



ISSN 2251-7480

افزایش کارایی سامانه هشدار سیلاب با استفاده از منحنی غیر قطعی بارش آستانه

احمد شرافتی^{*۱}

(۱) استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه آزاد اسلامی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ تهران؛ ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: asharafati@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۰۶

چکیده

یکی از روش‌های مهم و موثر در جلوگیری یا کاهش خسارات جانی و مالی سیلاب استفاده از سامانه‌های هشدار سیلاب می‌باشد. در همه سامانه‌های هشدار سیلاب از آشکارساز جهت شناسایی وقایع سیلاب مانند شاخص‌های اقلیمی استفاده می‌شود. استفاده از منحنی بارش آستانه از روش‌های متداول در هشدار سیلاب می‌باشد. در این روش با مقایسه بارش‌های مشاهده‌ای یا پیش‌بینی شده با مقادیر آستانه حدی بارش، هشدار وقوع سیلاب اعلام می‌گردد. از ضعف‌های اساسی استفاده از منحنی‌های متداول بارش آستانه، قطعی در نظر گرفتن الگوی توزیع زمانی بارش و پارامترهای مدل بارش-رواناب نظیر نفوذ و جریان‌ات پایه می‌باشند. در این تحقیق تلاش شده است با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پارامترها و متغیرهای ورودی مدل بارش-رواناب در تهیه منحنی بارش آستانه، ضعف‌های منحنی‌های متداول بارش آستانه برطرف گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که منحنی‌های بارش آستانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مذکور در مقایسه با منحنی‌های متداول بارش آستانه دقت بسیار بالاتری دارند.

کلید واژه‌ها: سامانه هشدار سیل؛ سیلاب؛ عدم قطعیت؛ منحنی بارش آستانه؛ مدل HEC 1

مقدمه

هشدار سیلاب با توجه به پیش‌بینی سیلاب قبل از وقوع آن باعث کاهش خسارت جانی و مالی می‌گردند. در سیستم‌های هشدار سیلاب حوضه‌های آبریز، استفاده از منحنی‌های بارش آستانه یکی از روش‌های پیش‌بینی سیلاب می‌باشد (بهزادفر و همکاران، ۱۳۹۱). استفاده از منحنی آستانه بارش برای اولین بار توسط کاین (۱۹۸۰) جهت پیش‌بینی رانش زمین استفاده شد. به‌طور کلی منحنی‌های بارش آستانه مشخص کننده مقادیر بارش حدی می‌باشند که جهت پیش‌بینی رانش زمین Neary and Swift (1987, Annunziati et al., 1999; Crosta and Frattini, 2000, Bacchini and Zannoni 2003; Dahal and Hasegawa, (2008) و یا جهت هشدار وقوع سیلاب

سیلاب یکی از وقایع تصادفی طبیعی محسوب می‌شود که سالانه باعث خسارت مالی و جانی فراوانی در جهان می‌گردد و در مناطقی که سابقه کمتری در وقوع سیلاب دارند خسارات بیشتر است. (Thieken et al., 2007). از سیلاب‌های مهم ایران می‌توان به سیلاب استان گلستان در مرداد ماه سال ۱۳۸۰ اشاره کرد که منجر به کشته شدن ۲۰۰ نفر و خسارتی در حدود ۶۰ میلیون دلار گردید. از سیلاب‌های مهم اتفاق اروپا نیز می‌توان به سیلاب‌های سال ۱۹۹۷ در آلمان و لهستان اشاره کرد (Bronstert et al., 1998). از این رو سیستم‌های

پارامترها و متغیرهای مدل بارش-رواناب است مرتفع گردد و شرایط استخراج شبیه‌سازی بارش-رواناب و منحنی‌های بارش آستانه با طبیعت مسئله سازگار باشد.

مواد و روش‌ها

منحنی بارش آستانه برای یک مدت معین بارش، عمق بارشی را مشخص می‌کند که منجر به تولید یک جریان بحرانی (سیلاب) در یک مقطع مشخص از رودخانه می‌شود. استفاده از داده‌های بارش ثبت شده و شبیه‌سازی مدل بارش - رواناب یکی از روش متداول جهت تعیین منحنی‌های بارش آستانه است. در تحقیقات گذشته در شبیه‌سازی‌ها انجام شده الگوی توزیع زمانی بارش و بعضی از پارامترهای مدل بارش-رواناب ثابت در نظر گرفته شده‌اند. از این رو در این تحقیق سعی شده است با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پارامترهای مدل بارش - رواناب 1 HEC و الگوی توزیع زمانی بارش، منحنی‌های بارش آستانه استخراج گردد. روش در نظر گرفته شده در این تحقیق جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های متغیرها و پارامترهای مدل بارش - رواناب، شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد.

شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو یک روش تحلیل عدم قطعیت آماری و مبتنی بر توزیع احتمالاتی متغیرهای تصادفی می‌باشد. بدین ترتیب که در هر شبیه‌سازی با تولید تصادفی متغیرهای تصادفی با استفاده از توزیع احتمالاتی متغیرها و اجرای سامانه، خروجی سیستم نیز تولید می‌گردد. با اجرای تعداد زیادی شبیه‌سازی و تولید نمونه‌های زیادی از خروجی سامانه امکان تحلیل عدم قطعیت متغیرها و پارامترهای تصادفی و خروجی سامانه فراهم می‌گردد (Shrestha, 2009).

در این تحقیق از مدل بارش-رواناب 1 HEC استفاده شده است (Maskey et al., 2004; Kobold and Suselj)

استفاده می‌شوند (Alfieri et al., 2011; Montesarchio et al., 2011; Javelle) et al. 2010; Golian et al., 2010; Norbiato et al., 2008; Collier 2007; Mendicino 2006; Georgakakos 2006; Martina et al., 2005; Amadio et al., 2003; Carpenter et al., 1999; Montesarchio et al., 2015; Toth. 2015).

در این روش با مقایسه بارش‌های مشاهداتی یا پیش‌بینی شده با مقادیر آستانه حدی بارش، هشدار وقوع سیلاب به تصمیم گیرندگان اعلام می‌گردد (Montesarchio et al., 2011). البته استفاده از منحنی‌های بارش آستانه برای حوضه‌های آبریز کوچک‌تر از ۶۰۰ کیلومترمربع نتایج بهتری ارائه می‌دهد. (Montesarchio et al., 2009; Borga et al., 2007; Martina et al., 2005; Amadio et al., 2003) به‌طور کلی جهت تهیه منحنی‌های بارش آستانه از روش‌های مختلف نظیر روش بیزیان^۱ (Martina et al., 2005)، روش آنتروپی^۲ (Montesarchio et al., 2011) و روش غیر تصادفی^۳ استفاده می‌شود. در روش غیر تصادفی با استفاده از بارش‌های ثبت شده و شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب، بارش‌های بحرانی برای مدت‌های مشخص استخراج می‌شوند (Montesarchio et al., 2009). ضعف‌های اساسی استفاده از روش غیر تصادفی و شبیه‌سازی مدل بارش - رواناب جهت تعیین منحنی‌های بارش آستانه، اعمال فرضیات چون ثابت بودن الگوی توزیع زمانی بارش (Golian et al., 2010; Montesarchio et al., 2009) و ثابت بودن نفوذ در مدل بارش-رواناب (Golian et al., 2009; Montesarchio et al., 2010) و همچنین نادیده گرفتن جریانات پایه می‌باشد. از این رو در این تحقیق سعی شده است با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های الگوی توزیع زمانی بارش، پارامترهای نفوذ، جریانات پایه و هیدروگراف واحد، ضمن اعمال عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل بارش - رواناب در برآورد منحنی‌های بارش آستانه، ضعف‌های تحقیقات گذشته که ثابت بودن بعضی از

¹ Bayesian theory

² Entropy function

³ Deterministic

که در رابطه فوق a ، b و c پارامترهای توزیع احتمالاتی مثلثی می باشند.

جدول ۲. مشخصات توزیع احتمالاتی پارامترهای مدل HEC 1

پارامترهای مدل HEC 1	واحد	پارامترهای توزیع احتمالاتی		
		a	b	c
تلفات اولیه (Initial loss)	mm	0	1.35	0.5
کمبود رطوبت (moisture deficit)	-	0.06	0.45	0.17
مکش مرطوب (Wetting front suction)	mm	200	2000	440
هدایت هیدرولیکی (Hydraulic conductivity)	mm/hr	0.07	3.5	0.07
درصد سطح نفوذناپذیر	%	1.8	12	7.65
زمان تاخیر	min	150	900	463
دبی رودخانه در ابتدای واقعه	cms	0.5	19	3.55
دبی حدی در شروع شاخه نزولی	cms	2.5	35	19.38
ضریب کاهش دبی	-	1.01	7.56	1.19

مدل RPG

در این تحقیق علاوه بر عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC 1، عدم قطعیت متغیرهای ورودی مدل HEC 1 نظیر الگوی بارش نیز در تهیه منحنی بارش آستانه در نظر گرفته شده است. جهت تاثیر عدم قطعیت الگوی بارش از مدل RPG¹ استفاده شده است (شرافتی و ذهبیون، ۱۳۹۲). مدل RPG یک مدل آماری مبتنی بر شبیه سازی مونت کارلو می باشد. سه متغیر مهم در تولید الگوی توزیع زمانی بارش، عمق بارش، مدت بارش و نوع الگوی بارش می باشند. در مدل RPG در هر شبیه سازی مونت کارلو، پس از تولید تصادفی عمق بارش، متناظر با عمق بارش تولیدی، مدت رگبار به صورت تصادفی با استفاده از توزیع احتمالاتی مربوطه تولید می شود. همچنین بر اساس عمق بارش مذکور و با استفاده از توزیع احتمالاتی تجربی نوع بارش (نوع الگوی توزیع زمانی بارش)، نوع رگبار به صورت تصادفی تولید می شود. بر اساس عمق بارش، مدت بارش و نوع الگوی بارش تعیین شده و با استفاده از روش نمونه گیری مجدد^۲ نمونه هایی از ماتریس الگوی توزیع

(2005). همچنین از معادلات تلفات گرین آمپ (Golian et al., 2010)، جریان پایه نمایی (Boyogueno et al. 2012) و هیدروگراف واحد مصنوعی SCS (Majidi and Shahedi, 2012) جهت شبیه سازی رواناب استفاده شده است. جهت کمی کردن رفتار تصادفی پارامترهای مدل HEC 1 در تهیه منحنی های بارش آستانه، توزیع چگالی احتمال پارامترهای مذکور تعیین گردید. با توجه به خاصیت فیزیکی پارامترهای مدل HEC 1 که محدود می باشند، از توزیع احتمالاتی مثلثی مطابق رابطه ۱ استفاده شده است (Dorp and Kotz, 2002) مقادیر پارامترهای توزیع احتمالاتی مثلثی با استفاده از واسنجی ده واقعه مشاهداتی تعیین شده است. مقایسه سیلابهای شبیه سازی و مشاهداتی در مرحله واسنجی مدل HEC1 در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین مشخصات توزیع احتمالاتی پارامترهای مدل HEC 1 در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه سیلابهای شبیه سازی و مشاهداتی در مرحله

واسنجی مدل HEC 1				
ردیف	تاریخ سیلاب	حداکثر بیک سیلاب مشاهداتی (مترمکعب بر ثانیه)	حداکثر بیک سیلاب شبیه سازی (مترمکعب بر ثانیه)	ضریب همبستگی
۱	۱۳۶۶/۸/۱۵	۲۱.۳۰	۲۲.۶۰	۰.۹۳۵
۲	۱۳۶۶/۱۲/۱۳	۴۰.۹۰	۴۲.۵۰	۰.۹۲۸
۳	۱۳۶۶/۱۲/۱۸	۲۱.۹۰	۲۲.۱۰	۰.۹۷۳
۴	۱۳۶۷/۱۲/۱۷	۲۱.۷۰	۲۰.۰۰	۰.۹۰۳
۵	۱۳۷۱/۳/۱۷	۲۳.۵۰	۲۳.۶۰	۰.۹۲۲
۶	۱۳۷۲/۱۱/۱۱	۱۲.۶۰	۱۲.۵۰	۰.۸۵۵
۷	۱۳۷۲/۸/۱۳	۳۷.۹۰	۳۷.۸۰	۰.۹۴۲
۸	۱۳۷۲/۱۲/۲۵	۷۱.۰۰	۶۷.۷۰	۰.۹۶۱
۹	۱۳۷۳/۱/۹	۳۶.۵۰	۳۷.۴۰	۰.۸۵۴
۱۰	۱۳۷۹/۱/۴	۴۴.۵۰	۴۴.۶۰	۰.۹۶۷

$$f(x|a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a \\ \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{for } a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{for } c < x \leq b \\ 0 & \text{for } b < x \end{cases} \quad (1)$$

¹ Rain Pattern Generator
² Bootstrap resampling

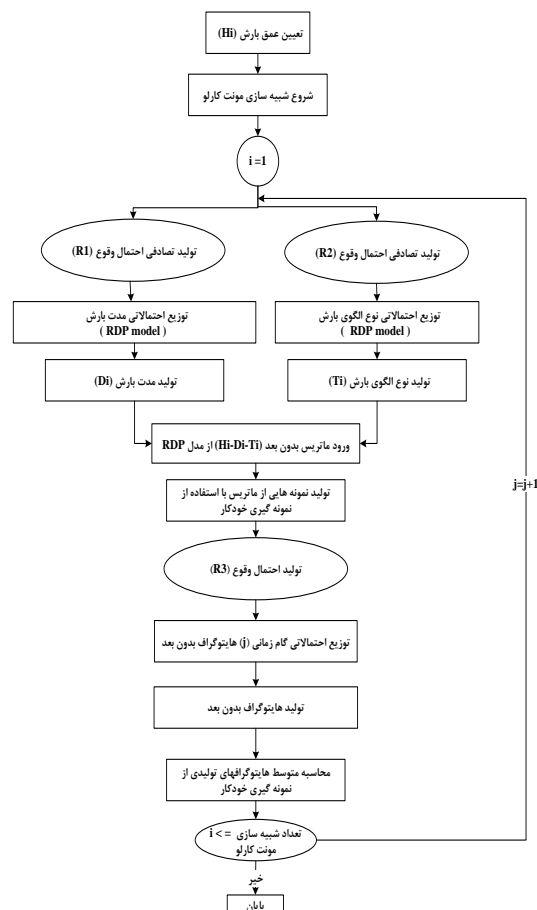
- ۱- در ابتدا مقادیر دبی هدف^۱ (Q_t)، حداکثر مدت بارش مدنظر (T_{max}) تعیین می‌گردد. در این تحقیق مقدار دبی هدف برابر ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه و حداکثر مدت بارش مدنظر برابر ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است.
- ۲- اولین مدت بارش (T_j) مشخص می‌گردد. در این تحقیق اولین مدت بارش برابر ۳ ساعت در نظر گرفته شده است.
- ۳- در این مرحله شبیه سازی مونت کارلو آغاز می‌گردد و مقدار اولیه به طور فرضی برای عمق بارش، $P(i,j)$ در نظر گرفته می‌شود.

- ۴- براساس $P(i,j)$ و T_j و با استفاده از مدل RPG الگوی توزیع زمانی بارش تولید می‌شود.
- ۵- مقادیر پارامترهای مدل HEC 1 با استفاده از توزیع احتمالاتی آنها به طور تصادفی تولید می‌گردند.
- ۶- بر اساس نتایج استخراج شده از مراحل ۴ و ۵ مدل HEC 1 اجرا شده و هیدروگراف سیلاب تولید می‌گردد.
- ۷- دبی حداکثر هیدروگراف تولیدی، $Q(i,j)$ ذخیره شده و با دبی هدف مقایسه می‌شود.
- ۸- بر اساس مقایسه $Q(i,j)$ و Q_t رابطه (۲) عمق بارش برای شبیه سازی بعدی $P(i+1,j)$ اصلاح می‌گردد.

$$p(i+1, j) = \begin{cases} p(i, j) \times (1 - \beta) & \text{if } Q(i, j) > Q_t (1 + \alpha) \\ p(i, j) / (1 - \beta) & \text{if } Q(i, j) < Q_t (1 - \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

که در رابطه فوق، β درصد تغییرات ارتفاع بارش در هر شبیه‌سازی و α درصد اختلاف از دبی هدف می‌باشند. در این تحقیق β و α برابر ۵ درصد (۰/۰۵) در نظر گرفته شده است. اگر $Q(i, j)$ در هیچ یک از شروط رابطه ۲ نباشد یعنی $Q_t (1 - \alpha) \leq Q(i, j) \leq Q_t (1 + \alpha)$ در این حالت $P(i,j)$ به عنوان بارش آستانه دبی هدف برای یک واقعه بارش با مدت T_j انتخاب می‌شود.

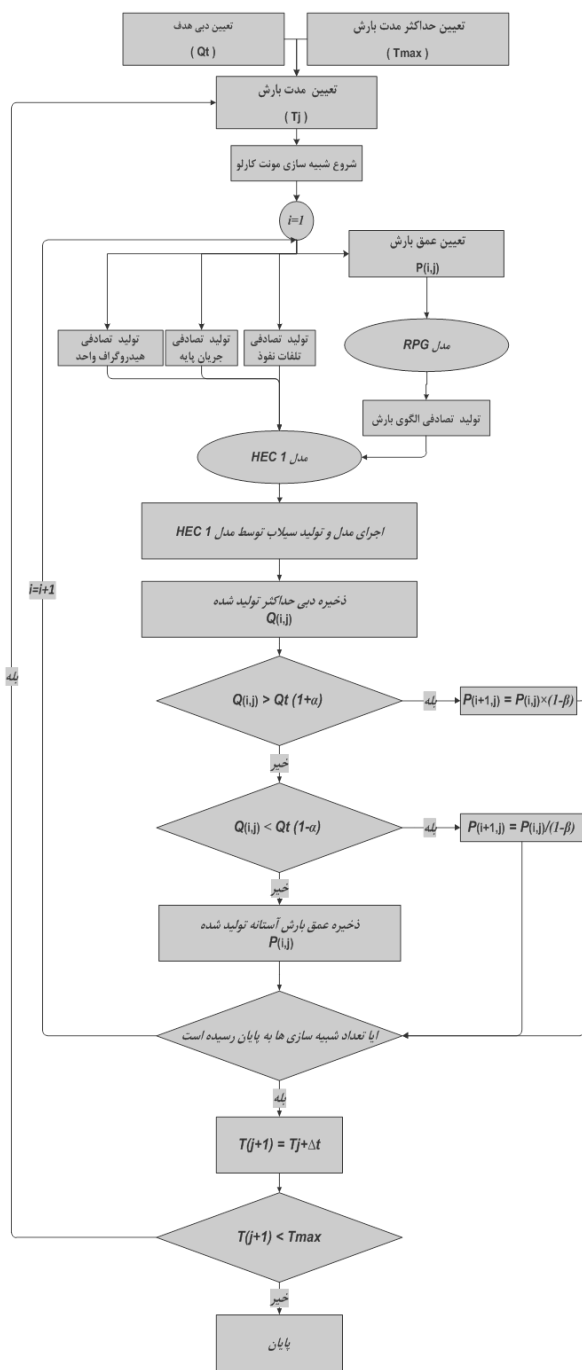
زمانی بارش بدون بعد تولید می‌شوند. پس از استخراج ماتریس بدون بعد الگوی توزیع زمانی بارش، با استفاده از توزیع احتمالاتی عمق بارش - الگوی بارش، الگوی بارش بدون بعد تولید می‌شود. بدین ترتیب الگوی توزیع زمانی بارش برای یک عمق مد نظر تولید می‌شود. این عمل بر اساس تعداد شبیه سازی های مونت کارلو انجام شده و در نهایت میانگین الگوهای رگبار حاصل از شبیه سازی ها به عنوان الگوی رگبار با احتمال وقوع مد نظر تعیین می‌شود. الگوریتم تولید الگوهای رگبار در مدل RPG در شکل (۱) ارایه شده است.



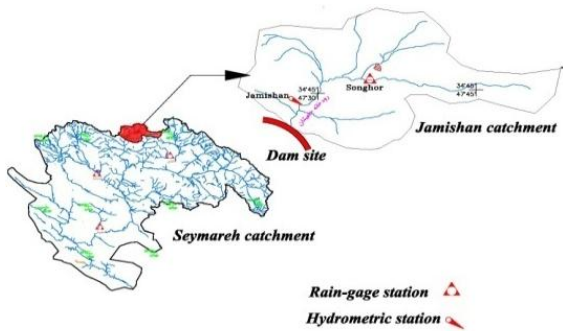
شکل ۱. الگوریتم تولید الگوهای بارش در مدل RPG (شرافتی و ذهبیون، ۱۳۹۲)

پس از کمی کردن رفتار تصادفی پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو منحنی‌های بارش آستانه تهیه می‌شود. روش شناسی تهیه منحنی‌های بارش آستانه به شرح ذیل می‌باشد.

¹ Target discharge



شکل ۲. الگوریتم تهیه منحنی بارش آستانه



شکل ۳. موقعیت حوضه آبریز سد جامیشان در حوضه آبریز سیمره

۹- پس از اتمام شبیه سازی های مونت کارلو برای وقایع مختلف بارش با مدت T_j ، بر اساس افزایش یک گام زمانی (Δt) مدت بارش جدید، $T(j+1)$ ، مطابق رابطه ۳ محاسبه می شود. در ادامه شبیه سازی مونت کارلو مطابق مراحل ۲ تا ۸ برای مدت بارش جدید انجام می گردد. در این تحقیق تعداد شبیه سازی های مونت کارلو جهت استخراج منحنی بارش آستانه برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

$$T(i+1, j) = T(i, j) + \Delta t \quad (3)$$

که در رابطه فوق Δt ، گام زمانی افزایش مدت بارش می باشد که در این تحقیق ۳ ساعت در نظر گرفته شده است.

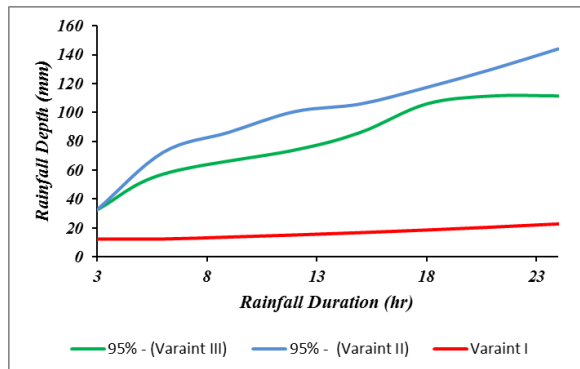
۱۰- کلیه مراحل فوق جهت استخراج نقاط مختلف منحنی بارش آستانه تا مدت بارش T_{max} انجام می پذیرد. ۱۱- در پایان حد بالا (۹۵٪) و حد پایین (۵٪) و حد میانه (۵۰٪) منحنی های بارش آستانه با استفاده از آنالیز رتبه بندی محاسبه می گردد (Oosterbaan 1994). الگوریتم تهیه منحنی های بارش آستانه در شکل (۲) ارایه شده است.

منطقه مورد مطالعه

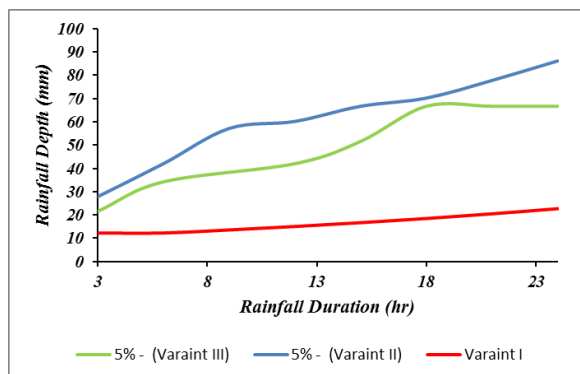
در این تحقیق از داده های حوضه آبریز سد جامیشان با مساحت ۵۲۴/۰۷ کیلومتر مربع استفاده شده است. این حوضه آبریز از نظر تقسیمات کشوری جزء استان کرمانشاه و بخشی از سرشاخه های حوضه رودخانه سیمره محسوب می شود. حوضه آبریز مورد استفاده در این تحقیق در حد فاصل 32° - 34° تا 53° - 34° عرض شمالی و 22° - 47° تا 52° - 47° طول شرقی می باشد. بلندترین نقطه آن ۳۰۰۰ متر از سطح دریا، متوسط بارندگی سالانه آن ۴۴۱ میلیمتر، متوسط تبخیر از سطح آزاد آن ۱۵۳۴ میلیمتر و متوسط دمای سالانه آن ۱۰ درجه سانتی گراد می باشد. در این تحقیق از ایستگاه باران سنجی سنقر و ایستگاه هیدرومتری جامیشان استفاده است. این حوضه آبریز در شکل ۳ ارایه شده است.

بحث و نتایج

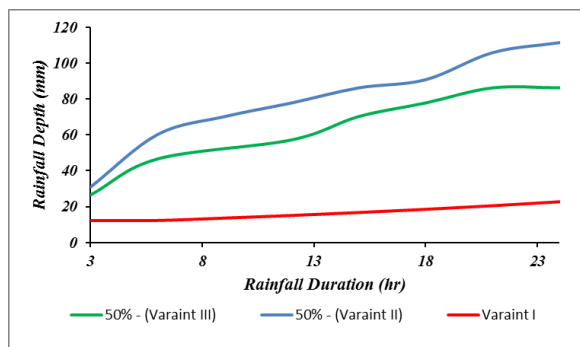
شکل های (۴) تا (۶) ارایه شده است.



شکل ۴. مقایسه حد بالای منحنی بارش آستانه در گزینه های مختلف



شکل ۵. مقایسه حد پایین منحنی بارش آستانه در گزینه های مختلف



شکل ۶. مقایسه حد میانه منحنی بارش آستانه در گزینه های مختلف

با ملاحظه شکل های (۴) تا (۶) مشخص می گردد، در گزینه ۱ تغییرات عمق بارش آستانه بین بارش ۳ ساعته و بارش ۲۴ ساعته در حدود ۱۰/۵ میلیمتر است و این مقدار تغییرات بسیار کم می باشد. به عبارت دیگر این منحنی همانطور که نشان داده شده است مانند یک منحنی خطی با مقدار ثابت می باشد و با طبیعت مسئله متناقض است و این تناقض ناشی از این می باشد که پاسخ هیدرولوژیکی

بر اساس روش شناسی ارایه شده در این تحقیق منحنی بارش آستانه به ازای احتمال وقوع ۵ و ۹۵ درصد برای حوضه آبریز سد جامشان تعیین شده است. جهت بررسی تاثیر عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 بر روی منحنی بارش آستانه برای سه گزینه مشروح در ذیل منحنی های بارش آستانه های تهیه گردید.

گزینه I؛ در این گزینه منحنی بارش آستانه بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 تهیه شده است. مقادیر پارامترهای مدل HEC 1 در این گزینه بر اساس واسنجی واقعه ۱۳۷۲/۱۲/۲۵ استخراج شده و در جدول (۳) ارایه شده است. الگوی بدون بعد بارش در گزینه ۱ بطور ثابت و براساس واقعه مورخ ۱۳۷۲/۱۲/۲۵ انتخاب شده است.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای مدل HEC 1 در گزینه I

پارامترهای مدل	واحد	مقدار
تلفات اولیه (Initial loss)	mm	0.3
کمبود رطوبت (moisture deficit)	-	0.45
مکش مرطوب (Wetting front suction)	mm	900
هدایت هیدرولیکی (Hydraulic conductivity)	mm/hr	0.22
درصد سطح نفوذناپذیر	%	8
زمان تاخیر	min	500.4
دبی رودخانه در ابتدای واقعه	cms	10
دبی حدی در شروع شاخه نزولی	cms	35
ضریب کاهش دبی	-	1.42

گزینه II؛ در این گزینه منحنی بارش آستانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC 1 نظیر پارامترهای تلفات، جریان پایه و هیدروگراف واحد تهیه شده است. در گزینه III نیز منحنی بارش آستانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC 1 نظیر پارامترهای تلفات، جریان پایه و هیدروگراف واحد و متغیرهای مدل HEC 1 نظیر الگوی زمانی بارش تهیه شده است. با استفاده از روش شناسی این تحقیق برای گزینه های مختلف تعریف شده منحنی بارش آستانه به ازای احتمال وقوع ۵، ۵۰ و ۹۵ درصد استخراج شده و در

$$hit\ rate = \frac{H}{H + M} \quad (۳)$$

$$false\ rate = \frac{F}{F + C} \quad (۴)$$

که در روابط فوق، H؛ تعداد وقایعی است که در آن سیلاب هدف ایجاد شده است و سیستم آشکارساز سیلاب حدی نیز عمق بارش متناظر با آن وقایع را بیش از بارش آستانه پیش‌بینی کرده است. M؛ تعداد وقایعی است که در آن سیلاب هدف ایجاد شده است ولی سیستم آشکارساز سیلاب حدی عمق بارش متناظر با آن وقایع را کمتر از بارش آستانه پیش‌بینی کرده است. F؛ تعداد وقایعی است که در آن سیلاب هدف ایجاد نشده است ولی سیستم آشکارساز سیلاب حدی عمق بارش متناظر با آن وقایع را بیشتر از بارش آستانه پیش‌بینی کرده است. C؛ تعداد وقایعی است که در آن سیلاب هدف ایجاد نشده است و سیستم آشکارساز سیلاب حدی عمق بارش متناظر با آن وقایع را کمتر از بارش آستانه پیش‌بینی کرده است. با توجه به تعاریف انجام شده و تقسیم‌بندی چهارگانه فوق، دقت یک سیستم هشدار سیلاب را بر اساس این دو شاخص اندازه‌گیری می‌شود.

فرض کنید هزینه ناشی از ایجاد تمهیدات جهت کنترل خطر سیل C2 باشد. همچنین هزینه ناشی از ایجاد خسارت سیل C1 در حالت عدم هشدار باشد و هزینه ناشی از ایجاد خسارت سیل C3 در حالت هشدار باشد. از این سود و هزینه‌های ایجاد شده در حالت‌های نرخ هشدار صحیح و نرخ هشدار اشتباه به صورت ذیل می‌باشد.

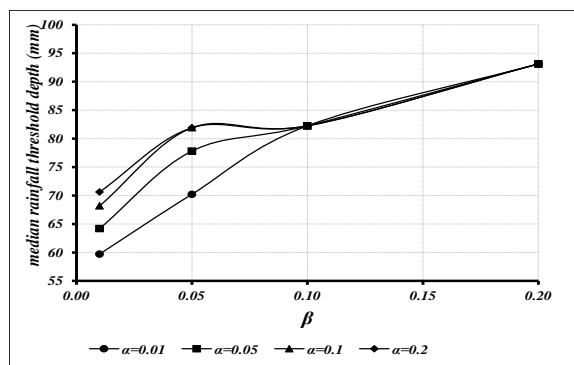
$$\begin{cases} C1 > C3 > C2 \\ C1 > C3 + C2 \end{cases} \quad (۵)$$

$$BMC_{hit} = \frac{BMC_h}{BMC_h + BMC_m} = \frac{(C1 - C2 - C3)}{(C1 - C2 - C3) + (0 - C2)} = \frac{(C1 - C2 - C3)}{(C1 - 2C2 - C3)} > 1 \quad (۶)$$

$$BMC_{false} = \frac{BMC_f}{BMC_f + BMC_c} = \frac{(0 - C2)}{(0 - C2) + (0 - 0)} = 1 \quad (۷)$$

حوضه آبریز یک رفتار غیرخطی است و برای وقوع سیلاب، وقایع بلند مدت، داری عمق بارش بیشتری نسبت به وقایع کوتاه مدت می‌باشند. از این رو استفاده از این منحنی در سامانه هشدار سیل حوضه آبریز سد جامیشان با اشتباه در هشدار سیل، باعث گمراهی تصمیم‌گیرندگان می‌شود. این شرایط در گزینه II و III ملاحظه نمی‌شود. بطوریکه منحنی‌های بارش آستانه رفتار غیر خطی را نشان می‌دهند و تغییرات عمق بارش آستانه بین بارش ۳ ساعته و بارش ۲۴ ساعته در حد بالا (۹۵٪) در هر دو گزینه بیش از ۷۱ میلی‌متر و در حد پایین (۵٪) بیش از ۴۴ میلی‌متر می‌باشند.

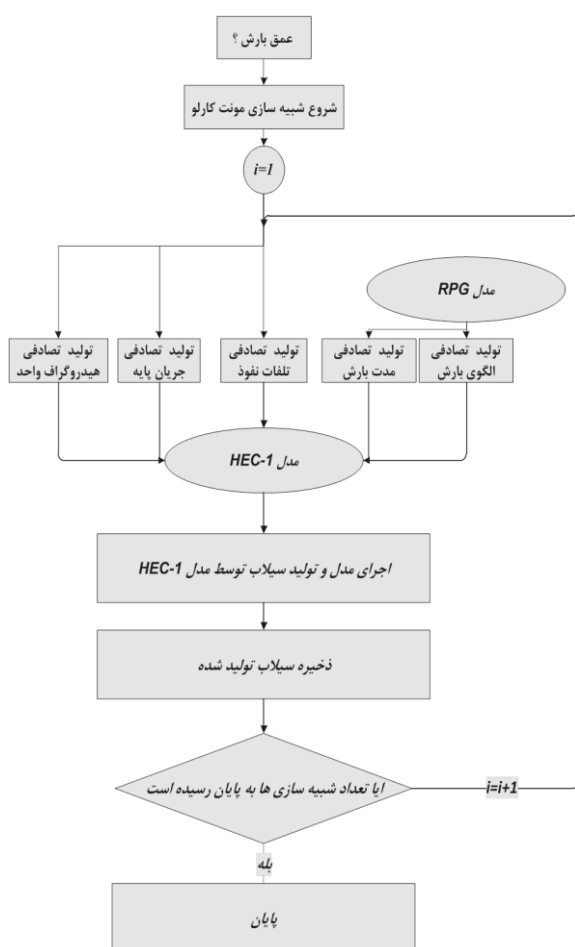
جهت تحلیل حساسیت روش شناسی تولید منحنی بارش آستانه، منحنی بارش آستانه ۱۲ ساعته با احتمال وقوع ۵۰ درصد برای مقادیر مختلف α و β استخراج گردید. منحنی‌های استخراج شده در شکل (۷) ارائه شده است. با بررسی شکل (۷) مشخص گردید که در کلیه مقادیر α با افزایش مقدار β ، عمق بارش آستانه افزایش می‌یابد. همچنین برای مقادیر β بزرگتر از ۰/۱، تغییرات مقدار α بر مقدار عمق بارش آستانه تأثیری ندارد.



شکل ۷. تغییرات عمق بارش آستانه به ازای تغییرات α و β (مدت بارش ۱۲ ساعت)

در این تحقیق علاوه بر تحلیل‌های کیفی فوق، کنترل کمی دقت گزینه‌های مذکور نیز انجام گردید. مبنای مقایسه کمی دقت گزینه‌های مختلف سیستم هشدار، نرخ هشدار صحیح (hit rate) و نرخ هشدار اشتباه (False rate) می‌باشد.

گزینه دیگر دارای دقت بیشتری است. همچنین گزینه I که در تهیه منحنی بارش آستانه آن عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 لحاظ نشده است با HMF rate برابر ۵/۷۴ نسبت به دو گزینه دیگر دقت بسیار پایین تری دارد. بطوریکه بر اساس این شاخص دقت گزینه I نسبت به گزینه III ۱۰ برابر کمتر می باشد.



شکل ۸ الگوریتم تولید سیلاب توسط فرآیند مونت کارلو

جدول ۴- مقایسه شاخص های اندازه گیری دقت سیستم هشدار سیل

گزینه	hit rate	false rate	HMF rate
I	100	94.26	5.74
II	43.96	2.83	41.13
III	67.93	11.25	56.68

که در روابط فوق BMC اختلاف سود از هزینه می باشد. با توجه به روابط (۶) و (۷) مشخص می گردد در یک سیستم هشدار سیلاب اهمیت نرخ هشدار صحیح بیشتر از اهمیت نرخ هشدار اشتباه می باشد و اگر C2 در مقابل C1 و C3 ناچیز فرض شود، مقدار BMC_{hit} نیز برابر یک می باشد و در این حالت اهمیت نرخ هشدار صحیح مساوی اهمیت نرخ هشدار اشتباه می باشد. لذا با توجه به توضیحات فوق هیچ یک از این دو شاخص به تنهایی امکان مقایسه دقت گزینه های مختلف سیستم هشدار سیل را میسر نمی کنند. از این رو در این تحقیق شاخصی به نام نرخ اختلاف هشدار صحیح از هشدار اشتباه^۱ HMF rate به صورت رابطه (۷) تعریف شده است تا بوسیله آن بتوان گزینه های مختلف هشدار سیل را با هم مقایسه کرد. به لحاظ ارزش اقتصادی اختلاف سود از هزینه شاخص HMF rate همواره بزرگتر یا برابر ۱ می باشد از این رو در یک سیستم هشدار سیل هرچه این شاخص بزرگتر باشد نشان دهنده دقت بیشتر آن سیستم هشدار سیل می باشد.

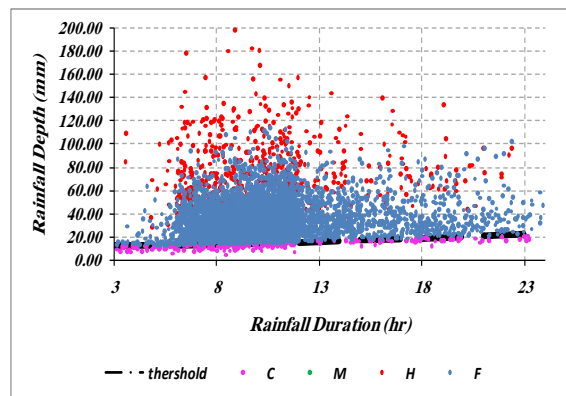
$$HMF\ rate = hit\ rate - false\ rate \quad (7)$$

در این تحقیق بر اساس ۵۰۰۰ واقعه تولیدی توسط شبیه سازی مونت کارلو و روش شناسی ارایه شده در شکل (۸)، مقادیر نرخ هشدار صحیح و نرخ هشدار اشتباه و نرخ اختلاف هشدار صحیح از هشدار اشتباه برای گزینه مدنظر سیستم هشدار سیل محاسبه و در جدول (۴) ارایه شده است. تقسیم بندی چهارگانه وقایع تولیدی نسبت به منحنی بارش آستانه ۵۰ درصد در گزینه های مختلف سیستم هشدار سیل در اشکال (۹) تا (۱۱) ارایه شده است. با ملاحظه شاخص HMF rate در گزینه های مختلف مشخص می گردد، گزینه III که در تهیه منحنی بارش آستانه عدم قطعیت های پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 لحاظ شده است با HMF rate برابر ۵۶/۶۸ نسبت به دو

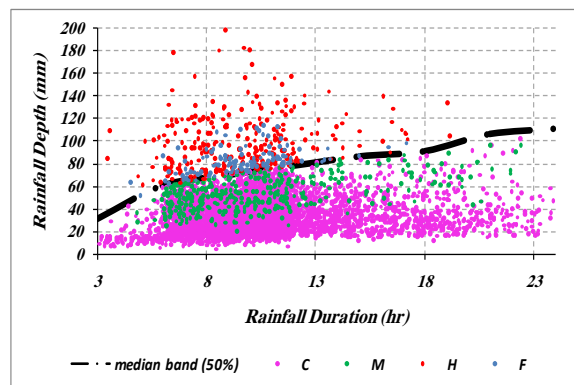
¹ Hit Minus False Rate

نتیجه‌گیری

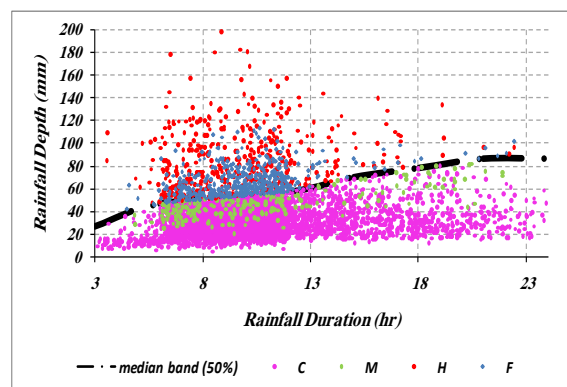
در این تحقیق جهت بررسی تاثیر عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 بر روی منحنی بارش آستانه برای سه گزینه تعریف و تحلیل گردید. در گزینه I منحنی بارش آستانه بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 تهیه شده است. در گزینه II، منحنی بارش آستانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC 1 نظیر پارامترهای تلفات، جریان پایه و هیدروگراف واحد تهیه شده است. در گزینه III نیز منحنی بارش آستانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC 1 نظیر پارامترهای تلفات، جریان پایه و هیدروگراف واحد و متغیرهای مدل HEC 1 نظیر الگوی زمانی بارش تهیه شده است. همچنین شاخصی به نام نرخ اختلاف هشدار صحیح از هشدار اشتباه HMF rate تعریف گردید تا بوسیله آن بتوان گزینه‌های مختلف هشدار سیل را با هم مقایسه کرد. نتایج نشان داد، گزینه III که در تهیه منحنی بارش آستانه عدم قطعیت‌های پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 لحاظ شده است با HMF rate برابر $56/68$ نسبت به دو گزینه دیگر دارای دقت بیشتری است. همچنین گزینه I که در تهیه منحنی بارش آستانه آن عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 لحاظ نشده است با HMF rate برابر $5/74$ نسبت به دو گزینه دیگر دقت بسیار پایین‌تری دارد. بطوریکه بر اساس این شاخص دقت گزینه I نسبت به گزینه III برابر کمتر می‌باشد. لذا استخراج منحنی‌های بارش آستانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پارامترها و متغیرهای مدل HEC 1 در مقایسه با منحنی‌های بارش آستانه متداول دقت بسیار بالاتری دارند.



شکل ۹- تقسیم بندی چهارگانه وقایع تولیدی نسبت به منحنی بارش آستانه در گزینه I



شکل ۱۰- تقسیم بندی چهارگانه وقایع تولیدی نسبت به منحنی بارش آستانه ۵۰ درصد در گزینه II



شکل ۱۱- تقسیم بندی چهارگانه وقایع تولیدی نسبت به منحنی بارش آستانه ۵۰ درصد در گزینه III

فهرست منابع

بهزادفر، م.، صادقی، س.ص.، خانجانی، م.ج. و حزباوی، ز. ۱۳۹۱. تأثیرپذیری تولید رواناب و رسوب خاک‌های تحت چرخه انجماد-ذوب در شرایط شبیه‌ساز باران. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۱): ۱۳-۲۴.

شرافتی، ا. و ذهبیون، ب. (۱۳۹۲). تحلیل عدم قطعیت و تولید آماری الگوی رگبار در حوضه سیمره. مجله پژوهش آب ایران. ۷ (۱۳). ۹۷-۱۰۸.

- Alfieri, L., Velasco, D. and Thielen, J. 2011. Flash flood detection through a multi-stage probabilistic warning system for heavy precipitation events. *Adv. Geosci.* 29, 69–75.
- Amadio, P., Mancini, M., Menduni, G., Rabuffetti, D. and Ravazzani, G. 2003. A real-time flood forecasting system based on rainfall thresholds working on the Arno Watershed: definition and reliability analysis. In *Proceedings of the 5th EGS Plinius Conference held at Ajaccio, Corsica, France*.
- Annunziati, A., Focardi, A., Focardi, P., Martello, S. and Vannocci, P. 1999. Analysis of the rainfall thresholds that induced debris flows in the area of Apuan Alps – Tuscany, Italy, *Plinius Conference '99: Mediterranean Storms*, Ed. Bios., 485–493.
- Bacchini M, and Zannoni, A. 2003. Relations between rainfall and triggering of debris-flow: a case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). *Nat Hazard Earth System*, 3: 71–79.
- Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F. and Sangati, M. 2007. Hydrometeorological analysis of the August 29, 2003 flash flood in the eastern Italian Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 8 (5), 1049–1067.
- Boyogueno, S.H, Mbessa, M. and Tatietse, T.T. 2012. Prediction of Flow-Rate of Sanaga Basin in Cameroon Using HEC-HMS Hydrological System: Application to the Djerem Sub-Basin at Mbakaou. *Energy and Environment Research*; 2(1): 205-216.
- Bronstert, A., Ghazi, A., Hlandy, J., Kundzewicz, Z. and Menzel, L. 1998. The Odra/Oder Flood in Summer 1997. *Proceedings of the European Expert Meeting in Potsdam*, 18. May 1998, Potsdam
- Caine, N. 1980. The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows. *Geog Ann A* 62:23–27.
- Carpenter, T. M., Sperflage J. A., Georgakakos K. P., Sweeney, T., and Fread, D. L. 1999. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems, *J. Hydrol.*, 224, 21–44.
- Collier, C. G. (2007). Flash flood forecasting: What are the limits of predictability?, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 3–23.
- Crosta, G. B. and Frattini, P. 2000. Rainfall thresholds for soil slip and debris flow triggering, *Proceedings of the EGS 2nd Plinius Conference on Mediterranean Storms*, Ed. Bios.
- Dahal, R.K., Hasegawa, S. 2008. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya, *Geomorphology*, 100 (3-4), 429-443.
- Dorp, R, Kotz .S. 2002. A novel extension of the triangular distribution and its parameter estimation. *The Statistician*. 51, Part 1, pp. 63–79.
- Georgakakos, K. P. 2006. Analytical results for operational flash flood guidance, *J. Hydrol.*, 317, 81–103.
- Golian Saeed, Saghafian Bahram and Maknoon Reza. 2010. Derivation of probabilistic thresholds of spatially distributed rainfall for flood forecasting", *Water Resources Management*, 24 (13): 3547-3559.
- Javelle, P., Fouchier, C., Arnaud, P., and Lavabre, J. 2010. Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations, *J. Hydrol.*, 394, 267–274.
- Kobold, M. and Sušelj, K. 2005. Precipitation forecasts and their uncertainty as input into hydrological models, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 322-332.
- Majidi.A, Shahedi.K. 2012. Simulation of Rainfall-Runoff Process Using Green-Ampt Method and HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran). *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(1): 5-9
- Martina, M. L. V., Todini, E., and Libralon, A. 2005. A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 413–426.
- Maskey, Sh., Guinot, V. and Price, R. K., 2004. Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modelling: a fuzzy set approach, *Advances in Water Resources*, Volume 27, Issue 9, Pages 889-898.
- Medicino .G. 2006. Rainfall and hydrometric thresholds for flood warning. *Proceedings of the AMHY-FRIEND, International Workshop on Hydrological Extremes*, University of Calabria, Cosenza (Italy), May 3-4.
- Montesarchio, V., Lombardo, F., and Napolitano, F. 2009. Rainfall thresholds and flood warning: an operative case study, *Nat. Hazards Earth System Science*, 9: 135–144.
- Montesarchio, V., Ridolfi, E., Russo, F., Napolitano, F. 2011. Rainfall threshold definition using an entropy decision approach and radar data. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 2061–2074.
- Montesarchio, V., Napolitano, F., Rianna, M., Ridolfi, E., Russo, F. and Sebastianelli, S. 2015. Comparison of methodologies for flood rainfall thresholds estimation. *Natural Hazards*, 75(1): 909-934.
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E. and Anquetin, S. 2008. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology* 362 (3-4), 274–290.

- Neary, D. G. and Swift, L. W. 1987. Rainfall thresholds for triggering a debris flow avalanching event in the southern Appalachian Mountains, *Rev. Eng. Geol.*, 7, 81–95.
- Shrestha, D.L. 2009. *Uncertainty Analysis in Rainfall-Runoff Modelling: Application of Machine Learning Techniques*, P.H.D thesis in Hydroinformatics with Distinction, Delft university.
- Thieken, A. H., Kreibich, H., M'uller, M., and Merz, B. 2007. Coping with floods: preparedness, response and recovery of flood affected residents in Germany in 2002, *Hydrology Science Journal*, 52 (5): 1016–1037.
- Toth, E. 2015. Estimation of flood warning runoff thresholds in ungauged basins with asymmetric error functions. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 12(6): 100-109.
- USACE. 1998. HEC-1 flood hydrograph package user manual. Davis, CA: Hydrologic Engineering Centre.



Enhancement of flood warning system performance using stochastic rainfall threshold curve

Ahmad Sharafati^{*1}

1) Assistant Prof., Technical and Engineering Department, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Corresponding author email: asharafati@srbiau.ac.ir

Received: 27-09-2015

Accepted: 27-12-2015

Abstract

Flood warning systems are the important and effective approaches to prevention or mitigation life and property loss in any flood event. All flood warning systems use one or more flood event indicator such as climatological signals. Rainfall threshold curve is one the conventional flood events indicator in many flood warning systems. In this respect, observed or forecasted rainfall was compared with rainfall threshold to notify flood event. Application of some assumptions like constant rainfall patterns and rainfall-runoff model parameters such as loss and base flow is known as the main drawback of using conventional rainfall threshold curves. This study has considered uncertainties of rainfall-runoff model parameters and variables for extracting rainfall threshold curve, while solving shortcomings of the previous works. Results of this study demonstrated that extraction of the rainfall threshold curves by considering uncertainties of the mentioned variables and parameters represents a very higher accuracy respect to conventional rainfall threshold curves.

Keywords: flood warning system; HEC1 model; rainfall threshold curves; uncertainty