کل حوضه دز در محل ایستگاه آب‌سنجی تل‌زنگ انجام شد. شکل (۳) شماتیک زیرحوضه‌ها و رودخانه‌های بالادست ایستگاه تل‌زنگ ساخته شده در محیط مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS را نشان می‌دهد.

شکل (۴) مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و



شکل ۳- شماتیک زیرحوضه‌ها و رودخانه‌های بالادست ایستگاه تل‌زنگ ساخته شده در مدل HEC-HMS



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه تل‌زنگ برای الف) واقعه 26 Mar 1998 برای واسنجی مدل و ب) واقعه 1 Feb 1993 برای صحت‌سنجی مدل

جدول ۴- معیارهای ارزیابی نیکویی برازش برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS

مرحله	NS	PTVE (%)	RMSE (cms)	MAPE (%)
واسنجی	۰/۹۷	-۳/۳۲	۲۲۵/۷	۸/۰۷
صحت‌سنجی	۰/۸۸	۹/۳	۲۶۰/۸	۱۷/۰۷

#### عدم قطعیت پارامترها با روش مونت-کارلو

اساس کار روش شبیه‌سازی مونت کارلو، نمایش ترکیبات تصادفی با تولید آن‌ها با توجه به حالات ممکن از عدم قطعیت‌هایی است که در یک مطالعه رخ می‌دهد. بدین صورت که هر متغیر با استفاده از تابع توزیع احتمال آن، شبیه‌سازی و سپس متناظر با آن‌ها خروجی هر مدل یا معادله محاسبه می‌شود. این عمل بارها تکرار و سپس با استفاده از داده‌های تولیدشده به تجزیه و تحلیل میزان و نحوه تغییرات نتایج مدل پرداخته می‌شود. میزان عدم قطعیت پارامتر خروجی نیز از طریق محاسبه شاخص‌های آماری یا تعیین تابع توزیع آن بیان می‌شود (Eckhardt *et al.*, 2003). انتخاب تابع توزیع احتمال برای متغیر ورودی، یکی از مسائل موجود در روش مونت کارلو می‌باشد که به دلیل محدودیت اطلاعات و به دنبال آن در دسترس نبودن سری زمانی پارامترها، با توجه به وجود تنها یک عدد برای تمام پارامترها در تمام زیرحوضه و آبراهه‌ها، تابع توزیع یکنواخت به عنوان تابع توزیع احتمال پارامتر مذکور در نظر گرفته شد.

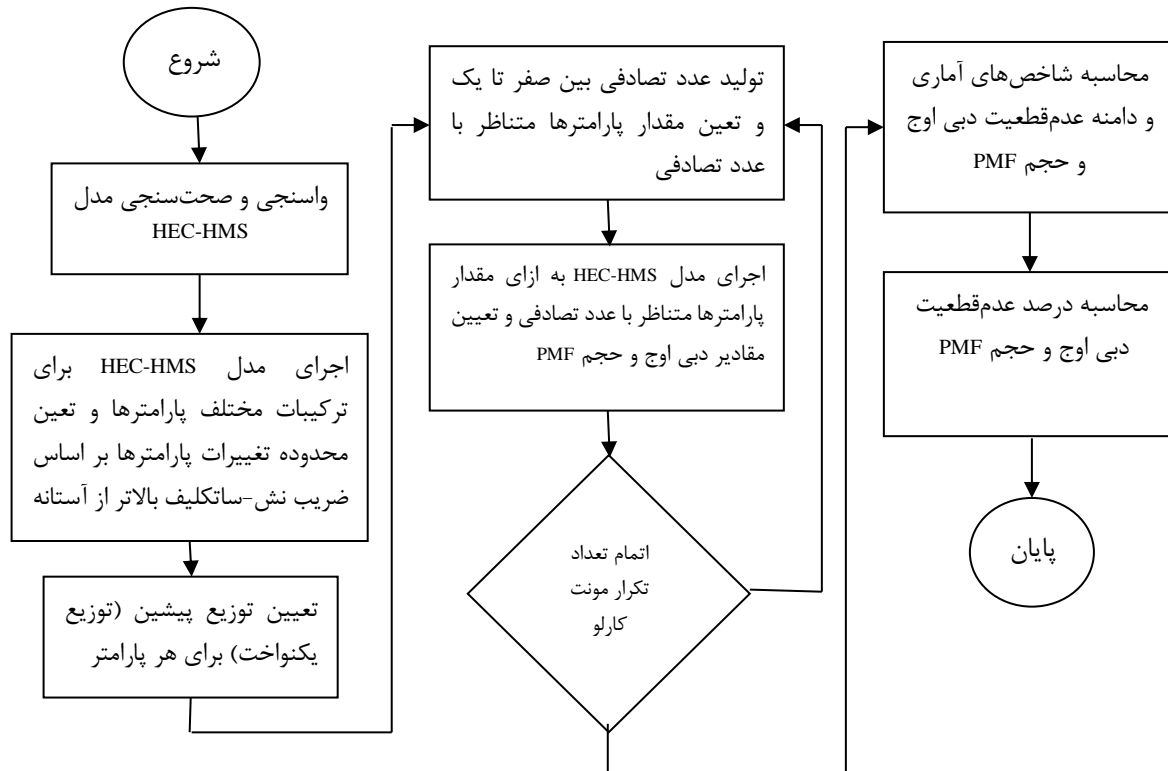
#### شکل (۵) فلوجارت تحلیل عدم قطعیت هیدروگراف PMF

به روش مونت کارلو با به‌کارگیری مدل HEC-HMS را نشان می‌دهد. جدول (۵) محدوده تغییرات پارامترهای مختلف شامل شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تمرکز و ضریب ذخیره کلارک برای زیرحوضه‌های مختلف در روش مونت کارلو را نشان می‌دهد. جدول (۶) محدوده تغییرات پارامترهای K و X ماسکینگام در آبراهه‌های مختلف را نشان می‌دهد. برای تعیین محدوده تغییرات پارامترها، ترکیبات مختلف پارامترها برای زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها در نظر گرفته و با اعمال پارامترها برای واقعه واسنجی در مدل HEC-HMS، مدل اجرا شده و ضریب نش-ساتکلیف محاسبه شد. به منظور تحلیل عدم قطعیت، ترکیبی از پارامترهای مختلف در نظر گرفته می‌شود که منجر به راندمان قابل قبول در مقایسه هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی‌شده و هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای برای وقایع واسنجی و صحت‌سنجی مدل شده باشد. آستانه قابل قبول ضریب نش-ساتکلیف برای ترکیب پارامترها، ۰/۷ در نظر گرفته شد (Bhavsar and Patel, 2018).

جدول ۵- محدوده تغییرات پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تمرکز و ضریب ذخیره کلارک زیرحوضه‌های مختلف

پارامتر	زیرحوضه یک	زیرحوضه دو	زیرحوضه سه	زیرحوضه چهار	زیرحوضه پنج	زیرحوضه شش
CN	۹۶-۶۰	۹۴-۶۰	۸۰-۵۰	۸۶-۴۸	۹۰-۴۹	۹۰-۴۶
Ia (mm)	۱۰-۳	۱۰-۳	۱۷-۴	۱۹-۴	۱۸-۴	۲۲-۴
Tc (hr)	۲۴-۷	۸-۲	۴-۱	۱۰-۳	۴-۱	۵-۱
R (hr)	۱۶-۵	۱۲-۳	۱۱-۳	۱۴-۴	۱۱-۳	۱۰-۳





شکل ۵- فلوجارت تحلیل عدم قطعیت هیدروگراف PMF به روش مونت کارلو با بکارگیری مدل HEC-HMS

$$\Delta V = \frac{100UR_V}{2V_{(PMF)}} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

که در آن  $Q_{p(UB)}$  دبی اوج هیدروگراف حد بالا،  $Q_{p(LB)}$  دبی اوج هیدروگراف حد پائین،  $UR_{Q_p}$  دامنه عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف،  $V_{(UB)}$  حجم هیدروگراف حد بالا،  $V_{(LB)}$  حجم هیدروگراف حد پائین،  $UR_V$  دامنه عدم قطعیت حجم هیدروگراف،  $\Delta Q_p$  درصد عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف،  $\Delta V$  درصد عدم قطعیت در حجم هیدروگراف،  $Q_{p(PMF)}$  دبی اوج هیدروگراف PMF نهایی و  $V_{(PMF)}$  حجم هیدروگراف PMF نهایی است.

### نتایج و بحث

#### تحلیل عدم قطعیت پارامترها در برآورد هیدروگراف PMF

برای تعیین عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت وجود پارامترهای مختلف، عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به هر یک از پارامترها شامل شماره منحنی (CN)، تلفات اولیه، زمان تمرکز و ضریب ذخیره کلارک هر یک از زیرحوضه‌ها و کل حوضه بختیاری و ضرایب  $K$  و  $X$  ماسکینگام هر یک از آبراهه‌ها و تمام آبراهه‌ها با روش مونت کارلو تحلیل شد. تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی برای هر پارامتر با توجه به دامنه تغییرات پیشنهادی برای هر یک، ۱۵۰۰ در نظر گرفته شد. مبنای انتخاب تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی آن است که در تحقیق دیگری تعداد

جدول ۶- محدوده تغییرات پارامترهای  $K$  و  $X$  ماسکینگام در آبراهه‌های مختلف

X	K (hr)	بازه آبراهه
۰/۲-۰/۴۵	۱/۷-۳/۵	Roudbar-Liro
۰/۲-۰/۴	۳/۷-۷/۶	Liro-Outlet 4&5
۰/۲-۰/۳۵	۱/۷-۳/۵	Outlet 4&5- Dam

با تعیین مقدار حد بالا و پائین دبی اوج و حجم PMF برای هر پارامتر، می‌توان دامنه عدم قطعیت دبی اوج و حجم PMF برای هر پارامتر را به ترتیب با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) به دست آورد. سپس با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) به ترتیب عدم قطعیت در دبی اوج و حجم PMF برای هر پارامتر به دست می‌آید. روابط (۱۱) و (۱۲)، به ترتیب دامنه تغییرات مقادیر دبی اوج و حجم هیدروگراف است. رابطه (۱۳)، درصد تغییرات (عدم قطعیت) در دبی اوج PMF است که از تقسیم دامنه تغییرات دبی اوج بر دبی اوج PMF نهایی به دست می‌آید. همچنین رابطه (۱۴)، درصد تغییرات در حجم PMF است که از تقسیم دامنه تغییرات حجم هیدروگراف بر حجم PMF نهایی بدست می‌آید (Moffat, 1982).

$$UR_{Q_p} = Q_{p(UB)} - Q_{p(LB)} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$UR_V = V_{(UB)} - V_{(LB)} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$\Delta Q_p = \frac{100UR_{Q_p}}{2Q_{p(PMF)}} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

و مقایسه شد. جدول (۷) مقایسه مزبور را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۷)، مقادیر شاخص‌های آماری برای تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ نسبتاً یکسان بوده و اختلاف قابل توجه‌ای مشاهده نشد.

تکرارهای شبیه‌سازی در روش مونت کارلو، مشابه با تعداد مزبور در نظر گرفته شده است (Bhavsar and Patel, 2018). همچنین برای بررسی تاثیر افزایش تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی بر نتایج، پارامتر CN در زیرحوضه شماره یک با تعداد ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰ اجرا

جدول ۷-مقایسه مقادیر شاخص‌های آماری برای تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ در تحلیل عدم قطعیت پارامتر شماره منحنی در زیرحوضه شماره ۱ با روش مونت کارلو

شاخص آماری	تعداد چرخه شبیه‌سازی برابر با ۱۵۰۰	تعداد چرخه شبیه‌سازی برابر با ۲۰۰۰
	دبی اوج (cms) حجم (MCM)	دبی اوج (cms) حجم (MCM)
حداقل	۱۱۴۴۰	۲۵۹۴/۹
حداکثر	۱۲۶۶۵	۲۸۴۴/۸
میانگین	۱۲۰۱۵/۲	۲۷۲۶/۴
انحراف استاندارد	۳۵۸/۶	۷۱/۷

عدم قطعیت پارامتر CN در تمام زیرحوضه‌ها برابر با ۵/۰۵ درصد است.

جدول (۹) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر CN در زیرحوضه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۹)، بیشترین و کمترین عدم قطعیت در حجم هیدروگراف PMF مربوط به عدم قطعیت پارامتر CN به ترتیب در زیرحوضه شماره یک برابر با ۴/۴۶ درصد و در زیرحوضه شماره دو برابر با ۱/۲ درصد است. همچنین عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر CN در تمام زیرحوضه‌ها برابر با ۴/۴۶ درصد است. بنابراین عدم قطعیت پارامتر CN در کل حوضه منجر به عدم قطعیت بیشتر در دبی اوج هیدروگراف PMF نسبت به حجم هیدروگراف PMF خواهد شد.

عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر CN برای تعیین عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر CN، عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر CN برای هر یک از زیرحوضه‌ها و کل حوضه بختیاری با روش مونت کارلو تحلیل شد. با توجه به جدول (۸) بیشترین و کمترین عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF مربوط به عدم قطعیت پارامتر CN به ترتیب در زیرحوضه شماره یک برابر با ۴/۹۴ درصد و در زیرحوضه شماره شش برابر با ۱/۰۵ درصد است. با توجه به اینکه زیرحوضه شماره یک بیشترین مساحت نسبت به زیرحوضه‌های دیگر را دارد، تغییرات CN در آن موجب تغییر بیشتر در هیدروگراف جریان خروجی آن و هیدروگراف جریان در محل سد بختیاری می‌شود. با توجه به جدول (۸) عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت

جدول ۸- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر CN در زیرحوضه‌های مختلف

زیرحوضه	مساحت (km <sup>2</sup> )	حداقل (cms)	حداکثر (cms)	میانگین (cms)	انحراف استاندارد (cms)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (cms)	عدم قطعیت (%)
یک	۲۴۹۰/۵	۱۱۴۴۰	۱۲۶۶۵	۱۲۰۰۴/۹	۳۶۱/۷	۳/۰۱	۱۲۲۵	۴/۹۴
دو	۶۷۱/۱	۱۲۰۶۱	۱۲۴۸۹	۱۲۲۷۵/۹	۱۲۷	۱/۰۳	۴۲۸	۱/۷۳
سه	۸۶۶/۲	۱۱۶۸۰	۱۲۳۲۵	۱۲۰۱۴/۵	۱۸۹/۳	۱/۵۸	۶۴۵	۲/۶
چهار	۱۲۱۵/۲	۱۱۴۱۴	۱۲۴۷۰	۱۱۹۹۴/۷	۳۱۱/۴	۲/۶	۱۰۵۶	۴/۲۶
پنج	۸۱۹/۱	۱۱۷۲۹	۱۲۴۵۷	۱۲۱۶۱/۴	۲۱۶	۱/۷۸	۷۲۸	۲/۹۴
شش	۳۲۶/۸	۱۲۱۶۳	۱۲۴۲۳	۱۲۳۲۵/۸	۷۶/۹	۰/۶۲	۲۶۰	۱/۰۵
کل حوضه	۶۳۸۸/۸	۱۱۴۱۴	۱۲۶۶۵	۱۲۰۶۹/۲	۲۷۰/۹	۲/۲۴	۱۲۵۱	۵/۰۵

جدول ۹- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر CN در زیرحوضه‌های مختلف

زیرحوضه	مساحت (km <sup>2</sup> )	حداقل (MCM)	حداکثر (MCM)	میانگین (MCM)	انحراف استاندارد (MCM)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (MCM)	عدم قطعیت (%)
یک	۲۴۹۰/۵	۲۵۹۵/۲	۲۸۴۴/۸	۲۷۲۶/۲	۷۲/۴	۲/۶۶	۲۴۹/۶	۴/۴۶
دو	۶۷۱/۱	۲۷۴۷/۶	۲۸۱۴/۹	۲۷۸۲/۳	۱۹/۶	۰/۷	۶۷/۳	۱/۲
سه	۸۶۶/۲	۲۶۸۰/۷	۲۷۸۸/۳	۲۷۳۶/۹	۳۱/۳	۱/۱۵	۱۰۷/۶	۱/۹۲
چهار	۱۲۱۵/۲	۲۶۳۹/۳	۲۸۱۶/۴	۲۷۳۱/۹	۵۱/۶	۱/۸۹	۱۷۷/۱	۳/۱۶
پنج	۸۱۹/۱	۲۶۵۵/۸	۲۸۲۱/۸	۲۷۴۶/۴	۴۸/۵	۱/۷۷	۱۶۶/۱	۲/۹۷
شش	۳۲۶/۸	۲۷۳۶/۲	۲۸۱۴/۴	۲۷۸۰/۲	۲۲/۸	۰/۸۲	۷۸/۲	۱/۴
کل حوضه	۶۳۸۸/۸	۲۵۹۵/۲	۲۸۴۴/۸	۲۷۳۹/۲	۵۱/۷	۱/۸۹	۲۴۹/۶	۴/۴۶

است. با توجه به جدول (۱۰)، عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه در تمام زیرحوضه‌ها برابر با ۰/۴ درصد است.

جدول (۱۱) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه در زیرحوضه‌های مختلف را نشان می‌دهد. بیشترین و کمترین عدم قطعیت در حجم هیدروگراف PMF مربوط به عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه به ترتیب مربوط به زیرحوضه‌های شماره چهار برابر با ۰/۳۳ درصد و زیرحوضه شماره دو برابر با ۰/۰۸ درصد است. با توجه به جدول (۱۱)، عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه در تمام زیرحوضه‌ها برابر با ۰/۳۳۲ درصد است.

### عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه

برای تعیین عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه، عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه برای هر یک از زیرحوضه‌ها و کل حوضه بختیاری با روش مونت کارلو تحلیل شد. جدول (۱۰) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه در زیرحوضه‌های مختلف را نشان می‌دهد. بیشترین و کمترین عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه به ترتیب مربوط به زیرحوضه‌های شماره یک برابر با ۰/۳۸ درصد و زیرحوضه شماره شش برابر با ۰/۰۲ درصد

جدول ۱۰- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه در زیرحوضه‌ها

زیرحوضه	مساحت (km <sup>2</sup> )	حداقل (cms)	حداکثر (cms)	میانگین (cms)	انحراف استاندارد (cms)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (cms)	عدم قطعیت (%)
یک	۲۴۹۰/۵	۱۲۲۹۹	۱۲۳۹۲	۱۲۳۴۷/۵	۲۷	۰/۲۲	۹۳	۰/۳۸
دو	۶۷۱/۱	۱۲۳۷۶	۱۲۳۹۷	۱۲۳۸۶/۵	۶/۱	۰/۰۵	۲۱	۰/۰۸
سه	۸۶۶/۲	۱۲۳۶۱	۱۲۳۹۴	۱۲۳۷۸/۶	۹/۵	۰/۰۸	۳۳	۰/۱۳
چهار	۱۲۱۵/۲	۱۲۳۵۳	۱۲۳۹۷	۱۲۳۷۶/۵	۱۲/۹	۰/۱	۴۴	۰/۱۸
پنج	۸۱۹/۱	۱۲۳۸۲	۱۲۳۹۵	۱۲۳۸۹	۳/۸	۰/۰۳	۱۳	۰/۰۵
شش	۳۲۶/۸	۱۲۳۹۱	۱۲۳۹۵	۱۲۳۹۳/۲	۱/۳	۰/۰۱	۴	۰/۰۲
کل حوضه	۶۳۸۸/۸	۱۲۲۹۹	۱۲۳۹۷	۱۲۳۶۹	۱۵/۴	۰/۱۲	۹۸	۰/۴

جدول ۱۱- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر تلفات اولیه در زیرحوضه‌ها

زیرحوضه	مساحت (km <sup>2</sup> )	حداقل (MCM)	حداکثر (MCM)	میانگین (MCM)	انحراف استاندارد (MCM)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (MCM)	عدم قطعیت (%)
یک	۲۴۹۰/۵	۲۷۸۳/۱	۲۷۹۹/۹	۲۷۹۱/۵	۴/۹	۰/۱۸	۱۶/۸	۰/۳
دو	۶۷۱/۱	۲۷۹۶/۳	۲۸۰۰/۸	۲۷۹۸/۶	۱/۳	۰/۰۵	۴/۶	۰/۰۸
سه	۸۶۶/۲	۲۷۸۸/۵	۲۸۰۰/۲	۲۷۹۴/۴	۳/۴	۰/۱۲	۱۱/۷	۰/۲۱
چهار	۱۲۱۵/۲	۲۷۸۳/۳	۲۸۰۱/۷	۲۷۹۲/۶	۵/۴	۰/۱۹	۱۸/۴	۰/۳۳
پنج	۸۱۹/۱	۲۷۸۸/۴	۲۸۰۱	۲۷۹۴/۷	۳/۷	۰/۱۳	۱۲/۶	۰/۲۳
شش	۳۲۶/۸	۲۷۹۴/۹	۲۸۰۱/۳	۲۷۹۸/۱	۱/۹	۰/۰۷	۶/۴	۰/۱۱
کل حوضه	۶۳۸۸/۸	۲۷۸۳/۱	۲۸۰۱/۷	۲۷۹۳/۶	۴/۱	۰/۱۵	۱۸/۶	۰/۳۳۲

هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز در زیرحوضه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱۲)، بیشترین و کمترین عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز به ترتیب مربوط به زیرحوضه‌های شماره یک برابر با ۳/۷۸ درصد و زیرحوضه شماره چهار برابر با ۰/۲۷ درصد است. با توجه به جدول (۱۲)، عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت

### عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز

برای تعیین عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز، عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز برای هر یک از زیرحوضه‌ها و کل حوضه بختیاری با روش مونت کارلو تحلیل شد. جدول (۱۲) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج

به عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز به ترتیب مربوط به زیرحوضه‌های شماره یک برابر با ۰/۳۲۵ درصد و زیرحوضه شماره سه برابر با ۰/۰۳۳ درصد است. با توجه به جدول (۱۳)، عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز در تمام زیرحوضه‌ها برابر با ۰/۳۲۸ درصد است.

پارامتر زمان تمرکز در تمام زیرحوضه‌ها برابر با ۳/۷۸ درصد است. جدول (۱۳) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز در زیرحوضه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱۳)، بیشترین و کمترین عدم قطعیت در حجم هیدروگراف PMF مربوط

جدول ۱۲- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج PMF به علت عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز در زیرحوضه‌های مختلف

زیرحوضه	مساحت (km <sup>2</sup> )	حداقل (cms)	حداکثر (cms)	میانگین (cms)	انحراف استاندارد (cms)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (cms)	عدم قطعیت (%)
یک	۲۴۹۰/۵	۱۱۶۴۷	۱۲۵۸۳	۱۲۰۸۳/۸	۲۷۰/۲	۲/۲۴	۹۳۶	۳/۷۸
دو	۶۷۱/۱	۱۲۲۷۶	۱۲۴۵۳	۱۲۳۶۸/۵	۵۱/۴	۰/۴۲	۱۷۷	۰/۷۱
سه	۸۶۶/۲	۱۲۳۴۶	۱۲۴۴۱	۱۲۳۹۶/۱	۲۷/۵	۰/۲۲	۹۵	۰/۳۸
چهار	۱۲۱۵/۲	۱۲۳۲۸	۱۲۳۹۵	۱۲۳۷۸/۱	۱۷/۹	۰/۱۴	۶۷	۰/۲۷
پنج	۸۱۹/۱	۱۲۳۰۵	۱۲۴۶۴	۱۲۳۸۱/۱	۴۵/۷	۰/۳۷	۱۵۹	۰/۶۴
شش	۳۲۶/۸	۱۲۲۷۹	۱۲۵۱۴	۱۲۴۰۳/۴	۶۹/۱	۰/۵۶	۲۳۵	۰/۹۵
کل حوضه	۶۳۸۸/۸	۱۱۶۴۷	۱۲۵۸۳	۱۲۲۶۶/۵	۱۲۷/۲	۱/۰۴	۹۳۶	۳/۷۸

جدول ۱۳- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم PMF به علت عدم قطعیت پارامتر زمان تمرکز در زیرحوضه‌های مختلف

زیرحوضه	مساحت (km <sup>2</sup> )	حداقل (MCM)	حداکثر (MCM)	میانگین (MCM)	انحراف استاندارد (MCM)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (MCM)	عدم قطعیت (%)
یک	۲۴۹۰/۵	۲۷۸۵/۲	۲۸۰۳/۴	۲۷۹۴/۲	۵/۳	۰/۱۹	۱۸/۲۲	۰/۳۲۵
دو	۶۷۱/۱	۲۷۹۸/۷	۲۸۰۱/۲	۲۸۰۰	۰/۸	۰/۰۳	۲/۵۷	۰/۰۴۶
سه	۸۶۶/۲	۲۷۹۹/۶	۲۸۰۱/۵	۲۸۰۰/۵	۰/۵	۰/۰۲	۱/۸۷	۰/۰۳۳
چهار	۱۲۱۵/۲	۲۷۹۸/۱	۲۸۰۱/۳	۲۷۹۹/۹	۰/۹	۰/۰۳	۳/۱۷	۰/۰۵۷
پنج	۸۱۹/۱	۲۷۹۸/۱	۲۸۰۳/۶	۲۸۰۰/۹	۱/۶	۰/۰۶	۵/۴۳	۰/۰۹۷
شش	۳۲۶/۸	۲۷۹۸/۶	۲۸۰۱/۷	۲۸۰۰/۲	۰/۹	۰/۰۳	۳/۰۹	۰/۰۵۵
کل حوضه	۶۳۸۸/۸	۲۷۸۵/۲	۲۸۰۳/۶	۲۷۹۷/۹	۲/۶	۰/۰۹	۱۸/۴	۰/۳۲۸

با توجه به جدول (۱۴)، عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک در تمام زیرحوضه‌ها برابر با ۳/۸۵ درصد است.

جدول (۱۵) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک در زیرحوضه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱۵)، بیشترین و کمترین عدم قطعیت در حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک به ترتیب مربوط به زیرحوضه شماره پنج برابر با ۱/۶ درصد و زیرحوضه شماره دو برابر با ۰/۴۱ درصد است. با توجه به جدول (۱۵)، عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک در تمام زیرحوضه‌ها برابر با ۱/۶ درصد است.

#### عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک

برای تعیین عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک، عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره برای هر یک از زیرحوضه‌ها و کل حوضه بختیاری با روش مونت کارلو تحلیل شد. جدول (۱۴) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک در زیرحوضه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱۴)، بیشترین و کمترین عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک به ترتیب مربوط به زیرحوضه‌های شماره یک برابر با ۳/۶۷ درصد و زیرحوضه شماره شش برابر با ۰/۷۱ درصد است.

جدول ۱۴- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک در زیرحوضه‌های مختلف

زیرحوضه	مساحت (km <sup>2</sup> )	حداقل (cms)	حداکثر (cms)	میانگین (cms)	انحراف استاندارد (cms)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (cms)	عدم قطعیت (%)
یک	۲۴۹۰/۵	۱۱۸۴۳	۱۲۷۵۴	۱۲۲۳۴	۲۶۳/۴	۲/۱۵	۹۱۱	۳/۶۷
دو	۶۷۱/۱	۱۲۱۴۷	۱۲۵۷۳	۱۲۳۳۳/۱	۱۲۴/۴	۱/۰۱	۴۲۶	۱/۷۲
سه	۸۶۶/۲	۱۱۹۷۷	۱۲۶۱۶	۱۲۲۸۰/۷	۱۸۹/۱	۱/۵۴	۶۳۹	۲/۵۸
چهار	۱۲۱۵/۲	۱۱۷۹۹	۱۲۷۱۵	۱۲۲۵۰	۲۷۳/۷	۲/۲۳	۹۱۶	۳/۷
پنج	۸۱۹/۱	۱۲۱۴۵	۱۲۳۹۸	۱۲۳۱۴/۹	۷۵/۹	۰/۶۲	۲۵۳	۱/۰۲
شش	۳۲۶/۸	۱۲۲۶۷	۱۲۴۴۲	۱۲۴۰۱/۷	۴۸/۹	۰/۳۹	۱۷۵	۰/۷۱
کل حوضه	۶۳۸۸/۸	۱۱۷۹۹	۱۲۷۵۴	۱۲۲۷۲/۷	۲۰۵/۷	۱/۶۸	۹۵۵	۳/۸۵

جدول ۱۵- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر ضریب ذخیره کلارک در زیرحوضه‌های مختلف

زیرحوضه	مساحت (km <sup>2</sup> )	حداقل (MCM)	حداکثر (MCM)	میانگین (MCM)	انحراف استاندارد (MCM)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (MCM)	عدم قطعیت (%)
یک	۲۴۹۰/۵	۲۷۸۴/۳	۲۸۱۸/۱	۲۷۹۷	۸/۹	۰/۳۲	۳۳/۷۸	۰/۶
دو	۶۷۱/۱	۲۷۸۵/۲	۲۸۰۸/۱	۲۷۹۶/۴	۶/۷	۰/۲۴	۲۲/۹	۰/۴۱
سه	۸۶۶/۲	۲۷۶۴/۷	۲۸۱۵/۱	۲۷۹۰/۷	۱۵	۰/۵۴	۵۰/۴۱	۰/۹
چهار	۱۲۱۵/۲	۲۷۵۴/۹	۲۸۲۷/۸	۲۷۹۰/۳	۲۰/۷	۰/۷۴	۷۲/۹۱	۱/۳
پنج	۸۱۹/۱	۲۷۴۱/۴	۲۸۳۰/۸	۲۷۸۳/۹	۲۶/۵	۰/۹۵	۸۹/۳۸	۱/۶
شش	۳۲۶/۸	۲۷۷۳/۶	۲۸۱۴/۶	۲۷۹۳/۲	۱۲	۰/۴۳	۴۰/۹۸	۰/۷۳
کل حوضه	۶۳۸۸/۸	۲۷۴۱/۴	۲۸۳۰/۸	۲۷۹۲/۹	۱۴/۲	۰/۵۱	۸۹/۴	۱/۶

برابر با ۱/۰۶ درصد است. با توجه به جدول (۱۶)، عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف سیل به علت عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام در تمام آبراهه‌ها برابر با ۴/۰۵ درصد است.

جدول (۱۷) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت K ماسکینگام آبراهه‌ها در زیرحوضه‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱۷)، بیشترین و کمترین عدم قطعیت در حجم هیدروگراف PMF مربوط به عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام به ترتیب مربوط به آبراهه Liro-Outlet4&5 برابر با ۰/۰۸ درصد و آبراهه Outlet4&5-Dam برابر با ۰/۰۲ درصد است. با توجه به جدول (۱۷)، عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام در تمام آبراهه‌ها برابر با ۰/۰۸ درصد است.

### عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام

برای تعیین عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام، عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام برای هر یک از آبراهه‌ها و تمام آبراهه‌های حوضه بختیاری با روش مونت کارلو تحلیل شد. جدول (۱۶) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام آبراهه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱۶)، بیشترین و کمترین عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام برابر با ۴/۰۵ درصد و آبراهه Liro-Outlet4&5-Dam

جدول ۱۶- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام آبراهه‌ها

آبراهه	حداقل (cms)	حداکثر (cms)	میانگین (cms)	انحراف استاندارد (cms)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (cms)	عدم قطعیت (%)
Roudbar-Liro	۱۲۲۲۵	۱۲۵۷۲	۱۲۳۹۶/۵	۱۰۰/۹	۰/۸۱	۳۴۷	۱/۴
Liro-Outlet 4&5	۱۱۸۸۶	۱۲۸۹۰	۱۲۳۹۴/۳	۲۹۲/۱	۲/۳۶	۱۰۰۴	۴/۰۵
Outlet 4&5-Dam	۱۲۲۵۹	۱۲۵۲۱	۱۲۳۹۳/۶	۷۵/۶	۰/۶۱	۲۶۲	۱/۰۶
کل آبراهه‌ها	۱۱۸۸۶	۱۲۸۹۰	۱۲۳۹۴/۷	۱۸۴/۲	۱/۴۹	۱۰۰۴	۴/۰۵

جدول ۱۷- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر K ماسکینگام آبراهه‌ها

آبراهه	حداقل (MCM)	حداکثر (MCM)	میانگین (MCM)	انحراف استاندارد (MCM)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (MCM)	عدم قطعیت (%)
Roudbar-Liro	۲۷۹۹/۴	۲۸۰۱/۴	۲۸۰۰/۴	۰/۶	۰/۰۲	۲/۰۳	۰/۰۴
Liro-Outlet 4&5	۲۷۹۸/۱	۲۸۰۲/۶	۲۸۰۰/۴	۱/۳	۰/۰۵	۴/۴۲	۰/۰۸
Outlet 4&5-Dam	۲۷۹۹/۷	۲۸۰۱	۲۸۰۰/۴	۰/۴	۰/۰۱	۱/۳۵	۰/۰۲
کل آبراهه‌ها	۲۷۹۸/۱	۲۸۰۲/۶	۲۸۰۰/۴	۰/۹	۰/۰۳	۴/۴	۰/۰۸

برابر با ۰/۰۴ درصد است. با توجه به جدول (۱۸)، عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام در تمام آبراهه‌ها برابر با ۰/۰۱ درصد است.

جدول (۱۹) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام آبراهه‌های مختلف را نشان می‌دهد. بیشترین و کمترین عدم قطعیت در حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام به ترتیب مربوط به آبراهه Liro-Outlet4&5 برابر با ۰/۰۰۰۱۵ درصد و آبراهه Roudbar-Liro برابر با ۰/۰۰۰۰۵ درصد است. با توجه به جدول (۱۹)، عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام در تمام آبراهه‌ها برابر با ۰/۰۰۰۲ درصد است.

### عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام

برای تعیین عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام، عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام برای هر یک از آبراهه‌ها و تمام آبراهه‌های حوضه بختیاری با روش مونت کارلو تحلیل شد. جدول (۱۸) شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام آبراهه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱۸)، بیشترین و کمترین عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام به ترتیب مربوط به آبراهه Roudbar-Liro برابر با ۰/۰۰۸ درصد و آبراهه Outlet4&5-Dam

جدول ۱۸- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام آبراهه‌ها

آبراهه	حداقل (cms)	حداکثر (cms)	میانگین (cms)	انحراف استاندارد (cms)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (cms)	عدم قطعیت (%)
Roudbar-Liro	۱۲۳۹۴	۱۲۳۹۶	۱۲۳۹۴/۷	۰/۶۷	۰/۰۰۵	۲	۰/۰۰۸
Liro-Outlet 4&5	۱۲۳۹۴	۱۲۳۹۵	۱۲۳۹۴/۶	۰/۴۸	۰/۰۰۴	۱	۰/۰۰۴
Outlet 4&5-Dam	۱۲۳۹۴	۱۲۳۹۵	۱۲۳۹۴/۶	۰/۴۹	۰/۰۰۴	۱	۰/۰۰۴
کل آبراهه‌ها	۱۲۳۹۴	۱۲۳۹۶	۱۲۳۹۴/۶	۰/۵	۰/۰۰۴	۲	۰/۰۱

جدول ۱۹- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامتر X ماسکینگام آبراهه‌ها

آبراهه	حداقل (MCM)	حداکثر (MCM)	میانگین (MCM)	انحراف استاندارد (MCM)	ضریب تغییرات (%)	دامنه عدم قطعیت (MCM)	عدم قطعیت (%)
Roudbar-Liro	۲۸۰۰/۳۷	۲۸۰۰/۳۸	۲۸۰۰/۳۷۵	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۲۵۶	۰/۰۰۰۰۵
Liro-Outlet 4&5	۲۸۰۰/۳۷	۲۸۰۰/۳۸	۲۸۰۰/۳۷۵	۰/۰۰۲۴۱	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۸۴۵	۰/۰۰۰۰۱۵
Outlet 4&5-Dam	۲۸۰۰/۳۷	۲۸۰۰/۳۸	۲۸۰۰/۳۷۵	۰/۰۰۱۴۰	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۴۸۶	۰/۰۰۰۰۰۹
کل آبراهه‌ها	۲۸۰۰/۳۷	۲۸۰۰/۳۸	۲۸۰۰/۳۷۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۰۰۲

اینکه دبی اوج یک مختصات از هیدروگراف سیل است، بنابراین تغییر در هر یک از پارامترها موجب تغییر بیشتری در دبی اوج نسبت به حجم هیدروگراف خواهد شد. به طوری که درصد عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تمرکز، ضریب ذخیره کلارک، K ماسکینگام و X ماسکینگام به ترتیب برابر با ۵/۰۵، ۰/۴، ۳/۷۸، ۳/۸۵، ۴/۰۵ و ۰/۰۱ درصد است. همچنین

### مقایسه عدم قطعیت هیدروگراف PMF نسبت به عدم قطعیت پارامترهای مختلف

شکل (۶) تغییرات درصد عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامترهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) می‌توان دریافت که برای تمام پارامترها درصد عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF بیشتر از درصد عدم قطعیت در حجم هیدروگراف PMF است. با توجه به

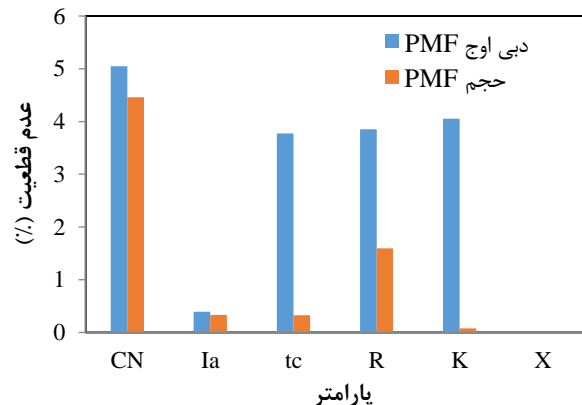
PMF نسبت به حجم هیدروگراف PMF می‌شوند. نتایج تحلیل عدم قطعیت هیدروگراف PMF در حوضه سد بختیاری نشان داد که عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت تمام پارامترها به ترتیب برابر با  $17/13$  و  $6/79$  درصد است. همچنین نتایج نشان داد که پارامترهای شماره منحنی، K ماسکینگام، ضریب ذخیره کلارک، زمان تمرکز، تلفات اولیه و X ماسکینگام به ترتیب بیشترین تاثیر در عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF دارند. با توجه به اینکه تغییر شماره منحنی در زیرحوضه‌ها، موجب تغییر در تلفات رواناب حاصل از بارش و ذوب برف در طول تداوم سیل خواهد شد، بنابراین عدم قطعیت در آن موجب عدم قطعیت بیشتری در مولفه‌های هیدروگراف سیل نسبت به عدم قطعیت پارامترهای دیگر می‌شود. دیگر نتایج نشان داد که زمان پیمایش سیلاب در آبراهه‌ها (K ماسکینگام) تاثیر بیشتری نسبت به زمان تمرکز زیرحوضه‌ها برای عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف PMF دارد. علت آن این است که مقدار K ماسکینگام در زمان رسیدن هیدروگراف سیلاب با المان‌های مختلف شامل زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها در محل تقاطع المان‌ها برای ترکیب هیدروگراف‌ها و تشکیل هیدروگراف جدید موثر می‌باشد. علاوه بر این نتایج نشان داد که پارامترهای شماره منحنی، ضریب ذخیره کلارک، تلفات اولیه، زمان تمرکز، K و X ماسکینگام به ترتیب بیشترین تاثیر را در عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF دارند. بنابراین برای کاهش عدم قطعیت در برآورد هیدروگراف PMF باید به ترتیب در برآورد پارامترهای شماره منحنی، K ماسکینگام، ضریب ذخیره کلارک و زمان تمرکز دقت بیشتری کرد. در نهایت پیشنهاد می‌شود که عدم قطعیت PMF به علت عدم قطعیت پارامترهای واسنجی مدل بارش-رواناب با الگوریتم DREAM روش مونت کارلو زنجیره مارکوف تحلیل و برآورد شود و با نتایج روش مونت کارلو مقایسه شود. همچنین تحلیل عدم قطعیت PMF به روش مونت کارلو با در نظر گرفتن همزمان تمامی پارامترها انجام شده و با نتایج تحلیل عدم قطعیت انفرادی هر یک از پارامترها مقایسه شود.

## REFERENCES

- Abrahart, R., Kneale, P. E. and See, L. M. (2004). Neural networks for hydrological modeling. CRC Press, 316p
- Australian Bureau of Meteorology (1996). Development of the generalized southeast Australia, Method for estimating probable maximum precipitation, Hydrology Report Series, HRS, R., No.4.
- Beauchamp, J., Leconte, R., Trudel, M., & Brissette, F. (2013). Estimation of the summer-fall PMP and PMF of a northern watershed under a changed climate. *Water Resources Research*, 49(6), 3852-3862.

درصد عدم قطعیت در حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تمرکز، ضریب ذخیره کلارک، K ماسکینگام و X ماسکینگام به ترتیب برابر با  $4/46$ ،  $0/332$ ،  $0/328$ ،  $1/6$ ،  $0/08$  و  $0/002$  درصد است. با توجه به اینکه تغییر شماره منحنی موجب تغییر تلفات رواناب حاصل از بارش و ذوب برف در طول تداوم سیل خواهد شد، بنابراین عدم قطعیت در آن نسبت به پارامترهای دیگر موجب عدم قطعیت بیشتری در دبی اوج و حجم هیدروگراف سیل می‌شود.

Liu *et al.*, (2017) نیز در بررسی عدم قطعیت پارامترها دریافتند که شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط سهم قابل توجه بر ایجاد دبی اوج حوضه دارد. نتایج تحقیقات Kumar *et al.* (2002) و Mostafazadeh *et al.* (2018) در رابطه با حساسیت هیدروگراف جریان به تغییر در پارامترهای روش زمان مساحت کلارک نشان داد که تغییرات ضریب ذخیره نسبت به زمان تمرکز، بیشترین تاثیر را بر دبی اوج هیدروگراف داشته است که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد.



شکل ۶- تغییرات درصد عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت پارامترهای مختلف

## نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عدم قطعیت پارامترهای واسنجی مدل بارش-رواناب موجب عدم قطعیت بیشتر در دبی اوج هیدروگراف

- Bhavsar, P.N. and Patel, J.N., 2018. Event-based rainfall-run-off modeling and uncertainty analysis for lower Tapi Basin, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, pp.1-10.
- Dotto, C. B., Kleidorfer, M., Detlic, A., Rauch, W., McCarthy, D. T., & Fletcher, T. D. (2011). Performance and sensitivity analysis of stormwater models using a Bayesian approach and long-term high resolution data. *Environmental Modelling & Software*, 26(10), 1225-1239.
- Eckhardt, K., Breuer, L., & Frede, H. G. (2003). Parameter uncertainty and the significance of

- simulated land use change effects. *Journal of Hydrology*, 273(1-4), 164-176.
- FathAbadi, A., Ruohani, H., Seyedian, S. M. (2018). The efficiency of nonparametric methods based on residual analyzes and parametric method to estimate hydrological model uncertainty. *Iran Water and Soil Research Journal*, 49(2), 281-292. (In Farsi)
- Gangrade, S., Kao, S. C., Naz, B. S., Rastogi, D., Ashfaq, M., Singh, N., & Preston, B. L. (2018). Sensitivity of probable maximum flood in a changing environment. *Water Resources Research*, 54(6), 3913-3936.
- Gao, G. Y., Fu, B. J., Lü, Y. H., Liu, Y., Wang, S., & Zhou, J. (2012). Coupling the modified SCS-CN and RUSLE models to simulate hydrological effects of restoring vegetation in the Loess Plateau of China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 2347-2364.
- Hydrologic Engineering Center. (2018). Hydrologic modeling system HEC-HMS: User manual and Applications Guide: Version 4.3, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- Iran Power and Water Resources Development Company (2006a). Review Report of Probable Maximum Precipitation (PMP) Studies, Bakhtiari Dam and Power Plant Design, Iranian Water and Power Resources Development Company, 175 p. (In Farsi)
- Iran Power and Water Resources Development Company (2006b). Review Report of Probable Maximum Flood (PMF) Studies, Bakhtiari Dam and Power Plant Design, Iranian Water and Power Resources Development Company, 110 p. (In Farsi)
- Kabir, A., Bahreman, A. R. (2013). Study uncertainty of parameters of rainfall-runoff model (WetSpa) by Monte Carlo method. *J. of Water and Soil Conservation*, Vol. 20(5), pp: 97-81. (In Farsi)
- Kahe, M.S., Javadi, S. and Roozbahani A. (2017). Uncertainty Assessment of Hydraulic Conductivity Parameter in MODFLOW Model Using Monte Carlo and RPEM Methods (Case Study: Ali Abad Plain of Qom). *Iran Water Resources Research*, 14(2):23-35 (In Farsi)
- Karami cheme, E. and Mazaheri, M. (2018). Determine of the importance of longitude dispersion coefficient on solute transport in rivers using the Monte Carlo simulation. *Iran Water and Soil Research Journal*, 50(4), 763-776. (In Farsi)
- Karimi, Sh., Jabbarian Amiri, B. and Malekian, A. (2018). Modeling the Impact of Watershed Physical Attributes on Surface Water Quality and Uncertainty Assessment of the Models Using the Monte Carlo Simulation. *Iran Water Resources Research*, 14(3):304-317 (In Farsi)
- Klein, I. M., Rousseau, A. N., Frigon, A., Freudiger, D., & Gagnon, P. (2016). Evaluation of probable maximum snow accumulation: Development of a methodology for climate change studies. *Journal of hydrology*, 537, 74-85.
- Kumar, R., Chatterjee, C., Lohani, A.K., Kumar, S., and Singh, R.D. (2002). Sensitivity analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. *Water Resources Management*, 16, 263-278.
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Easterling, D. R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1402-1408.
- Liu, Y. R., Li, Y. P., Huang, G. H., Zhang, J. L., & Fan, Y. R. (2017). A Bayesian-based multilevel factorial analysis method for analyzing parameter uncertainty of hydrological model. *Journal of hydrology*, 553, 750-762.
- Maskey, S., Guinot, V., & Price, R. K. (2004). Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modelling: a fuzzy set approach. *Advances in water resources*, 27(9), 889-898.
- Maskey, S., Price, R. K. (2003). Uncertainty Issues in flood forecasting. *Flood Events: Are We Prepared? Proceeding of the OSIRIS Workshop*, March 2003, Berlin. 123-136.
- Micovic, Z., Schaefer, M. G., & Taylor, G. H. (2015). Uncertainty analysis for probable maximum precipitation estimates. *Journal of Hydrology*, 521, 360-373.
- Moffat, R.J. (1982). Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis. *Journal of Fluids Engineering*, 104, 250-258.
- Mostafazadeh R, Mirzaei S, Esmali Ouri A and Zabihi M (2018) Sensitivity analysis of the flow hydrograph components due to changes in Clark's time-area model in Mohammad-Abad watershed, Gloestan Province. *J. of Water and Soil Conservation*, Vol. 49(1), pp: 91-99. (In Farsi)
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models; part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290
- Rastogi, D., Kao, S. C., Ashfaq, M., Mei, R., Kabela, E. D., Gangrade, S. ... & Anantharaj, V. G. (2017). Effects of climate change on probable maximum precipitation: A sensitivity study over the Alabama-Coosa-Tallapoosa River Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(9), 4808-4828.
- Rousseau, A. N., Klein, I. M., Freudiger, D., Gagnon, P., Frigon, A., & Ratté-Fortin, C. (2014). Development of a methodology to evaluate probable maximum precipitation (PMP) under changing climate conditions: Application to southern Quebec, Canada. *Journal of Hydrology*, 519, 3094-3109.
- Stratz, S. A., & Hossain, F. (2014). Probable maximum precipitation in a changing climate: Implications for dam design. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(12), 06014006.
- Vrugt, J. A., Ter Braak, C. J., Clark, M. P., Hyman, J. M., & Robinson, B. A. (2008). Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resources Research*, 44(12).



- Wang, H., Wang, C., Wang, Y., Gao, X., & Yu, C. (2017). Bayesian forecasting and uncertainty quantifying of stream flows using Metropolis–Hastings Markov Chain Monte Carlo algorithm. *Journal of hydrology*, 549, 476-483.
- Zimmermann, H.-J. 1997a. a Fresh Perspective on Uncertainty Modelling: Uncertainty vs. Modelling. In *Uncertainty Analysis in Engineering and Sciences: Fuzzy Logic, Statistics, and Neural Network Approach*, Kluwer Academic Publisher, pp. 353-364.
- Zimmermann, H.-J. 1997b. Uncertainty Modelling and Fuzzy Sets. In *Uncertainty: Models and Measures. Mathematical Research*, 99, Akademie Verlag, pp. 84-100.
- Zischg, A. P., Felder, G., Weingartner, R., Quinn, N., Coxon, G., Neal, J. ... & Bates, P. (2018). Effects of variability in probable maximum precipitation patterns on flood losses. *Hydrology and earth system sciences*, 22(5), 2759-2773.