

واسنجی خودکار مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS با استفاده از

الگوریتم فراکاوشی بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)

(مطالعه موردی: حوضه آبریز سد کارده)

رضا گرمه ای^۱، علیرضا فرید حسینی^۲، سید مجید هاشمی نیا^۳

1.r.garmeh@gmail.com

2.A.faridh@yahoo.com

3. s.m.hashemini@gmail.com

چکیده

در این مقاله، طرحی برای واسنجی خودکار مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS ارائه می شود. اغلب سوابق تحقیقات در زمینه واسنجی خودکار به مدل های هیدرولوژیکی پیوسته می پردازد. اما ماهیت مدل HEC-HMS رخداده پایه بوده و پارامترهای آن به شرایط اولیه حساسیت قابل توجهی دارند. بنابراین عملکرد مناسب مدل به نحوه واسنجی پارامترهای آن به منظور تطابق هرچه بیشتر بین نتایج پیش بینی مدل با داده های مشاهداتی بستگی دارد. با توجه به دشواری واسنجی با روش های مبتنی بر سعی و خطا، استفاده از روش های بهینه سازی به منظور واسنجی خودکار مدل های هیدرولوژیکی مطرح است. از طرفی خصوصیات مختلفی نظیر حجم رواناب، دبی حداکثر و زمان متناظر با دبی حداکثر ممکن است مبنای سنجش کارایی مدل بهینه سازی در واسنجی خودکار باشد. این امر سبب تبدیل مدل به یک مساله بهینه سازی چند هدفه می گردد. در این تحقیق، برای واسنجی خودکار مدل HEC-HMS از الگوریتم فراکاوشی بهینه سازی PSO با هدف حداقل سازی خطای پیش بینی مدل با مدل های تک هدفه برآورد شده است. مطالعه موردی بر روی حوضه سد کارده واقع در استان خراسان رضوی انجام گرفته است. نتایج حاصل بیانگر اهمیت انتخاب تابع هدف در مقادیر بهینه از پارامترهای مدل می باشد و روند پیشنهادی قادر به وصول مقادیر مطلوب پارامترهای مدل مفهومی است.

واژه های کلیدی: مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، الگوریتم فراکاوشی بهینه سازی PSO، بهینه سازی

چند هدفه

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب

^۲ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ مربی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

بهره برداری و استفاده مطلوب از منابع آب و مدیریت بهینه آن مستلزم شناخت بهتر مدل هیدرولوژیکی است. بارش و به دنبال آن تشکیل رواناب سطحی از فازهای مهم چرخه هیدرولوژیکی محسوب می شود و اساس کار مدل هیدرولوژیکی، بررسی رابطه بین بارش و رواناب است. واسنجی دستی مدل های هیدرولوژیکی از اوایل دهه ۱۹۶۰ مورد توجه قرار گرفته است، ولی به دلیل وقت گیر بودن و پیچیدگی آن، از اواخر دهه مذکور بحث واسنجی خودکار مورد توجه قرار گرفت. واسنجی خودکار نیازمند انتخاب یک تابع هدف مناسب، یک الگوریتم جستجو و یک معیار برای به اتمام رساندن الگوریتم است. در دهه های اول، نتایج استفاده از این روش چندان موفقیت آمیز نبوده است (گوپتا و همکاران، ۱۹۹۹). از یک طرف در بسیاری از مواقع پارامترهای به دست آمده از نظر مفهومی چندان واقعی نبوده است، از طرف دیگر عملکرد مدل بر روی داده های مختلف متفاوت بوده و نتایج واسنجی نیز متأثر از داده های انتخاب شده، حدس اولیه برای پارامترها، تابع هدف و فرآیند جستجو بوده است (سروشیان، ۱۹۸۳). تجربه های عملی در زمینه واسنجی مدل های تک هدفه نشان داده است که هیچ تابع هدف منحصر به فردی هرچند هم با دقت بالا به تنهایی نمی تواند مهم ترین خصوصیات حوضه را نشان دهد و مقدار داده های هر حوضه محدودیت های زیادی را در واسنجی مدل ایجاد می کند (یاپو، ۱۹۹۶). در طی فرایند واسنجی، تابع هدف مساله باید از نظر دبی پیک، زمان رسیدن به دبی پیک، حجم دبی، نرخ رسیدن به دبی پیک، شکل کلی هیدروگراف با داده های مشاهداتی مطابقت داشته باشد. از این رو لازم است یک تبادل مناسب بین عملکرد تابع هدف های مختلف برقرار باشد. این فرآیند با استفاده از مدل سازی چندهدفه امکان پذیر است و نتایج این گونه تحقیقات در کارهای مادسن (۲۰۰۰) و یاپو و همکاران (۱۹۹۷) می توان یافت. در این تحقیق ابتدا مبحث واسنجی تک هدفه با سناریوهای مختلف بر حوضه آبریز سد کارده اعمال می شود. در مرحله بعدی ارزیابی نتایج واسنجی با معیارهای عملکرد و صحت سنجی مدل بررسی می شود. در ادامه مدل مورد نظر به صورت یک مساله بهینه به همراه قید اختلاف دبی پیک در نظر گرفته شده است. معیار تابع RMSE به همراه قید اختلاف دبی پیک در نظر گرفته شده است و نتایج حاصل از رویکرد تک هدفه ارائه می شود.

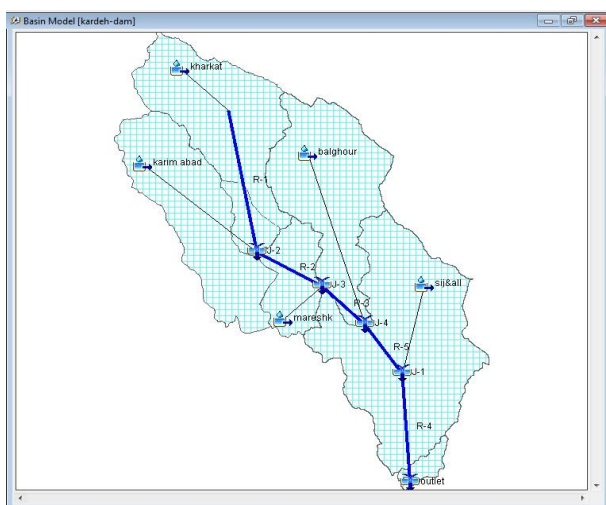
مواد و روش ها

مدل کامپیوتری HEC-HMS نسخه جدید مدل HEC-1 برای شبیه سازی بارش-رواناب از اولین سری نرم افزارهای تهیه شده توسط مرکز هیدرولوژی مهندسی امریکا در سال ۱۹۶۸ بوده است. این مدل، حوضه آبریز را به عنوان یک سیستم به هم پیوسته با مولفه های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نمایش می دهد. هر مولفه مدل یک جنبه از فرایند بارش-رواناب را در داخل بخشی از حوضه که معمولاً به عنوان زیرحوضه در نظر گرفته می شود، شبیه سازی می کند. به عبارت دیگر مولفه های مختلفی برای شبیه سازی سیستم فیزیکی حوضه ترکیب می شوند و هر مولفه قسمتی از محاسبات لازم را برای یک هیدروگراف کامل انجام می دهد. شکل ۱ نحوه مدل سازی حوضه مورد مطالعه را در این نرم افزار نشان می دهد. در این تحقیق از نسخه ۴ این نرم افزار استفاده شده است.

دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط زیست)، دانشگاه شهرکرد، شهریور ۱۳۹۳

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سدکارده با ۵۴۳ کیلومتر مربع پهنا، شیب ۲/۶٪، طول آبراهه اصلی ۴۴/۲۴ کیلومتر، در شمال شرقی خراسان بزرگ بین عرض های جغرافیایی ۳۶°۴۴' و ۳۶°۵۸' شمالی و طول ۴۵°۵۹' و ۲۷°۴۵' شرقی قرار دارد. کارده یکی از حوضه های معرف کشور و مجهز به ابزار های مناسب برای اندازه گیری و ثبت داده ها می باشد. رودخانه کارده که مهم ترین و تنها رودخانه دائمی این حوضه است از ذوب برف در ارتفاعات کپه داغ- هزار مسجد و نیز دو چشمه کارستی (خرکت و بزرگ) واقع در شمال حوضه سرچشمه می گیرد و پس از عبور از روستاهای خرکت در جنوب روستای مارشک به شاخه قره نو که شمال غرب حوضه را زهکش می کند، می پیوندد و پس از عبور از روستاهای جنگ، پنج منه، آل و کارده در جنوب روستای کارده وارد سد کارده می شود.



جدول ۱- حدود بالا و پایین پارامترهای کالیبراسیون

پارامتر	زیر حوضه	حد پایین	حد بالا
عدد منحنی رواناب	زیر حوضه ۱	۹۱	۷۰
	زیر حوضه ۲	۸۲	۵۸
	زیر حوضه ۳	۸۴	۶۲
	زیر حوضه ۴	۹۳	۷۱
	زیر حوضه ۵	۸۱	۶۰
گیرش اولیه	۵ زیر حوضه	۰/۱۵S	۰/۲۵S
ضریب ذخیره	۵ زیر حوضه	۰/۲	۰/۶
ماسکینگام	۵ بازه	۰/۲	۰/۵

شکل ۱- شماتیک مدل سازی حوضه در HEC-HMS

حوضه سد کارده دارای ۵ زیر حوضه بوده که هر زیر حوضه سه پارامتر واسنجی دارد. پارامتر اول عدد منحنی رواناب برای محاسبه تلفات حوضه با روش SCS بوده که برای تعیین حد بالا و پایین آن با توجه به دستورالعمل های سازمان حفاظت خاک و اطلاعات فیزیوگرافی حوضه عمل شده است. پارامتر دوم ضریب تلفات برای محاسبه گیرش اولیه بوده است. از روش کلارک برای تبدیل بارش به رواناب استفاده شده که زمان تمرکز حوضه این روش با توجه به رابطه پیشنهادی سازمان حفاظت خاک SCS به صورت زیر به دست آمده است (چوو، ۱۹۸۸) و (علیزاده، ۱۳۸۷).

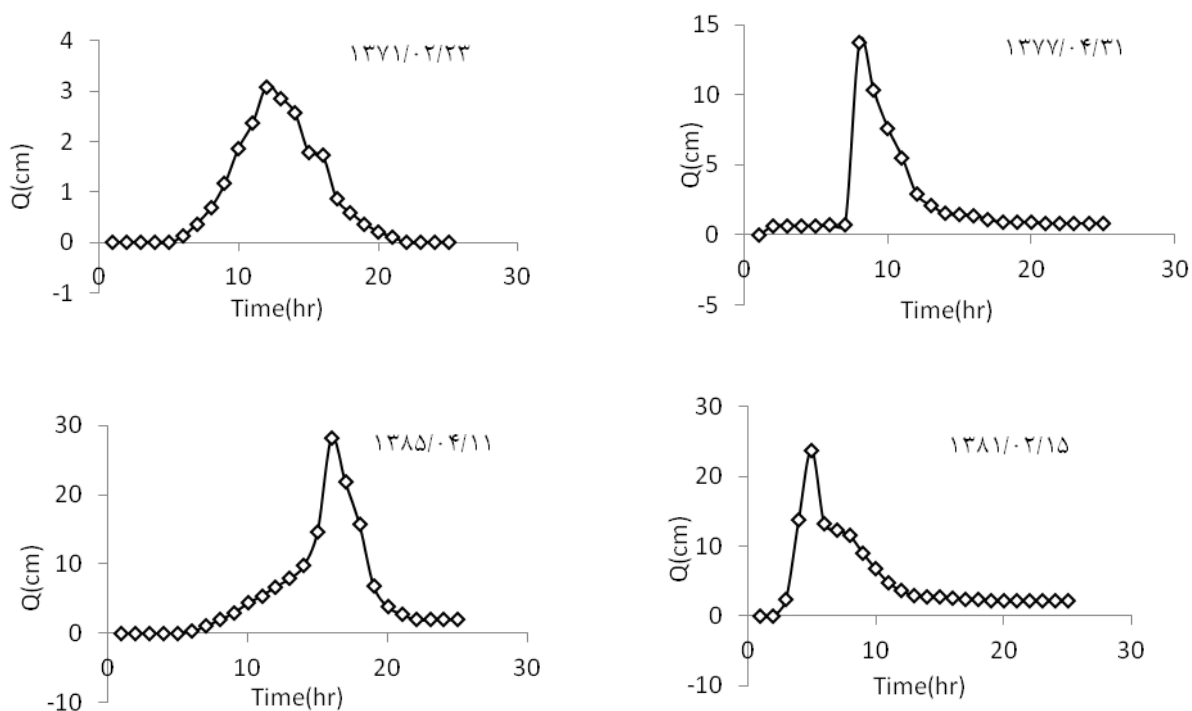
$$t_{lag} = \frac{L^{0.8} \times (S+1)^{0.7}}{1900 \times y^{0.5}} \quad (1)$$

رابطه ضریب ذخیره و زمان تمرکز در یک حوضه بر اساس توصیه Krause (۱۹۹۹) نسبت زیر پیشنهاد شده است که در آن R ضریب ذخیره می باشد. ثابت این رابطه بین ۰/۲ تا ۰/۶ تغییر می کند و به عنوان پارامتر واسنجی سوم برای محاسبه ضریب ذخیره به کار گرفته شده است.

$$\frac{R}{R+t_c} = const \quad (2)$$

دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط زیست)، دانشگاه شهرکرد، شهریور ۱۳۹۳

پنج کانال اصلی در فاصله زیر حوضه ها طراحی و جریان در آنها با روش ماسکینگام روندیابی می شوند. پارامتر X این روش به عنوان پارامتر واسنجی در نظر گرفته شده است. بنابراین در مجموع ۲۰ پارامتر واسنجی برای این حوضه در نظر گرفته شده است. حد بالا و پایین هریک از پارامترها در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۲ هیدروگراف هر رخداد را نشان می دهد.



شکل ۲- هیدروگراف رخدادهای بارش

الگوریتم بهینه سازی

الگوریتم بهینه سازی مورد استفاده در این تحقیق به منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مدل HMS، الگوریتم PSO می باشد. الگوریتم در ابتدا با یک مجموعه (Swarm) جواب های تصادفی شروع می شود. هر عضو این مجموعه، ذره (particle) نامیده می شود. هدایت ذرات به این صورت انجام می گیرد که تمامی ذرات بهترین موقعیتی را که در طی فرایند جستجو کسب کرده اند تحت عنوان P_{best} ، در حافظه خود ذخیره می کنند. از طرفی بهترین موقعیتی که تا هر مرحله توسط تمامی ذرات به دست آمده است نیز تحت عنوان G_{best} حفظ می شود. در این الگوریتم تمامی ذرات بر اساس یک میانگین وزنی با مولفه های تصادفی به سمت جواب های بهتر یعنی P_{best} و G_{best} حرکت می کنند تا در نهایت به نقطه واحدی همگرا شوند. اگر موقعیت ذره i با بعد j را توسط پارامتر P_{ij} و سرعت آن را توسط V_{ij} نشان داده و بهترین موقعیتی که ذره تاکنون به دست آورده است با $P_{best_{ij}}$ و بهترین موقعیتی که تاکنون توسط ذرات به دست آمده است با $G_{best_{ij}}$ نشان داده شود، در نهایت هدایت ذرات توسط دو رابطه ۳ و ۴ صورت می گیرد.

$$V_{ij}(t) = W * V_{ij}(t-1) + C_1 * rand_1 * (P_{best_{ij}} - P_{ij}(t-1)) + C_2 * rand_2 * (G_{best_{ij}} - P_{ij}(t-1)) \quad (3)$$

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

دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط زیست)، دانشگاه شهرکرد، شهریور ۱۳۹۳

یکی از نقاط ضعف الگوریتم PSO همگرایی زودرس آن است. در این تحقیق از تکنیک هایی برای بهبود این ضعف استفاده شده است. اولین استراتژی، الگوریتم PSO با آشفتگی (Turbulence PSO) بوده که قرار دادن یک حد آستانه بر حداقل سرعت، ذرات تنبل را به جستجوی بهتر فضای مساله وا می دارد. استراتژی دوم PSO با جهش نخبه (PSO with Elitist Mutation) می باشد که باعث تنوع و جستجوی بهتر فضای مساله می شود.

تابع هدف

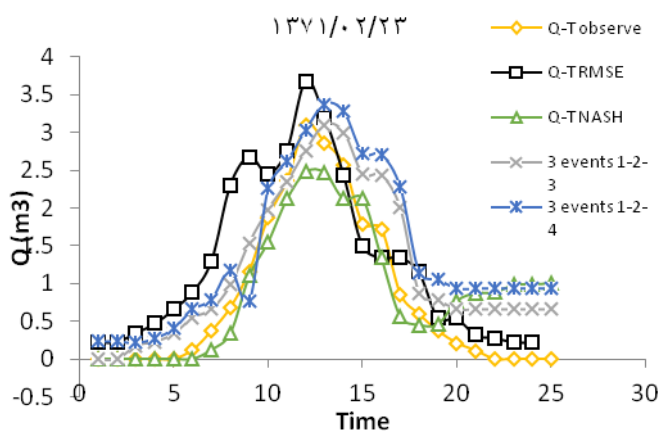
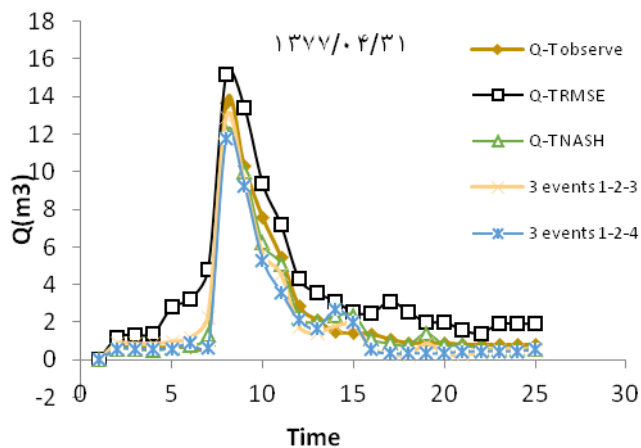
با توجه به اهمیت انتخاب تابع هدف، در این تحقیق عملکرد مدل با تابع هدف های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. اولین تابع RMSE که یکی از پرکاربردترین تابع ها در زمینه واسنجی مدل هیدرولوژیکی می باشد. با توجه به این که نقاط پیک اهمیت بیشتری دارند، ضریب وزنی برای نقاط پیک مقادیر بزرگتری در نظر گرفته شده است. تابع دوم NASH بوده که نسبت واریانس باقیمانده به واریانس دبی ها را نشان می دهد (رابطه - ۵). مقدار بهینه آن یک می باشد.

$$NASH = 1 - C_{NS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (5)$$

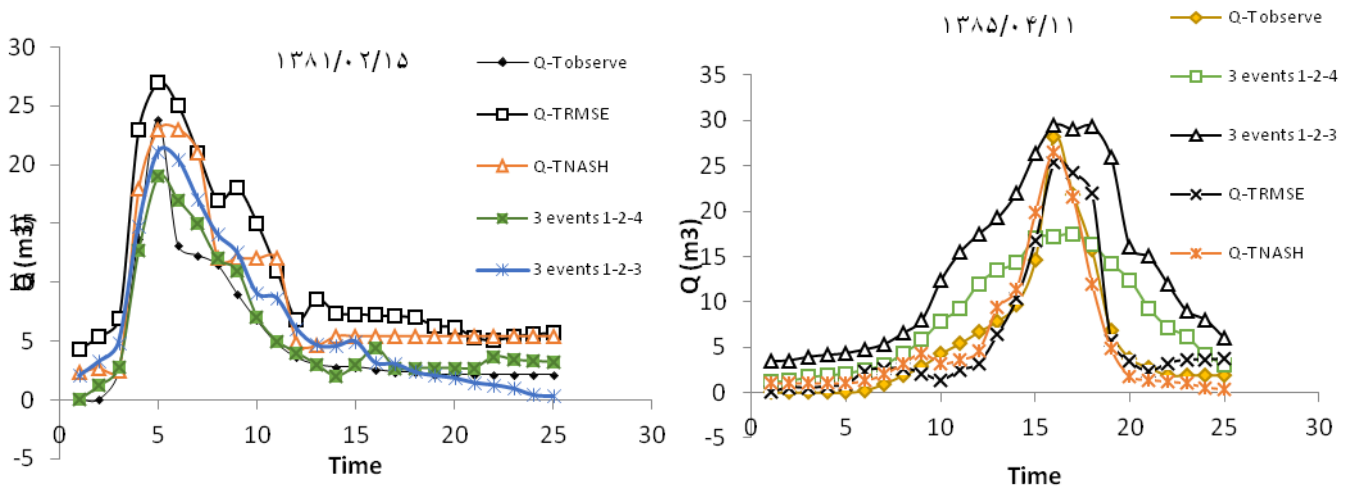
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W e_i^2 * (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n W e_i^2}} \quad (6)$$

نتایج واسنجی

در این بخش از بین چهار رخداد سیلاب تاریخی، سه رخداد به عنوان رخدادهای واسنجی یک رخداد به منظور صحت سنجی با ترکیب های مختلف از ترتیب رخدادهای واسنجی و صحت سنجی استفاده شده است. در سناریوی اول ابتدا مدل به صورت تک رخداد با هر یک از تابع هدف های RMSE و NASH کالیبره می شود. در سناریوی دوم، سه رخداد (۱-۲-۳) و (۱-۲-۴) به صورت همزمان کالیبره شده و تابع هدف به صورت حداقل سازی مجموع تابع خطای سه رخداد در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ نتایج واسنجی هر دو سناریو و در جدول ۲ مقادیر بهینه پارامترها ارائه شده است. نتایج واسنجی نشان می دهد که مدل در حالتی که به صورت تک رخداد کالیبره می شود عملکرد مناسبی داشته است. هرچند که مقادیر پارامترها از الگوی مشابهی پیروی نکرده و مدل نتوانسته دسته پارامتر منحصر به فردی را به دست دهد. به همین جهت ضرورت واسنجی هر سه رخداد حس گردیده است. در بخش بعدی عملکرد هر یک از سناریوها در صحت سنجی بررسی می شود.



دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط زیست)، دانشگاه شکرود، شهریور ۱۳۹۳



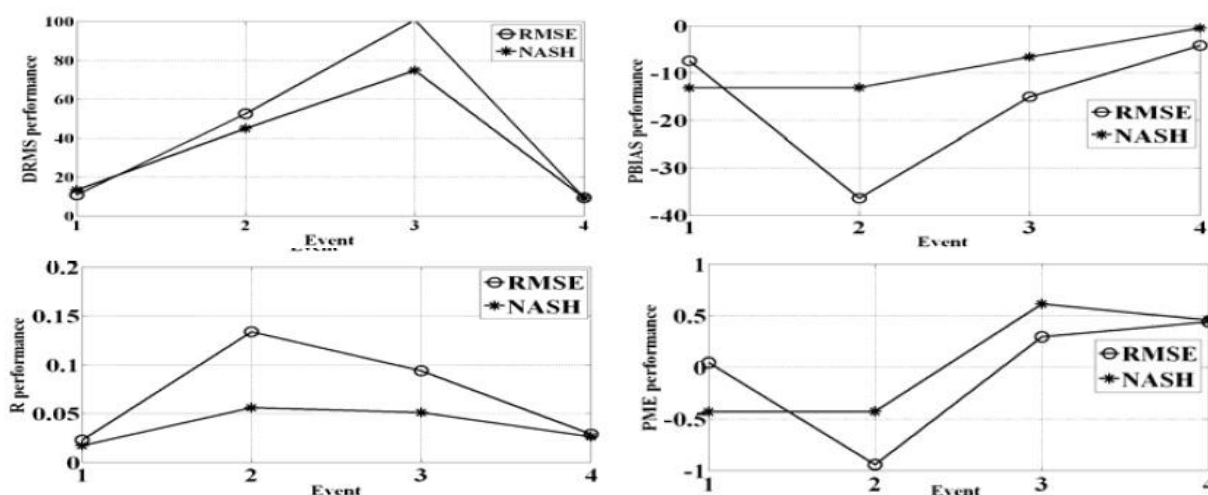
شکل ۳- مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی در هر یک از رخدادها

جدول ۲- نتایج کالیبراسیون

		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
RMSE	۱	۷۲	۶۳	۷۷	۷۰	۶۲	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۵۹	۰/۴۳	۰/۵۶	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۳۶	۰/۴۸	۰/۲۷	۰/۴۹
	۲	۷۶/۲	۶۸	۸۴	۷۳	۷۷	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۱۷	۰/۵۶	۰/۲۳	۰/۵۹	۰/۳	۰/۲	۰/۳	۰/۴۵	۰/۵	۰/۴	۰/۳۵
	۳	۸۴/۳	۷۲	۸۱	۷۸	۸۳	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۵۲	۰/۲۱	۰/۵۵	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۴۸	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۳۵
	۴	۷۱/۲	۷۳	۷۲	۸۱	۶۸	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۴۲	۰/۳۵	۰/۲۷	۰/۴	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۳۹	۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۴۹
NASH	۱	۷۱	۶۵/۴	۷۸	۸۳	۶۱	۰/۲۳	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۴۳	۰/۴۹	۰/۵۷	۰/۴۹	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۳۸	۰/۴۷	۰/۳۹
	۲	۷۸/۳	۷۶	۷۲	۸۱	۷۵	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۴	۰/۳۷	۰/۴۴	۰/۲۷	۰/۴۶	۰/۲۳
	۳	۸۱/۲	۷۴	۶۸	۸۹	۷۶	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۴۶	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۵
	۴	۸۸/۲	۶۸	۶۱	۹۰	۷۲	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۴۸	۰/۳۶	۰/۴۲	۰/۴۹	۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۴۳	۰/۴۹	۰/۴۸
3events	۱-۱-۱	۸۴	۸۰	۷۸	۸۴	۷۵	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۳۸	۰/۴	۰/۵۹	۰/۳۹	۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۳۳
	۱-۱-۱	۸۷	۷۶	۶۷	۸۹	۶۳	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/۵۶	۰/۳۳	۰/۵۹	۰/۴۶	۰/۲	۰/۳۶	۰/۴۹	۰/۳۹	۰/۴۶	۰/۴۸

ارزیابی مدل

در این تحقیق، عملکرد نتایج واسنجی توسط چهار معیار عملکرد سنجیده می شود. اولین معیار ارزیابی تابع DRMS می باشد. این تابع انحراف استاندارد مدل را نشان می دهد. مقادیر کمتر، عملکرد بهتر مدل را نشان می دهد. تابع PBIAS نشان می دهد که آیا به طور متوسط مقادیر دبی شبیه سازی بیشتر از دبی محاسباتی است یا نه. مقادیر مثبت نشان دهنده تخمین پایین دست دبی و مقادیر منفی نشان دهنده تخمین بالادست مدل است. معیار PME فرض می کند که تخمین دبی در گام بعدی با توجه به مقادیر دبی مشاهداتی در گام فعلی به دست می آید. مقادیر دبی PME کوچکتر از صفر، نشان می دهد که ممکن است دبی های به دست آمده برای پیش بینی، عملکرد مناسبی نداشته باشند. نتایج معیار نشان می دهد که تقریباً در همه موارد عملکرد تابع NASH نسبت به تابع RMSE مناسبتر بوده است. در معیار عملکرد DRMS، میزان خطای مدل در سیلاب ها با نقاط پیک بالاتر افزایش می یابد. معیار عملکرد PBIAS در همه رخدادهای حاکی از تخمین بالادستی دبی ها بوده است. مقادیر منفی PME در رخدادهای ۱ و ۲ نشان می دهد که عملکرد مدل برای مقاصد پیش بینی باید بررسی شود. معیار R نشان می دهد که مدل در نقاطی که دارای دو پیک نزدیک به هم است، عملکرد ضعیف تری دارد.



شکل ۴- معیار عملکرد در رخدادهای مختلف

جمع بندی و نتیجه گیری

محور این تحقیق واسنجی خودکار مدل مفهومی HEC-HMS با استفاده از الگوریتم بهینه سازی PSO بر روی حوضه آبریز سد کارده می باشد. مدل در دو سناریو تک رخ داده و سه رخ داده و با تابع هدف های RMSE و NSAH مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج واسنجی در هر یک از رخدادهای مختلف نتوانست پارامترهای منحصر به فردی را برای حوضه ارائه دهد. در ادامه نتایج واسنجی در رخدادهای مختلف با معیار عملکردهای متفاوت ارزیابی شد و نشان داده شد اگر چه هر دو تابع RMSE و NSAH سعی در حداقل کردن خطای نقاط پیک دارند، ولی به طور کلی عملکرد تابع NSAH نسبت به تابع RMSE بهتر بوده است و دبی های به دست آمده در اکثر موارد بیشتر برآورد شده است. نتایج واسنجی نشان داد که با

دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط زیست)، دانشگاه شهرکرد، شهریور ۱۳۹۳

بهبود نقاط پیک مقدار تابع RMSE بدتر می شود و بالعکس. که این امر حاکی از این واقعیت است که اگرچه تابع RMSE سعی در حداقل کردن خطای نقاط پیک دارد، ولی در مواردی از این نقطه نظر به خوبی عمل نکرده و مدل می تواند جوابهای با خطای پیک کم را به دست آورد که در آن مقدار تابع RMSE مناسب نباشد.

فهرست منابع

۱. علیزاده، ا.، (۱۳۸۷)، اصول هیدرولوژی کاربردی، دانشگاه امام رضا، مشهد.
2. Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O.,(1999), "Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models, comparison with multi-level expert calibration", Journal Of Hydrologic Engineering.
3. Sorooshian, S.,(1983), "Evaluation of Maximum Likelihood Parameter Estimation Techniques for Conceptual Rainfall-Runoff Models' Influence of Calibration Data Variability and Length on Model Credibility", Water resource research, Vol. 19,
4. Yapo, P., Gupta, H.V. and Sorooshian, S.,(1996), "Automatic Calibration of Conceptual Rainfall-Runoff Models; Sensitivity to Calibration Data", Journal of Hydrology, Vol. 181, pp. 23-48.
5. Madsen, H., (2000), "Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives", Journal of Hydrology, Vol. 235, pp. 276-288.
6. Yapo, P., Gupta, H.V. and Sorooshian, S., (1997), "Multi-objective Global Optimization or Hydrologic Models", Journal of Hydrology, Vol. 204, pp. 83-97.
7. Chow, V.T., Maidment, D. R. and Mays, L.W., (1988)," Applied Hydrology", McGraw, Inc, New York, USA.
8. USACE, US Army Corps of Engineers.(1990), " HEC-1 User's Manual- Hydrologic Engineering Center",
<http://www.hec.usace.army.mil/software/legacysoftware/hec1/hec1documentation.htm>
9. Kumar, D. N. and Reddy, M. J.,(2007), "Multipurpose Reservoir Operation Using Particle Swarm Optimization", Journal Of Water Resource Planning And Management, pp. 192-201.
10. Pant, M., Thangaraj, R. and Abraham, A.,(2007), "A New PSO Algorithm with Crossover Operator for Global Optimization Problems", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 215-222.