

تحلیل عدم قطعیت در برآورد سیلاب با مدل HEC-HMS در حوضه آبریز سد جامیشان

احمد شرافتی^۱، باقر ذهبیون^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری عمران- مهندسی آب، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵

bagher@iust.ac.ir

چکیده- برآورد سیلاب با عدم قطعیت‌هایی ناشی از تغییرات متغیرهای ورودی مدل بارش- رواناب مانند بارش، پارامترهای مدل مانند تلفات و ساختار مدل همراه است. برآورد سیلاب طراحی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های متغیرهای تصادفی مؤثر بر آن، یکی از مباحث مهم در طراحی سازه‌های هیدرولیکی است. در این تحقیق، با استفاده از مدل آماری تولید بارش (RPG)، مدل بارش-رواناب HEC-HMS و روش مونت کارلو، عدم قطعیت متغیرهای ورودی مدل بارش-رواناب نظیر الگوی توزیع زمانی بارش، عمق بارش، مدت بارش و پارامترهای مدل بارش-رواناب تک واقعه HEC-HMS مانند جریان پایه، تلفات و هیدروگراف واحد ارزیابی می‌شود. یکی دیگر از موارد بررسی شده در این تحقیق، نحوه انتشار و چگونگی همبستگی عدم قطعیت متغیرهای ورودی و پارامترهای مدل HEC-HMS در گزینه‌های مختلف است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر بر عدم قطعیت بیشینه و حجم سیلاب، ناشی از عدم قطعیت مدت بارش، الگوی توزیع زمانی بارش و تلفات است.

کلیدواژگان: تحلیل عدم قطعیت، سیلاب، HEC-HMS، جامیشان.

۱ مقدمه

سازه‌های هیدرولیکی است (Hoybye and Rosbjerg,

۱۹۹۹) روش‌های متداول در تخمین بیشینه سیلاب، بر روش‌های آماری تحلیل فراوانی مبتنی است (Aronica and Candela, ۲۰۰۷) در این روش‌ها فقط عدم قطعیت ذاتی سیلاب در نظر گرفته می‌شود (Afshar et al., ۲۰۰۹; Afshar et al., ۱۹۹۴; Afshar and Marino, ۱۹۹۰). این رو عدم قطعیت سایر متغیرهای تصادفی مانند بارش، تلفات و جریان پایه در تعیین سیلاب طراحی در نظر گرفته نمی‌شود. شناخت دقیق متغیرهای تصادفی ورودی به مدل بارش-رواناب، کمی‌سازی و انتشار تغییر پذیری

برآورد سیلاب با عدم قطعیت‌های مرتبط با متغیرهای ورودی مدل بارش-رواناب مانند بارش، پارامترهای مدل نظیر تلفات و ساختار مدل همراه است. (Li et al., ۲۰۱۰; Liu and Gupta, ۲۰۰۷; Wagener and Gupta ۲۰۰۵; Maskey and Price, ۲۰۰۳; Beven, ۲۰۰۱; Høybye and Rosbjerg, ۱۹۹۹). برآورد سیلاب طراحی با استفاده از مدل‌های بارش-رواناب و با در نظر گرفتن تغییرات متغیرهای تصادفی، یکی از مباحث مهم در طراحی

روش‌های بالا به جز آخری روش‌های مبتنی بر ویژگی‌های آماری است. در این روش‌های آماری خواص متغیرهای تصادفی با استفاده از توزیع احتمال آنها توصیف می‌شود. تفاوت اصلی روش‌های آماری در پیچیدگی‌های ریاضی و داده‌های مورد نیاز است. در این تحقیق برای کمی کردن عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل بارش-رواناب برآورد سیلاب از روش مونت کارلو استفاده شده است. هدف اصلی این تحقیق، تحلیل انتشار عدم قطعیت متغیرهای تصادفی مؤثر بر هیدروگراف سیلاب برای گزینه‌های مختلف است. برای تحقق این هدف از شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل آماری تولید الگوی زمانی بارش (¹RPG) و مدل بارش-رواناب HEC-HMS (زادبر و همکاران ۱۳۸۷) و (Anderson et al., ۲۰۰۱; Mc Lin et al., ۲۰۰۲; Emerson et al., ۲۰۰۵; Yusop et al., ۲۰۰۷; Ayka, ۲۰۰۸; Chu and Steinman, ۲۰۰۹; Nasri et al., ۲۰۱۱; USACE ۲۰۰۰) استفاده شده است. در این تحقیق از معادلات تلفات گرین آمپ (Golian et al., ۲۰۱۰)، جریان پایه‌نمایی (Boyogueno et al., ۲۰۱۲) و هیدروگراف واحد مصنوعی SCS (Majidi and Shahedi, ۲۰۱۲) برای شبیه‌سازی رواناب استفاده است. پس از تحلیل عدم قطعیت متغیرهای ورودی مدل بارش-رواناب شامل الگوی زمانی بارش، مدت بارش و پارامترهای مدل بارش-رواناب تلفات، جریان پایه و هیدروگراف واحد، انتشار و همبستگی عدم قطعیت متغیرها و پارامترهای مدل HEC-HMS در گزینه‌های مختلف تحلیل می‌شود. نوآوری این تحقیق، کمی‌سازی انتشار عدم قطعیت متغیرها و پارامترهای مدل HEC-HMS در عدم قطعیت سیلاب خروجی است.

۲- مواد و روش‌ها

آنها در عدم قطعیت سیلاب یک از مباحث مهم است. به‌طور کلی روش‌های تحلیل عدم قطعیت مدل‌های بارش-رواناب را می‌توان به شش دسته زیر طبقه‌بندی کرد (Shrestha ۲۰۰۹):

۱- روش تحلیلی (Tung, ۱۹۹۶): در این روش، توزیع احتمال سیلاب بر اساس سایر متغیرهای تصادفی محاسبه می‌شود. این روش به علت پیچیدگی و رفتار غیر خطی سیلاب در تحلیل عدم قطعیت سیلاب بسیار کم به کار رفته است (Shrestha, ۲۰۰۹). ۲- روش‌های تقریبی مانند (Tung, ۱۹۸۷; Melching, ۱۹۹۲; Maskey and Guinot, ۲۰۱۰; Wu et al., ۲۰۰۳) سادگی این روش‌ها نظیر FOSM و AFOSM و نیازمندی آنها به دو آماره (میانگین و واریانس)، از مزایای این روش‌ها است. ۳- شبیه‌سازی مونت کارلو (Kuchment and Gelfan, ۱۹۹۱; Kuczera and Parent, ۱۹۹۸; Yuet et al., ۲۰۰۱; Kuchment et al., ۲۰۰۳; Butts et al., ۲۰۰۴; Hong et al., ۲۰۰۶; Diaz-Ramirez, ۲۰۰۷; McCuen, ۲۰۰۹).

در میان روش‌های موجود برای تحلیل عدم قطعیت، شبیه‌سازی مونت کارلو بهترین روش برای تعیین توزیع احتمال خروجی مدل‌های غیرخطی است (Melching, ۲۰۰۹; Shrestha, ۱۹۹۵). ۴- روش تخمین احتمال تعمیم یافته "GLUE" (حیدری و همکاران ۱۳۸۳، ۱۳۸۴) و (Aronicaa et al., ۱۹۹۸; Uhlenbrook et al., ۱۹۹۹; Beven and Freer, ۲۰۰۱; Montanari, ۲۰۰۵; Merwade et al., ۲۰۰۷; Younger et al., ۲۰۰۹; Golian et al., ۲۰۱۰, ۲۰۱۱)

۵- روش‌های مبتنی بر تحلیل خطای خروجی مدل (Montanari and Brath, ۲۰۰۴; Kobold and Suselj, ۲۰۰۸; Habib et al., ۲۰۰۶; Olsson, ۲۰۰۵). ۶- نظریه منطق فازی (Aronicaa et al., ۱۹۹۸; Maskey et al., ۲۰۰۴; Hostacheet al., ۲۰۱۱; Shrestha and Nestmann, ۲۰۰۹).

در این تحقیق عدم قطعیت سیلاب خروجی حوضه، ناشی از متغیرهای تصادفی ورودی و پارامترهای مدل HEC-HMS به طور کمی ارزیابی شده است. همچنین چگونگی همبستگی و انتشار عدم قطعیت متغیرها و پارامترهای تصادفی مدل در عدم قطعیت سیلاب خروجی از مدل بررسی شده است. برای تحلیل عدم قطعیت از شبیه سازی مونت کارلو استفاده شده است که یک روش تحلیل عدم قطعیت آماری و مبتنی بر توزیع احتمال متغیرهای تصادفی است. در این روش در هر شبیه سازی، با تولید تصادفی متغیرهای تصادفی با استفاده از توزیع احتمال متغیرها و اجرای مدل سیستم، خروجی تولید شده و با توجه به خروجی های تولید شده در سیستم و با استفاده از شاخص های عدم قطعیت مانند ضریب تغییرات یا با تعیین توزیع احتمال خروجی ها، عدم قطعیت خروجی تحلیل می شود. با اجرای تعداد زیادی شبیه سازی و تولید نمونه هایی از خروجی، تحلیل عدم قطعیت متغیرها و پارامترهای تصادفی و خروجی سیستم امکان پذیر می شود. مراحل شبیه سازی مونت کارلو در شکل ۱ نشان داده شده است.

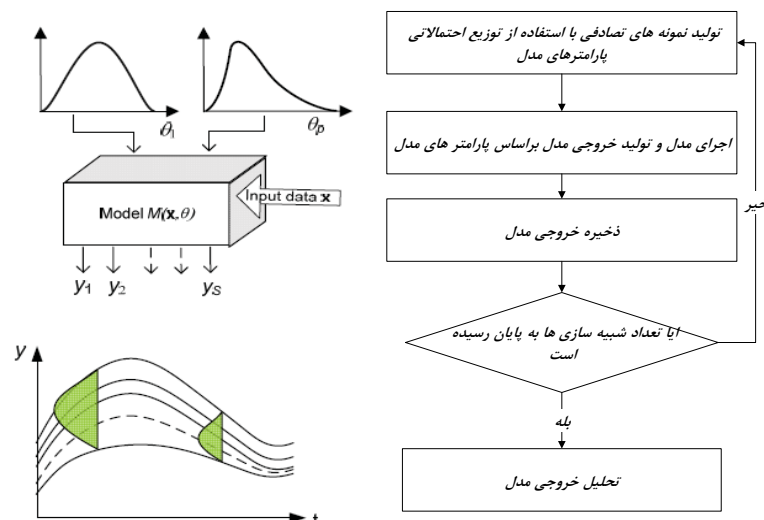
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق از داده های حوضه آبریز سد جامیشان به مساحت ۵۲۴/۰۷ کیلومتر مربع استفاده شده است. این حوضه آبریز جزو استان کرمانشاه و بخشی از

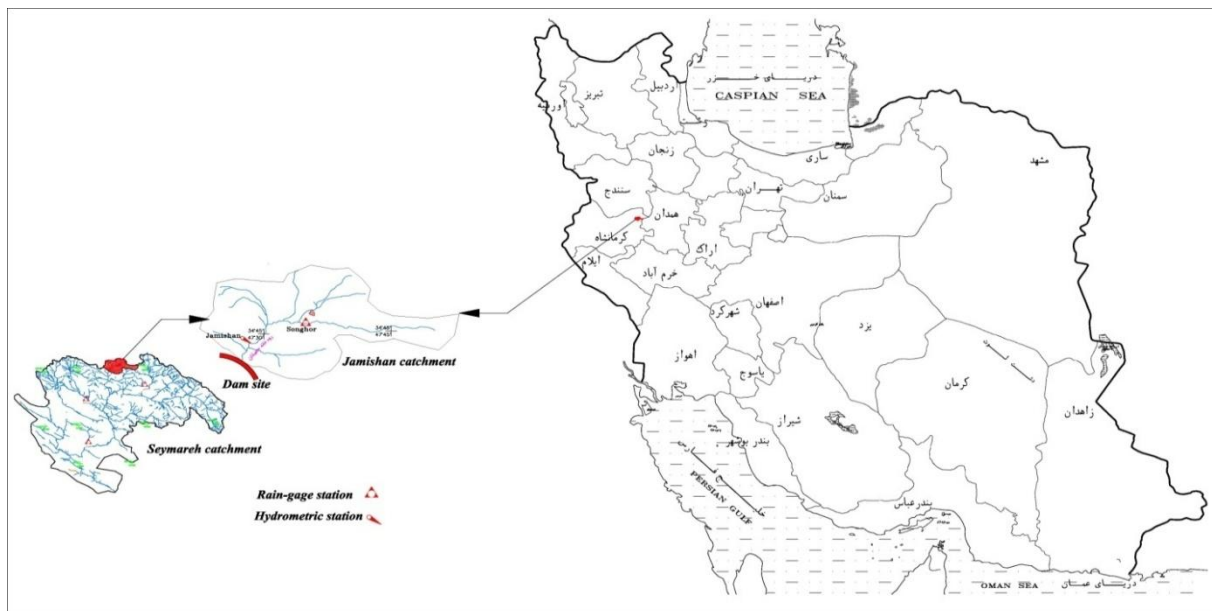
سرشاخه های حوضه رودخانه سیمره محسوب می شود. حوضه آبریز مورد مطالعه در این تحقیق در حد فاصل 34° تا 32° تا 34° عرض شمالی و 47° تا 52° طول شرقی قرار دارد. بلندترین نقطه آن ۳۰۰۰ متر از سطح دریا، متوسط بارندگی سالیانه در آن برابر ۴۴۱ میلی متر، متوسط تبخیر از سطح آزاد آن برابر ۱۵۳۴ میلی متر و متوسط دمای سالیانه آن برابر ۱۰ درجه سانتی گراد است. در این تحقیق از اطلاعات ایستگاه باران سنجی سنقر و ایستگاه هیدرومتری جامیشان استفاده است. این حوضه آبریز در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۲- مدل RPG

مدل RPG نوعی مدل آماری مبتنی بر شبیه سازی مونت کارلو است. سه متغیر مهم در تولید الگوی توزیع زمانی بارش، عمق بارش، مدت بارش و نوع الگوی بارش است. در مدل RPG در هر شبیه سازی مونت کارلو بر اساس عمق بارش مشخص و تولید تصادفی احتمال وقوع، مدت بارش به صورت تصادفی تولید می شود. همچنین بر اساس عمق بارش مذکور و با استفاده از توزیع احتمال تجربی نوع بارش (نوع الگوی توزیع زمانی بارش)، نوع بارش به صورت تصادفی تولید می شود. نوع بارش، مشخص کننده زمان وقوع بیشینه ارتفاع بارش در مدت بارش است. بر اساس تقسیم بندی معرفی شده در این تحقیق بارش ها به چهار دسته تقسیم می شوند.



شکل ۱ روندنمای شبیه سازی مونت کارلو

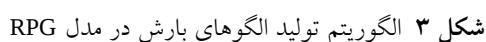


شکل ۲ موقعیت حوضه آبریز سد جامیشان و حوضه آبریز سیمره در ایران

با استفاده از روش نمونه گیری مجدد^۱ نمونه هایی از ماتریس الگوی توزیع زمانی بارش بدون بعد تولید می شوند. پس از مشخص شدن ماتریس بدون بعد الگوی توزیع زمانی بارش، با استفاده از توزیع احتمال محدوده عمق بارش مشخص شده و تولید تصادفی احتمال وقوع الگوی بارش بدون بعد تولید می شود. بدین ترتیب الگوی توزیع زمانی بارش برای عمق مورد نظر تولید می شود.

در دسته اول، بیشینه ارتفاع بارش در ۲۵ درصد آغازین مدت بارش، در دسته دوم بیشینه ارتفاع بارش در حد فاصل ۲۵ درصد تا ۵۰ درصد مدت بارش، در دسته سوم بیشینه ارتفاع بارش در حد فاصل ۵۰ تا ۷۵ درصد مدت بارش و در گروه چهارم بیشینه ارتفاع بارش در ۲۵ درصد پایانی مدت بارش اتفاق می افتد. این تقسیم بندی شبیه به تقسیم بندی الگوی بارش است (Huff ۱۹۶۷). بر اساس عمق بارش، مدت بارش و نوع الگوی بارش تعیین شده و

۱. Bootstrap resampling


$$\begin{cases} r(t) = \bullet & \text{for } P(t) \leq IA \\ r(t) = r.(t) & \text{for } P(t) > IA \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F(t) = \frac{PSIF \times DTHETA}{\lfloor \frac{f(t)}{XKSAT} - 1 \rfloor} & , \quad f(t) > XKSAT \\ f(t) = r(t) & , \quad f(t) \leq XKSAT \\ f(t) = dF(t)/dt \end{cases} \quad (2)$$

مدل بارش-رواناب مورد استفاده در این تحقیق مدل HEC-HMS است. این مدل از نوع توده‌ای^۱ و همچنین نیمه توزیعی^۲ است و برای شبیه‌سازی جریان‌های تک‌واپعه^۳ و پیوسته^۴ استفاده می‌شود. در این تحقیق از معادلات تلفات گرین‌آمپ، جریان پایه‌نمایی و هیدروگراف واحد مصنوعی SCS برای شبیه‌سازی رواناب استفاده شده است. پارامترهای مدل HEC-HMS - شامل تلفات اولیه^۵، کمبود رطوبت^۶، مکش مرطوب^۷، هدایت هیدرولیکی^۸، درصد سطح نفوذناپذیر، دبی رودخانه در ابتدای واپعه، دبی حدی در شروع شاخه نزولی، ضریب کاهش دبی و زمان تأخیر - در جدول ۱ ارائه شده است.

17

این تحقیق به بارش ارتباط دارند. عمق بارش، مدت بارش و الگوی بارش با استفاده از اتصال مدل RPG و مدل HEC-HMS در محیط متلب به عنوان متغیرهای ورودی تعریف می شوند.

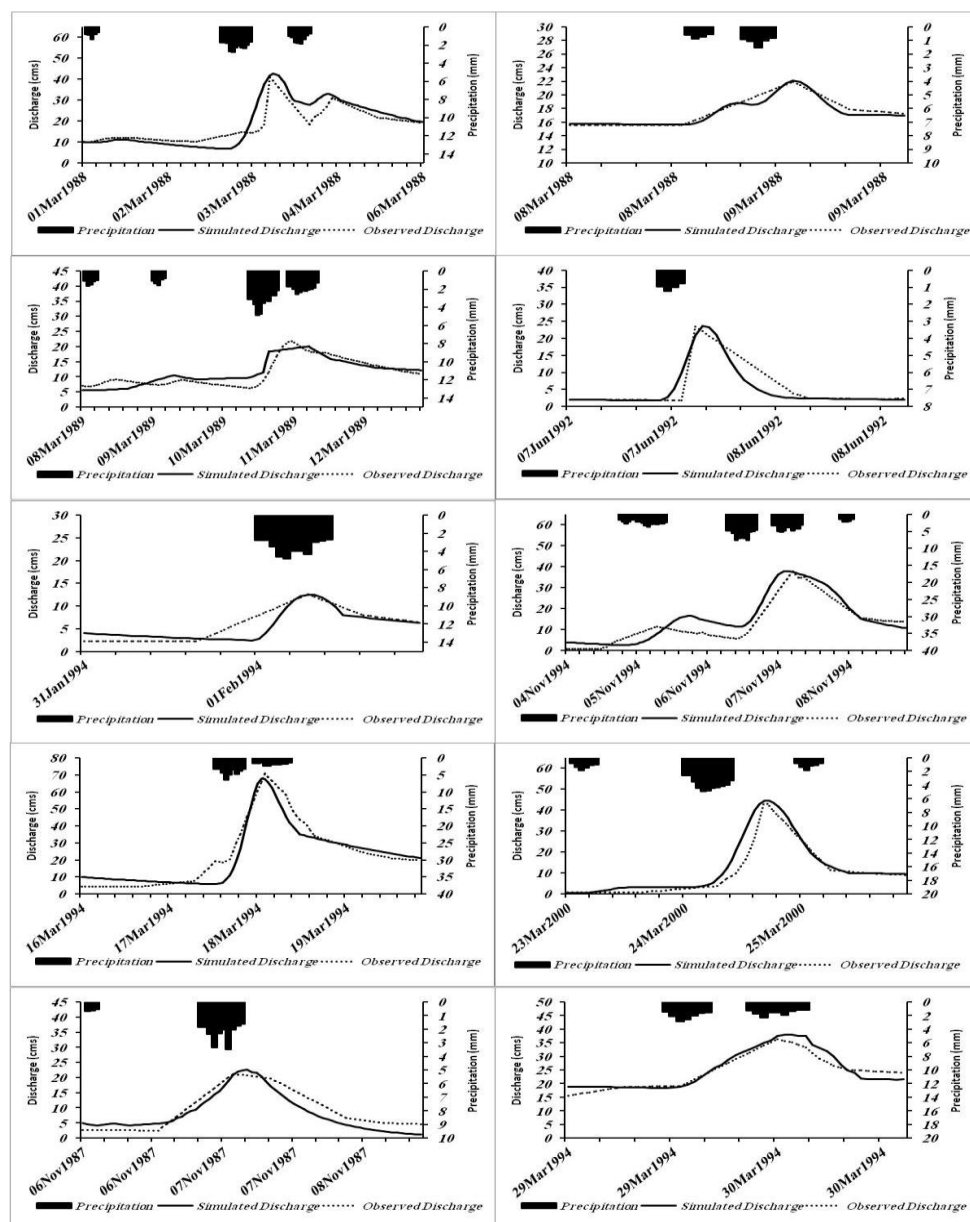
در این رابطه $F(t)$ نفوذ تجمعی، $f(t)$ نرخ نفوذ، PSIF مکش مرطوب، DTHETA کمبود رطوبت و XKSAT هدایت هیدرولیکی در شرایط اشباع است (USACE ۱۹۹۸). متغیرهای تصادفی ورودی مدل HEC-HMS در

جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی رواناب در مدل HEC-HMS

پارامتر	حروف اختصاری در مدل HEC-HMS	واحد	تعریف
IA	LG(۱)	mm	تلفات اولیه
DTHETA	LG(۲)	-	کمبود رطوبت
PSIF	LG(۳)	mm	مکش مرطوب
XKSAT	LG(۴)	mm/hr	هدایت هیدرولیکی
RTIMP	LG(۵)	%	درصد سطح نفوذناپذیر
STRTQ	BF(۱)	cms	دبی رودخانه در ابتدای واقعه
QRCSN	BF(۲)	cms	دبی حدی در شروع شاخه نزولی
RTIOR	BF(۳)	-	ضریب کاهش دبی
TLAG	UD	hr	زمان تأخیر

مرحله واسنجی مدل HEC-HMS در شکل ۴ آورده شده است. مقادیر کمینه و بیشینه پارامترهای مدل HEC-HMS بر اساس واسنجی های انجام شده در جدول ۲ ارائه شده است. پس از تعیین توزیع احتمال پارامترهای تصادفی و استفاده از مدل RPG برای کمی سازی رفتار تصادفی بارش، شبیه سازی مدل بارش - رواناب با استفاده از پارامترها و متغیرهای تصادفی - به تعداد تعریف شده توسط کاربر - به روش مونت کارلو انجام می شود.

اولین مرحله در تحلیل عدم قطعیت مدل بارش - رواناب HEC-HMS، استخراج توزیع چگالی احتمال پارامترهای مدل HEC-HMS است. در این تحقیق از توزیع چگالی احتمال یکنواخت برای کمی سازی رفتار تصادفی پارامترها استفاده شده است. ضرایب توزیع چگالی احتمال برای هر پارامتر تصادفی از واسنجی پارامترهای مدل HEC-HMS و با استفاده از ۱۰ واقعه مشاهداتی انجام شده است. مقایسه هیدروگراف های شبیه سازی و مشاهداتی در



شکل ۴ مقایسه هیدروگرافهای شبیه سازی و مشاهداتی در مرحله واسنجی مدل HEC-HMS

جدول ۲ مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل HEC-HMS

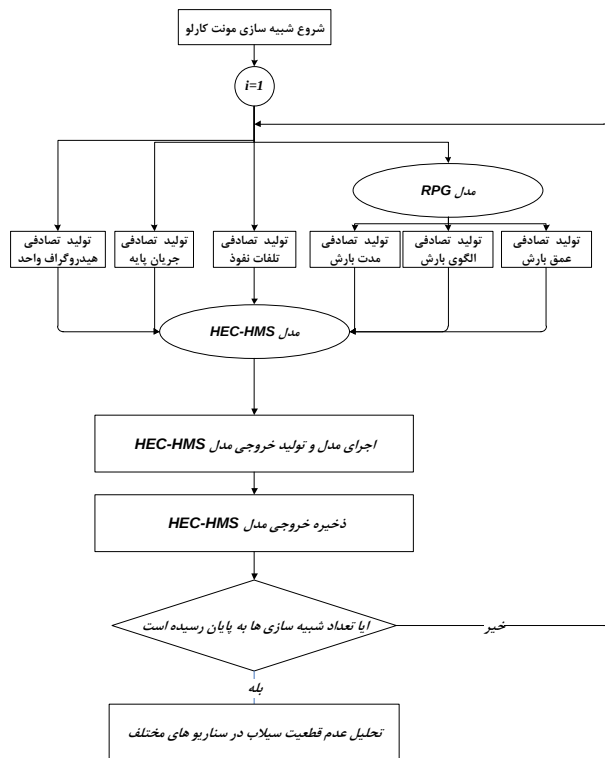
۳۵	۲/۵	hr	UD
----	-----	----	----

پارامتر	واحد	مقدار کمینه	مقدار بیشینه
LG(۱)	mm	۰/۰۱	۰/۱
LG(۲)	-	۰/۰۶	۰/۴۵
LG(۳)	mm	۲۰۰	۲۰۰۰
LG(۴)	mm/hr	۰/۰۷	۳/۵
LG(۵)	%	۱/۸	۱۲
BF(۱)	cms	۰/۵	۱۹
BF(۲)	cms	۲/۵	۳۵
BF(۳)	-	۱/۰۱	۷/۵۷

مراحل شبیه سازی مدل بارش-رواناب بر اساس روش شناسی این تحقیق به شرح ذیل است.

۱ تولید متغیرهای تصادفی مدل بارش-رواناب شامل عمق بارش، مدت بارش و الگوی زمانی بارش توسط مدل RPG.

۲ تولید پارامترهای تصادفی مدل بارش-رواناب شامل پارامترهای تلفات، جریان پایه و هیدروگراف واحد بر



شکل ۵ شبیه سازی استوکستیک مدل HEC-HMS توسط فرآیند مونت کارلو

در این تحقیق با توجه متفاوت بودن واحد پارامترها و متغیرها ورودی مدل HEC-HMS و سیلاب خروجی برای مقایسه شاخص Sharpness، از مقادیر پارامترها و متغیرها و سیلاب های بدون بعد، برای تحلیل عدم قطعیت در گزینه های مختلف -که در ادامه تشریح خواهند شد- استفاده شد. در روش بدون بعد کردن، برای هر متغیر، مقادیر تولید شده بر مقدار بیشینه مقدار تولیدی تقسیم می شوند و بدین ترتیب دامنه تغییر هر متغیر بین ۰ تا ۱ می شود. در مدل های بارش رواناب پیچیده، گاهی تعداد زیاد پارامترهای مدل اندرکنش پارامترها باعث عدم قطعیت سیلاب خروجی می شود (Beven ۲۰۰۱). بنابراین تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC-HMS و بررسی چگونگی انتشار خطا و همبستگی میان پارامترهای تصادفی مدل HEC-HMS و سیلاب خروجی سه گزینه تعریف شد. در گزینه اول، تحلیل عدم قطعیت پارامترهای تلفات، جریان پایه و هیدروگراف واحد به طور جداگانه و

اساس توزیع احتمال استخراج شده برای پارامترهای مذکور.

۳ اجرای مدل HEC-HMS و ذخیره سازی سیلاب خروجی

۴ مقایسه تعداد شبیه سازی های انجام شده با تعداد شبیه سازی های مورد نظر در روش مونت کارلو

۵ تحلیل عدم قطعیت سیلاب در گزینه های مورد نظر الگوریتم شبیه سازی مدل HEC-HMS به روش مونت کارلو در شکل ۵ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۵، در هر شبیه سازی، مقادیر عمق بارش، مدت بارش و الگوی توزیع زمانی بارش توسط مدل RPG و مقادیر پارامترهای تصادفی مدل HEC-HMS با استفاده از تولید تصادفی احتمال وقوع و توزیع احتمال پارامترها تولید می شوند. تعداد شبیه سازی ها بسته به شرایط گزینه های تحلیل عدم قطعیت متغیر است. مبنای انتخاب تعداد شبیه سازی مورد نیاز، تعداد متغیرهای تصادفی مورد نظر در تحلیل عدم قطعیت و همگرایی عدم قطعیت خروجی (سیلاب) است (افشار و همکاران ۲۰۰۹). تعداد شبیه سازی های مونت کارلو در این تحقیق بین ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است. پس از پایان شبیه سازی ها، با استفاده از شاخص Sharpness (Diaz-Ramirez ۲۰۰۷) عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای تصادفی و سیلاب خروجی تحلیل شد. شاخص Sharpness برابر است با اختلاف بین حدود اطمینان متغیر و بزرگ بودن آن نشان دهنده بزرگ بودن عدم قطعیت آن متغیر است. این شاخص برای کمی سازی عدم قطعیت سیلاب در گزینه های مختلف مناسب است.

بیشینه سیلاب دارد که این بر خلاف تأثیر عدم قطعیت پارامترهای جریان پایه در گزینه اول است. یکی دیگر از نتایج عدم قطعیت پارامترهای تلفات این است که با افزایش مدت بارش، عدم قطعیت در حجم سیلاب زیاد و در بیشینه سیلاب کم می‌شود (شکل ۷). پس از بررسی تأثیر عدم قطعیت مدل هیدروگراف واحد بر سیلاب خروجی در گزینه اول ملاحظه شد که در این حالت نیز برای بارش‌های کمتر از ۱۲ ساعت مشابه تأثیر عدم قطعیت جریان‌های پایه، تأثیر عدم قطعیت مدل هیدروگراف واحد بر عدم قطعیت بیشینه سیلاب بیشتر از حجم سیلاب است. در بارش‌های با مدت بیشتر از ۱۲ ساعت تأثیر عدم قطعیت مدل هیدروگراف واحد بر عدم قطعیت بیشینه سیلاب نزدیک به صفر است (شکل ۸).

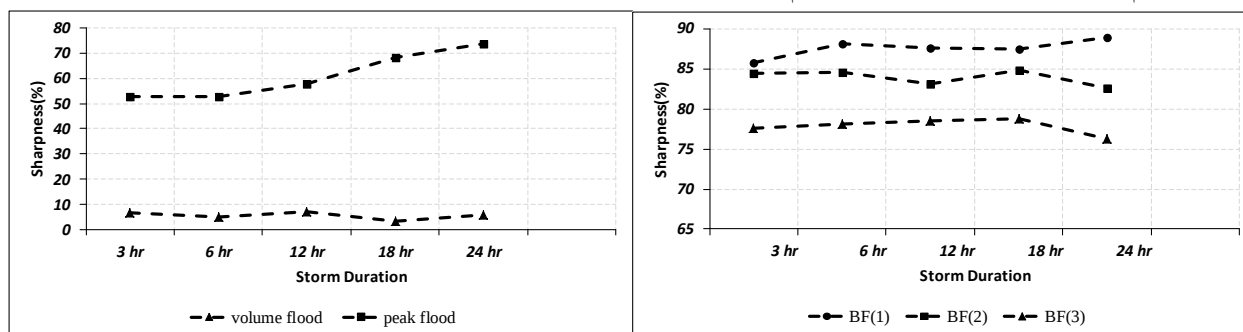
به‌طور خلاصه بر اساس نتایج تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC-HMS و سیلاب خروجی در گزینه اول مشخص می‌شود که عدم قطعیت جریان‌های پایه بر خلاف عدم قطعیت تلفات، بر عدم قطعیت بیشینه سیلاب مؤثرتر از عدم قطعیت حجم سیلاب است. عدم قطعیت هیدروگراف واحد برای بارش‌های کوتاه مدت، بر عدم قطعیت بیشینه سیلاب مؤثرتر است. در گزینه دوم که در آن فقط پارامترهای تصادفی مدل HEC-HMS عدم قطعیت دارند و تأثیر کلی عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC-HMS بر عدم قطعیت حجم سیلاب و بیشینه سیلاب تقریباً مشابه و به صورت نزولی نسبت به مدت بارش است (شکل ۹).

با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها و متغیرهای ورودی انجام شد. برای مثال برای تحلیل عدم قطعیت پارامترهای تلفات، پارامترهای جریان پایه و هیدروگراف واحد و متغیرهای ورودی ثابت نگاه داشته شدند. در گزینه دوم، تحلیل عدم قطعیت تمامی پارامترهای تصادفی مدل HEC-HMS با ثابت نگاه داشتن متغیرهای ورودی انجام گردید. در گزینه سوم، تحلیل عدم قطعیت کلیه پارامترها و متغیرهای ورودی مدل HEC-HMS انجام شد. برای تمامی گزینه‌ها، همبستگی و انتشار عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC-HMS در عدم قطعیت سیلاب خروجی نیز ارزیابی شد.

۳- نتایج و بحث

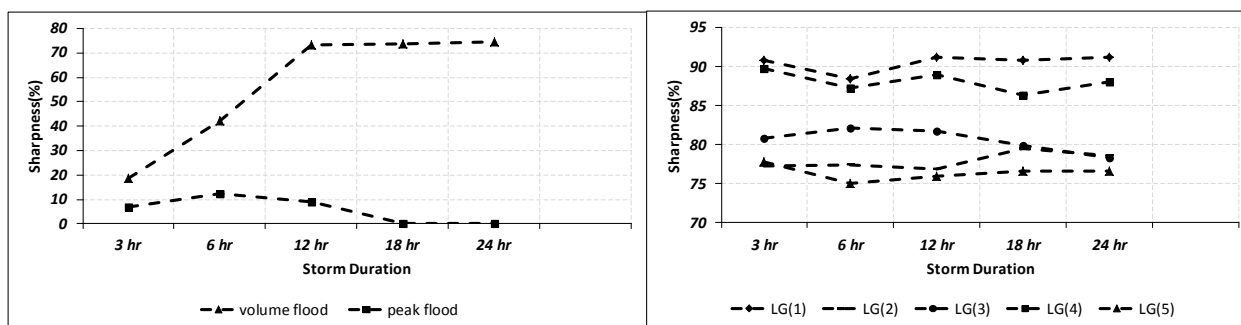
با توجه به نتایج حاصل از تحلیل عدم قطعیت در گزینه اول ملاحظه می‌شود که عدم قطعیت پارامترهای مدل جریان پایه بر عدم قطعیت بیشینه سیلاب تأثیر بیشتری (نسبت به عدم قطعیت حجم سیلاب) دارد؛ به این ترتیب که شاخص Sharpness در بیشینه سیلاب با تغییر بیشتر از ۵۰ درصد همراه بوده است، اما در حجم سیلاب تغییر شاخص Sharpness کمتر از ۱۰ درصد است. یکی دیگر از نتایج حاصل از تأثیر عدم قطعیت جریان پایه بر سیلاب خروجی، افزایش عدم قطعیت بیشینه سیلاب در ازای افزایش مدت بارش است. روند مذکور در شکل ۶ نشان داده شده است.

عدم قطعیت پارامترهای تلفات در گزینه اول بر عدم قطعیت حجم سیلاب تأثیر بیشتری نسبت به عدم قطعیت



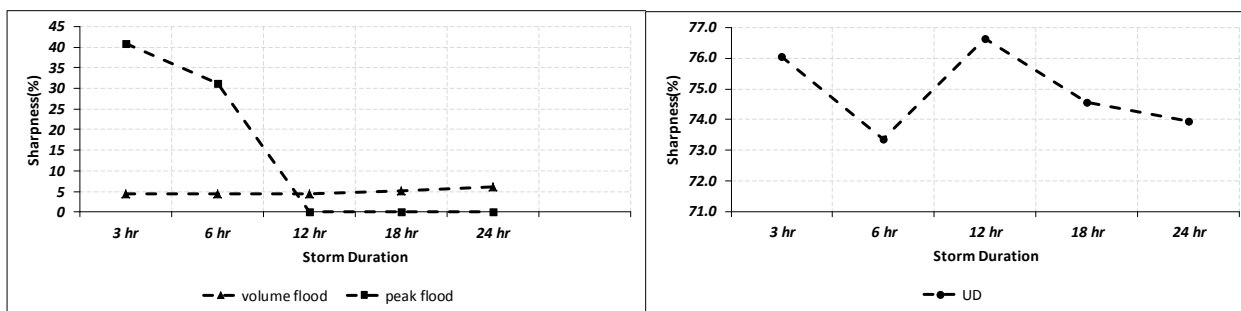
الف) پارامترهای جریان پایه ب) حجم سیلاب و بیشینه سیلاب

شکل ۶ تغییر شاخص Sharpness مرتبط با جریان پایه در گزینه اول



الف) پارامترهای تلفات (ب) حجم سیلاب و پیک سیلاب

شکل ۷ تغییرات شاخص Sharpness مرتبط با تلفات در گزینه اول



الف) پارامتر هیدروگراف واحد (ب) حجم سیلاب و بیشینه سیلاب

شکل ۸ تغییرات شاخص Sharpness مرتبط با هیدروگراف واحد در گزینه اول

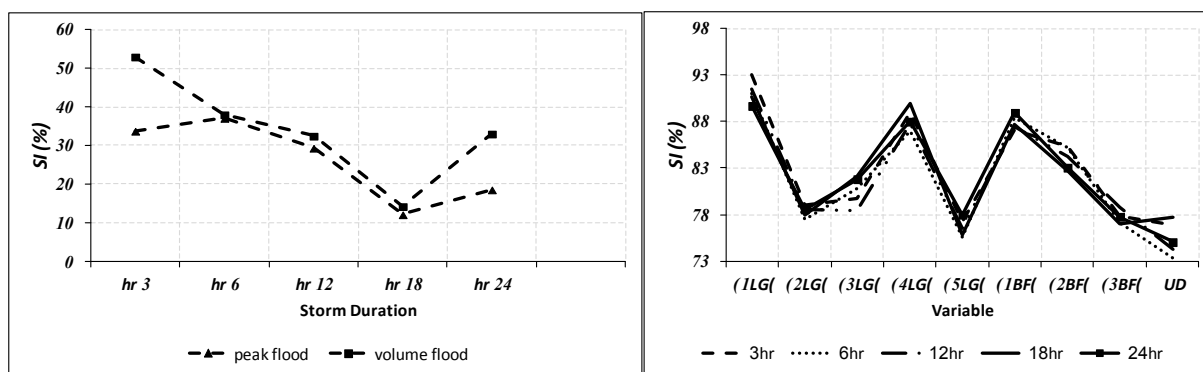
در گزینه سوم که عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب شبیه سازی تحت تأثیر عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC-HMS برآورد شده است، ملاحظه می شود که بر اثر اندرکنش عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC-HMS و تأثیر متفاوتی که عدم قطعیت هر یک از پارامترها و متغیرها بر عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب دارند، در مجموع عدم قطعیت های مذکور بر عدم قطعیت حجم سیلاب نسبت به بیشینه سیلاب تأثیر بیشتری داشته است. همچنین در بارش های بلند مدت عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب روند کاهشی داشته است (شکل ۱۰).

در این تحقیق، همبستگی و چگونگی انتشار عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC-HMS در عدم قطعیت

نتایج تحلیل عدم قطعیت در گزینه اول و دوم یکدیگر را تأیید می کند. همان گونه که در تحلیل نتایج گزینه اول اشاره شد، تغییر عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب نسبت به عدم قطعیت هر یک از پارامترهای مدل بارش - رواناب متفاوت است. برای مثال عدم قطعیت جریان پایه بر عدم قطعیت بیشینه سیلاب مؤثرتر بوده و باعث افزایش آن نسبت به مدت بارش می شود، در حالی که عدم قطعیت تلفات بر عدم قطعیت حجم سیلاب مؤثرتر بوده و باعث افزایش آن نسبت به مدت بارش می شود. از این رو در گزینه دوم، -که عدم قطعیت همه پارامترها در نظر گرفته شده- اندرکنش تأثیر عدم قطعیت پارامترها بر عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب باعث شده که دامنه تغییر عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب مشابه باشند.

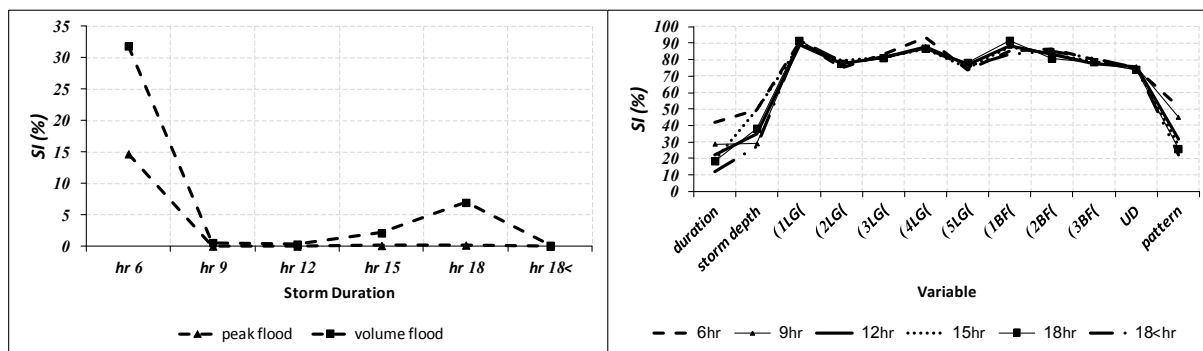
در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است (Li et al. ۲۰۱۰). با توجه به نتایج و کمتر بودن مقادیر P-value در گزینه سوم مشخص می‌شود که همبستگی بین عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC-HMS و عدم قطعیت سیلاب خروجی در گزینه سوم بیشتر از سایر گزینه‌ها است.

سیلاب خروجی در گزینه‌های مختلف مطالعه شد. برای مطالعه همبستگی عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC-HMS در عدم قطعیت سیلاب خروجی، مقادیر P-value در آزمون فرضیه صفر بودن همبستگی میان عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC-HMS و عدم قطعیت بیشینه و حجم سیلاب در گزینه‌های مختلف، استخراج و



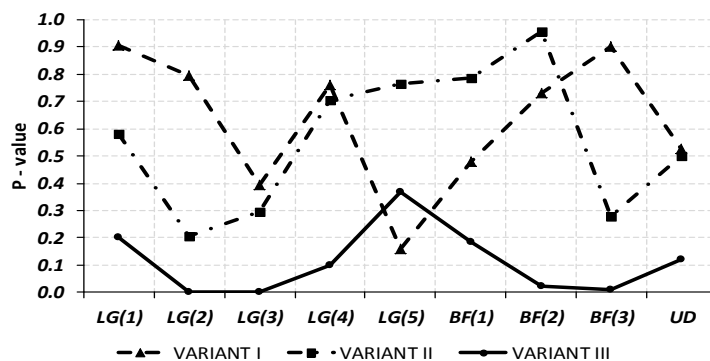
الف) پارامترهای مدل HEC-HMS (ب) حجم سیلاب و بیشینه سیلاب

شکل ۹ تغییر شاخص Sharpness مرتبط با جریان پایه در گزینه دوم

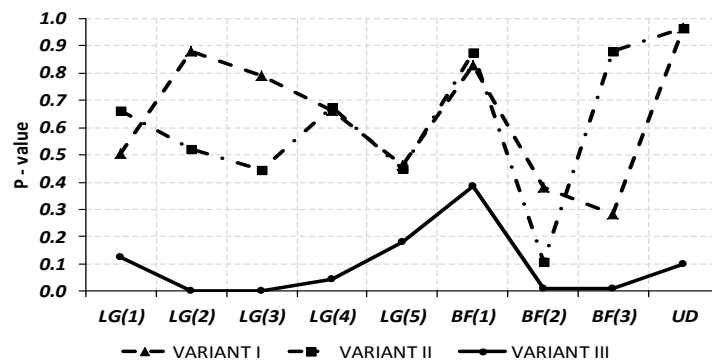


الف) پارامترها و متغیرهای مدل HEC-HMS (ب) حجم سیلاب و بیشینه سیلاب

شکل ۱۰ تغییر شاخص Sharpness مرتبط با جریان پایه در گزینه سوم



شکل ۱۱ مقادیر P-value همبستگی بین عدم قطعیت پارامترها و عدم قطعیت حجم سیلاب در گزینه‌های مختلف



شکل ۱۲ مقادیر P-value همبستگی میان عدم قطعیت پارامترها و عدم قطعیت بیشینه سیلاب در گزینه‌های مختلف

جدول ۳ مقادیر P-value همبستگی میان عدم قطعیت پارامترها و عدم قطعیت حجم سیلاب در گزینه‌های مختلف

پارامتر	تعریف	p-value		
		گزینه اول	گزینه دوم	گزینه سوم
LG(۱)	تلفات اولیه	۰/۹	۰/۵۸	۰/۲
LG(۲)	کمبود رطوبت	۰/۸	۰/۲۱	۰
LG(۳)	مکش مرطوب	۰/۳۹	۰/۳	۰
LG(۴)	هدایت هیدرولیکی	۰/۷۶	۰/۷۱	۰/۱
LG(۵)	درصد سطح نفوذناپذیر	۰/۱۶	۰/۷۶	۰/۳۷
BF(۱)	دبی رودخانه در آغاز واقعه	۰/۴۸	۰/۷۹	۰/۱۹
BF(۲)	دبی حدی در شروع شاخه نزولی	۰/۷۳	۰/۹۶	۰/۰۲
BF(۳)	ضریب کاهش دبی	۰/۹	۰/۲۸	۰/۰۱
UD	زمان تأخیر	۰/۵۲	۰/۵	۰/۱۲

قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC-HMS و عدم قطعیت بیشینه و حجم سیلاب در گزینه سوم ارائه شده است.

جدول ۴ مقادیر P-value همبستگی بین عدم قطعیت پارامترها و عدم قطعیت بیشینه سیلاب

پارامتر	p-value		
	گزینه اول	گزینه دوم	گزینه سوم
LG(۱)	۰/۵	۰/۶۶	۰/۱۳
LG(۲)	۰/۸۸	۰/۵۲	۰
LG(۳)	۰/۷۹	۰/۴۴	۰
LG(۴)	۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۰۴

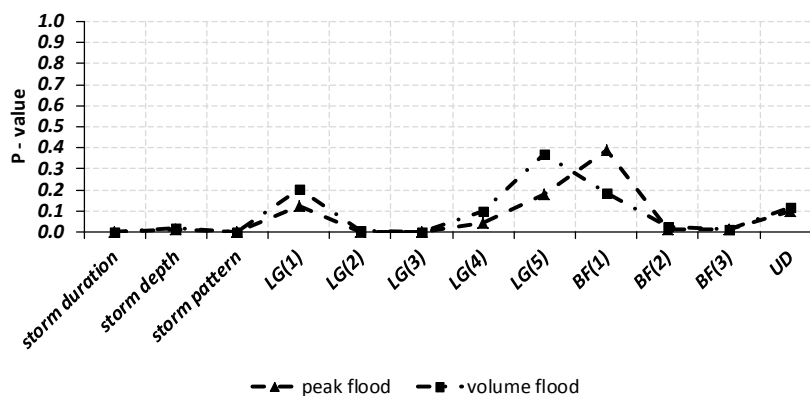
در تفسیر فیزیکی این نتیجه می‌توان به این نکته اشاره کرد که در گزینه‌های اول و دوم به دلیل آن که بعضی از پارامترها و متغیرها ثابت در نظر گرفته شده، مقدار پارامتر یا متغیر غیر تصادفی می‌تواند به اندازه‌ای بر سیلاب خروجی مؤثر باشد که باعث ناچیز شدن تغییر عدم قطعیت سیلاب در برابر تغییر بزرگ عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای تصادفی شود. از این رو همبستگی عدم قطعیت سیلاب در برابر عدم قطعیت پارامتر و متغیرهای تصادفی کم می‌شود. در شکل ۱۳ و جدول ۵ مقادیر P-value در آزمون فرضیه صفر بودن همبستگی بین عدم

پارامتر	p-value	
	حجم سیلاب	پیک سیلاب
Storm Duration	۰	۰
Storm Depth	۰/۰۱۹	۰/۰۰۹
Storm Pattern	۰	۰
LG(1)	۰/۲	۰/۱۳
LG(2)	۰/۰۰۳	۰
LG(3)	۰	۰
LG(4)	۰/۱	۰/۰۴
LG(5)	۰/۳۷	۰/۱۸
BF(1)	۰/۱۹	۰/۳۹
BF(2)	۰/۰۲	۰/۰۱
BF(3)	۰/۰۱	۰/۰۱
UD	۰/۱۲	۰/۰۱

LG(5)	۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۱۸
BF(1)	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۳۹
BF(2)	۰/۳۸	۰/۱۱	۰/۰۱
BF(3)	۰/۲۸	۰/۸۸	۰/۰۱
UD	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۰۱

با مقایسه مقادیر P-value در آزمون فرضیه صفر بودن همبستگی بین عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC-HMS و عدم قطعیت بیشینه و حجم سیلاب در گزینه‌های مختلف مشخص می‌شود، که مدت بارش و الگوی توزیع زمانی بارش و پارامتر تلفات، کمترین مقدار P-value را دارند. به بیانی دیگر، مؤثرترین متغیرهای تصادفی در ایجاد عدم قطعیت در حجم و بیشینه سیلاب به ترتیب مدت بارش و الگوی توزیع زمانی بارش و پارامترهای LG(2)، LG(3) است.

جدول ۵ مقادیر P-value همبستگی بین عدم قطعیت مدل HEC-HMS و عدم قطعیت سیلاب در گزینه سوم



شکل ۱۳ مقادیر P-value همبستگی بین عدم قطعیت مدل HEC-HMS و عدم قطعیت سیلاب در گزینه سوم

واحد به طور جداگانه و با ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها و متغیرهای ورودی انجام شد. در گزینه دوم، تحلیل عدم قطعیت تمامی پارامترهای تصادفی مدل HEC-HMS با ثابت نگاه داشتن متغیرهای ورودی انجام شد. در گزینه سوم، تحلیل عدم قطعیت تمامی پارامترها و متغیرهای

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق برای تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC-HMS و بررسی چگونگی انتشار خطا و همبستگی بین پارامترهای تصادفی مدل HEC-HMS و سیلاب خروجی سه گزینه تعریف شد. در گزینه اول، تحلیل عدم قطعیت پارامترهای تلفات، جریان پایه و هیدروگراف

ورودی مدل HEC-HMS انجام شد. خلاصه نتایج به شرح زیر است.

در گزینه اول، عدم قطعیت جریانهای پایه - بر خلاف عدم قطعیت تلفات - بر روی عدم قطعیت بیشینه سیلاب مؤثرتر از عدم قطعیت حجم سیلاب است. عدم قطعیت هیدروگراف واحد برای بارشهای کوتاه مدت، بر عدم قطعیت بیشینه سیلاب مؤثرتر است. در گزینه دوم، تأثیر کلی عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC-HMS بر عدم قطعیت حجم سیلاب و بیشینه سیلاب تقریباً مشابه و به صورت نزولی نسبت به مدت بارش است. در گزینه سوم، به دلیل تأثیر متفاوت عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC-HMS بر عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب، عدم قطعیت سیلاب در بارشهای بلند کاهش می یابد. همبستگی بین عدم قطعیت پارامترهای مدل HEC-HMS و عدم قطعیت بیشینه و حجم سیلاب در گزینه سوم بیشتر از سایر گزینه ها است. با مقایسه مقادیر P-value در آزمون فرضیه صفر بودن همبستگی بین عدم قطعیت پارامترها و متغیرهای مدل HEC-HMS و عدم قطعیت بیشینه و حجم سیلاب مشخص می شود، بر عدم قطعیت سیلاب خروجی مؤثرترین عدم قطعیت متغیرها، مدت بارش و الگوی توزیع زمانی بارش و تلفات (LG3) است. مقادیر P-value در آزمون فرضیه صفر بودن همبستگی بین عدم قطعیت متغیرهای مذکور و عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب برابر صفر است. این مقدار P-value، نشان دهنده همبستگی بالای بین عدم قطعیت این سه متغیر و عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب است. همچنین بیشترین مقدار P-value - که در حدود ۰/۴ است، نشان دهنده عدم همبستگی بین عدم قطعیت متغیر و عدم قطعیت حجم و بیشینه سیلاب است - به جریان پایه مرتبط است. این نتیجه مشابه نتیجه تحقیق (Hoybye and Rosbjerg ۱۹۹۹) است که در آن

مشخص شده بود که بارش، مهمترین عامل عدم قطعیت در شبیه سازی سیلاب است.

۵- فهرست علائم

BF(۱)	STRTQ	دبی رودخانه در ابتدای واقعه
BF(۲)	QRCSN	دبی حدی در شروع شاخه نزولی
BF(۳)	RTIOR	ضریب کاهش دبی
DTHETA		کمبود رطوبت
F(t)		نفوذ تجمعی
f(t)		نرخ نفوذ
LG(۱)	IA	تلفات اولیه
LG(۲)	DTHETA	کمبود رطوبت
LG(۳)	PSIF	مکش مرطوب
LG(۴)	XKSAT	هدایت هیدرولیکی
LG(۵)	RTIMP	درصد سطح نفوذ ناپذیر
P(t)		بارش تجمعی
PSIF		مکش مرطوب
r(t)		شدت بارش مازاد
r*(t)		شدت بارش خالص
t		زمان بعد از شروع بارش
XKSAT		هدایت هیدرولیکی در شرایط اشباع
UD	TLAG	زمان تأخیر

۶- منابع

حیدری ع.، ثقفیان، ب. و مکنون ر.، (۱۳۸۳). "شبیه سازی هیدروگراف سیل بر اساس عدم قطعیت مدل های بارش - رواناب"، مجله استقلال، سال ۲۳، شماره ۲، صص. ۹۳-۱۱۱.

حیدری ع.، ثقفیان ب. و مکنون ر.، (۱۳۸۴). "تلفیق تئوری بیز با روش مونت کارلو جهت ارتقاء نتایج واسنجی مدل های هیدرولیکی"، تحقیقات منابع آب ایران، سال یکم، شماره ۳، صص. ۲۹-۴۰.

- Butts M B., Payne J T., Kristensen M. and Madsen H. (2004). "An evaluation of the impact of model structure on hydrological modeling uncertainty for streamflow simulation", *Journal of Hydrology*, 298, pp. 222-241.
- Diaz-Ramires J.N. (2007). "Assessment of uncertainty in flow model parameter, channel hydraulics properties and rainfall data of lumped watershed model", PhD Thesis in Civil Eng., Mississippi State University.
- Chu X. and Steinman A. (2009). "Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 135, No. 1, pp. 119-124.
- Emerson C. H., Welty C. and Traver R. G. (2005). "Watershed-Scale evaluation of a system of storm water detention basins", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 10(3), pp. 237-242.
- Golian S., Saghafian B. and Maknoon R. (2010). "Derivation of probabilistic thresholds of spatially distributed rainfall for flood forecasting", *Water Resources Management*, Vol. 24, No. 13, pp. 3547-3559.
- Golian S., Saghafian B., Elmi M. and Maknoon R. (2011). "Probabilistic rainfall thresholds for flood forecasting: evaluating different methodologies for modelling rainfall spatial correlation (or dependence)", *Hydrological Processes*, Vol. 25, Issue 13, pp. 2046-2055.
- Habib E., Aduvala A.V., Meselhe E.A. (2008). "Analysis of radar-rainfall error characteristics and implications for streamflow simulation uncertainty" *Hydrological Sciences Journal*, 53 (3), pp. 568-587.
- Habib E., Aduvala A V. and Meselhe E A. (2007). "Effect of radar-rainfall errors on rainfall-runoff modeling", *World Environmental and Water Resources Congress*.
- Hong Y. Hsu K L. Moradkhani H. and Sorooshian S. (2006). "Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response", *Water Resources Research*, 42, pp. 1-15
- Hostache R., Matgen P., Montanari A., Montanari M., Hoffmann L. and Pfister L. (2011). "Propagation of uncertainties in coupled hydro-meteorological forecasting systems: A stochastic approach for the assessment of the total predictive uncertainty" *Atmospheric Research*, 100, pp. 263-274.
- زادبرع، علیمحمدی س. و اکبریان اقدم ا.، (۱۳۸۷). "محاسبه هیدروگراف سیل طراحی به روش مونت کارلو با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز.
- Afshar A. and Marino M.A. (1990). "Optimizing spillway capacity with uncertainty in flood estimator", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116 (1), PP.71-84.
- Afshar A., Barkhordary A. and Marino M.A. (1994). "Optimizing river diversion under hydraulic and hydrologic uncertainties", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120 (1), PP. 36-47.
- Afshar A, Rasekh A. and Afshar M.H. (2009). "Risk-based optimization of large flood-diversion systems using genetic algorithms", *Engineering Optimization*, Vol. 41, No. 3, PP. 259-273.
- Anderson M. L., Chen Z.-Q., Kavvas M. L. and Feldman A., (2002). "Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 312-318.
- Aronicaa G. B., Hankinb B, Bevenb K. (1998). "Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data", *Advances in Water Resources* Vol. 22, No. 4, pp. 349-365.
- Aronica G. T. and Candela A. (2007). "Derivation of flood frequency curves in poorly gauged Mediterranean catchments using a simple stochastic hydrological rainfall-runoff model", *Journal of Hydrology*, Vol. 347, Issues 1-2, pp. 132-142.
- Ayka A. (2008). "Hydrological models comparison for estimation of floods in the Abaya-Chamo sub-basin", M.S. Thesis, Assis Ababa University, School of Graduate Studies.
- Beven K. J. (2001). "*Rainfall-Runoff modelling, the primer*", John Wiley and Sons, LTD.
- Beven K. and Freer J. (2001). "Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology", *Journal of Hydrology*, 249, pp. 11-29.
- Boyogueno S.H., Mbessa M. and Tatietsse 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*, Vol. 2, No. 1, pp. 205-216.

in Water Resources, Volume 27, Issue 9, pp. 889-898.

McCuen R.H (2009). "Uncertainty analyses of watershed time parameters", Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 490-498.

Mc Lin S. G., Springer E. P. and Lane L. G., (2001). "Predicting floodplain boundary changes following the Cerro grande wildfire", Hydrological Processes, Vol. 15, Issue 15, pp. 2967-2980.

Melching C.S. (1992). "An improved first-order reliability approach for assessing uncertainties in hydrological modeling", Journal of Hydrology, 132, pp. 157-177.

Melching C S. (1995). "Reliability estimation, In: V.P. Singh (ed.)", Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, USA, pp. 69-118.

Merwade V., Olivera F., Arabi M. and Edleman S. (2007). "Uncertainty in flood inundation mapping: current issues and future directions", Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 13, No. 7, pp. 608-620.

Montanari A. and Brath A. (2004). "A stochastic approach for assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations", Water Resour. Res. 40, (W01106), pp. 1-11.

Montanari A. (2005). "Large sample behaviors of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) in assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations", Water Resources Research, 41, W08406, doi: 10.1029/2004 WR003826.

Nasri M., Soleimani Sardoo F. and Katani M. (2011). "Simulation of the rainfall-runoff process using of HEC-HMS hydrological model (a case study of Sheikh Bahaei dam basin)", World Academy of Science, Engineering and Technology, 78, 548-551.

Olsson J. (2006). "Spatio-temporal precipitation error propagation in runoff modelling: a case study in central Sweden", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 6, pp. 597-609.

Shrestha D.L. (2009). "Uncertainty analysis in rainfall-runoff modelling: application of machine learning techniques", Phd Thesis in Hydroinformatics, Delft university.

Shrestha. R.R and Nestmann F. (2009). "Physically based and data-driven models and propagation of input uncertainties in river flood prediction", Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 1309-1319.

Hoybye J. and Rosbjerg D. (1999). "Effect of input and parameter uncertainties in rainfall-runoff simulations", Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 214-224.

Huff F. A. (1967). "Time distribution of rainfall in heavy storms", Water Resources Research, 3(4): 1007-1019.

Kobold M. and Sušelj K. (2005). "Precipitation forecasts and their uncertainty as input into hydrological models", Hydrol. Earth Syst. Sci., 9, pp. 322-332.

Kuchment L. S. and Gelfan A. N. (1991). Dynamic-stochastic models of rainfall and snowmelt runoff. Hydrol. Sci. J., 36, pp. 153-169.

Kuchment L. S., Gelfan A. N. and Demidov V. N. (2003). "Application of dynamic-stochastic runoff generation models for estimating extreme flood frequency distributions, water resources systems-hydrological risk", Management and Development (Proceedings of symposium HS02b). IAHS Publ. No. 281.

Kuczera G. and Parent E. (1998). "Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm", Journal of Hydrology, 211, pp. 69-85.

Liu Y., and Gupta H.V. (2007). "Uncertainty in hydrologic modeling: toward an integrated data assimilation framework", Water Resour. Res., 43 (W07401), pp. 1-18.

Li. Z, Shao Q., Xu Z. and Cai X. (2010). "Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: A case study of SWAT model applied to Yingluoxia watershed in northwest China", Journal of Hydrology, 385, pp. 76-83.

Majidi A., and 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

Maskey S. and Price RK. (2003). "Uncertainty issues in flood forecasting", In: Proc Workshop: Flood Events—Are We Prepared? Berlin, pp. 123-36.

Maskey S. and Guinot V. (2003). "Improved first order second moment method for uncertainty estimation in flood forecasting", Hydrological Sciences Journal, 48(2), pp. 183-190.

Maskey Sh., Guinot V. and Price R. K. (2004). "Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modelling: a fuzzy set approach", Advances

- Wu S. J., Lien H. C. and Chang C. H. (2010). "Modeling risk analysis for forecasting peak discharge during flooding prevention and warning operation", *Stoch. Environ. Res. Risk Asses.*, ۲۱(۳), pp. ۱-۱۷.
- USACE (1998). HEC-1 flood hydrograph package user's manual, Davis, CA: Hydrologic Engineering Centre.
- USACE (۲۰۰۰). Hydrologic modelling system HEC-HMS technical reference manual. Davis, CA: Hydrologic Engineering Centre.
- Younger P M. Freer J E. and Beven K J. (۲۰۰۹). "Detecting the effects of spatial variability of rainfall on hydrological modelling within an uncertainty analysis framework", *Hydrological Processes*, ۲۳, ۱۹۸۸-۲۰۰۳.
- Yu P.S., Yang T.C. and Chen S.J. (۲۰۰۱). "Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed Rainfall-runoff model", *Journal of Hydrology* ۲۴۴, pp. ۴۳-۵۹.
- Yusop Z., Chan C. H. and Katimon A. (۲۰۰۷). "Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modeling storm flow hydrograph in an oil palm catchment", *Water Science & Technology* Vol. ۵۶, No. ۸, pp. ۴۱-۴۸.
- Tung Y. K. (1987). "Uncertainty analysis of national weather service rainfall frequency atlas", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 2. pp. 179-189.
- Tung Y.-K (1996). "Uncertainty and reliability analysis", *Water Resources Handbook*, McGraw-Hill, New York, NY, USA, pp. 7.1-7.65.
- Uhlenbrook S., Seibert J., Leibundgut C. and Rodhe A. (1999). "Prediction uncertainty of conceptual rainfall runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure", *Hydrological Science*, 44(5), pp. 779-797.
- Wagner T. and Gupta H.V. (2005). "Model identification for hydrological forecasting under uncertainty", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), pp. 378-387.