



## Uncertainty Analysis of Probable Maximum Flood in Bakhtiari Dam Basin Due to Uncertainty in Probable Maximum Precipitation, Air Temperature and Initial Snow Water Equivalent

H. Fathian<sup>1\*</sup>, A.M. AkhondAli<sup>2</sup>, and M.R. Sharifi<sup>3</sup>

### Abstract

The reliability and validity of extreme floods, especially the Probability Maximum Flood (PMF), cannot be ensured without considering the uncertainties in flood estimation. Input variables in rainfall-runoff models include precipitation, air temperature, and initial Snow Water Equivalent (SWE) are sources of uncertainty in flood forecasting and estimation. In this paper, the fuzzy set theory method is used to propagate uncertainty of PMP, air temperature and initial SWE for estimating PMF in Bakhtiari Dam Basin in southwestern Iran. The results show that the uncertainty of PMF hydrograph peak discharge due to uncertainty of PMP is more than the uncertainty of PMF hydrograph volume. The uncertainty of the PMF hydrograph volume due to the uncertainty of air temperature and initial SWE is more than the uncertainty of the PMF hydrograph peak discharge. So that the uncertainty of PMF hydrograph peak discharge due to uncertainty in PMP, air temperature and initial SWE equal to 10% were  $\pm 10.2\%$ ,  $\pm 7.6\%$  and  $\pm 0.18\%$  respectively. Also the uncertainty of PMF hydrograph volume due to uncertainty in PMP, air temperature and initial SWE equal to 10% were  $\pm 8.0\%$ ,  $\pm 9.8\%$  and  $\pm 0.35\%$  respectively. Therefore, in order to reduce the uncertainty in estimating PMF, it is necessary to be more careful in estimating PMP, air temperature and initial SWE values respectively.

**Keywords:** Input Uncertainty, PMP, PMF, Air Temperature, Initial SWE.

Received: October 10, 2019

Accepted: December 17, 2019

## تحلیل عدم قطعیت حداکثر سیلاب محتمل حوضه سد بختیاری به علت عدم قطعیت در مقدار حداکثر بارش محتمل، دمای هوا و آب معادل برف اولیه

حسین فتحیان<sup>۱\*</sup>، علی محمد آخوندعلی<sup>۲</sup> و محمدرضا شریفی<sup>۳</sup>

### چکیده

اطمینان و اعتبار سیل‌های حدی مخصوصاً حداکثر سیلاب محتمل (PMF)، بدون در نظر گرفتن منابع عدم قطعیت در برآورد سیل نمی‌تواند تأمین شود. متغیرهای ورودی در مدل‌های بارش-رواناب شامل بارش، دمای هوا و آب معادل برف (SWE) از جمله منابع عدم قطعیت در پیش‌بینی و برآورد سیل هستند. در این مقاله از روش تئوری مجموعه فازی برای پخش عدم قطعیت مقادیر حداکثر بارش محتمل (PMP)، دمای هوا و آب معادل برف اولیه در برآورد PMF در حوضه سد بختیاری در جنوب غربی ایران استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت مقدار PMP بیشتر از عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF است. عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت مقدار دمای هوا و آب معادل برف اولیه بیشتر از عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF است. بطوریکه عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه به اندازه  $\pm 10.2\%$ ،  $\pm 7.6\%$  و  $\pm 0.18\%$  به ترتیب برابر با  $\pm 10/2$ ،  $\pm 7/6$  و  $\pm 0/18$  درصد است. همچنین عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در مقدار PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه به اندازه  $\pm 10$  درصد به ترتیب برابر با  $\pm 9/8$ ،  $\pm 8$  و  $\pm 0/35$  درصد است. بنابراین به منظور کاهش عدم قطعیت در برآورد PMF، باید به ترتیب در برآورد مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه دقت بیشتری کرد.

**کلمات کلیدی:** عدم قطعیت ورودی‌ها، PMP، PMF، دمای هوا، آب معادل برف اولیه.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۹/۲۶

1- Ph.D. Candidate of Water Resources Engineering, Department of Hydrology and Water Resources, Collage of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: [Fathian.h58@gmail.com](mailto:Fathian.h58@gmail.com)

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

3- Assistant Professor of Hydrology and Water Resources Engineering Department, Collage of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

سیل‌ها همواره به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین و پرشمارترین بلایای طبیعی در سرتاسر جهان محسوب می‌شوند. از آنجایی که سیل ذاتاً یک پدیده غیرقطعی می‌باشد، اطمینان و اعتبار سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیل بدون در نظر گرفتن کامل منابع عدم قطعیت در سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیل نمی‌تواند تأمین شود. منابع عدم قطعیت عواملی هستند که منجر به افزایش عدم قطعیت در پیش‌بینی یک سیستم مدل‌سازی شده می‌شوند. در زمینه پیش‌بینی سیل منابع عدم قطعیت مربوط به عدم قطعیت مدل، ورودی‌ها و پارامترها می‌باشند. عدم قطعیت مدل به دلیل فرضیات در نظر گرفته شده 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 به دلیل تعیین نادرست پارامترهای مدل است (Maskey et al., 2003).

حداکثر سیلاب محتمل<sup>۱</sup> (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 نظری، PMF حد بالای سیل در یک حوضه آبخیز معین و در یک فصل خاص را نشان می‌دهد. در واقعیت برآوردهای PMF معمولاً کمتر از حد بالای نظری با مقداری تغییر هستند که به داده‌های موجود، روش انتخاب شده و رویکرد تحلیلگر برای تخمین PMF وابسته می‌باشد (Micovic et al., 2015). مطالعات اخیر پیشنهاد کرده‌اند که حداکثر بارش محتمل<sup>۲</sup> (PMP) و PMF به تغییر شرایط آب و هوایی حساس هستند (Kunkel et al., 2013; Beauchamp et al., 2013; Rousseau et al., 2014; Stratz and Hossain, 2014; Klein et al., 2016; Rastogi et al., 2017; Gangrade et al., 2018) و برخورد قطعی با PMP و PMF را به چالش کشیدند.

(Maskey et al., 2004) به منظور پخش عدم قطعیت بارش در مدل بارش-رواناب، روش گسسته‌سازی زمانی<sup>۳</sup> در چهارچوب تئوری مجموعه فازی را ارائه نمودند. نتایج نشان داد که عدم قطعیت مقادیر دبی به علت عدم قطعیت در توزیع زمانی و مکانی غیرقطعی بارش می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از عدم قطعیت در مقدار غیرقطعی بارش باشد. (Gabellani et al., 2007) بطور عددی حساسیت برآوردهای دبی پیک به عدم قطعیت‌های در توزیع زمانی و مکانی بارش در حوضه‌های Orba و Tanaro در شمال غربی ایتالیا را

تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که برای عدم قطعیت ۵٪ برآوردهای دبی پیک، بایستی بارش را در مقیاس مکانی  $0.7D$  و مقیاس زمانی  $0.7T_c$  در نظر گرفت بطوری که  $D$  و  $T_c$  به ترتیب مساحت حوضه و زمان تمرکز است. (Vrugt et al., 2008) یک نمونه‌گیر مونت کارلو زنجیره مارکوف<sup>۴</sup> (MCMC) تحت عنوان متروپولیس تطبیقی تکاملی تفاضلی<sup>۵</sup> (DREAM) را ارائه دادند که بطور خاص برای برآورد تابع چگالی احتمال پسین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی در مسایل نمونه‌برداری پیچیده و با ابعاد زیاد به‌صورت مؤثر طراحی شده است. آنها نشان دادند که خطای بارش در طی کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی نه تنها بطور صریح موجب دامنه عدم قطعیت در پیش‌بینی جریان گردید بلکه بطور قابل توجهی توزیع پسین پارامترهای مدل حوضه را تغییر می‌دهند. (Fathian et al., 2011) به منظور پخش عدم قطعیت بارش در پیش‌بینی سیل، روش گسسته‌سازی زمانی در چهارچوب اصل بسط تئوری فازی در ترکیب با الگوریتم ژنتیک نرمال بکار بردند. نتایج نشان داد که عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف سیل به علت عدم قطعیت در توزیع زمانی و مکانی بارش به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از عدم قطعیت به علت مقدار بارش می‌باشد. به طوری که به ازای تعداد زیردوره‌های پیش‌بینی برابر با ۶ و درجه عضویت مقادیر بارش برابر با صفر، عدم قطعیت در دبی اوج به علت توزیع زمانی و مکانی بارش و مقدار بارش به ترتیب برابر با ۱۷٪ و ۱۶٪ می‌باشد.

(Strauch et al., 2012) تأثیر عدم قطعیت بارش در هر دو عدم قطعیت پارامتر مدل و پیش‌بینی در یک منطقه با داده‌های پراکنده بررسی کردند. به این منظور آنها مدل SWAT را برای جریان اندازه‌گیری شده در رودخانه پی‌ریپا در مرکز برزیل کالیبره کردند. برای هر مدل ورودی بارش، بهترین مجموعه پارامتر و دامنه عدم قطعیت مرتبط با آنها با استفاده از روش برازش عدم قطعیت متوالی<sup>۶</sup> (SUFI-2) تعیین کردند. نتایج نشان داد که عدم قطعیت پارامتر بسته به روشی که برای تولید مجموعه داده‌های بارش مورد استفاده قرار می‌گیرد، بطور قابل توجهی متفاوت است. این مطالعه نشان داد که مدل‌سازی گروهی با ورودی‌های بارش چندگانه می‌تواند به میزان قابل توجهی سطح اطمینان را در نتایج شبیه‌سازی بویژه در مناطق با داده‌های کم، افزایش دهد. (Jothityangkoon et al., 2013) حساسیت PMF را نسبت به متغیرهای ورودی آن بررسی کردند و گزارش دادند که ۱۰٪ افزایش در PMP باعث افزایش ۱۵٪ PMF می‌شود، در حالی که افزایش ۱۰٪ در جنگل‌زدایی منجر به افزایش ۳٪ PMF می‌شود.

رخداد سیلاب واریزه‌ای با استفاده از مدل بیزین در ناحیه البرز ایران ارزیابی کردند. آنها شش سناریو شامل مقدار بارش پیشین سه روز قبل به صورت مجزا، بارش پیشین دو روز قبل به صورت مجزا، بارش پیشین یک روز قبل، مقدار تجمعی بارش پیشین سه روز قبل، مقدار تجمعی بارش پیشین دو روز قبل و حذف اثر بارش پیشین در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که دقت مدل در حالت بارش پیشین مجزا، ۱۳ درصد نسبت به حالت بارش پیشین تجمعی بیشتر است و بالاترین دقت مدل به ازای سناریو بارش پیشین سه روز قبل به صورت مجزا، معادل ۹۱ درصد برآورد شد. همچنین، حذف اثر هر یک از بارش پیشین از ورودی مدل باعث افت عملکرد آن می‌شود. (Zischg et al. (2018) از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داد 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 (Gangrade et al., 2018) ممکن است موجب عدم قطعیت بیشتری در برآورد PMF و در نتیجه مناطق سیلاب‌گرفتنی سطحی حاصل از آن شوند.

هدف از این تحقیق برآورد درصد و دامنه عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF سد بختیاری به علت عدم قطعیت در متغیرهای ورودی شامل مقدار PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه است.

## ۲- روش تحقیق

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 ۶ زیرحوضه تقسیم شده است. شکل ۱ نقشه زیرحوضه‌بندی حوضه دز و حوضه بختیاری بر مبنای نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰، شماره مربوط به هر زیرحوضه، شبکه آبراهه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری را نشان می‌دهد. در شکل ۱ زیرحوضه‌های ۱ تا ۶ 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 بدست آمده را نشان می‌دهد. شکل ۲ تغییرات دمای هوا در زمان وقوع PMP در پایین‌ترین نقطه زیرحوضه‌های مختلف حوضه سد بختیاری را نشان می‌دهد. تغییرات

Micovic et al. (2015) عدم قطعیت مرتبط با برآورد PMP مشتق شده از تحلیل هواشناسی در حوضه سد LaJoie در کلمبیا بریتانیایی تحلیل کردند. نتایج نشان داد که برآورد PMP تک‌مقداره که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند بیشتر از ۴۰٪ زمانی باشد که تغییرات ممکن در متغیرهای مختلف هواشناسی جهت برآورد PMP در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان دادند که برآوردهای PMP باید همیشه بصورت یک دامنه مقادیر که بیانگر عدم قطعیت‌های قابل توجه در مقدار PMP است، ارائه شود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که عمق برف ۱۰۰ ساله بدست آمده به روش آماری و شبیه‌سازی ذوب برف همراه با عدم قطعیت بوده که ممکن است عدم قطعیت آن افزایش یابد هنگامی که اثرات ذوب برف به علت باران در نظر گرفته شود. (Coxon et al. (2015) روش رگرسیون وزنی موضعی<sup>۷</sup> (LOWESS) غیرپارامتری با چهارچوب جدید برای برآورد عدم قطعیت دبی در ایستگاه‌های هیدرومتری با خطاهای مختلف در روابط دبی-اشل بکار بردند. آنها این روش را در ۵۰۰ ایستگاه هیدرومتری در انگلند و ولز بکار بردند و مقدار عدم قطعیت دبی مقادیر کم، متوسط و زیاد بر روی منحنی سنج جریان بدست آوردند. نتایج نشان داد که دامنه وسیع در عدم قطعیت دبی (۳۹۷٪-۱۰) وجود دارد، اما در اکثر ایستگاه‌های هیدرومتری (بیش از ۸۰ درصد) دامنه عدم قطعیت دبی متوسط و زیاد آنها، کمتر از ۴۰٪ است. (Khorami and Ghahraman (2017) بر اساس نظریه‌ی مجموعه‌های فازی، رویکردی جایگزین برای بیان نادقیقی پارامترهای مدل و پیش‌بینی عدم قطعیت در شبیه‌سازی مدل ریچاردز برای حرکت آب در خاک به کار گرفتند. برای به دست آوردن عدم قطعیت در شبیه‌سازی این مدل، متغیرهای ورودی  $\alpha$ ،  $\theta_s$ ،  $\theta_r$ ،  $K_s$  و  $n$  به عنوان توابع فازی معرفی شدند. نتایج نشان داد که عدم قطعیت در شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در فاز اشباع کمترین و در فاز پیشروی بیش‌ترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد که علت این امر بیش‌ترین اثر عدم قطعیت ذاتی پارامترهای ورودی و نتیجه این عدم قطعیت در پروفیل رطوبتی در فاز پیشروی است.

Wang et al. (2017) روش بیزین با بکارگیری الگوریتم مونت کارلو زنجیره مارکوف متروپولیس-هستینگس معرفی کردند و از این روش برای کمی‌سازی عدم قطعیت در رودخانه ژوجیاچن در چین استفاده کردند و با روش مرسوم برآورد حداکثر درستی برای برآورد پارامترها و کمی‌سازی عدم قطعیت مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که روش بیزین مشابه روش حداکثر درستی در برآورد مقدار میانگین جریان روزانه بوده و در کمی‌سازی عدم قطعیت دقیق‌تر از روش حداکثر درستی است. (Tanhapour et al. (2018) اثر بارش پیشین بر

زیرحوضه ۱ و ۲ در ایستگاه هیدرومتری رودبار مشترک می‌باشند، بنابراین نمودار تغییرات دمای هوا در پایین‌ترین نقطه این دو حوضه کاملاً یکسان است. جدول ۳ مقادیر آب معادل برف<sup>۸</sup> (SWE) اولیه در باندهای ارتفاعی زیرحوضه‌ها را نشان می‌دهد (Iran Power and Water Resources Development Company, 2006). شکل ۳ هیدروگراف PMF نهایی در محل سد بختیاری با زمان پایه ۱۰ روزه را نشان می‌دهد (Iran Power and Water Resources Development Company, 2006). دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF نهایی به ترتیب برابر با ۱۲۴۰۰ مترمکعب در ثانیه و ۲۸۰۰ میلیون مترمکعب است.

دما در شکل ۲ از جمله عوامل تأثیرگذار بر حجم سیلاب PMF است. تغییرات دما در پنج مرحله زمانی متوالی برآورد می‌شود. مرحله اول مربوط به زمان شروع توفان است. در این مرحله باید دما تا حد منطقی حداکثر باشد. در مرحله سوم و حین وقوع PMP فرض بر این است که هوا در حالت اشباع قرار دارد و دمای نقطه شبنم حاکم است. طبق توصیه‌های WMO، حداکثر دمای نقطه شبنم باید در حین وقوع PMP لحاظ گردد. مرحله دوم نیز مربوط به گذار دما از شرایط شروع توفان تا مرحله اشباع هوا است. در این مرحله مقدار دما میانگینی از دمای شروع توفان (مرحله اول) و دما در حین توفان (مرحله سوم) است. تغییرات زمانی دما در مرحله چهارم و پنجم مشابه مراحل دوم و اول در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل ۲، به علت اینکه خروجی دو

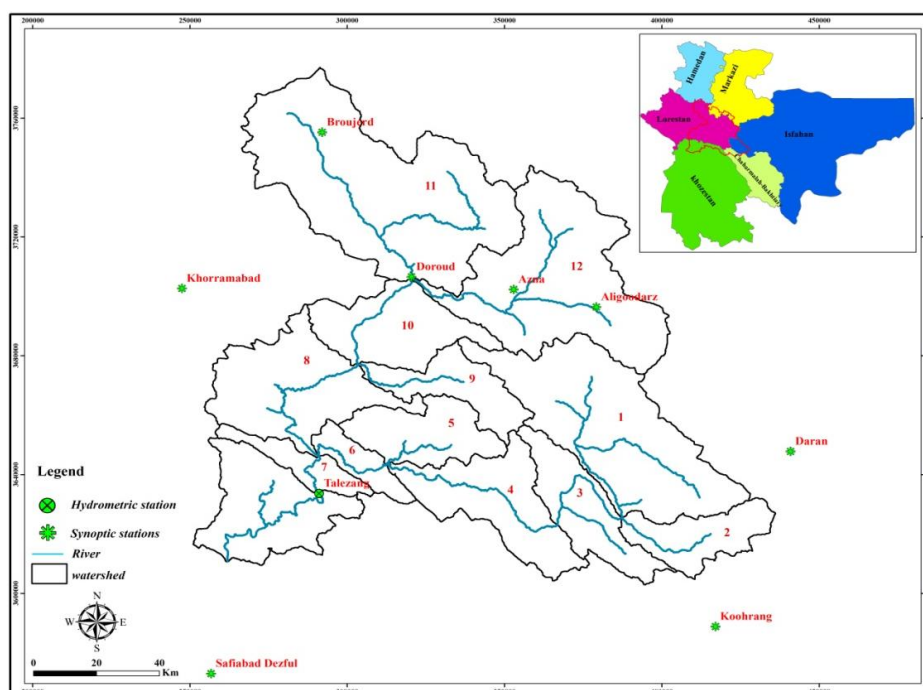


Fig. 1- Boundary of Bakhtiari and Dez sub-basins, streams network and location of synoptic and hydrometric stations

شکل ۱- مرز زیرحوضه‌های بختیاری و دز، شبکه آبراهه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری

Table 1- Summary of physiographic and altitude characteristics of Bakhtiari Dam sub-basins

جدول ۱- خلاصه مشخصات فیزیوگرافی و ارتفاعی زیرحوضه‌های سد بختیاری

| Sub-basin | Area (km <sup>2</sup> ) | Perimeter (Km) | Minimum elevation (m) | Maximum elevation (m) | Average elevation (m) | Mean slope of (%) basin | Main stream (Km) length | Net slope of main stream (%) |
|-----------|-------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 1         | 2490.1                  | 393.4          | 1514                  | 4020                  | 2552                  | 26.6                    | 112.6                   | 0.98                         |
| 2         | 671.1                   | 191.8          | 1513                  | 3900                  | 2672                  | 35.2                    | 63.3                    | 1.9                          |
| 3         | 866.1                   | 240.4          | 1124                  | 3710                  | 2234                  | 43.8                    | 55.7                    | 2.33                         |
| 4         | 215.2                   | 284.8          | 689                   | 3715                  | 1857                  | 42.7                    | 93.7                    | 1                            |
| 5         | 819.1                   | 208.2          | 694                   | 3134                  | 1679                  | 37.1                    | 55.9                    | 1.93                         |
| 6         | 326.8                   | 132.2          | 539                   | 2499                  | 1279                  | 45.3                    | 50.3                    | 1.01                         |

Table 2- PMP values at the Bakhtiari Dam sub-basins

جدول ۲- مقادیر PMP در سطح زیرحوضه‌های سد بختیاری

| Sub-basin               | 1      | 2     | 3     | 4      | 5     | 6     | Total basin |
|-------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------------|
| Area (km <sup>2</sup> ) | 2490.5 | 671.1 | 866.2 | 1215.2 | 819.1 | 326.8 | 6388.8      |
| PMP (mm)                | 208.5  | 211.0 | 258.7 | 303.1  | 381.0 | 512.6 | 273         |

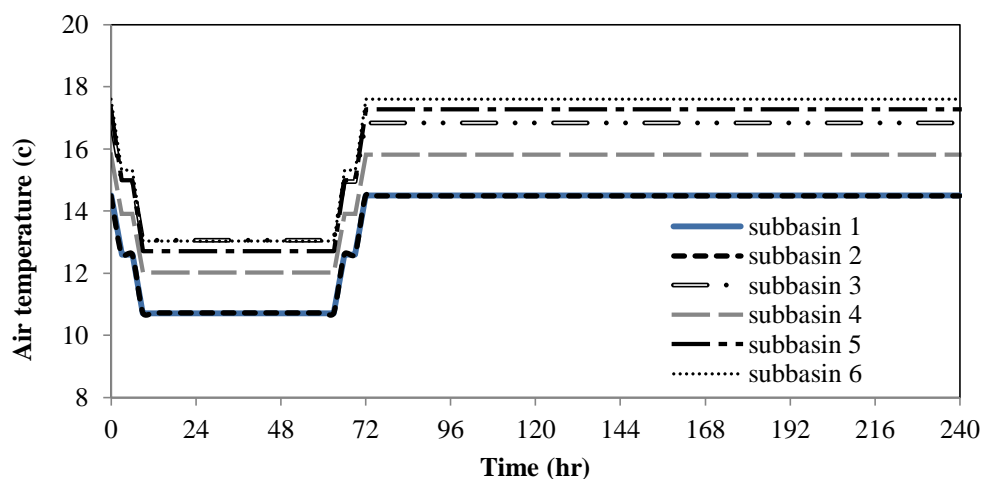


Fig. 2- Changes in air temperature at the time of PMP occurrence in different sub-basins of Bakhtiari Dam Basin

شکل ۲- تغییرات دمای هوا در زمان وقوع PMP در زیرحوضه‌های مختلف حوضه سد بختیاری

Table 3- Initial snow water equivalent in millimeters in sub-basins elevation bands

جدول ۳- مقادیر آب معادل برف اولیه بر حسب میلیمتر در باندهای ارتفاعی زیرحوضه‌ها

| Elevation Band | Sub-basin 1 | Sub-basin 2 | Sub-basin 3 | Sub-basin 4 | Sub-basin 5 | Sub-basin 6 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1              | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         |
| 2              | 52.2        | 29.8        | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         |
| 3              | 178.6       | 156.2       | 6.4         | 0.0         | 0.0         | 0.0         |
| 4              | 316.7       | 292.2       | 110.3       | 2.3         | 0.0         | 0.0         |
| 5              | 451.0       | 433.4       | 252.0       | 116.7       | 6.3         | 0.0         |
| 6              | 585.6       | 551.3       | 398.9       | 287.8       | 109.8       | 0.0         |
| 7              | 730.3       | 684.0       | 543.6       | 460.0       | 249.3       | 8.8         |
| 8              | 872.5       | 823.4       | 675.8       | 640.9       | 384.2       | 96.9        |
| 9              | 1011.1      | 946.1       | 815.5       | 788.6       | 512.6       | 192.3       |
| 10             | 1132.4      | 1032.2      | 954.9       | 959.7       | 633.8       | 297.7       |

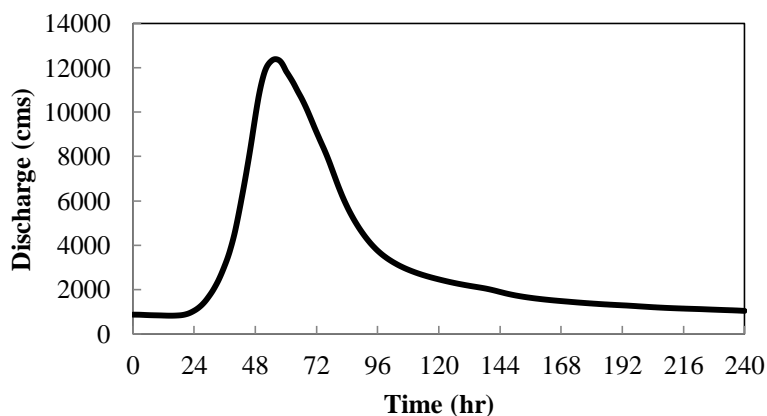


Fig. 3- Final PMF hydrograph at Bakhtiari Dam site

شکل ۳- هیدروگراف PMF نهایی در محل سد بختیاری

## ۲-۱- ارزیابی عدم قطعیت متغیرهای ورودی با روش فازی

به منظور ارزیابی عدم قطعیت مقدار PMP، دمای هوا و آب معادل برف در مدل بارش-رواناب، از روش تئوری فازی استفاده شد. به عنوان مثال کاربرد روش تئوری فازی فقط برای مقدار PMP توضیح داده می شود. مقدار PMP با  $P_i$  نشان داده می شود. برای نمایش عدم قطعیت بارش تجمعی  $P_i$  برای زیرحوضه  $i$  ( $m = 1, \dots, m$ ) تعداد زیرحوضه ها) با استفاده از تئوری مجموعه فازی نیاز به معلوم بودن تابع عضویت  $P_i$  می باشد. در صورت فقدان اطلاعات کافی در مورد تابع عضویت  $P_i$ ، فرض می گردد که  $P_i$  شامل مقداری خطا می باشد که با مقادیر بدون بعد  $e_1$  و  $e_2$  نشان داده می شود به طوری که  $0 \leq e_1 \leq 1$  و  $e_2 \geq 0$  است. همچنین فرض می گردد که مقدار معین  $P_i$ ، معتبرترین مقدار که با  $P_{i,mc}$  نشان داده می شود است. پس دو مقدار حداقل و حداکثر  $P_i$  که به ترتیب با  $P_{i,min}$  و  $P_{i,max}$  نشان داده می شود به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\begin{cases} P_{i,max} = (1 + e_2)P_{i,mc} \\ P_{i,min} = (1 - e_1)P_{i,mc} \end{cases} \quad (1)$$

که در آن سه مقدار  $P_{i,mc}$ ،  $P_{i,min}$  و  $P_{i,max}$  که در شکل ۴ نشان داده شده یک تابع عضویت مثلثی شکل را تشکیل می دهند که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mu(P_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } P_i < P_{i,min} \\ \frac{P_i - P_{i,min}}{P_{i,mc} - P_{i,min}} & \text{if } P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,mc} \\ \frac{P_{i,max} - P_i}{P_{i,max} - P_{i,mc}} & \text{if } P_{i,mc} \leq P_i \leq P_{i,max} \\ 0 & \text{if } P_i > P_{i,max} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن  $\mu(P_i)$  درجه عضویت بارش با مقدار  $P_i$  می باشد. مقدار صحیح بارش،  $P_i$ ، یقیناً بین  $P_{i,min}$  و  $P_{i,max}$  بوده و احتمالاً نزدیک به  $P_{i,mc}$  می باشد (Revelli and Ridolfi, 2002). بنابراین عدم قطعیت یا خطای مربوط به یک مقدار بارش پیش بینی شده، با استفاده از یک عدد فازی بر اساس حداقل اطلاعات موجود در مورد بارش نشان داده می شود.

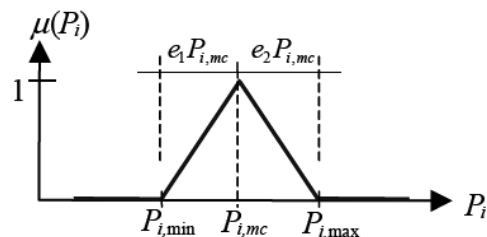


Fig. 4- Triangular membership function with  $P_{i,min}$ ,  $P_{i,max}$  and  $P_{i,mc}$

شکل ۴- تابع عضویت مثلثی با مقادیر  $P_{i,min}$ ،  $P_{i,max}$  و  $P_{i,mc}$

اصل بسط تئوری مجموعه فازی با روش برش  $\alpha$  صورت می گیرد (Schulz and Huwe, 1997). مثالی از یک برش  $\alpha$  برای یک تابع عضویت و حد بالا و پایین متناظر با آن در شکل ۵ نشان داده شده است. مقادیر  $P_{i,min}$ ،  $P_{i,max}$  و  $P_{i,mc}$  در شکل ۵ با مقادیر در شکل ۴ یکسان است. با در نظر گرفتن تابع  $f$  به عنوان مدل بارش-رواناب با بارش، دمای هوا و آب معادل برف اولیه به عنوان ورودی ها و رواناب،  $Q$ ، به عنوان خروجی خواهیم داشت:

$$Q = f(P_i, T_i, SWE_{ij}; i = 1, \dots, m) \quad (3)$$

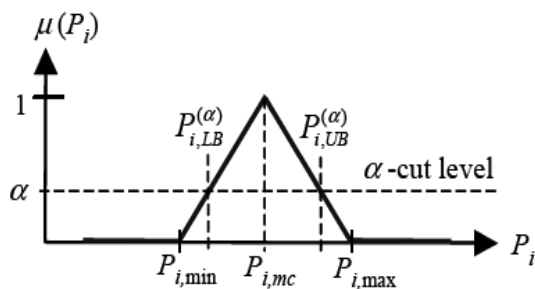


Fig. 5-  $\alpha$ -cut and its corresponding upper and lower bounds

شکل ۵- برش  $\alpha$  و حدود بالایی و پایینی متناظر با آن

با داشتن تابع عضویت دبی اوج می توان مقدار حد بالا و پایین دبی اوج نسبت به مقادیر مختلف  $\alpha$  را تعیین نمود. همچنین با داشتن مقادیر هیدروگراف سیلاب محتمل حد بالا و حد پایین به ازای مقادیر مختلف  $\alpha$  می توان حجم PMF را محاسبه نمود. سپس با استفاده از روابط زیر عدم قطعیت در دبی اوج و حجم PMF بدست می آید.

$$\Delta Q_p = \frac{100(Q_{p_i} - Q_{p,PMF})}{Q_{p,PMF}} \quad (4)$$

$$\Delta V = \frac{100(V_i - V_{PMF})}{V_{PMF}} \quad (5)$$

که در آن  $\Delta Q_p$  درصد عدم قطعیت در دبی اوج PMF،  $\Delta V$  درصد عدم قطعیت در حجم PMF،  $Q_{p_i}$  دبی اوج PMF حد بالا و پایین،  $Q_{p,PMF}$  دبی اوج PMF نهایی،  $V_i$  حجم PMF حد بالا و پایین،  $V_{PMF}$  حجم PMF نهایی است. تابع عضویت بیانگر عدم قطعیت در مقدار PMP، دمای هوا و آب معادل برف برای هر زیرحوضه، با فرض ۱۰٪  $\pm$  خطا در مقدار PMP، دمای هوا و آب معادل برف برآورد شده در هر زیرحوضه حاصل می شود. به عبارتی  $e_1$  و  $e_2$  در معادله (۱) برابر با ۰/۱ در نظر گرفته می شود. اگرچه خطا به طور دلخواه در نظر گرفته می شود، ولی مشاوره با کارشناسان منابع آب این نتیجه را در برداشت که فرض خطا در مقادیر بارش تا  $\pm 30\%$  خیلی دور از واقعیت نیست.

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

#### ۳-۱- مقایسه هیدروگراف PMF حد بالا و پایین

توجهی وجود دارد، در حالی که برای  $\alpha = 1$  به علت وجود داشتن یک مقدار برای PMP و دمای هوا هیچ حدود بالایی و پایینی وجود ندارد. البته اختلاف حدود هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در مقدار PMP بیشتر از عدم قطعیت در مقدار دمای هوا است. همچنین با توجه به شکل ۸ می توان دریافت که با کاهش درجه عضویت مقادیر آب معادل برف اولیه، اختلاف حدود هیدروگراف PMF افزایش یافته، اما این اختلاف خیلی کم است. همچنین برای  $\alpha = 1$  به علت وجود داشتن یک مقدار برای آب معادل برف اولیه هیچ حدود بالایی و پایینی وجود ندارد.

اشکال ۶ الی ۸ هیدروگراف های PMF حد بالا و پایین به ترتیب مربوط به عدم قطعیت در مقدار PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه به ازای درجه عضویت مختلف را نشان می دهد. در اشکال ۶ الی ۸ LB و UB به ترتیب حد بالا و پایین هیدروگراف PMF هستند و هیچ حدود بالا و پایین برای  $\alpha = 1$  وجود ندارد. با توجه به شکل ۶ و ۷ می توان دریافت که با کاهش درجه عضویت ( $\alpha$ ) مقادیر PMP و دمای هوا، اختلاف حدود هیدروگراف PMF افزایش می یابد. همچنین برای  $\alpha = 0$ ، بین حدود بالایی و پایینی اختلاف قابل

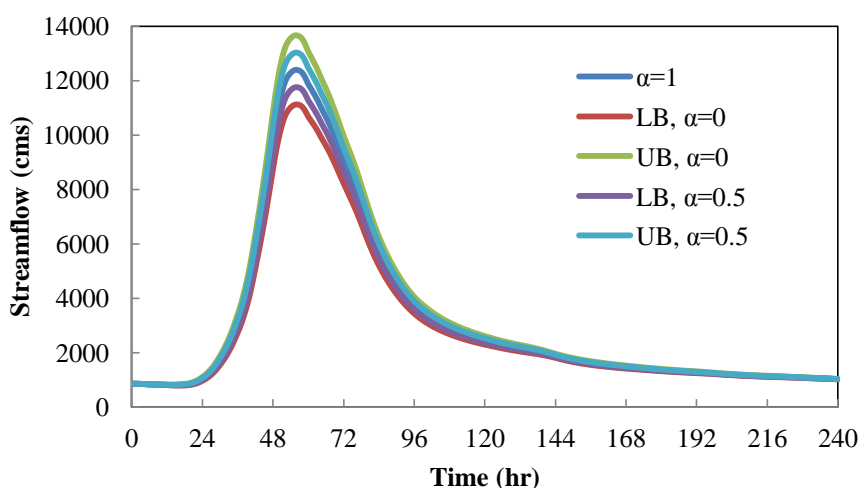


Fig. 6- Upper and lower bound of PMF hydrograph due to uncertainty in PMP for different membership degree

شکل ۶- حدود بالا و پایین هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در PMP به ازای درجه عضویت مختلف

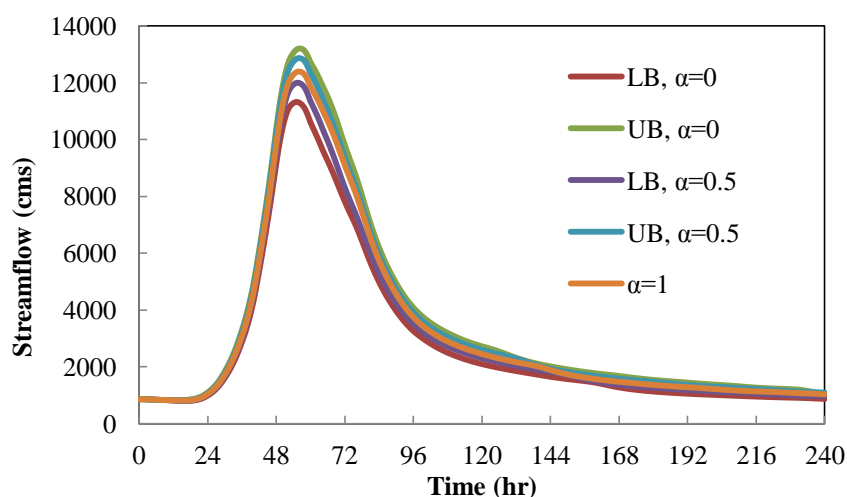
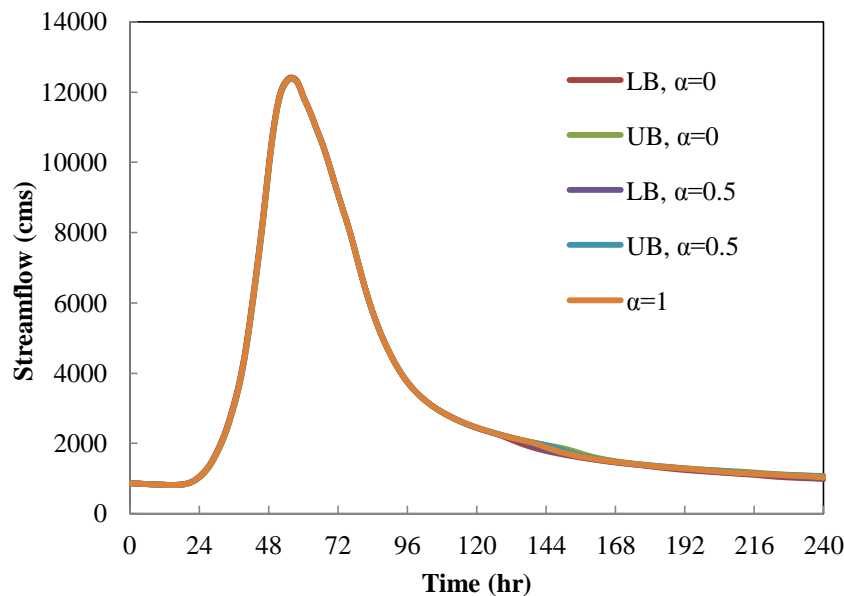


Fig. 7- Upper and lower bound of PMF hydrograph due to uncertainty in air temperature for different membership degree

شکل ۷- حدود بالا و پایین هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در دمای هوا به ازای درجه عضویت مختلف



**Fig. 8– Upper and lower bound of PMF hydrograph due to uncertainty in initial SWE for different membership degree**

شکل ۸- حدود بالا و پایین هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در مقدار آب معادل برف اولیه به ازای درجه عضویت مختلف

عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت مقدار دمای هوا بیشتر از درصد عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF است. بطوریکه عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در مقدار دمای هوا به اندازه  $\pm 10\%$  درصد (درجه عضویت برابر با صفر) به ترتیب برابر با  $\pm 7/6$  و  $\pm 9/8$  درصد است.

جدول ۶ مقادیر دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF و درصد عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در آب معادل برف اولیه در سطح حوضه بختیاری به ازای درجه عضویت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در جدول ۶ UB و LB به ترتیب حد بالا و پایین هیدروگراف PMF است. با توجه به جدول ۶ با کاهش مقدار  $\alpha$ ، متوسط عدم قطعیت حد بالا و پایین دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF افزایش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به جدول ۵، عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت مقدار آب معادل برف اولیه در سطح حوضه بیشتر از عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF است. بطوریکه عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در مقدار آب معادل برف اولیه به اندازه  $\pm 10\%$  درصد (درجه عضویت برابر با صفر) به ترتیب برابر با  $\pm 0/18$  و  $\pm 0/35$  درصد است.

جدول ۴ مقادیر دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF و درصد عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در مقدار PMP به ازای درجه عضویت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در جدول ۴، UB و LB به ترتیب حد بالا و پایین هیدروگراف PMF است. با توجه به جدول ۴ با کاهش مقدار  $\alpha$ ، متوسط عدم قطعیت حد بالا و پایین دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF افزایش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به جدول ۴، درصد عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت مقدار PMP بیشتر از درصد عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF است. بطوریکه عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در مقدار PMP به اندازه  $\pm 10\%$  درصد (درجه عضویت برابر با صفر) به ترتیب برابر با  $\pm 10/2$  و  $\pm 8$  درصد است.

جدول ۵ مقادیر دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF و درصد عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در دمای هوا در طول تداوم PMF به ازای درجه عضویت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در جدول ۵، UB و LB به ترتیب حد بالا و پایین هیدروگراف PMF است. با توجه به جدول ۵ با کاهش مقدار  $\alpha$ ، متوسط عدم قطعیت حد بالا و پایین دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF افزایش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به جدول ۵، درصد



**Table 4- Uncertainty in peak discharge and volume of PMF due to uncertainty in PMP for different membership degree**

جدول ۴- عدم قطعیت در دبی اوج و حجم PMF به علت عدم قطعیت در مقدار PMP به ازای درجه عضویت مختلف

| $\alpha$ | Lower or Upper Band | Peak discharge (cms) | Volume (MCM) | Uncertainty in peak discharge (%) | Mean uncertainty in peak discharge (%) | Uncertainty in hydrograph volume (%) | Mean uncertainty in hydrograph volume (%) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|---|
| 0        | LB                  | 11123.3              | 2575.8       | -10.3                             | ±10.2                                  | -8.01                                | ±8.0                                      |
|          | UB                  | 13663.9              | 3026.6       | 10.2                              |  | 8.08                                 |   |
| 0.1      | LB                  | 11250.5              | 2598.3       | -9.2                              | ±9.2                                   | -7.21                                | ±7.2                                      |
|          | UB                  | 13536.5              | 3003.9       | 9.2                               |  | 7.27                                 |   |
| 0.2      | LB                  | 11377.6              | 2620.6       | -8.2                              | ±8.2                                   | -6.42                                | ±6.4                                      |
|          | UB                  | 13409.7              | 2981.2       | 8.2                               |  | 6.46                                 |   |
| 0.3      | LB                  | 11504.7              | 2643.0       | -7.2                              | ±7.2                                   | -5.61                                | ±5.6                                      |
|          | UB                  | 13282.7              | 2958.5       | 7.2                               |  | 5.65                                 |   |
| 0.4      | LB                  | 11631.7              | 2665.4       | -6.2                              | ±6.1                                   | -4.82                                | ±4.8                                      |
|          | UB                  | 13155.8              | 2935.8       | 6.1                               |  | 4.84                                 |   |
| 0.5      | LB                  | 11758.8              | 2687.8       | -5.1                              | ±5.1                                   | -4.02                                | ±4.0                                      |
|          | UB                  | 13028.8              | 2913.2       | 5.1                               |  | 4.03                                 |   |
| 0.6      | LB                  | 11885.8              | 2710.2       | -4.1                              | ±4.1                                   | -3.22                                | ±3.2                                      |
|          | UB                  | 12902                | 2890.5       | 4.1                               |  | 3.22                                 |   |
| 0.7      | LB                  | 12012.9              | 2732.7       | -3.1                              | ±3.1                                   | -2.41                                | ±2.4                                      |
|          | UB                  | 12774.9              | 2867.9       | 3.1                               |  | 2.42                                 |   |
| 0.8      | LB                  | 12139.8              | 2755.1       | -2.1                              | ±2.1                                   | -1.61                                | ±1.6                                      |
|          | UB                  | 12648                | 2845.3       | 2.0                               |  | 1.61                                 |   |
| 0.9      | LB                  | 12267                | 2777.7       | -1.0                              | ±1.0                                   | -0.81                                | ±0.8                                      |
|          | UB                  | 12521.1              | 2822.8       | 1.0                               |  | 0.80                                 |   |
| 1        | LB=UB               | 12394.6              | 2800.3       | 0.0                               | 0.0                                    | 0.00                                 | 0.0                                       |

**Table 5- Uncertainty in peak discharge and volume of PMF due to uncertainty in air temperature for different membership degree**

جدول ۵- عدم قطعیت در دبی اوج و حجم PMF به علت عدم قطعیت در مقدار دمای هوا به ازای درجه عضویت مختلف

| $\alpha$ | Lower or Upper Band | Peak discharge (cms) | Volume (MCM) | Uncertainty in peak discharge (%) | Mean uncertainty in peak discharge (%) | Uncertainty in hydrograph volume (%) | Mean uncertainty in hydrograph volume (%) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|---|
| 0        | LB                  | 11323.3              | 2478.7       | -8.6                              | ±7.6                                   | -11.49                               | ±9.8                                      |
|          | UB                  | 13205.2              | 3027.3       | 6.5                               |  | 8.11                                 |   |
| 0.1      | LB                  | 11449.1              | 2509.9       | -7.6                              | ±6.6                                   | -10.37                               | ±8.5                                      |
|          | UB                  | 13085.6              | 2986.6       | 5.6                               |  | 6.66                                 |   |
| 0.2      | LB                  | 11700.2              | 2566.4       | -5.6                              | ±5.4                                   | -8.35                                | ±7.3                                      |
|          | UB                  | 13050.8              | 2973.9       | 5.3                               |  | 6.20                                 |   |
| 0.3      | LB                  | 11943.4              | 2617.5       | -3.6                              | ±4.3                                   | -6.53                                | ±6.1                                      |
|          | UB                  | 13017.6              | 2960.5       | 5.0                               |  | 5.72                                 |   |
| 0.4      | LB                  | 11972                | 2632.6       | -3.4                              | ±4.1                                   | -5.99                                | ±5.6                                      |
|          | UB                  | 12982.5              | 2946.9       | 4.7                               |  | 5.24                                 |   |
| 0.5      | LB                  | 12001.7              | 2647.5       | -3.2                              | ±3.5                                   | -5.46                                | ±4.8                                      |
|          | UB                  | 12867.5              | 2918.0       | 3.8                               |  | 4.20                                 |   |
| 0.6      | LB                  | 12266.1              | 2742.1       | -1.0                              | ±1.8                                   | -2.08                                | ±2.5                                      |
|          | UB                  | 12714.1              | 2884.5       | 2.6                               |  | 3.01                                 |   |
| 0.7      | LB                  | 12297.7              | 2756.4       | -0.8                              | ±1.5                                   | -1.57                                | ±2.0                                      |
|          | UB                  | 12681.9              | 2870.4       | 2.3                               |  | 2.50                                 |   |
| 0.8      | LB                  | 12330.8              | 2771.4       | -0.5                              | ±1.2                                   | -1.03                                | ±1.5                                      |
|          | UB                  | 12632.6              | 2853.7       | 1.9                               |  | 1.91                                 |   |
| 0.9      | LB                  | 12364.2              | 2785.9       | -0.2                              | ±0.9                                   | -0.51                                | ±0.9                                      |
|          | UB                  | 12598.8              | 2838.9       | 1.6                               |  | 1.38                                 |   |
| 1        | LB=UB               | 12394.6              | 2800.3       | 0.0                               | 0.0                                    | 0.00                                 | 0.0                                       |

**Table 6- Uncertainty in peak discharge and volume of PMF due to uncertainty in initial SWE for different membership degree**

جدول ۶- عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در آب معادل برف اولیه به ازای درجه عضویت

مختلف

| $\alpha$ | Lower or Upper Band | Peak discharge (cms) | Volume (MCM) | Uncertainty in peak discharge (%) | Mean uncertainty in peak discharge (%) | Uncertainty in hydrograph volume (%) | Mean uncertainty in hydrograph volume (%) |
|----------|---------------------|----------------------|--------------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|---|
| 0        | LB                  | 12416.6              | 2787.0       | 0.18                              | ±0.18                                  | -0.47                                | ±0.35                                     |
|          | UB                  | 12373.1              | 2806.8       | -0.17                             |  | 0.23                                 |   |
| 0.1      | LB                  | 12414.3              | 2788.6       | 0.16                              | ±0.16                                  | -0.42                                | ±0.31                                     |
|          | UB                  | 12375.1              | 2806.2       | -0.16                             |  | 0.21                                 |   |
| 0.2      | LB                  | 12412                | 2790.2       | 0.14                              | ±0.14                                  | -0.36                                | ±0.27                                     |
|          | UB                  | 12377.7              | 2805.6       | -0.14                             |  | 0.19                                 |   |
| 0.3      | LB                  | 12409.7              | 2791.8       | 0.12                              | ±0.12                                  | -0.30                                | ±0.24                                     |
|          | UB                  | 12379.6              | 2805.3       | -0.12                             |  | 0.18                                 |   |
| 0.4      | LB                  | 12407.7              | 2793.2       | 0.11                              | ±0.10                                  | -0.25                                | ±0.21                                     |
|          | UB                  | 12381.8              | 2804.7       | -0.10                             |  | 0.16                                 |   |
| 0.5      | LB                  | 12405.4              | 2794.7       | 0.09                              | ±0.09                                  | -0.20                                | ±0.17                                     |
|          | UB                  | 12384                | 2804.2       | -0.09                             |  | 0.14                                 |   |
| 0.6      | LB                  | 12403.2              | 2796.0       | 0.07                              | ±0.07                                  | -0.15                                | ±0.13                                     |
|          | UB                  | 12386.2              | 2803.5       | -0.07                             |  | 0.11                                 |   |
| 0.7      | LB                  | 12401                | 2797.2       | 0.05                              | ±0.05                                  | -0.11                                | ±0.10                                     |
|          | UB                  | 12388.3              | 2802.8       | -0.05                             |  | 0.09                                 |   |
| 0.8      | LB                  | 12398.8              | 2798.2       | 0.03                              | ±0.03                                  | -0.07                                | ±0.07                                     |
|          | UB                  | 12390.3              | 2802.0       | -0.03                             |  | 0.06                                 |   |
| 0.9      | LB                  | 12396.9              | 2799.4       | 0.02                              | ±0.02                                  | -0.03                                | ±0.03                                     |
|          | UB                  | 12392.5              | 2801.2       | -0.02                             |  | 0.03                                 |   |
| 1        | LB=UB               | 12394.6              | 2800.3       | 0.00                              | 0.00                                   | 0.00                                 | 0.00                                      |

### ۳-۲- مقایسه توابع عضویت دبی اوج و حجم هیدروگراف PMF

شکل ۱۱ توابع عضویت بدست آمده از دبی اوج PMF مربوط به عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان دریافت که به ازای یک درجه عضویت معین برای متغیرهای PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه، دامنه عدم قطعیت دبی اوج PMF مربوط به PMP بیشتر از دامنه عدم قطعیت دبی اوج PMF مربوط به دمای هوا و آب معادل برف اولیه است. همچنین دامنه عدم قطعیت دبی اوج PMF مربوط به دمای هوا بیشتر از دامنه عدم قطعیت دبی اوج PMF مربوط به آب معادل برف اولیه است.

شکل ۱۲ توابع عضویت بدست آمده از حجم هیدروگراف PMF مربوط به عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت که به ازای یک درجه عضویت معین برای متغیرهای PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه، دامنه عدم قطعیت حجم PMF مربوط به دمای هوا بیشتر از دامنه عدم قطعیت حجم PMF مربوط به PMP و آب معادل برف اولیه است.

شکل ۹ تغییرات عدم قطعیت دبی اوج PMF نسبت به عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه و معادله خط برازش بر آنها را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ تغییرات عدم قطعیت حجم PMF نسبت به عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه و معادله خط برازش بر آنها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، نرخ تغییرات دبی اوج PMF نسبت به تغییرات عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه به ترتیب برابر با ۰/۰۲۴، ۱/۰۳۷ و ۰/۰۱۷ است. به عبارتی با عدم قطعیت معادل یک درصد در مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه، عدم قطعیت دبی اوج PMF به ترتیب برابر با ۱/۰۲۴، ۰/۷۳۷ و ۰/۰۱۷ درصد است. همچنین با توجه به شکل ۱۰، نرخ تغییرات عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF نسبت به تغییرات عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه به ترتیب برابر با ۰/۸۰۴، ۰/۹۸۱ و ۰/۰۳۵ است. به عبارتی با عدم قطعیت معادل یک درصد در مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه، عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به ترتیب برابر با ۰/۸۰۴، ۰/۹۸۱ و ۰/۰۳۵ درصد است.

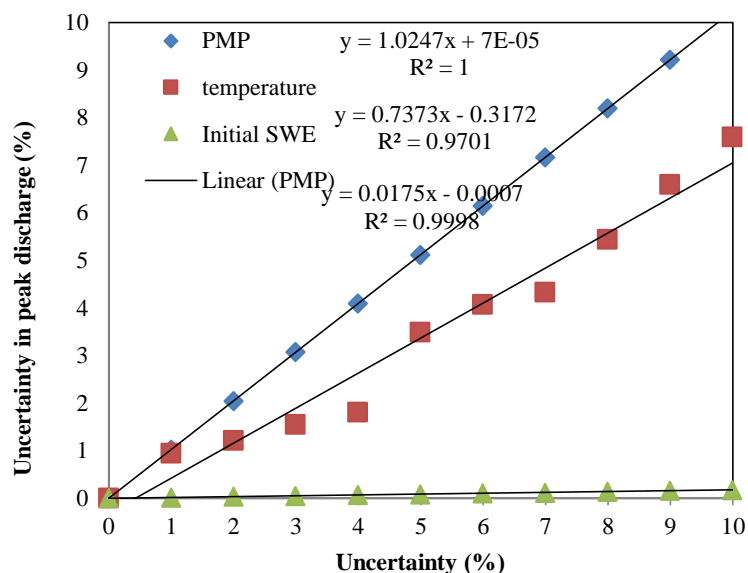


Fig. 9- Changes of uncertainty in PMF peak discharge relative to uncertainty in PMP, air temperature and initial SWE

شکل ۹- تغییرات عدم قطعیت در دبی اوج PMF نسبت به عدم قطعیت در مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه

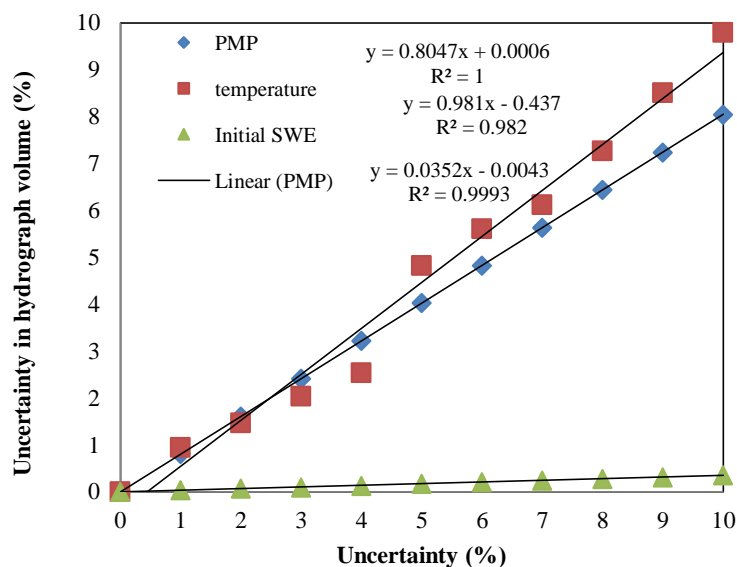
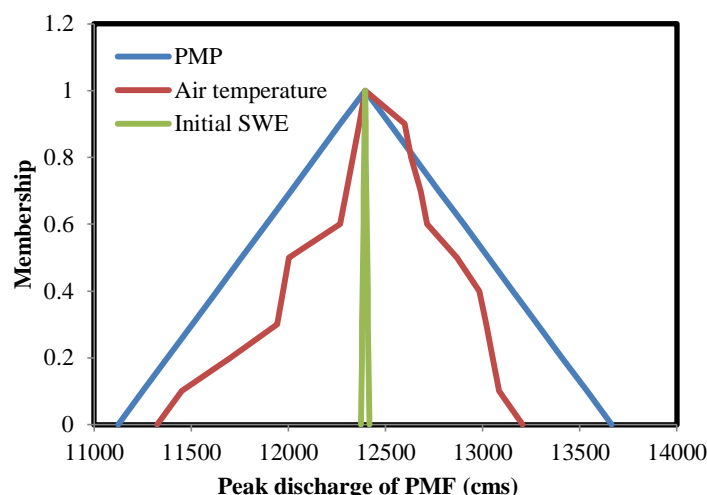


Fig. 10- Changes of uncertainty in PMF volume relative to uncertainty in PMP, air temperature and initial SWE

شکل ۱۰- تغییرات عدم قطعیت حجم PMF نسبت به عدم قطعیت در مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه

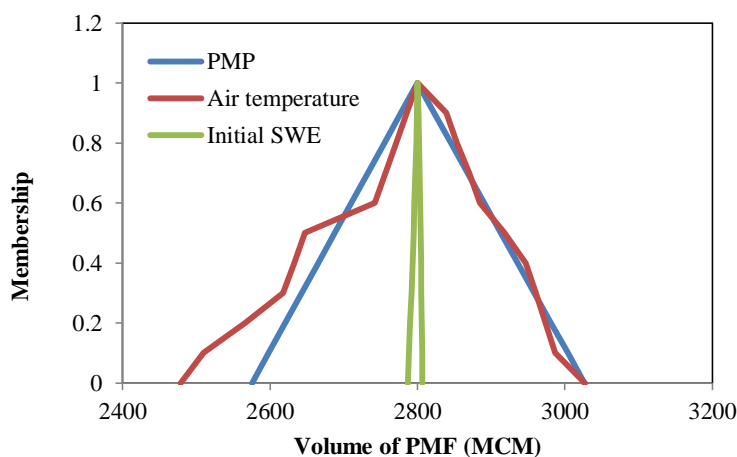
نتیجه حاصل از توابع عضویت مثلثی شکل متغیرهای ورودی (مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه)، تابع عضویت مثلثی شکل از خروجی (دبی اوج و حجم PMF) خواهد شد. مثلثی شکل بودن توابع عضویت دبی اوج و حجم PMF بیانگر آن است که عدم قطعیت به علت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه مستقل از مقدار  $\alpha$  نیست.

همچنین دامنه عدم قطعیت حجم PMF مربوط به PMP بیشتر از دامنه عدم قطعیت حجم PMF مربوط به آب معادل برف اولیه است. نکته قابل توجه دیگر شکل توابع عضویت می باشد. شکل های توابع عضویت مربوط به دبی اوج و حجم PMF در تحلیل عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه نسبتاً مثلثی شکل هستند. این نشان دهنده آن است که اگر از عدم قطعیت زمانی صرف نظر گردد،



**Fig. 11- Membership functions of PMF peak discharge due to uncertainty in PMP, air temperature and initial SWE**

شکل ۱۱- توابع عضویت دبی اوج PMF به علت عدم قطعیت در مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه



**Fig. 12- Membership functions of PMF volume due to uncertainty in PMP, air temperature and initial SWE**

شکل ۱۲- توابع عضویت حجم PMF به علت عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه

بر این اختلاف حدود هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت در مقدار PMP بیشتر از عدم قطعیت در مقدار دمای هوا است. نتایج نشان می‌دهد که درصد عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت مقدار PMP بیشتر از درصد عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF است. درصد عدم قطعیت حجم هیدروگراف PMF به علت عدم قطعیت مقدار دمای هوا و آب معادل برف اولیه بیشتر از درصد عدم قطعیت دبی اوج هیدروگراف PMF است.

نتایج نشان می‌دهد که به ازای یک درجه عضویت معین برای متغیرهای PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه، دامنه عدم قطعیت

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه برای پخش عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه در برآورد PMF در حوضه سد بختیاری از روش تئوری مجموعه فازی استفاده شده است. مقایسه هیدروگراف‌های PMF حد بالا و پایین مربوط به عدم قطعیت در مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه به ازای درجه عضویت مختلف نشان می‌دهد که با کاهش درجه عضویت (افزایش عدم قطعیت) مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه اختلاف حدود هیدروگراف PMF افزایش می‌یابد. این اختلاف حدود برای متغیرهای PMP و دمای هوا قابل توجه است ولی برای متغیر آب معادل برف اولیه ناچیز می‌باشد. علاوه

مارکوف برآورد کرده و با نتایج روش فازی مقایسه شود. علاوه بر این عدم قطعیت پارامترهای کالیبراسیون مدل بارش- رواناب در برآورد PMF با روش‌های مونت کارلو و مونت کارلو زنجیره مارکوف تحلیل کرده و با عدم قطعیت مربوط به متغیرهای ورودی شامل PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه مقایسه گردد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Probable Maximum Flood
- 2- Probable Maximum Precipitation
- 3- Temporal Disaggregation
- 4- Markov Chain Monte Carlo
- 5- Differential Evolution Adaptive Metropolis
- 6- Sequential Uncertainty Fitting
- 7- Local Weighted Regression
- 8- Snow Water Equivalent
- 9- Most Credible
- 10-  $\alpha - \text{Cut}$

#### ۵- مراجع

- Beauchamp J, Leconte R, Trudel M, and 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
- Coxon G, Freer J, Westerberg IK, Wagener T, Woods R, Smith PJ (2015) A novel framework for discharge uncertainty quantification applied to 500 UK gauging stations. *Water Resources Research* 51(7):5531-5546
- Fathian H, Sedghi H, Bostani F, Mousavi Jahromi H, and Manshori M (2011) Uncertainty analysis of amount, temporal and spatial distribution of precipitation in flood forecasting. *Journal of Iran-Watershed Management Science & Engineering* 4(13):1-14 (In Persian)
- Gabellani S, Boni G, Ferraris L, Von Hardenberg J, Provenzale A (2007) Propagation of uncertainty from rainfall to runoff: A case study with a stochastic rainfall generator. *Advances in Water Resources* 30(10):2061-2071
- Gangrade S, Kao SC, Naz BS, Rastogi D, Ashfaq M, Singh N, and Preston BL (2018) Sensitivity of probable maximum flood in a changing environment. *Water Resources Research* 54(6):3913-3936
- Iran Power and Water Resources Development Company (2006) Review report of Probable Maximum Precipitation (PMP) studies, Bakhtiari Dam and power plant design. Iranian Water and Power Resources Development Company 175 p

دبی اوج PMF مربوط به PMP بیشتر از دامنه عدم قطعیت دبی اوج PMF مربوط به دمای هوا و آب معادل برف اولیه است. همچنین دامنه عدم قطعیت دبی اوج PMF مربوط به دمای هوا بیشتر از دامنه عدم قطعیت دبی اوج PMF مربوط به آب معادل برف اولیه است. همچنین به ازای یک درجه عضویت معین برای متغیرهای PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه، دامنه عدم قطعیت حجم PMF مربوط به دمای هوا بیشتر از دامنه عدم قطعیت حجم PMF مربوط به آب معادل برف اولیه است. همچنین دامنه عدم قطعیت حجم PMF مربوط به PMP بیشتر از دامنه عدم قطعیت حجم PMF مربوط به آب معادل برف اولیه است.

نتایج بررسی حساسیت PMF نسبت به متغیرهای ورودی توسط Jothityangkoon et al. (2013) نشان داد که ۱۰٪ افزایش در PMP باعث افزایش ۱۵٪ PMF می‌شود، در حالی که افزایش ۱۰٪ در جنگل زدایی منجر به افزایش ۳٪ PMF می‌شود. علاوه بر این، نتایج تحقیق Micovic et al. (2015) نشان داد که عمق برف ۱۰۰ ساله بدست‌آمده به روش آماری و شبیه‌سازی ذوب برف همراه با عدم قطعیت بوده که ممکن است عدم قطعیت آن افزایش یابد زمانی که اثرات ذوب برف بعلت باران در نظر گرفته شود.

شکل‌های توابع عضویت مربوط به دبی اوج و حجم PMF در تحلیل عدم قطعیت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه نسبتاً مثلثی شکل هستند. این نشان‌دهنده آن است که اگر از عدم قطعیت زمانی صرف‌نظر گردد، نتیجه حاصل از توابع عضویت مثلثی شکل متغیرهای ورودی (مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه)، تابع عضویت مثلثی شکل از خروجی (دبی اوج و حجم PMF) خواهد شد. مثلثی شکل بودن توابع عضویت دبی اوج و حجم PMF بیانگر آن است که عدم قطعیت به علت مقادیر PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه مستقل از مقدار درجه عضویت نیست.

بنابر نتایج این تحقیق، در برآورد PMF و پیش‌بینی سیل باید عدم قطعیت ناشی از متغیرهای هواشناسی در نظر گرفته شود. حتی با کمبود مراحل هشدار سیل بر مبنای ریسک، به کمیت درآوردن عدم قطعیت، اطلاعات اضافی در مورد پیش‌بینی‌ها فراهم می‌نمایند که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا به نحو مناسب‌تر تصمیم بگیرند. در ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌شود که برای ارزیابی عدم قطعیت متغیرهای ورودی شامل PMP، دمای هوا و آب معادل برف اولیه با روش فازی از توابع عضویت غیر از مثلثی مانند دوزنقه‌ای استفاده شود. همچنین عدم قطعیت PMP با الگوریتم DREAM مونت کارلو زنجیره

- Revelli R and Ridolfi L (2002) Fuzzy approach for analysis of pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(1):93-101
- Rousseau AN, Klein IM, Freudiger D, Gagnon P, Frigon A, and 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
- Schulz K and Huwe B (1997) Water flow modeling in the unsaturated zone with imprecise parameters using a fuzzy approach. *Journal of Hydrology* 201(1-4):211-229
- Stratz SA and Hossain F (2014) Probable maximum precipitation in a changing climate: Implications for dam design. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(12):06014006
- Strauch M, Bernhofer C, Koide S, Volk M, Lorz C, and Makeschin F (2012) Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 414:413-424
- Tanhapour M, Banihabib ME, and Roozbahany A (2018) Bayesian network model for the assessment of the effect of antecedent rainfall on debris flow forecasting In Alborz Zone of Iran. *Iran-Water Resources Research* 13(4):118-131(In Persian)
- Vrugt JA, Ter Braak CJ, Clark MP, Hyman JM, and Robinson BA (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, and 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
- Zischg AP, Felder G, Weingartner R, Quinn N, Coxon G, Neal J, Freer J, and Bates P (2018) Effects of variability in probable maximum precipitation patterns on flood losses. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(5):2759-2773
- Iran Power and Water Resources Development Company (2006) Review report of Probable Maximum Flood (PMF) studies, Bakhtiari Dam and power plant design. Iranian Water and Power Resources Development Company 110 p
- Jothityangkoon C, Hirunteeyakul C, Boonrawd K, and Sivapalan M (2013) Assessing the impact of climate and land use changes on extreme floods in a large tropical catchment. *Journal of Hydrology* 490:88-105
- Khorami M and Ghahraman B (2017) Uncertainty analysis of soil parameters in soil moisture profile uncertainty using fuzzy set theory. *Iran-Water Resources Research* 13(1):126-138 (In Persian)
- Klein IM, Rousseau AN, Frigon A, Freudiger D, and Gagnon P (2016) Evaluation of probable maximum snow accumulation: Development of a methodology for climate change studies. *Journal of hydrology* 537:74-85
- Kunkel KE, Karl TR, Easterling DR, Redmond K, Young J, Yin X, and Hennon P (2013) Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters* 40(7):1402-1408
- Maskey S and Price RK (2003) Uncertainty issues in flood forecasting. *Flood Events: Are We Prepared? Proceeding of the OSIRIS Workshop, Berlin*, 123-136
- Maskey S, Guinot V, and Price RK (2004) Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modelling: a fuzzy set approach. *Advances in Water Resources* 27(9):889-898
- Micovic Z, Schaefer MG, and Taylor GH (2015) Uncertainty analysis for probable maximum precipitation estimates. *Journal of Hydrology* 521:360-373
- Rastogi D, Kao SC, Ashfaq M, Mei R, Kabela ED, Gangrade S, Naz BS, Preston BL, Singh N, and Anantharaj VG (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