

بهینه‌سازی پارامترهای حساس مدل بارش- رواناب HEC-HMS به وسیله الگوریتم فراکاوشی بهینه‌سازی PSO

رضا گرمه^۱، علی‌رضا فریدحسینی^{۲*}

۱. کارشناس ارشد منابع آب دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۱/۱۱)

چکیده

محدودیت‌های ساختاری مدل‌های هیدرولوژیکی و عدم دسترسی به همه پارامترهای حوضه آبخیز همچنین عدم امکان تعیین دقیق شرایط مرزی و شرایط اولیه، واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک را ایجاب می‌کند. با توجه به زمان‌بر بودن واسنجی دستی، به‌ویژه هنگامی که داده‌ها کم و پارامترها فراوان‌اند، روش‌های واسنجی خودکار، مبتنی بر استفاده از روش‌های جست‌وجوی سیستماتیک در فضای چندبعدی، با استفاده از یک تابع هدف، بسیار سودمند است. در این مطالعه، نرم‌افزار HEC-HMS همچون مدل شبیه‌ساز و الگوریتم هوش جمعی PSO به مثابه مدل بهینه‌ساز عمل می‌کنند. برنامه‌نویسی مدل و فراخوانی HEC-HMS در محیط برنامه MATLAB انجام گرفت. مدل تلفیقی ارائه‌شده در حوضه سد کارده، واقع در استان خراسان رضوی، بررسی شد. واسنجی مدل به کمک تابع هدف RMSE در سناریوهای مختلف سه‌رخداده مطالعه شد و نتایج دسته‌ای پارامتر با مقادیر متفاوت تولید کرد. سپس همه سناریوهای بررسی‌شده صحت‌سنجی شد و در انتها، با مقایسه مقادیر تابع هدف و ضریب همبستگی بین دبی‌های مشاهداتی و محاسباتی در رخدادهای مختلف، سه دسته پاسخ تولیدشده به منزله پاسخ‌های بهینه مدل معرفی شد. نتایج بر خاصیت عدم امکان حصول پارامترهای منحصره‌فرد برای یک حوضه آبخیز تأکید داشت. این روش، با توجه به مشکل غیرمنفردبودن مجموعه جواب‌های مسئله واسنجی به منزله یک مسئله معکوس، می‌تواند در محدودکردن تعداد جواب‌های کاندید مؤثر باشد.

کلیدواژگان: الگوریتم هوش جمعی PSO، مدل شبیه‌ساز HEC-HMS، واسنجی خودکار.

مقدمه

قطعیت سبب می‌شود هیچ مدل بارش- روانابی بازتابی کامل و دقیق از فرایندهای طبیعت ارائه ندهد. معمولاً در روش‌هایی که عدم قطعیت برای مدل در نظر گرفته نشده فرض می‌شود فقط یک سری منحصره‌فرد از پارامترهای مدل وجود دارد (QodsiPour, 2009).

Qaderi *et al.* (2006) واسنجی خودکار مدل‌های مفهومی بارش- رواناب را به کمک روش بهینه‌سازی^۱ SCE بررسی کردند. روش واسنجی اتوماتیک در زیرحوضه گاماسیاب، در شمال غربی حوضه رودخانه کرخه، آزمایش شد. معیارهای ارزیابی و نتایج نشان داد روش توسعه‌داده‌شده برای واسنجی خودکار پارامترهای مدل مفهومی بارش- رواناب (CRR) دقت و کارایی زیادی دارد.

Kamali and Mousavi (2010) مدل مفهومی HEC^۲ HMS را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO^۳ چندمنظوره

نخستین هدف یک مدل شبیه‌سازی پیش‌بینی عملکرد مجموعه‌ای پیچیده و بررسی اثر هر گونه تغییر بر عملکرد مجموعه است. با توجه به روند رو به افزایش سیل و خسارت‌های ناشی از آن در اغلب حوضه‌های آبخیز کشور، شناخت مناطق سیل‌خیز اهمیت ویژه دارد. مدل‌های واسنجی‌شده بارش- رواناب هسته اصلی محاسبات فرایند تبدیل بارش به سیلاب را در سرشاخه‌ها و حوضه‌های میانی، در سیستم پیش‌بینی، تشکیل می‌دهند (Behzadian, 2010). به طور کلی، هدف از واسنجی حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده است. این کار ممکن است با مقایسه چشمی هیدروگراف‌ها یا به کمک روش‌های بهینه‌سازی با معیارهای نکویی برازش انجام گیرد. به طور کلی، عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی همواره با عدم قطعیت همراه است. این عدم

1. Shuffled Complex Evolution
2. Hydrologic Engineering Center's- Hydrologic Modeling System
3. Particle Swarm Optimization

* نویسنده مسئول: farid-h@um.ac.ir

صورت دست‌پایین تخمین زده شد، بررسی عملکرد نتایج واسنجی مدل با تابع NASH مقدار ۰/۸۶ را نتیجه داد. عدم کارایی مناسب مدل در نقاط پیک و از طرفی به دست‌آمدن حدود بالا و پایین پارامترها به منزله مقادیر بهینه نشان‌دهنده ضرورت جست‌وجوی راهکارهایی به منظور بهبود مدل است.

Kuok *et al.* (2010) به کمک الگوریتم PSO یک مدل بارش- رواناب شبکه عصبی را، که در حوضه رودخانه سانجای به کار گرفته شده، کالیبره کردند. مدل در سناریوهای مختلف تکرار شده و چندرخداده و تحت معیار عملکردهای متفاوت ارزیابی و نتایج بر رخدادهای مختلف واسنجی نشده صحت‌سنجی شد. واسنجی چندهدفه با در نظر گرفتن هم‌زمان دو یا سه تابع هدف صورت گرفت. نتایج نشان داد انتخاب دو تابع هدف مناسب برای واسنجی مسائل چندهدفه مناسب است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از مدل کامپیوتری HEC-HMS برای شبیه‌سازی بارش- رواناب استفاده شد. مدل هیدرولوژیکی HMS بر اساس شبیه‌سازی بارندگی- رواناب در حوضه‌ها با استفاده از قابلیت‌های گرافیکی بسیار قوی برای مطالعات آب‌رسانی، هیدرولوژی سیلاب‌ها، پیش‌بینی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌ها در مقابل توسعه شهری، کاهش خسارت سیلاب‌ها و ... قابل استفاده است (HEC-HMS User Manual, 2008). در این تحقیق از نسخه ۴ این نرم‌افزار استفاده شد.

منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز سد کارده، با ۵۴۳ کیلومتر مربع پهنا و شیب ۲/۶ درصد و طول آبراهه اصلی ۴۴/۲۴ کیلومتر، در شمال شرقی خراسان رضوی بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶°۴۴' و ۳۶°۵۸' شمالی و طول‌های ۴۵°۵۹' و ۴۵°۲۷' شرقی قرار دارد. رودخانه کارده، که مهم‌ترین و یگانه رودخانه دائمی این حوضه است، از ذوب برف در ارتفاعات کپه‌داغ هزارمسجد و نیز دو چشمه کارستی (خرکت و بزرگ)، واقع در شمال حوضه، سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از روستاهای خرکت در جنوب روستای مارشک به شاخه قره‌نو، که شمال غرب حوضه را زهکش می‌کند، می‌پیوندد و پس از عبور از روستاهای جنگ، پنج‌منه، آل و کارده در جنوب روستای کارده وارد سد کارده می‌شود. شکل ۱ موقعیت حوضه را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل آمار در حوضه سد کارده: تجزیه و تحلیل آمار جهت کنترل تطابق میزان و توزیع زمانی بارش با شکل و حجم هیدروگراف سیل انجام گرفت، که منجر به انتخاب سیلاب‌های درج شده در جدول ۱ شد.

کالیبره کردند. در این تحقیق مدل در دو بخش تک و چندهدفه بررسی شد. در بخش پایانی، بهینه‌سازی چندهدفه در شرایط معلوم بودن اولویت مدل‌ساز در هیدروگراف، به صورت ترکیبی از مدل بهینه‌سازی و الگوریتم PSO، تحلیل شد. نتایج نشان داد رویکرد چندهدفه‌فازی می‌تواند عملکردی مناسب در یافتن یک جواب مؤثر و کارآمد از مقادیر پارامترهای مدل داشته باشد.

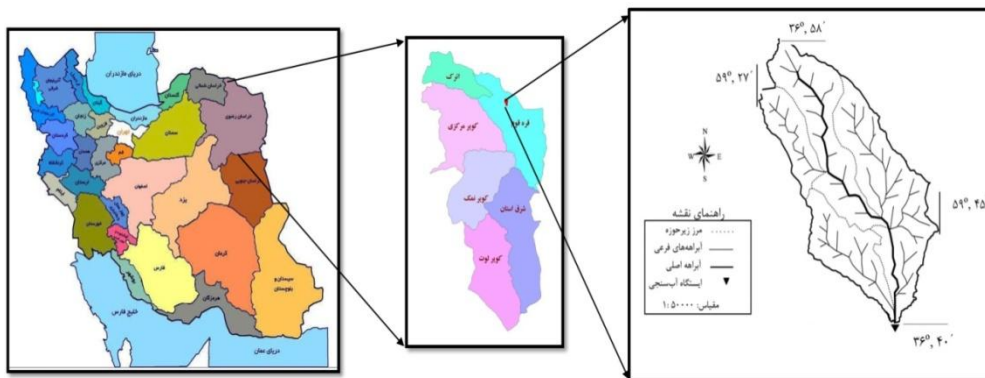
Ensanat (2012) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO به کالیبراسیون مدل بارش رواناب ARNO پرداخت. در این تحقیق، حوضه آبریز رودخانه کرج، در بالادست ساختمان سد امیرکبیر، با جدا کردن سهم برف از مجموع نزولات و اضافه کردن مجدد برف ذوب‌شده، مطالعه شد. در نهایت، مدل مفهومی بارش رواناب ARNO به کمک الگوریتم بهینه‌سازی PSO، به صورت خودکار، کالیبره شد و ضریب کارایی ناش- ساتکلیف در مرحله کالیبراسیون برای حوضه کوهستانی کرج برابر ۰/۸۱ به دست آمد.

Sorooshian *et al.* (1983) عواملی را بررسی کردند که سبب می‌شود یک مدل نتواند پارامترهای منحصربه‌فردی به دست آورد. دو تابع HMLE و SLS برای واسنجی در نظر گرفته شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد اثر متقابل پارامترهای مدل‌سازی بر یکدیگر مانع به دست‌آوردن مجموعه‌ای از پارامترهای منحصربه‌فرد برای مدل می‌شود.

Gupta *et al.* (1999) روش‌های واسنجی خودکار مدل هیدرولوژیکی را با واسنجی نیمه‌خودکار چندگامه^۱ مقایسه کردند. در این تحقیق از مدل SAC-SMA برای شبیه‌سازی و از الگوریتم SCE برای بهینه‌سازی استفاده شد. تابع هدف بهینه‌سازی استفاده شده در این تحقیق DRMS و HMLE^۲ بود. در حالت کلی، نتایج واسنجی نشان‌دهنده آن است که یک هیدرولوژیست می‌تواند از واسنجی خودکار به نحوی استفاده کند که تخمینی مناسب از پارامترها به دست آورد؛ به گونه‌ای که هم مطابق وقایع تاریخی باشد و هم بتواند به کمک مقادیر به دست‌آمده به مواردی بپردازد که در فرایند واسنجی به آن‌ها توجه نشده است.

Eckhardt *et al.* (2005) واسنجی را روی مدل SWAT-G انجام دادند. این مدل حوضه را به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌کند که هر یک تعدادی پارامتر واسنجی دارند. برای به دست‌آوردن مقادیر پارامترها از الگوریتم بهینه‌سازی SCE و تابع هدف RMSE استفاده شد. هرچند مقادیر دبی پیک به

1. Interactive Multilevel Calibration
2. Heterostastic Maximum Likelihood Error



شکل ۱. جانمایی حوضه آبریز سد کارده در نقشه ایران

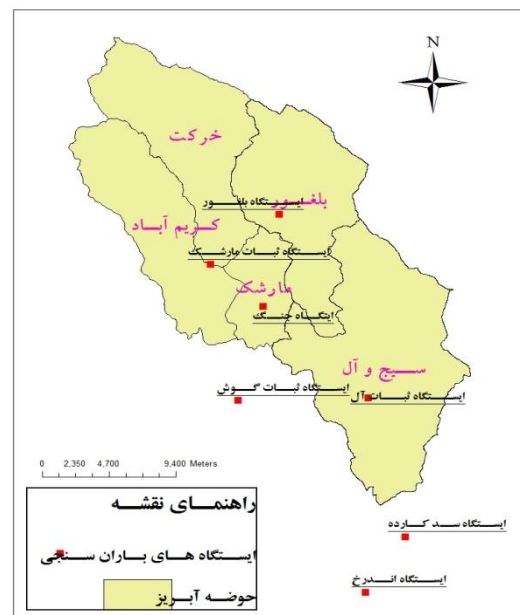
جدول ۱. مشخصات سیلاب‌های انتخابی

رخداد	تاریخ وقوع	دبی اوج (m^3/s)	تداوم (ساعت)	بارش (mm)
اول	۱۳۸۵/۰۴/۱۱	۲۸,۲	۲۴	۱۱,۲
دوم	۱۳۸۳/۰۵/۰۴	۵۲,۴	۲۴	۲۶,۷
سوم	۱۳۸۲/۰۲/۰۳	۱۵۰	۲۴	۴۳,۳
چهارم	۱۳۸۱/۰۴/۲۹	۸۸,۳۴	۲۴	۳۰,۵

استفاده شد. در روش توزیع زمانی رگبار نیز روش باران وزنی^۲ در مدل HEC-HMS به کار گرفته شد.

مدل شبیه‌سازی HEC-HMS

شبیه‌سازی و محاسبه هیدروگراف در حوضه نیازمند معرفی چهار مدل است. پس از رسم شماتیک توپولوژی و شبکه آبراهه‌ها در مدل حوضه، مدل محاسبه تلفات و دبی پایه و تبدیل بارش به رواناب و روندیابی تعیین شد. حوضه مورد نظر به پنج زیرحوضه اصلی تقسیم شد. هر زیرحوضه پارامترهایی داشت که باید واسنجی می‌شد. اطلاعات دینامیکی بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و ایستگاه‌های هیدرومتری در مؤلفه داده‌های سری زمانی حوضه وارد می‌شود و سپس در مدل هواشناسی به زیرحوضه‌های مربوطه تخصیص می‌یابد. در مؤلفه شاخص‌های کنترل محدوده زمانی شبیه‌سازی و گام زمانی تعیین می‌شود. اطلاعات ورودی در مدل حوضه با خصوصیات فیزیکی حوضه مرتبط است. پس از معرفی زیرحوضه، باید خصوصیات زیرحوضه، شامل مساحت زیرحوضه و روش تعیین تلفات و دبی پایه و تبدیل بارش به رواناب حوضه، تعیین شود. در این تحقیق، برای محاسبه نفوذ حوضه از روش شماره منحنی (CN)، برای تبدیل بارش به رواناب از روش هیدروگراف واحد کلارک، و برای روندیابی رودخانه از روش ماسکینگام استفاده شد. گفتنی است دبی پایه در این مدل در نظر گرفته نشد و



شکل ۲. ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در حوضه آبریز سد کارده

توزیع زمانی و مکانی بارش

پس از انتخاب سیلاب مورد نظر، داده‌های روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه در روز وقوع سیلاب استخراج شد. سپس، با استفاده از روش مربع فاصله معکوس^۱ در نرم‌افزار ARC-GIS، توزیع مکانی بارش برای هر زیرحوضه برآورد شد. با توجه به شکل ۲ و با وجود ایستگاه‌های باران‌سنج ثابت در حوضه (زیرحوضه‌های آل و مارشک) از آن‌ها جهت توزیع زمانی رگبار

2. Gage Weight

1. Inverse Distance Square Weighted

$$t_{lag} = \frac{L^{.18} \times S+1^{-.17}}{1900 \times y^{.15}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

مقدار نگه‌داشت سطحی (S) با توجه به مقدار عدد منحنی رواناب به دست می‌آید. پارامتر L همان طول رودخانه بر حسب فوت است که در تک‌تک زیرحوضه‌ها، با توجه به اطلاعات فیزیوگرافی، مشخص است. متوسط شیب حوضه (y) نیز در اطلاعات فیزیوگرافی حوضه می‌آید. زمان تأخیر (t_{lag}) حوضه بر حسب ساعت محاسبه می‌شود. رابطه بین زمان تأخیر و زمان تمرکز حوضه به کمک رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$t_c = 1167 \times t_{lag} \quad (\text{رابطه ۴})$$

تعیین ضریب ذخیره حوضه: رابطه ضریب ذخیره و زمان تمرکز حوضه بر اساس نسبت نشان‌داده‌شده در رابطه ۵ پیشنهاد می‌شود:

$$\frac{R}{R+t_c} = Cs \quad (\text{رابطه ۵})$$

R ضریب ذخیره است. عموماً عدد ثابت در این رابطه از ۰٫۶ تا ۰٫۲ تغییر می‌کند و مقدار آن در واسنجی ارزیابی می‌شود. در این تحقیق، به جای واسنجی ضریب ذخیره، ثابت فوق در رابطه ۵ به‌منزله پارامتر واسنجی در نظر گرفته شد (Timothy et al., 2000).

روندیابی سیل در رودخانه-روش ماسکینگام: با توجه به آماده‌نبودن مقاطع عرضی رودخانه هنگام مطالعات سیل‌خیزی، روش ماسکینگام انتخاب شد. در این روش از یک تقریب ساده تفاضل محدود از معادله پیوستگی استفاده می‌شود. روابط نهایی در رابطه ۶ نشان داده می‌شود (Chow et al., 1988):

$$Q_t = C_1 / t + C_2 / t - 1 + C_3 Q t - 1$$

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t}$$

این مدل مؤلفه‌های هیدروگراف خروجی را با داشتن مؤلفه‌های هیدروگراف ورودی، شرایط اولیه ($Q(t=0)$) و پارامترهای X و K محاسبه می‌کند. با توجه به اینکه K تقریبی از زمان تمرکز است، می‌توان در محاسبه آن از رابطه ۷ استفاده کرد:

$$Musk_k = \frac{L}{V_{Wave}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

سیلاب‌های مورد نظر بدون در نظر گرفتن دبی پایه شبیه‌سازی شد. اصولاً در رخدادهای حدی حداکثر (سیلاب) مؤلفه دبی پایه اهمیت کمتری دارد.

مدل تلفات-روش شماره منحنی (CN): با توجه به رابطه ۱، بین گیرش اولیه (I_a) و نگهداشت سطحی (S) رابطه‌ای تجربی برقرار است که در آن α ضریب تلفات حوضه است و معمولاً بین ۰٫۱۵ و ۰٫۲۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$I_a = \alpha \times S \quad (\text{رابطه ۱})$$

مدل شماره منحنی از مدل‌های مشهور در محاسبه تلفات است. هدف این مدل ارائه روشی است که با داشتن خصوصیات خاک حوضه و انتخاب بارش طرح میزان بارش مازاد قابل محاسبه باشد. این روش بیان می‌کند در هر رخداد بارش، عمق بارش مازاد و به عبارت دیگر رواناب همواره مساوی یا کمتر از عمق بارش است. رابطه ۲ عدد منحنی رواناب (CN) و نگه‌داشت سطحی خاک (بر حسب اینچ) (S) را نشان می‌دهد.

$$CN = \frac{1000}{S+10} \quad (\text{رابطه ۲})$$

تبدیل بارش به رواناب-روش هیدروگراف واحد کلارک: کلارک هیدروگراف واحد یک حوضه آبخیز را به صورت صریح با دو فرایند اصلی انتقال یا حرکت بارش اضافی از نقطه اصلی تا نقطه خروجی حوضه آبخیز و میرایی یا کاهش مقدار دبی را به منزله ذخیره مازاد در سراسر حوضه آبخیز معرفی می‌کند. در مدل کلارک، مخزن خطی تأثیر تجمعی کل ذخیره حوضه را نشان می‌دهد. بنابراین، می‌تواند در خروجی حوضه آبخیز متمرکز شود. در استفاده از این مدل در HEC-HMS معرفی پارامتر زمان تمرکز (t_c) ضرورت دارد. این پارامتر از طریق واسنجی برآورد می‌شود و با استفاده از هیدروگراف واحد یا SCS تخمین زده می‌شود. ضریب ذخیره حوضه شاخص ذخیره زمانی بارش مازاد است که در حوضه آبخیز زهکشی می‌شود. همچنین، اگر داده‌های بارش و رواناب موجود باشد، از طریق واسنجی نیز برآورد می‌شود. ضریب ذخیره دارای بعد زمان است و فقط از حیث فیزیکی معنای کیفی دارد. کلارک در سال ۱۹۴۵ نشان داد ضریب ذخیره می‌تواند از تقسیم مقدار جریان در نقطه عطف شاخه فروکش هیدروگراف بر زمان همان جریان محاسبه شود. پس، دو پارامتر زمان تمرکز و ضریب ذخیره حوضه باید تعیین شوند (Chow et al., 1988).

محاسبه زمان تمرکز: در این تحقیق برای محاسبه زمان تمرکز حوضه از روش پیشنهادی سازمان حفاظت امریکا (SCS) (Chow et al., 1988) استفاده شد. اساس این روش به‌کارگیری رابطه ۳ است:

نمایانگر بهترین موقعیت برای ذرهⁱ و $Gbest_j$ نمایانگر بهترین ذره میان کل ذرات جمعیت تا تکرار t است. اندیس z بعد بردار مورد نظر را نشان می‌دهد. رابطه‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند بهینه‌سازی در این الگوریتم با در نظر گرفتن اثر موقعیت فعلی ذره (عبارت اول رابطه ۸)، فاصله ذره از بهترین نقطه‌ای که در همسایگی آن است (عبارت دوم رابطه ۸)، و فاصله ذره از بهترین نقطه‌ای که توسط همه ذرات به دست آمده است (عبارت سوم رابطه ۸) صورت می‌گیرد. تعداد ذرات اولیه الگوریتم، ۲۰ و حداکثر تعداد تکرار الگوریتم، ۲۰۰ در نظر گرفته شد. یکی از ضعف‌های این الگوریتم هم‌گرایی زودرس آن به جواب‌های بهینه موضعی است. به منظور بهبود عملکرد الگوریتم و رفع این مشکل از دو تکنیک ایجاد آشفتگی در PSO^۵ (Baltar and Fontane, 2008) و جهش نخبه^۶ (Gupta et al., 1999) بهره گرفته شد. اگرچه استفاده از این دو روش هیچ تضمینی برای به دست آوردن جواب بهینه سراسری نیست، با توجه به هدایت ذرات به بخش‌های مختلف فضای جست‌وجوی مسئله، گاه می‌تواند در فرار از بهینه محلی مؤثر واقع شود.

انتخاب تابع هدف: یکی از مراحل مهم واسنجی انتخاب تابع هدف مناسب است. تابع هدف مناسب تابعی است که بتواند تا حد امکان هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی را به هم نزدیک کند.

تابع ریشه میانگین مربعات خطا^۷: در رابطه ۱۰، W_e ضریب وزنی هر یک از نقاط را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نقاط پیک اهمیت بیشتری دارند، در این تحقیق این ضریب برای نقاط پیک مقادیر بزرگ‌تری در نظر گرفته شد و مقدار آن‌ها با روش سعی و خطا تنظیم شد:

$$\frac{\sum_{i=1}^n W_e^i * Q_{obs} - Q_{sim}^2}{\sum_{i=1}^n W_e^i} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

تعیین حدود بالا و پایین پارامترها در حوضه: به طور کلی، هر زیرحوضه ۳ پارامتر واسنجی دارد؛ شامل عدد منحنی رواناب (CN)، ضریب گیرش اولیه (S)، و عدد ثابت فاکتور ذخیره (C_s). رودخانه یا کانال اصلی در فاصله زیرحوضه‌ها در نظر گرفته شد که در هر پارامتر ماسکینگ باید طراحی شود. این مقادیر در جدول ۲ می‌آید.

V_{Wave} سرعت موج و L طول بلندترین آبراهه یا مسیر جریان است که هنگام محاسبه ضریب ماسکینگ معرف طول رودخانه خواهد بود. سرعت موج با توجه به شبیه‌سازی حوضه می‌تواند به کمک نرم‌افزار HEC-RAS برآورد شود.

پارامتر ضریب ماسکینگ X : ضریب ماسکینگ X بدون بعد است و درجه اهمیت I و O دبی ورودی و خروجی را در تعیین ظرفیت ذخیره رودخانه نشان می‌دهد. مقدار آن حداقل ۰ و حداکثر ۰/۵ است و به طور متوسط بین ۰/۲ تا ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود (Alizadeh, 2008).

مدل بهینه‌سازی PSO

الگوریتم اشاره شده در این تحقیق PSO است که یک الگوریتم جست‌وجوی اجتماعی است و از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان و ماهی‌های در حال حرکت در محیط مدل شده است. این الگوریتم ابتدا به منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز هم‌زمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آن‌ها و تغییر شکل بهینه دسته پرندگان به کار رفت. اساس کار با این الگوریتم به این صورت است که ابتدا یک سری ذرات فرض می‌شوند. هر ذره یک بردار موقعیت و یک بردار سرعت دارد که با توجه به سرعتشان تمایل به حرکت به نقاط بهینه دارند. مکان بهینه نشان‌دهنده نقطه بهینه است. در این روش، برای هر ذره یک بردار موقعیت P_{ij} و یک بردار سرعت V_{ij} در نظر گرفته می‌شود. اگر بعد مسئله بهینه‌سازی n فرض شود، این دو بردار در هر تکرار به کمک رابطه‌های ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند (Yapo et al., 1996):

$$V_{ij}^t = W \times V_{ij}^{t-1} + C_1 \times rand_1 \times Pbest_{ij} - P_{ij}^{t-1} + C_2 \times rand_2 \times Gbest_j - P_{ij}^{t-1} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$P_{ij}^t = P_{ij}^{t-1} + V_{ij}^t \quad (\text{رابطه ۹})$$

W ضریب وزن اینرسی^۱ و C_1 و C_2 ضرایب یادگیری (شتاب)^۲ است. C_1 را پارامتر شناختی^۳ و C_2 را پارامتر اجتماعی^۴ می‌نامند. در این تحقیق مقادیر پارامترهای شناختی و اجتماعی به شکل دینامیک و با تابع خطی از حدود بالای خود در اولین تکرار به حدود پایین در آخرین تکرار تغییر می‌کند. $Pbest_{ij}$

1. Inertia Weight
2. Acceleration Coefficients
3. Cognitive
4. Social

5. Turbulent Particle Swarm Optimization (TPSO)
6. Elitist mutation
7. Root Mean Square Error

یافته‌ها و بحث

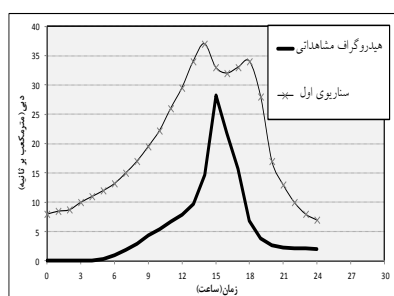
مدل به صورت سه‌رخداده، به این معنا که سه رخداد به صورت هم‌زمان واسنجی می‌شوند، و طی فرایند واسنجی بیست پارامتر مربوط واسنجی شد و تابع هدف RMSE، تابع هدف ارزیابی در نظر گرفته شد و از جمع سه رخداد به دست آمد. پنج سناریوی مختلف برای اجرای مدل تعریف شد. همه سناریوها و مشخصات هر یک، شامل پارامترهای واسنجی، در جدول ۳ به صورت خلاصه می‌آید.

جدول ۲. حدود بالا و پایین پارامترهای واسنجی

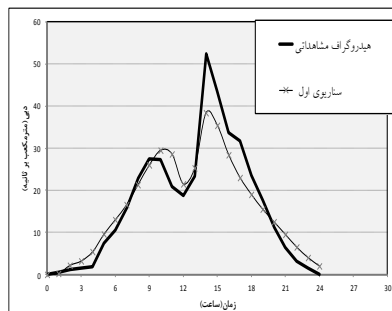
پارامتر	موقعیت	حد پایین	حد بالا
زیرحوضه ۱	۱	۷۰	۹۰
زیرحوضه ۲	۲	۵۸	۸۲
عدد منحنی رواناب (CN)	۳	۶۲	۸۴
زیرحوضه ۴	۴	۷۱	۹۳
زیرحوضه ۵	۵	۶۰	۸۵
ضریب تلفات حوضه (α)	پنج زیرحوضه	۰٫۱۵	۰٫۲۵
عدد ثابت ضریب ذخیره (C_s)	پنج زیرحوضه	۰٫۲	۰٫۶
ماسکینگام (X)	پنج بازه	۰٫۲	۰٫۵

جدول ۳. خلاصه مشخصات و ویژگی‌های سناریوهای بررسی شده در رویکرد سه‌رخداده

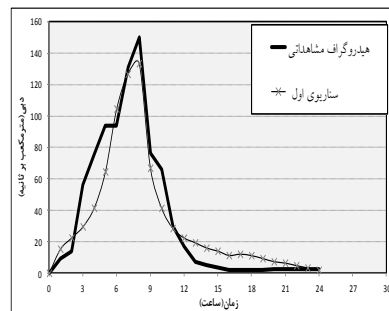
سناریو	تعداد پارامترهای واسنجی	ویژگی رخداد
سناریوی ۱	۲۰؛ شامل پنج پارامتر عدد منحنی رواناب، پنج پارامتر ضریب گیرش اولیه، پنج پارامتر ضریب ذخیره، پنج پارامتر ماسکینگام	واسنجی هم‌زمان رخدادهای ۱ و ۲ و ۳، در نظر گرفتن ضریب اهمیت یکسان برای همه رخدادها
سناریوی ۲	۲۰؛ شامل پنج پارامتر عدد منحنی رواناب، پنج پارامتر ضریب گیرش اولیه، پنج پارامتر ضریب ذخیره، پنج پارامتر ماسکینگام	واسنجی هم‌زمان رخدادهای ۱ و ۲ و ۳، اختصاص ضریب بزرگ‌تر در رخداد ۱ و ضریب یکسان و کمتر در رخداد ۲ و ۳
سناریوی ۳	۲۵؛ شامل پنج پارامتر عدد منحنی رواناب، ده پارامتر ضریب گیرش اولیه، شامل پنج پارامتر در رخداد ۱ و پنج پارامتر در رخداد ۲ و ۳، پنج پارامتر ضریب ذخیره، پنج پارامتر ماسکینگام	واسنجی هم‌زمان رخدادهای ۱ و ۲ و ۳، در نظر گرفتن ضریب اهمیت یکسان برای همه رخدادها، در نظر گرفتن ضریب گیرش اولیه متفاوت برای رخداد ۱
سناریوی ۴	۲۵؛ شامل پنج پارامتر عدد منحنی رواناب، ده پارامتر ضریب گیرش اولیه، شامل پنج پارامتر در رخداد ۱ و پنج پارامتر در رخداد ۲ و ۳، پنج پارامتر ضریب ذخیره، پنج پارامتر ماسکینگام	واسنجی هم‌زمان رخدادهای ۱ و ۲ و ۳، در نظر گرفتن ضریب اهمیت یکسان برای همه رخدادها، در نظر گرفتن ضریب گیرش اولیه متفاوت برای رخداد ۱ افزایش حد بالای ضریب گیرش اولیه در رخداد ۱ از ۰٫۲۵ به ۰٫۴۵
سناریوی ۵	۲۵؛ شامل پنج پارامتر عدد منحنی رواناب، ده پارامتر ضریب گیرش اولیه، شامل پنج پارامتر در رخداد ۱ و پنج پارامتر در رخداد ۲ و ۳، پنج پارامتر ضریب ذخیره، پنج پارامتر ماسکینگام	واسنجی هم‌زمان رخدادهای ۱ و ۲ و ۳، در نظر گرفتن ضریب اهمیت یکسان برای همه رخدادها، در نظر گرفتن ضریب گیرش اولیه متفاوت برای رخداد ۱، کاهش حد پایین ضریب گیرش اولیه در رخداد ۳ از ۰٫۲۵ به ۰٫۰۵



رخداد ۱



رخداد ۲

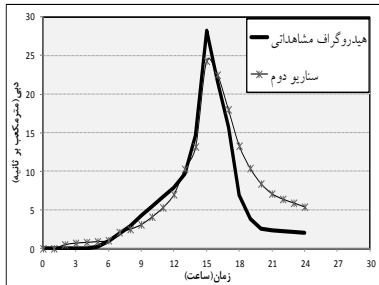


رخداد ۳

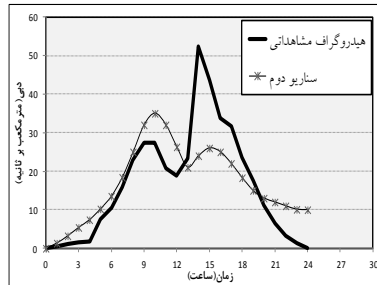
شکل ۳. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی واسنجی هم‌زمان سه رخداد- سناریوی ۱

می‌شود، در این سناریو رخداد ۱ عملکرد مناسبی ندارد و رخدادهای ۲ و ۳ تا حد مناسب به‌خوبی واسنجی شده‌اند.

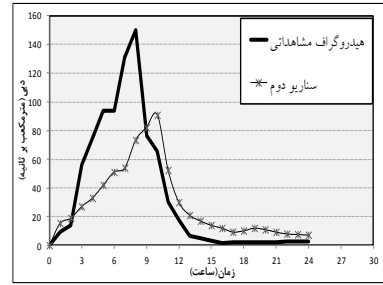
در همه نمودارهای این تحقیق خطوط بدون علامت نشان‌دهنده هیدروگراف مشاهداتی و خطوط دارای علامت هیدروگراف محاسباتی است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده



رخداد ۱



رخداد ۲



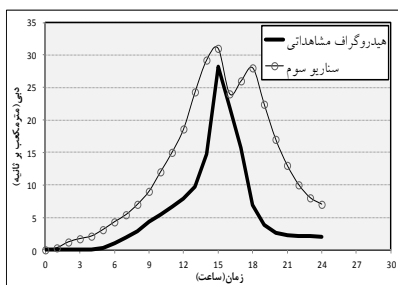
رخداد ۳

شکل ۴. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی واسنجی هم‌زمان سه رخداد- سناریوی ۲

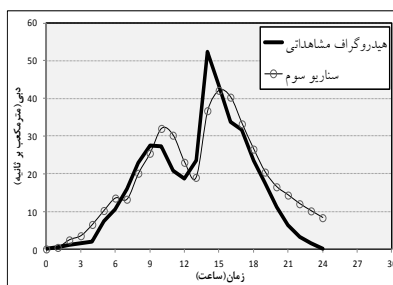
نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، تعداد پارامترهای مدل واسنجی یا درجه آزادی مدل در تطبیق با هر یک از رخدادهای افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، این سناریو، اگرچه باعث بهبود نتایج واسنجی رخدادهای شد، رخداد ۱ چندان بهبود نیافت. اختلاف دبی پیک رخداد ۱ تا حدی کاهش پیدا کرد، ولی همچنان به صورت دوپیکه و بیشتر از مقدار دبی مشاهداتی آن بود. بنابراین، به منظور بهبود فرایند واسنجی، فضای جست‌وجوی پارامترهایی را که بر مقدار دبی نقاط پیک هیدروگراف تأثیر می‌گذارند تغییر می‌دهیم. بدین ترتیب، در سناریوی ۴، به منظور کاهش دبی نقاط پیک رخداد ۱، حد بالای گیرش اولیه افزایش می‌یابد.

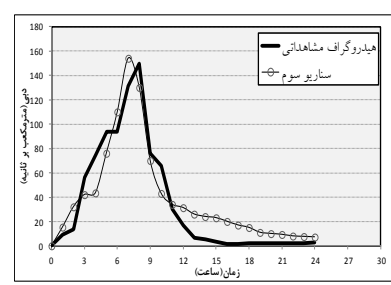
نتایج سناریوی ۱ نشان داد واسنجی هم‌زمان رخداد ۱ چندان مناسب نیست. از این رو، در این قسمت سناریوی دیگری، به نام سناریوی ۲، که در آن ضریب بیشتری برای رخداد ۱ در نظر گرفته شده، بررسی شد. نتایج هیدروگراف‌های شکل ۴ نشان داد رخدادهای ۲ و ۳ به صورت هم‌زمان به‌خوبی واسنجی نمی‌شوند که دلیل آن وابستگی زیاد پارامترها به شرایط اولیه است و اینکه با گذشت زمان در یک حوضه تغییر می‌کنند. یکی از این پارامترها گیرش اولیه حوضه است که به رطوبت حوضه بستگی دارد و با تغییر شرایط رطوبتی حوضه تغییر می‌کند. این پارامتر بر مقدار دبی در نقاط پیک هیدروگراف تأثیری چشمگیر می‌گذارد. بنابراین، در سناریوی ۳ مقدار ضریب گیرش اولیه رخدادهای ۱ و ۳ به صورت مجزا در



رخداد ۱

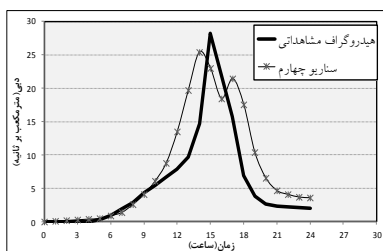


رخداد ۲

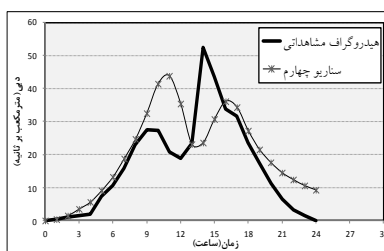


رخداد ۳

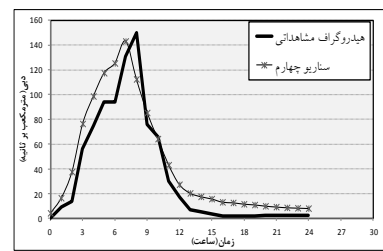
شکل ۵. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی واسنجی هم‌زمان سه رخداد- سناریوی ۳



رخداد ۱



رخداد ۲

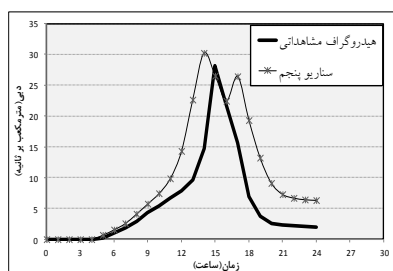


رخداد ۳

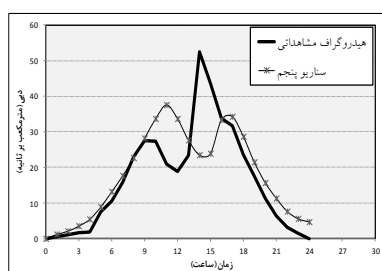
شکل ۶. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی واسنجی هم‌زمان سه رخداد- سناریوی ۴

نقاط پیک رخداد ۱ به شکلی بسیار بهتر واسنجی شد؛ هرچند هیدروگراف آن به صورت دوپیکه مشاهده می‌شود. هیدروگراف به‌دست‌آمده رخداد‌های ۲ و ۳ حاکی از بهبود عملکرد مدل در سناریوی ۴ است.

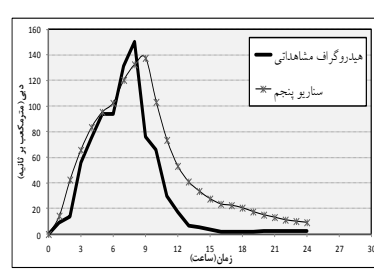
همان‌طور که گفته شد، برای کاهش مقدار دبی پیک رخداد ۱ حد بالای پارامتر گیرش اولیه از ۰/۲۵ به ۰/۴۵ افزایش داده شد. این فرایند باعث شد مدل قابلیت کاهش دبی را در نقاط پیک داشته باشد. نتایج در شکل ۶ می‌آید و نشان می‌دهد حدود جدید پارامترها به واسنجی بهتر هر سه رخداد می‌انجامد.



رخداد ۱



رخداد ۲



رخداد ۳

شکل ۷. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی واسنجی هم‌زمان سه رخداد- سناریوی ۵

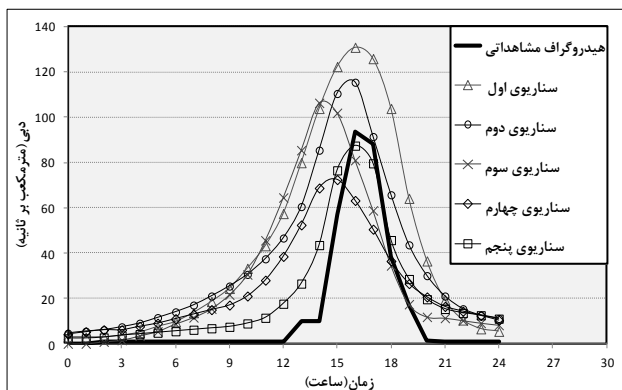
پیشنهادی در پیدا کردن مقادیر مجموعه پارامترهای حوضه در این تحقیق است.

صحت‌سنجی مدل

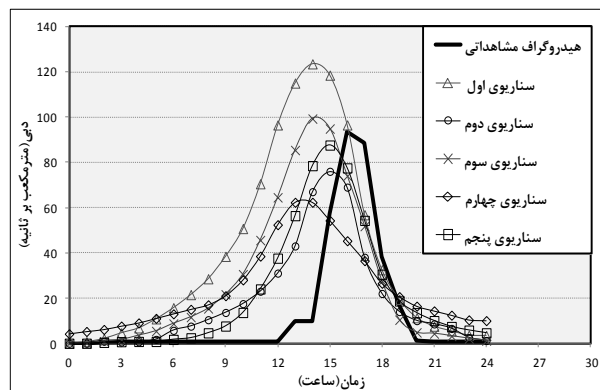
نتایج واسنجی رویکرد سه‌رخداده نشان داد مدل نتوانسته است یک دسته پارامتر منحصر به فرد را نتیجه دهد. از طرفی، نمی‌توان صرفاً بر اساس نتایج واسنجی درباره پارامترهای حوضه اظهار نظر کرد و صرفاً مدلی را که نتایج مناسب‌تر در واسنجی دارد انتخاب کرد؛ زیرا نتایج واسنجی باید صحت‌سنجی شود. در این قسمت، نتایج واسنجی بر داده‌های تست (رخداد ۴) ارزیابی می‌شود. نتایج واسنجی سناریوهای ۳ و ۴ و ۵ دو دسته پارامتر با گیرش‌های اولیه متفاوت را نتیجه داد. در شکل ۸ رخداد ۴ با مقادیر گیرش اولیه رخداد ۱ صحت‌سنجی می‌شود (دسته اول) و در شکل ۹ مقادیر گیرش اولیه رخداد ۲ و ۳ (دسته دوم) مبنای صحت‌سنجی قرار می‌گیرد.

در سناریوی ۵، به جای اینکه حد بالای پارامتر گیرش اولیه در رخداد ۱ افزایش داده شود، مقدار آن در همه رخدادها ۰/۲۵ در نظر گرفته شد؛ ولی به منظور افزایش مقدار دبی پیک در رخداد ۳ حد پایین پارامتر گیرش اولیه در رخداد ۳ از ۰/۱۵ به ۰/۰۵ کاهش یافت. نتایج این سناریو در شکل ۷ حاکی از عملکرد مناسب مدل در سناریوی ۵ است.

در صورتی که جواب‌های اولیه به صورت تصادفی و بدون دراختیار داشتن مقدار اولیه در نظر گرفته شود، به‌دست‌آوردن هیدروگراف مناسب مستلزم زمان بسیار طولانی است. این موضوع دلیل کارایی الگوریتم بهینه‌سازی PSO در یافتن هر چه سریع‌تر جواب‌های بهینه است. واسنجی سناریوهای بررسی شده، با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار HEC-HMS، بسیار پیچیده و تا حدی غیر ممکن است. این مسئله از مزایای مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز PSO-HMS و اهمیت واسنجی خودکار با رویکرد



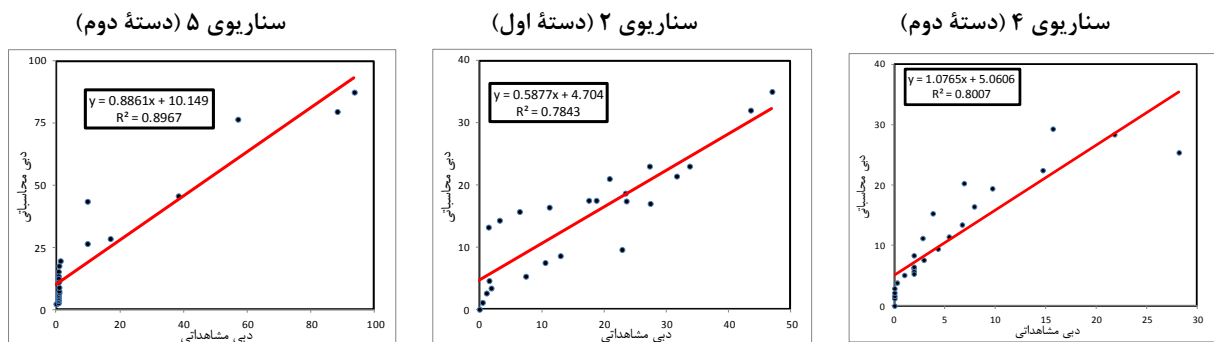
شکل ۸. نتایج صحت‌سنجی رخداد‌های واسنجی دسته اول بر رخداد تست (رخداد ۴)



شکل ۹. نتایج صحت‌سنجی رخداد‌های واسنجی دسته دوم بر رخداد تست (رخداد ۴)

منحصربه‌فرد به دست آورد. نتایج این قسمت با نتایج Kamali and Mousavi (2010) از لحاظ عدم یافتن پارامترهای منحصربه‌فرد برای هر حوضه تطابق بسیار داشت. همچنین، با توجه به نتایج Ensaniat (2012)، تحقیق حاضر نشان داد الگوریتم PSO توانایی خوبی در مرحله واسنجی مدل دارد؛ ولی در بخش صحت‌سنجی نتایج با عملکرد ضعیف‌تری ظاهر می‌شوند.

از بین دسته جواب باقی‌مانده آن دسته جواب‌هایی که مقدار تابع هدف آن‌ها بسیار بالا (بالای ۳۰) بود و عملکرد ضعیف‌تری داشتند حذف شدند. با حذف این دسته جواب‌ها، سه دسته پارامتر (سناریوی ۴ (دسته دوم)، سناریوی ۲ (دسته اول)، سناریوی ۵ (دسته دوم)) پارامترهای نهایی حوضه معرفی می‌شوند. عدم حصول یک مجموعه پارامتر منحصربه‌فرد با عملکرد تقریباً یکسان در رخدادهای صحت‌سنجی بیانگر این واقعیت است که در یک مدل هیدرولوژیکی نمی‌توان یک دسته پارامتر



شکل ۱۰. نمودار پراکنش دبی‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی در صحت‌سنجی

مقدار گیرش اولیه زیرحوضه‌ها، توجه شد. این موضوع، ضمن بهبود چشمگیر نتایج در مرحله صحت‌سنجی، سبب شد بتوان برخی از مجموعه پارامترهای کاندید را، که بر اساس محدوده پارامترهای گیرش اولیه واسنجی شدند ولی به لحاظ فیزیکی کاملاً نپذیرفتنی بودند، حذف کرد. از طرف دیگر، یکی از ویژگی‌های بارز مدل‌های هیدرولوژیکی هم‌پایایی^۱ است؛ بدین معنا که حتی در صورت به‌کاربردن یک تابع هدف می‌توان دسته پارامترهایی پیدا کرد که اگرچه مقادیر آن‌ها با یکدیگر تفاوت زیادی دارند هر یک از آن‌ها با مقادیر تقریباً یکسان برای تابع هدف می‌توانند جواب‌هایی پذیرفتنی، با عملکرد تقریباً مشابه، در نظر گرفته شوند. همچنین، باید خاطرنشان کرد افزایش پیچیدگی مدل لزوماً سبب بهبود عملکرد مدل نمی‌شود؛ برعکس، عملکرد بهتر مدل با استفاده مناسب از اطلاعات و هیدروگراف‌های موجود، با تعداد پارامترهای مناسب و نه لزوماً با تعداد پارامترهای بیشتر، حاصل می‌شود. این روش، با توجه به مشکل غیرمنفردبودن مجموعه جواب‌های مسئله واسنجی، به منزله مسئله‌ای معکوس، می‌تواند در محدودکردن تعداد جواب‌های کاندید موثر باشد. بنابراین، در نهایت، نبود تابع منحصربه‌فرد برای در نظر گرفتن همه خصوصیات هیدروگراف از یک طرف و لزوم مشخص‌بودن اولویت‌های مدل‌ساز در فرایند

همان‌طور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، همبستگی خوبی بین داده‌های دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی رخدادهای منتخب برقرار است؛ هرچند شیب خط رگرسیون اندکی کمتر از شیب خط نیم‌ساز (خط نقطه‌چین) است. این بدان معناست که هیدروگراف پیشنهادی مدل، در مجموع، دبی را اندکی کمتر از دبی مشاهداتی برآورد می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهد سناریوی ۵ نسبت به دیگر سناریوها در دبی پیک عملکردی به‌مراتب بهتر در تطبیق با رخداد ۴ دارد؛ هرچند هیدروگراف با اختلاف زمانی در نقاط پیک مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

انطباق بالای دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی، به‌خصوص در زمینه روند دو هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی، آن‌گونه که در هیدروگراف‌های دوره واسنجی مشاهده می‌شود، علاوه بر نمایش عملکرد مناسب مدل، می‌تواند حاکی از موفقیت الگوریتم PSO در بهینه‌سازی تابع هدف و واسنجی مدل باشد. سناریوهای بررسی‌شده در واسنجی باعث شد مجموعه پارامترهای مختلفی برای حوضه به دست آید. مجموعه پارامترهای به‌دست‌آمده بر رخداد ۴ صحت‌سنجی شد؛ که در آغاز قادر به بازسازی حتی نسبی هیدروگراف‌های سیلاب رخداد ۴ نبودند. ولی، به دلیل رخداد پایه بودن مدل، به مفهوم واسنجی مجدد پارامترهای گیرش اولیه، با ضرب مقدار ثابت بر

1. Equifinality

این تحقیق مشهود بود که ضرورت استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل عدم قطعیت پارامترها را بیشتر توجیه می‌کند.

واسنجی باعث می‌شود نتوان در یک مدل هیدرولوژیکی مجموعه پارامترهای منحصر به فرد ارائه کرد. خصوصیت هم‌پایایی به مثابه یکی از ویژگی‌ها و مشکلات واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی در

REFERENCES

- Alizadeh, A. (2008). Principles of Applied Hydrology. Imam Reza University, Mashhad.
- Baltar, A. M. and Fontane D. G. (2008). Use of multi objective particle Swarm Optimization in water resource management. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 21, 257-265.
- Behzadian, K. (2010). *Developing methods for designing optimal biopsy samples for calibration water distribution networks using multi criteria decision*. Ph. D. dissertation, Amirkabir University, Tehran.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology, McGraw, Inc, New York, USA.
- Eckhardt, K., Fohrer, N., and Frede, H. G. (2005). Automatic model calibration. *Wiley Inter Science*. 12, 651-658.
- Ensaniat, N. (2012). *Daily runoff simulation using the PSO algorithm in catchment model optimization*. M.sc. Thesis. Azad University. Tehran.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., and Yapo, P. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models comparison with multi-Level expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*. 250, 135-143.
- HEC-HMS User Manual. (2008). Retrieved January 12, from <http://www.hec.usace.army.mil/software/hechhms>.
- Kamali, B. and Mousavi, J. (2010). Automatic Calibration of Hydrologic Event-Based Model Using PSO Meta-Heuristic Algorithm. Fifth National Congress on Civil Engineering. (In Farsi)
- Kuok, K., Harun, S., and Shamsuddin, S. (2010). Particle swarm optimization feedforward neural network for modeling runoff. *Int. J. Environ. Sci. Tech*. 7 (1), 67-78.
- Qaderi, K, Samani, J, and Eslami, H. (2006). Auto Calibration of a Rainfall-Runoff Model Based on SCE Method. *Iran-Water Resources Research*. 2(2), 39-52. (In Farsi)
- QodsiPour, A. (2009). *Analytic Hierarchy Process*. Amirkabir University. Tehran.
- Sorooshian, S., Gupta V. H., and Fulton, J. L. (1983). Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models' influence of calibration data variability and length on model credibility. *Water Resource Research*. 19, 251-259.
- Timothy, D. S., Charles, S. M., and Kyle, E. K. (2000). Equations for Estimating Clark Unit Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. *Water-Resources Investigations Report*. 62: 18p.
- Yapo, P., Gupta, H. V., and Sorooshian, S. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models; Sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology*. 181, 23-48.