کالیبراسیون خودکار مدل هیدرولوژیکي رخدادپایه با استفاده از الگوریتم فراکاوشي *PSO*

بهاره کمالي[i] *; سید جمشید موسوي[ii]

چکیده

مدل هیدرولوژیکي مفهومي HEC-HMS شامل کتابخانه‌اي از انواع روش‌هاي شبیه‌هاي سازي فرایندهاي هیدرولوژیکي کاربرد وسیعي را در شبیه‌سازي فرآیند بارش-رواناب در سطح مطالعات کاربردي داشته است. در این مقاله کالیبراسیون خودکار مدل گفته شده با استفاده از الگوریتم فراکاوشي PSO بر روي مدل حوضه تمر از زیرحوضه‌هاي حوضه گرگانرود در استان گلستان، مورد توجه قرار گرفته است. این امر از طریق کدنویسي الگوریتم بهینه‌سازي در نرم‌افزار مطلب، فراخواني و اجراي HEC-HMS در این محیط با استفاده از محیط حدواسط DOS میسر شده است. کالیبراسیون مدل ابتدا در سناریوهاي تک‌رخداده انجام شد که منجر نیل به دسته پارامترهاي مختلف گردید. براي ارزیابي توانایي الگوریتم PSO در نیل به جواب‌هاي مطلوب، نتایج رویکرد کالیبراسیون تک‌رخداده با نتایج کالیبراسیون شبه‌خودکار مبتني بر الگوریتم جستجوي محلي نلدرومید موجود در HMS مقایسه شد که نشان‌دهنده کارایي الگوریتم PSO در اتصال به مدل هیدرولوژیکي است. در ادامه کالیبراسیون مدل در سناریوهاي چندرخداده بررسي شد. دسته پارامترهاي حاصل از رویکردهاي تک و چندرخداده در رخداد صحت‌سنجي ارزیابي و با استفاده از مفهوم بازکالیبراسیون پارامترهاي شرایط اولیه حوضه، فرآیند غربالگري دسته پارامترهاي رقیب انجام پذیرفت. این روش با توجه به مشکل غیرمنفرد بودن مجموعه جواب‌هاي مساله کالیبراسیون به عنوان یک مساله معکوس مي‌تواند در محدود نمودن تعداد جواب‌هاي کاندید موثر باشد.

کلمات کلیدي

مدل هیدرولوژیکي رخدادپایه، 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

تاریخ دریافت مقاله:۱۳۸۸/۱۱/٤

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۷/۹

[i] *نویسنده مسئول و دانشجوي دکتري، دانشگاه صنعتي امیرکبیر، دانشکده عمران و محیط زیست, kamalicivil@aut.ac.ir

[ii]دانشیار و عضو هیئت علمي دانشگاه صنعتي امیرکبیر، دانشکده عمران و محیط زیست, jmousavi@aut.ac.ir

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. 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

۱- مقدمه

با توجه به انواع روش‌هاي مديريت و بهينه‌سازي حوضه آبريز، پيش‌بيني دقيق رواناب خروجي مي‌تواند در بهينه‌سازي و مديريت حوضه بسيار موثر باشد. در اين ميان يكي از مهم‌ترين بخش‌هاي شناخت حوضه مربوط به ارائه مدلي به منظور شبيه‌سازي فرايند بارش-رواناب آن حوضه مي‌باشد. بارش مهم‌ترين و موثرترين منبع آب يك حوضه آبريز است كه با توزيع نابرابر مكاني و زماني در سطح حوضه تغيير مي‌نمايد. يكي از چالش‌هاي مهم در مطالعه فرآيند بارش-رواناب در حوضه‌هاي آبريز، يافتن پارامترهاي معرف فرآيندهاي مختلف چرخه هيدرولوژيكي در فرايندي با عنوان كاليبراسيون است.

در ابتدا اين فرايند به صورت دستي با هدف انطباق هيدروگراف مشاهداتي و محاسباتي با مقايسه چشمي انجام مي‌شد. در حضور تعداد قابل‌ملاحظه‌اي از پارامترها و با توجه به پيچيدگي روابط حاكم در مدل، تخمين و برآورد اين پارامترها با دقت كافي به شكل دستي و در يک فرايند مبتني بر حدس و خطا بسيار زمانبر و اغلب غيرممكن مي‌باشد. در چنين شرايطي استفاده از روش‌هاي كاليبراسيون خودكار كه مبتني بر استفاده از روش‌هاي جستجوي سيستماتيک در فضاي چندبعدي پارامترهاي مدل بوده، بسيار سودمند است. در اين راستا الگوريتم‌هاي بهينه‌سازي فراكاوشي، ابزار مناسبي را به عنوان موتورهاي جستجوي كارامد فراهم مي‌نمايد.

كاليبراسيون دستي مدل‌هاي هيدرولوژيكي از اوايل دهه ۶۰ ميلادي و كاليبراسيون خودكار از اواخر دهه نام‌برده مورد توجه قرار گرفت و تحقيقات زيادي براي بهبود فرايند كاليبراسيون خودكار هم از لحاظ مدنظر قرار دادن خطاي اندازه‌گيري و هم از نظر استراتژي‌هايي براي استفاده از داده-هاي با كيفيت مناسب و اعمال عدم قطعيت انجام شده است. در سال ۱۹۹۳، جين تاثير طول داده‌هاي بارش-رواناب حوضه را در فرايند كاليبراسيون ارزيابي نمود [۷]. دووان و همكارانش الگوريتم SCE [۱] را به عنوان الگوريتمي مناسب براي كاليبراسيون خودكار مدل‌هاي هيدرولوژيكي معرفي نمودند [۳]. سروشيان و همكارانش عواملي را كه باعث مي‌شوند نتوان براي يک مدل يک دسته پارامترهاي منحصر به فرد به دست آورد، مورد بررسي قرار دادند [۱۶] و[۶].ادركارد و آرنولد در سال ۲۰۰۱ و ميوتلا در سال ۲۰۰۵ كاليبراسيون خودكار مدل‌هاي توزيعي را بررسي نموده و روش‌هايي براي كاهش تعداد پارامترهاي كاليبراسيون اين مدل‌ها ارائه نمودند [۵] و [۱۲].

مطالعات بسيار زيادي در زمينه چالش‌هاي مختلف مطرح در مساله كاليبراسيون مدل‌هاي هيدرولوژيكي اعم از نقش عدم‌قطعيت‌هاي حاكم بر شكل رويه پاسخ مدل و نقش تابع هدف، ساختار مدل و روابط آن، غيرمنحصربه فرد بودن جواب و خصوصيات الگوريتم جستجو يا موتور بهينه‌ساز انجام شده است كه مرور تمامي آنها خارج از دامنه تحقيق حاضر است. اغلب كارهاي انجام شده در رابطه با مدل‌هاي پيوسته است كه البته بيشتر مباحث و روش‌هاي مطرح شده در مدل‌هاي رخدادپايه نيز موضوعيت دارد. در كاليبراسيون خودكار مدل‌هاي رخدادپايه نيز مي‌توان به نمونه‌هايي از قبيل كار موسي و همكاران در سال ۲۰۰۹ اشاره كرد [۱۱].

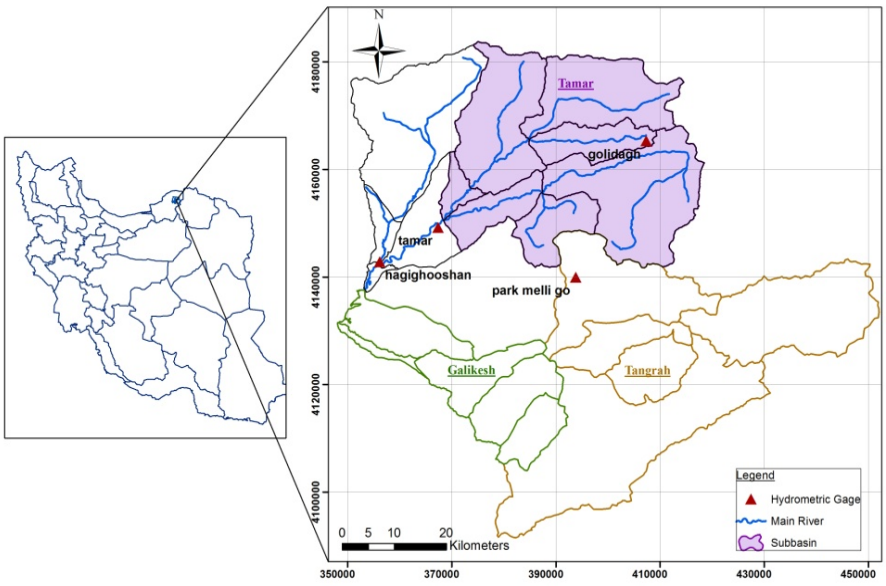
در اين تحقيق كاليبراسيون خودكار مدل مفهومي بارش-رواناب HEC-HMS [۲] در حوضه تمر از زيرحوضه‌هاي حوضه گرگانرود مورد بررسي قرار گرفته است. در اين راستا فرايند جستجو و گزينش پارامترهاي مدل حوضه با استفاده از الگوريتم بهينه‌سازي PSO [۳] به عنوان يكي از روش‌هاي بهينه‌سازي فراكاوشي انجام شده است. سناريوهاي مختلفي با در نظر گرفتن درجات آزادي مختلف براي مدل ارائه شده است و نتايج آن بر روي رخداد صحت‌سنجي ارزيابي شده است. همچنين با توجه به رخداد پايه بودن مدل مفهوم

بازکالیبراسیون پارامترهاي گیرش اولیه مورد توجه قرار گرفته است.

۲- معرفي حوضه سد گلستان

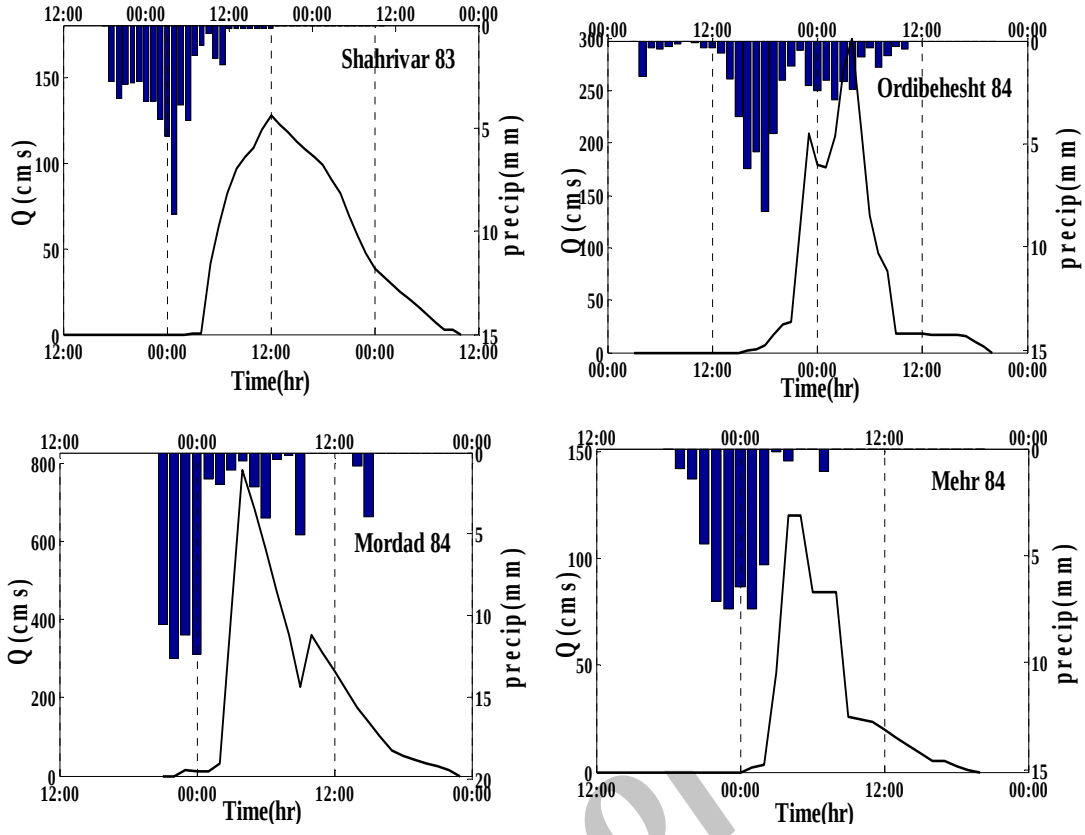
حوضه آبریز سد گلستان یکي از مناطق سیل‌خیز کشور محسوب مي‌شود که به علت وجود شهرها و روستاهاي واقع در مسیر رودخانه در سال‌هاي اخیر دچار سیلاب‌هاي مخربي شده است و به شدت از کمبود داده رنج مي‌برد. بنابراین مطالعات مربوط به سیلاب این حوضه مي‌تواند با اهمیت باشد. این حوضه طبق با نقشه‌هاي توپوگرافي و وضعیت رودخانه‌ها به سه حوضه تمر، تنگراه و گالیکش تقسیم مي‌شود که حوضه‌هاي تمر و تنگراه هر کدام داراي ۱۱ زیرحوضه فرعي و حوضه گالیکش داراي ۵ زیرحوضه فرعي است [۱]. در این تحقیق، حوضه تمر به دلیل داشتن اطلاعات مناسبتر انتخاب شده است. در شکل (۱) موقعیت سه زیرحوضه، جانمایي آنها بر روي نقشه ایران و همچنین محدوده مطالعاتي حوضه تمر نمایش داده شده است.

از کل ۱۱ زیرحوضه تمر، ۷ زیر حوضه با مساحت حدود ۱۵۳۰ کیلومترمربع منتهي به ایستگاه تمر بوده و بنابراین در مدلسازي فقط پارامترهاي این زیرحوضه‌ها را مدنظر گرفته است. موقعیت ایستگاه موردنظر تمر به همراه شبکه آبراهه‌هاي اصلي بر روي نقشه شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): موقعیت زیرحوضه‌هاي استان گلستان و حوضه تمر بر روي نقشه ایران

نبود اطلاعات مناسب، یکي از بزرگ‌ترین چالش‌هاي مطرح در مدلسازي این حوضه بوده و تنها چهار رخداد قابل‌اعتماد براي مدلسازي در دسترس بود. هیدروگراف سیلاب خروجي و هیتوگراف بارش در حوضه تمر که از متوسط بارش در هفت ایستگاه باران‌سنجي به دست آمده است، در شکل (۲) نشان داده شده است. از بین چهار رخداد مدنظر، سه رخداد براي کالیبراسیون و یک رخداد براي صحت‌سنجي انتخاب شد که مشخصات هر یک از این سیلاب‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.



شكل (۲): هيتوگراف بارش متوسط حوضه آبريز تمر و هيدروگراف سيلاب خروجي حوضه در ايستگاه تمر در رخدادهاي ۴،۳،۲،۱

جدول (۱): مشخصات سيلاب‌هاي بارش در حوضه تمر

رخداد	تاريخ وقوع سيل	دبي اوج (مترمكعب بر ثانيه)	تداوم (ساعت)
رخداد اول	۱۳۸۳ /۶/۲۹	۱۲۸	۳۰
رخداد دوم	۱۳۸۴/۲/۱۶-۱۷	۲۹۹	۲۵
رخداد سوم	۱۳۸۴/۵/۱۸	۷۸۳ و ۲۸۴	۱۸
رخداد چهارم	۱۳۸۴/۷/۱۷	۱۲۰	۱۶

۳- معرفي مدل HEC-HMS و ساختار كاليبراسيون

HEC-HMS [۱۵] نرم‌افزار توسعه يافته توسط مركز هيدرولوژي مهندسي ارتش آمريكا است كه براي شبيه‌سازي بارش-رواناب تهيه شده و امروزه كاربرد وسيعي دارد. شبيه-سازي حوضه با استفاده از معرفي المان زيرحوضه و المان بازه روندیابي امكان‌پذير است. در اين تحقيق از نسخه ۳،۲ نرم-افزار استفاده شده است.

در اين نرم‌افزار چهار مدول تلفات، تبديل بارش مازاد به رواناب، دبي پايه و روندیابي با يكديگر تركيب شده كه هر يک قسمتي از محاسبات موردنياز براي به دست آوردن هيدروگراف سيلاب و شبيه‌سازي فرايند بارش را انجام مي‌دهند و در هر يك، روش‌هاي مختلفي براي محاسبه هيدروگراف پيشنهاد شده است.

در مطالعه حاضر براي محاسبه تلفات از روش *SCS-CN*، براي تبديل بارش به رواناب از روش; گلارك و براي روندیابي در كانال‌هاي اصلي از روش ماسكينگام استفاده شده است. محاسبه تلفات با روش *SCS* مستلزم تعيين دو پارامتر عدد منحني رواناب (*CN*) و مقدار گيرش اوليه I_a مي‌باشد. حدود بالا و پايين عدد منحني رواناب به عنوان اولين پارامتر كاليبراسيون در هر زيرحوضه با توجه به نقشه كاربري اراضي حوضه و درصد مساحت تحت پوشش هر كاربري طبق جدول (۲) به دست آمده است. با فرض S به عنوان پتانسيل تلفات حوضه و α به عنوان ضريب تلفات، مقدار گيرش اوليه با توجه به رابطه (۱) به دست مي‌آيد:

$$I_a = \alpha \times S \qquad (۱)$$

ضريب تلفات در هر حوضه بين ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ تغيير نموده و به

عنوان دومين پارامتر كاليبراسيون در نظر گرفته شده است. براي تبديل بارش به رواناب دو پارامتر زمان تمركز حوضه و ضريب ذخيره بايد كاليبره شوند. براي كاهش تعداد پارامترهاي كاليبراسيون زمان تمركز از رابطه پيشنهادي سازمان حفاظت خاک [۲] مطابق رابطه (۲) برآورد شده است.

$$T_c = 1.67 \times \frac{(L \times 3.28)^{0.8} \times (1000/CN - 9)^{0.7}}{1900 y^{0.5}} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق L طول رودخانه بر حسب متر، CN عدد منحنی رواناب و y متوسط شيب حوضه و T_C زمان تمركز بر حسب ساعت محاسبه مي‌شود. با توجه به رابطه زمان تمركز و ضريب ذخيره مي‌توان ضريب ذخيره هر زيرحوضه را از رابطه (۳) محاسبه نمود [۱۷]:

$$\frac{R}{R+T_c} = Cs \qquad (۳)$$

كه مقدار ثابت Cs (ثابت ضريب ذخيره) بين ۰/۲ تا ۰/۶ متغير بوده و به عنوان سومين پارامتر كاليبراسيون در نظر گرفته شده است. در روش رونديابي ماسكينگام پارامتر K_m با استفاده از اطلاعات برآورد شده و پارامتر X_m كاليبره مي شود. با توجه به اين كه حوضه مركب از ۷ زيرحوضه با ۳ پارامتر در هر زيرحوضه و ۳ بازه روندیابي با ۱ پارامتر در هر بازه است، مدل حوضه مركب از ۲۴ پارامتر كاليبراسيون خواهد بود كه برآورد و انتخاب مناسب مقدار آنها هدف اين تحقيق مي‌باشد. جدول (۲) پارامترهاي كاليبراسيون و حدود بالا و پايين در نظر گرفته شده براي هر پارامتر را نشان مي‌دهد.

جدول (۲): حدود بالا و پايين پارامترهاي كاليبراسيون

پارامتر	زيرحوضه	حدپايين	حدبالا
عدد منحني رواناب ($CN_1 - CN_7$)	زيرحوضه۱	۹۱	۶۰
	زير حوضه ۲	۹۱	۶۱
	زير حوضه۳	۸۷	۵۸
	زير حوضه۴	۸۵	۶۰
	زير حوضه۵	۸۴	۵۰
	زير حوضه۶	۹۱	۷۰
	زيرحوضه۷	۹۱	۷۰
ضريب تلفات $\alpha_1 - \alpha_7$	۷ زير حوضه	۰/۱۵	۰/۲۵
ثابت ذخيره $Cs_1 - Cs_7$	۷زير حوضه	۰/۲	۰/۶
X_m (۲۴-۲۲)	سه بازه	۰/۲	۰/۵

نرم‌افزار HEC-HMS داراي يك ماجول بهينه‌ساز شبه‌خودكار براي كاليبراسيون پارامترهاي حوضه با استفاده از دو الگوريتم گراديان تك‌متغيره و نلدروميد [۱۳] مي‌باشد. الگوريتم اول تنها بر مبناي كاليبراسيون همزمان يك پارامتر بوده ولي الگوريتم دوم قابليت كاليبراسيون همزمان چند پارامتر را دارد. برخلاف سادگي اين ماجول داراي ضعف‌هايي است. موسوي و همكاران [۱۰] به اين ضعف‌ها و ضرورت استفاده از الگوريتم‌هاي بهينه‌سازي اشاره نمودند.

٤- الگوريتم بهينه‌سازي PSO و معيار ارزيابي مدل

الگوريتم PSO [۱۴] يكي از الگوريتم‌هاي بهينه‌سازي فراكاوشي با سرعت همگرايي مطلوب است. در اين روش، براي هر ذره يک بردار موقعيت P_{ij} و يک بردار سرعت V_{ij} در نظر گرفته مي‌شود. اگر بعد مساله بهينه‌سازي n فرض شود، اين دو بردار در هر تكرار از روابط (۴) و (۵) محاسبه مي‌شوند:

$$V_{ij}(t) = W \times V_{ij}(t-1) + C_1 \times rand_1 \times (Pbest_{ij} - P_{ij}(t-1)) + C_2 \times rand_2 \times (Gbest_j - P_{ij}(t-1)) \qquad (۴)$$

$$P_{ij}(t) = P_{ij}(t-1) + V_{ij}(t) \qquad (۵)$$

در روابط فوق W وزن اينرسي، C_1 و C_2 ضرايب يادگيري (شتاب) بوده كه C_1 را پارامتر شناختي و C_2 را پارامتر اجتماعي مي‌گویند. در اين تحقيق مقادير اين پارامترها به شكل ديناميک و با تابع خطي از حدود بالاي خود در اولين تكرار به حدود پايين در آخرين تكرار تغيير مي‌نمايد. $Pbest_{ij}$ نمايانگر بهترين موقعيت براي ذره i و $Gbest_j$ نمايانگر بهترين ذره در ميان كل ذرات جمعيت تا تكرار t است. انديس j بعد بردار مورد نظر را نشان مي‌دهد.

روابط فوق نشان مي‌دهد كه بهينه‌سازي در اين الگوريتم با درنظر گرفتن اثر موقعيت فعلي ذره (عبارت اول رابطه ۵)، فاصله ذره از بهترين نقطه‌اي كه در همسايگي آن است (عبارت دوم رابطه ۵) و فاصله ذره از بهترين نقطه‌اي است كه توسط تمام ذرات به دست آمده است (عبارت سوم رابطه ۵) صورت مي‌گيرد. تعداد ذرات اوليه الگوريتم ۲۰ عدد براي رويكرد تک-رخداده و ۳۰ عدد در رويكرد سه‌رخداده و حداكثر تعداد تكرار الگوريتم برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شده است.

يكي از ضعف‌هاي اين الگوريتم همگرايي زودرس آن به جواب‌هاي بهينه موضعي است. به منظور بهبود عملكرد الگوريتم و رفع اين مشكل از دو تكنيک آشفتگي PSO [۹] و جهش نخبه [۸] بهره گرفته شده است. اگرچه استفاده از اين دو روش هيچ تضميني براي به دست اوردن جواب بهينه سراسري نيست، ولي با توجه به هدايت ذرات به بخش‌هاي مختلف فضاي جستجو مساله بعضاً مي‌تواند در فرار از بهينه محلي موثر واقع شود.

استفاده از الگوريتم PSO مستلزم معرفي يك تابع هدف

است که در این تحقیق تابع *RMSE* به عنوان معیار ارزیابي انتخاب شده است و به صورت رابطه (۶) محاسبه مي‌شود:

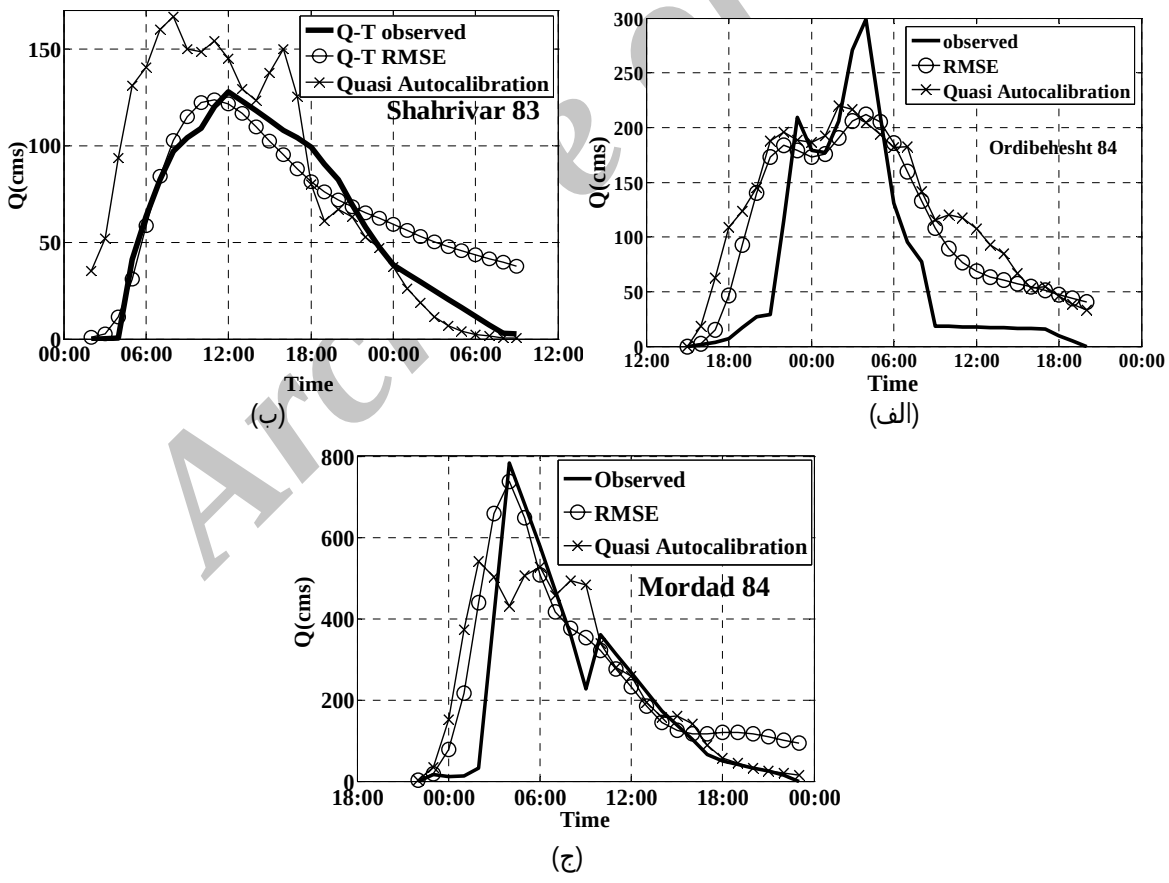
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n}(We_k \times (Q_{obs,k} - Q_{sim,k}))^2}{\sum_{k=1}^{n} We_k^{\,2}}} \qquad (۶)$$

در رابطه فوق Q_{obs} مقدار دبي مشاهداتي، Q_{sim} مقدار دبي شبيه‌سازي، n تعداد گام زماني در هر رخداد و We ضريب وزني نقاط مختلف هيدروگراف است. با توجه به اين كه در ارزيابي هر هيدروگراف نقاط پيک از اهميت بيشتري دارند، مقدار اين ضريب براي نقاط پيک بزرگتر در نظر گرفته شده است [۵].

۵- نتايج كاليبراسيون

كاليبراسيون مدل در دو رويكرد مختلف مورد بررسي قرار گرفته است. در رويكرد اول هر يک از رخدادها به صورت جدا كاليبره شدند. به منظور بررسي كارايي مدل HMS-PSO نتايج كاليبراسيون در رويكرد تک‌رخداده با نتايج حاصل از كاليبراسيون شبه‌خودكار و با استفاده از الگوريتم نلدروميد موجود در HMS مقايسه شده است. شكل (۳) هيدروگراف‌هاي مربوط به كاليبراسيون دو رويكرد را در هر سه رخداد نشان مي‌دهد. مقايسه نتايج نشان مي‌دهد كه ماجول بهينه‌ساز شبه-خودكار HMS قادر به تطبيق هيدروگراف‌هاي مشاهداتي و شبيه‌سازي نبوده است. شايان ذكر است كه حصول جواب‌هاي تا حدي مناسب تنها در صورت انتخاب مناسب مقادير اوليه پارامترها ميسر خواهد بود.

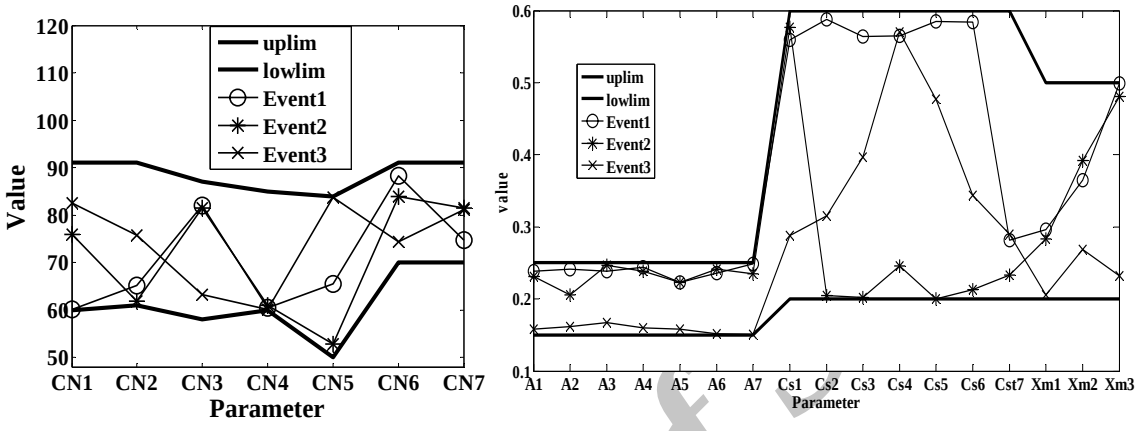
همان‌طور كه در شكل (۳) مشاهده مي‌شود مدل HMS-PSO قابليت كاليبراسيون هيدروگراف‌هاي هر سه رخداد را تا حدقابل‌قبولي داشته است. بيشترين اختلاف در رخداد دوم (ارديبهشت ۸۴) مشاهده مي‌شود. هيدروگراف اين رخداد داراي دو پيک با بزرگي پيک اول حدود ۲۱۰ و دوم حدود ۳۰۰ مترمعب بر ثانيه (cms) بوده و پس از آن دبي به سرعت و به صورت نامتعارف نزول نموده است. اين مساله مي‌تواند ناشي از خطاي اندازه‌گيري و يا وقوع پديده‌اي خاص باشد.



شكل (۳): هيدروگراف تاريخي و شبيه‌سازي در سناريو تک رخداده و هيدروگراف شبيه‌سازي در كاليبراسيون شبه خودكار؛ (الف) رخداد اول، (ب) رخداد دوم و (ج) رخداد سوم

بررسي امكان وجود جواب بهتر با جايگذاري بهترين جواب در بين جمعيت اوليه الگوريتم PSO و سپس تقويت قدرت جستجوي مدل با افزايش تعداد ذرات و تكرارهاي الگوريتم، افزايش تعداد ذرات در معرض جهش و در نهايت بازتر كردن بازه تغييرات پارامترها صورت گرفت. علي‌رغم آن تغيير چشمگيري در كيفيت جواب حاصل نشد.

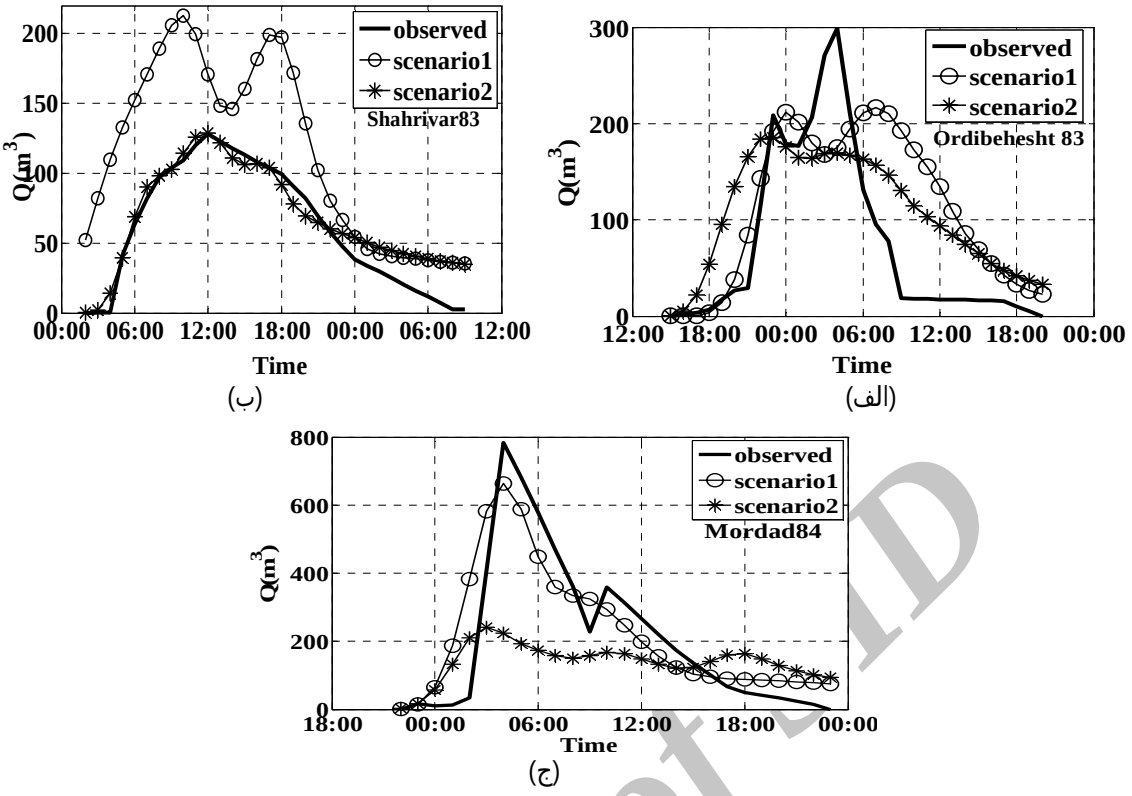
يک راه حل ديگر استفاده از درجات آزادي بيشتر از طريق افزايش تعداد پارامترها است. با توجه به ضرورت كنترل تعداد پارامترها و حفظ قدرت تعميم مدل كاليبره شده در مرحله صحت‌سنجي و اينكه تلاش براي كاليبره بهتر يک رخداد نامتعارف لزوماً عملكرد مطلوبتري را در مرحله صحت‌سنجي نخواهد داشت، درنهايت استفاده از اين راهكار نيز در دستور كار قرار نگرفت. مجموعه پارامترهاي به دست آمده در رخدادهاي مختلف نيز در شكل (۴) نشان داده شده است.



شكل (٤): نحوه تغييرات پارامترهاي كاليبراسيون در رخدادهاي مختلف در رويكرد تک‌رخداده (A متناظر پارامتر ضريب تلفات α مي‌باشد)

همان‌طور كه در شكل (۴) مشاهده مي‌شود، مجموعه پارامترهاي حاصل از سه رخداد از الگوي مشابهي پيروي نمي‌كند و نتايج حاصل از كاليبراسيون تک‌رخدادها قادر به حصول مجموعه پارامترهاي منحصر به فرد براي مدل حوضه نبوده است. از اينرو كاليبراسيون هم‌زمان چند (سه) رخداد اول به عنوان رخدادهاي كاليبراسيون مورد بررسي قرار گرفت. در اين شرايط تابع هدف مدل مجموع نسبي *RMSE* هر رخداد با وزن يكسان لحاظ شده است. اين امر سبب شد كه ارزش هر سه رخداد به صورت يكسان لحاظ شود. نتايج به دست آمده از اين سناريو (سناريو۱) كه در شكل (۵) نشان داده شده است، براي تمامي رخدادها مطلوب نبوده است. به طوري كه هيدروگراف‌هاي رخدادهاي دوم و سوم كمابيش به مانند سناريوي تک‌رخداده كاليبره شده‌اند، ولي رخداد اول به شكل مناسبي شبيه‌سازي نشده است. براي بهبود هيدروگراف رخداد اول در سناريو بعدي (سناريو۲) ضريب اهميت بيشتري براي رخداد اول در نظر گرفته شد. نتايج اين سناريو (شكل (۵)) باعث بهبود شرايط رخداد اول و نامطلوب شدن رخداد سوم گرديد.

مقايسه دو سناريوي گفته شده بر اين امر دلالت دارد كه رخدادهاي يک و سه نمي‌توانند به صورت هم‌زمان با يک دسته پارامتر مشابه كاليبره شوند. بنابراين در سناريو سوم (سناريو۳) ضريب گيرش اوليه رخدادهاي اول و سوم به صورت مجزا و متفاوت از هم در نظر گرفته شد. اين امر باعث افزايش تعداد پارامترهاي كاليبراسيون از ۲۴ عدد به ۳۱ عدد شد. هيدروگراف‌هاي مربوط به اين سناريو (شكل (۶)) نشان مي‌دهد كه گرچه شرايط كاليبراسيون رخداد اول تا حدي بهبود يافته است، اختلاف دبي به ويژه در نقاط پيک هنوز زياد است. در ادامه بهبود نتايج كاليبراسيون بدون افزايش درجات آزادي مدل با هدف تغيير حدود بالا و پايين ضرايب گيرش اوليه در رخدادها (سناريو ۴ و سناريو۵) صورت گرفت. در جدول (۳) خلاصه مشخصه‌هاي سناريوهاي مختلف مطرح، ارائه شده است.



شكل (۵): هيدروگراف‌هاي شبيه‌سازي و هيدروگراف‌هاي تاريخي رخدادهاي كاليبراسيون در سناريو ۱ و سناريو ۲؛ (الف) رخداد اول، (ب) رخداد دوم و (ج) رخداد سوم

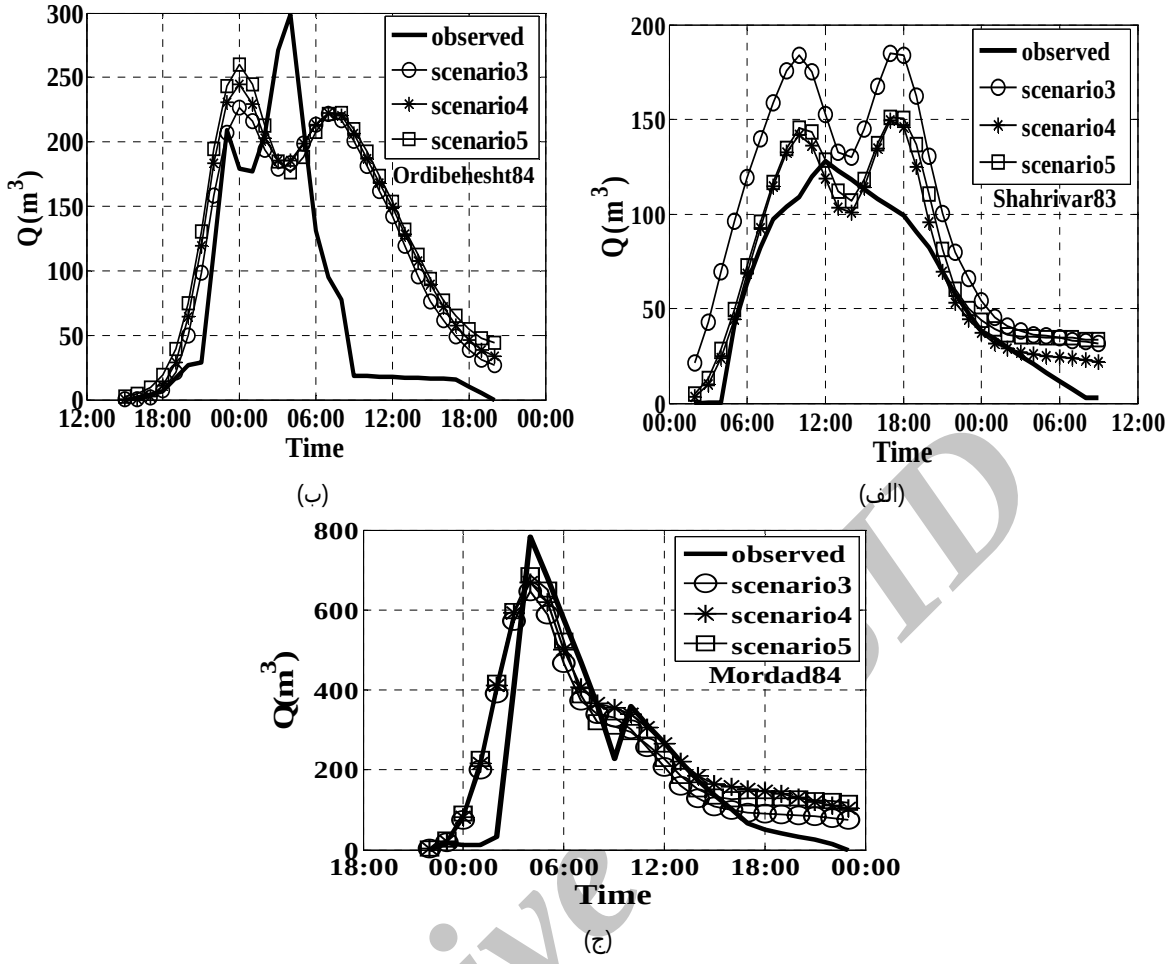
ضريب گيرش اوليه بر نقاط پيک هيدروگراف تاثير چشم‌گيري داشته و افزايش اين پارامتر باعث كاهش دبي پيک هيدروگراف و كاهش آن باعث افزايش دبي پيك خواهد شد، در دو سناريو اخير حدود بالا و پايين اين پارامترها در هر يک از رخدادها به صورت متفاوت در نظر گرفته شد. در سناريو۴براي كاهش دبي نقاط پيک هيدرورگراف رخداد اول، حد بالاي اين پارامتر در رخداد اول از ۰/۲۵ به ۰/۴۵ افزايش يافته و در يک سناريوي ديگر (سناريو۵) براي افزايش دبي نقاط پيک رخداد سوم، حد پايين اين پارامتر در اين رخداد از ۰/۱۵ به ۰/۰۵ كاهش يافت. شكل (۶) هيدروگراف مربوط به دو سناريوي اخير را نشان مي‌دهد.

جد.ول (۳): خلاصه مشخصه‌هاي سناريوهاي بررسي شده در رويكرد سه‌رخداده

تابع هدف	حدود بالا و پايين پارامترها	پارامترهاي كاليبراسيون	
اهميت يكسان سه رخداد	جدول ۲	CN, α, Cs, X_m يكسان براي سه رخداد	سناريو۱
اهميت رخداد ۱ نسبت به رخدادهاي ۲و ۳	جدول ۲	CN, α, Cs, X_m يكسان براي سه رخداد	سناريو۲
اهميت يكسان سه رخداد	جدول ۲	CN, Cs, X_m يكسان براي سه رخداد α يكسان براي رخداد ۲و۳ و متفاوت از رخداد ۱	سناريو۳
اهميت يكسان سه رخداد	افزايش حد بالاي α به ۰/۴۵ در رخداد اول ساير پارمترها مطابق جدول۲	*CN1-CN7* يكسان براي سه رخداد α يكسان براي رخداد ۲و ۳ و متفاوت با رخداد ۱	سناريو۴
اهميت يكسان سه رخداد	كاهش حد پايين α به ۰/۰۵ در رخداد۳ و۲ ساير پارمترها مطابق جدول۲	*CN1-CN7* يكسان براي سه رخداد α يكسان براي رخداد ۲و ۳ و متفاوت با رخداد ۱	سناريو۵

نتايج دو سنايو اخير نشان داد كه مدل در هر دو حالت قابليت كاليبراسيون هر سه رخداد را به شكل مناسب، نزديک به آنچه در سناريوهاي تک‌رخداده ديده شد، داشته است. البته هيدروگراف شبيه‌سازي شده رخداد اول دوپيكه است كه شايد بتوان با افزايش مجدد تعداد پارامترها اين پديده را مرتفع نمود، ليكن نظر به حفظ پارامترها با تعداد كمتر براي تعميم‌پذيري

بیشتر در مرحله صحت‌سنجي تا جايي كه شكل كلي هيدروگراف‌ها مناسب است، انجام آن دنبال نشد.



شكل (٦): هيدروگرافهاي شبيه‌سازي و هيدروگرافهاي تاريخي رخدادهاي كاليبراسيون در سناريوهاي ٣، ۴ و ۵ ؛ (الف) رخداد اول، (ب) رخداد دوم و (ج) رخداد سوم

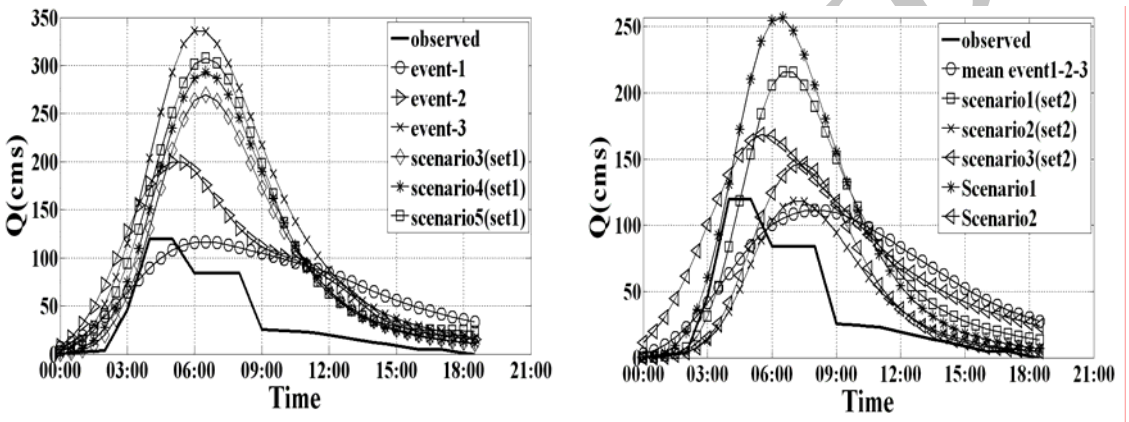
٦- صحت‌سنجي نتايج

نتايج كاليبراسيون هر دو رويكرد تك رخداده و سه رخداده نشان داد كه مدل نتوانست يک دسته پارامتر منحصر به فرد براي مدل حوضه به دست آورد. از طرفي نمي‌توان تنها بر اساس نتايج كاليبراسيون در مورد پارامترهاي مدل قضاوت نمود و عملكرد دسته پارامترهاي مختلف بايد در مرحله صحت‌سنجي (رخداد چهارم) مورد بررسي قرار گيرد. در سناريوهاي ٣، ۴ و ۵ براي هر سناريو دو دسته پارامتر را بسته به اينكه ضرايب گيرش اوليه در رخداد صحت‌سنجي ضرايب مربوط به رخداد اول انتخاب شود يا رخدادهاي دوم و سوم، مطرح خواهد بود. نتايج هر دو حالت در رخداد اعتبارسنجي مورد ارزيابي قرار گرفت. در حالتي كه ضريب گيرش رخداد اول انتخاب شد، مجموعه پارامتر منتخب Set_1 و در حالتي كه ضريب گيرش اوليه ساير رخدادها انتخاب شد. مجموعه پارامتر كانديد Set_2 ناميده شده است. بنابراين در مجموع ١٢ دسته پارامتر براى مدل به دست مى‌آيد كه شامل سه دسته پارامتر در سناريو تك‌رخداده، يک دسته با توجه به متوسط پارامترهاى سه‌رخداد، دسته پارامترهاى سناريو١ و سناريو٢ و شش دسته پارامتر در سناريو هاى ٣ تا ۵ به شرح فوق مى‌باشد.

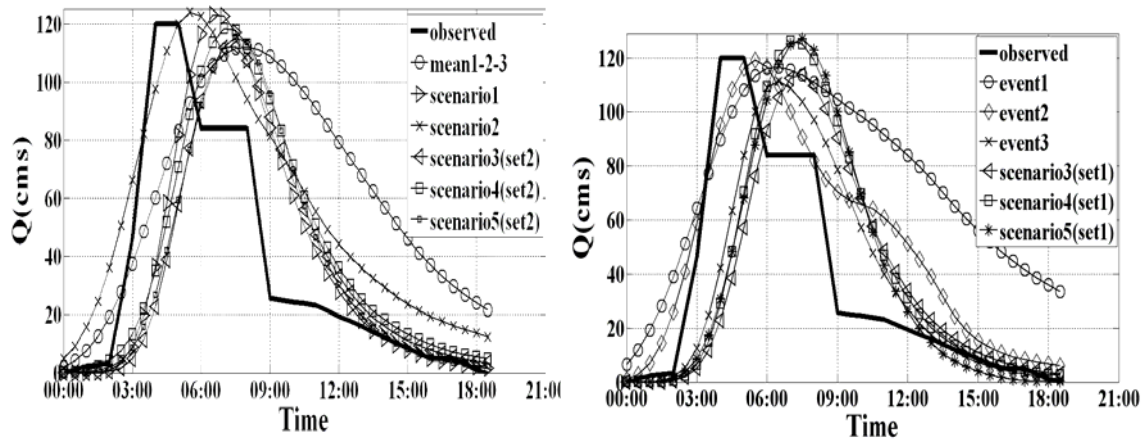
در شكل (٧) نتايج هر يک از سناريوها شامل دسته پارامترهاي حاصل از كاليبراسيون هر يک از رخدادها به شكل منفرد و نيز با هم در دو حالت اخير بر روي رخداد چهارم نشان داده شد. همان‌طور كه ديده مي‌شود، مدل حتي قادر به بازسازي جزئي هيدروگراف رخداد چهارم نبوده و اختلاف چشم‌گيري در نقاط پيک هيدروگراف ديده مي‌شود. از طرفي نمي‌توان از ميان دسته پارامترهاي يادشده پارامترهايي را كه منجر به هيدروگراف شبيه‌سازي شده‌اي نزديک به هيدروگراف مشاهداتي رخداد چهارم است، پيشنهاد كرد. بايد توجه نمود كه

علت اصلي اختلاف بيشتر هيدروگراف‌هاي مشاهداتي و محاسباتي مي‌تواند ناشي از عدم تناسب ضرايب شرايط اوليه بدست آمده در رخدادهاي كاليبراسيون با شرايط اوليه رخداد چهارم باشد كه از يک رخداد به رخداد ديگر متفاوت است. بنابراين كاليبراسيون مجدد اين رخدادها ضرورت مي‌يابد.

فرايند بازكاليبراسيون پارامترهاي گيرش اوليه با استفاده مجدد از الگوريتم بهينه‌سازي گرچه ممكن است، چندان منطقي به نظر نمي‌رسد. علت آن است كه تغيير آنچه كه در مرحله كاليبراسيون بدست آمده به نفع نيل به نتيجه بهتر در مرحله صحت‌سنجي مفهوم صحت‌سنجي عادلانه را خدشه‌دار مي‌نمايد. از طرف ديگر همان‌طور كه گفته شد متفاوت بودن ضرايب گيرش اوليه در رخدادهاي كاليبراسيون و صحت‌سنجي (بازكاليبراسيون) نه تنها غيرمنطقي نيست، بلكه ضروري است. از اين‌رو مفهوم بازكاليبراسيون در اين مطالعه بدين معني معرفي استفاده شده است كه در هر يک از مجموعه پارامترهاي كانديد با ضرب مقدار ثابتي در ضريب ضرايب گيرش اوليه هر هفت زيرحوضه، مجموعه پارامترهايي به دست آيند كه تا حد ممكن دبي پيک رخداد چهارم را بازسازي نمايند. اين كار بدين مفهوم است كه گرچه متفاوت بودن ضرايب گيرش اوليه در رخدادهاي كاليبراسيون و صحت‌سنجي به رسميت شناخته مي‌شود، ليكن نسبت‌هاي بين ضرايب فوق در زيرحوضه‌هاي مختلف در مرحله صحت‌سنجي همان نسبت‌هايي خواهند بود كه در مرحله كاليبراسيون بدست آمده‌اند. اين مفهوم از نظر فيزيكي نيز منطقي‌تر است. شكل (۸) هيدروگراف رخداد چهارم را پس از بازكاليبراسيون ضرايب گفته شده نشان مي‌دهد.



شكل (۷): هيدروگراف رخداد چهارم در صحت‌سنجي در سناريوهاي مختلف



شكل (۸): هيدروگراف رخداد چهارم پس از بازكاليبراسيون در سناريوهاي مختلف

همان‌طور كه ديده مي‌شود، نتايج به مراتب بهتر شده و مجموعه پارامترهاي كاليبره شده عملكرد بهتري را در تطبيق با رخداد چهارم نشان مي‌دهد. بيشترين اختلاف در زمان رسيدن به پيک ديده مي‌شود.

پس از بازكاليبراسيون دسته پارامترهايي كه مقدار پارامترهاي ضرايب گيرش اوليه آنها خارج از محدوده از نظر فيزيكي قابل قبول ۰/۴۵–۰/۵ قرار گرفته است حذف مي‌شوند. بنابراين سناريو ۵ (set_1) از اين مجموعه حذف گرديد (جدول (۴)).

جدول (٤): مقادير پارامتر آلفا در رخدادهاي مختلف پس از باز كاليبراسيون

شماره		RMSE	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	وضعيت
١	رخداد اول	۴۳/١	٠/٢۴	٠/٢۴١	٠/٢٣٨	٠/٢۴۴	٠/٢٢٣	٠/٢٣۶	٠/٢۴٨	Y
٢	رخداد دوم	٢٣/۶١	٠/٣۴٧	٠/٣٠٨	٠/٣٧	٠/٣۵٨	٠/٣٣۴	٠/٣۶٢	٠/٣۵٢	Y
٣	رخداد سوم	٣۶/۶	٠/۴١	٠/۴٢	٠/۴٣۵	٠/۴١۵	٠/۴١	٠/٣٩۵	٠/٣٩١	Y
۴	سناريو٣ (set_1)	۴٧/٨	٠/٣۴٧	٠/٣۴	٠/۵٢۵	٠/۴۴	٠/٣۵	٠/۵١	٠/۴٢	N
۵	سناريو۴ (set_1)	۴٧/۵	٠/۴٨	٠/۵۵	٠/٣۵٣	٠/۵٠۴	٠/۵١	٠/٣٧	٠/٣۶	N
۶	سناريو ۵ (set_1)	۴٧/٨	٠/٨٣۶	٠/٧٣٧	٠/٢۵٩	٠/٢۴١	٠/٩٣٢	٠/٢٢	٠/٢۴	N
٧	متوسط ١-٢-٣	۴۵/۵	٠/٢٢	٠/٢١	٠/٢٣	٠/٢٢۵	٠/٢١	٠/٢٢	٠/٢٢٢	Y
٨	سناريو ١	۴١/٣	٠/٣٨	٠/٣۵	٠/۴۵	٠/۴٣	٠/٢٨	٠/۴۴٨	٠/٣۶	Y
٩	سناريو ٢	٢٨/٢	٠/٢٨	٠/٢٧	٠/٣۴	٠/٣۶	٠/٢٩	٠/٢٧	٠/٢۶	Y
١٠	سناريو ٣ (set_2)	۴٧	٠/٣۶	٠/٣٧	٠/٢٨١	٠/٣۴٧	٠/٣٢١	٠/٣٧١	٠/٣۶۴	Y
١١	سناريو ۴ (set_2)	۴۴/١	٠/۴٢	٠/١۶	٠/٢٢۴	٠/٣٧۶	٠/٢۴٨	٠/۴١	٠/٣٩٢	Y
١٢	سناريو ۵ (set_2)	۴٧/١	٠/٢۶١	٠/٢٢	٠/٢۵٢	٠/٢٣۴	٠/٢۶۶	٠/١٨۶	٠/٢٠٧	Y

از بين دسته پارامترهاي باقيمانده دسته يا دسته‌هايي با تابع هدف بهتر انتخاب شده است، بنابراين دسته پارامترهايي كه به ازاي آنها مقدار تابع هدف مدل از مقدار۴٠ بيشتر بوده از مجموعه پارامترهای كانديد حذف گرديد. در نهايت از بين ١٢ دسته پارامتر مذكور، ٣ دسته به عنوان دسته پارامترهاي قابل قبول حوضه معرفي شد. مقادير اين پارامترها و مقدار تابع هدف در هر دسته پارامتر در جداول (۴) و (۵) نشان داده شده است. مجموعه پارامترهاي رخداد٢، رخداد٣ و سناريو ٢ با عملكرد تابع هدف تقريباً يكسان به عنوان پارامترهاي مدل حوضه پيشنهاد مي‌شود.

جدول (۵): مقادير ساير پارامترهاي كاليبراسيون در دسته پارامترهای پيشنهادی برای حوضه

	رخداد٢	رخداد٣	سناريو دو		رخداد٢	رخداد٣	سناريو دو
CN_1	٧۵/٩۴	٨٢/۵	۶١/٣٨	Cs_1	٠/۵٨	٠/٢٨٨	٠/۵٩
CN_2	۶١/٧۴	۵٨/٨	٨۶/٨	Cs_2	٠/٢	٠/٣١۵	٠/۴۵۶
CN_3	٨١/٩١	۶٣/٢۴	٧۶/۶٨	Cs_3	٠/٢٠٢	٠/٣٩٧	٠/۵۵۴
CN_4	۶١/٠١	۶٠/١	۶٠/۵٣	Cs_4	٠/٢۴۵	٠/۵٧١	٠/۵٩
CN_5	۵٢/٧	٨٣/٨٢	۶٠/١١	Cs_5	٠/٢	٠/۴٨	٠/۴١
CN_6	٨٣/٩٨	٧۴/۴	٨۵/۴۴	Cs_6	٠/٢١٣	٠/٣۴٣	٠/٢٩
CN_7	٨١/۴٩	٨١/٢	٧٩/٠٢	Cs_7	٠/٢٣	٠/٢٩	٠/٢۴٢
X_{m1}	٠/٢٨٣	٠/٢١	٠/۴۴				
X_{m2}	٠/٣٩٢	٠/٢٧	٠/٣۴				
X_{m3}	٠/۴٨	٠/٢٣٢	٠/۴١				

٧ - جمع‌بندي و نتيجه‌گيري

در اين تحقيق مدل كاليبراسيون خودكار مدل مفهومي HEC-HMS با استفاده از الگوريتم PSO در قالب مدل تركيبي PSO-HMS توسعه يافته و در حوضه تمر از زير حوضه‌هاي گرگانرود به عنوان مطالعه موردي پياده‌سازي گرديد. اين امر از طريق كدنويسي الگوريتم بهينه‌سازي در نرم‌افزار مطلب و فراخواني و اجراي HEC-HMS در اين محيط از طريق محيط حدواسط DOS و بدون كاهش سرعت اجراي مدل هيدرولوژيكي ميسر شد. از بين چهار رخداد سيلاب مورد اعتماد ثبت شده، سه رخداد به عنوان رخدادهاي كاليبراسيون و رخداد چهارم به عنوان رخداد صحت‌سنجي در نظر گرفته شد. مساله در دو رويكرد تك‌رخداده و سه‌رخداده ارزيابي شد. نتايج رويكرد تك‌رخداده با الگوريتم كاليبراسيون شبه‌خودكار موجود در مدل HEC-HMS تحت عنوان الگوريتم جستجوي محلي نلدروميد مقايسه شد كه حاكي از كارايي مدل تركيبي توسعه يافته بود.

در رويكرد سه رخداده سناريوهاي مختلفي با افزايش تعداد پارامترهاي وابسته به گيرش اوليه و تغيير حدود بالا و پايين

پارامترهاي كاليبراسيون مورد بررسي قرار گرفت. هر يک از سناريوهاي معرفي شده منجر به ارائه دسته پارامترهاي مختلفي شد كه همگي در رخداد صحت‌سنجي ارزيابي شدند. بازكاليبراسيون براي به دست آوردن مقادير جديد براي گيرش اوليه انجام شد و دسته پارامترهاي از نظر فيزيكي غيرقابل قبول از مجموعه پارامترهاي كانديد حذف گرديدند.

در نهايت دسته پارامترهاي با تطابق بهتر از منظر شكل هيدروگراف شبيه‌سازي شده و تابع هدف انتخاب و معرفي شدند. نتايج تحقيق نشان داد كه منطبق بر آنچه در ديگر مطالعات كاليبراسيون مدل‌هاي هيدرولوژيكي گزارش شده است، فرايند كاليبراسيون لزوماً منتهي به پيشنهاد دسته پارامترهاي منحصر به فرد نخواهد شد.

۸- مراجع

[۱] ثقفيان، بهرام، گزارش مطالعات فيزيوگرافي طرح هشدار سيل گرگانرود، موسسه تحقيقات آب، پژوهشكده 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- زيرنويس ها

[1] Shuffled Complex Evolution
[2] Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
[3] Particle Swarm Optimization