

## تحلیل عدم قطعیت متغیرهای مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب HEC-HMS با استفاده از روش GLUE در حوضه آبریز سد دز

محمودرضا معقولی<sup>۱</sup>، محمود ذاکری نیری<sup>۲\*</sup> و معصومه سهرابی<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران [Zakeriau@gmail.com](mailto:Zakeriau@gmail.com)

۳- گروه زمین شناسی، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۱۶

### چکیده

این مطالعه، کاربرد روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) را برای واسنجی خودکار مدل معروف HEC-HMS نشان می‌دهد. برای این منظور روش GLUE جهت واسنجی مدل توسعه یافته HEC-HMS، برای حوضه سد دز در جنوب غرب ایران استفاده شد. از سه رخداد انتخاب شده اولین رخداد برای واسنجی مدل؛ سپس تمام رخدادهای برای آنالیز عدم قطعیت و حساسیت توسط GLUE استفاده شدند. واسنجی مدل نشان داد که مدل توسعه یافته با ضریب R2 و ضریب-ساتکلیف به ترتیب ۰.۸۸۷ و ۰.۹ و مدلی مناسب برای شبیه‌سازی سیلاب است. آنالیز حساسیت مدل، بر اساس چهار متغیر روش Green Ampt نشان داد که مدل، حساسیت‌متمایبی را به یک متغیر در رخدادهای مختلف نشان نمی‌دهد؛ برای مثال هدایت هیدرولیکی اشباع بیشترین تأثیر را بر مدل سیلاب ۱ داشت و مدل سیلاب ۳ نیز نسبت به مکش جبهه اشباع و تخلخل خاک حساسیت بیشتری نشان می‌داد. آنالیز عدم قطعیت، با استفاده از توزیع پسین حاکی از عدم قطعیت تخمین بعد از در نظر گرفتن اطلاعات ایجاد شده توسط سیلاب‌های مختلف بود. روی هم رفته، آنالیز GLUE نشان داد که به دلیل منابع خطای متعدد عدم قطعیت عمده‌ای در مدل هیدرولوژیک وجود دارد. همچنین این روش می‌تواند برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک مانند HEC-HMS مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: تحلیل عدم قطعیت، مدل‌سازی بارش-رواناب-HEC-HMS، GLUE.

### مقدمه

غیرخطی بودن در فرآیندهای هیدرولوژیک و عدم یکتایی واسنجی، دستیابی به مقادیر متغیرهای یکتا را سخت می‌سازد. از این رو محدودیت‌های موجود در مدل‌ها و واسنجی آن‌ها منجر به ترکیب آنالیز عدم قطعیت در مدل‌سازی توسط هیدرولوژیست‌ها شده است. منبع ایجاد عدم قطعیت در مدل‌ها مختلف بوده و به ساختار مدل، متغیرها، شرایط اولیه و اطلاعات مشاهده‌ای بستگی دارد. هدف آنالیز عدم قطعیت کمی‌سازی خطای موجود میان مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده و ترجمه آن‌ها به عدم

مدل‌های بارش-رواناب مختلفی برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوضه‌ها توسعه یافته‌اند که نقش مهمی را در پیش‌بینی پاسخ حوضه به فرآیندهای مختلف آب و هوایی در سیستم طبیعی ایفا می‌کنند. در حال این مدل‌ها نیاز به تعدادی متغیر تخمین یافته دارند. واسنجی مدل فرآیند تعدیل مقادیر متغیرها تا رسیدن به پیش‌بینی نزدیک به مشاهدات است. واسنجی دستی مدل‌های هیدرولوژیک سخت، خسته‌کننده و گاهی غیرعملی است مخصوصاً وقتی که تعداد متغیرها زیاد باشد. علاوه بر این درجه بالای

جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Beven and Binley 1992). (Yanget al. 2008). روش - های GLUE، ParaSol، SUFI2، MCMC را در حوضه‌ای در چین مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های مختلف ممکن است به راه حل‌های مختلف در مکان‌های مختلفی و با دبی‌های کم و بیش یکسان همگرا شوند. از میان روش‌های نامبرده روش GLUE پرکاربردترین روش می‌باشد. ذهنیت در انتخاب احتمال‌ها و مقادیر آستانه مورد استفاده در روش GLUE بسیار مورد بحث قرار گرفته است (Beven and Freer 2001; Freer et al. 1996; Refsgaard et al. 2007). (Vrugt et al. 2009). روش‌های Bayesian و GLUE را با یکدیگر مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که هر دو روش تخمین‌های مشابهی را در شرایط قطعی تولید می‌کنند. با توجه به مروری که بر مطالعات گذشته انجام شد می‌توان دید که بیشتر مطالعات در زمینه فن‌های عدم قطعیت برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی پیوسته است. مدل پیوسته مدت‌های طولانی‌تر را تخمین می‌زند و پاسخ حوضه را در طول مدت بارش و میان رخداد‌های بارش شبیه‌سازی می‌کند. منطقه مورد مطالعه حوضه سد دز است. حوضه آبریز رودخانه دز به‌عنوان یک حوضه درجه ۳، زیرمجموعه‌ای از حوضه کارون بزرگ محسوب می‌شود و در تقسیم‌بندی بزرگ‌تر در زیرمجموعه حوضه خلیج فارس و دریای عمان قرار می‌گیرد. بخش عمده بارش‌های جوی در فصل‌های پاییز و زمستان به‌صورت برف است و آب شدن آن‌ها از اواخر فصل زمستان تا اواخر بهار، بخش عمده آب سالانه رواناب‌های سطحی این حوضه را تأمین می‌کند. رودخانه‌های استان خوزستان از پرآب‌ترین رودخانه‌های ایران محسوب می‌شوند که رودخانه دز نیز به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های رودخانه‌های کارون، از این جهت اهمیت فراوانی دارد و نقش مهمی را در حیات شهری مانند دزفول و آبیاری اراضی کشاورزی ایفا می‌کند. در حدود ۲۵ کیلومتری جنوب غربی این نقطه، رود واسک و به فاصله کمی رود زاز از ساحل چپ به رود سزار پیوسته و جریان در جهت جنوب غربی ادامه می‌یابد.

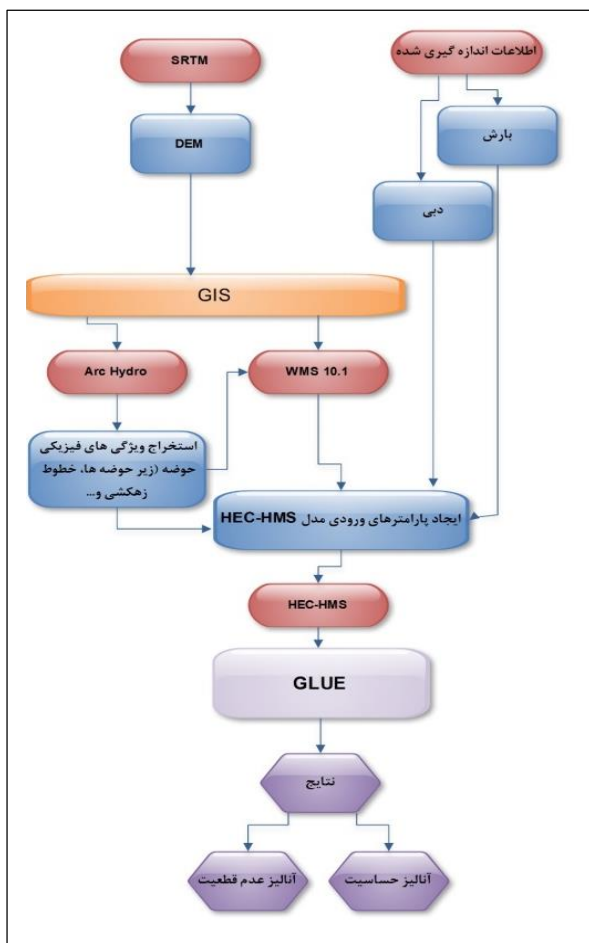
قطعیت نتایج به‌دست آمده است (Beven and Freer 2001; Ibrahim and Liong 1993; Kizza et al. 2011; Vázquez and Feyen 2010; Viola et al. 2009).

متغیرهای ورودی مدل‌های هیدرولوژیک بندرت دارای قطعیت است؛ بنابراین، آن‌ها قادر به تشریح دقیق فرآیندهای هیدرولوژیک نمی‌باشند. اطلاعات ورودی و عدم قطعیت ساختاری مرتبط با مقیاس و تقریب در فرآیندهای هیدرولوژیک منابع مختلف عدم قطعیت است که مدل‌سازی یک فرآیند هیدرولوژیک را با دشواری همراه می‌کند. از این رو مطالعه عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژیک از اهمیت زیادی برخوردار است. مطالعات زیادی در زمینه بررسی عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی انجام شده است (Ebtehaj et al. 2010; Gupta and Sorooshian 1985; Johnston and Pilgrim 1976).

چالش‌های بسیار زیادی مانند ساختار مدل و قابلیت شناخت، عدم یکنابیی متغیرها، نوع تابع هدف و عدم قطعیت در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک وجود دارد. مدل‌سازی عدم قطعیت در مطالعات زیادی انجام شده است (Moradkhani et al. 2005; Muleta and Nicklow 2004; Tolson and Shoemaker 2008). روش‌های متعددی در آنالیز عدم قطعیت مانند، (Yang et al. 2008) روش‌های GLUE، MCMC و SUFI2، ParaSol را در حوضه‌ای در چین مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های مختلف ممکن است به راه حل‌های مختلف در مکان‌های مختلف با دبی‌های کم و بیش یکسان همگرا شوند. از میان روش‌های نامبرده روش GLUE پرکاربردترین روش است این روش در واسنجی و صحت سنجی مدل‌های توزیعی یا نیمه توزیع استفاده می‌شود. این روش همچنین شامل شبیه‌سازی‌های متعدد با مقادیر مختلف متغیرها در مدل است که به‌صورت تصادفی از یک توزیع ثابت ساخته می‌شوند. تمام متغیرهایی که دارای احتمالی بیشتر از یک آستانه مشخص می‌باشند برای ساخت تابع توزیع این متغیرها استفاده می‌شوند که برای پیش‌بینی در مقیاس

کوچک‌تر (که دارای ابعاد یک درجه طولی و یک درجه عرضی است و اندازه هر پیکسل آن ۹۰ متر است) تقسیم می‌شود. قبل از استخراج مرز حوضه عملیات پیش‌پردازش موزایک بر روی اطلاعات انجام گرفت و سپس خصوصیات فیزیکی حوضه توسط نرم‌افزار Arc Hydro استخراج شد.

این مطالعه در چندین مرحله انجام شد. ابتدا اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی جمع‌آوری و با استفاده از اطلاعات رقومی منطقه مورد مطالعه مدل اولیه HEC-HMS در محیط نرم‌افزار WMS 10.1 ساخته شد؛ سپس سه رخداد سیلاب مختلف از میان اطلاعات بارش و دبی منطقه انتخاب و مدل هیدرولوژیکی برای سیلاب اول کالیبره شده و مدل کالیبره شده برای هر سه سیلاب توسط روش GLUE آنالیز شد تا عدم قطعیت و حساسیت مدل توسعه یافته مورد بررسی قرار گیرد. شکل (۱) فلوجارت، روش انجام تحقیق در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- فلوجارت روش انجام مطالعه

رودخانه کوچک سرخاب نیز از ساحل راست به رودخانه سزار متصل می‌شود. در دشت خوزستان با کاهش شیب اراضی، شکل بستر رودخانه‌ها به حالت مئاندر تبدیل شده، سطح مقطع آن افزایش قابل‌ملاحظه‌ای یافته و سرعت جریان آب کاهش می‌یابد. طول مسیر رودخانه از سد انحرافی دزفول (که محل آبیگری شبکه آبیاری دز است) تا محل اتصال به کارون حدود ۱۲۰ کیلومتر است. در این محدوده در مناطق میاناب دزفول و دیمچه از آب رودخانه دز به طریق ثقلی بهره‌برداری می‌شود؛ همچنین با استفاده از تعداد زیادی از پمپ‌ها، اراضی مجاور بستر رودخانه آبیاری می‌گردند.

### اطلاعات هواشناسی

از اطلاعات روزانه بارش ایستگاه ازنا در بازه زمانی ۴۸ ساله از ۱۹۶۶ تا ۲۰۱۴ برای ورود بارش به مدل استفاده شد. اطلاعات مذکور از سازمان مدیریت منابع آب طبیعی کشور اخذ گردید و از آن برای شبیه‌سازی سیلاب بر پایه رخدادهای بارش-رواناب انتخاب شده استفاده شد. اطلاعات هیدرولوژیکی

اطلاعات روزانه دبی ثبت شده در ایستگاه سد دز نیز واقع در خروجی حوضه آن در فاصله ۱۹۶۶ تا ۲۰۱۴ استفاده شد. هیدروگراف سیلاب‌های ثبت شده در بازه روزانه برای شبیه‌سازی بر پایه رخداد بارش-رواناب مورد آنالیز قرار گرفت.

### اطلاعات توپوگرافی

در این مطالعه از اطلاعات رقومی سنجنده به‌عنوان اطلاعات ارتفاعی استفاده شد؛ تا به کمک آن و نرم‌افزار GIS بتوان خصوصیات فیزیکی حوضه مانند مرز آن، طول خطوط آبراهه‌ها و شیب را استخراج نمود. در کنار اطلاعات ارتفاعی دیگر نقشه‌ها نظیر کاربری اراضی، جنس خاک، شبکه زهکشی و شماره منحنی استخراج می‌شوند. این سنجنده با استفاده از روش اندازه‌گیری radar interferometry مدل رقومی ارتفاع را برای تمام سطح کره زمین فراهم می‌کند و نقشه‌های رقومی به قسمت‌های

برای انتقال بارش مازاد به رواناب استفاده شد؛ همچنین روش Muskingum Cung نیز برای روند یابی رودخانه استفاده شد تا بتوان هیدروگراف دبی در نقطه پایین دست رودخانه را تولید نمود.

### روش هدر رفت Green Ampt

روش هدر رفت Green Ampt دارای چهار متغیر هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K$ )، مکش جبهه اشباع ( $\psi_f$ )، تخلخل خاک ( $\Phi$ ) و رطوبت اولیه خاک ( $\theta_i$ ) است که به شکل رابطه (۱) با یکدیگر در ارتباط هستند. متغیرهای این روش به طور مستقیم قابل اندازه گیری نمی باشند اما در مطالعات مختلفی جداولی برای تخمین آن ها از ویژگی های خاک آورده شده است (Zacharias and Wessolek, 2007).

$$f_t = k \left[ \frac{1 + (\phi - \theta_i) S_f}{F_t} \right] \quad (1)$$

که در این معادله  $f_t$ : هدر رفت در زمان  $t$ ،  $k$ : هدایت هیدرولیکی اشباع،  $\phi - \theta_i$ : کمبود رطوبت حجمی،  $S_f$ : مقطع مرطوب و  $F_t$ : هدر رفت تجمعی در زمان  $t$  است.

### هیدروگراف واحد کلارک

هیدروگراف واحد کلارک نیز اولین بار توسط کلارک (۱۹۴۵) و بر پایه پایستگی جرم و به شکل زیر تعریف شد:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - Q_t \quad (2)$$

که در آن  $S$ : ذخیره در زمان  $t$ ،  $I_t$ : جریان متوسط در زمان  $t$  و  $Q_t$ : جریان خروجی در زمان  $t$  است.

روش کلارک از زمان تمرکز و ضریب ذخیره نیز برای محاسبه هیدروگراف استفاده می کند. زمان تمرکز به زمان انتقال آب از دورترین نقطه در حوضه به خروجی آن اطلاق می شود. این متغیر برای تعیین زمان هیدروگراف خروجی استفاده می شود. ضریب ذخیره نیز درجه میرایی در حوضه را نشان می دهد و مانع تبدیل ساده هیدروگراف ورودی به هیدروگراف خروجی می شود. حوضه ای با ضریب ذخیره بزرگ دارای جریان اوج کوچک تر و زمان رواناب

### بیکره بندی مدل هیدرولوژیک HEC-HMS بر پایه رخدادهای

برنامه HEC-HMS توسط سازمان HEC (Hydrological Engineering Center) مهندسين ارتش آمریکا توسعه یافت (Feldman 2000) که مدلی قطعی، نیمه توزیعی و مفهومی است. سیستم این مدل به گونه ای طراحی شده است تا بتواند فرآیند بارش-رواناب را در حوضه آبریز شبیه سازی کند که شامل تأمین آب حوضه رودخانه های بزرگ، سیلاب و رواناب حوضه های شهری است (Doan 2000). بارش ورودی کلیدی به مدل HEC-HMS است که بخش زیادپاز آن به صورت جریان سطحی هنگامی که خاک اشباع است جریان پیدا می کند. با پیشرفت های صورت گرفته در علم GIS، امروزه از نرم افزارهای مربوطه برای ایجاد مدل اولیه HEC-HMS در حوضه های پیچیده استفاده می شود. از این رو در این مطالعه نیز از نرم افزار ArcHydro 10.3 و WMS 10.1 برای ایجاد مدل حوضه و انتقال آن به HEC-HMS استفاده شد. بدین ترتیب حوضه آبریز سد دز به ۲۲ زیر حوضه، ۲۰ محل اتصال آبراهه و ۱۹ آبراهه تقسیم شد که مساحت آن ها از ۴,۰۸ تا ۲۹۷۵ کیلومتر مربع متغیر است. در کنار مساحت زیر حوضه ها ArcHydro طول هر رودخانه در هر زیر حوضه و محل تقاطع زیر حوضه ها را نیز به کمک DEM ترسیم می کند. با توجه به محاسبات انجام شده توسط این نرم افزار طول آبراهه های حوضه از ۰,۹ تا ۱۹ کیلومتر متغیر است.

### ایجاد مدل حوضه

مدل حوضه در HEC-HMS برای هر زیر حوضه توسط دو جزء هیدرولوژیکی زیر حوضه و تقاطع تعریف می شود. زیر حوضه فرآیندهای انتقال بارش-رواناب و هدررفت حاصل از نفوذ و تقاطع نیز اطلاعات جریان مشاهده شده را کنترل می کند. در این مطالعه از میان روش های هدررفت، از روش Green Ampt برای مدل سازی هدررفت حاصل از نفوذ استفاده شد. روش هیدروگراف واحد کلارک نیز

مرزی است تا خروجی‌ها شامل هیدروگراف رواناب حاصل شود.

۴- در این مرحله مقایسه میان هیدروگراف محاسبه شده و مشاهده شده انجام می‌شود تا بتوان صحت مدل‌سازی بررسی شود.

۵- اگر نتایج مطلوب نبود از سعی و خطای دستی و خودکار HEC-HMS استفاده می‌شود تا بتواند مقادیر متغیرها را به صورت دستی و سیستماتیک برای حصول بهترین نتیجه تعدیل نمود.

۶- وقتی که مدل‌سازی بر اساس مشاهدات موجود رضایت‌بخش بود، از متغیرهای موجود برای آنالیز رواناب سیلاب استفاده می‌شود.

#### صحت‌سنجی

برای بررسی مدل توسعه یافته برای شبیه‌سازی سیلاب از سه شاخص آماری راندمان نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و خطای حجمی نسبی (RVE) استفاده شد.

#### الف- راندمان نش-ساتکلیف

این ضریب به صورت معادله (۴) محاسبه می‌شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs(t)} - Q_{sim(t)})^2}{\sum (Q_{obs(t)} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (۴)$$

که در این معادله NSE راندمان نش-ساتکلیف،  $Q_{obs(t)}$  دبی مشاهده شده در زمان  $t$ ،  $Q_{sim(t)}$  دبی شبیه‌سازی شده در زمان  $t$  و  $\bar{Q}_{obs}$  میانگین دبی مشاهده شده است (Nash and Sutcliffe, 1970). مقادیر ضریب NSE از  $-\infty$  تا ۱ متغیر است. با افزایش دقت مدل این مقدار افزایش یافته و در حالتی ایده آل که دبی شبیه‌سازی شده و دبی مشاهده شده کاملاً باهم تطابق داشته باشند به عدد ۱ می‌رسد (Bhattarai, 2013).

#### ب- ضریب تعیین ( $R^2$ )

دیگر ضریب پرکاربرد مورداستفاده در آمار ضریب تعیین است که از معادله (۷) قابل محاسبه است:

طولانی‌تری در مقایسه با حوضه‌ای دارای ضریب ذخیره کوچک است.

#### مدل ماسکینگام کانج

با اینکه روش ماسکینگام ساده و پرکاربرد است؛ اما دارای متغیرهایی است که پایه فیزیکی نداشته و تخمین آن‌ها با دشواری همراه است. از سوی دیگر این مدل بر پایه فرضیاتی بنا شده است که همیشه در کانال‌های طبیعی صادق نیستند. از این رو مدل ماسکینگام کانج برای غلبه بر این محدودیت‌ها ارائه شد. این مدل بر پایه حل معادله پیوستگی (با جریان جانبی  $q_L$ ) و معادله مومنتوم به شرح زیر است

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (۳)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (۴)$$

ترکیب دو رابطه بالا و فرض خطی باعث ایجاد معادله انتشار به شکل زیر می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + c q_L \quad (۵)$$

که در این معادله  $c$ : سرعت موج و  $\mu$ : ضریب پخش هیدرولیکی است.

#### واسنجی مدل

برای واسنجی مناسب مدل HEC-HMS نیاز است تا مراحل زیر طی شود تا بهینه‌ترین مقادیر متغیرها به دست آید:

- ۱- در مرحله اول سری زمانی اطلاعات بارش و دبی جریان جمع‌آوری می‌شود.
- ۲- مرحله دوم انتخاب مقادیر اولیه متغیرها برای روش‌های انتخاب شده در مدل است که پیش‌تر تشریح شدند.
- ۳- مرحله سوم شامل شبیه‌سازی اولیه جریان توسط متغیرهای انتخاب شده در مدل HEC-HMS برای شرایط

ایجاد شده و نتایج حاصل از سری‌های مختلف بر اساس نسبت اعتمادشان وزن گرفته؛ سپس از این وزن‌ها برای تعیین توزیع احتمالاتی پیش‌بینی استفاده می‌شود. معرفی روش‌های عدم قطعیت مبتنی بر روش نمونه‌گیری مونت کارلو زنجیره مارکی توسط (Campbell, 1967) ارائه شد. در واقع روش مونت کارلو وسیله‌ای برای ارزیابی آماری توابع ریاضی بر اساس نمونه‌های تصادفی است.

روش GLUE برای حل مشکل روش‌های واسنجی مرسوم ارائه شده است که بر این مبنا یافتن یک سری منحصر به فرد متغیرهای بهینه غیرممکن بوده و این امر به سبب وجود خطا در متغیرهای ورودی و ساختار مدل‌ها است. برای اجرای روش GLUE می‌بایست گام‌های زیر را اجرا نمود: گام اول: تعیین محدوده تغییرات اولیه (توزیع پیشین) متغیرهای واسنجی مدل است که در این مطالعه نرخ تغییرات متغیرها از واسنجی مدل HEC-HMS برای سیلاب‌های انتخاب‌شده توسط روش Trial Optimization نرم‌افزار HEC-HMS به دست آمد.

گام دوم: تولید تعداد N مجموعه متغیر تصادفی از محدوده تغییرات اولیه بر اساس روش‌های مبتنی بر مونت کارلو که در این تحقیق برای ایجاد مجموعه متغیرهای تصادفی از روش نمونه‌گیری مربع لاتین (LHS) و نرم‌افزار SIMLAB استفاده شد. در واقع روش LHS با نمونه‌گیری در فواصل مساوی در فضای هر متغیر (چهار فاصله مساوی) باعث افزایش دقت در شبیه‌سازی مونت کارلو بدون افزایش در تعداد نمونه‌ها می‌شود. به‌طور عمومی آنالیز مونت کارلو شامل ۵ مرحله است: در مرحله اول، دامنه و توزیع برای هر فاکتور ورودی انتخاب می‌شود؛ این انتخاب‌ها در مرحله بعدی برای تولید نمونه از فاکتورهای ورودی استفاده می‌شود. در مرحله دوم، نمونه‌ای از دامنه‌ها و توزیع‌های انتخاب شده در مرحله اول تولید می‌شود؛ نتایج این مرحله توالی‌ای از عناصر نمونه است. در مرحله سوم، مدل برای هر عنصر نمونه ارزیابی می‌شود؛ در اصل این ارزیابی‌ها باعث ایجاد نقشه‌ای از ورودی‌ها تا نتایج می‌شوند که می‌توانند در آنالیز حساسیت و عدم قطعیت استفاده شوند.

$$R^2 = \frac{\left( \sum (Q_{obs(t)} - \bar{Q}_{obs}) \sum (Q_{sim(t)} - \bar{Q}_{sim(t)}) \right)^2}{\sum (Q_{obs(t)} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum (Q_{sim(t)} - \bar{Q}_{sim(t)})^2}$$

که در این معادله  $Q_{obs}$  و  $Q_{sim}$  دبی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده و  $\bar{Q}_{obs}$  و  $\bar{Q}_{sim}$  میانگین دبی مشاهده‌شده و محاسبه شده‌اند. ضریب تعیین از ۰ تا ۱ متغیر است و مقادیر بالاتر نشان‌دهنده برازش بهتر خط رگرسیون میان دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده است. وقتی دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده کاملاً منطبق بر هم باشند مقدار ۱ به دست خواهد آمد (Masih et al., 2011).

### ج- خطای حجمی نسبی

خطای حجمی نسبی از معادله زیر به دست آید:

$$RVE = \frac{\sum (Q_{sim(t)} - Q_{obs(t)})}{\sum Q_{obs(t)}} \times 100 \quad (8)$$

که در این معادله  $Q_{obs(t)}$  دبی مشاهده‌شده در زمان t و  $Q_{sim(t)}$  دبی شبیه‌سازی شده در زمان t است. RVE از  $-\infty$  تا  $+\infty$  متغیر است. شبیه‌سازی مدل زمانی خوب است که RVE در محدوده  $-5\%$  تا  $+5\%$  قرار گیرد، در حالی که مقادیر بین  $-10\%$  تا  $-5\%$  و  $5\%$  تا  $10\%$  نشان‌دهنده شبیه‌سازی قابل قبول با توجه به خطای حجمی است.

### روش GLUE برای بررسی عدم قطعیت مدل HEC-HMS

روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) یکی از روش‌های پرکاربرد برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت متغیرهای مدل‌های هیدرولوژیکی است که توسط (Beven and Binley, 1992) و بر اساس منابع مختلف عدم قطعیت در مشکلات واقعی و فرض اینکه ساختار خطا پیچیده است، توسعه یافته است. در این روش با فرض عدم وجود متغیرهای بهینه منحصر به فرد، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو چندین سری متغیرهای مختلف

در ستنمایی (L) محاسبه شده در گام قبل به همراه مجموعه متغیرهای ( $\theta$ ) مرتبط به آن به‌صورت کاهشی، درصدی از اجراهای مدل با عملکرد بالاتر به‌عنوان مجموعه متغیرهای قابل قبول انتخاب می‌شود. در این مطالعه از تابع درستنمایی پیشنهادشده توسط (Beven and Freer, 2001; Romanowicz et al., 1994) تفاوت میان دبی مشاهده‌شده و محاسبه‌شده استفاده شده است.

$$L2(\theta_i / Q) = \left( \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^N \quad (11)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{Nobs} \sum_{j=1}^{Nobs} (Q_i^{sim}(t_j) - Q_i^{obs}(t_j))^2$$

در این معادله  $Q^{sim}$  و  $Q^{obs}$  دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، Nobs تعداد دبی‌های مشاهده شده و  $\sigma_i^2$  میانگین مربع اختلاف بین دبی مشاهده شده و محاسبه شده برای  $i$  امین فاکتور می‌باشند. برای هر مجموعه متغیر شبیه‌سازی انجام شده و با مشاهدات روزانه دبی سیلاب در رخداد‌های انتخاب‌شده مقایسه شدند. با مقادیر نش-ساتکلیف بالا ممکن است محاسبات خوبی برای دبی حداکثر سیلاب به دست نیاید؛ از این رو ترکیب این دو معیار برای بررسی رفتار سیلاب مناسب‌تر است. مجموعه متغیرهایی که باعث تولید مقادیر بیشتر از ۰٫۶ برای نش-ساتکلیف و مقادیر بین ۰٫۳- و ۰٫۳ برای خطای نسبی میان دبی حداکثر مشاهده شده و محاسبه شده شوند قابل قبول خواهند بود.

گام پنجم: محاسبه عدم قطعیت خروجی مدل است که این کار توسط شاخص عرض نسبی (R-factor) انجام می‌گیرد.

$$R - factor = \frac{\frac{1}{n} \sum_{ti} (q_{ti,95\%}^M - q_{ti,5\%}^M)}{\sigma_{obs}} \quad (12)$$

در این معادله  $q_{ti,95\%}^M$  و  $q_{ti,5\%}^M$  مرز بالا و پایین فاصله پیش‌بینی شده و  $\sigma_{obs}$  انحراف معیار دبی اندازه‌گیری شده

در مرحله چهارم، نتایج مرحله سوم به‌عنوان پایه‌ای برای آنالیز عدم قطعیت استفاده می‌شوند. در مرحله پنجم نیز آنالیز حساسیت انجام می‌شود.

گام سوم: اجرای مدل HEC-HMS با استفاده از مجموعه متغیرهای تولیدشده در گام قبل و محاسبه مقدار درستنمایی میان مقادیر شبیه‌سازی شده دبی و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در سطح حوضه بر اساس معادله بیز (Bayes) است (معادله ۹). در واقع معادله (۹) برای به‌روزرسانی مقادیر درستنمایی توسط روش GLUE به کار گرفته می‌شود.

$$L_P(\theta / Y_-) = L_0(\theta) L(\theta / Y_-) \quad (9)$$

که در این معادله  $L_P(\theta / Y_-)$ : درستنمایی پسین برای مجموعه متغیر ( $\theta$ )،  $L_0(\theta)$  درستنمایی پیشین و  $L(\theta / Y_-)$  درستنمایی محاسبه‌شده از مجموعه دیتای حاضر است.

معادله (۱۰) نیز برای محاسبه چارک‌های پیش‌بینی هر مجموعه متغیر از درستنمایی تغییر مقیاس یافته استفاده می‌کند:

$$P(Q_t^{sim} < q) = \sum_{i=1}^n L(\theta_i | Q_{t,i}^{sim} < q)$$

در این معادله  $n$  تعداد قابل قبول مجموعه متغیرها،  $Q_{t,i}^{sim}$  مقدار دبی محاسبه‌شده در زمانی  $t$  با استفاده از مجموعه متغیر  $\theta_i$  می‌باشند. توزیع تجمعی ۵ و ۹۵ درصد چارک‌ها در هر بازه زمانی به دست می‌آید. این دو چارک محدودیت شبیه‌سازی می‌باشند که عدم قطعیت گره‌خورده در خروجی مدل با عدم قطعیت متغیرهای مدل را مشخص می‌کنند.

گام چهارم: در این مرحله با در نظر گرفتن آستانه قابل پذیرش (cut-off threshold) مجموعه متغیرهایی که منجر به عمل کرد بهتر مدل شده‌اند از سایر مجموعه متغیرها جدا می‌شوند. به عبارت دیگر با مرتب کردن مقادیر

جدول ۱- اطلاعات سه سیلاب انتخاب شده در بازه زمانی ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۶

Events	StartDate	End Date	Peak Dis(m <sup>3</sup> /s)	Date Peak Dis
E1	01/01/1993	16/01/1993	2813	08/01/1993
E2	04/12/2002	17/12/2002	1004	10/12/2002
E3	04/09/2004	20/09/2004	7268	12/09/2004

هدررفت Green Ampt انجام شود. برای انجام واسنجی از اطلاعات سیلاب ۱ استفاده شد. حد متغیرهای روش Green Ampt نیز با توجه به اطلاعات موجود از راهنماهای نرم افزار HEC-HMS (جدول ۲) وارد مدل شد. جدول ۲- دامنه متغیرهای مورد استفاده برای واسنجی و شبیه سازی مونت کارلو.

Parameters		Prior Distributions
Initial Con	$\theta_i$	0.1-0.5
Saturated Con	$\Phi$	0.3-0.5
Suction	$\psi_f$	1-100
Conductivity	K	0.6-5

HEC-HMS برای بهینه سازی دارای دو روش Univariate gradient و Nelder and Mead است که روش Univariate gradient فقط یک متغیر را درزمان مشخص تعدیل می کند و مقدار دیگر متغیرها در زمان تعدیل آن متغیر اصطلاحاً قفل می شود. در این مطالعه از روش Univariate gradient برای بهینه سازی مدل HEC-HMS استفاده شد. جدول (۳) متغیرهای کالیبره شده روش های هدررفت، هیدروگراف واحد و روندیابی را برای سیلاب ۱ نشان می دهد. از اطلاعات به دست آمده برای آنالیزهای بعدی استفاده شد. شکل (۲) نیز هیدروگراف دبی محاسبه شده در مقابل دبی مشاهده شده برای سیلاب ۱ را نشان می دهد. مقادیر ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین  $R^2$  به ترتیب ۰٫۸۸۷ و ۰٫۹ به دست آمد که نشان دهنده واسنجی خوب مدل برای سیلاب ۱ است. در نتیجه از مقادیر به دست آمده در روش های مختلف برای

است. مطلوب بودن واسنجی و بررسی عدم قطعیت بر اساس حداقل ممکن R-factor است.

### انتخاب سیلاب ها

برای انتخاب سیلاب های مورد نظر از داده های بارش و دبی در فاصله سال های ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۶ استفاده شد و به دلیل دبی بالای رودخانه دز دبی های بیشتر از ۱۰۰۰ متر مکعب در ثانیه به عنوان دبی سیلاب در نظر گرفته شد. بدین ترتیب سه سیلاب مطابق جدول (۱) انتخاب شد که دبی های آنها از ۱۰۰۴ تا ۷۲۶۸ متر مکعب بر ثانیه متغیر می باشد. از این سیلاب ها برای کالیبره کردن مدل رواناب و بررسی عدم قطعیت و آنالیز حساسیت آن استفاده شد.

### بحث و نتایج

#### واسنجی مدل برای سیلاب ۱

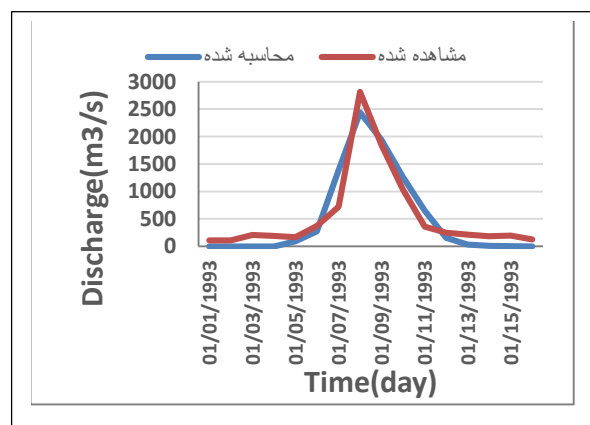
قبل از انجام آنالیزهای عدم قطعیت و حساسیت مدل توسط روش GLUE نیاز است تا دامنه متغیرهای مورد بررسی در مدل HEC-HMS مشخص شوند. در این مطالعه، چهار متغیر روش هدررفت Green Ampt شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (K)، مکش جبهه اشباع ( $\psi_f$ )، تخلخل خاک ( $\Phi$ ) و رطوبت اولیه خاک ( $\theta_i$ ) جهت آنالیزهای نامبرده مورد بررسی قرار گرفتند. قبل از انجام آنالیز بر روی متغیرهای نامبرده، نیاز است که ابتدا مدل واسنجی شود تا بتوان مقادیر بهینه روش هیدروگراف واحد کلارک و روندیابی ماسکینگام کانچ را مشخص کرد؛ همچنین در مراحل بعدی با فرض مقادیر ثابت این دو روش، عدم قطعیت و آنالیز حساسیت بر روی چهار متغیر روش



شبه‌سازی سیلاب‌های دیگر و آنالیز عدم قطعیت و حساسیت مدل استفاده شد.

جدول ۳- مقادیر بهینه شده متغیرهای روش هدررفت Green Ampt، هیدروگراف واحد کلارک و روندیابی ماسکینگام کانج.

Nu	Metode	Parameters	Value
1	Green Ampt	$\theta_i$	0.23
2		$\Phi$	0.35
3		$\psi_f$	82.33
4		K	4.19
5	Clark	Time Of Concentration	9.7
6		Storage Coefficient	15.84
7	Mustingum-cung	Lenght(m)	3586
8		Slope	0.0263
9		Manning	0.025
10		Width	2
11		Side Slope	0.05



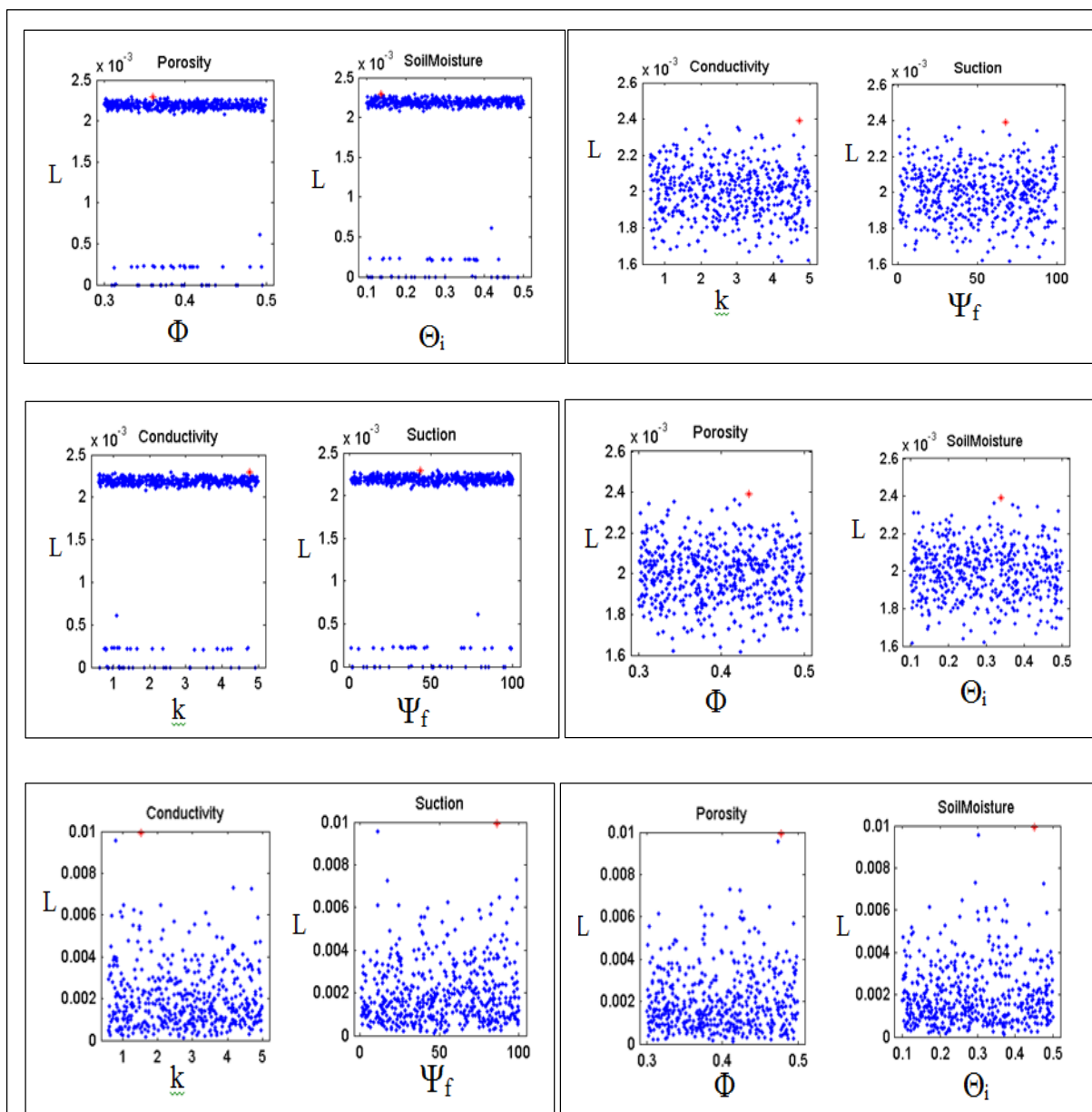
شکل ۲- مقایسه دبی مشاهده شده با دبی محاسبه شده در

سیلاب ۱ در مرحله واسنجی

آنالیز حساسیت

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، برای انجام آنالیز حساسیت و عدم قطعیت از نرم‌افزار GLUEWIN استفاده شد. برای این منظور تعداد ۵۰۰ سری داده تصادفی به روش مونت کارلو از متغیرهای جدول (۲) تولید و مدل HEC-

HMS برای هر سری متغیر و برای هر سه سیلاب به‌طور جداگانه اجرا شد و آنالیزهای مربوطه بر روی نتایج انجام شد. بدین ترتیب برای هر سیلاب تعداد ۵۰۰ اجرا تولید شد و به کمک دبی‌های محاسبه شده در هر اجرا و مقایسه آن‌ها با دبی مشاهده شده سیلاب آنالیز حساسیت و عدم قطعیت انجام شد. رسم مقادیر در دستنمایی در مقابل مقادیر مختلف متغیرها در هر اجرای مدل را اصطلاحاً نمودار نقطه‌ای می‌گویند. شکل (۳) نمودار نقطه‌ای رسم شده برای سه رخداد سیلاب را در هر ۵۰۰ اجرای مدل نشان می‌دهد. به دلیل مشابه بودن نتایج در شکل (۳) در هر چهار متغیر نمی‌توان از نمودار پراکنش در این مطالعه برای تشخیص مؤثرترین متغیر بر روی مدل استفاده کرد. اشکال موجود در شکل (۳) برای هر چهار متغیر در هر سه سیلاب از نظر پراکندگی شباهت زیادی به یکدیگر داشته و از این رو نمودار پراکنش معیار خوبی برای آنالیز حساسیت مدل نیست. به دلیل نزدیکی تأثیر چهار متغیر روش Green Ampt بر مدل رواناب، از رسم توزیع تجمعی مرزی برای آنالیز حساسیت و تشخیص مؤثرترین متغیر بر مدل رواناب استفاده شد. شکل (۴) نمودارهای رسم شده برای هر سه سیلاب را نشان می‌دهد. در نمودار توزیع تجمعی خط بالا نشان‌دهنده ۵۰ درصد بالاترین مقادیر در دستنمایی و خط پایین نشان‌دهنده ۵۰ درصد کمترین مقادیر در دستنمایی است و هرچه فاصله این دو خط از یکدیگر بیشتر باشد نشان‌دهنده حساسیت مدل به آن متغیر است. مطابق نتایج حاصل برای سیلاب ۱ می‌توان دید که هدایت هیدرولیکی اشباع به دلیل تفاوت واضح میان دو خط نمودار تأثیر بیشتری را بر مدل دارد و تغییرات آن باعث تغییرات بیشتر در مدل رواناب می‌شود. این امر توسط دیگر محققان (Borrell et al., 2005; Castillo et al., 2003; Senarath et al., 2000) نیز بیان شده است. اما این وضعیت برای سیلاب‌های دیگر یکسان نبود. همان‌طور که از شکل (۴:ب) می‌تواند دید مدل حساسیت مشخصی را نسبت به تغییرات چهار متغیر نشان نمی‌دهد؛ اما در شکل (۴:ج)



شکل ۳- نمودار پراکنش متغیرهای روش *Green Ampt* در مقابل مقادیر درستمایی در هر ۵۰۰ اجرای مدل برای الف (سیلاب ۱، ب)

### سیلاب ۲ و ج سیلاب ۳

تأثیر زیادی بر مدل سیلاب ندارد زیرا در هر سه سیلاب نمودارهای رسم شده آن اختلاف فاحشی را از خود نشان نمی‌دهند.

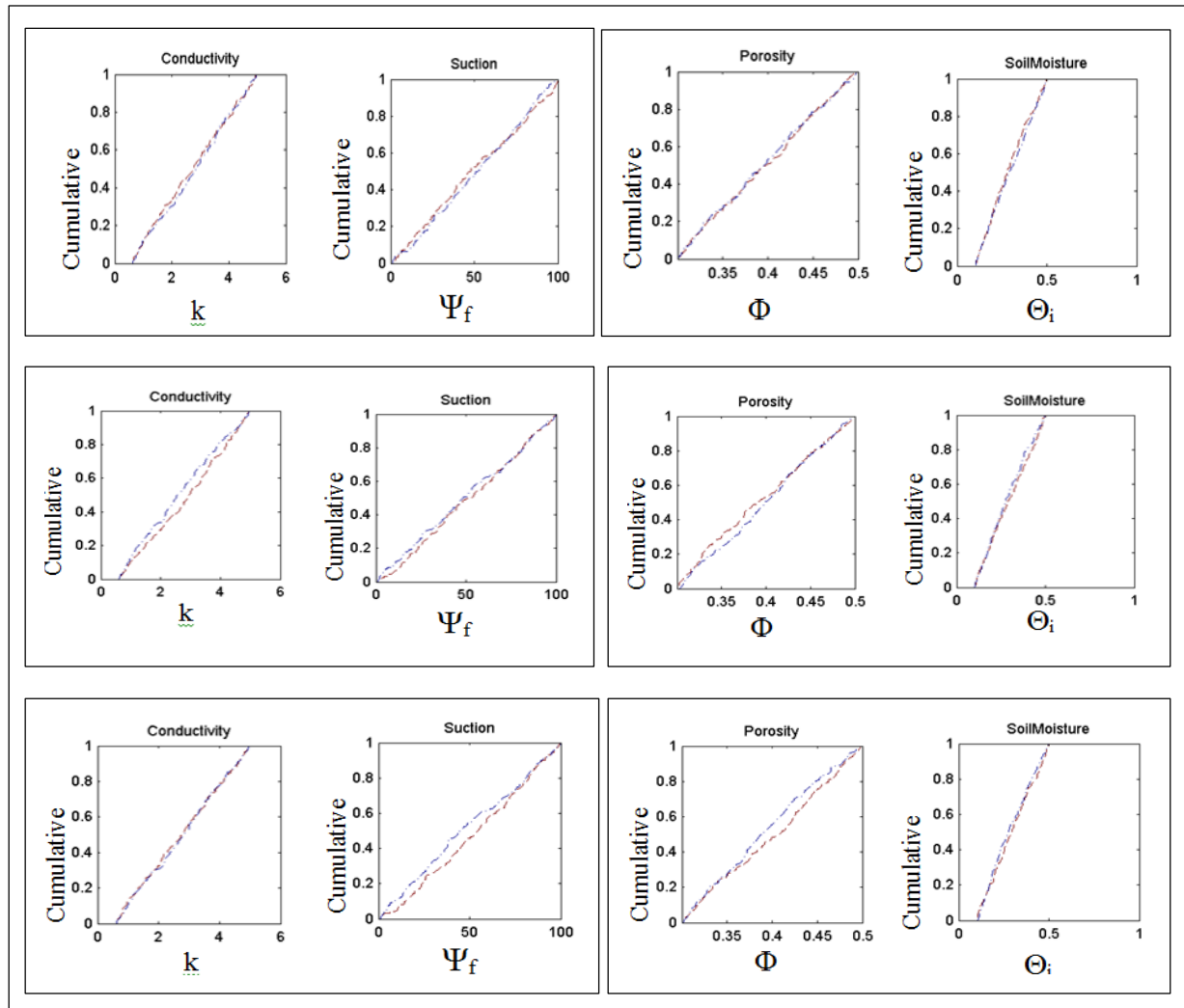
### آنالیز عدم قطعیت

در این مرحله از آنالیز، مقادیر درستمایی برای هر رخداد سیلاب محاسبه شده تا بتوان متغیر بودن توزیع پسین در یک رخداد و از رخدادی به رخداد دیگر را مورد بررسی قرارداد. توزیع‌های متغیرهای پسین محاسبه شده توسط

می‌توان دید مدل سیلاب ۳ به مکش اشباع و تخلخل حساسیت بیشتری را نشان می‌دهند. از این نتایج چنین استنباط می‌شود که حساسیت مدل سیلاب به متغیرهای روش هدررفت در همه رخدادها یکسان نبوده و این امر می‌تواند ناشی از تأثیر واسنجی مدل در یک سیلاب و استفاده از متغیرهای واسنجی شده در سیلاب دیگر باشد. که می‌تواند بر روی حساسیت مدل نسبت به یک متغیر اثرگذار باشد. به‌طورکلی از نتایج آنالیز حساسیت در سه سیلاب می‌توان نتیجه گرفت که فاکتور رطوبت خاک

تعیین‌شده و در مقابل توزیع‌های هموار و پراکنده بیانگر متغیرهای غیرقطعی می‌باشند. از اشکال موجود می‌توان دید که متغیرهای به‌کاررفته روش Green Ampt دارای توزیع یکنواختی نیستند و از آنجایی که نمودار توزیع همه متغیرها دارای پراکندگی و صافی می‌باشند، می‌توان گفت که دارای عدم قطعیت می‌باشند.

روش GLUE برای مدل HEC-HMS در شکل (۳) نشان داده‌شده است. برای هر متغیر، توزیع پسین (که مطابق با تابع چگالی احتمال (PDF) آن است) محاسبه شده است که بیانگر عدم قطعیت تخمین بعد از در نظر گرفتن اطلاعات موجود در سیلاب‌های مختلف است. شکل توزیع‌ها در شکل (۴) بیانگر درجه عدم قطعیت تخمین‌ها است. توزیع‌های تند و دارای پیک بیانگر متغیرهای خوب

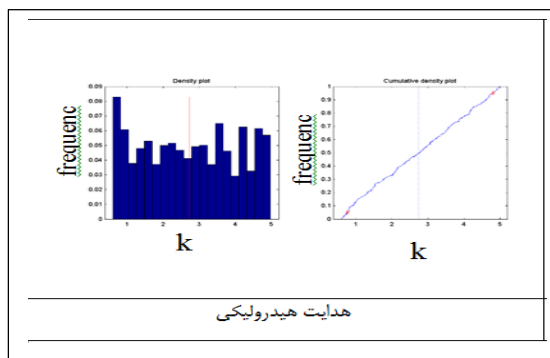
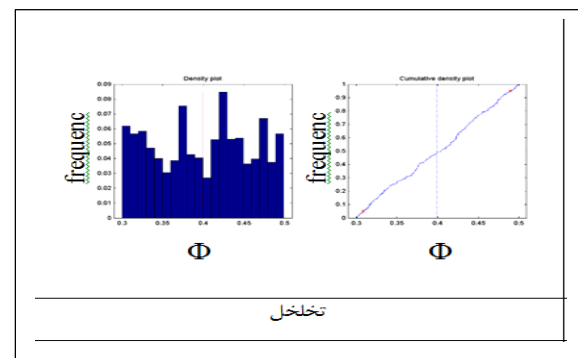
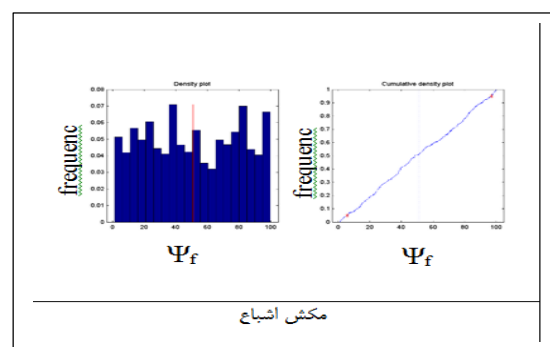
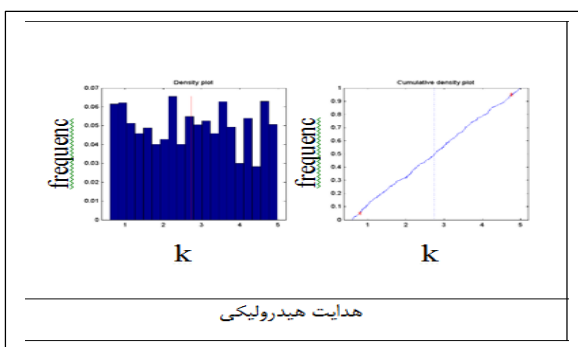
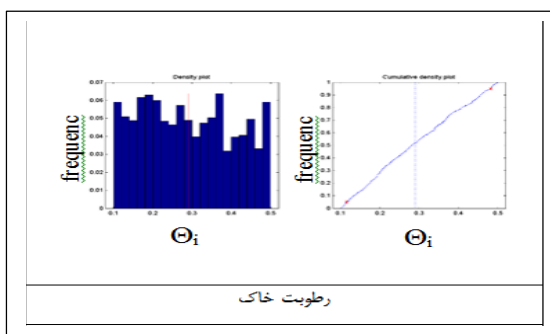
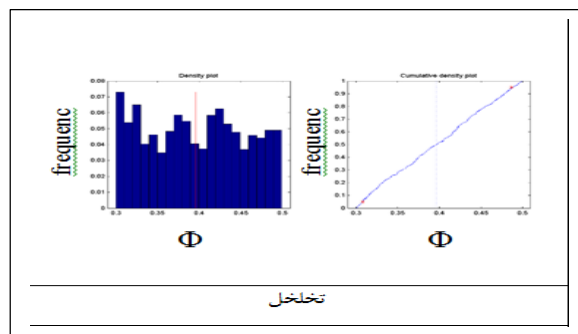
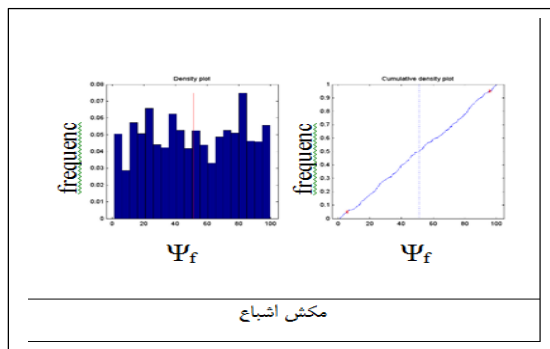
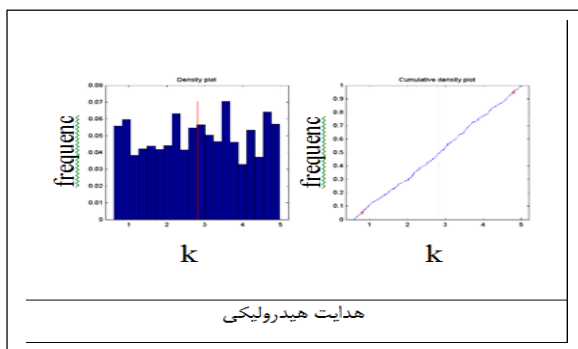
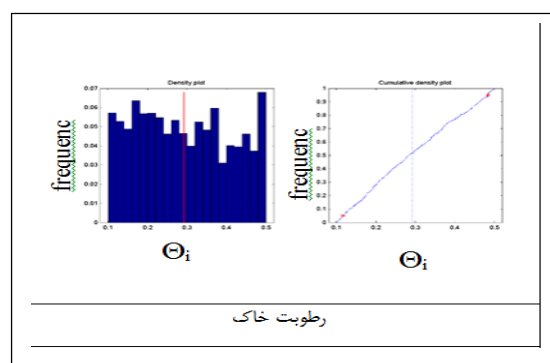
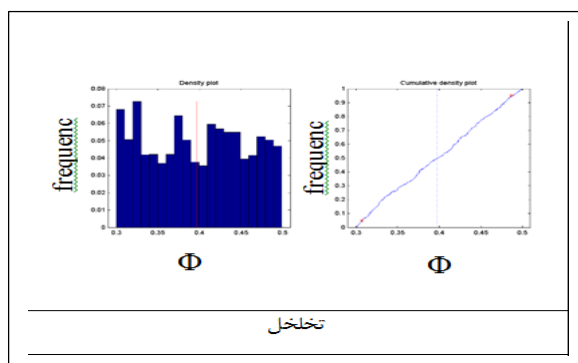


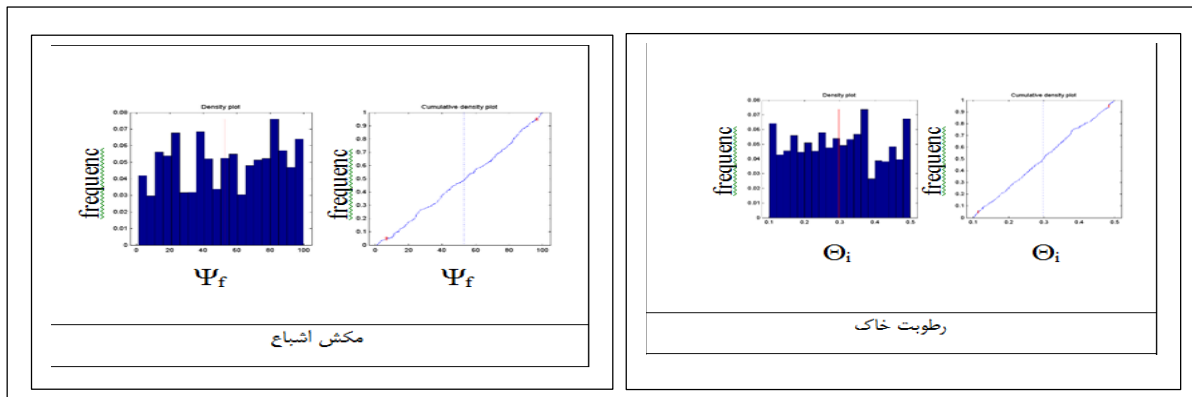
شکل ۴-توزیع تجمعی مرزی متغیرهای روش Green Ampt در هر ۵۰۰ اجرای مدل برای الف (سیلاب ۱، ب) سیلاب ۲ و ج سیلاب ۳

#### فاصله پیش‌بینی

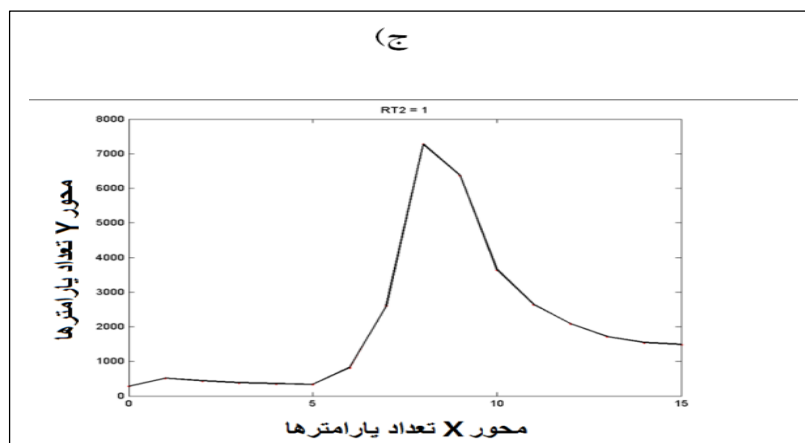
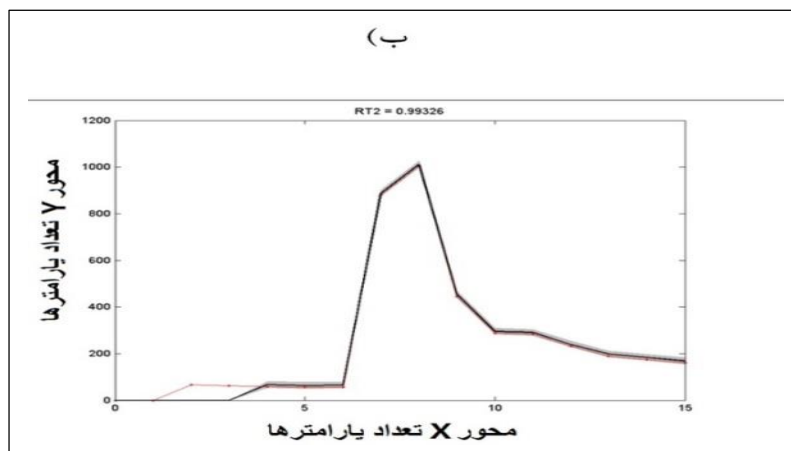
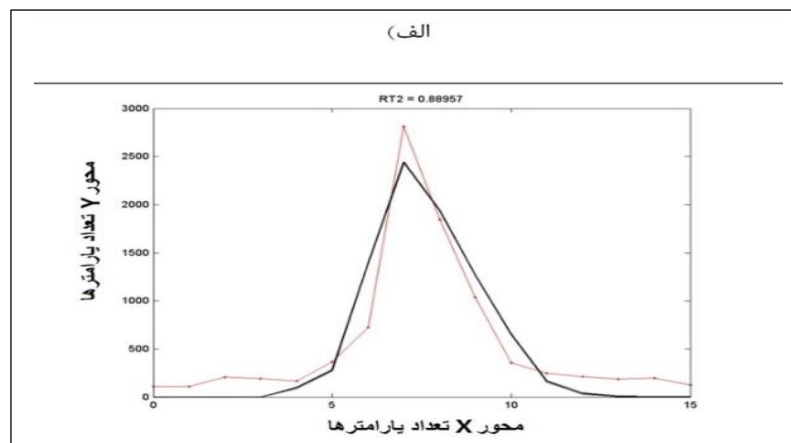
اطمینان ۵ و ۹۵ تخمین‌های HEC-HMS به‌کاربرده شد. شکل (۸) باند تخمین ۹۰ درصد بر اساس مقادیر متغیرهای پسین را برای هر سه سیلاب نشان می‌دهد. اگر پهنای باند به‌اندازه‌ای بزرگ باشد که بیشتر مشاهدات را

بعد از شبیه‌سازی مدل، مقادیر درست‌نمایی اجازه محاسبه تابع چگالی احتمال تخمین‌های مدل را می‌دهد که به کمک آن می‌توان فاصله پیش‌بینی متغیرها را محاسبه نمود. مقادیر قابل‌قبوله دست‌آمده از آنالیز GLUE برای محاسبه محدودیت





شکل ۴- نمودارهای توزیع پسین و تابع چگالی احتمال متغیرهای روش Green Ampt برای الف (سیلاب ۱، ب) سیلاب ۲ و ج سیلاب ۳



شکل ۵- بانده عدم قطعیت پیش‌بینی برای دبی‌های محاسبه‌شده بر اساس متغیرهای پسین برای الف (سیلاب ۱)، ب (سیلاب ۲ و ج) سیلاب ۳. دبی مشاهده‌شده (خط قرمز)، دبی شبیه‌سازی شده (خط سیاه) و عدم قطعیت تخمین مدل (ناحیه خاکستری).

موجود در بارش باعث ایجاد خطاهای بزرگ تری در تخمین رواناب می شود که برای رفع این مشکل به عنوان مثالی توان از تعداد بیشتری از ایستگاه های اندازه گیری بارش استفاده کرد.

در این مطالعه اگرچه آنالیز GLUE عدم قطعیت ذاتی مدل هیدرولوژیک را به دلیل وجود منابع مختلف خطا نشان داد اما مدل توسعه یافته می تواند برای تخمین دبی سیلاب استفاده شود. این مدل با تخمین عدم قطعیت متغیرهای مدل می تواند ما را در یافتن مقادیر دقیق تر هر متغیر در مرحله واسنجی یاری نماید. برای تحقیقات آینده نیاز است تا دیگر منابع تولید عدم قطعیت در ورودی و خروجی مدل برای مطالعه دقیق تر عدم قطعیت مورد استفاده قرار گیرند.

#### منابع

- Abbaspour, K.C., Johnson, C., Van Genuchten, M.T., (2004). "Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure". *Vadose Zone Journal*, 3(4): 1340-1352.
- Beven, K. Binley, A. (1992). "The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction". *Hydrological processes*, 6(3): 279-298.
- Beven, K. Freer, J. (2001). "Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology". *Journal of hydrology*, 249(1-4): 11-29.
- Borrell, V.E. Chorda, J. Dartus, D. (2005). "Prévision des crues éclair. *Comptes Rendus Géoscience*", 337(13): 1109-1119.
- Campbell, P.M. (1967). "Monte Carlo method for radiative transfer". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10(4): 519-527.
- Castillo, V. Gomez-Plaza, A. Martinez-Mena, M. (2003). "The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach". *Journal of Hydrology*, 284(1-4): 114-130.
- Chu, X. Steinman, A. (2009). "Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1): 119-124.
- Doan, J. (2000). "Geospatial hydrologic modeling extension HEC-GeoHMS-user's manual-version 1.0. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center", Davis, California, USA.

پوشانند، بدان معناست که تغییر پذیری متغیر به تنهایی می تواند دیگر منابع خطا مانند خطای اندازه گیری و ساختار مدل را جبران نماید؛ بنابراین می تواند برای عدم قطعیت خروجی در نظر گرفته شود. به طور آماری مقادیر فاکتور R برای سیلاب ۲،۱ و ۳ به ترتیب ۰،۸۸، ۰،۹۹ و ۱ محاسبه شد که نشان می دهد مدل GLUE نتوانسته است به خوبی مقادیر مشاهده شده را تخمین بزند؛ زیرا مقادیر R هرچه کوچک تر از ۱ باشند عدم قطعیت تخمین کمتر خواهد بود. همان طور که در شکل (۵) می توان دید مدل GLUE تخمین خوبی را از دبی در هر سه سیلاب داشته است؛ اما باند عدم قطعیت در سیلاب ۲ و ۳ شبیه به یکدیگر است.

#### نتیجه گیری

هدف از مطالعه انجام شده ارزیابی عدم قطعیت متغیرهای مدل HEC-HMS و بررسی حساسیت مدل به متغیرهای ورودی آن توسط مدل روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) بود. این کاربر روی مدل هیدرولوژیک تولید شده بر روی حوضه سد دز انجام شد. آنالیز عدم قطعیت نشان داد که متغیرهای به کار رفته در روش Green Ampt دارای توزیع یکنواختی نیستند و از آنجایی که نمودار توزیع همه متغیرها دارای پراکندگی و صافی می باشند می توان گفت که دارای عدم قطعیت می باشند. برای محاسبه فاصله پیش بینی متغیرهای روش Green Ampt مقادیر قابل قبول به دست آمده از آنالیز GLUE برای محاسبه محدودیت اطمینان ۵ و ۹۵ تخمین های HEC-HMS به کار برده شد. به طور آماری مقادیر فاکتور R برای سیلاب ۲،۱ و ۳ به ترتیب ۰،۸۸، ۰،۹۹ و ۱ محاسبه شد که نشان می دهد مدل GLUE نتوانسته است به خوبی مقادیر مشاهده شده را تخمین بزند؛ زیرا مقادیر R هرچه کوچک تر از ۱ باشند عدم قطعیت تخمین کمتر خواهد بود. دلایل ایجاد این امر خطاهای موجود در ورودی های مدل و مقادیر مشاهده شده است که باعث ایجاد عدم قطعیت تخمین در مدل شده است. در مناطق خشک و نیمه خشک مانند حوضه سد دز به دلیل ماهیت غیرخطی رواناب خطاهای

Province, Vietnam. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC).

**-Ratto, M. Tarantola, S. Saltelli, A. (2001).** "Sensitivity analysis in model calibration: GSA-GLUE approach". *Computer Physics Communications*, 136(3): 212-224.

**-Romanowicz, R. Beven, K. Tawn, J. (1994).** "Evaluation of predictive uncertainty in nonlinear hydrological models using a Bayesian approach". *Statistics for the Environment*, 2: 297-317.

**-Spear, R. Hornberger, G. (1980).** "Eutrophication in Peel Inlet—II. Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis". *Water Research*, 14(1): 43-49.

**-Tolson, B.A. Shoemaker, C.A. (2008).** "Efficient prediction uncertainty approximation in the calibration of environmental simulation models". *Water Resources Research*, 44(4).

**-Vázquez, R. Feyen, J. (2010).** "Rainfall-runoff modelling of a rocky catchment with limited data availability: Defining prediction limits". *Journal of hydrology*, 387(1-2): 128-140.

**-Vrugt, J.A. Gupta, H.V. Bouten, W. Sorooshian, S. (2003).** "A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters". *Water resources research*, 39(8).

**-Vrugt, J.A. Ter Braak, C.J. Clark, M.P. Hyman, J.M. Robinson, B.A. (2008).** "Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation". *Water Resources Research*, 44(12).

**-Vrugt, J.A. Ter Braak, C.J. Gupta, H.V. Robinson, B.A. (2009).** "Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian". *approaches in hydrologic modeling? Stochastic environmental research and risk assessment*, 23(7): 1011-1026.

**-Yang, J. Reichert, P. Abbaspour, K.C. Xia, J. Yang, H. (2008).** "Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China". *Journal of Hydrology*, 358(1-2): 1-23.

**-Duan, Q. Ajami, N.K. Gao, X. Sorooshian, S. (2007).** "Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging". *Advances in Water Resources*, 30(3): 1371-1386.

**-Ebtehaj, M. Moradkhani, H. Gupta, H.V. (2010).** "Improving robustness of hydrologic parameter estimation by the use of moving block bootstrap resampling". *Water resources research*, 46(7).

**-Feldman, A. (2000).** "HEC-HMS Hydrologic Modeling System-Technical Reference Manual". US Army Corps of Engineers-Hydrologic Engineering Center. USA.

**-Freer, J. Beven, K. Ambrose, B. (1996).** "Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach". *Water Resources Research*, 32(7): 2161-2173.

**-Gupta, V.K. Sorooshian, S. (1985).** "The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models". *Journal of Hydrology*, 81(1-2): 57-77.

**-Ibrahim, Y. Liang, S.Y. (1993).** "A method of estimating optimal catchment model parameters". *Water resources research*, 29(9): 3049-3058.

**-Johnston, P. Pilgrim, D. 1976.** Parameter optimization for watershed models. *Water Resources Research*, 12(3): 477-486.

**-Kizza, M. Rodhe, A. Xu, C.Y. Ntale, H.K. (2011).** "Modelling catchment inflows into Lake Victoria: uncertainties in rainfall-runoff modelling for the Nzoia River". *Hydrological sciences journal*, 56(7): 1210-1226.

**-Masih, I. Maskey, S. Uhlenbrook, S. Smakhtin, V. (2011).** "Assessing the impact of areal precipitation input on streamflow simulations using the SWAT model". *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47(1): 179-195.

**-Mirzaei, M. et al. 2015.** Uncertainty analysis for extreme flood events in a semi-arid region. *Natural Hazards*, 78(3): 1947-1960.

**-Mousavi, S.J. Abbaspour, K.C. Kamali, B. Amini, M. Yang, H. (2012).** "Uncertainty-based automatic calibration of HEC-HMS model using sequential uncertainty fitting approach". *Journal of Hydroinformatics*, 14(2): 286-309.

**-Nash, J.E. Sutcliffe, J.V. (1970).** "River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles". *Journal of hydrology*, 10(3): 282-290.

**-Pedziszai, E. (2010).** "Rainfall-runoff Modelling for Flash Floods in Cuong Thinh Catchment", Yen Bai

## Uncertainty analysis of HEC-HMS parameters using the GLUE methodology in Dez Dam watershed

Mahmoodreza Maghouli<sup>1</sup>, Mahmood Zakeri Niri<sup>2\*</sup> & Masoume Sohrabi<sup>3</sup>

1- M.s. Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran  
2- Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran  
3- Department of Geology, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

### Abstract

This study represents the application of a generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) technique for automatic calibration of the well-known Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modelling System (HEC-HMS) model. For this purpose, the GLUE method was used in calibration of the HEC-HMS model built for Dez Dam basin located in south-west of Iran. From the three selected events, first event was used for calibration and all events were used for uncertainty and sensitivity analysis using GLUE approach. Model calibration showed that the developed model is a suitable model for simulation of flood with R2 and Nash-Sutcliffe Efficiency of 0.9 and 0.887, respectively. Sensitivity analysis of the model based on the four parameters of the Green Ampt method indicated that model does not show the same sensitivity on the same parameter in different events. For instance, saturated hydraulic conductivity has the greatest influence on the model of event 1 and model of event 3 is more sensitive to saturation suction at the wetting front and porosity. Uncertainty analysis using posterior distribution describes the uncertainty of estimation after taking into account information provided by the various flood events. Overall, the GLUE analysis showed that there is a significant uncertainty associated with hydrological modelling that is due to multiple sources of errors. Also, this method can be used for calibration of hydrological models like HEC-HMS.

**Keywords:** Uncertainty analysis, Rainfall-runoff modeling, HEC-HMS, GLUE.