Archive of SID

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۹، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۴، ص. ۶۲۶-۶۱۵

Journal of Water and Soil
Vol. 29, No. 3, Jul.-Agu. 2015, p. 615-626

# واسنجی و اعتباریابی پارامترهای مدل HEC-HMS با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)-رویکرد تک هدفه

رضا گرمه‌ای[۱]- علیرضا فرید حسینی[۲*]- سیدمجید هاشمی نیا[۳]- علی حجتی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۰۹

## چکیده

مدیریت حوضه‌های آبریز مستلزم استفاده از الگوهای هیدرولوژیکی است که نقش مهمی را در پیش‌بینی پاسخ حوضه به فرآیندهای بارش-رواناب ایفا می‌کنند. از طرفی ارزیابی رفتار حوضه نیز با الگوهای ریاضی هیدرولوژیکی مستلزم واسنجی مدل با هدف تخمین و برآورد پارامترهای حوضه با بیشترین تطابق خروجی مدل با مجموعه‌ای از مقادیر مشاهداتی است. مهم‌ترین هدف واسنجی الگوهای بارش-رواناب یافتن مقادیر بهینه مدل به گونه‌ای که بتوان بهترین منحنی را برای آبنمودهای مشاهداتی و محاسباتی برازش داد. در این پژوهش، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به عنوان مدل بهینه‌ساز عمل می‌کنند. مدل تلفیقی ارائه شده بر حوضه سد کارده واقع در استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار گرفته است. واسنجی مدل در رویکرد تک هدفه و با دو تابع هدف NASH و RMSE به طور جداگانه در رخدادهای مختلف انجام گرفت. نتایج حاکی از قابلیت مدل در واسنجی رخدادها تا حد قابل قبولی بود. هم‌چنین نتایج واسنجی با چهار معیار متفاوت ارزیابی شد. اعتباریابی در انتها با دسته پارامترهای حاصل از واسنجی انجام شد. نتایج نشان داد که مدل عملکرد چندان مطلوبی ندارد. لذا پیشنهاد یک مجموعه پارامتر بر اساس واسنجی رخدادهای منفرد و صحت‌سنجی تک رخداد باقی‌مانده ممکن نیست.

**واژه‌های کلیدی:** بارش-رواناب، حوضه آبریز، صحت‌سنجی، مدل بهینه‌ساز، واسنجی، مدل هیدرولوژیکی،

## مقدمه

پیش‌بینی دقیق‌تر رواناب خروجی با توجه به انواع روش‌های مدیریت و بهینه‌سازی حوضه آبریز، می‌تواند در بهینه‌سازی و مدیریت حوضه بسیار موثر باشد. یکی از مهم‌ترین بخش‌های شناخت حوضه مربوط به ارائه مدلی به منظور شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب آن حوضه است. یکی از چالش‌های مهم در مطالعه فرآیند بارش-رواناب در حوضه‌های آبریز، یافتن پارامترهای معرف فرآیندهای مختلف چرخه هیدرولوژیکی در فرآیندی با عنوان واسنجی است. تخمین و برآورد این پارامترها در حضور تعداد قابل ملاحظه‌ای از پارامترها و با توجه به پیچیدگی روابط حاکم در مدل، با دقت کافی به شکل دستی و در یک فرآیند مبتنی بر حدس و خطا بسیار زمانبر و اغلب غیرممکن است. در چنین شرایطی استفاده از روش‌های واسنجی خودکار که مبتنی بر روش‌های جستجوی نظام مند در فضای چندبعدی پارامترهای مدل بوده، بسیار سودمند است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری، ابزار مناسبی به عنوان موتورهای جستجوی کارامد در این راستا هستند. واسنجی دستی مدل‌های هیدرولوژیکی از اوایل دهه ۶۰ میلادی و واسنجی خودکار از اواخر دهه نامبرده مورد توجه قرار گرفت و تحقیقات زیادی برای بهبود فرآیند واسنجی 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.

کمالی و موسوی (۸) مدل مفهومی HEC-HMS را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO چند منظوره کالیبره کردند. در این تحقیق مدل در دو بخش تک و چندهدفه بررسی شده است. در بخش پایانی، بهینه‌سازی چندهدفه در شرایط معلوم بودن اولویت مدل‌ساز در آبنمود، به صورت ترکیبی از مدل بهینه فازی و الگوریتم PSO تحلیل گردید. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد چندهدفه فازی می‌تواند عملکرد مناسبی را در یافتن یک جواب موثر و کارآمد از مقادیر پارامترهای مدل داشته باشد.

انسانیت (۵) با استفاده از الگوریتم بهینه سازی PSO به

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار، مربی و دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email:farid-h@um.ac.ir)

www.SID.ir

Archive of SID



کالیبراسیون مدل بارش رواناب ARNO پرداخت. در این تحقیق، حوزه آبریز رودخانه کرج در بالادست ساختگاه سد امیرکبیر مورد مطالعه قرار گرفت. این کار با جدا کردن سهم برف از مجموع نزولات و اضافه نمودن مجدد برف ذوب شده انجام گردید. در نهایت مدل مفهومی بارش رواناب ARNO توسط الگوریتم بهینه سازی PSO به صورت خودکار کالیبره شد و ضریب کارآیی ناش–ساتکلیف در مرحله کالیبراسیون برای حوزه کوهستانی کرج برابر ۰/۸۱ به دست آمده است.

جین (۷) با استفاده از الگوریتم PSO یک مدل بارش–رواناب شبکه عصبی که در حوزه رودخانه سانجای به کار گرفته شده است را کالیبره کرد. مدل در سناریوهای مختلف تک رخداده و چندرخداده و تحت معیار عملکردهای متفاوت ارزیابی و نتایج بر روی رخدادهای مختلف واسنجی نشده صحت‌سنجی شد. واسنجی چندهدفه با درنظر گرفتن هم‌زمان دو یا سه تابع هدف صورت گرفت و نتایج نشان داد که انتخاب دو تابع هدف مناسب برای واسنجی کردن مسائل چندهدفه مناسب می‌باشد.

دووان و همکارانش (۲) مهم‌ترین چالش‌های موجود در واسنجی مدل‌های هیدولوژیکی را در صورت عدم خطای ساده‌سازی در ساختار مدل، در ۵ دسته معرفی نمودند. این چالش‌ها شامل وجود چند ناحیه بهینه و بیش از یک نقطه همگرایی، وجود نقاط بهینه موضعی، عدم پیوستگی فضای موجه، حساسیت پایین جواب‌ها در نواحی بهینه و روابط غیرخطی پارامترها و سطح پاسخ غیر محدب می باشد. در این تحقیق، الگوریتم SCE ، تشریح شده و از آن‌جا که کارایی مناسب این الگوریتم به پارامترهای آن بستگی زیادی دارد، نحوه به دست آوردن این پارامترها تبیین شده است.

سروشیان و همکارانش (۱۵) عواملی را که باعث می‌شود یک مدل نتواند پارامترهای منحصر به فردی را به‌دست آورد، مورد بررسی قرار دادند. به عنوان مثال استفاده از داده‌های مربوط به دوران خشک در فرآیند واسنجی، برای پیش‌بینی دوره مرطوب مناسب نیست. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که اثر متقابل پارامترهای مدلسازی بر روی یکدیگر باعث می‌شود که برای مدل نتوان یک مجموعه پارامتر منحصر به فرد به‌دست آورد.

اکهاردت و آرنولد (۴) واسنجی را بر روی مدل SWAT-G انجام دادند. این مدل حوزه را به تعدادی زیر حوزه تقسیم می‌کند که هر یک دارای تعدادی پارامتر واسنجی می‌باشد. برای به‌دست آوردن مقادیر پارامترها از الگوریتم بهینه‌سازی SCE و تابع هدف RMSE استفاده شد. هرچند که مقادیر دبی پیک به صورت دست‌پایین تخمین زده شد، ولی بررسی عملکرد نتایج واسنجی مدل با تابع NASH مقدار ۰/۸۶ را نتیجه داد. عدم کارایی مناسب مدل در نقاط پیک و از طرفی به‌دست آمدن حدود بالا و پایین پارامترها به عنوان مقادیر بهینه، نشان دهنده ضرورت جستجوی راهکارهایی به منظور بهبود مدل بوده است.

میوتلا (۱۰) واسنجی خودکار مدل‌های توزیعی را بررسی نموده و روش‌هایی برای کاهش تعداد پارامترهای واسنجی این مدل‌ها ارائه نمودند. مطالعات بسیار زیادی در زمینه چالش‌های مختلف مطرح در مسأله واسنجی 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 رخدادپایه نیز موضوعیت دارد. در واسنجی خودکار مدل‌های رخدادپایه نیز می‌توان به نمونه‌هایی از قبیل کار مووسا و همکاران (۹) اشاره کرد.

واسنجی خودکار مدل مفهومی بارش–رواناب HEC-HMS[1] در حوضه سد کارده واقع در استان خراسان رضوی بررسی شد. فرآیند جستجو و گزینش پارامترهای مدل حوضه با الگوریتم بهینه‌سازی PSO[2] به عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در این راستا انجام شده است. سناریوهای مختلفی با درجات آزادی متفاوتی برای مدل ارائه شده است و نتایج آن بر روی رخداد صحت‌سنجی ارزیابی شده است.

## مواد و روش‌ها

### داده‌ها و موقعیت

حوضه آبریزسدکارده با ۵۴۳ کیلومتر مربع مساحت، طول آبراهه اصلی۴۴/۲۴ کیلومتر، در شمال خراسان رضوی بین عرض‌های جغرافیایی ´۴۴ °۳۶ و ´۵۸ °۳۶ شمالی و طول ´۵۹ °۴۵ و ´۲۷ °۴۵ شرقی قرار دارد. کارده یکی از حوضه‌های معرف کشور و مجهز به ابزارهای مناسب برای اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها است. رودخانه کارده مهم‌ترین و تنها رودخانه دایمی این حوضه از ذوب برف در ارتفاعات کپه داغ–هزار مسجد و نیز دو چشمه کارستی (خرکت و بزرگ) واقع در شمال حوضه سرچشمه می‌گیرد. در شکل(۱) موقعیت پنج زیرحوضه، جانمایی آن ها بر روی نقشه ایران و هم‌چنین محدوده مطالعاتی حوضه سدکارده نمایش داده شده است.

### نرم‌افزار HEC-HMS

HEC-HMS نرم‌افزار توسعه یافته توسط مرکز هیدرولوژی مهندسی ارتش آمریکا است که برای شبیه‌سازی بارش–رواناب تهیه

1 -Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System

2 -Particle Swarm Optimization

www.SID.ir

Archive of SID



شده و امروزه کاربرد وسیعی دارد. شبیه‌سازی حوضه با معرفی اجزای زیرحوضه و اجزای بازه روندیابی امکان‌پذیر است. در این تحقیق از نسخه ۴ نرم‌افزار استفاده شده است.

این نرم‌افزار چهار مدول تلفات، تبدیل بارش مازاد به رواناب، دبی پایه و روندیابی با یکدیگر ترکیب شده که هر یک قسمتی از محاسبات مورد نیاز برای به دست آوردن آبنمود سیلاب و شبیه‌سازی فرآیند بارش را انجام می‌دهند و در هر یک، روش‌های مختلفی برای محاسبه آبنمود پیشنهاد شده است. این پژوهش برای محاسبه تلفات روش SCS-CN، برای تبدیل بارش به رواناب از روش کلارک و برای روندیابی در کانال‌های اصلی از روش ماسکینگام استفاده شده است. محاسبه تلفات با روش SCS مستلزم تعیین شماره منحنی رواناب (CN) و تلفات اولیه ($I_a$) است. حدود بالا و پایین عدد منحنی رواناب به عنوان اولین پارامتر واسنجی در هر زیرحوضه با توجه به نقشه کاربری اراضی حوضه و درصد مساحت تحت پوشش هر کاربری به‌دست آمده است. با فرض S به عنوان پتانسیل تلفات حوضه و $\alpha$ به عنوان ضریب تلفات، مقدار گیرش اولیه با توجه به رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$I_a = \alpha \times S \qquad (۱)$$

ضریب تلفات در هر حوضه بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ تغییر نموده و به عنوان دومین پارامتر واسنجی در نظر گرفته شده است. برای تبدیل بارش به رواناب دو پارامتر زمان تمرکز حوضه و ضریب ذخیره باید واسنجی شوند. برای کاهش تعداد پارامترهای واسنجی زمان تمرکز از رابطه پیشنهادی سازمان حفاظت خاک مطابق رابطه ۲ برآورد شده است. در رابطه فوق L طول رودخانه بر حسب متر، عدد منحنی رواناب CN و y متوسط شیب حوضه و $t_c$ زمان تمرکز بر حسب ساعت محاسبه می شود. با توجه به رابطه زمان تمرکز و ضریب ذخیره می‌توان ضریب ذخیره هر زیر حوضه را از رابطه (۳) محاسبه نمود (۱۶):

$$t_c = 1.67 \times \frac{L^{0.8} \times (S+1)^{0.7}}{1900 \times y^{0.5}} \qquad (۲)$$

$$\frac{R}{R+t_c} = const \qquad (۳)$$

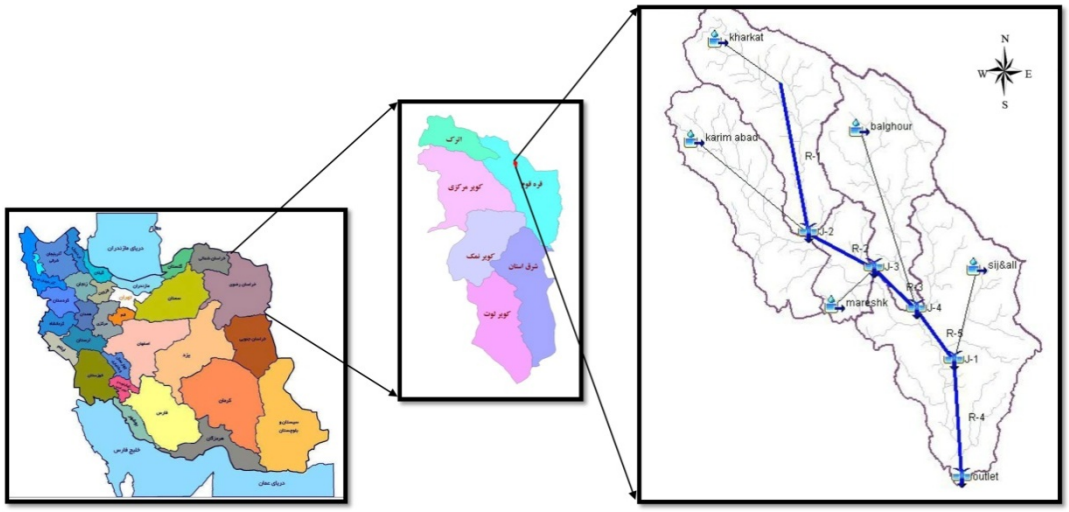
که مقدار ثابت (ثابت ضریب ذخیره) بین ۰/۲ تا ۰/۶ متغیر بوده و به عنوان سومین پارامتر واسنجی در نظر گرفته شده است. در روش روندیابی ماسکینگام پارامتر $K_m$ با استفاده از اطلاعات برآورد شده و پارامتر $X_m$ واسنجی می‌شود. با توجه به این که حوضه مرکب از ۵ زیر حوضه با ۳ پارامتر در هر زیر حوضه و ۵ بازه روندیابی با ۱ پارامتر در هر بازه است، مدل حوضه مرکب از ۲۰ پارامتر واسنجی خواهد بود. جدول ۱ پارامترهای واسنجی و حدود بالا و پایین در نظر گرفته شده برای هر پارامتر را نشان می‌دهد.

الگوریتم PSO (۱۱) یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری 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 مسئله بهینه‌سازی n فرض شود، این دو بردار در هر تکرار از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

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

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

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.




**شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز سد کارده واقع در استان خراسان رضوی**

**Figure 1- Position of kardeh dam basin in khorasan razavi province**

www.SID.ir

Archive of SID



جدول ۱- حدود بالا و پایین پارامترهای واسنجی

Table 1- limitation of Up and down calibration parameters

| پارامتر Parameter | زیرحوضه Sub Basin | حد پایین down limit | حد بالا up limit |
|---|---|---|---|
| شماره منحنی رواناب Curve Number | 1 | 70 | 90 |
| | 2 | 58 | 82 |
| | 3 | 62 | 84 |
| | 4 | 71 | 93 |
| | 5 | 60 | 85 |
| ضریب گیرش اولیه Initial Abstraction Coefficient | 5 | 0/15 S | 0/25 S |
| ضریب ذخیره Storage Coefficient | 5 | 0/2 | 0/6 |
| X ماسکینگام Muskingum X | 5 | 0/2 | 0/5 |

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 موردنظر 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 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 آشفتگی PSO (۸) و جهش نخبه (۷) 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 مسئله بعضاً می‌تواند در فرار از بهینه محلی مؤثر واقع شود. استفاده از الگوریتم PSO مستلزم معرفی یک تابع هدف است که در این تحقیق تابع RMSE و NASH به طور جداگانه به عنوان معیار ارزیابی انتخاب شده‌اند و به صورت رابطه ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i-1}^{n} We_i^2 * (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i-1}^{n} We_i^2}} \quad (۶)$$

$$NASH = 1 - C_{NS} = \frac{\sum_{i-1}^{n} \left(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}\right)^2}{\sum_{i-1}^{n} \left(Q_{obs,i} - \overline{Q}_{obs}\right)^2} \quad (۷)$$

در روابط فوق $Q_{\text{obs}}$ مقدار دبی مشاهداتی، $Q_{sim}$ مقدار دبی شبیه-سازی، $n$ تعداد گام زمانی در هر رخداد و $We$ ضریب وزنی نقاط مختلف آبنمود است. با توجه به این که در ارزیابی هر آبنمود نقاط پیک از اهمیت بیشتری دارند، مقدار این ضریب برای نقاط پیک بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است (۴).

## نتایج و بحث

هر رخداد با توجه به تابع هدف موردنظر به طور جداگانه مورد واسنجی قرار گرفت. هیدروگراف های حاصل از واسنجی هر یک از رخدادها در شکل (۲) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود مدل HMS-PSO قابلیت واسنجی آبنمودهای هر چهار رخداد را تا حد قابل قبولی داشته است. بیشترین اختلاف در رخداد دوم مشاهده می‌شود. آبنمود این رخداد دارای دو پیک متوالی بوده و پس‌ازآن دبی به‌سرعت و به صورت نامتعارف نزول نموده است. این مسئله می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری و یا وقوع پدیده‌ای خاص باشد.

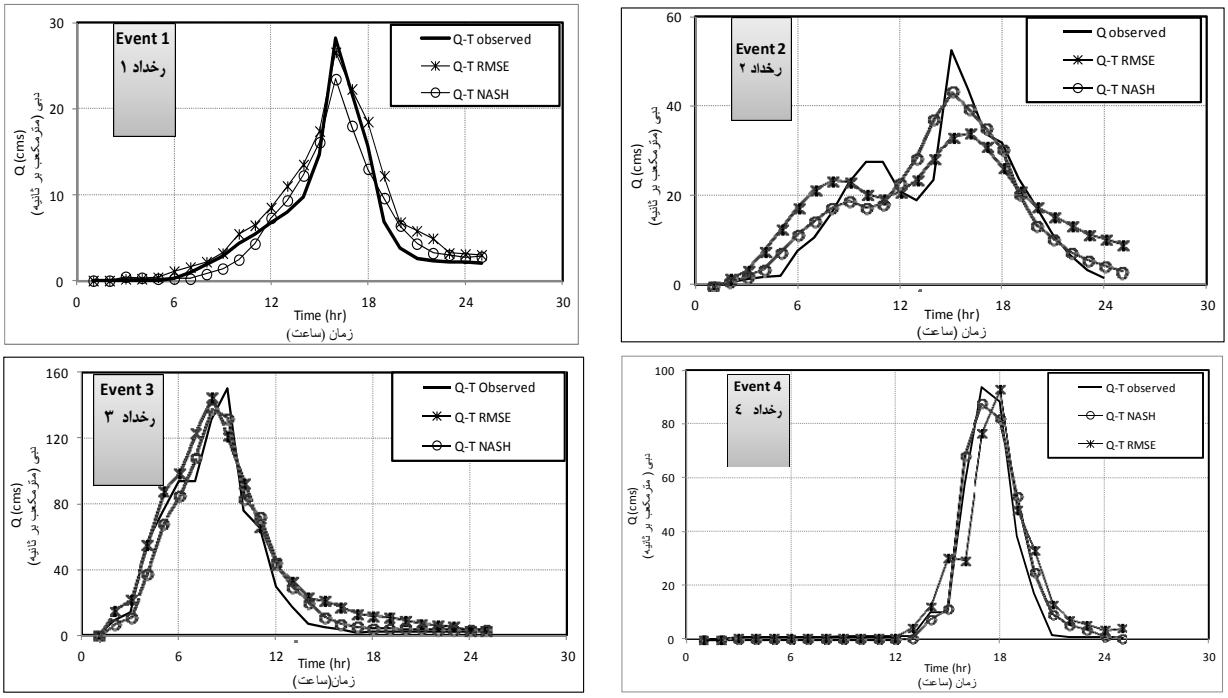
برای بهبود نتایج، مدل با تعداد تکرارهای بالاتر و مقادیر اولیه متفاوت اجرا شد. ولی تغییر چشم‌گیری در آن حاصل نگردید. یک راه‌حل دیگر برای مدل‌سازی بهتر این رخداد، دادن درجات آزادی بیشتر به مدل می‌باشد که البته با توجه به این که مدل تک رخداده بوده و از واسنجی رخدادهای مختلف، مجموعه پارامترهای مختلفی حاصل می‌شود، لذا تلاش برای بهتر واسنجی شدن تنها یک رخداد لزوماً عملکرد مطلوب‌تری را در صحت‌سنجی نخواهد داشت. در شکل ۳ نمودار پراکنش دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی نیز توسط دو تابع هدف مذکور ارائه شده است. هم‌چنین در شکل ۴ تغییرات هر یک از پارامترهای به دست آمده از واسنجی رخدادها در هریک از زیر حوضه‌ها مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود پراکندگی پارامترها به ازای رخدادهای مختلف قابل توجه بوده و از الگوهای

www.SID.ir

Archive of SID

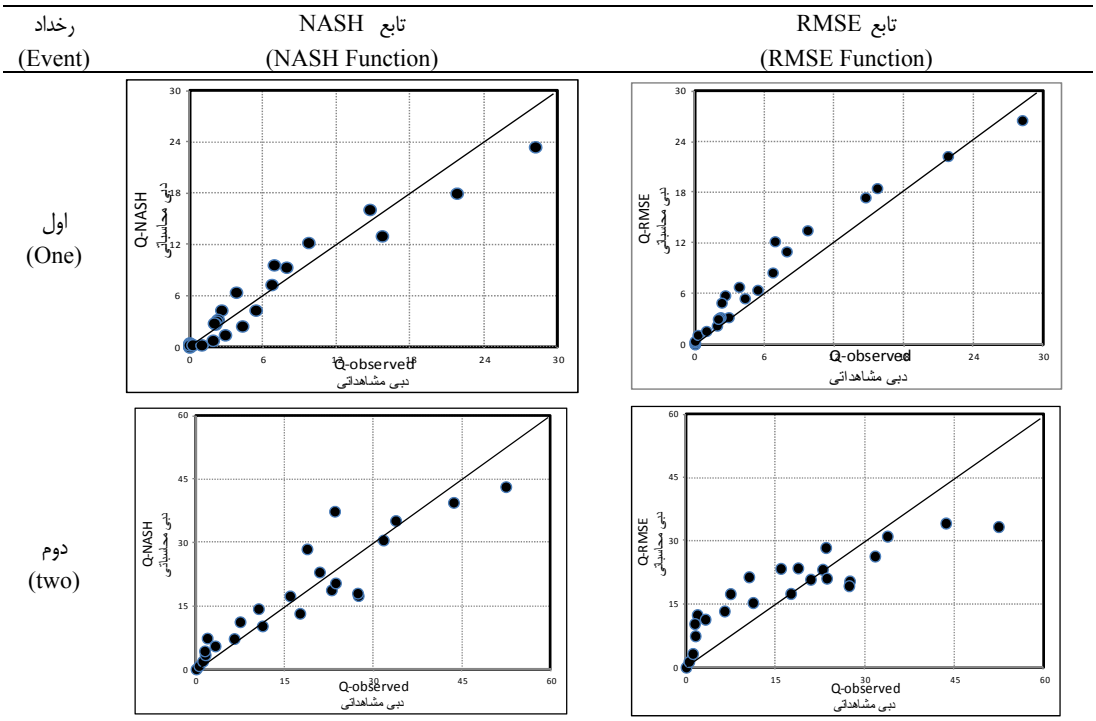


مشابهی پیروی نمی‌کند، بدین معنی که با مقایسه آن‌ها نمی‌توان پارامترهای واحد مناسبی را برای کل حوضه تخمین زد.




**شکل ۲- مقایسه آبنمودهای محاسباتی و مشاهداتی در هریک از رخدادها**

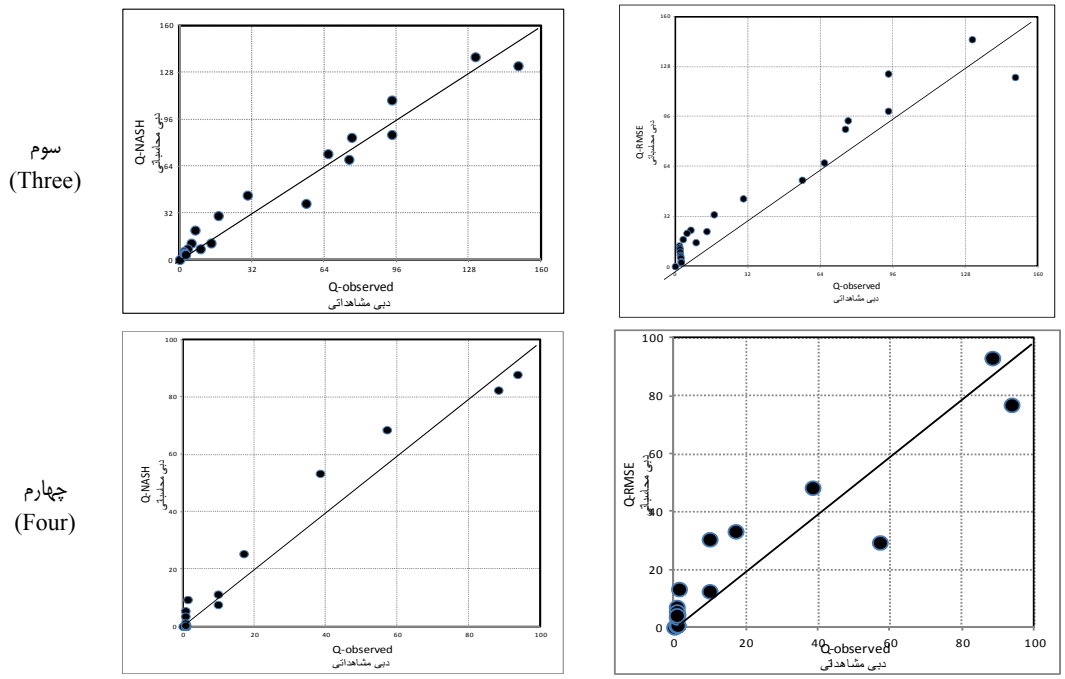
**Figure 2- Comparison of simulated and observed hydrograph on each event**




www.SID.ir

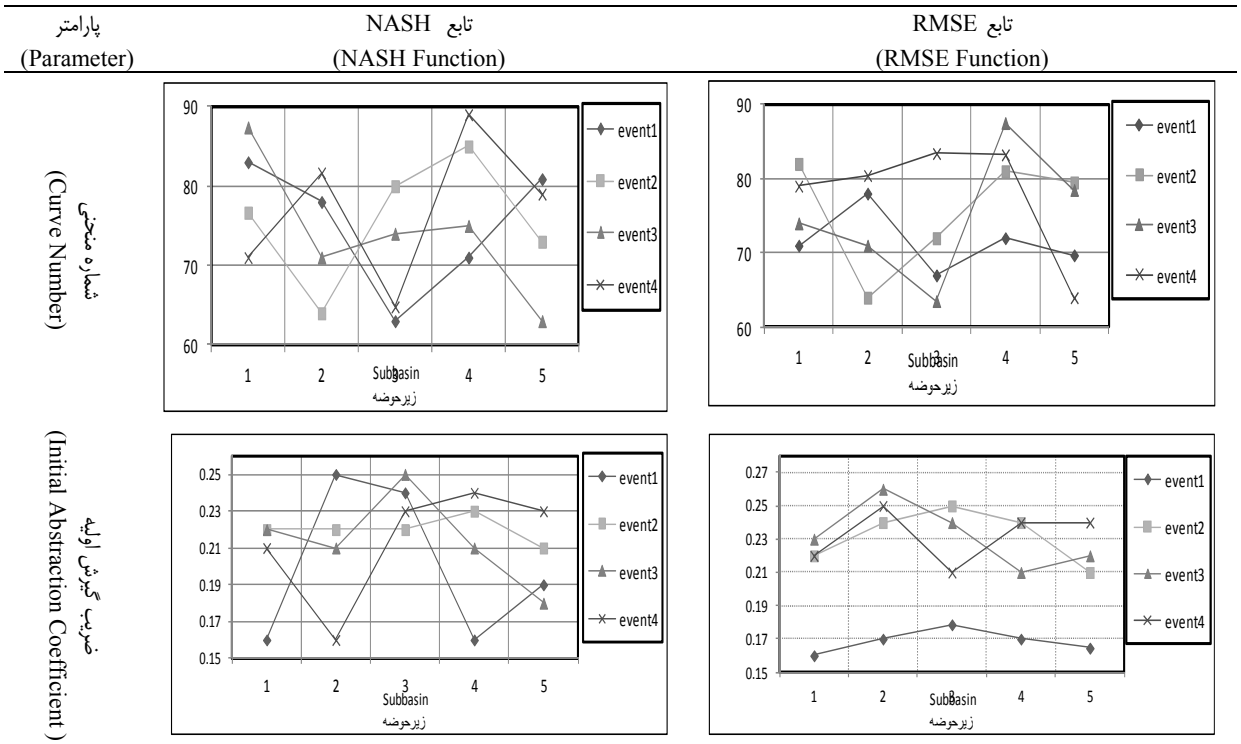
Archive of SID






**شکل ۳- نمودار پراکنش دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی**

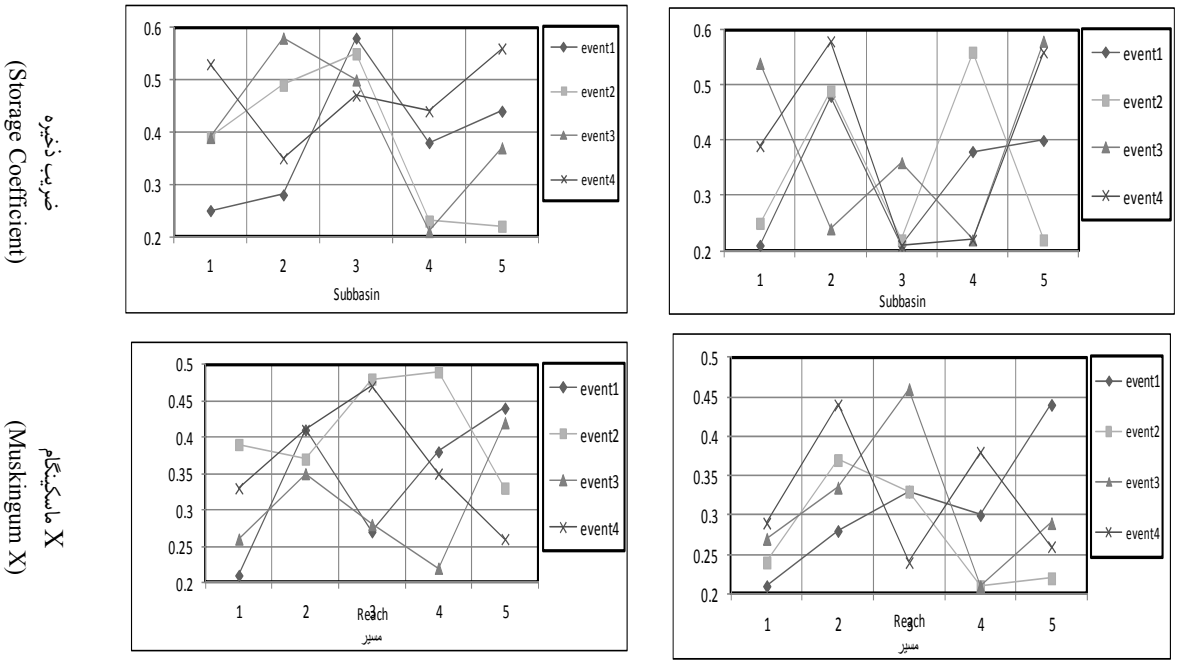
**Figure 3- Distribution of simulated and observed discharge**




www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ٤- تغییرات دسته پارامترهای به دست آمده از واسنجی رخدادها در هریک از زیر حوضه‌ها**
**Figure 4- Variation of calibration parameter on each sub basin**

**ارزیابی مدل با معیارهای عملکرد**

در این پژوهش، عملکرد نتایج واسنجی توسط چهار معیار عملکرد سنجیده می‌شود. اولین معیار ارزیابی تابع DRMS می‌باشد. این تابع انحراف استاندارد خطای مدل را نشان می‌دهد. مقادیر کمتر، عملکرد بهتر مدل را نشان می‌دهد. تابع PBIAS نشان می‌دهد که آیا به طور متوسط مقادیر دبی شبیه‌سازی بیشتر از دبی محاسباتی است یا نه؟ مقادیر مثبت نشان‌دهنده تخمین دست پایین دبی است، حال آن که مقادیر منفی نشان‌دهنده تخمین دست بالای مدل است. معیار سوم شاخص نرمال‌شده مدل‌سازی است. معیار PME نسبت خطای Noise را به خطای استفاده از مدل ساده نشان می‌دهد که بهترین مقدار آن یک است. این معیار فرض می‌کند که تخمین دبی در گام بعدی با توجه به مقادیر دبی مشاهداتی در گام فعلی به دست می‌آید. مقادیر دبی $PME < 0$ نشان می‌دهد که ممکن است دبی‌های به دست آمده برای پیش‌بینی، عملکرد مناسبی نداشته باشند. پارامتر $R_{cc}$ تطابق دینامیکی بین دو آبنمود، صرف‌نظر از مقادیر مطلق آن‌ها را نشان می‌دهد. این معیار شیف زمانی بین دو آبنمود را نشان می‌دهد، مقدار بهینه این تابع یک می‌باشد.

$$DRMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(q_t^{sim} - q_t^{obs})^2} \quad (۸)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^{N} Q_{obs,i}} \times 100 \quad (۹)$$

$$PME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i} - Q_{obs,i-1})^2} \quad (۱۰)$$

$$Rcc = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (۱۱)$$

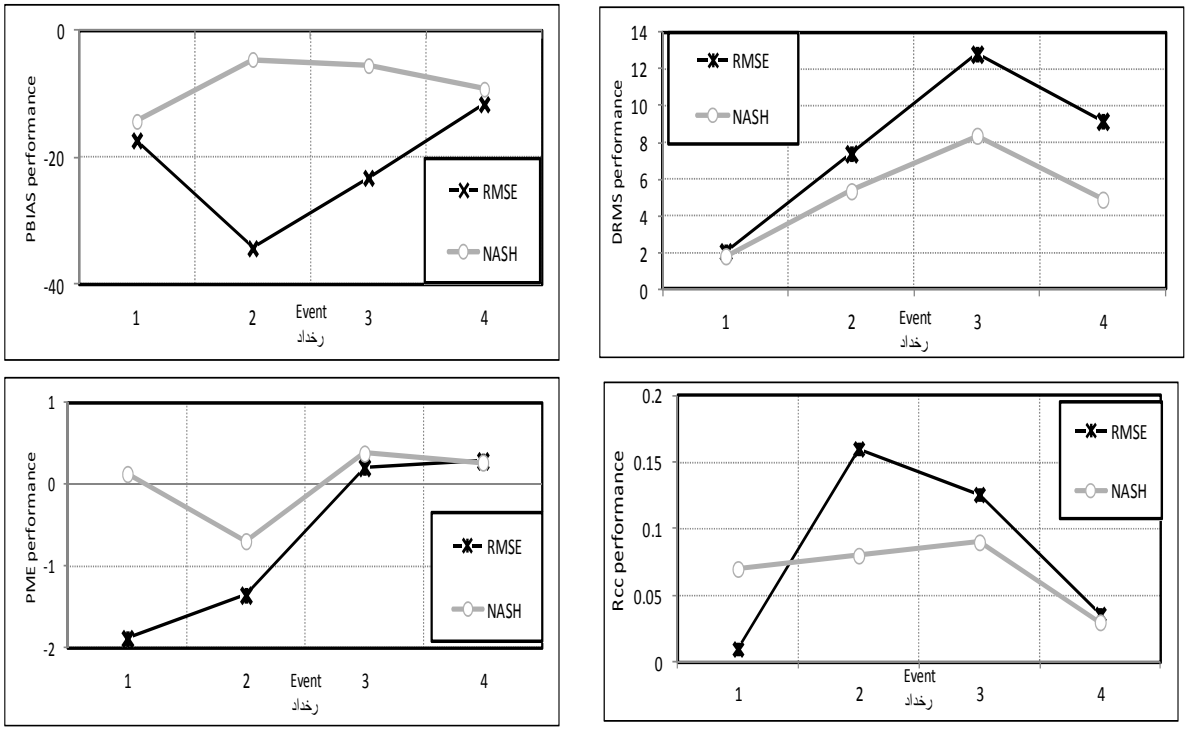
نتایج معیار نشان می‌دهد که تقریباً در همه موارد عملکرد تابع NASH نسبت به تابع RMSE مناسب‌تر بوده است. در معیار عملکرد RMSE، میزان خطای مدل در سیلاب‌ها با نقاط پیک بالاتر افزایش می‌یابد. معیار عملکرد PBIAS در همه رخدادها به صورت متوسط بالادست بوده است. مقادیر منفی PME در رخدادهای ۱و ۲ نشان می‌دهد که عملکرد مدل برای مقاصد پیش‌بینی باید بررسی شود. معیار R نشان می‌دهد که مدل در نقاطی که دارای دو پیک نزدیک به هم است، عملکرد ضعیف‌تری دارد.

در ادامه نتایج ارزیابی مدل در قالب نمودارهایی بر اساس توابع هدف مذکور در شکل ۵ ارائه شده است.

www.SID.ir

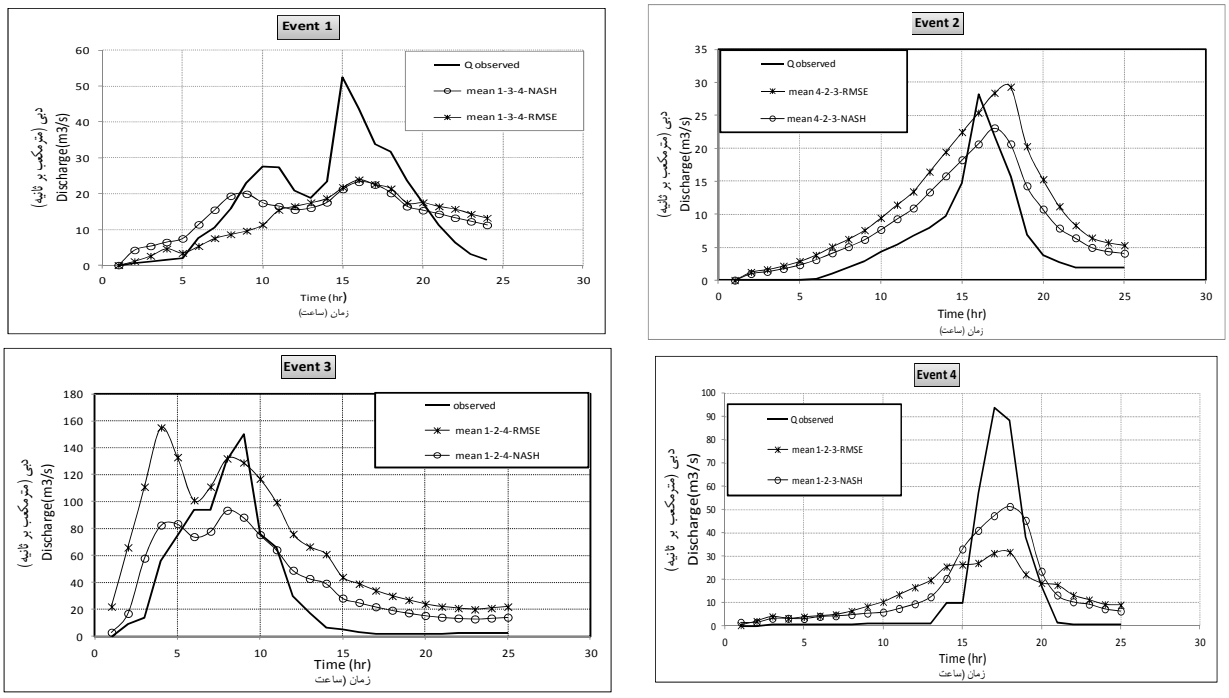
Archive of SID






**شکل ۵- معیار عملکرد در رخدادهای مختلف**

**Figure 5- Performance scale of each event**




**شکل ٦- هیدروگراف‌های حاصل از صحت‌سنجی رخدادهای مختلف**

**Figure 6- Hydrograph of validation each event**

www.SID.ir

Archive of SID



**اعتباریابی مدل**

به طور کلی در هر فرآیند واسنجی، دو مرحله اعتبارسنجی[1] و اعتباریابی[2] حائز اهمیت است (۵). در فرآیند اعتبارسنجی بررسی می‌شود که آیا مدل با توجه به شرایط عملکرد مناسبی داشته است یا نه؟ معمولاً در این فاز از داده‌های واسنجی برای اعتبارسنجی استفاده نمی‌شود. حال آن که در فرآیند اعتباریابی دلایلی مبنی بر رد یا پذیرش مدل موردنظر ارائه می‌شود. در این مرحله می‌توان از داده‌های آموزشی نیز به عنوان داده‌های تست بهره گرفت. روش‌های مختلفی برای اعتباریابی مدل‌های هیدرولوژی وجود دارد که روش cross validation در زمره مشهورترین روش‌ها قرار دارد. بر طبق این روش یک سری از داده‌ها به عنوان آموزشی و یک سری به عنوان تست انتخاب می‌شوند. در این تحقیق، میانگین پارامترهای حاصل از سه رخداد بر روی رخداد چهارم ارزیابی می‌شود. در شکل (۶) عملکرد آبنمودهای حاصله مشاهده می‌شود. بدین منظور ترکیب مختلف از انتخاب سه رخداد واسنجی و یک رخداد صحت‌سنجی ممکن می‌باشد.

## نتیجه‌گیری کلی

هدف اصلی این مطالعه واسنجی خودکار مدل مفهومی HEC-HMS به عنوان یک مدل یکپارچه برای شبیه‌سازی بارش–رواناب بوده است. زیر مدل‌های استفاده شده از مدل HMS رخداد پایه بوده، بنابراین نتایج آن‌ها نسبت به شرایط اولیه حوضه و مقادیر پارامترهای معرف این شرایط حساس می‌باشند. یکی از مشکلات و مسایل مطرح در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، واسنجی مدل یا به عبارتی برآورد پارامترهای مدل است؛ به نحوی که تا حد امکان آبنمودهای مشاهداتی و محاسباتی بر یکدیگر منطبق گردند. در این تحقیق واسنجی خودکار مدل HMS با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO انجام گرفت. از تکنیک‌های جهش نخبه و آشفتگی به منظور بهبود الگوریتم و حل ضعف همگرایی زودرس آن بهره گرفته شد. مدل به صورت تک رخداده و با تابع RMSE و NASH واسنجی شد. نتایج مدل‌های تک رخداده توانست تا حد زیادی دو آبنمود مشاهداتی و محاسباتی را بر یکدیگر منطبق کند. از طرفی نتایج به دست آمده از هر یک از رخدادها نشان داد که پارامترهای به دست آمده از الگوی مشابهی پیروی نکرده و از یک رخداد به رخدادی دیگر متفاوت است. در ادامه صحت‌سنجی سناریو تک هدفه با روش Cross validation انجام شد که در آن میانگین پارامترهای حاصل از سه رخداد بر روی رخداد چهارم با ترکیب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج موفقیت‌آمیزی را به دنبال نداشت. باید خاطر نشان کرد که افزایش پیچیدگی مدل لزوماً باعث بهبود عملکرد مدل نمی‌شود و بر عکس عملکرد بهتر مدل با استفاده مناسب از اطلاعات و آبنمودهای موجود با تعداد پارامترهای مناسب و نه لزوماً با تعداد پارامترهای بیشتر حاصل می‌شود. لذا در نهایت عدم وجود تابع منحصر به فرد برای در نظر گرفتن کلیه خصوصیات آبنمود از یک طرف و لزوم مشخص بودن اولویت‌های مدل‌ساز در فرآیند واسنجی باعث می‌شود که نتوان در یک مدل هیدرولوژیکی مجموعه پارامترهای منحصر به فردی ارائه کرد و خصوصیت همپایابی به عنوان یکی از ویژگی‌ها و مشکلات واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی در این تحقیق مشهود بوده است که ضرورت استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل عدم قطعیت پارامترها را بیشتر توجیه می‌کند.

عدم حصول یک مجموعه پارامتر منحصر به فرد با عملکرد تقریباً یکسان در رخداد صحت‌سنجی بیانگر این واقعیت است که در یک مدل هیدرولوژیکی نمی‌توان یک دسته پارامتر منحصر به فرد به دست آورد. نتایج حاصل در این قسمت با نتایج کمالی و موسوی دارای تطابق بسیاری از لحاظ عدم یافتن پارامترهای منحصر به فرد برای هر حوضه می‌باشد. هم‌چنین با توجه به نتایج انسانیت، تحقیق حاضر نشان داد الگوریتم PSO توانایی خوبی در مرحله واسنجی مدل دارد ولی در بخش صحت‌سنجی نتایج با عملکرد ضعیف تری ظاهر می‌شوند.

## منابع


1- Chow V.T., Maidment D.R., and Mays L.W. 1988. Applied Hydrology, McGraw, Inc, New York, USA.
2- Duan Q., Sorooshian S., and Gupta H.V. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. Journal of Hydrology, 158: 265-284.
3- Eberhart R., Kennedy J. 1995. 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.
4- Eckhardt K., Arnold J.G. 2001. Automatic Calibration of Distributed Catchment's Model. Journal of Hydrology, 251:103-109.
5- Ensaniat N. 2012. Daily runoff simulation using the PSO algorithm in catchment model optimization. M.sc. Thesis. Azad University. Tehran. (in Persian with English abstract)


1- Verification
2- Validation

www.SID.ir

Archive of SID



6- 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.
7- Jain S.K. 1993. Calibration of Conceptual Models for Rainfall-Runoff Simulation. HydrologicalSciences, 189: 431-441.
8- Kamali B., Mousavi J. 2010. Automatic Calibration of Hydrologic Event-Based Model Using PSO Meta-Heuristic Algorithm. Fifth National Congress on Civil Engineering. (in Persian with English abstract)
9- Kumar D.N., Reddy M.J. 2007. Multipurpose Reservoir Operation Using Particle Swarm Optimization. Journal of Water Resource Planning and Management, 133: 192-201.
10- Liu H., Abraham A. 2007. Calibration of Conceptual Models for Rainfall-Runoff Simulation. Journal of Innovative Computing and Applications, 139: 39-47.
11- Moussa R., Chahinian N. 2009. Comparison of Different Multi-Objective Calibration Criteria Using a Conceptual Rainfall-Runoff Model of Flood Events. Journal of hydrology and Earth System Sciences,194: 519-535.
12- Muleta M.K., Nicklow J.W. 2005. Sensitivity and Uncertainty Analysis Coupled with Automatic Calibration for a Distributed Watershed Model. Journal of Hydrology, 306: 127-145.
13- Parsopoulos K.E, Vrahatis M.N. 2002. Recent Approaches to Global Optimization Problems through Particle Swarm Optimization. Natural Computing, 1: 235-306.
14- Scharffenberger W.A., Fleming M.J. 2008. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. USACE, 1-290.
15- Sorooshian S. (1983). Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models; the Question of Parameter Observability and Uniqueness. Water Resource Research, 19: 260-268.
16- Timothy D.S., Charles S.M., Kyle E.K. 2000. Equations for Estimating Clark Unit Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. Water-Resources Investigations Report.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Water and Soil
Vol. 29, No. 3, Jul.-Agu. 2015, p. 615-626

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۹، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۴، ص. ۶۲۶-۶۱۵

# Calibration and Validation Parameter of Hydrologic Model HEC-HMS using Particle Swarm Optimization Algorithms – Single Objective

**R. Garmeh[1] - A. Faridhosseini[2*] - S. M. Hasheminia[3] - A. Hojjati[4]**

Received: 14-07-2014
Accepted: 29-04-2015

**Introduction**: Planning and management of water resource and river basins needs use of conceptual hydrologic models which play a significant role in predicting basins response to different climatic and meteorological processes. Evaluating watershed response through mathematical hydrologic models requires finding a set of parameter values of the model which provides thebest fit between observed and estimated hydrographs in a procedure called calibration. Asmanual calibration is tedious, time consuming and requires personal experience, automaticcalibration methods make application of *more significant CRR* models which are based onusing a systematic search procedure to find good parameter sets in terms of at least oneobjective function.

**Materials and Methods:** Conceptual hydrologic models play a significant role inpredicting a basin's response to different climatic and meteorological processes within natural systems. However, these models require a number of estimated parameters. Model calibration is the procedure of adjusting the parametervalues until the model predictions match the observed data. Manual calibration of high-fidelity hydrologic (simulation) models is tedious, time consuming and sometimesimpractical, especially when the number of parameters islarge. Moreover, the high degrees of nonlinearity involved in different hydrologic processes and non-uniqueness ofinverse-type calibration problems make it difficult to find asingle set of parameter values. In this research, the conceptual HEC-HMS model is integrated with the Particle Swarm Optimization (*PSO*) algorithm.The *HEC-HMS* model was developed as areplacement for HEC-1, which has long been considered as astandard model for hydrologic simulation. Most of thehydrologic models employed in *HEC-HMS* are event-basedmodels simulating a single storm requiring the specificationof all conditions at the beginning of the simulation. The soil moistureaccounting model in the *HEC-HMS* is the onlycontinuous model that simulates both wet and dry weatherbehavior.Programming of *HEC –HMS* has been done by *MATLAB* and techniques such as elite mutation and creating confusion have been used in order to strengthen the algorithm and improve the results. The event-based *HEC-HMS* model simulatesthe precipitation-runoff process for each set of parameter values generated by *PSO*. Turbulentand elitism with mutation are also employed to deal with *PSO* premature convergence. The integrated *PSO-HMS* model is tested on the Kardeh dam basin located in the Khorasan Razavi province.

**Results and Discussion:** Input parameters of hydrologic models are seldomknown with certainty. Therefore, they are not capable ofdescribing the exact hydrologic processes. Input data andstructural uncertainties related to scale and approximationsin system processes are different sources of uncertainty thatmake it difficult to model exact hydrologic phenomena.In automatic calibration, the parameter values dependon the objective function of the search or optimization algorithm.In characterizing a runoff hydrograph, threecharacteristics of time-to-peak, peak of discharge and totalrunoff volume are of the most importance. It is thereforeimportant that we simulate and observe hydrographs matchas much as possible in terms of those characteristics.

Calibration was carried out in single objective cases. Model calibration in single-objective approach with regard to the objective function in the event of *NASH* and *RMSE* were conducted separately.The results indicated that the capability of the model was calibrated to an acceptable level of events. Continuing calibration results were evaluated by four different criteria.Finally, to validate the model parameters with those obtained from the calibration, tests perfomed indicated poor results. Although, based on the calibration and verification of individual events one event remains, suggesting set is a possible parameter.

**Conclusion:** All events were evaluated by validations and the results show that the performance model is not desirable. The results emphasized the impossibility of obtaining unique parameters for a basin. This method of solution, because of non-single solutions of calibration, could be helpful as an inverse problem that could limit the number of candidates. The above analysis revealed the existence of differentparameter sets that can altogether simulate verificationevents quite well, which shows the non-uniqueness featureof the calibration problem under study. However, the methodologyhas benefited from that feature by finding newparameter intervals that should be fine-tuned further inorder to decrease input and model prediction uncertainties.The

1, 2, 3, 4- M.Sc Student, Assistant Professor, Instructor and M.Sc Graduated, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculuure Ferdowsi University of Mashhad, Respectively
(* - Corresponding Author Email: farid-h@um.ac.ir)

www.SID.ir

Archive of SID



proposed methodology performed well in the automatedcalibration of an event-based hydrologic model;however, the authors are aware of a drawback of the presentedanalysis – this undertakingwas not a completely fair validationprocedure. It is because validation events represent possiblefuture scenarios and thus are not available at the time ofmodel calibration. Hence, an event being selected as a validationevent should not be used to receive any morefeedback for adjusting parameter values and ranges.However,this remark was not fully taken into consideration, mostlybecause of being seriously short of enough observed eventsin this calibration study. Therefore, the proposed methodology,although sound and useful, should be validated inother case studies with more observed flood events.

**Keywords:** *HEC-HMS*, Particle Swarm Optimization Algorithm, Validation

www.SID.ir