



Uncertainty Analysis Due to the Application of Different Infiltration Methods on the Performance of HEC-HMS Model Using GLUE Algorithm

S. Roodaki¹ and A. Azizian^{2*}

Abstract

Quantifying the uncertainty contribution of important factors on the performance of rainfall-runoff models has always been one of the major challenges for researchers and hydrologists. The main problems of applying these models especially in calibration period are the large number of required parameters and the lack of physical understanding for some of them. In contrast of previous studies that have been carried out on the assessment of infiltration methods in the field scale and point measurements, this research addressed the uncertainty contribution of different infiltration methods (Green-Ampt, SCS-CN, Exponential, Smith-Parlange, Initial-Constant and Deficit-Constant) on the performance of HEC-HMS model using GLUE algorithm in the Chehel chai river basin. Results showed that using each of infiltration methods imposes different uncertainty bounds on the simulated flood hydrograph by HEC-HMS. Findings indicate that SCS-CN and Smith-Parlange owing to have the higher P-factor (0.78 and 0.72) and lower ARIL (0.39 and 0.40) values, enforce minimum uncertainty on the model output. In addition, these methods have the fewer sensitive parameters and then outperform other methods. In contrast, the uncertainty of applying Initial-Constant and Deficit-Constant methods for simulation of flood hydrograph is relatively high and the smaller percentage of observed data fall into the 95% uncertainty bounds. Moreover, sensitivity analysis of the parameters of each of the infiltration methods using the nonparametric Kolmogorov-Smirnov (D) test showed that parameters with the sharp and peaked distributions indicate well-identifiable parameters, while flat and spread distributions indicate uncertain parameters. Overall, the outcomes of this study prove that GLUE algorithm has high ability to determine the optimal range of rainfall-runoff model parameters and the prediction uncertainty bounds.

Keywords: Hydrological Model, Uncertainty, GLUE Algorithm, Flood Routing, Effective Rainfall.

Received: February 26, 2020

Accepted: May 12, 2020

تحلیل عدم قطعیت ناشی از کاربرد روش های مختلف برآورد نفوذ بر عملکرد مدل بارش - رواناب HEC-HMS با استفاده از الگوریتم GLUE

سارا رودکی^۱ و اصغر عزیزیان^{۲*}

چکیده

بررسی و کمی کردن عدم قطعیت ناشی از عوامل مختلف و مؤثر بر عملکرد مدل های بارش - رواناب همواره به عنوان یکی از چالش های مهم محققین و هیدرولوژیست ها به شمار می رود. به دلیل تعدد پارامترهای ورودی مدل های بارش - رواناب و عدم وجود درک درست و کافی از ماهیت فیزیکی آنها، کاربرد این مدل ها به ویژه در مرحله واسنجی با مشکل مواجه شده است. برخلاف مطالعات انجام شده در زمینه ارزیابی معادلات نفوذ که عمدتاً در مقیاس مزرعه و به صورت نقطه ای بوده است، پژوهش حاضر، با هدف بررسی عدم قطعیت ناشی از روش های مختلف برآورد نفوذ: Initial-Constant, Smith-Parlange, Exponential, SCS-CN, Green-Ampt و Deficit-Constant بر هیدروگراف سیلاب شبیه سازی شده توسط مدل رخدادمحور HEC-HMS و با استفاده از الگوریتم GLUE در حوضه چهل چای استان گلستان به انجام رسیده است. براساس نتایج این تحقیق، استفاده از روابط مختلف نفوذ باند عدم قطعیت متفاوتی در هیدروگراف سیلاب شبیه سازی شده توسط مدل ایجاد نموده است. محاسبات انجام شده حاکی از آن است که در صورت استفاده از دو معادله نفوذ SCS و Smith-Parlange به علت دارا بودن بیشترین مقدار P-Factor (به ترتیب معادل ۰/۷۸ و ۰/۷۲) و کمترین مقدار ARIL (به ترتیب معادل ۰/۳۹ و ۰/۴۰)، موجب عدم قطعیت کمتر در خروجی مدل HEC-HMS شده است. علاوه بر این، روابط ارائه شده به علت پارامترهای حساس کمتر از کارایی به مراتب بالاتری نسبت به دیگر روش ها برخوردار بوده اند. برخلاف روش های مذکور، عدم قطعیت ناشی از کاربرد معادلات نفوذ Initial & Constant و Deficit & Constant جهت برآورد هیدروگراف سیلاب نسبتاً بالا بوده و درصد کمتری از داده های مشاهده شده در پهنای باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار گرفته اند. تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی هر کدام از معادلات نفوذ با استفاده از آماره d در روش غیرپارامتریک کلموگراف-اسمیرنوف نیز نشان داد که پارامترهایی که دارای توزیع با شیب زیاد و شکل کشیده ای هستند، به ترتیب دارای عدم قطعیت کم و زیاد می باشند. به طور کلی یافته های این تحقیق نشان داد که الگوریتم GLUE از توانایی بالایی در تعیین محدوده بهینه پارامترهای مدل بارش - رواناب و تخمین باند عدم قطعیت پیش بینی برخوردار بوده است.

کلمات کلیدی: مدل هیدرولوژیکی، عدم قطعیت، الگوریتم GLUE،

روندبایی سیلاب، بارش مؤثر.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۲/۲۳

1- M.Sc. in Water Resources Engineering, Water engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Assistant Professor, Water engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: azizian@eng.ikiu.ac.ir

*- Corresponding author

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

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

۱- مقدمه

تعداد پارامترهای مدل زیاد است با محدودیت روبرو می‌نماید (Montanari, 2011; Wei et al., 2015). همچنین فرآیند پیاده‌سازی و برنامه‌نویسی برخی از الگوریتم‌ها مانند DREAM نیازمند حجم محاسباتی زیادی بوده و همین مسأله در مطالعاتی همچون هشدار سیل (که نیازمند به‌روزرسانی هرچه سریعتر پارامترهای مدل هستند) معطلی بزرگ به‌شمار می‌آید. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های بارش-رواناب مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش احتمالاتی^۱ GLUE می‌باشد (Beven and Binley, 1992; Beven and Freer, 2001; Montanari, 2007; Blasone et al., 2008; Lee et al., 2010; Mannina, 2011; Wei et al., 2015; Hamraz et al., 2016; Meishui et al., 2016; Nasserri and Ahmadi, 2019) که در زمره محبوب‌ترین روش‌های ارزیابی مبتنی بر نمونه‌برداری قرار دارد. این روش براساس رویکرد بنیادی مونت کارلو در تلفیق با تئوری بیز استقرار یافته و به‌خصوص در ارزیابی مدل‌های بارش-رواناب و محیط زیست مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد (Beven and Binley, 1992; Beven, 2006; Jafarzadeh et al., 2016; Nasserri and Ahmadi, 2019). این روش با فرض عدم وجود پارامترهای بهینه یکتا و با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۲ چندین سری از پارامترهای مختلف مدل ایجاد شده و با اجرای مدل موردنظر، باند عدم قطعیت خروجی مدل به‌دست می‌آید. برای کاهش میزان خطا و عدم قطعیت در هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده توسط یک مدل هیدرولوژی، تخمین صحیح میزان نفوذ آب در خاک عاملی مهم به‌شمار می‌آید. در طول دهه‌های گذشته روابط ریاضی و تجربی متعددی توسط محققین مختلف برای برآورد مقدار نفوذ آب در خاک و متعاقب آن محاسبه بارش مؤثر، ارائه شده است (Abodd, 2012). هسته اصلی و مرکزی بسیاری از مدل‌های بارش-رواناب به‌ویژه رخدادمحور (Event based) همانند TOPMODEL^۳، KW-GIUH^۴ و HEC-HMS^۵ عامل نفوذ می‌باشد. نفوذپذیری از جمله مؤلفه‌های مهم در بررسی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز محسوب می‌گردد و نشان‌دهنده سرعت عمودی حرکت آب به داخل خاک است؛ نفوذپذیری خاک می‌تواند بر روی مدیریت نگهداشت آب در خاک در مناطق کوهستانی که یک چالش بزرگ محسوب می‌شود، تأثیر به‌سزایی داشته باشد (Kothyari, 1983; Oyarzun, 1995; Rawls, 1989; Silva, 2007).

تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه ارزیابی معادلات مختلف نفوذ به انجام رسیده است که عمده آنها در مقیاس مزرعه و به صورت نقطه‌ای بوده است (Chahinian, 2005; Coleman, 2008; Abodd et al.,).

با توجه به افزایش فناوری‌های رایانه‌ای در دهه‌های اخیر، مدل‌های هیدرولوژیکی از اهمیت بسیار زیادی در تحلیل سیستم‌های مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب برخوردار شده‌اند. مدل‌های هیدرولوژیکی شامل تعداد زیادی از پارامترها برای شبیه‌سازی مؤلفه‌هایی مانند: رواناب سطحی و زیرسطحی، آب زیرزمینی، مقدار نفوذ آب در خاک، تبخیر و تعرق و غیره هستند که به اطلاعات ارزشمندی از خصوصیات خاک، وضعیت کاربری اراضی حوضه و توزیع مکانی بارش نیازمند می‌باشند (Gaither and Sorooshian, 1996). در بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی نمی‌توان برخی از پارامترها را به صورت مستقیم اندازه‌گیری نمود و لازم است که آنها را طی فرآیند واسنجی تعیین کرد. با این وجود، تخمین پارامترهای مدل به علت وجود عدم قطعیت پارامترهایی که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند، مشکل می‌باشد (Beven, 1997; Hankin et al., 2001). در بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی بارش-رواناب عمدتاً از روش‌های جستجو با سعی و خطا که اغلب زمان‌بر بوده و دارای عدم قطعیت زیادی در رسیدن به جواب بهینه هستند، استفاده شده است. در واقع در فرآیند مدل‌سازی همواره خطاهای ذاتی و اجتناب‌ناپذیری وجود دارد که یکی از علت‌های اصلی آن وجود عدم قطعیت در داده‌های ورودی، پارامترها و ساختار مدل است (Beven, 1996). بنابراین کمی نمودن میزان عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها برای رسیدن به شبیه‌سازی‌ها و پیش‌بینی‌های مطمئن‌تر امری ضروری در مدل‌سازی به‌شمار می‌آید. روش‌های پیشرفته‌تر ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای چنین مدل‌هایی بر مبنای به‌روزرسانی و اصلاح نتایج با استفاده از داده‌های مشاهداتی جدید استوار می‌باشند. در کلیه روش‌های تحلیل عدم قطعیت، فرض بر عدم وجود سری پارامترهای بهینه یکتا برای یک مدل بارش-رواناب است. بنابراین با قبول وجود چندین جواب بهینه برای پارامترهای یک مدل، تنها راه رسیدن به جواب منطقی رتبه‌بندی سری پارامترها براساس نحوه انطباق رواناب محاسبه‌ای و مشاهداتی است که در این صورت می‌توان محدوده تغییرات هر پارامتر را به همراه توزیع احتمالاتی آن مشخص نمود (Heidari et al., 2005).

عمده روش‌های بررسی عدم قطعیت در مدل‌های بارش-رواناب و مباحث مدل‌سازی منابع آب بر پایه شبیه‌سازی مونت کارلو استوار هستند که از مهمترین آنها می‌توان به روشهایی مانند: MCMC، SUFI-2، DREAM و GLUE اشاره نمود. هر کدام از روش‌های مذکور در کنار مزایایی که دارند به‌طور قطع کاستی‌هایی نیز در ساختار و یا روند محاسباتی خود دارند که امکان استفاده از آنها را در حالت‌هایی که

HEC-HMS در حوضه مطالعاتی دقیقاً مشخص نیست، در پژوهش حاضر از توزیع یکنواخت برای این منظور استفاده شده است. **گام دوم:** در این گام بایستی با توجه به توزیع احتمالاتی حاکم بر هر کدام از پارامترها، به تعداد n مجموعه پارامتر تصادفی براساس روش‌های مبتنی بر مونت کارلو تولید شود. در تحقیق حاضر تعداد ۱۰۰۰ نمونه تصادفی تولید شده است که علت انتخاب این تعداد نمونه در بخش‌های بعدی شرح داده شده است.

گام سوم: در این مرحله مدل HEC-HMS بایستی با استفاده از پارامترهای تولید شده در گام دوم اجرا و مقدار معیار درست‌نمایی^۷ محاسبه گردد. در حال حاضر معیارهای درست‌نمایی متعددی وجود دارد که از مهمترین و پرکاربردترین آنها می‌توان به شاخص نش-ساتکلیف (NS) اشاره نمود (رابطه ۱).

گام چهارم: در این مرحله و با در نظر گرفتن آستانه قابل پذیرش برای معیار درست‌نمایی، مجموعه پارامترهای قابل قبول که منجر به عملکرد بهتر مدل شده‌اند، از سایر مجموعه پارامترها جدا می‌شوند. به عبارت دیگر، با مرتب کردن مقادیر درست‌نمایی محاسبه شده در گام قبل از بزرگ به کوچک، اجراهایی از مدل که منجر به معیار درست‌نمایی بالاتری شده‌اند به عنوان اجراهای قابل قبول و به مجموعه پارامترهای مرتبط با آنها، پارامترهای قابل قبول اطلاق می‌گردد.

پس از انجام گام‌های مذکور، بازه اطمینان ۹۵ درصد برای هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده توسط مدل استخراج می‌شود، به طوری که ۲/۵ درصد حدود بالا و پایین آن به عنوان شبیه‌سازی‌های پرت کنار گذاشته و محدوده عدم قطعیت یا همان بازه اطمینان ۹۵ درصد به دست می‌آید.

۲-۲- نحوه تحلیل حساسیت پارامترهای معادلات مختلف نفوذ

تحلیل حساسیت مدل از قسمت‌های اساسی مدل‌سازی است که به وسیله تغییر در پارامترهای ورودی مدل و بررسی تأثیر این تغییر بر خروجی مدل، انجام می‌شود. شیوه رایج در تحلیل حساسیت بدین‌گونه است که تنها با تغییر یک پارامتر ورودی، تغییرات بر روی خروجی مدل بررسی می‌شود. در روش GLUE و سایر آنالیزهای احتمالاتی بر پایه شبیه‌سازی مونت کارلو، به دلیل در نظر گرفتن ترکیبات مختلفی از پارامترها و تأثیر اندرکنش بین آنها، تحلیل حساسیت مدل به صورت جامع و نه مبتنی بر تغییر یک پارامتر در آن واحد که در اکثر روش‌های معمول وجود دارد، صورت می‌گیرد. در این روش‌ها با توجه به شکل توزیع پارامتر، درجه حساسیت آن بررسی می‌گردد به طوری‌که پارامتری که تابع توزیع احتمالاتی آن یکنواخت‌تر بوده و دامنه تغییرات آن به دامنه اولیه نزدیک‌تر باشد، حساسیت مدل نسبت به آن پارامتر

(2012). آنچه تاکنون کمتر بدان پرداخته شده است، ارزیابی معادلات نفوذ در قالب مدل‌های بارش- رواناب و برآورد عدم قطعیت ناشی از کاربرد آنها بر هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده می‌باشد. با توجه به توضیحات فوق، هدف اصلی در پژوهش حاضر بررسی عدم قطعیت ناشی از کاربرد روش‌های مختلف برآورد نفوذ بر عملکرد مدل رخدادمحور HEC-HMS و با استفاده از روش احتمالاتی GLUE می‌باشد. همچنین آنالیز حساسیت پارامترهای هر کدام از معادلات نفوذ با استفاده از روش غیرپارامتریک کلموگروف- اسمیرنوف و نیز بررسی وضعیت توزیع پسین و پیشین پارامترها از دیگر اهداف این تحقیق به‌شمار می‌آید. از مهمترین عوامل انتخاب مدل هیدرولوژیکی مذکور می‌توان به ساختار قوی مدل جهت در نظر گرفتن عمده مؤلفه‌های هیدرولوژیکی موثر بر شکل‌گیری سیلاب، پشتیبانی از روش‌های نفوذ مختلف، تبدیل بارش مؤثر به رواناب با روش‌های تجربی ساده تا روش‌های پیچیده عددی مانند موج سینماتیک، روندیابی سیلاب با استفاده از روابط هیدرولوژیکی و هیدرولیکی اشاره نمود. علاوه بر موارد مذکور، مدل HEC-HMS در رده مدل‌های رخدادمحور (شبیه‌سازی سیلاب) یکی از پرکاربردترین و محبوب‌ترین مدل‌های هیدرولوژیکی به‌شمار می‌آید که تاکنون نتایج رضایت‌بخش متعددی از آن توسط محققین در بخش‌های مختلفی از دنیا گزارش شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش تحلیل عدم قطعیت GLUE

روش GLUE یکی از روش‌های پرکاربرد و محبوب برای تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که اصل یکسانی نتایج، رویکرد و فلسفه کلی آن برای واسنجی و تخمین عدم قطعیت پارامترهای مدل می‌باشد (Beven and Binley, 1992). روش مذکور، مبتنی بر روش مونت کارلو و زنجیره مارکوف توسعه یافته است که در آن پیش‌بینی‌های احتمالاتی مربوط به شبیه‌سازی‌های مختلف، با استفاده از مشاهدات جدید به‌روزرسانی می‌شود. روش GLUE برای حل مشکل روش‌های واسنجی مرسوم ارائه شده است و بر این مبنا است که یافتن یک سری منحصر به‌فرد پارامترهای بهینه غیرممکن است و این امر به سبب وجود خطا در پارامترهای ورودی و ساختار مدل‌ها می‌باشد (Beven et al., 2007). مراحل اجرایی روش GLUE شامل گام‌های زیر می‌باشد (Beven et al., 2007):

گام اول: در این مرحله بایستی محدوده تغییرات اولیه (توزیع پیشین^۸) هر کدام از پارامترهای مدل تعیین شود که این محدوده می‌تواند براساس مشخصات فیزیکی یا تجربی تا حد ممکن بزرگ در نظر گرفته شود. از آنجایی که توزیع احتمالاتی بسیاری از پارامترهای مدل

۲-۳- معرفی مدل HEC-HMS

مدل بارش- رواناب HEC-HMS یکی از پرکاربردترین مدل‌های هیدرولوژیکی رخدادمحور برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب به‌شمار می‌آید (USACE, 2017). این مدل با توجه به اینکه قادر به لحاظ نموده عمده مؤلفه‌های هیدرولوژیکی مؤثر بر شکل‌گیری سیلاب (مانند: نفوذ آب در خاک، شبیه‌سازی دبی پایه، مدل‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف، روندیابی سیلاب و غیره) می‌باشد، در رده بهترین مدل‌های بارش- رواناب با مقیاس ساعتی قرار دارد و تاکنون در مطالعات و تحقیقات متعددی در سراسر دنیا با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی سیلاب توسط مدل مذکور، مؤلفه‌های مختلفی مورد نیاز می‌باشد که از میان آنها نوع روش نفوذ و به‌تبع آن مقدار بارش مؤثر به‌دست آمده از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشند. هر کدام از روابط نفوذ ارائه شده توسط محققین مختلف دارای ساختاری متفاوت نسبت به هم بوده و در عین حال پارامترهای مختلفی را نیز نیازمند می‌باشند که برخی از آنها دارای ماهیت فیزیکی بوده و برخی دیگر نیز کاملاً تجربی هستند. در جدول ۱ جزئیات مربوط به ساختار هر کدام از معادلات نفوذ ارائه شده است. در شکل ۱ فلوجارت کلی نحوه اتصال مدل HEC-HMS و الگوریتم GLUE نشان داده شده است. همچنین در تحقیق حاضر از مدل GLUE-Win (Ratto and Saltelli, 2001) که در محیط متلب قابل اجرا می‌باشد برای اتصال الگوریتم مذکور به مدل HEC-HMS استفاده گردیده است.

کمتراست. در پژوهش حاضر و برای مشخص نمودن حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی هر کدام از معادلات نفوذ، از توزیع تجمعی مربوط به ۵۰٪ شبیه‌سازی‌های بالاترین مقدار تشابه (توزیع پسین) و همچنین توزیع تجمعی مربوط به ۵۰٪ شبیه‌سازی‌های با پایین‌ترین مقدار تشابه (توزیع پیشین) استفاده گردید. هرچه اختلاف بین این دو توزیع بیشتر باشد، حساسیت مدل نسبت به پارامتر موردنظر بیشتر و هرچه فاصله بین آنها کم باشد، پارامتر موردنظر از تأثیر کمتری بر خروجی مدل برخوردار است (Beven, 2008). به عبارت بهتر در این روش نمودار تجمعی توزیع پسین و پیشین مربوط به پارامتر موردنظر ترسیم و اختلاف بین آنها معیاری برای سنجش میزان حساسیت مدل نسبت به پارامتر موردنظر در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای کمی‌سازی اختلاف بین دو نمودار مذکور (نمودار تجمعی توزیع پیشین و پسین) و تعیین اهمیت نسبی هر کدام از پارامترها بر خروجی مدل از آماره d روش غیرپارامتریک کولموگروف-اسمیرنوف^۸ استفاده گردید تا متوسط فاصله بین دو توزیع پیشین و پسین بدست آید. در این روش هرچه مقدار d به یک نزدیک باشد، به معنی حساسیت زیاد مدل نسبت به پارامتر موردنظر و هرچه به مقدار صفر نزدیک باشد، به معنی حساسیت کم مدل نسبت به پارامتر مربوطه است (Hornberger and Spear, 1998; Thronthal et al., 2008; Beven, 2008).

Table 1- Details of infiltration methods which are used in this research (USACE, 2000)
جدول ۱- جزئیات روش‌های نفوذ مورد استفاده در این پژوهش (USACE, 2000)

Method	Equation	Description
Green-Ampt	$F = Kt + \psi \cdot \Delta\theta \cdot \ln\left(1 + \frac{F}{\psi \cdot \Delta\theta}\right)$	F: Cumulative infiltration at time t (cm), K: Soil hydraulic conductivity (cm/hr), ψ : Soil suction head (cm) and $\Delta\theta$: Saturation content.
Initial & constant	$Pe_t = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum P_t < I_a \\ P_t - f_c & \text{if } \sum P_t > I_a \text{ and } P_t > f_c \\ 0 & \text{if } \sum P_t > I_a \text{ and } P_t < f_c \end{cases}$	P_t : Rainfall depth (cm), f_c : Maximum potential of rainfall loss (mm), I_a : Initial loss (mm).
Exponential	$L = AP^E$	L: Rainfall loss (mm), A: Rate of variation (mm), P: Rainfall intensity (mm/hr), E: Exponent of the equation.
Smith-Parlange	$f_c = \frac{K_s + \beta \times (K_s - K_i)}{\exp\left(\beta \times \frac{F}{J}\right) - 1}$ $J = G \times (\theta_s - \theta_i)$	f_c : Infiltration rate (mm/hr), Cumulative infiltration (m), K_s : Saturated hydraulic conductivity (mm/hr), K_i : Initial hydraulic conductivity (mm/hr), β : Constant (between 0 and 1), G: Capillary length (m), θ_s : Saturation content (-), θ_i : Initial content (-)
SCS-CN	$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$	P_e : Cumulative net rainfall (mm), P: Cumulative rainfall (mm), I_a : Initial abstraction (mm), S: Potential maximum retention (mm)
Deficit & Constant	$r_d = \sum_{m=1}^M (R_m - \phi \Delta t)$	R_m : Rainfall depth (mm), R_d : Runoff depth of surface hydrograph (mm), ϕ : Loss rate during the rainfall (mm/hr)

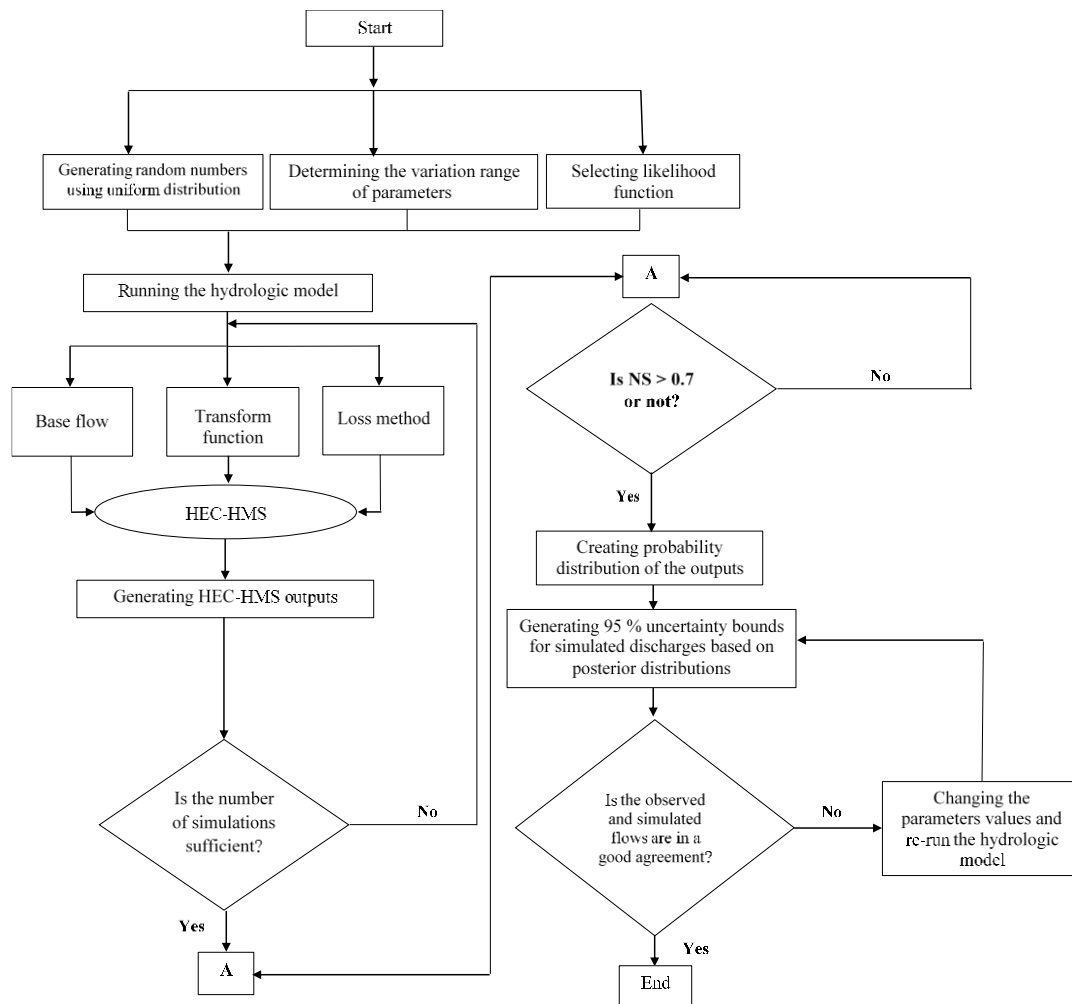


Fig. 1- Overall process of uncertainty analysis of HEC-HMS model using GLUE algorithm
 شکل ۱- فرآیند کلی موردنیاز برای تحلیل عدم قطعیت خروجی مدل HEC-HMS با استفاده از الگوریتم GLUE

مقدار به خط رگرسیون با شیب ۱ (خط با شیب ۱:۱) نزدیک می‌باشد. تاکنون هیچ معیار خاصی به طور دقیق در مورد مقادیر مناسب برای این پارامتر ارائه نگردیده است. ولی به طور کلی اگر شاخص ناش- ساتکلیف بیشتر از ۰/۷ باشد عملکرد مدل عالی، اگر بین ۰/۳ تا ۰/۷ باشد، عملکرد رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳ باشد، عملکرد غیرقابل قبول فرض می‌شود (Xu et al., 2009).

۲-۴-۲- آماره‌های P-Factor، R-Factor و ARIL

P-Factor عبارت است از درصد داده‌های مشاهده‌ای که در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند. R-Factor نیز عبارت است از تقسیم میانگین باند عدم قطعیت ۹۵ درصد بر انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای؛ حالت ایده‌آل زمانی است که P-Factor برابر ۱۰۰ و R-Factor برابر صفر باشد. همچنین Xiaoli et al. (2010) رابطه‌ای مشابه با مفهوم آماره R-factor به نام ARIL برای ارزیابی سطح

۲-۴-۲- آماره‌های مورد استفاده در ارزیابی

۲-۴-۱- شاخص ناش- ساتکلیف (NS)

شاخص کارایی ناش- ساتکلیف یکی از رایج‌ترین آماره‌هایی است که برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Nash and Sutcliffe, 1970). این شاخص حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاها است که نسبت واریانس باقیمانده به واریانس دبی‌ها را نشان می‌دهد.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

در رابطه فوق، Q_{sim} : دبی شبیه‌سازی شده، Q_{obs} : دبی اندازه‌گیری شده و \bar{Q}_{obs} : میانگین دبی‌های اندازه‌گیری شده است. مقدار NS از $-\infty$ تا $+\infty$ متغیر است و مقدار بهینه این شاخص $+1$ است که نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تا چه

زراعت و باغات تشکیل می‌دهد. زراعت در اراضی با شیب تند یکی از معضلات اصلی حوضه می‌باشد که باعث افزایش نرخ فرسایش در سطح حوضه و شکل‌گیری سیلاب در خروجی آن شده است (Sheikh et al., 2015). نوع اقلیم حوضه مذکور نیمه‌خشک کوهستانی بوده و در حدود ۹۰ درصد بارش در منطقه به صورت باران می‌باشد که البته در ارتفاعات و در بخشی از سال به صورت برف و در تابستان و فصول خشک به صورت رگبار بر سطح حوضه نازل می‌گردد (Mosavinejad et al., 2017). در پژوهش حاضر از داده‌های بارش ۳ ایستگاه هواشناسی (قلعه قافه، دوزین و لزوره) واقع در محدوده مطالعاتی برای برآورد هیئتوگراف بارش و از داده‌های سیلاب ثبت شده در محل ایستگاه هیدرومتری لزوره برای اجرای مدل هیدرولوژیکی استفاده به عمل آمده است. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه نشان داده شده است.

۳- نتایج

۳-۱- تعیین تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای برآورد عدم قطعیت مدل با استفاده از روش احتمالاتی GLUE

در اکثر موارد کاربردی در دومین گام از اجرای روش GLUE نمونه‌برداری از فضای پارامتری نیاز است که از نمونه‌برداری یکنواخت تصادفی در محدوده مشخص پارامترها استفاده شود (Beven and Binley, 1992; Beven, 2000; Heidari et al., 2005). نمونه‌های به دست آمده از این روش به عنوان توزیع پیشین پارامترها جهت ورود به مدل در نظر گرفته خواهد شد.

پوششی باند عدم قطعیت پیش‌بینی در طول دوره شبیه‌سازی ارائه کرده‌اند:

$$ARIL = \frac{1}{n} \sum \frac{Limit_{upper,t} - Limit_{Lower,t}}{Q_{obs,t}} \quad (2)$$

در رابطه فوق، $Limit_{upper,t}$ و $Limit_{Lower,t}$ به ترتیب حد بالا و پایین باند عدم قطعیت و n تعداد گام‌های زمانی می‌باشد. تقسیم تفاضل حد بالا و پایین پهنای باند عدم قطعیت به داده‌های مشاهداتی فاصله نسبی نامیده می‌شود. مقادیر کمتر شاخص‌های R -factor و $ARIL$ و مقادیر بالای شاخص P -factor، بیانگر عملکرد مناسب شبیه‌سازی است.

۲-۵- مشخصات حوضه مورد مطالعه

حوضه آبریز مورد مطالعه در این پژوهش حوضه چهل چای واقع در استان گلستان می‌باشد. مساحت این حوضه در بالادست ایستگاه هیدرومتری لزوره (واقع در خروجی حوضه) حدود ۲۵۷ کیلومتر مربع است. این حوضه از لحاظ تقسیمات سیاسی در محدوده شهرستان مینودشت قرار داشته و یکی از زیرحوضه‌های بزرگ حوضه آبریز گرگانود به‌شمار می‌آید. حداقل و حداکثر ارتفاع این حوضه به ترتیب در حدود ۱۳۵ و ۲۵۵۰ متر از سطح آزاد دریا می‌باشد. بارش سالانه منطقه حدود ۷۶۵ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین آبدهی رودخانه ۲/۱۳ مترمکعب بر ثانیه است. آبراهه‌های اصلی حوضه چهل‌چای با جهت کلی جنوب به شمال نزولات جوی را جمع‌آوری و از حوضه خارج می‌نمایند. ۵۱ درصد از مساحت کل حوضه را کاربری جنگلی و ۴۹ درصد باقیمانده را کاربری

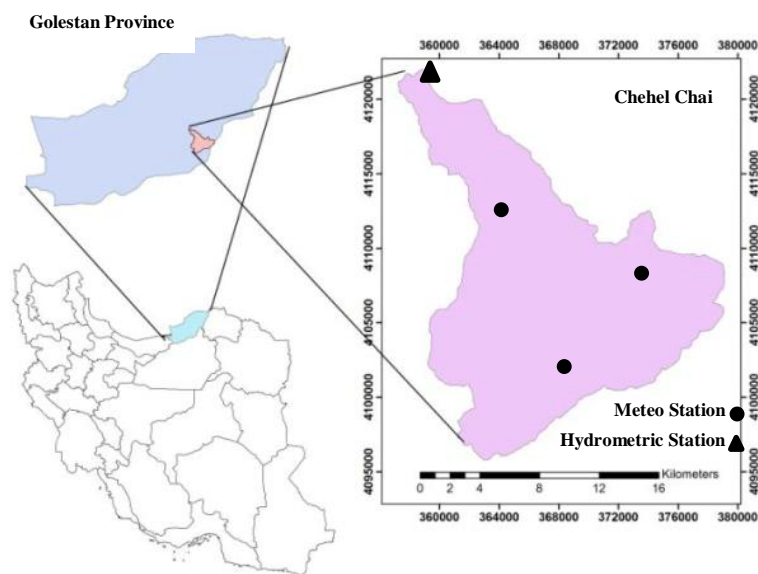


Fig. 2- Geographic location of the study area (Fathabadi et al., 2019)
شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه (Fathabadi et al., 2019)

شبیه‌سازی‌های با بالاترین مقدار تشابه (توزیع پسین) و همچنین توزیع تجمعی مربوط به ۵۰٪ شبیه‌سازی‌های با پایین‌ترین مقدار تشابه (توزیع پیشین) استفاده گردید. پس از استخراج توزیع‌های مذکور از نرم‌افزار SPSS استفاده و مقدار آماره d روش غیرپارامتریک کلموگروف-اسمیرنوف برای هر کدام از پارامترهای معادلات نفوذ محاسبه و با مقایسه مقادیر d هر کدام از آنها میزان حساسیت مدل به پارامترهای ورودی حاصل گردید. چنانچه مقدار آماره d صفر و یا نزدیک به صفر باشد بدین معنی است که توزیع تجمعی پسین و پیشین در سطح ۵٪ هیچ اختلافی با یکدیگر ندارند و لذا مدل نسبت به پارامتر موردنظر حساسیتی ندارد. همچنین هرچه مقدار آماره d بزرگ باشد مبین این حقیقت است که توزیع پسین و پیشین کاملاً متفاوت از هم بوده و در نتیجه پارامتر موردنظر از تأثیر زیادی بر خروجی مدل هیدرولوژیکی برخوردار است. به عبارت بهتر در این روش نمودار تجمعی توزیع پسین و پیشین مربوط به پارامتر موردنظر ترسیم و اختلاف بین آنها معیاری برای سنجش میزان حساسیت مدل نسبت به پارامتر موردنظر در نظر گرفته می‌شود.

به عنوان مثال، نتایج به‌دست آمده از کاربرد روش Green-Ampt برای شبیه‌سازی سیلاب حاکی از آن است که پارامتر هدایت هیدرولیکی خاک (K_s) به خاطر وجود اختلاف زیاد بین توزیع‌های پیشین و پسین، حساس‌ترین پارامتر می‌باشد. همچنین پارامتر مکش رطوبتی خاک (ψ_f) در درجه دوم حساسیت قرار داشته و دیگر پارامترهای این روش (مانند: رطوبت اولیه (θ_i) و تخلخل خاک (n)) از اهمیت به‌مراتب کمتری برخوردار هستند.

از آنجاکه توزیع احتمالاتی تشابهات توسط وزن‌های خاص هر مدل تعریف می‌گردد، لذا استفاده از نمونه‌برداری یکنواخت سبب می‌شود که کاربرد روش ساده‌تر شده و امکان به‌روزرسانی تشابهات وجود داشته باشد. در این پژوهش از توزیع یکنواخت به عنوان توزیع پیشین استفاده شده و با استفاده از روش مونت کارلو، داده‌های تصادفی برای پارامترهای ورودی هر کدام از معادلات نفوذ ایجاد شده است. همچنین به منظور بهینه‌سازی تعداد نمونه‌ها، ابتدا ۳ حالت مختلف با تعداد اعضای ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ از فضای موجود (محدوده‌های پیشنهادی برای هر پارامتر که توسط توسعه‌دهندگان مدل HEC-HMS توصیه شده است) ایجاد و سپس توزیع تجمعی آنها ترسیم گردید که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳، اختلاف چندان زیادی بین توزیع تجمعی حاصل از نمونه‌های با ۱۰۰۰ عضو و بالاتر از آن وجود ندارد و لذا با اطمینان می‌توان ۱۰۰۰ نمونه را به نوعی نماینده شایسته‌ای از جامعه موجود استفاده نمود. لذا از هر کدام از پارامترهای ورودی موردنیاز معادلات نفوذ، تعداد ۱۰۰۰ نمونه از فضای موجود انتخاب شده است.

۳-۲- تحلیل حساسیت پارامترهای معادلات مختلف نفوذ

در این تحقیق از روش غیرپارامتریک کلموگروف-اسمیرنوف برای تعیین پارامترهای حساس و غیرحساس هر کدام از معادلات نفوذ استفاده شده است که نتایج آن برای دو رخداد ۱ و ۲ در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است؛ برای مشخص نمودن حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی معادله نفوذ، از توزیع تجمعی مربوط به ۵۰٪

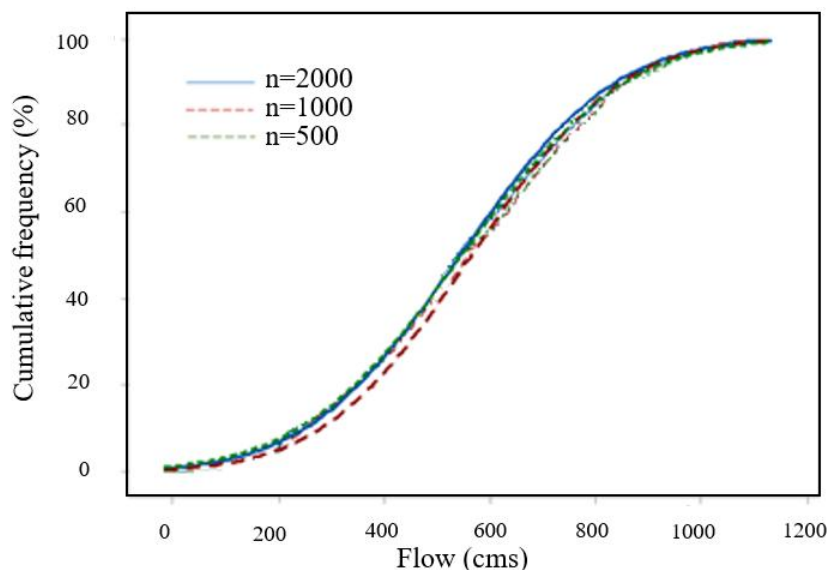


Fig. 3- Determining the required samples for creating random numbers of input parameters

شکل ۳- تعیین تعداد نمونه‌های موردنیاز برای ساخت داده‌های تصادفی از پارامترهای ورودی

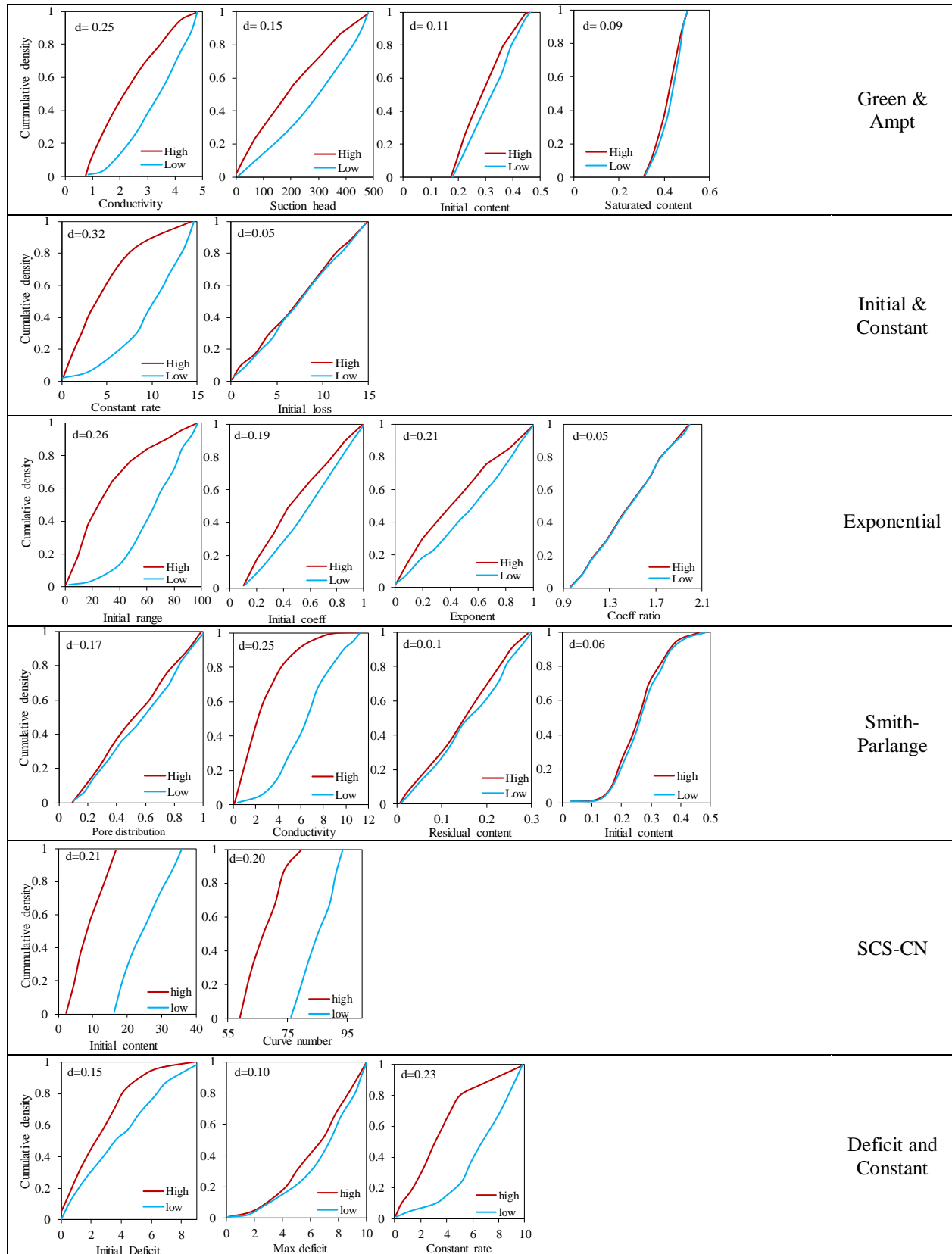


Fig. 4- Sensitivity analysis of input parameters of each infiltration methods for event 1

شکل ۴- تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی هر کدام از معادلات نفوذ برای رخداد ۱

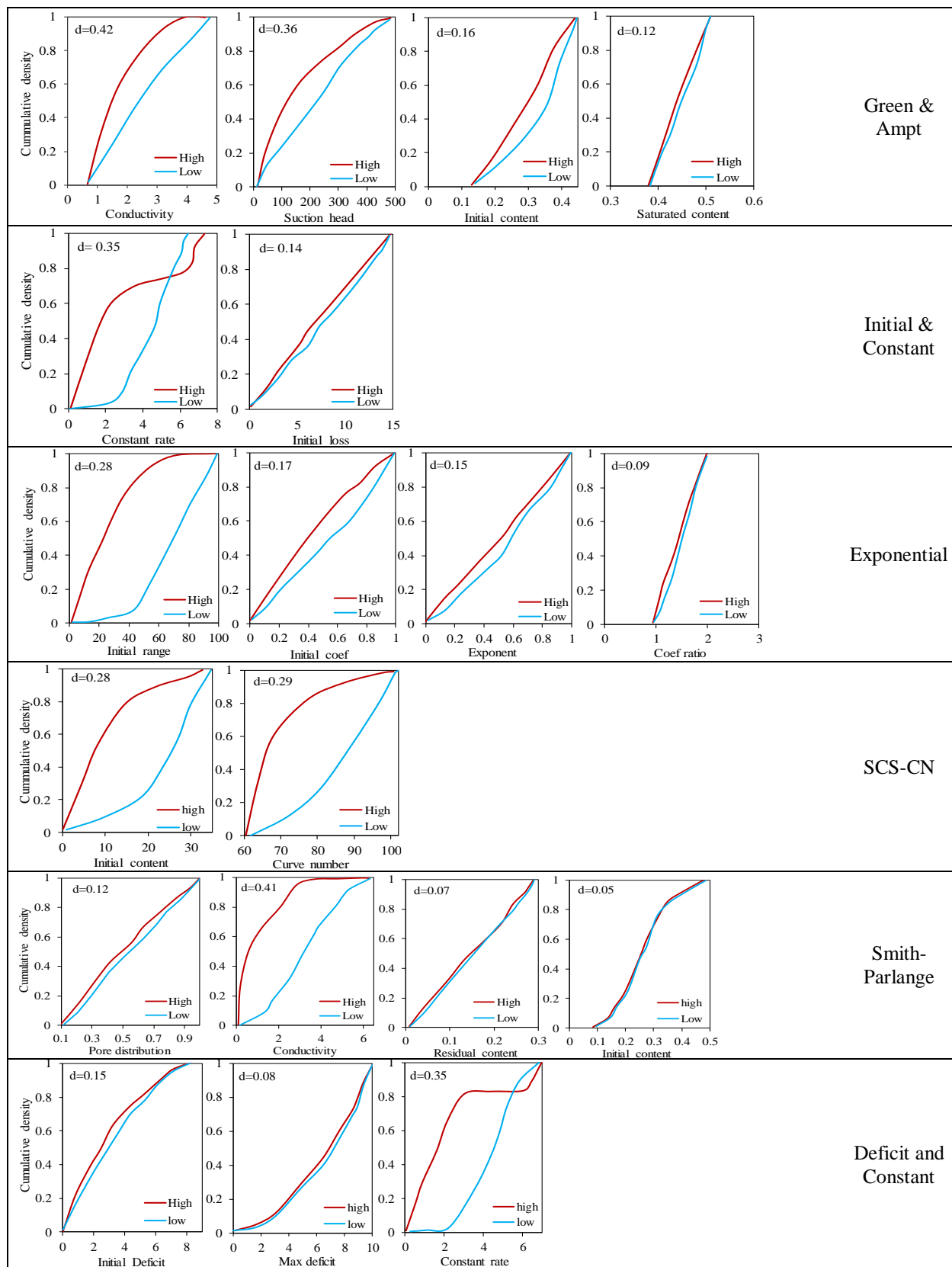


Fig. 5- Sensitivity analysis of input parameters of each infiltration methods for event 2

شکل ۵- تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی هر کدام از معادلات نفوذ برای رخداد ۲

نتایج قابل توجهی را نشان داده که مهم‌ترین آنها عبارتند از: الف) توزیع پسین بیشتر پارامترها دارای توزیع یکنواخت نمی‌باشد. به عبارت بهتر توزیع حاکم بر پارامترها بر خلاف آنچه که در ابتدا یکنواخت فرض شد، یکنواخت نمی‌باشد. ب) در تمامی رخدادهای تفاوت معنی‌داری (در سطح ۵٪) در شکل و محدوده تغییرات توزیع پسین پارامترها وجود ندارد. مقایسه توابع پیشین و پسین نشان می‌دهد، در صورتی که پارامتری به طور معنی‌دار نسبت به کران بالا و پایین توزیع پیشین خود اختلاف داشته باشد، آن پارامتر از عدم قطعیت بالایی در معادله موردنظر برخوردار خواهد بود. همچنین با توجه به اینکه دامنه تعریف شده در مراجع و منابع معتبر (مانند راهنمای نرم‌افزار HEC-HMS) برای هر پارامتر دامنه‌ای گسترده است و به دلیل ایجاد خطا در اجرای رخدادهای مورد استفاده در این پژوهش، محدوده قابل پذیرش در اجرای مدل HEC-HMS، با وسعت حوضه کوچک‌تر در نظر گرفته شده است.

۳-۴- آنالیز عدم قطعیت شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب

پس از اجرای مدل هیدرولوژیکی و شناسایی مجموعه پارامترهای قابل قبول با استفاده از روش GLUE، باند اطمینان ۹۵ درصد برای خروجی شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-HMS طوری استخراج می‌گردد که ۲/۵ درصد حدود بالا و پایین آن به عنوان شبیه‌سازی‌های پرت کنار گذاشته می‌شود و باندهای عدم قطعیت به دست می‌آید. هرچه فاصله بین حدود اطمینان بزرگ باشد، عمده مقادیر مشاهداتی بیشتری در داخل محدوده پیش‌بینی‌ها قرار می‌گیرد و این بدین معنی است که تغییرات پارامترها می‌تواند اثر منابع خطا (مانند: خطاهای اندازه‌گیری و خطای مربوط به ساختار مدل) را جبران نماید. به عبارت دیگر حدود اطمینان تنها در بردارنده عدم قطعیت ناشی از پارامترها نبوده و نشان‌دهنده عدم قطعیت کلی خروجی مدل نیز می‌باشند. در این پژوهش به منظور بررسی عدم قطعیت ناشی از کاربرد روش‌های مختلف برآورد نفوذ بر هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولوژیکی، از معیارهای P-Factor و ARIL استفاده شده است.

در یک شبیه‌سازی صحیح، تقابل و اندرکنش پارامترها جهت اجرای صحیح مدل بایستی در نظر گرفته شود. به منظور حاصل نمودن درجه حساسیت پارامترها، اطلاعات حاصل از همبستگی میان پارامترهای مزبور می‌تواند بسیار مفید و سودمند باشد. با توجه به حجم بالای خروجی‌ها در شکل ۷ تنها ضرایب همبستگی مربوط به پارامترهای مختلف روش Green-Ampt برای دو رخداد ۱ و ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، مقادیر ضرایب همبستگی به دست آمده برای تمامی پارامترها نسبتاً کم بوده و لذا

مقادیر آماره d روش کلموگروف-اسمیرنوف به دست آمده برای پارامترهای K_s ، μ_f ، θ_i و n (در $P\text{-value}=5\%$) به ترتیب معادل ۰/۳۳۶، ۰/۱۵۴، ۰/۱ و ۰/۰۹ برای رخداد اول و ۰/۴۲۷، ۰/۳۳۶، ۰/۱۵۴ و ۰/۱۳۶ برای رخداد دوم می‌باشد. با ملاحظه در هر دو رخداد مورد بررسی ضریب K_s با دارا بودن مقدار d معادل ۰/۲۴۵ (رخداد ۱) و ۰/۴۲۷ (رخداد ۲) حساس‌ترین پارامتر بوده و این در حالی است که پارامترهای n و θ_i با دارا بودن مقدار d کمتر از ۰/۱۶ از حساسیت بسیار کمتری برخوردار هستند. نتایج به دست آمده از کاربرد مدل‌هایی همچون MARINE (Borrell et al., 2005) و LISEM^۱ (Sheikh et al., 2010) نیز حاکی از آن است که فارغ از نوع مدل مورد استفاده، پارامتر هدایت هیدرولیکی از اهمیت بسیار زیادی در عملکرد مدل‌های بارش-رواناب برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد که در روش‌های SCS و Initial & Constant نیز به ترتیب دو پارامتر شماره منحنی (CN) و Constant Rate دارای اهمیت و تأثیر بسیار زیادی در شکل هیدروگراف سیلاب هستند. روش Smith-Parlange نیز اگرچه دارای تعداد ورودی‌های نسبتاً زیادی است، اما محاسبات صورت گرفته حاکی از حساسیت بالای خروجی مدل HEC-HMS به یکی از ورودی‌های مدل به نام هدایت هیدرولیکی خاک^{۱۰} می‌باشد. نتایج به دست آمده در مورد روش Exponential نیز گواه بر حساسیت بسیار زیاد هیدروگراف سیلاب نسبت به پارامتر Initial Range است.

۳-۳- تعیین دامنه بهینه پارامترهای معادلات نفوذ

برای تعیین دامنه بهینه پارامترهای هر کدام از معادلات نفوذ از توابع توزیع پسین آن‌ها استفاده شده است. توابع توزیع پسین، نشان‌دهنده میزان عدم قطعیت باقیمانده در پارامترهای تخمین‌زده شده توسط روش GLUE است. این میزان عدم قطعیت به توابع توزیع پیشین پارامترها و همچنین عدم قطعیت در داده‌های اندازه‌گیری شده بستگی دارد. در جدول ۲ دامنه اولیه (توزیع پیشین) و بهینه (توزیع پسین) هر کدام از پارامترهای ورودی معادلات نفوذ ارائه شده است. همچنین در شکل ۶ توزیع فراوانی و تجمعی پارامترهای توزیع پسین هر کدام از پارامترهای معادلات مختلف نفوذ برای رخداد ۱ نشان داده شده است (با توجه به حجم زیاد خروجی‌های بدست آمده، نتایج مربوط به تنها رخداد ۱ ارائه شده است). شکل مربوط به هر کدام از توزیع‌های مزبور به نوعی مبین میزان عدم قطعیت پارامتر موردنظر می‌باشد. پارامترهایی که دارای توزیع با شیب زیاد هستند بدین معنی است که تخمین پارامتر موردنظر دارای عدم قطعیت زیادی نبوده و به راحتی قابل شناسایی می‌باشد. همچنین پارامترهایی که توزیع آنها دارای شکل کشیده‌ای می‌باشند، از عدم قطعیت بالاتری برخوردار هستند و لذا در انتخاب آنها بایستی دقت بیشتری را به عمل آورد. ارزیابی نمودارهای ارائه شده در شکل ۶

بوده و درصد کمتری از داده‌های مشاهداتی در پهنای باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار می‌گیرند. یکی از دلایل اصلی این عملکرد ضعیف روش‌های فوق را می‌توان به این مسأله نسبت داد که معادلات نفوذ Initial & Constant و Deficit & Constant اساساً برای استفاده در مدل‌های پیوسته (Continuous) توسعه داده شده‌اند و استفاده از آنها در یک مدل رخدادمحور (با توجه به متفاوت بودن فرآیند تبدیل بارش به رواناب) می‌تواند نتایج دور از واقعیتی را به دست دهد.

نکته قابل توجه دیگری که از شکل ۸ قابل استنتاج است، محدوده دبی اوج هیدروگراف سیل است که در صورت استفاده از تمامی معادلات نفوذ در محدوده باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار گرفته و مقدار خطای برآورد دبی اوج سیلاب در دو رخداد ۱ و ۲ همواره کمتر از ۱۰ درصد قابل تخمین است. همچنین محاسبات صورت گرفته حاکی از عملکرد نسبتاً ضعیف الگوریتم GLUE در شناسایی باندهای عدم قطعیت در محدوده بازوی بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف می‌باشد که علت اصلی آن نیز وجود عدم قطعیت در داده‌های ورودی مدل می‌باشد که امکان شبیه‌سازی صحیح کل رواناب را میسر نمی‌سازد.

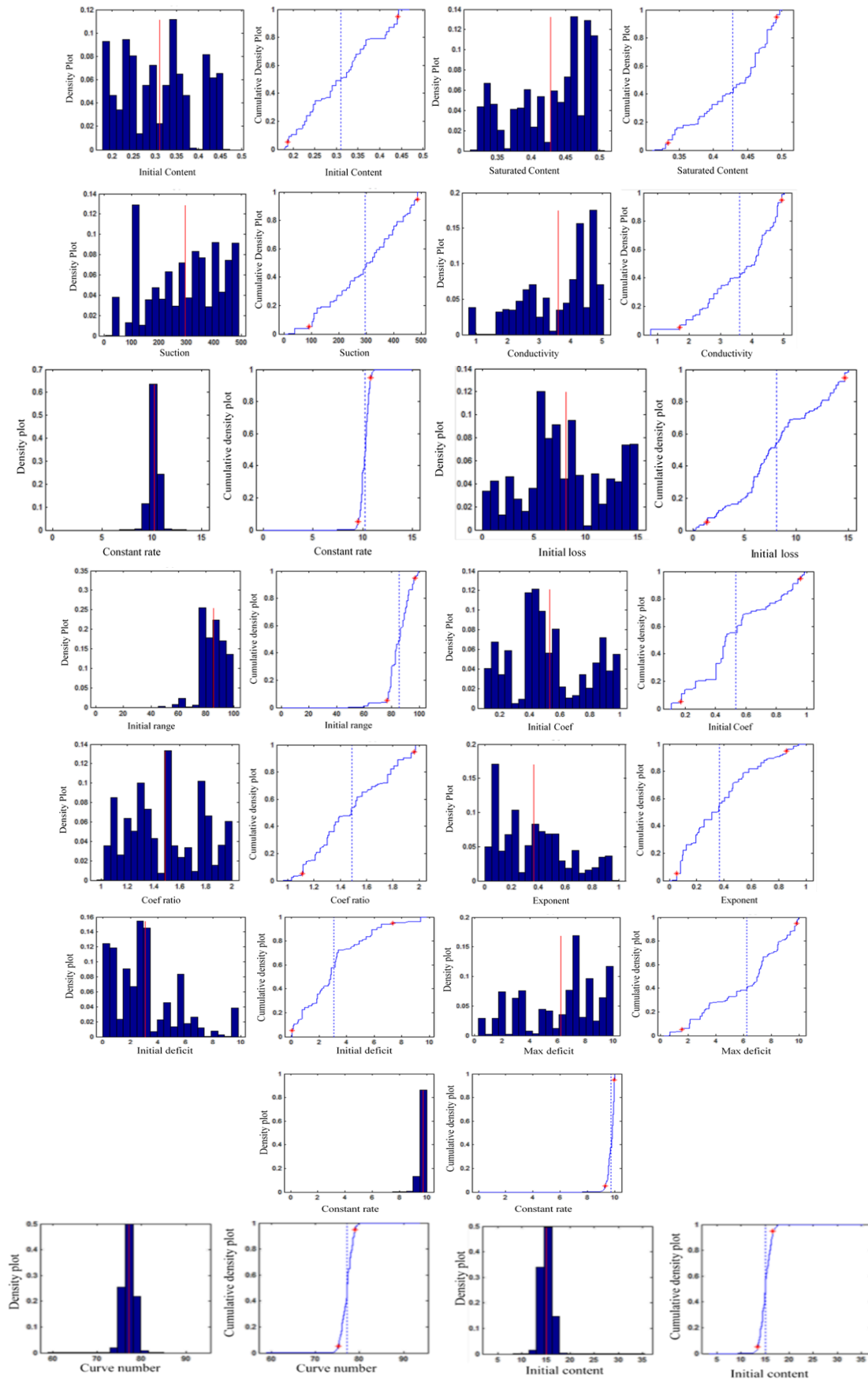
می‌توان چنین استدلال نمود که داده‌ها مستقل از هم می‌باشند و لذا استقلال داده‌ها که یکی از شروط اصلی الگوریتم GLUE است، ارضا شده است.

ذکر این نکته ضروری است که با توجه به عملکرد متفاوت خروجی مدل بر اساس هر کدام از معیارهای مذکور، تعیین بالاترین و کمترین میزان عدم قطعیت با روش Ranking based method به انجام رسیده است. همانطور که در جدول ۳ و شکل ۸ نشان داده شده است، استفاده از دو معادله نفوذ SCS و Smith-Parlange به علت دارا بودن بیشترین مقدار P-Factor (به ترتیب معادل ۰/۷۸ و ۰/۷۲) و کمترین مقدار ARIL (به ترتیب معادل ۰/۳۹ و ۰/۴۰)، عدم قطعیت کمتری را بر خروجی مدل رخدادمحور HEC-HMS اعمال کرده است.

همچنین با توجه به ماهیت مشابه معادلات Smith-Parlange و Green-Ampt، عدم قطعیت ناشی از کاربرد هر کدام از آنها تقریباً به یکدیگر نزدیک بوده است. برخلاف روش‌های مذکور، عدم قطعیت ناشی از کاربرد معادلات نفوذ Initial & Constant و Deficit & Constant جهت برآورد هیدروگراف سیلاب نسبتاً بالا

Table 2- Variation range of infiltration parameters in prior and posterior distribution- Event 1
جدول ۲- دامنه تغییرات پارامترهای معادلات نفوذ در توزیع پسین و پیشین- رخداد ۱

Posterior Distribution			Defined Interval (USACE, 2000)	Parameter	Equation
Average of the Parameters	Max	Min			
3.60	4.89	0.85	0.6-5	Conductivity(Ks)	Green & Ampt
295.1	477.4	42.5	1-500	Suction(ψ_r)	
0.31	0.46	0.18	0.1-0.5	Initial content(θ_i)	
0.43	0.49	0.31	0.3-0.5	Saturated content(n)	
85.29	95.9	47.4	1-100	Initial range	Exponential
0.53	0.97	0.12	0.1-1	Initial coef	
0.37	0.92	0.03	0.1-1	Exponent	
0.49	0.62	0.21	0-1	Coef ratio	
0.26	0.48	0.11	0-1	Initial content	Smith Parlange
0.16	0.28	0.02	0.01-0.3	Residual content	
0.35	0.53	0.20	0.2-0.6	Saturated content	
454.6	777.6	112.3	100-800	P _b	
0.59	0.97	0.12	0.1-1	Pore distribution	
6.10	10.36	1.63	0.03-11.8	Conductivity	
-604.7	-223	-980	-1000-200	Beta zero	Initial & constant
8.05	14.1	0.36	0-500	Initial Loss	
10.21	12.9	7.35	0-300	Constant rate	SCS
15.05	18.8	9.05	0-500	Initial content(θ_i)	
77.16	80.6	73.6	35-99	Curve number(CN)	Deficit & constant
3.06	9.5	0.19	0-500	Initial deficit	
6.22	9.8	0.52	0-500	max deficit	
9.74	9.8	7.9	0-300	Constant rate	



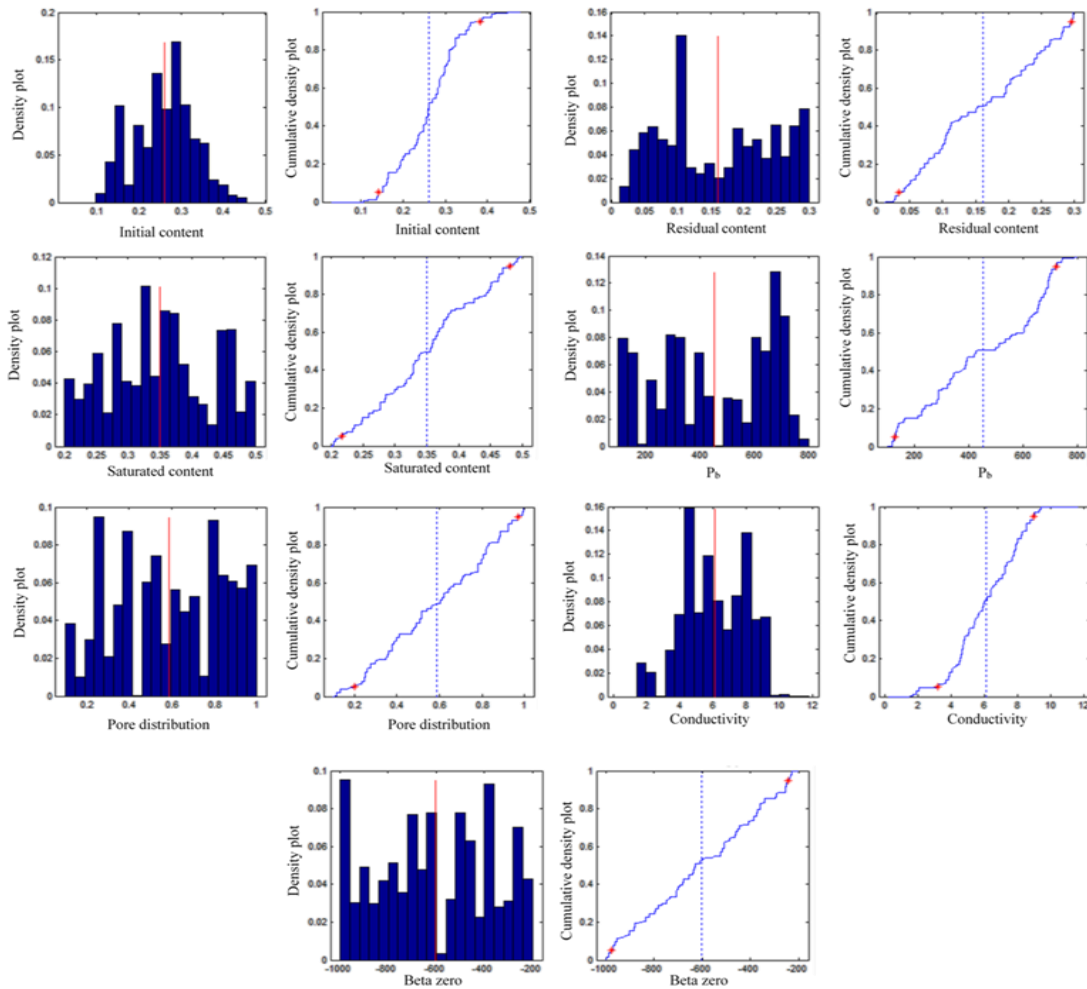
Green & Ampt

Initial & Constant

Exponential

Deficit and Constant

SCS-CN



Smith Parlange

Fig. 6- Frequency and cumulative distribution of posterior distribution for each infiltration methods, Vertical line represent mean value and stars on cumulative distribution indicate the bounds of uncertainty. شکل ۶- توزیع فراوانی و تجمعی توزیع پسین مربوط به هر کدام از پارامترهای معادلات نفوذ در رخداد ۱، خط میانی در نمودار توزیع پسین پارامترها بیانگر مقدار میانگین داده‌ها و علامت‌های ستاره در نمودار توزیع تجمعی بیانگر محدوده باند عدم قطعیت (۲/۵ و ۹۷/۵٪) می‌باشد.

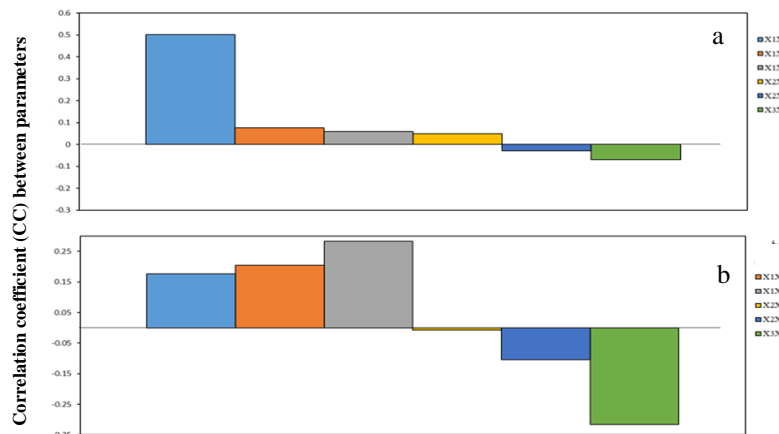
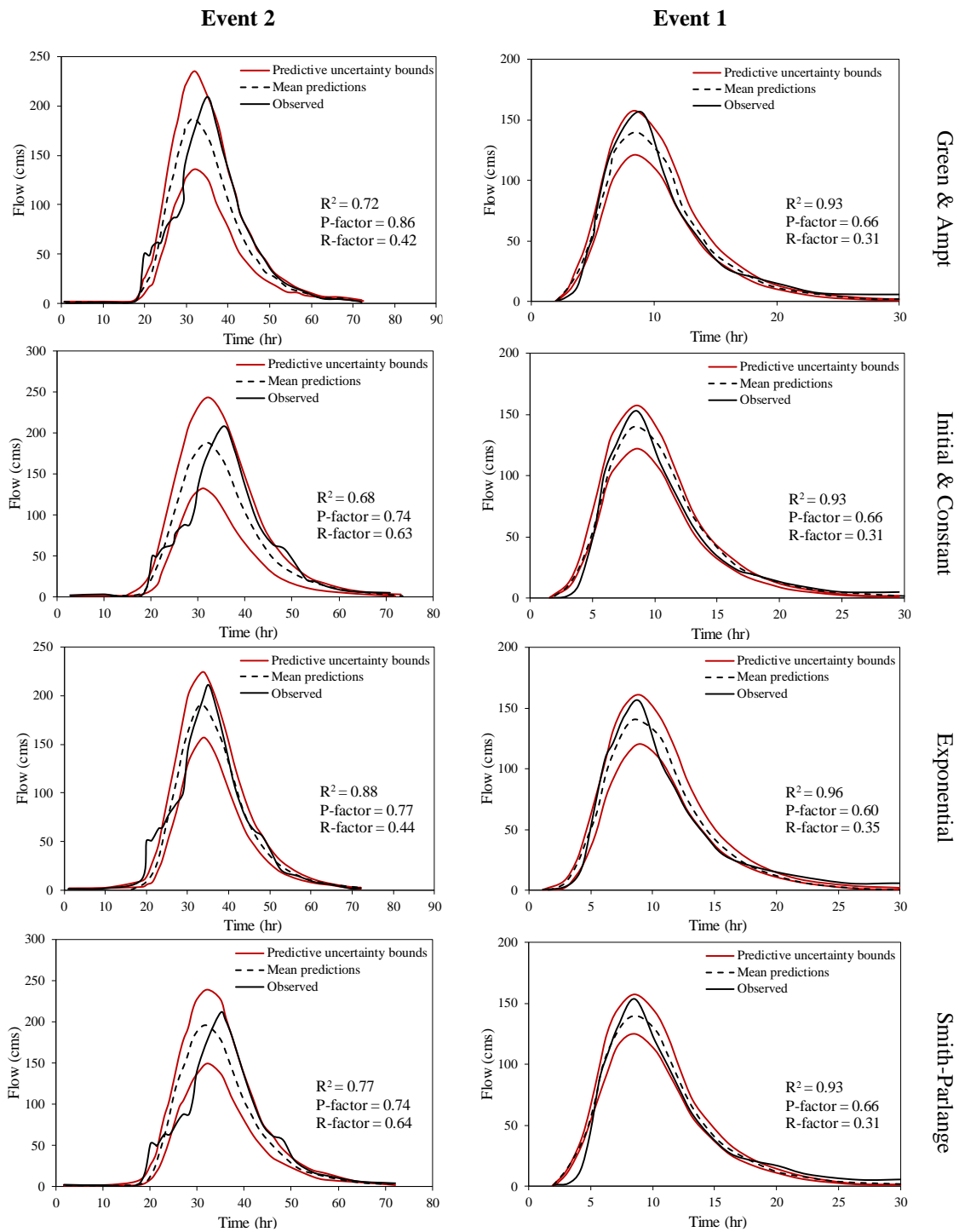


Fig. 7- Correlation coefficient between Green-Ampt method's parameters (a for event 1 and b for event 2) شکل ۷- ضریب همبستگی بین پارامترهای روش Green-Ampt (شکل الف رخداد ۱ و شکل ب رخداد ۲)، $X4(Ks)$ و $X3(\psi f)$, $X2(n)$, $X1(\theta i)$



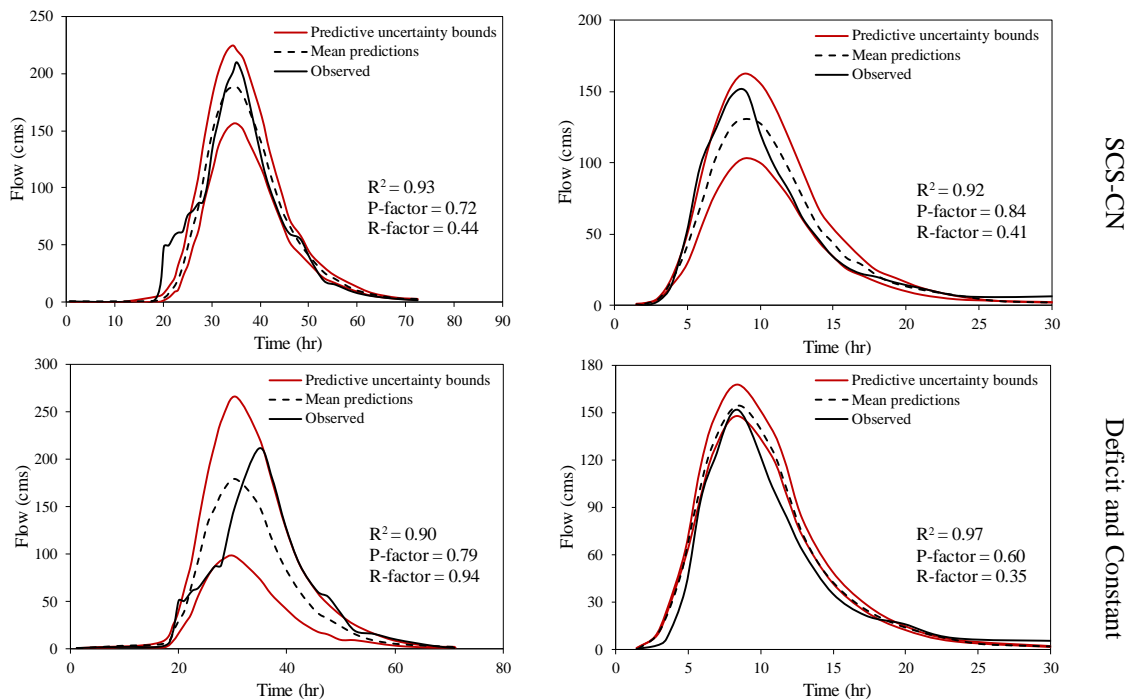


Fig. 8- Uncertainty bound due to using different infiltration methods for simulation of flow hydrograph based on posterior distribution for events 1 and 2.

شکل ۸- پهنای باند عدم قطعیت ناشی از کاربرد هر کدام از معادلات نفوذ برای دبی‌های شبیه‌سازی شده براساس توزیع پسین پارامترها برای دو رخداد ۱ و ۲

Table 3- Ranking the uncertainty due to different infiltration methods using Ranking based Method
جدول ۳- رتبه‌بندی عدم قطعیت ناشی از معادلات نفوذ با استفاده از روش Ranking based Method

	ARIL	Rank	Pfactor	Rank	Sum of Ranks
Green & Ampt	0.49	4	0.76	2	6
Initial & Constant	0.52	5	0.68	5	10
SCS	0.39	1	0.78	1	2
Exponential	0.46	3	0.69	4	7
Smith Parlange	0.40	2	0.72	3	5
Deficit & Constant	0.56	6	0.43	6	12

تلقی شده است. طبق محاسبات صورت گرفته، استفاده از دو معادله نفوذ SCS و Smith-Parlange به علت دارا بودن بیشترین مقدار P-Factor (به ترتیب معادل ۰/۷۸ و ۰/۷۲) و کمترین مقدار ARIL (به ترتیب معادل ۰/۳۹ و ۰/۴۰)، عدم قطعیت کمتری را در خروجی مدل رخدادمحور HEC-HMS ایجاد کرده است؛ همچنین برخلاف روش‌های مذکور، عدم قطعیت ناشی از کاربرد معادلات نفوذ Initial & Constant و Deficit & Constant برای برآورد هیدروگراف سیلاب نسبتاً بالا بوده و درصد کمتری از داده‌های مشاهداتی در پهنای باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار می‌گیرند. یکی از دلایل اصلی عملکرد ضعیف این است که معادلات نفوذ Initial & Constant و Deficit & Constant مختص مدل‌های پیوسته برای شبیه‌سازی معادله بیلان آب می‌باشند و برای برآورد نفوذ

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در فرآیند مدل‌سازی بارش- رواناب همواره عدم اطمینانی به طور ذاتی و اجتناب‌ناپذیری وجود دارد که علت اصلی آن وجود عدم قطعیت و خطا در داده‌های ورودی مدل، پارامترها و ساختار مدل است. بنابراین به کمیت درآوردن میزان عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها برای رسیدن به پیش‌بینی‌های مطمئن در مدل‌سازی امری اجتناب‌ناپذیر است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عدم قطعیت ناشی از انتخاب نوع معادله نفوذ بر عملکرد مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS با استفاده از الگوریتم GLUE به انجام رسیده است. براساس شاخص‌های P-factor و ARIL عدم قطعیت زیاد در هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده با استفاده از روابط مختلف نفوذ توسط مدل از نتایج مهم این تحقیق

calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology* 306:127-145

Gupta HV, Yapo PO, and Sorooshian S (1996) Automatic calibration of conceptual rainfall runoff models: Sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology* 181(1-4):23-48

Ndomba P, Mtalo F and Killingtonveit A (2008) SWAT model application in a data scarce tropical complex catchment in Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth* 33(8-13):626-632

Yisa J and Jimoh T (2010) Analytical studies on water quality index of river Landzu. *American Journal of Applied Sciences* 458-453

Kumar A and D Jain (2008) Predicting direct runoff from hilly watershed using geomorphology and stream-order law ratios: Case study. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE 13(7):570-576

Beven KJ and Binley A (1992) The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes* 6(3):279-298

Kuczera G and Parent E (1998) Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology* 211(1-4):69-85

Beven KJ and Freer J (2001) A dynamic topmodel. *Hydrological Processes* 15(10):1993-2011

Bahremnd A (2006) Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium

Stolte J (2003) Effects of land use and infiltration behavior on soil conservation strategies. Ph.D. Wageningen University, Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena* 72:79-90

Gaither RE and Buckhouse JC (1983) Infiltration rates of various vegetative communities within the Blue Mountains of Oregon. *Journal of Range Management* 36:58-60

Kothyari BP, Verma PK, Joshi BK, Kothyari UC (2004) Rainfall-runoff-soil and nutrient loss relationships for plot size areas of Bhetagad watershed in Central Himalaya, India. *Journal of Hydrology* 293:137-150

Kresic N (2009) Ground water resources sustainability, management, and restoration. Copyright by The McGraw Hill Companies, Inc., 856p.

Tung YK (1996) Uncertainty analysis in water resources engineering, in stochastic hydraulics. 96, (Edited by K.S. Tickle et al.), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 29-46

آب در خاک در مدل‌های رخدادمحور مانند HEC-HMS چندان مناسب نمی‌باشند. تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی هر کدام از معادلات نفوذ با استفاده از آماره d روش غیرپارامتریک کلموگراف-اسمیرنوف نیز نشان داد که پارامترهایی که دارای توزیع با شیب زیاد هستند دارای عدم قطعیت زیادی نبوده و به راحتی قابل شناسایی می‌باشند. همچنین پارامترهایی که توزیع آنها دارای شکل کشیده‌ای می‌باشند، از عدم قطعیت بالاتری برخوردار هستند و لذا در انتخاب آنها بایستی دقت بیشتری را مدنظر قرارداد. از آنجایی که پیش‌بینی دبی اوج هیدروگراف در سامانه‌های هشدار سیل از اهمیت بالایی برخوردار است، استفاده از الگوریتم GLUE و نیز انتخاب رابطه نفوذ مناسب می‌تواند در پیش‌بینی دبی اوج سیل مؤثر واقع شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
- 2- Monte Carlo
- 3- Topographically Based Model
- 4- Kinematic Wave Based Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph
- 5- Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
- 6- Prior Distribution
- 7- Likelihood Function
- 8- Kolmogorov-Smirnov Test
- 9- Limburg Soil Erosion Model
- 10- Conductivity

۵- مراجع

Aboud M, Thamer AM, Ghazali AH, Mahmud AR and Sidek LM (2012) Impact of infiltration methods on the accuracy of rainfall-runoff simulation. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4:1708-1713

Chahinian N, Moussa R, Andrieux P, and Voltz M (2005) Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology* 306:191-214

Liu YB, Batelaan O, De Smedt F, Poórová J, and Velcická L (2005) Automated calibration applied to a GIS-based flood simulation model using PEST, in J. van Alphen, E. van Beek and M. Taal (eds.), *Floods, from Defense to Management*, Taylor-Francis Group, London, Pp:317-326

Bahremnd A (2006) Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium

Muleta MK and Nicklow JW (2005) Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic

- Jafarzadeh MS, Rouhani H, Salmani H, and Fathabadi A (2016) Reducing uncertainty in a semi distributed hydrological modeling within the GLUE framework. *Journal of Water and Soil Conservation* 23(1):83-100 (In Persian)
- Wei Z, Tian L, Meihong D (2015) Uncertainty assessment of water quality modeling for a small-scale urban catchment using the GLUE methodology: A case study in Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research* 22(12):9241-9249
- USACE (2000) HEC-HMS technical reference manual. Davis, CA. USA.
- USACE (2017) HEC-HMS user's manual. Davis, CA. USA.
- Ratto M and Saltelli A (2001) Model assessment in integrated procedures for environmental impact evaluation: software prototypes. Joint Research Centre of European Commission, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Ispra, Italia
- Fathabadi A, Rouhani H, and Seyedian SM (2017) The efficiency of nonparametric methods based on residual analyzes and parametric method to estimate hydrological model uncertainty. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(2):281-292 (In Persian)
- Yeh KC and Deng SL (1996) Uncertainty analysis of sediment transport formulas, in stochastic hydraulics. 96, Tickle et al. (Eds)
- Nasserri M and Ahmadi A (2019) Simulation of parametric uncertainty of hydrological models using UNEEC-P framework: Monthly water balance model case study. *Iran-Water Resources Research* 14(5):164-176 (In Persian)
- Montanari A (2011) Uncertainty of hydrological predictions. In: Peter Wilderer (ed.) *Treatise on Water Science*, Oxford: Academic Press 2:459-478
- Montanari A (2007) What do we mean by 'uncertainty'? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes* 21:841-845
- Mosavinejad SH, Habashi H, Kiani F, Shataee SH, and Abdi O (2017) Evaluation of soil erosion using imagery SOPT5 satellite in Chehel chi catchment of Golestan province. *Journal of Wood & Forest Science and Technology* 24(2):73-86 (In Persian)
- Sheikh V, Hezbi A, and Bahremand A (2015) Distributed dynamic modeling of water balance in the Chehelchai Watershed within A GIS Environment. *Journal of Watershed Management Research* 6(2):29-42 (In Persian)