

واسنجی غیرقطعی پارامترهای مدل بارش-رواناب HEC-1 با استفاده از الگوریتم SUFI

احمد شرافتی^{۱*}

^۱ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۳

چکیده

یکی از روش‌های متداول در شبیه‌سازی سیلاب، استفاده از مدل‌های بارش-رواناب است. همچنین، واسنجی پارامترهای مدل‌های بارش-رواناب از جمله مسائل مهم و چالش‌انگیز در شبیه‌سازی سیلاب است. با توجه به رفتار تصادفی و غیرقطعی پارامترهای مدل‌های بارش-رواناب، استفاده از روش‌های بهینه‌یابی قطعی واسنجی همواره نتایج صحیحی را ارائه نمی‌دهد. از این رو در این تحقیق سعی شده است، با استفاده از یک رویکرد غیرقطعی و استفاده از الگوریتم SUFI، محدوده بهینه‌ای از پارامترهای مدل بارش-رواناب HEC-1 ارائه شود. با بررسی نتایج واسنجی و مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی (سه واقعه) با بهترین هیدروگراف‌های تولیدی، مشخص شد که ضریب تعیین در هر سه واقعه بیش از ۰/۸۵ است. همچنین، متوسط اختلاف بین مقادیر دبی مشاهداتی و تولیدی کمتر از حدود پنج درصد است. همچنین، در مرحله صحت‌سنجی نیز نتایج نشان داد که ضریب همبستگی در حدود ۰/۹۸ است. همچنین، متوسط اختلاف بین مقادیر دبی مشاهداتی و تولیدی حدود ۱۱ درصد است. بنابراین الگوریتم SUFI جهت واسنجی غیرقطعی مدل HEC-1 دقت مناسبی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: عدم قطعیت، سیلاب، شبیه‌سازی، پارامتر، صحت‌سنجی

مقدمه

الگوریتم‌های بهینه‌یاب نظیر GA، PSO و ... است. در این روش‌ها یک مقدار مشخص برای پارامترهای مدل بارش-رواناب به‌عنوان پارامترهای بهینه تعیین می‌شود. البته این نکته قابل توجه است که پارامترهای مدل‌های بارش-رواناب دارای عدم قطعیت زمانی و مکانی است. لذا، استفاده از الگوریتم‌های غیرقطعی جهت تعیین محدوده پارامترها از اهمیت زیادی برخوردار است.

در زمینه واسنجی غیرقطعی مدل‌های بارش-رواناب تحقیقات زیادی انجام شده است. از روش‌های

شبیه‌سازی سیلاب یکی از مسایل مهم در مهندسی آب است. شبیه‌سازی سیلاب همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است. عدم قطعیت‌ها ناشی از متغیرهای ورودی مدل بارش-رواناب نظیر بارش، پارامترهای مدل نظیر تلفات و ساختار مدل است (Gupta و Wagener، ۲۰۰۵؛ Liu و Gupta، ۲۰۰۷؛ Li و همکاران، ۲۰۱۰). واسنجی مدل‌های بارش-رواناب از مباحث مهم در شبیه‌سازی سیلاب به شمار می‌رود. روش‌های متداول واسنجی استفاده از

* مسئول مکاتبات: asharafati@srbiau.ac.ir

آمپ، جریان پایه نمایی و هیدروگراف واحد مصنوعی SCS جهت شبیه‌سازی رواناب استفاده شده است. پارامترهای انتخاب شده از مدل HEC1 به‌منظور شبیه‌سازی سیلاب عبارت از تلفات اولیه^۳، کمبود رطوبت^۴، مکش مرطوب^۵، هدایت هیدرولیکی^۶، درصد سطح نفوذناپذیر، دبی رودخانه در ابتدای واقعه، دبی حدی در شروع شاخه نزولی، ضریب کاهش دبی و زمان تأخیر می‌باشند. پارامترهای مذکور در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

مدل HEC1 بارش را بر اساس رابطه (۱) تصحیح می‌کند.

$$\begin{cases} r(t) = 0 & , p(t) \leq IA \\ r(t) = r_0(t) & , p(t) > IA \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، $p(t)$ بارش تجمعی، $r(t)$ شدت بارش مازاد، t زمان بعد از شروع بارش و IA تلفات اولیه می‌باشند. در حالتی که بارش تجمعی از تلفات اولیه بیشتر است، شدت بارش مازاد برابر $r_0(t)$ است. در مدل HEC1 جهت محاسبه تلفات نفوذ با در نظر گرفتن مدل تلفات گرین-آمپت از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

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

که در آن، $F(t)$ نفوذ تجمعی، $f(t)$ نرخ نفوذ، $PSIF$ مکش مرطوب، $DTHETA$ کمبود رطوبت و $XKSAT$ هدایت هیدرولیکی در شرایط اشباع است. همچنین، $r_0(t)$ عبارت از شدت بارش خالص در حالتی که بارش تجمعی از تلفات اولیه بیشتر باشد.

الگوریتم SUFI: در این الگوریتم به‌منظور کمی کردن رفتار تصادفی پارامترهای تصادفی مدل HEC-1 از توزیع احتمالاتی یکنواخت استفاده شده است.

واسنجی غیرقطعی مدل‌های بارش-رواناب می‌توان به روش‌های مبتنی بر حداکثر درست‌نمایی (Sorooshian و همکاران، ۱۹۸۳)، مبتنی بر تئوری حوضه (Kuczera، ۱۹۸۳؛ Romanowicz و همکاران، ۱۹۹۴؛ Kavetski و همکاران، ۲۰۰۶؛ Ajami و همکاران، ۲۰۰۷؛ Thyer و همکاران، ۲۰۰۹)، مبتنی بر روش GLUE (Beven و Binley، ۱۹۹۲؛ Freer و همکاران، ۱۹۹۶؛ Freer و Beven، ۲۰۰۱) و مبتنی بر روش SUFI (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۴؛ Mousavi و همکاران، ۲۰۱۲) اشاره کرد.

مدل HEC-1 از مدل‌های متداول بارش-رواناب جهت شبیه‌سازی سیلاب است. محققین زیادی از این مدل جهت شبیه‌سازی وقایع سیلاب استفاده کرده‌اند (Kobold و Suselj، ۲۰۰۵؛ Maskey و همکاران، ۲۰۰۴؛ USCE، ۱۹۹۸). در این تحقیق سعی شده است با استفاده از روش SUFI، ضمن واسنجی غیرقطعی مدل بارش-رواناب HEC-1 و اصلاح توزیع احتمالاتی پارامترهای مدل HEC-1، وقایع سیلاب نیز تولید و با وقایع مشاهداتی مقایسه شود. در این تحقیق از معادلات تلفات گرین-آمپت (Golian و همکاران، ۲۰۱۰)، جریان پایه نمایی (Boyogueno و همکاران، ۲۰۱۲) و هیدروگراف واحد مصنوعی SCS (Majidi و Shahedi، ۲۰۱۲) جهت شبیه‌سازی رواناب استفاده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم غیرقطعی SUFI، اقدام به واسنجی و اصلاح توزیع احتمالاتی پارامترهای مدل HEC-1 شد. سپس با استفاده از توزیع احتمالاتی اصلاح شده پارامترها، وقایع سیلاب تولید شد. کلیه مراحل مذکور به‌صورت کد نویسی در محیط نرم‌افزار Matlab انجام شده است.

مدل HEC-1: مدل بارش-رواناب مورد استفاده در این تحقیق مدل HEC1 است. این مدل از نوع توده‌ای^۱ و جهت شبیه‌سازی جریانات تک واقعه^۲ تهیه شده است. در این تحقیق از معادلات تلفات گرین

³ Initial Loss

⁴ Moisture Deficit

⁵ Wetting Front Suction

⁶ Hydraulic Conductivity

¹ Lump

² Single Event

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی رواناب در مدل HEC1

| پارامتر | حروف اختصاری در مدل HEC1 | واحد | تعریف |
|---------|--------------------------|--------------------|--|
| IA | LG(1) | mm | تلفات اولیه (Initial loss) |
| DTHETA | LG(2) | - | کمبود رطوبت (moisture deficit) |
| PSIF | LG(3) | mm | مکش مرطوب (Wetting front suction) |
| XKSAT | LG(4) | mmhr ⁻¹ | هدایت هیدرولیکی (Hydraulic conductivity) |
| RTIMP | LG(5) | % | درصد سطح نفوذناپذیر |
| STRTQ | BF(1) | cms | دبی رودخانه در ابتدای واقعه |
| QRCSN | BF(2) | cms | دبی حدی در شروع شاخه نزولی |
| RTIOR | BF(3) | - | ضریب کاهش دبی |
| TLAG | UD | hr | زمان تاخیر |

۲- پس از تعیین تابع هدف، بازه مطلق پارامترها استخراج شده است. تعیین این بازه می‌تواند بر اساس واسنجی وقایع و یا بر اساس تجربه متخصصین استخراج شده باشد. در این تحقیق بازه مطلق بر اساس ۱۰ واقعه واسنجی شده استخراج شده است. مشخصات واقعه مورد استفاده به منظور تعیین باند اولیه پارامترهای مدل HEC-1 در جدول ۲ و مقادیر بازه مطلق پارامترهای مدل در جدول ۳ ارائه شده است. رابطه پارامترها نسبت به بازه مطلق پارامترها به شرح ذیل است.

$$b_j : b_{j,abs_min} \leq b_j \leq b_{j,abs_max} \quad j = 1, \dots, m \quad (3)$$

که در آن، b_j زامین پارامتر و m تعداد پارامترها است. b_{j,abs_min} و b_{j,abs_max} نیز به ترتیب مقدار حداکثر مطلق و مقدار حداقل مطلق پارامتر b_j هستند.

با استفاده از توزیع احتمالاتی پارامترها و روش نمونه‌گیری LHS نمونه‌های مختلفی از پارامترها به تعداد زیاد، برای مثال ۲۰۰ نمونه (Mousavi و همکاران، ۲۰۱۲) تولید شده است. از میان نمونه تولید شده، نمونه‌ای که دارای بهترین مقدار تابع است، به‌عنوان بازه بعدی پارامترهای مدل HEC-1 با اعمال مقادیری از توزیع t انتخاب شده است. این روند به تعداد مناسب تکرار می‌شود تا بهینه‌ترین و صحیح‌ترین بازه انتخاب شود. جزئیات الگوریتم مذکور به شرح ذیل است.

۱- اولین مرحله در الگوریتم SUFI انتخاب تابع هدف است. تابع هدف‌های مختلفی نظیر RMSE، Nash-Sutcliffe و R^2 می‌توانند در مسائل مشابه این تحقیق استفاده شوند. در این تحقیق از RMSE به‌عنوان تابع هدف استفاده شده است.

جدول ۲- مقایسه سیلاب‌های واسنجی شده و مشاهداتی جهت تعیین باند اولیه پارامترهای مدل HEC-1

| ردیف | تاریخ سیلاب | پیک سیلاب مشاهداتی (مترمکعب بر ثانیه) | پیک سیلاب شبیه‌سازی (مترمکعب بر ثانیه) | ضریب همبستگی |
|------|-------------|--|---|--------------|
| ۱ | ۱۳۶۶/۰۸/۱۵ | ۲۱/۳۰ | ۲۲/۶۰ | ۰/۹۳۵ |
| ۲ | ۱۳۶۶/۱۲/۱۳ | ۴۰/۹۰ | ۴۲/۵۰ | ۰/۹۲۸ |
| ۳ | ۱۳۶۶/۱۲/۱۸ | ۲۱/۹۰ | ۲۲/۱۰ | ۰/۹۷۳ |
| ۴ | ۱۳۶۷/۱۲/۱۷ | ۲۱/۷۰ | ۲۰/۰۰ | ۰/۹۰۳ |
| ۵ | ۱۳۷۲/۱۱/۱۱ | ۱۲/۶۰ | ۱۲/۵۰ | ۰/۸۵۵ |
| ۶ | ۱۳۷۲/۰۸/۱۳ | ۳۷/۹۰ | ۳۷/۸۰ | ۰/۹۴۲ |
| ۷ | ۱۳۷۲/۱۲/۲۵ | ۷۱/۰۰ | ۶۷/۷۰ | ۰/۹۶۱ |

جدول ۳- بازه‌های مختلف پارامترهای مدل HEC1 در الگوریتم SUFI

| پارامتر | واحد | مقدار حداقل مطلق | مقدار حداکثر مطلق | مقدار حداقل اولیه | مقدار حداکثر اولیه |
|---------|-------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| LG(1) | mm | ۰ | ۱/۳۵ | ۰/۳ | ۰/۸ |
| LG(2) | - | ۰/۰۶ | ۰/۴۵ | ۰/۱ | ۰/۳۵ |
| LG(3) | mm | ۲۰۰ | ۲۰۰۰ | ۵۰۰ | ۱۵۰۰ |
| LG(4) | mm/hr | ۰/۰۷ | ۳/۵ | ۰/۵ | ۲/۵ |
| LG(5) | % | ۱/۸ | ۱۲ | ۲/۵ | ۱۰ |
| BF(1) | cms | ۰/۵ | ۱۹ | ۲ | ۱۵ |
| BF(2) | cms | ۲/۵ | ۳۵ | ۵/۵ | ۳۰ |
| BF(3) | - | ۱/۰۱ | ۷/۵۷ | ۲ | ۶ |
| UD | hr | ۲/۵ | ۳۵ | ۳/۵ | ۱۲ |

$$C = S_g^2 H^{-1} \quad (8)$$

که در آن‌ها، S_g^2 واریانس تابع هدف و T عملگر دترانه‌دهنده است.

۶- بر اساس مقادیر قطری ماتریس C و توزیع t و پارامترهای مرتبط با بهترین مقدار تابع هدف، مقادیر جدید برای پارامترها به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$s_j = \sqrt{C_{jj}} \quad (9)$$

$$\begin{cases} b_{j,lower} = b_j^* - abx(t_{v,0.025})s_j \\ b_{j,upper} = b_j^* + abx(t_{v,0.025})s_j \end{cases} \quad (10)$$

که در آن، b_j^* پارامترهای مدل HEC1 مرتبط با بهترین مقدار تابع هدف و v درجه آزادی است. ۷- در نهایت بر اساس پارامترهای محاسبه شده در مرحله قبلی و رابطه زیر بازه جدید پارامترها محاسبه شده است.

$$\begin{cases} b'_{j,min} = b_{j,lower} - \max \left\{ \frac{(b_{j,lower} - b_{j,min})}{2}, \frac{(b_{j,max} - b_{j,upper})}{2} \right\} \\ b'_{j,max} = b_{j,upper} + \max \left\{ \frac{(b_{j,lower} - b_{j,min})}{2}, \frac{(b_{j,max} - b_{j,upper})}{2} \right\} \end{cases} \quad (11)$$

که در آن، b' نشانگر مقادیر جدید برای بازه پارامترهای مدل HEC1 است.

در کنترل نتایج الگوریتم SUFI علاوه بر مقادیر تابع هدف، دو عامل دیگر به نام‌های D_factor و P_factor نیز محاسبه می‌شود. D_factor بیانگر نسبت متوسط تغییرات باند معنی‌دار تولید شده

۳- بر اساس بازه مطلق پارامترها، بازه اولیه‌ای برای هر پارامتر استخراج شده است. در جدول ۳ مقادیر بازه اولیه پارامترهای مد نظر ارائه شده است. بازه اولیه توسط کاربر و به جهت کاهش تکرارهای بهینه‌یابی از بازه مطلق استخراج می‌شود. رابطه میان بازه اولیه و مقادیر پارامترها به شرح رابطه (۴) است.

$$b_j : b_{j,min} \leq b_j \leq b_{j,max} \quad j = 1, \dots, m$$

که در آن، $b_{j,min}, b_{j,max}$ نیز به ترتیب مقدار حداکثر اولیه و مقدار حداقل اولیه پارامتر b_j هستند. ۴- با استفاده از بازه اولیه پارامترها و روش نمونه‌گیری LHS^۱ نمونه‌هایی از پارامترها (سری پارامترها) تولید شده و متناسب با هر نمونه تابع هدف محاسبه شده است.

۵- پس از اتمام نمونه‌گیری‌ها، ماتریس‌ها C, H, J محاسبه می‌شود که درایه‌های ماتریس C, H, J به صورت زیر محاسبه شده است.

$$J = \frac{\Delta g_i}{\Delta b_j^i} \quad i = 1, \dots, C_2^n, \quad j = 1, \dots, m \quad (5)$$

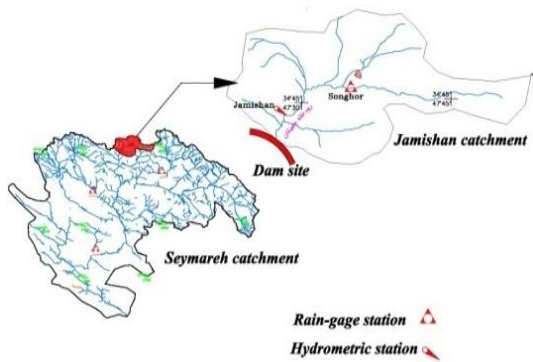
که در آن، Δg_i تفاضل تابع هدف مرتبط به دو سری از پارامترهای تولید شده هستند. n تعداد نمونه‌های تولید شده از پارامترهای مدل، m تعداد پارامترها و C_2^n تعداد کل حالت‌های ممکن برای مقایسه پارامترهای تولید شده است.

$$C_2^n = \frac{n!}{[2 \times (n-2)!]} \quad (6)$$

$$H = J^T J \quad (7)$$

¹ Latin Hypercube Sampling

جامیشان استفاده است. این حوزه آبخیز در شکل ۱
ارایه شده است.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز سد جامیشان در حوزه آبخیز
سیمره

به منظور بررسی روش شناسی الگوریتم SUFI در
واسنجی و همچنین صحت سنجی این الگوریتم، چهار
وقایع سیلاب از حوزه سد جامیشان انتخاب شده
است. مشخصات وقایع انتخابی در جدول ۴ ارایه شده
است.

جدول ۴- مشخصات وقایع مشاهده‌ای سیلاب و بارش در حوزه
آبریز سد جامیشان

| واقعیه | مورد استفاده | عمق بارش (میلی متر) | پیک سیلاب (مترمکعب بر ثانیه) |
|--------|--------------|---------------------|------------------------------|
| ۱ | واسنجی | ۲۴/۳۰ | ۲۱/۳۰ |
| ۲ | واسنجی | ۴۳ | ۶۹ |
| ۳ | واسنجی | ۵۳ | ۱۳۸ |
| ۴ | صحت سنجی | ۵۷/۵۰ | ۱۹۵ |

نتایج و بحث

طبق موارد اشاره در روش شناسی الگوریتم SUFI
و بر اساس باند اولیه پارامترهای مدل HEC-1، اصلاح
توزیع احتمالاتی پارامترها مطابق روش شناسی مذکور
انجام شد.

در هر مرحله از اجرای الگوریتم SUFI، مقادیر
تغییرات تابع هدف g ، شاخص‌های P_Factor و D_Factor
محاسبه و در شکل‌های ۲ تا ۴ و جدول ۵ ارایه
شده است.

(95PPU) به انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای است و
بهترین مقدار برای این شاخص عدد ۱ است. D_Factor
با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$d_x = \sum_{z=1}^k (X_{U,z} - X_{L,z}) / k \quad (12)$$

$$D_factor = d_x / \sigma_x \quad (13)$$

که در آن‌ها، K تعداد داده‌های مشاهده‌ای و σ_x
انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای هستند.

P_Factor نیز بیانگر درصد داده‌های مشاهده‌ای
داخل 95PPU است. بهترین مقدار برای این شاخص
عدد ۱۰۰ درصد است. برای تعیین باند تغییرات
پارامترهای HEC1 با استفاده از الگوریتم SUFI در
ابتدا با استفاده از سه واقعه ابتدای ارایه شده در جدول
۳ و به صورت واسنجی متصل^۱ و استفاده از شاخص
RMSE تابع هدفی مشابه تابع هدف مورد استفاده
توسط Abbaspour و همکاران (۲۰۰۴) به صورت ذیل
تعریف شده است. در این تحقیق، تابع هدف وزنی
شامل متوسط RMSE‌های محاسباتی در نظر گرفته
شده است.

$$g(b_i) = \sum_{e=1}^3 C_e \times RMSE_{e,i}, i=1, \dots, n \quad (14)$$

$$C_e = \frac{ave_{RMSE_e}}{ave_{RMSE_e}} \quad (15)$$

که در آن، ave_{RMSE_e} متوسط RMSE‌های
محاسباتی برای واقعه e است.

منطقه مورد پژوهش: در این تحقیق از داده‌های
حوزه آبخیز سد جامیشان با مساحت ۵۲۴/۰۷
کیلومتر مربع استفاده شده است. این حوزه آبخیز از
نظر تقسیمات کشوری جزء استان کرمانشاه و بخشی
از سرشاخه‌های حوزه رودخانه سیمره محسوب
می‌شود. حوزه آبخیز مورد استفاده در این تحقیق در
حد فاصل ۳۲' ۳۴° تا ۵۳' ۳۴° عرض شمالی و ۲۲'
۴۷° تا ۵۲' ۴۷° طول شرقی می‌باشد. متوسط
بارندگی سالانه آن ۴۴۱ میلی‌متر، متوسط تبخیر از
سطح آزاد آن ۱۵۳۴ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه
آن ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در این تحقیق از
ایستگاه باران سنجی سنقر و ایستگاه هیدرومتری

¹ Joint calibration

بررسی نتایج واسنجی و کنترل صحت‌سنجی الگوریتم SUFI استفاده شده است.

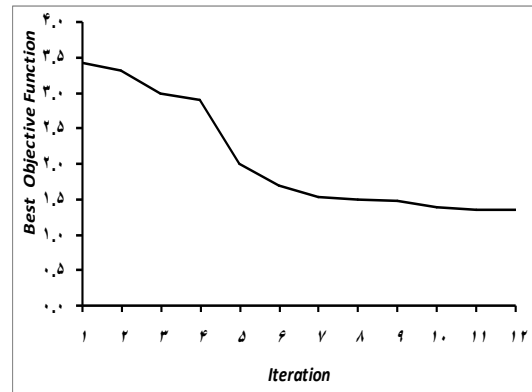
جدول ۵- مقادیر عددی شاخص‌های مورد بررسی در الگوریتم SUFI

| P_factor (%) | D_factor | RMSE | تکرار |
|--------------|----------|------|-------|
| ۹۲ | ۵/۷۸ | ۳/۴۲ | ۱ |
| ۷۱ | ۱/۴۶ | ۳/۳۱ | ۲ |
| ۷۳ | ۱/۵۳ | ۳ | ۳ |
| ۶۸ | ۱/۱۹ | ۲/۸۹ | ۴ |
| ۷۱ | ۱/۸۵ | ۱/۹۹ | ۵ |
| ۶۹ | ۱/۵۶ | ۱/۷ | ۶ |
| ۷۰ | ۱/۶ | ۱/۵۳ | ۷ |
| ۶۹ | ۱/۶۲ | ۱/۵ | ۸ |
| ۶۷ | ۱/۶۸ | ۱/۴۸ | ۹ |
| ۶۷ | ۱/۵۳ | ۱/۳۸ | ۱۰ |
| ۶۶ | ۱/۳۱ | ۱/۳۵ | ۱۱ |
| ۶۶ | ۱/۳۴ | ۱/۳۵ | ۱۲ |

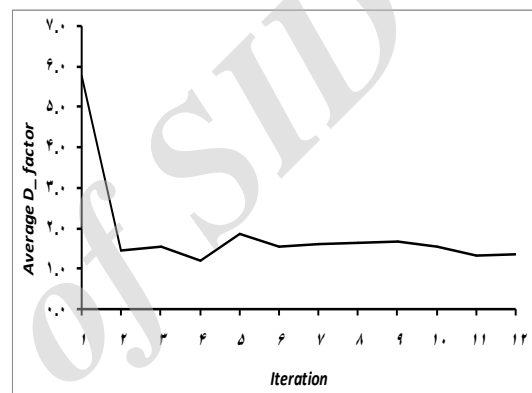
جدول ۶- بازه‌های بهینه (نهایی) پارامترهای مدل HEC1 در الگوریتم SUFI

| پارامتر | واحد | مقدار حداقل بهینه | مقدار حداکثر بهینه |
|---------|-------|-------------------|--------------------|
| LG(1) | mm | ۰/۴۸ | ۰/۵۱ |
| LG(2) | - | ۰/۱۳ | ۰/۱۴ |
| LG(3) | mm | ۸۱۶/۵۴ | ۸۸۷/۴۶ |
| LG(4) | mm/hr | ۰/۷۷ | ۰/۹۳ |
| LG(5) | % | ۸/۹۸ | ۹/۴۵ |
| BF(1) | cms | ۱۲/۷۷ | ۱۳/۶۵ |
| BF(2) | cms | ۱۵ | ۱۶/۳۷ |
| BF(3) | - | ۴/۵ | ۴/۷۸ |
| UD | hr | ۸/۹۲ | ۹/۳۱ |

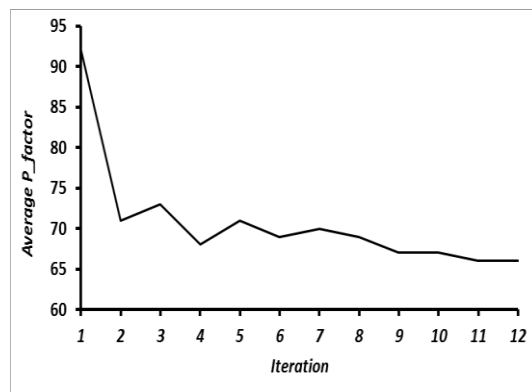
به‌منظور بررسی نتایج واسنجی، مقایسه هیدروگراف مشاهداتی با بهترین هیدروگراف تولیدی در شکل‌های ۵ تا ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است در شکل ۶ مقادیر سیلاب‌های شبیه‌سازی بر اساس بهترین سری پارامترهای (b_j^*) مدل HEC-1 استخراج شده است.



شکل ۲- تغییرات مقادیر تابع هدف متناظر با بهترین نمونه از پارامترها

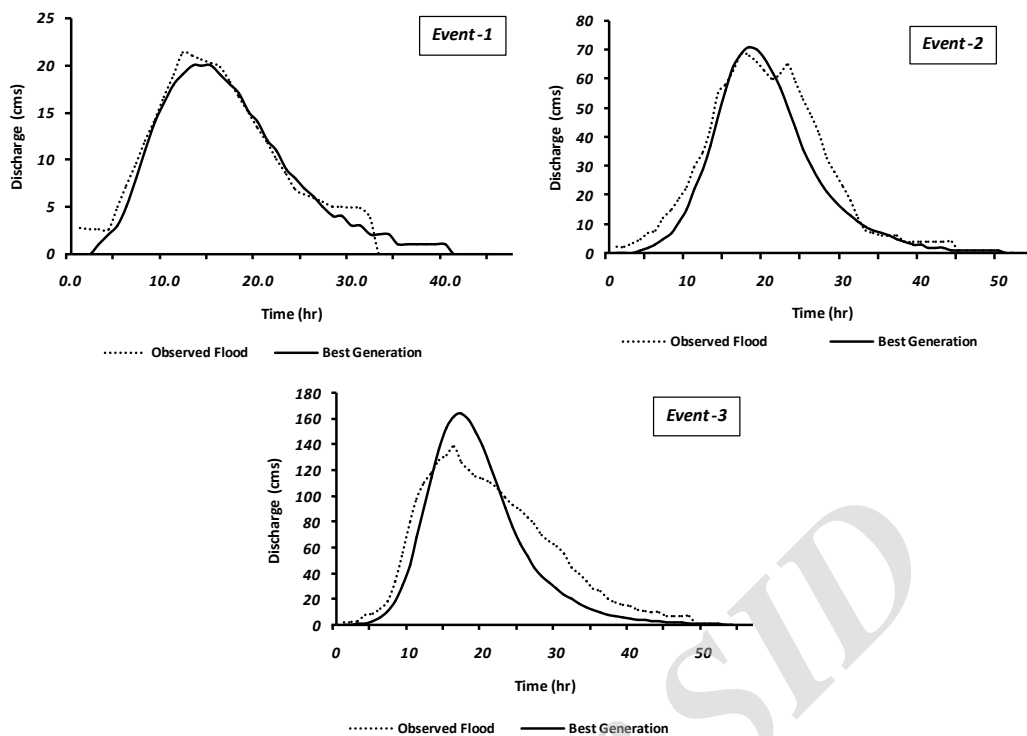


شکل ۳- تغییرات شاخص D_factor

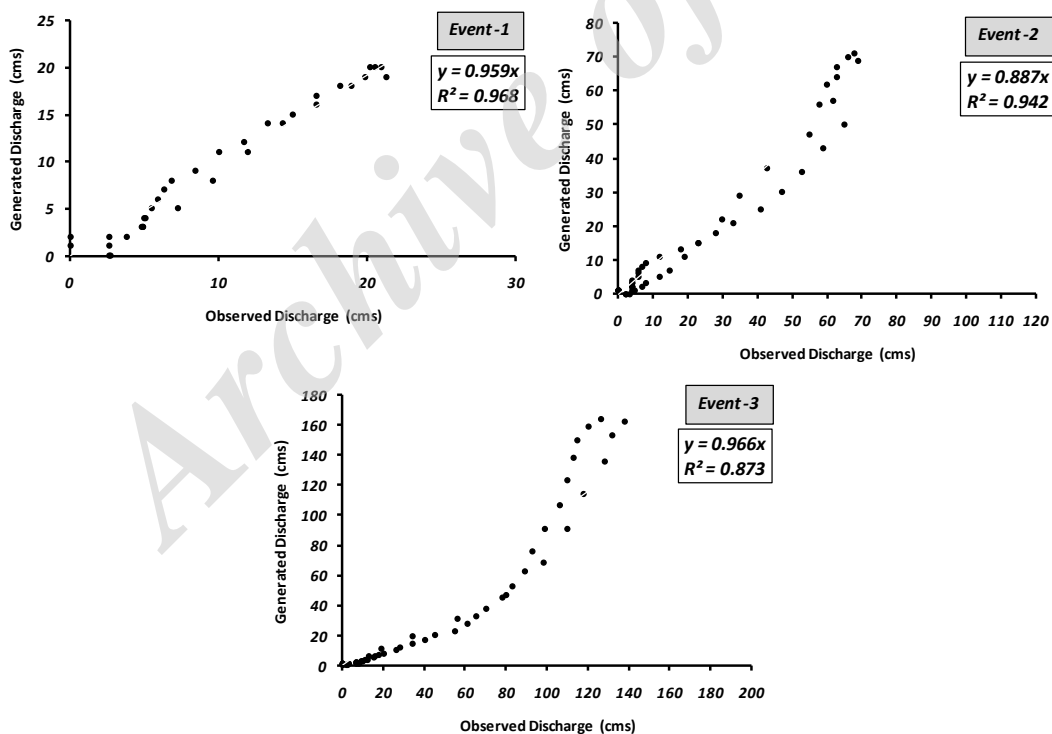


شکل ۴- تغییرات شاخص P_factor

با ملاحظه شکل ۲ تا ۴ مشخص شده است که پس از تکرار پنجم مقدار تابع هدف همگرا شده است. از این رو از نتایج و بازه محاسباتی پارامترها در این تکرار (پارامترهای بهینه) مطابق جدول ۶ به‌منظور



شکل ۵- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی با بهترین هیدروگراف‌های تولیدی



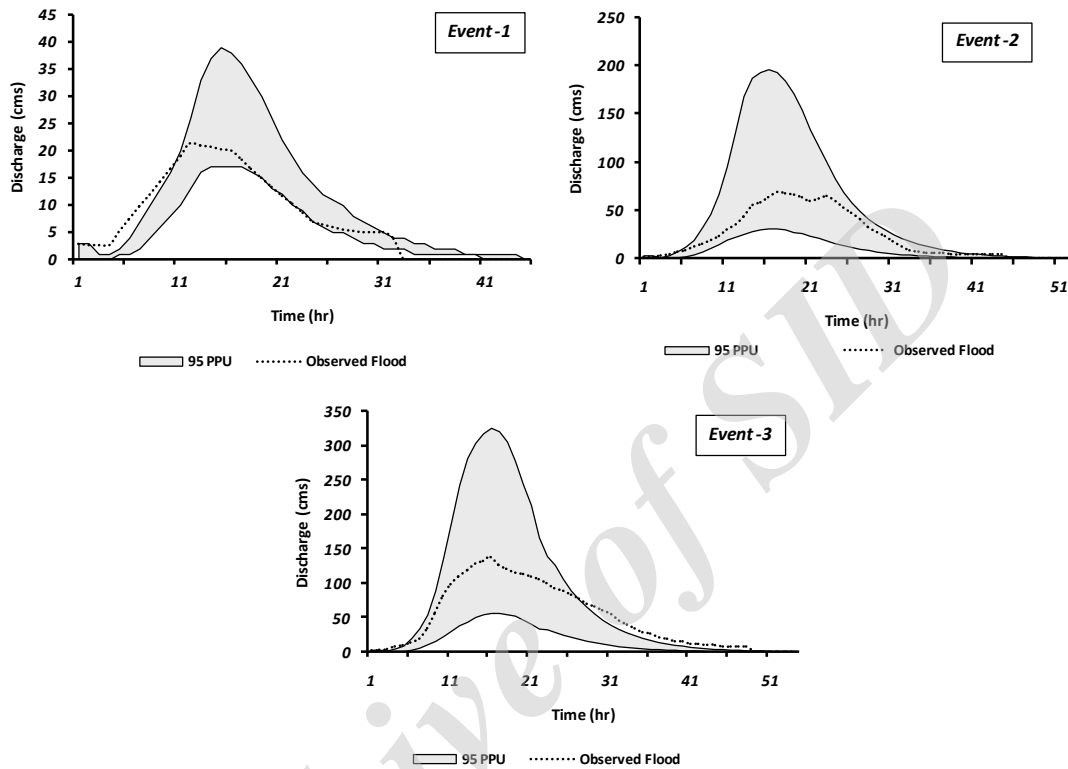
شکل ۶- مقایسه دبی سیلاب‌های مشاهداتی با بهترین سیلاب‌های تولیدی

بیش از ۰/۸۵ است. همچنین، متوسط اختلاف بین مقادیر دبی مشاهداتی و تولیدی ($Ce = 1 - Cr$) کمتر از حدود پنج درصد است. با توجه به توضیحات فوق

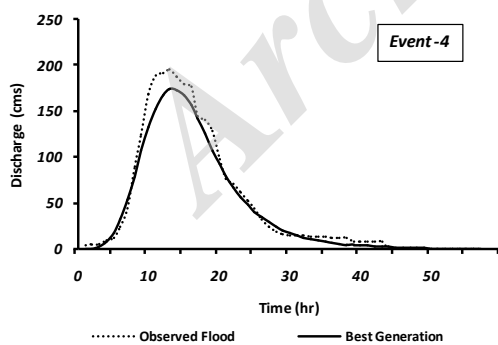
با بررسی نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی با بهترین هیدروگراف‌های تولیدی ملاحظه شده است که ضریب تعیین (R^2) در هر سه واقعه

ارایه شده در جدول ۲ ملاحظه می‌شود که به‌طور متوسط ۷۰ درصد هیدروگراف‌های مشاهداتی در باند 95PPU قرار دارد. البته قسمت‌های مهم هیدروگراف که در محدوده پیک سیلاب است در باند 95PPU قرار دارند.

الگوریتم SUFI در تعیین باند تغییرات پارامترهای مدل HEC1 از دقت نسبتاً مناسبی برخوردار بوده است. در ادامه مقایسه‌ای میان هیدروگراف‌های مشاهداتی و باند 95PPU انجام شد. نتایج این مقایسه در شکل ۷ ارایه شده است. با ملاحظه شکل ۷ و نتایج



شکل ۷- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی با باند 95PPU تولیدی

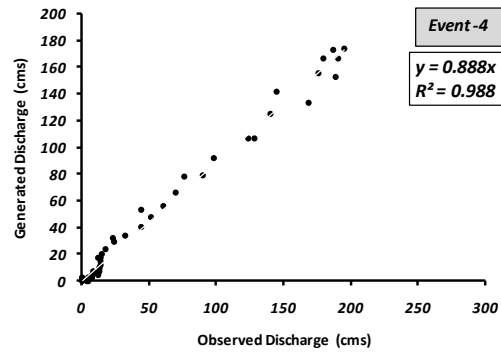


شکل ۸- مقایسه هیدروگراف مشاهداتی با بهترین هیدروگراف تولیدی

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج الگوریتم SUFI از واقعه چهارم مندرج در جدول ۳ استفاده شده است. بدین ترتیب با استفاده از بازه تغییرات پارامترهای مدل HEC1 محاسبه شده در مرحله واسنجی و روش نمونه‌گیری LHS نمونه‌هایی از هیدروگراف به تعداد ۲۰۰ نمونه تولید شده است. مقایسه هیدروگراف مشاهداتی با بهترین هیدروگراف تولیدی و در شکل‌های ۸ تا ۹ ارایه شده است.

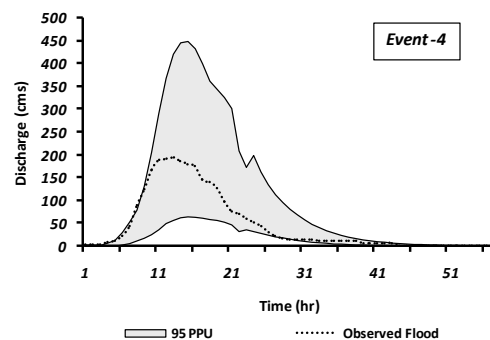
نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد تا با استفاده از الگوریتم SUFI و به صورت غیرقطعی مدل HEC-1 واسنجی شود. برای بررسی روش شناسی مورد استفاده حوزه آبخیز سد جامیشان انتخاب شد. همچنین، جهت واسنجی و صحت‌سنجی از چهار واقعه سیلاب استفاده شد. با استفاده از الگوریتم SUFI و سه واقعه سیلاب و بارش متناظر با آن محدوده بهینه پارامترهای مدل HEC-1 استخراج شد. با ملاحظه نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی با بهترین هیدروگراف‌های تولیدی در مرحله واسنجی ملاحظه شد که ضریب تعیین (R^2) در هر سه واقعه بیش از ۰/۸۵ است. همچنین، متوسط اختلاف بین مقادیر دبی مشاهداتی و تولیدی ($Ce=1-Cr$) کمتر از حدود پنج درصد است. در ادامه مقایسه‌ای میان هیدروگراف‌های مشاهداتی و باند 95PPU انجام شد و نتایج نشان داد که به‌طور متوسط ۷۰ درصد هیدروگراف‌های مشاهداتی در باند 95PPU قرار دارند. البته قسمت‌های مهم هیدروگراف که در محدوده پیک سیلاب است، به‌طور کامل در باند 95PPU قرار دارند. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج الگوریتم SUFI از واقعه چهارم استفاده شد. بدین ترتیب با استفاده از بازه تغییرات پارامترهای مدل HEC-1 محاسبه شده در مرحله واسنجی و روش نمونه‌گیری LHS نمونه‌هایی از هیدروگراف به تعداد ۲۰۰ نمونه تولید شد. با ملاحظه نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی با بهترین هیدروگراف‌های تولیدی در مرحله صحت‌سنجی ملاحظه شد که ضریب تعیین (R^2) در حدود ۰/۹۹ است. همچنین، متوسط اختلاف بین مقادیر دبی مشاهداتی و تولیدی ($Ce=1-Cr$) کمتر از حدود ۱۱ درصد است. با توجه به توضیحات فوق الگوریتم SUFI در تعیین باند تغییرات پارامترهای مدل HEC1 از دقت نسبتاً مناسبی برخوردار بوده است. از طرف دیگر، مقایسه‌ای میان هیدروگراف مشاهداتی و باند 95PPU انجام شده است که نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهد که ۸۲ درصد هیدروگراف‌های مشاهداتی در باند 95PPU قرار دارد و شاخص D_factor برابر ۱/۴۵ است.



شکل ۹- مقایسه دبی سیلاب مشاهداتی با بهترین سیلاب تولیدی

با ملاحظه نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی با بهترین هیدروگراف‌های تولیدی در مرحله صحت‌سنجی ملاحظه شده است که ضریب تعیین (R^2) در حدود ۰/۹۹ است. همچنین، متوسط اختلاف بین مقادیر دبی مشاهداتی و تولیدی ($Ce = 1 - Cr$) کمتر از حدود ۱۱ درصد است. با توجه به توضیحات فوق الگوریتم SUFI در تعیین باند تغییرات پارامترهای مدل HEC1 از دقت نسبتاً مناسبی برخوردار بوده است. همچنین، مقایسه‌ای میان هیدروگراف مشاهداتی و باند 95PPU انجام شده است. نتایج این مقایسه در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهد که ۸۲ درصد هیدروگراف‌های مشاهداتی در باند 95PPU قرار دارد و شاخص D_factor برابر ۱/۴۵ است.



شکل ۱۰- مقایسه هیدروگراف مشاهداتی با باند 95PPU تولیدی

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C., C.A. Johnson and M.T. Van Genuchten. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4): 1340-1352.
2. Ajami, N.K., Q. Duan and S. Sorooshian. 2007. An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter and model structural uncertainty in hydrologic prediction. *Water Resources Research*, 43(1): 12-24.
3. Beven, K. and A. Binley. 1992. The future of distributed models—model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3): 279–298.
4. Beven, K. and J. Freer. 2001. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of hydrology*, 249(1): 11-29.
5. Boyogueno, S.H., M. Mbessa and T.T. Tatietsé. 2012. Prediction of flow-rate of Sanaga Basin in Cameroon using HEC-HMS hydrological system: application to the Djerem sub-basin at Mbakaou. *Energy and Environment Research*, 2(1): 205-228.
6. Freer, J., K. Beven and B. Ambroise. 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.
7. Golian, S., B. Saghafian and R. Maknoon. 2010. Derivation of probabilistic thresholds of spatially distributed rainfall for flood forecasting. *Water Resources Management*, 24(13): 3547-3559.
8. Kavetski, D., G. Kuczera and S.W. Franks. 2006. Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory. *Water Resources Research*, 42(3): 24-35.
9. Kobold, M. and K. Sušelj. 2005. Precipitation forecasts and their uncertainty as input into hydrological models, *Hydrology and Earth System Sciences*, 9: 322-332.
10. Kuczera, G. 1983. Improved parameter inference in catchment models 1. Evaluating parameter uncertainty. *Water Resources Research*, 19(5): 1151–1162.
11. Kuczera, G. 1983. Improved parameter inference in catchment models 2. Combining different kinds of hydrologic data and testing their compatibility. *Water Resources Research*, 19(5): 1163–1172.
12. Li, Z, Q. Shao, Z. Xu and X. Cai. 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: 76–83.
13. Liu, Y., and H.V. Gupta. 2007. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research*, 43(7): 68-79.
14. Majidi, A. and K. Shahedi. 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.
15. Maskey, S. and V. Guinot. 2003. Improved first-order second moment method for uncertainty estimation in flood forecasting. *Hydrological sciences journal*, 48(2): 183-196.
16. Maskey, S., V. Guinot and R.K. Price. 2004. Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modelling: a fuzzy set approach. *Advances in water resources*, 27(9): 889-898.
17. Mousavi, S.J., K.C. Abbaspour, B. Kamali, M. Amini and H. Yang. 2012. Uncertainty-based automatic calibration of HEC-HMS model using sequential uncertainty fitting approach. *Journal of Hydroinformatics*, 14(2): 286-309.
18. Romanowicz, R., K.J. Beven and J. Tawn. 1994. Evaluation of predictive uncertainty in nonlinear hydrological models using a Bayesian approach. *Statistics for the Environment*, 2: 297-317.
19. Sorooshian, S. and H.V. Gupta. 1983. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. *Water Resources Research*, 19(1): 260-268.
20. Sorooshian, S., H.V. Gupta, and J. Fulton. 1983. Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: influence of calibration data variability and length on model credibility. *Water Resources Research*, 19(1): 251–259.
21. Thyer, M., B. Renard, D. Kavetski, G. Kuczera, S.W. Franks and S. Srikanthan. 2009. Critical evaluation of parameter consistency and predictive uncertainty in hydrological modeling: a case study using Bayesian total error analysis. *Water Resources Research*, 45(12): 253-264.
22. Wagener, T. and H.V. Gupta. 2005. Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6): 378-387.