

کالیبراسیون خودکار مدل هیدرولوژیکی رخدادهای با استفاده از الگوریتم فراکاوشی PSO

بهاره کمالی^{۱*}؛ سید جمشید موسوی^۲

چکیده

مدل هیدرولوژیکی مفهومی HEC-HMS شامل کتابخانه‌ای از انواع روش‌های شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی کاربرد وسیعی را در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در سطح مطالعات کاربردی داشته است. در این مقاله کالیبراسیون خودکار مدل گفته شده با استفاده از الگوریتم فراکاوشی PSO بر روی مدل حوضه تمر از زیرحوضه‌های حوضه گرگانود در استان گلستان، مورد توجه قرار گرفته است. این امر از طریق کدنویسی الگوریتم بهینه‌سازی در نرم‌افزار مطلب، فراخوانی و اجرای HEC-HMS در این محیط با استفاده از محیط حدواسط DOS میسر شده است. کالیبراسیون مدل ابتدا در سناریوهای تک‌رخداده انجام شد که منجر نیل به دسته پارامترهای مختلف گردید. برای ارزیابی توانایی الگوریتم PSO در نیل به جواب‌های مطلوب، نتایج رویکرد کالیبراسیون تک‌رخداده با نتایج کالیبراسیون شبه‌خودکار مبتنی بر الگوریتم جستجوی محلی نلدرومید موجود در HMS مقایسه شد که نشان‌دهنده کارایی الگوریتم PSO در اتصال به مدل هیدرولوژیکی است. در ادامه کالیبراسیون مدل در سناریوهای چندرخداده بررسی شد. دسته پارامترهای حاصل از رویکردهای تک و چندرخداده در رخدادهای سنجی ارزیابی و با استفاده از مفهوم بازکالیبراسیون پارامترهای شرایط اولیه حوضه، فرآیند غربالگری دسته پارامترهای رقیب انجام پذیرفت. این روش با توجه به مشکل غیرمنفرد بودن مجموعه جواب‌های مساله کالیبراسیون به عنوان یک مساله معکوس می‌تواند در محدود نمودن تعداد جواب‌های کاندید موثر باشد.

کلمات کلیدی

مدل هیدرولوژیکی رخدادهای، مدل بارش رواناب HEC-HMS، الگوریتم PSO، باز کالیبراسیون

Automatic Calibration of Hydrologic Event-Based Model Using PSO Meta-Heuristic Algorithm

B. Kamali and S. J. Mousavi

ABSTRACT

The conceptual hydrologic HEC-HMS model that includes a library of different event-based models for simulating rainfall-runoff process has been gained a significant attention in different applications. Automatic calibration of HMS model has been considered in this study using particle swarm optimization (PSO) algorithm and its application has been assessed in modeling Tamar basin in North of IRAN. The PSO algorithm has been coded in MATLAB where the HMS model is called and run from through transferring to DOS applications. Firstly, Model calibration is performed in single event scenarios and the results were compared with Nelder and Mead local search algorithm method built in HMS model. The results revealed the outperformance of the proposed PSO-HMS model. Since no unique parameter set was obtained in single event scenarios, the model was employed to calibrate three calibration events jointly.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۱۱/۴

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۷/۹

^{۱*} نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده عمران و محیط زیست، kamalicivil@aut.ac.ir

دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده عمران و محیط زیست، jmousavi@aut.ac.ir

Then all candidate parameter sets obtained from single and jointly-event calibration scenarios were tested in verification stage in which parameters of initial abstraction coefficients were recalibrated. The procedure resulted in choosing more suitable parameter sets to be screened out, although no unique parameter set can be obtained.

KEYWORDS

Event-based hydrologic model, HEC-HMS rainfall-runoff model, Particle Swarm Optimization, recalibration

عواملی را که باعث می‌شوند نتوان برای یک مدل یک دسته پارامترهای منحصر به فرد به دست آورد، مورد بررسی قرار دادند [۱۶] و [۶]. ادراکارد و آرنولد در سال ۲۰۰۱ و میوتلا در سال ۲۰۰۵ کالیبراسیون خودکار مدل‌های توزیعی را بررسی نموده و روش‌هایی برای کاهش تعداد پارامترهای کالیبراسیون این مدل‌ها ارائه نمودند [۵] و [۱۲].

مطالعات بسیار زیادی در زمینه چالش‌های مختلف مطرح در مساله کالیبراسیون مدل‌های هیدرولوژیکی اعم از نقش عدم قطعیت‌های حاکم بر شکل رویه پاسخ مدل و نقش تابع هدف، ساختار مدل و روابط آن، غیرمنحصربه فرد بودن جواب و خصوصیات الگوریتم جستجو یا موتور بهینه‌ساز انجام شده است که مرور تمامی آنها خارج از دامنه تحقیق حاضر است. اغلب کارهای انجام شده در رابطه با مدل‌های پیوسته است که البته بیشتر مباحث و روش‌های مطرح شده در مدل‌های رخداده‌پایه نیز موضوعیت دارد. در کالیبراسیون خودکار مدل‌های رخداده‌پایه نیز می‌توان به نمونه‌هایی از قبیل کار موسی و همکاران در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد [۱۱].

در این تحقیق کالیبراسیون خودکار مدل مفهومی بارش-رواناب^۲ HEC-HMS در حوضه تمر از زیرحوضه‌های حوضه گرگانرود مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا فرایند جستجو و گزینش پارامترهای مدل حوضه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی^۲ PSO به عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی انجام شده است. سناریوهای مختلفی با در نظر گرفتن درجات آزادی مختلف برای مدل ارائه شده است و نتایج آن بر روی رخداده‌های صحت‌سنجی ارزیابی شده است. همچنین با توجه به رخداده‌پایه بودن مدل مفهوم بازکالیبراسیون پارامترهای گیرش اولیه مورد توجه قرار گرفته است.

۲- معرفی حوضه سد گلستان

حوضه آبریز سد گلستان یکی از مناطق سیل‌خیز کشور محسوب می‌شود که به علت وجود شهرها و روستاهای واقع در مسیر رودخانه در سال‌های اخیر دچار سیلاب‌های مخربی شده است و به شدت از کمبود داده رنج می‌برد. بنابراین مطالعات

۱- مقدمه

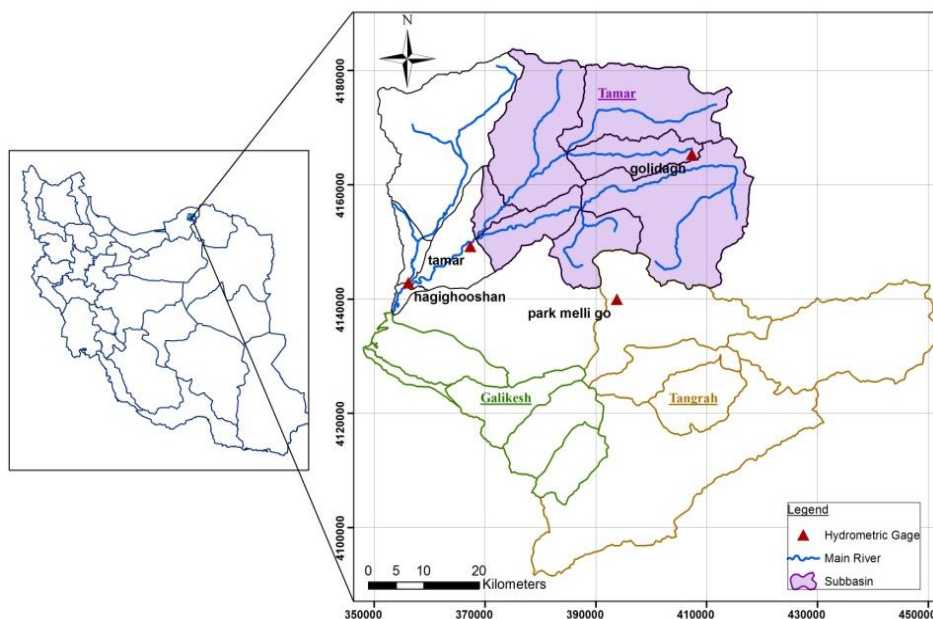
با توجه به انواع روش‌های مدیریت و بهینه‌سازی حوضه آبریز، پیش‌بینی دقیق رواناب خروجی می‌تواند در بهینه‌سازی و مدیریت حوضه بسیار موثر باشد. در این میان یکی از مهم‌ترین بخش‌های شناخت حوضه مربوط به ارائه مدلی به منظور شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب آن حوضه می‌باشد. بارش مهم‌ترین و موثرترین منبع آب یک حوضه آبریز است که با توزیع نابرابر مکانی و زمانی در سطح حوضه تغییر می‌نماید. یکی از چالش‌های مهم در مطالعه فرایند بارش-رواناب در حوضه‌های آبریز، یافتن پارامترهای معرف فرآیندهای مختلف چرخه هیدرولوژیکی در فرایندی با عنوان کالیبراسیون است.

در ابتدا این فرایند به صورت دستی با هدف انطباق هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی با مقایسه چشمی انجام می‌شد. در حضور تعداد قابل‌ملاحظه‌ای از پارامترها و با توجه به پیچیدگی روابط حاکم در مدل، تخمین و برآورد این پارامترها با دقت کافی به شکل دستی و در یک فرایند مبتنی بر حدس و خطا بسیار زمانبر و اغلب غیرممکن می‌باشد. در چنین شرایطی استفاده از روش‌های کالیبراسیون خودکار که مبتنی بر استفاده از روش‌های جستجوی سیستماتیک در فضای چندبعدی پارامترهای مدل بوده، بسیار سودمند است. در این راستا الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی، ابزار مناسبی را به عنوان موتورهای جستجوی کارآمد فراهم می‌نماید.

کالیبراسیون دستی مدل‌های هیدرولوژیکی از اوایل دهه ۶۰ میلادی و کالیبراسیون خودکار از اواخر دهه نام‌برده مورد توجه قرار گرفت و تحقیقات زیادی برای بهبود فرایند کالیبراسیون خودکار هم از لحاظ مدنظر قرار دادن خطای اندازه‌گیری و هم از نظر استراتژی‌هایی برای استفاده از داده‌های با کیفیت مناسب و اعمال عدم قطعیت انجام شده است. در سال ۱۹۹۳، جین تاثیر طول داده‌های بارش-رواناب حوضه را در فرایند کالیبراسیون ارزیابی نمود [۷]. دووان و همکارانش الگوریتم^۱ SCE را به عنوان الگوریتمی مناسب برای کالیبراسیون خودکار مدل‌های هیدرولوژیکی معرفی نمودند [۳]. سروشیان و همکارانش

موقعیت سه زیرحوضه، جانمایی آنها بر روی نقشه ایران و هم- چنین محدوده مطالعاتی حوضه تمر نمایش داده شده است. از کل ۱۱ زیرحوضه تمر، ۷ زیر حوضه با مساحت حدود ۱۵۳۰ کیلومترمربع منتهی به ایستگاه تمر بوده و بنابراین در مدلسازی فقط پارامترهای این زیرحوضه‌ها را مدنظر گرفته است. موقعیت ایستگاه موردنظر تمر به همراه شبکه آبراهه‌های اصلی بر روی نقشه شکل (۱) نمایش داده شده است.

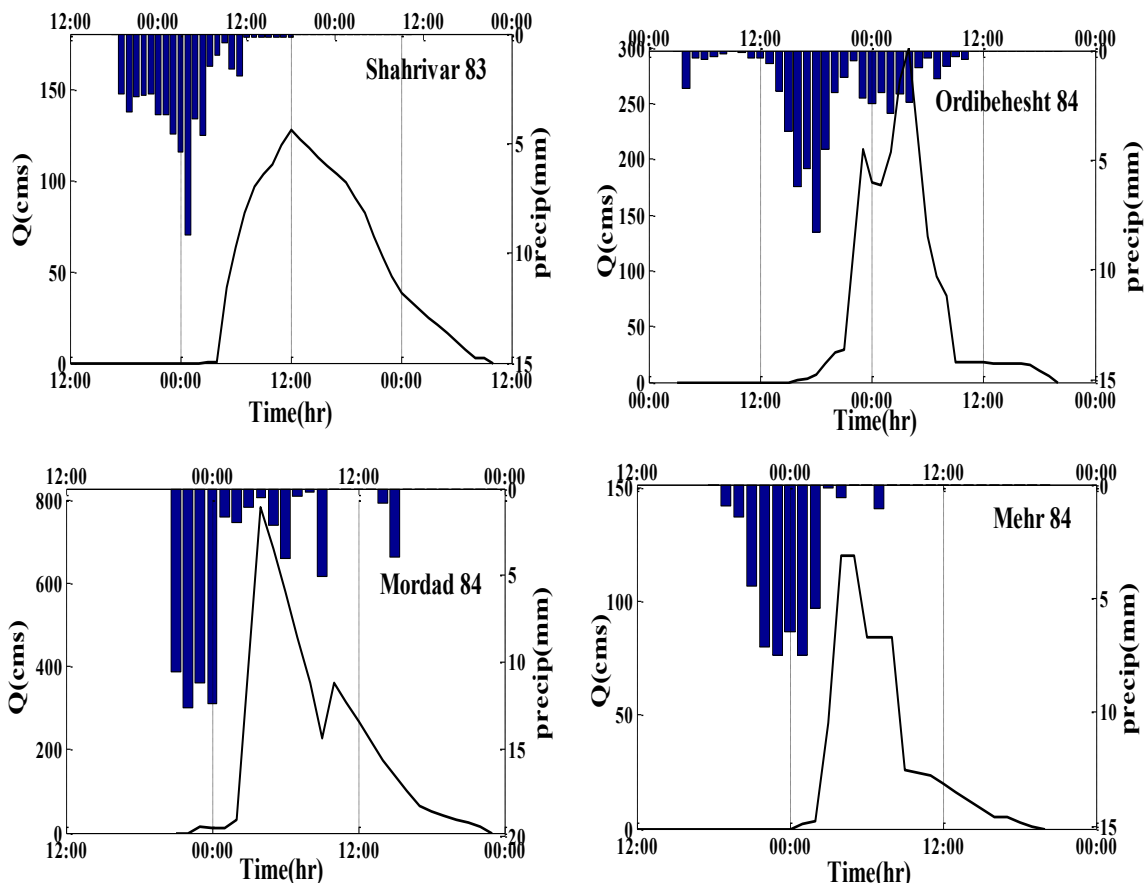
مربوط به سیلاب این حوضه می‌تواند با اهمیت باشد. این حوضه طبق با نقشه‌های توپوگرافی و وضعیت رودخانه‌ها به سه حوضه تمر، تنگراه و گالیکش تقسیم می‌شود که حوضه‌های تمر و تنگراه هر کدام دارای ۱۱ زیرحوضه فرعی و حوضه گالیکش دارای ۵ زیرحوضه فرعی است [۱]. در این تحقیق، حوضه تمر به دلیل داشتن اطلاعات مناسبتر انتخاب شده است. در شکل (۱)



شکل (۱): موقعیت زیرحوضه‌های استان گلستان و حوضه تمر بر روی نقشه ایران

داده شده است. از بین چهار رخداد مدنظر، سه رخداد برای کالیبراسیون و یک رخداد برای صحت‌سنجی انتخاب شد که مشخصات هر یک از این سیلاب‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

نیود اطلاعات مناسب، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های مطرح در مدلسازی این حوضه بوده و تنها چهار رخداد قابل‌اعتماد برای مدلسازی در دسترس بود. هیدروگراف سیلاب خروجی و هیتوگراف بارش در حوضه تمر که از متوسط بارش در هفت ایستگاه باران‌سنجی به دست آمده است، در شکل (۲) نشان



شکل (۲): هیئوگراف بارش متوسط حوضه آبریز تمر و هیدروگراف سیلاب خروجی حوضه در ایستگاه تمر در رخدادهای ۲۰۲۰، ۲۰۲۱

قسمتی از محاسبات موردنیاز برای به دست آوردن هیدروگراف سیلاب و شبیه‌سازی فرایند بارش را انجام می‌دهند و در هر یک، روش‌های مختلفی برای محاسبه هیدروگراف پیشنهاد شده است.

در مطالعه حاضر برای محاسبه تلفات از روش *SCS-CN* برای تبدیل بارش به رواناب از روش گلاک و برای روندیابی در کانال‌های اصلی از روش ماسکینگام استفاده شده است. محاسبه تلفات با روش *SCS* مستلزم تعیین دو پارامتر عدد منحنی رواناب (*CN*) و مقدار گیرش اولیه I_a می‌باشد. حدود بالا و پایین عدد منحنی رواناب به عنوان اولین پارامتر کالیبراسیون در هر زیرحوضه با توجه به نقشه کاربری اراضی حوضه و درصد مساحت تحت پوشش هر کاربری طبق جدول (۲) به دست آمده است. با فرض S به عنوان پتانسیل تلفات حوضه و α به عنوان ضریب تلفات، مقدار گیرش اولیه با توجه به رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$I_a = \alpha \times S \quad (1)$$

ضریب تلفات در هر حوضه بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ تغییر نموده و به عنوان دومین پارامتر کالیبراسیون در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مشخصات سیلاب‌های بارش در حوضه تمر

رخداد	تاریخ وقوع سیل	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	تداوم (ساعت)
رخداد اول	۱۳۸۳/۶/۲۹	۱۲۸	۳۰
رخداد دوم	۱۳۸۴/۲/۱۶-۱۷	۲۹۹	۲۵
رخداد سوم	۱۳۸۴/۵/۱۸	۲۸۴ و ۷۸۳	۱۸
رخداد چهارم	۱۳۸۴/۷/۱۷	۱۲۰	۱۶

۳- معرفی مدل HEC-HMS و ساختار کالیبراسیون

HEC-HMS [۱۵] نرم‌افزار توسعه یافته توسط مرکز هیدرولوژی مهندسی ارتش آمریکا است که برای شبیه‌سازی بارش-رواناب تهیه شده و امروزه کاربرد وسیعی دارد. شبیه‌سازی حوضه با استفاده از معرفی المان زیرحوضه و المان بازه روندیابی امکان‌پذیر است. در این تحقیق از نسخه ۳.۲ نرم‌افزار استفاده شده است.

در این نرم‌افزار چهار مدول تلفات، تبدیل بارش مازاد به رواناب، دبی پایه و روندیابی با یکدیگر ترکیب شده که هر یک

سادگی این ماجول دارای ضعف‌هایی است. موسوی و همکاران [۱۰] به این ضعف‌ها و ضرورت استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی اشاره نمودند.

۴- الگوریتم بهینه‌سازی PSO و معیار ارزیابی مدل

الگوریتم PSO [۱۴] یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی با سرعت همگرایی مطلوب است. در این روش، برای هر ذره یک بردار موقعیت P_{ij} و یک بردار سرعت V_{ij} در نظر گرفته می‌شود. اگر بعد مساله بهینه‌سازی n فرض شود، این دو بردار در هر تکرار از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

$$V_{ij}(t) = W \times V_{ij}(t-1) + \quad (4)$$

$$C_1 \times rand_1 \times (Pbest_{ij} - P_{ij}(t-1)) +$$

$$C_2 \times rand_2 \times (Gbest_j - P_{ij}(t-1))$$

$$P_{ij}(t) = P_{ij}(t-1) + V_{ij}(t) \quad (5)$$

در روابط فوق W وزن اینرسی، C_1 و C_2 ضرایب یادگیری (شتاب) بوده که C_1 را پارامتر شناختی و C_2 را پارامتر اجتماعی می‌گویند. در این تحقیق مقادیر این پارامترها به شکل دینامیک و با تابع خطی از حدود بالای خود در اولین تکرار به حدود پایین در آخرین تکرار تغییر می‌نماید. $Pbest_{ij}$ نمایانگر بهترین موقعیت برای ذره i و $Gbest_j$ نمایانگر بهترین ذره در میان کل ذرات جمعیت تا تکرار t است. اندیس j بعد بردار مورد نظر را نشان می‌دهد.

روابط فوق نشان می‌دهد که بهینه‌سازی در این الگوریتم با در نظر گرفتن اثر موقعیت فعلی ذره (عبارت اول رابطه ۵)، فاصله ذره از بهترین نقطه‌ای که در همسایگی آن است (عبارت دوم رابطه ۵) و فاصله ذره از بهترین نقطه‌ای است که توسط تمام ذرات به دست آمده است (عبارت سوم رابطه ۵) صورت می‌گیرد. تعداد ذرات اولیه الگوریتم ۲۰ عدد برای رویکرد تکرار خداده و ۳۰ عدد در رویکرد سه‌رخداده و حداکثر تعداد تکرار الگوریتم برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شده است.

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 آشفستگی PSO [۹] و جهش نخبه [۸] بهره گرفته شده است. اگرچه استفاده از این دو روش هیچ تضمینی برای به دست آوردن جواب بهینه سراسری نیست، ولی با توجه به هدایت ذرات به بخش‌های مختلف فضای جستجو مساله بعضاً می‌تواند در فرار از بهینه محلی موثر واقع شود. استفاده از الگوریتم PSO مستلزم معرفی یک تابع هدف است که در این تحقیق تابع $RMSE$ به عنوان معیار ارزیابی انتخاب شده است و به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

برای تبدیل بارش به رواناب دو پارامتر زمان تمرکز حوضه و ضریب ذخیره باید کالیبره شوند. برای کاهش تعداد پارامترهای کالیبراسیون زمان تمرکز از رابطه پیشنهادی سازمان حفاظت خاک [۲] مطابق رابطه (۲) برآورد شده است.

$$T_c = 1.67 \times \frac{(L \times 3.28)^{0.8} \times (1000 / CN - 9)^{0.7}}{1900y^{0.5}} \quad (2)$$

در رابطه فوق L طول رودخانه بر حسب متر، CN عدد منحنی رواناب و y متوسط شیب حوضه و T_c زمان تمرکز بر حسب ساعت محاسبه می‌شود. با توجه به رابطه زمان تمرکز و ضریب ذخیره می‌توان ضریب ذخیره هر زیرحوضه را از رابطه (۳) محاسبه نمود [۱۷]:

$$\frac{R}{R + T_c} = Cs \quad (3)$$

که مقدار ثابت Cs (ثابت ضریب ذخیره) بین ۰/۲ تا ۰/۶ متغیر بوده و به عنوان سومین پارامتر کالیبراسیون در نظر گرفته شده است. در روش روندیابی ماسکینگام پارامتر K_m با استفاده از اطلاعات برآورد شده و پارامتر X_m کالیبره می‌شود. با توجه به این که حوضه مرکب از ۷ زیرحوضه با ۳ پارامتر در هر زیرحوضه و ۳ بازه روندیابی با ۱ پارامتر در هر بازه است، مدل حوضه مرکب از ۲۴ پارامتر کالیبراسیون خواهد بود که برآورد و انتخاب مناسب مقدار آنها هدف این تحقیق می‌باشد. جدول (۲) پارامترهای کالیبراسیون و حدود بالا و پایین در نظر گرفته شده برای هر پارامتر را نشان می‌دهد.

جدول (۲): حدود بالا و پایین پارامترهای کالیبراسیون

پارامتر	زیرحوضه	حد پایین	حد بالا
عدد منحنی رواناب ($CN_1 - CN_7$)	زیرحوضه ۱	۹۱	۶۰
	زیر حوضه ۲	۹۱	۶۱
	زیر حوضه ۳	۸۷	۵۸
	زیر حوضه ۴	۸۵	۶۰
	زیر حوضه ۵	۸۴	۵۰
	زیر حوضه ۶	۹۱	۷۰
	زیرحوضه ۷	۹۱	۷۰
$\alpha_1 - \alpha_7$	ضریب تلفات ۷ زیر حوضه	۰/۱۵	۰/۲۵
$Cs_1 - Cs_7$	ثابت ذخیره ۷ زیر حوضه	۰/۲	۰/۶
X_m (۲۴-۲۲)	سه بازه	۰/۲	۰/۵

نرم‌افزار HEC-HMS دارای یک ماجول بهینه‌ساز شبه خودکار برای کالیبراسیون پارامترهای حوضه با استفاده از دو الگوریتم گرادیان تک‌متغیره و نلدرومید [۱۳] می‌باشد. الگوریتم اول تنها بر مبنای کالیبراسیون هم‌زمان یک پارامتر بوده ولی الگوریتم دوم قابلیت کالیبراسیون هم‌زمان چند پارامتر را دارد. برخلاف

کالیبراسیون شبه خودکار و با استفاده از الگوریتم نلدرومید موجود در HMS مقایسه شده است. شکل (۳) هیدروگراف‌های مربوط به کالیبراسیون دو رویکرد را در هر سه رخداد نشان می‌دهد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که ماجول بهینه‌ساز شبه خودکار HMS قادر به تطبیق هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی نبوده است. شایان ذکر است که حصول جواب‌های تا حدی مناسب تنها در صورت انتخاب مناسب مقادیر اولیه پارامترها میسر خواهد بود.

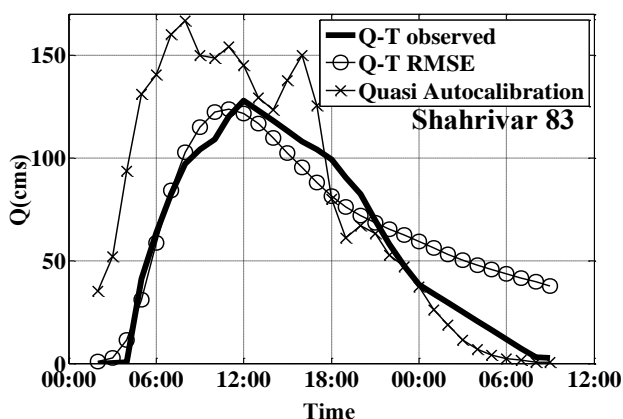
همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود مدل HMS-PSO قابلیت کالیبراسیون هیدروگراف‌های هر سه رخداد را تا حد قابل قبولی داشته است. بیشترین اختلاف در رخداد دوم (اردیبهشت ۸۴) مشاهده می‌شود. هیدروگراف این رخداد دارای دو پیک با بزرگی پیک اول حدود ۲۱۰ و دوم حدود ۳۰۰ مترمعب بر ثانیه (cms) بوده و پس از آن دبی به سرعت و به صورت نامتعارف نزول نموده است. این مساله می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری و یا وقوع پدیده‌ای خاص باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (W e_k \times (Q_{obs,k} - Q_{sim,k}))^2}{\sum_{k=1}^n W e_k^2}} \quad (۶)$$

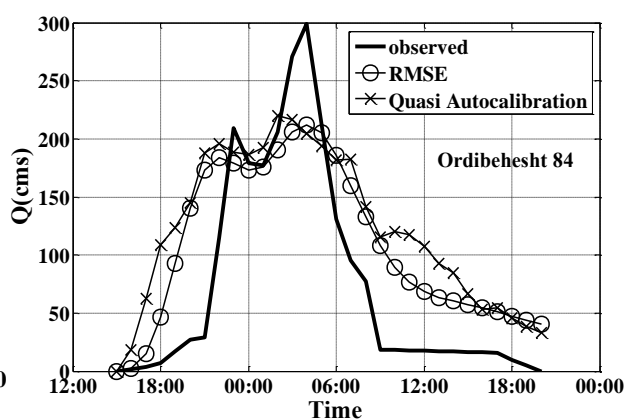
در رابطه فوق Q_{obs} مقدار دبی مشاهداتی، Q_{sim} مقدار دبی شبیه‌سازی، n تعداد گام زمانی در هر رخداد و $W e$ ضریب وزنی نقاط مختلف هیدروگراف است. با توجه به این که در ارزیابی هر هیدروگراف نقاط پیک از اهمیت بیشتری دارند، مقدار این ضریب برای نقاط پیک بزرگتر در نظر گرفته شده است [۵].

۵- نتایج کالیبراسیون

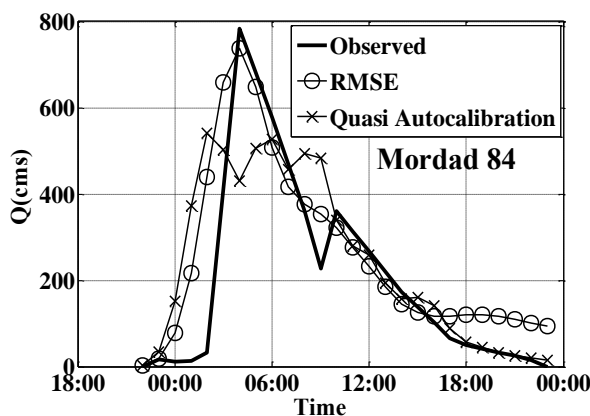
کالیبراسیون مدل در دو رویکرد مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در رویکرد اول هر یک از رخدادهای به صورت جدا کالیبره شدند. به منظور بررسی کارایی مدل HMS-PSO نتایج کالیبراسیون در رویکرد تکرر رخداد با نتایج حاصل از



(ب)



(الف)



(ج)

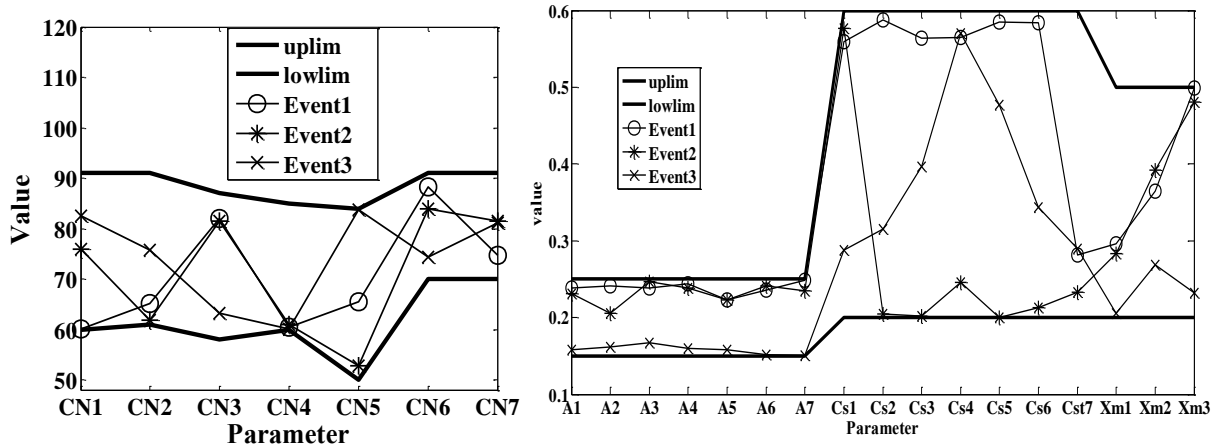
شکل (۳): هیدروگراف تاریخی و شبیه‌سازی در سناریو تک رخداد و هیدروگراف شبیه‌سازی در کالیبراسیون شبه خودکار؛ (الف) رخداد اول، (ب) رخداد دوم و (ج) رخداد سوم

بررسی امکان وجود جواب بهتر با جایگذاری بهترین جواب در بین جمعیت اولیه الگوریتم PSO و سپس تقویت قدرت



پارامترها و حفظ قدرت تعمیم مدل کالیبره شده در مرحله صحت‌سنجی و اینکه تلاش برای کالیبره بهتر یک رخداد نامتعارف لزوماً عملکرد مطلوبتری را در مرحله صحت‌سنجی نخواهد داشت، در نهایت استفاده از این راهکار نیز در دستور کار قرار نگرفت. مجموعه پارامترهای به دست آمده در رخدادهای مختلف نیز در شکل (۴) نشان داده شده است.

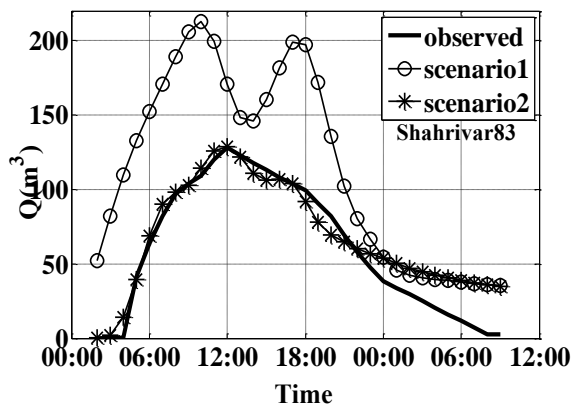
جستجوی مدل با افزایش تعداد ذرات و تکرارهای الگوریتم، افزایش تعداد ذرات در معرض جهش و در نهایت بازتر کردن بازه تغییرات پارامترها صورت گرفت. علی‌رغم آن تغییر چشمگیری در کیفیت جواب حاصل نشد. یک راه حل دیگر استفاده از درجات آزادی بیشتر از طریق افزایش تعداد پارامترها است. با توجه به ضرورت کنترل تعداد



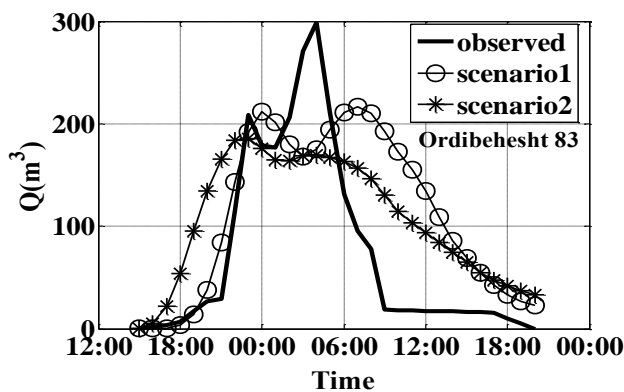
شکل (۴): نحوه تغییرات پارامترهای کالیبراسیون در رخدادهای مختلف در رویکرد تکرر داده (A متناظر پارامتر ضریب تلفات α می‌باشد)

در نظر گرفته شد. نتایج این سناریو (شکل (۵)) باعث بهبود شرایط رخداد اول و نامطلوب شدن رخداد سوم گردید. مقایسه دو سناریوی گفته شده بر این امر دلالت دارد که رخدادهای یک و سه نمی‌توانند به صورت هم‌زمان با یک دسته پارامتر مشابه کالیبره شوند. بنابراین در سناریو سوم (سناریو ۳) ضریب گیرش اولیه رخدادهای اول و سوم به صورت مجزا و متفاوت از هم در نظر گرفته شد. این امر باعث افزایش تعداد پارامترهای کالیبراسیون از ۲۴ عدد به ۳۱ عدد شد. هیدروگراف‌های مربوط به این سناریو (شکل (۶)) نشان می‌دهد که گرچه شرایط کالیبراسیون رخداد اول تا حدی بهبود یافته است، اختلاف دبی به ویژه در نقاط پیک هنوز زیاد است. در ادامه بهبود نتایج کالیبراسیون بدون افزایش درجات آزادی مدل با هدف تغییر حدود بالا و پایین ضرایب گیرش اولیه در رخدادهای (سناریو ۴ و سناریو ۵) صورت گرفت. در جدول (۳) خلاصه مشخصه‌های سناریوهای مختلف مطرح، ارائه شده است.

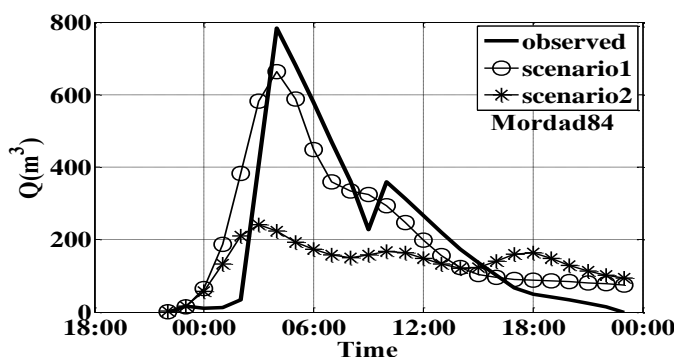
همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، مجموعه پارامترهای حاصل از سه رخداد از الگوی مشابهی پیروی نمی‌کند و نتایج حاصل از کالیبراسیون تکرر داده‌ها قادر به حصول مجموعه پارامترهای منحصر به فرد برای مدل حوضه نبوده است. از اینرو کالیبراسیون هم‌زمان چند (سه) رخداد اول به عنوان رخدادهای کالیبراسیون مورد بررسی قرار گرفت. در این شرایط تابع هدف مدل مجموع نسبی $RMSE$ هر رخداد با وزن یکسان لحاظ شده است. این امر سبب شد که ارزش هر سه رخداد به صورت یکسان لحاظ شود. نتایج به دست آمده از این سناریو (سناریو ۱) که در شکل (۵) نشان داده شده است، برای تمامی رخدادهای مطلوب نبوده است. به طوری که هیدروگراف‌های رخدادهای دوم و سوم کمابیش به مانند سناریوی تکرر داده کالیبره شده‌اند، ولی رخداد اول به شکل مناسبی شبیه‌سازی نشده است. برای بهبود هیدروگراف رخداد اول در سناریو بعدی (سناریو ۲) ضریب اهمیت بیشتری برای رخداد اول



(ب)



(الف)



(ج)

شکل (۵): هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و هیدروگراف‌های تاریخی رخدادهای کالیبراسیون در سناریو ۱ و سناریو ۲؛ (الف) رخداد اول، (ب) رخداد دوم و (ج) رخداد سوم

پارامتر در رخداد اول از ۰/۲۵ به ۰/۴۵ افزایش یافته و در یک سناریوی دیگر (سناریو ۵) برای افزایش دبی نقاط پیک رخداد سوم، حد پایین این پارامتر در این رخداد از ۰/۱۵ به ۰/۰۵ کاهش یافت. شکل (۶) هیدروگراف مربوط به دو سناریوی اخیر را نشان می‌دهد.

ضریب گیرش اولیه بر نقاط پیک هیدروگراف تاثیر چشم‌گیری داشته و افزایش این پارامتر باعث کاهش دبی پیک هیدروگراف و کاهش آن باعث افزایش دبی پیک خواهد شد، در دو سناریو اخیر حدود بالا و پایین این پارامترها در هر یک از رخدادها به صورت متفاوت در نظر گرفته شد. در سناریو ۴ برای کاهش دبی نقاط پیک هیدروگراف رخداد اول، حد بالای این

جدول (۳): خلاصه مشخصه‌های سناریوهای بررسی شده در رویکرد سه‌رخداده

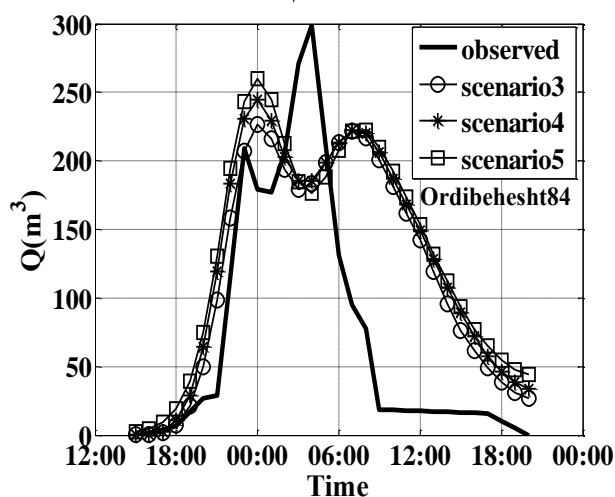
تابع هدف	حدود بالا و پایین پارامترها	پارامترهای کالیبراسیون
اهمیت یکسان سه رخداد	جدول ۲	CN, α, Cs, X_m یکسان برای سه رخداد
اهمیت رخداد ۱ نسبت به رخدادهای ۲ و ۳	جدول ۲	CN, α, Cs, X_m یکسان برای سه رخداد
اهمیت یکسان سه رخداد	جدول ۲	CN, Cs, X_m یکسان برای سه رخداد α یکسان برای رخداد ۲ و ۳ و متفاوت از رخداد ۱
اهمیت یکسان سه رخداد	افزایش حد بالای α به ۰/۴۵ در رخداد اول سایر پارامترها مطابق جدول ۲	$CNI-CN7$ یکسان برای سه رخداد α یکسان برای رخداد ۲ و ۳ و متفاوت با رخداد ۱
اهمیت یکسان سه رخداد	کاهش حد پایین α به ۰/۰۵ در رخداد ۲ و ۳ سایر پارامترها مطابق جدول ۲	$CNI-CN7$ یکسان برای سه رخداد α یکسان برای رخداد ۲ و ۳ و متفاوت با رخداد ۱

در سناریوهای تک‌رخداده دیده شد، داشته است. البته هیدروگراف شبیه‌سازی شده رخداد اول دویکه است که شاید

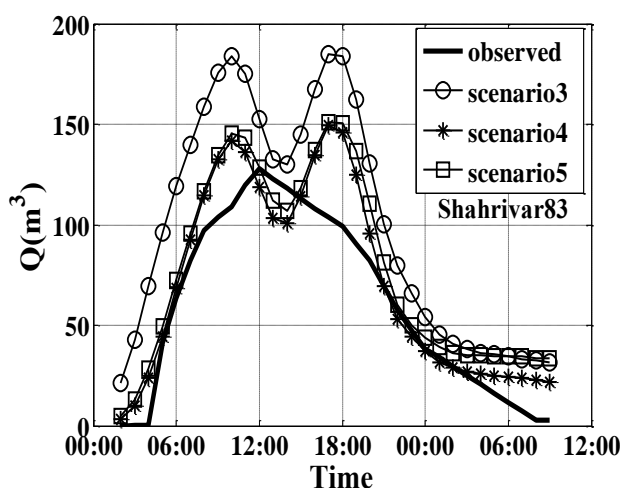
نتایج دو سناریو اخیر نشان داد که مدل در هر دو حالت قابلیت کالیبراسیون هر سه رخداد را به شکل مناسب، نزدیک به آنچه

بیشتر در مرحله صحت‌سنجی تا جایی که شکل کلی هیدروگراف‌ها مناسب است، انجام آن دنبال نشد.

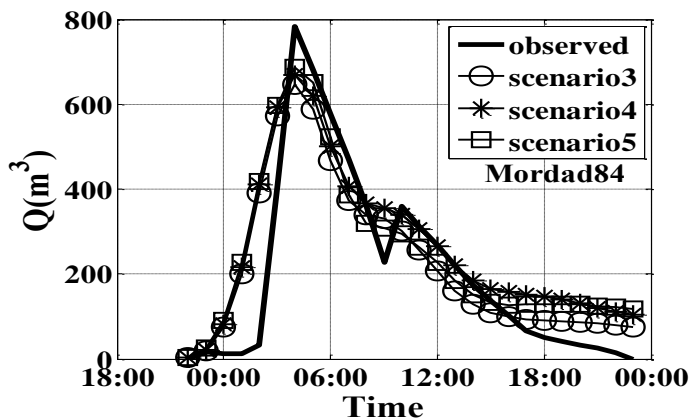
بتوان با افزایش مجدد تعداد پارامترها این پدیده را مرتفع نمود، لیکن نظر به حفظ پارامترها با تعداد کمتر برای تعمیم‌پذیری



(ب)



(الف)



(ج)

شکل (۶): هیدروگرافهای شبیه‌سازی و هیدروگرافهای تاریخی رخدادهای کالیبراسیون در سناریوهای ۳، ۴ و ۵؛ (الف) رخداد اول، (ب) رخداد دوم و (ج) رخداد سوم

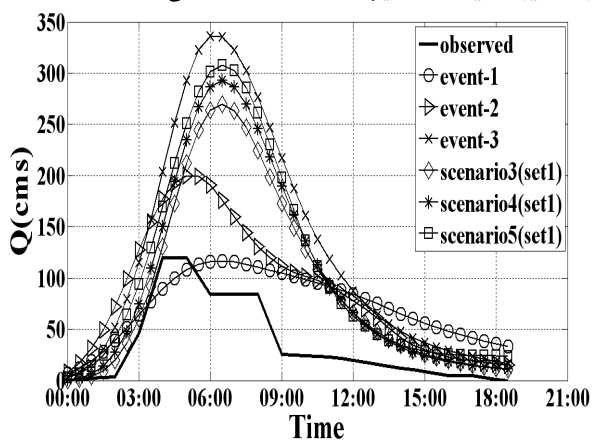
شد. مجموعه پارامتر کاننید Set_2 نامیده شده است. بنابراین در مجموع ۱۲ دسته پارامتر برای مدل به دست می‌آید که شامل سه دسته پارامتر در سناریو تک‌رخداده، یک دسته با توجه به متوسط پارامترهای سه‌رخداد، دسته پارامترهای سناریو ۱ و سناریو ۲ و شش دسته پارامتر در سناریوهای ۳ تا ۵ به شرح فوق می‌باشد.

در شکل (۷) نتایج هر یک از سناریوها شامل دسته پارامترهای حاصل از کالیبراسیون هر یک از رخدادهای به شکل منفرد و نیز با هم در دو حالت اخیر بر روی رخداد چهارم نشان داده شد. همان‌طور که دیده می‌شود، مدل حتی قادر به بازسازی جزئی هیدروگراف رخداد چهارم نبوده و اختلاف چشم‌گیری در نقاط پیک هیدروگراف دیده می‌شود. از طرفی نمی‌توان از میان دسته پارامترهای یادشده پارامترهایی را که منجر به هیدروگراف شبیه‌سازی شده‌ای نزدیک به هیدروگراف

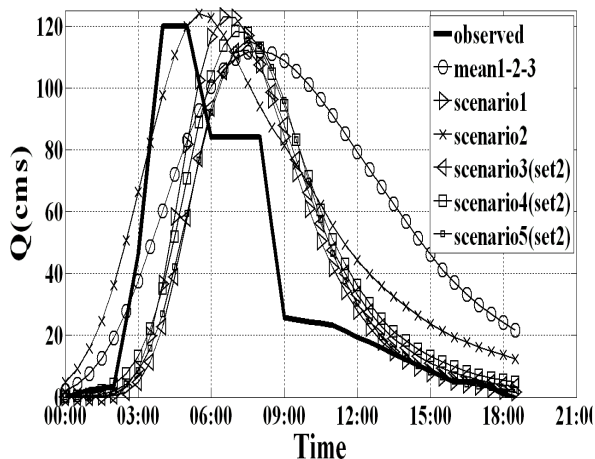
۶- صحت‌سنجی نتایج

نتایج کالیبراسیون هر دو رویکرد تک‌رخداده و سه‌رخداده نشان داد که مدل نتوانست یک دسته پارامتر منحصر به فرد برای مدل حوضه به دست آورد. از طرفی نمی‌توان تنها بر اساس نتایج کالیبراسیون در مورد پارامترهای مدل قضاوت نمود و عملکرد دسته پارامترهای مختلف باید در مرحله صحت‌سنجی (رخداد چهارم) مورد بررسی قرار گیرد. در سناریوهای ۳، ۴ و ۵ برای هر سناریو دو دسته پارامتر را بسته به اینکه ضرایب گیرش اولیه در رخداد صحت‌سنجی ضرایب مربوط به رخداد اول انتخاب شود یا رخدادهای دوم و سوم، مطرح خواهد بود. نتایج هر دو حالت در رخداد اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالتی که ضرایب گیرش رخداد اول انتخاب شد، مجموعه پارامتر منتخب Set_1 و در حالتی که ضرایب گیرش سایر رخدادهای انتخاب

(بازکالیبراسیون) نه تنها غیرمنطقی نیست، بلکه ضروری است. از این رو مفهوم بازکالیبراسیون در این مطالعه بدین معنی معرفی استفاده شده است که در هر یک از مجموعه پارامترهای کاندید با ضرب مقدار ثابتی در ضریب ضرایب گیرش اولیه هر هفت زیرحوضه، مجموعه پارامترهایی به دست آیند که تا حد ممکن دبی پیک رخداد چهارم را بازسازی نمایند. این کار بدین مفهوم است که گرچه متفاوت بودن ضرایب گیرش اولیه در رخدادهای کالیبراسیون و صحت‌سنجی به رسمیت شناخته می‌شود، لیکن نسبت‌های بین ضرایب فوق در زیرحوضه‌های مختلف در مرحله صحت‌سنجی همان نسبت‌هایی خواهند بود که در مرحله کالیبراسیون بدست آمده‌اند. این مفهوم از نظر فیزیکی نیز منطقی‌تر است. شکل (۸) هیدروگراف رخداد چهارم را پس از بازکالیبراسیون ضرایب گفته شده نشان می‌دهد.



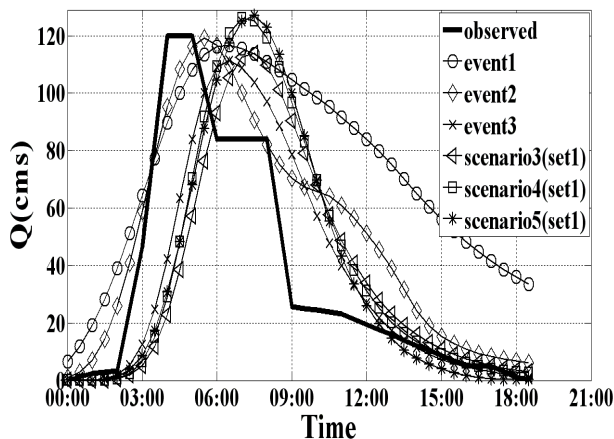
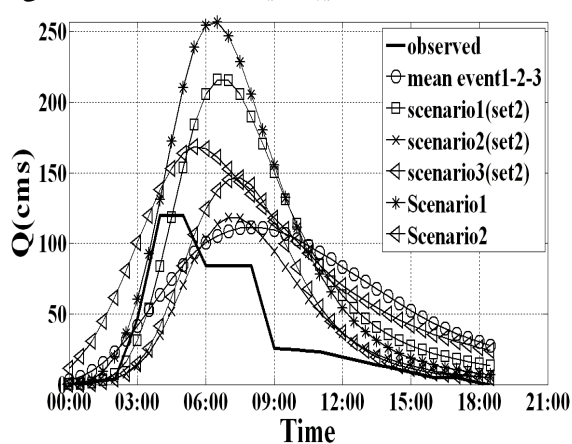
شکل (۷): هیدروگراف رخداد چهارم در صحت‌سنجی در سناریوهای مختلف



شکل (۸): هیدروگراف رخداد چهارم پس از بازکالیبراسیون در سناریوهای مختلف

پارامترهای ضرایب گیرش اولیه آنها خارج از محدوده از نظر فیزیکی قابل قبول $0/5-0/45$ قرار گرفته است حذف می‌شوند. بنابراین سناریو ۵ (set₁) از این مجموعه حذف گردید (جدول (۴)).

مشاهداتی رخداد چهارم است، پیشنهاد کرد. باید توجه نمود که علت اصلی اختلاف بیشتر هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی می‌تواند ناشی از عدم تناسب ضرایب شرایط اولیه بدست آمده در رخدادهای کالیبراسیون با شرایط اولیه رخداد چهارم باشد که از یک رخداد به رخداد دیگر متفاوت است. بنابراین کالیبراسیون مجدد این رخدادهای ضرورت می‌یابد. فرایند بازکالیبراسیون پارامترهای گیرش اولیه با استفاده مجدد از الگوریتم بهینه‌سازی گرچه ممکن است، چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. علت آن است که تغییر آنچه که در مرحله کالیبراسیون بدست آمده به نفع نیل به نتیجه بهتر در مرحله صحت‌سنجی مفهوم صحت‌سنجی عادلانه را خدشه‌دار می‌نماید. از طرف دیگر همان‌طور که گفته شد متفاوت بودن ضرایب گیرش اولیه در رخدادهای کالیبراسیون و صحت‌سنجی



همان‌طور که دیده می‌شود، نتایج به مراتب بهتر شده و مجموعه پارامترهای کالیبره شده عملکرد بهتری را در تطبیق با رخداد چهارم نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف در زمان رسیدن به پیک دیده می‌شود. پس از بازکالیبراسیون دسته پارامترهایی که مقدار

جدول (۴): مقادیر پارامتر آلفا در رخدادهای مختلف پس از باز کالیبراسیون

شماره		RMSE	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	وضعیت
۱	رخداد اول	۴۲/۱	۰/۲۴	۰/۲۴۱	۰/۲۲۸	۰/۲۴۴	۰/۲۲۲	۰/۲۳۶	۰/۲۴۸	Y
۲	رخداد دوم	۲۳/۶۱	۰/۳۴۷	۰/۳۰۸	۰/۳۷	۰/۳۵۸	۰/۳۳۴	۰/۳۶۲	۰/۳۵۲	Y
۳	رخداد سوم	۳۶/۶	۰/۴۱	۰/۴۲	۰/۴۲۵	۰/۴۱۵	۰/۴۱	۰/۳۹۵	۰/۳۹۱	Y
۴	سناریو ۳ (set ₁)	۴۷/۸	۰/۳۴۷	۰/۳۴	۰/۵۲۵	۰/۴۴	۰/۳۵	۰/۵۱	۰/۴۲	N
۵	سناریو ۴ (set ₁)	۴۷/۵	۰/۴۸	۰/۵۵	۰/۳۵۳	۰/۵۰۴	۰/۵۱	۰/۳۷	۰/۳۶	N
۶	سناریو ۵ (set ₁)	۴۷/۸	۰/۸۳۶	۰/۳۷	۰/۲۵۹	۰/۲۴۱	۰/۹۲۲	۰/۲۲	۰/۲۴	N
۷	متوسط ۱-۲-۳	۴۵/۵	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۲۵	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۲۲	Y
۸	سناریو ۱	۴۱/۳	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۲۸	۰/۴۴۸	۰/۳۶	Y
۹	سناریو ۲	۲۸/۲	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۶	Y
۱۰	سناریو ۳ (set ₂)	۴۷	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۲۸۱	۰/۳۴۷	۰/۳۲۱	۰/۳۷۱	۰/۳۶۴	Y
۱۱	سناریو ۴ (set ₂)	۴۴/۱	۰/۴۲	۰/۱۶	۰/۲۲۴	۰/۳۷۶	۰/۲۴۸	۰/۴۱	۰/۳۹۲	Y
۱۲	سناریو ۵ (set ₂)	۴۷/۱	۰/۲۶۱	۰/۲۲	۰/۲۵۲	۰/۲۳۴	۰/۲۶۶	۰/۱۸۶	۰/۲۰۷	Y

قبول حوضه معرفی شد. مقادیر این پارامترها و مقدار تابع هدف در هر دسته پارامتر در جداول (۴) و (۵) نشان داده شده است. مجموعه پارامترهای رخداد ۲، رخداد ۳ و سناریو ۲ با عملکرد تابع هدف تقریباً یکسان به عنوان پارامترهای مدل حوضه پیشنهاد می‌شود.

از بین دسته پارامترهای باقیمانده دسته یا دسته‌هایی با تابع هدف بهتر انتخاب شده است، بنابراین دسته پارامترهایی که به ازای آنها مقدار تابع هدف مدل از مقدار ۴۰ بیشتر بوده از مجموعه پارامترهای کاندید حذف گردید. در نهایت از بین ۱۲ دسته پارامتر مذکور، ۳ دسته به عنوان دسته پارامترهای قابل

جدول (۵): مقادیر سایر پارامترهای کالیبراسیون در دسته پارامترهای پیشنهادی برای حوضه

سناریو دو	رخداد ۳	رخداد ۲		سناریو دو	رخداد ۳	رخداد ۲	
۰/۵۹	۰/۲۸۸	۰/۵۸	Cs_1	۶۱/۳۸	۸۲/۵	۷۵/۹۴	CN_1
۰/۴۵۶	۰/۳۱۵	۰/۲	Cs_2	۸۶/۸	۵۸/۸	۶۱/۷۴	CN_2
۰/۵۵۴	۰/۳۹۷	۰/۲۰۲	Cs_3	۷۶/۶۸	۶۳/۲۴	۸۱/۹۱	CN_3
۰/۵۹	۰/۵۷۱	۰/۲۴۵	Cs_4	۶۰/۵۳	۶۰/۱	۶۱/۰۱	CN_4
۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۲	Cs_5	۶۰/۱۱	۸۳/۸۲	۵۲/۷	CN_5
۰/۲۹	۰/۳۴۳	۰/۲۱۳	Cs_6	۸۵/۴۴	۷۴/۴	۸۳/۹۸	CN_6
۰/۲۴۲	۰/۲۹	۰/۲۳	Cs_7	۷۹/۰۲	۸۱/۲	۸۱/۴۹	CN_7
				۰/۴۴	۰/۲۱	۰/۲۸۳	X_{m1}
				۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۳۹۲	X_{m2}
				۰/۴۱	۰/۲۳۲	۰/۴۸	X_{m3}

رخداد به عنوان رخدادهای کالیبراسیون و رخداد چهارم به عنوان رخداد صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. مساله در دو رویکرد تک‌رخداده و سه‌رخداده ارزیابی شد. نتایج رویکرد تک-رخداده با الگوریتم کالیبراسیون شبه‌خودکار موجود در مدل HEC-HMS تحت عنوان الگوریتم جستجوی محلی نلدرومید مقایسه شد که حاکی از کارایی مدل ترکیبی توسعه یافته بود. در رویکرد سه رخداده سناریوهای مختلفی با افزایش تعداد پارامترهای وابسته به گیرش اولیه و تغییر حدود بالا و پایین پارامترهای کالیبراسیون مورد بررسی قرار گرفت. هر یک از سناریوهای معرفی شده منجر به ارائه دسته پارامترهای مختلفی

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل کالیبراسیون خودکار مدل مفهومی HEC-HMS با استفاده از الگوریتم PSO در قالب مدل ترکیبی PSO-HMS توسعه یافته و در حوضه تمر از زیر حوضه‌های گرگانرود به عنوان مطالعه موردی پیاده‌سازی گردید. این امر از طریق کدنویسی الگوریتم بهینه‌سازی در نرم‌افزار مطلب و فراخوانی و اجرای HEC-HMS در این محیط از طریق محیط حدواسط DOS و بدون کاهش سرعت اجرای مدل هیدرولوژیکی میسر شد. از بین چهار رخداد سیلاب مورد اعتماد ثبت شده، سه

هیدروگراف شبیه‌سازی شده و تابع هدف انتخاب و معرفی شدند. نتایج تحقیق نشان داد که منطبق بر آنچه در دیگر مطالعات کالیبراسیون مدل‌های هیدرولوژیکی گزارش شده است، فرایند کالیبراسیون لزوماً منتهی به پیشنهاد دسته پارامترهای منحصر به فرد نخواهد شد.

شد که همگی در رخداد صحت‌سنجی ارزیابی شدند. بازکالیبراسیون برای به دست آوردن مقادیر جدید برای گیرش اولیه انجام شد و دسته پارامترهای از نظر فیزیکی غیرقابل قبول از مجموعه پارامترهای کانید حذف گردیدند. در نهایت دسته پارامترهای با تطابق بهتر از منظر شکل

۸- مراجع

- [۱] تقیان، بهرام، گزارش مطالعات فیزیوگرافی طرح هشدار سیل گرگانرود، موسسه تحقیقات آب، پژوهشکده منابع آب، تهران، ۱۳۸۷
- [۲] Chow, V.T.; Maidment, D. R.; Mays, L.W.; Applied Hydrology, McGraw, Inc, New York, USA, 1988.
- [۳] Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V.K.; "Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models", Journal of Hydrology, vol. 158, pp. 265-284, 1994.
- [۴] Eberhart, R.; Kennedy, J.; "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory" Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, Piscataway, NJ: IEEE Service Center pp. 39-43, 1995.
- [۵] Eckhardt, K.; Arnold, J.G.; "Automatic Calibration of Distributed Catchment's Model", Journal of Hydrology, vol. 251, pp. 103-109, 2001.
- [۶] Gupta, H.V.; Sorooshian, S.; Yapo, P.O.; "Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models, Comparison with Multi-level Expert Calibration"; Journal of Hydrologic Engineering, vol. 4, pp. 135-143, 1999.
- [۷] Jain, S.K.; "Calibration of Conceptual Models for Rainfall-Runoff Simulation", Hydrological Sciences, pp. 431-441, 1993.
- [۸] Kumar, D.N.; Reddy, M.J. "Multipurpose Reservoir Operation Using Particle Swarm Optimization", Journal of Water Resource Planning and Management, vol. 133, pp. 192-201, 2007.
- [۹] Liu, H.; Abraham A.; "Calibration of Conceptual Models for Rainfall-Runoff Simulation", Journal of Innovative Computing and Applications, pp. 39-47, 2007.
- [۱۰] Mousavi, S.J; Abbaspour, K.C; Kamali, B.; Amini M; Yang, H.; "Uncertainty-Based Automatic Calibration of HEC-HMS Model Using Sequential Uncertainty Fitting Approach", Journal of Hydroinformatics, In Press, Uncorrected Proof, 2011.
- [۱۱] Moussa, R.; Chahinian, N.; "Comparison of Different Multi-Objective Calibration Criteria Using a Conceptual Rainfall-Runoff Model of Flood Events", Journal of hydrology and Earth System Sciences, pp-519-535, 2009, doi:10.5194/hess-13-519-2009.
- [۱۲] Muleta, M.K.; Nicklow, J.W.; "Sensitivity and Uncertainty Analysis Coupled with Automatic Calibration for a Distributed Watershed Model", Journal of Hydrology, vol. 306, pp. 127-145, 2005.
- [۱۳] Nelder, J.A; Mead, R.; "A simplex method for function minimization", Computer Journal, vol. 7, pp. 308-313, 1965.
- [۱۴] Parsopoulos, K.E; Vrahatis M.N.; "Recent Approaches to Global Optimization Problems through Particle Swarm Optimization", Natural Computing, vol. 1, pp. 235-306, 2002.
- [۱۵] Scharffenberger, W.A.; Fleming, M.J.; "Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual", USACE, pp. 1-290, 2008.
- [۱۶] Sorooshian, S.; "Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models; the Question of Parameter Observability and Uniqueness", Water Resource Research, vol. 19, pp. 260-268, 1983.
- [۱۷] Timothy, D.S.; Charles, S.M.; Kyle, E.K.; "Equations for Estimating Clark Unit Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois" Water-Resources Investigations Report, 2000.

۹- زیر نویس ها

¹ Shuffled Complex Evolution

² Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System

³ Particle Swarm Optimization

