نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و دوم، شماره پنجم، ۱۳۹٤
http://jwsc.gau.ac.ir

مقایسه روش‌های واسنجی خودکار الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و شبه‌خودکار الگوریتم Nelder و Mead بر روی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد کارده)

رضا گرمه‌ای[۱]، *علیرضا فریدحسینی[۲]، سیدمجید هاشمی‌نیا[۳] و علی حجتی[۴]

[۱]دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد، [۲]استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد، [۳]مربی گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد، [۴]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۹

چکیده

سابقه و هدف: برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و حوضه‌های آبریز رودخانه‌ها مستلزم استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی مفهومی است که نقش مهمی را در پیش‌بینی پاسخ حوضه به فرآیندهای مختلف اقلیمی و هواشناسی ایفا می‌کنند. ارزیابی رفتار حوضه نیز با استفاده از مدل‌های ریاضی هیدرولوژیکی مستلزم واسنجی مدل می‌باشد که هدف آن تخمین و برآورد دسته پارامترهای حوضه با بیش‌ترین تطابق خروجی مدل با مجموعه‌ای از مقادیر مشاهداتی است. مهم‌ترین هدف در واسنجی مدل‌های بارش- رواناب پیدا کردن مقادیر بهینه برای مدل می‌باشد که با استفاده از آن بتوان بهترین منحنی را برای هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی برازش داد. با توجه به زمانبر بودن واسنجی دستی به‌ویژه در شرایط داده‌های کم و پارامترهای زیاد، روش‌های واسنجی خودکار مبتنی بر استفاده از روش‌های جستجوی سیستماتیک در فضای چندبعدی با استفاده از یک تابع هدف بسیار سودمند می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، مدل مفهومی HEC-HMS و الگوریتم هوش جمعی PSO به‌عنوان مدل بهینه‌ساز عمل می‌کنند. مدل HEC-HMS به‌عنوان جایگزینی برای HEC-1 توسعه داده شد، که به‌مدت طولانی یک مدل استاندارد برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در نظر گرفته شده است. بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی به‌کار رفته در HEC-HMS، مدل‌های مبتنی بر رویداد شبیه‌سازی یک واقعه نیاز به همه مشخصات و شرایط در آغاز شبیه‌سازی می‌باشد. مدل محاسبه رطوبت خاک در HEC-HMS یک مدل پیوسته است که مدلسازی را در شرایط خشک و مرطوب آب و هوایی شبیه‌سازی می‌نماید برنامه‌نویسی الگوریتم PSO در محیط نرم‌افزار MATLAB صورت گرفت. واسنجی مدل با استفاده از دو تابع هدف NASH و RMSE انجام شد که منجر به ایجاد دسته پارامترهای مختلف گردید. برای ارزیابی توانایی الگوریتم PSO در نیل به جواب‌های مطلوب، نتایج رویکرد واسنجی تک‌رخداده با نتایج واسنجی شبه‌خودکار مبتنی بر الگوریتم جستجوی Nelder و Mead موجود در نرم‌افزار HEC-HMS توسط توابع PBIAS و RMSE مقایسه شد که نشان‌دهنده کارایی الگوریتم PSO در اتصال به مدل هیدرولوژیکی است. مدل تلفیقی ارائه شده در حوضه آبریز سد کارده واقع در استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار گرفت.

* مسئول مکاتبه: farid-h@um.ac.ir

یافته‌ها: نتایج دو تابع نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف به‌دست آمده در مدل شبه‌خودکار به مراتب بیش‌تر از مدل PSO-HMS معرفی شده است. همچنین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده حاصل از مدل PSO-HMS به مراتب بهتر می‌باشد. در انتها دسته پارامترهای حاصل از واسنجی رویکرد تک‌رخداده مدل PSO-HMS در رخداد صحت‌سنجی ارزیابی شد.

نتیجه گیری: نتایج نشان داد این روش با توجه به مشکل غیرمنفرد بودن مجموعه جواب‌های مساله واسنجی به‌عنوان یک مساله معکوس می‌تواند در محدود نمودن تعداد جواب‌های کاندید مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: واسنجی خودکار، مدل مفهومی HEC-HMS، الگوریتم بهینه‌سازی PSO، مدل PSO-HMS

مقدمه

با توجه به روند رو به افزایش سیل و خسارت‌های ناشی از آن در اغلب حوضه‌های آبریز کشور، شناخت مناطق سیل‌خیز از جایگاه و اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیستم‌های پیشرفته پیش‌بینی سیل به‌عنوان یکی از روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب بوده که به‌منظور کاهش خسارت جانی در اکثر کشورها مورد توجه قرار دارد. محدودیت‌های ساختاری مدل و عدم دسترسی به تمام پارامترهای حوضه آبریز، همچنین عدم امکان تعیین دقیق شرایط مرزی و شرایط اولیه و همچنین عدم وجود تعبیر فیزیکی برای برخی از پارامترها، ما را ملزم به واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی می‌کند. استفاده صحیح از یک مدل هیدرولوژیکی به نحوه واسنجی مدل بستگی دارد و باید به‌گونه‌ای باشد که بتواند مشخصات حوضه آبریز را تا حد امکان به واقعیت نزدیک کند. چنان‌چه مدل برای یک محل ناشناخته (به‌طور مثال یک حوضه آبریز بدون ایستگاه) به‌کار رود، مقادیر پارامترها باید از طریق اندازه‌گیری خواص فیزیکی سیستم تعیین شود. چنین پارامترهایی را پارامترهای فرآیندی می‌نامند. این مقادیر ممکن است با پارامترهای برآورد شده که معمولاً به‌طور خودکار با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری تعیین می‌شوند، متفاوت باشند. بنابراین برای کالیبره کردن مدل روش‌های متفاوتی وجود دارد که می‌توان از آن‌ها استفاده نمود (8).

واسنجی دستی مدل‌های هیدرولوژیکی از اوایل دهه 1960 مورد توجه قرار گرفت، ولی به‌دلیل وقت‌گیر بودن و مشکلات آن، از اواخر دهه مذکور و اوایل دهه 1970، بحث واسنجی خودکار مطرح شد. واسنجی خودکار نیازمند انتخاب یک تابع هدف مناسب، یک الگوریتم جستجو و یک معیار برای به اتمام رساندن الگوریتم است. در راستای استفاده از الگوریتم‌های مناسب بهینه‌سازی تحقیقات زیادی انجام شده است که از جمله می‌توان به الگوریتم SCE داون و همکاران (1994) اشاره کرد که در به‌دست آوردن مقادیر بهینه پارامترها بسیار مؤثر واقع شده است (6). اولین تلاش‌های سیستماتیک در زمینه واسنجی خودکار به اواخر دهه 1960 برمی‌گردد. جانستون و پیلگریم (1976) مقادیر بهینه مدل Boughton را که یک مدل بر اساس بارش روزانه است، به‌دست آورده و از روش‌های عددی برای به‌دست آوردن پارامترهای بهینه مدلسازی استفاده نمودند (10).

سروشیان (1983) عواملی را که باعث می‌شود یک مدل نتواند پارامترهای منحصر به فردی را به‌دست آورد، مورد بررسی قرار دادند. به‌عنوان مثال استفاده از داده‌های مربوط به دوران خشک در فرآیند واسنجی، برای پیش‌بینی دوره مرطوب مناسب نیست. نتایج پژوهش 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 (13).

داون و همکاران (1994) مهم‌ترین چالش‌های موجود در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی 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 مسأله، حساسیت پایین جواب‌ها در نواحی بهینه و روابط غیرخطی پارامترها و سطح پاسخ غیرمحدب می‌باشد. بنابراین یک الگوریتم کارا باید توانایی مواجه با مشکلات مذکور را داشته باشد. در این پژوهش، الگوریتم SCE که یک الگوریتم کارا بوده، تشریح شده و از آن‌جا که کارایی مناسب این الگوریتم به پارامترهای آن بستگی زیادی دارد، نحوه به‌دست آوردن این پارامترها تبیین شده است (6).

عجمی و همکاران (2004) واسنجی خودکار را بر روی مدل نیمه توزیعی SAC-SMA بر روی رودخانه‌ای در ایلی نوی اعمال نمودند. یکی از مهم‌ترین اهداف مدل‌های هیدرولوژیکی، توزیع مکانی داده‌های ورودی و تخمین دبی در هر نقطه در طول و عرض رودخانه است. مدل فوق با ادغام با دو مدل DEM و NEXRAD برای پیش‌بینی سیلاب به‌دست آمد (1).

سروشیان و همکاران (1983) طی گزارشی، مراحل واسنجی، صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت را بر روی رودخانه Upper Thames با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS مورد بررسی قرار دادند. دو تابع HMLE و SLS برای واسنجی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که تابع HMLE به‌علت این‌که واریانس خطاها را در نظر می‌گیرد، نسبت به SLS عملکرد بهتری دارد و برای مقاصد پیش‌بینی مناسب‌تر است (14).

قادری و همکاران (2006) به بررسی واسنجی خودکار مدل‌های مفهومی بارش- رواناب (CRR) با استفاده از روش بهینه‌سازی SCE پرداختند. نتایج نشان داد که روش SCE توسعه داده شده در این پژوهش دقیق‌تر از دیگر روش‌های موجود می‌باشد. معیارهای ارزیابی و نتایج نشان داد که روش توسعه داده شده برای واسنجی خودکار پارامترهای مدل CRR دارای دقت و کارائی بالایی می‌باشد (12).

کمالی و موسوی (2009) مدل مفهومی HEC-HMS را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO چندمنظوره کالیبره کردند. بهینه‌سازی چندهدفه در شرایط معلوم بودن اولویت مدلساز در هیدروگراف، به‌صورت ترکیبی از مدل بهینه فازی و الگوریتم PSO تحلیل گردید. نهایتاً نتایج هر دو رویکرد تک‌هدفه و چندهدفه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد چندهدفه فازی می‌تواند عملکرد مناسبی را در یافتن یک جواب مؤثر و کارآمد از مقادیر پارامترهای مدل داشته باشد. همچنین استفاده از رویکرد بازکالیبراسیون معرفی شده در این پژوهش می‌تواند در غربال کردن و حذف تعدادی از مجموعه جواب‌های کاندید مؤثر باشد (11).

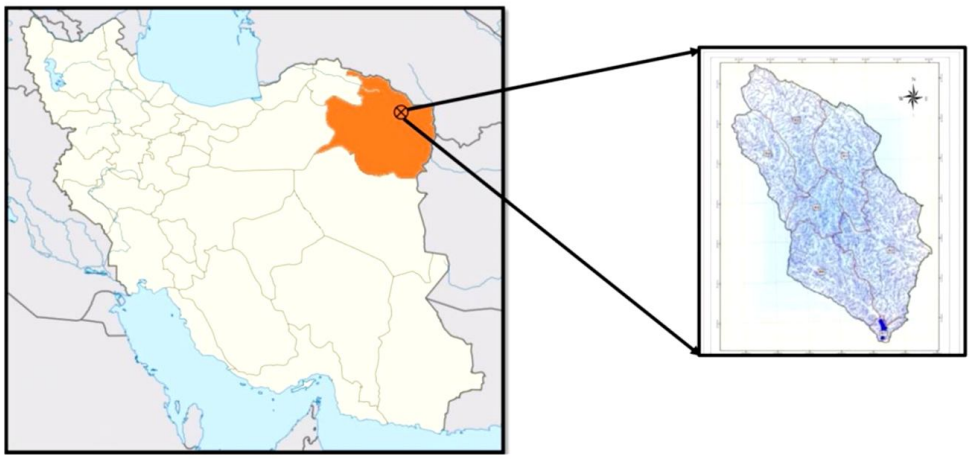
انسانیت (2010) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO به کالیبراسیون مدل بارش رواناب ARNO پرداخت. در این پژوهش، حوضه آبریز رودخانه کرج در بالادست ساختگاه سد امیرکبیر مورد مطالعه قرار گرفت. ورودی‌های مدل ARNO به‌صورت دو سری زمانی بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل هستند. از آن‌جا که تبخیر و تعرق پتانسیل تابع دما است و با توجه به اختلاف ارتفاع زیاد نقاط مختلف حوضه، یک مدل رگرسیونی (براساس بهترین ضریب تعیین) به‌منظور محاسبه رابطه بین دما و ارتفاع، برای محاسبه دمای میانگین در هر روز پیشنهاد گردید. در نهایت با اصلاح فایل بارش به‌عنوان ورودی اصلی مدل و همچنین ساختن فایل تبخیر و تعرق پتانسیل، مدل

مفهومی بارش رواناب ARNO توسط الگوریتم بهینه‌سازی PSO به‌صورت خودکار کالیبره شد و ضریب کارآیی ناش- ساتکلیف در مرحله کالیبراسیون برای حوضه کوهستانی کرج برابر ۰/۸۱۰۸ به‌دست آمده است (7).

در این پژوهش واسنجی خودکار مدل مفهومی بارش- رواناب HEC-HMS (نسخه ۴) در حوضه آبریز سد کارده واقع در استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا فرآیند جستجو و گزینش پارامترهای مدل حوضه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO به‌عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی انجام شده است. به‌طورکلی بررسی روش‌های مدلسازی در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی به‌منظور دستیابی به هیدروگرافی که هرچه بیش‌تر با واقعیت مطابقت داشته و یافتن پارامترهای شبیه‌سازی حوضه است. پیشنهاد ارائه شده برای این پژوهش، تلفیق مدل HMS و الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای یافتن پارامترهای حساس این مدل می‌باشد و نتایج آن با واسنجی شبه‌خودکار الگوریتم Nelder و Mead موجود در نرم‌افزار HEC-HMS مقایسه و ارزیابی گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد نیاز: حوضه آبریز سد کارده با ۵۴۳ کیلومترمربع پهنه، شیب ٪۲/۶، طول آبراهه اصلی ۴۴/۲۴ کیلومتر در شمال‌شرقی خراسان رضوی بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۴ دقیقه و ۳۶ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی و طول ۴۵ درجه و ۵۹ دقیقه و ۴۵ درجه و ۲۷ دقیقه شرقی قرار دارد. کارده یکی از حوضه‌های معرف کشور و مجهز به ابزارهای مناسب برای اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها می‌باشد. رودخانه کارده که مهم‌ترین و تنها رودخانه دایمی این حوضه است از ذوب برف در ارتفاعات کپه‌داغ- هزارمسجد و نیز دو چشمه کارستی (خرکت و بزرگ) واقع در شمال حوضه سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از روستاهای خرکت در جنوب روستای مارشک به شاخه قره‌نو که شمال‌غرب حوضه را زهکش می‌کند، می‌پیوندد و پس از عبور از روستاهای جنگ، پنج‌منه، آل و کارده در جنوب روستای کارده وارد سد کارده می‌شود. در شکل ۱ موقعیت حوضه، جانمایی آن در نقشه ایران و شبیه‌سازی آن در مدل معرفی شده را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱- جانمایی حوضه آبریز سد کارده در نقشه ایران.

Figure 1. Position of kardeh dam basin in iran map.

نحوه شبیه‌سازی در مدل HEC-HMS: شبیه‌سازی و محاسبه هیدروگراف در حوضه، نیازمند معرفی چهار مدل می‌باشد. پس از رسم شماتیک توپولوژی حوضه و رسم شبکه آبراهه‌ها در مدل حوضه، مدل محاسبه تلفات، دبی پایه و تبدیل بارش به رواناب و روندیابی تعیین می‌شوند. حوضه مورد نظر به ۵ زیرحوضه اصلی تقسیم شده است. هر زیرحوضه دارای پارامترهایی بوده که باید واسنجی شوند. اطلاعات دینامیکی مربوط به بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و ایستگاه‌های هیدرومتری در مؤلفه داده‌های سری زمانی حوضه وارد می‌شود و سپس در مدل هواشناسی به زیرحوضه‌های مربوطه تخصیص داده می‌شود. در مؤلفه شاخص‌های کنترل محدوده زمانی شبیه‌سازی و گام زمانی تعیین می‌شود. اطلاعات ورودی در مدل حوضه به خصوصیات فیزیکی حوضه مرتبط است. پس از معرفی زیر حوضه، باید خصوصیات زیرحوضه شامل مساحت زیرحوضه و روش تعیین تلفات، دبی پایه و تبدیل بارش به رواناب حوضه تعیین شود. در این پژوهش، برای محاسبه نفوذ حوضه از روش شماره منحنی (CN)، برای تبدیل بارش به رواناب از روش هیدروگراف واحد کلارک و برای روندیابی رودخانه از روش ماسکینگام استفاده شده است. لازم به ذکر است که دبی پایه در این مدل در نظر گرفته نشده است و سیلاب‌های مورد نظر بدون در نظر گرفتن دبی پایه شبیه‌سازی شده است. اصولاً در رخدادهای حدی حداکثر (سیلاب) مؤلفه دبی پایه از اهمیت کم‌تری برخوردار است.

مدل تلفات- روش شماره منحنی (CN): با توجه به تجارب حوضه‌های کوچک آزمایشگاهی، SCS یک رابطه تجربی بین گیرش اولیه (I_a) و نگهداشت سطحی (S) به‌صورت رابطه ۱ بسط داده است.

$$I_a = \propto \times S \qquad (۱)$$

که در آن، α ضریب تلفات حوضه است و معمولاً بین ۰/۱۵ و ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود.

مدل شماره منحنی در زمره مشهورترین مدل‌های محاسبه تلفات قرار گرفته است. هدف از این مدل ارائه روشی بود که با داشتن خصوصیات خاک حوضه و انتخاب بارش طرح، میزان بارش مازاد قابل محاسبه باشد. این روش بیان می‌کند که در هر رخداد بارش، عمق بارش مازاد و یا به‌عبارتی رواناب، همواره مساوی یا کم‌تر از عمق بارش می‌باشد. که در رابطه ۲ عدد منحنی رواناب (CN) و نگهداشت سطحی خاک (برحسب اینچ) (S) می‌باشد.

$$CN = \frac{1000}{S + 10} \qquad (۲)$$

تبدیل بارش به رواناب- روش هیدروگراف واحد کلارک: کلارک، هیدروگراف واحد یک حوضه آبریز را به‌صورت صریح با دو فرآیند اصلی معرفی می‌کند: انتقال یا حرکت بارش اضافی از نقطه اصلی تا نقطه خروجی حوضه آبریز و میرایی یا کاهش مقدار دبی به منزله ذخیره مازاد در سراسر حوضه آبریز.

ذخیره کوتاه‌مدت آب در حوضه، درخاک، روی سطح و در کانال‌ها نقش مهمی را در تبدیل بارش مازاد به رواناب ایفا می‌کند. مدل مخزن خطی، فرض می‌کند که در قسمت انتهایی رودخانه یک مخزن مجازی وجود داشته باشد تا آب در آن ذخیره شود.

در مدل کلارک، مخزن خطی تأثیرات تجمعی کل ذخیره حوضه را نشان می‌دهد، بنابراین می‌تواند در خروجی حوضه آبریز متمرکز شود. علاوه بر این، مدل کلارک زمان لازم برای حرکت آب به خروجی حوضه را نیز منظور می‌کند. این روش همانند مدل کانال خطی که در آن آب از نقطه انتهایی تا خروجی حوضه با تاخیر روندیابی می‌شود، عمل می‌کند. این تأخیر به‌صورت ضمنی در هیستوگرام زمان- مساحت

وارد می‌شود و نشان می‌دهد که مساحت حوضه آبریزی که جریان را در خروجی پشتیبانی می‌کند، تابعی از زمان است.

در استفاده از این مدل در HMS معرفی پارامتر زمان تمرکز (t_c) ضرورت دارد. این پارامتر از طریق واسنجی برآورد می‌شود و با استفاده از هیدروگراف واحد یا SCS تخمین زده می‌شود. ضریب ذخیره حوضه، شاخص ذخیره زمانی بارش مازاد است که در حوضه آبریز زهکشی می‌شود. همچنین اگر داده‌های مربوط به بارش و رواناب موجود باشد، از طریق واسنجی نیز برآورد می‌شود. ضریب ذخیره دارای بعد زمان است و فقط از حیث فیزیکی دارای معنای کیفی است. کلارک در سال 1945 نشان داد که ضریب ذخیره می‌تواند از تقسیم مقدار جریان در نقطه عطف شاخه فروکش هیدروگراف بر زمان همان جریان محاسبه شود. پس دو پارامتر زمان تمرکز و ضریب ذخیره حوضه باید تعیین شوند (5).

محاسبه زمان تمرکز: در این پژوهش برای محاسبه زمان تمرکز حوضه از روش پیشنهادی سازمان حفاظت امریکا SCS (5) استفاده می‌شود. اساس این روش استفاده از رابطه ۳ است:

$$t_{lag} = \frac{L^{0.8} \times (S+1)^{0.7}}{1900 \times y^{0.5}} \qquad (۳)$$

مقدار S با توجه به مقدار عدد منحنی رواناب به‌دست خواهد آمد. پارامتر L همان طول رودخانه بر حسب فوت است که در تک‌تک زیرحوضه‌ها با توجه به اطلاعات فیزیوگرافی مشخص می‌باشد. y متوسط شیب حوضه است که مقدار آن نیز در اطلاعات فیزیوگرافی حوضه مشخص است. زمان تأخیر (t_{lag}) حوضه که بر حسب ساعت به‌دست می‌آید. رابطه بین زمان تأخیر حوضه و زمان تمرکز حوضه به‌صورت رابطه ۴ به‌دست می‌آید.

$$t_c = 1.67 \times t_{lag} \qquad (۴)$$

نحوه تعیین ضریب ذخیره حوضه: رابطه ضریب ذخیره و زمان تمرکز در یک حوضه بر اساس نسبت نشان داده شده در رابطه ۵ پیشنهاد شده است:

$$\frac{R}{R+t_c} = const \qquad (۵)$$

که در آن، R ضریب ذخیره می‌باشد. عموماً عدد ثابت در این رابطه بین ۰/۶ تا ۰/۲ تغییر می‌کند، که مقدار آن در واسنجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این پژوهش به‌جای واسنجی ضریب ذخیره، ثابت فوق به‌عنوان پارامتر واسنجی در نظر گرفته شده است (15).

روندیابی سیل در رودخانه- روش ماسکینگام: در مدل HMS روش‌های مختلفی جهت روندیابی جریان آبراهه‌ها وجود دارد. با توجه به آماده نبودن مقاطع عرضی رودخانه در زمان انجام مطالعات سیل‌خیزی، روش ماسکینگام انتخاب شد. در این روش از یک تقریب ساده تفاضل محدود از معادله پیوستگی استفاده می‌شود که روابط نهایی به‌صورت روابط ۶ است (5):

$$\begin{aligned} Q_t &= C_1 I(t) + C_2 I(t-1) + C_3 Q(t-1) \\ C_1 &= \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \\ C_2 &= \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \\ C_3 &= \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \end{aligned} \qquad (۶)$$

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

$$MUSK_k = \frac{L}{V_{Wave}} \quad (۷)$$

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

پارامتر ضریب ماسکینگام X: این ضریب بدون بعد بوده و درجه اهمیت I و O دبی ورودی و خروجی در تعیین ظرفیت ذخیره رودخانه را نشان می‌دهد. مقدار آن حداقل ۰ و حداکثر ۰/۵ می باشد و به‌طور متوسط بین ۰/۲ تا ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود (2).

توزیع زمانی و مکانی بارش: در این پژوهش پس از انتخاب سیلاب مورد نظر داده‌های بارندگی روزانه ایستگاه های باران‌سنجی موجود در حوضه در روز وقوع سیلاب استخراج گردید. سپس با استفاده از روش مربع فاصله معکوس در نرم‌افزار ARC-GIS توزیع مکانی بارش برای هر زیرحوضه برآورد گردید. با توجه به وجود ایستگاه‌های باران‌سنج ثبات در حوضه (آل و مارشک) از آن‌ها جهت توزیع زمانی رگبار استفاده گردید. در روش توزیع زمانی رگبار نیز از روش باران وزنی در مدل HEC-HMS استفاده گردید.

تجزیه و تحلیل آمار در حوضه سد کارده: پس از جمع‌آوری آمار، تجزیه و تحلیل آن‌ها جهت کنترل تطابق میزان و توزیع زمانی بارش با شکل و حجم هیدروگراف سیل انجام گرفت که منجر به انتخاب سیلاب‌های مذکور در جدول ۱ گردید.

جدول ۱- مشخصات رخدادهای انتخابی.

Table 1. Specifications selective events.

رخداد Event	تاریخ Date	دبی اوج (m^3/s) Peak discharge	تداوم (ساعت) Duration(hr)
اول First	07/2/2006	28.2	24
دوم Second	07/25/2004	52.4	24
سوم Third	04/23/2003	150	24
چهارم Fourth	07/20/2002	88.34	24

الگوریتم جستجوی Nelder و Mead: این روش یک الگوریتم جستجو برای پیدا کردن پارامترهای بهینه بدون استفاده از مشتق تابع هدف می‌باشد. این الگوریتم جستجو را بر اساس روش جستجوی سیمپلکس انجام می‌دهد. به این ترتیب که در هنگام وجود تعداد n پارامتر، سیمپلکس n+1 دسته پارامتر در نظر می‌گیرد. از نقطه نظر هندسی در یک مدل با n پارامتر، یک چندوجهی با n+1 رأس در فضای n بعدی تشکیل می‌شود. به‌عنوان مثال در صورت وجود دو پارامتر، سیمپلکس مسأله به‌صورت یک سه ضلعی در فضای دوبعدی خواهد بود.

شرط توقف این الگوریتم از یکی از دو روش زیر به‌دست می‌آید:

۱- با توجه به رابطه ۸:

$$\sqrt{\sum \frac{(Z_j - Z_c)^2}{n-1}} < tolerance \qquad (۸)$$

که در آن، n تعداد پارامترها، j اندیس رأس، c اندیس رأس مرکزی، z تابع هدف با اندیس مربوطه است.

۲- حداکثر تکرار ۵۰ برابر تعداد ذرات باشد.

پارامترهایی که در بهترین رأس به‌دست آمده است به‌عنوان پارامترهای بهینه در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش، حداکثر تکرار ۲۰۰ که بیش‌تر از ۵۰ برابر تعداد پارامترهاست، در نظر گرفته شده است.

مدل بهینه‌ساز PSO: الگوریتم PSO 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 ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شوند (16):

$$V_{ij}(t) = W \times V_{ij}(t-1) + C_1 \times rand_1 \times \left(Pbest_{ij} - P_{ij}(t-1)\right) + C_2 \times rand_2 \times \left(Gbest_j - P_{ij}(t-1)\right) \qquad (۹)$$

$$P_{ij}(t) = P_{ij}(t-1) + V_{ij}(t) \qquad (۱۰)$$

که در آن‌ها، 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 پژوهش 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 درنظر گرفتن اثر موقعیت فعلی ذره (عبارت اول رابطه ۹) فاصله ذره از بهترین نقطه‌ای که در همسایگی آن است (عبارت دوم رابطه ۹) و فاصله ذره از بهترین نقطه‌ای است که توسط تمام ذرات به‌دست آمده است (عبارت سوم رابطه ۹) 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. به‌منظور بهبود عملکرد الگوریتم و رفع این مشکل از دو تکنیک آشفتگی PSO (3) و جهش نخبه (9) بهره گرفته شده است. اگرچه استفاده از این دو روش هیچ تضمینی برای به‌دست آوردن جواب بهینه سراسری نیست، ولی با توجه به هدایت ذرات به بخش‌های مختلف فضای جستجو مسأله بعضاً می‌تواند در فرار از بهینه محلی مؤثر واقع شود.

انتخاب تابع هدف: یکی از مهم‌ترین مراحل واسنجی انتخاب تابع هدف مناسب است. تابع هدف مناسب تابعی است که بتواند تا حد امکان هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی را به هم نزدیک کند. در این پژوهش عملکرد تابع هدف‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه توابع هدف مورد استفاده تشریح شده است.

تابع ریشه میانگین مربعات خطا: در این رابطه W_e ضریب وزنی هر یک از نقاط را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که نقاط پیک اهمیت بیش‌تری دارند، در این پژوهش این ضریب برای نقاط پیک مقادیر بزرگ‌تری در نظر گرفته شده است. مقدار آن‌ها با روش سعی و خطا تنظیم شده است. این تابع به‌صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i-1}^{n} We_i^2 * (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i-1}^{n} We_i^2}} \qquad (۱۱)$$

تابع PBIAS: این تابع نشان می‌دهد که آیا به‌طور متوسط مقادیر دبی شبیه‌سازی بیش‌تر از دبی محاسباتی است یا نه؟ مقادیر مثبت نشان‌دهنده تخمین دست پایین دبی است، حال آن‌که مقادیر منفی نشان‌دهنده تخمین دست بالای مدل است. معیار سوم شاخص نرمال‌شده مدلسازی است. این تابع به‌صورت رابطه ۱۲ تعریف می‌شود.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^{N} Q_{obs,i}} \times 100 \quad (۱۲)$$

تابع نش- ساتکلیف: شاخص NASH نسبت واریانس باقیمانده به واریانس دبی‌ها را نشان می‌دهد و مقدار بهینه آن یک می‌باشد. مقادیر بزرگ‌تر از صفر قابل‌قبول‌تر می‌باشند. مقدار صفر نشان می‌دهد که میانگین دبی‌ها شاخص مناسب‌تری برای پیش‌بینی است (4). این تابع به شکل رابطه ۱۳ تعریف می‌شود.

$$NASH = 1 - C_{NS} = \frac{\sum_{i-1}^{n}(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i-1}^{n}(Q_{obs,i} - \overline{Q}_{obs})^2} \quad (۱۳)$$

تعیین حدود بالا و پایین پارامترها در حوضه: به‌طورکلی هر زیر حوضه دارای ۳ پارامتر واسنجی شامل عدد منحنی رواناب (C_N)، ضریب گیرش اولیه (S) و عدد ثابت فاکتور ذخیره (C_s) می‌باشد و رودخانه یا کانال اصلی در فاصله زیرحوضه‌ها در نظر گرفته شده که در هر یک پارامتر ماسکینگام باید طراحی شود. این مقادیر در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- حدود بالا و پایین پارامترهای واسنجی.

Table 2. 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

نتایج و بحث

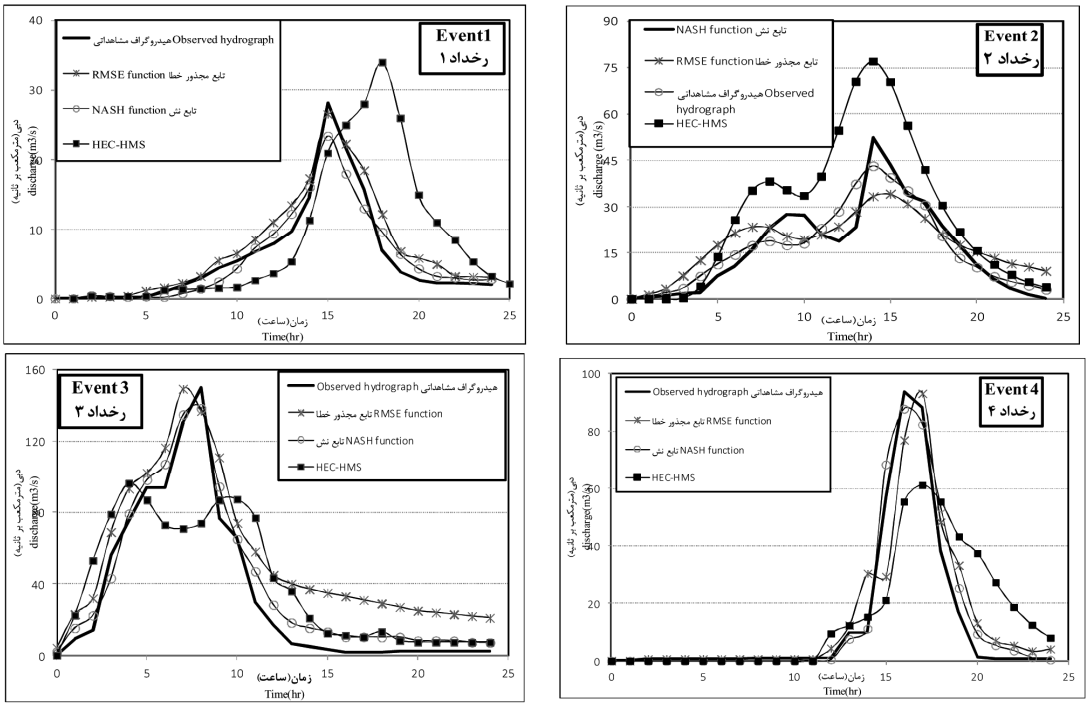
هر یک از رخدادها به‌صورت جدا واسنجی می‌شوند. در این حالت مسأله دارای ۲۰ پارامتر (۲۰ درجه آزادی) است. حداکثر تعداد تکرارها در مدل PSO برابر ۲۰۰ لحاظ شده است. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده در هر یک از رخدادها در شکل ۲ نشان داده شده است. در هر رخداد نتایج واسنجی با دو تابع هدف RMSE و NASH و همچنین واسنجی شبه‌خودکار HEC-HMS ارائه شده است.

مقایسه نتایج با واسنجی شبه‌خودکار نرم‌افزار HEC-HMS: نتایج به‌دست آمده از روش واسنجی شبه‌خودکار مدل HEC-HMS با استفاده از الگوریتم

جستجوی نلدر و مید عملکرد چندان مناسبی را نتیجه نداده است. ملاحظه می‌گردد هیدروگراف‌های واسنجی شده حاصل از مدل PSO-HMS به مراتب بهتر می‌باشد. البته جواب‌های مناسب‌تر در روش شبه‌خودکار در صورت در اختیار داشتن تخمین اولیه مناسب از پارامترها به‌دست خواهد آمد. در صورتی که جواب‌های اولیه به‌صورت تصادفی و بدون در اختیار داشتن مقدار اولیه در نظر گرفته شود، به‌دست آوردن هیدروگراف مناسب مستلزم زمان بسیار طولانی می‌باشد که این بیانگر کارایی مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز PSO-HMS پیشنهادی در این پژوهش است.

ارزیابی مدل با معیارهای عملکرد: ارزیابی دو مدل توسط توابع PBIAS و RMSE صورت گرفت. به‌منظور مقایسه دو مدل مقدار ضرایب وزنی در تابع RMSE در همه نقاط برابر یک فرض شده است. نتایج دو تابع نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف به‌دست آمده در مدل شبه‌خودکار به مراتب بیش‌تر از مدل معرفی شده است. در تابع PBIAS نیز خطای مدل شبه‌خودکار به مراتب بالاتر بوده است. تنها در رخداد سوم و چهارم در واسنجی کردن مدل با تابع RMSE مقدار خطای PBIAS بیش‌تر از مدل شبه‌خودکار بوده که البته مقدار چشم‌گیری نمی‌باشد. جدول ۳ دال بر کارایی مدل معرفی شده می‌باشد.

اعتباریابی مدل: به‌طورکلی در هر فرآیند واسنجی، دو مرحله اعتبارسنجی و اعتباریابی دارای اهمیت است. در فرآیند اعتبارسنجی بررسی می‌شود که آیا مدل با توجه به شرایط عملکرد مناسبی داشته است یا نه؟ حال آن‌که در فرآیند اعتباریابی دلایلی مبنی بر رد یا پذیرش مدل مورد نظر ارائه می‌شود. در این مرحله می‌توان از داده‌های واسنجی نیز به‌عنوان داده‌های صحت‌سنجی بهره گرفت. در این پژوهش، میانگین پارامترهای حاصل از سه رخداد بر روی رخداد چهارم ارزیابی گردید که در شکل ۳ عملکرد هیدروگراف‌های حاصله مشاهده می‌شود. بدین منظور ترکیب مختلف از انتخاب سه رخداد واسنجی و یک رخداد صحت‌سنجی ممکن می‌باشد.



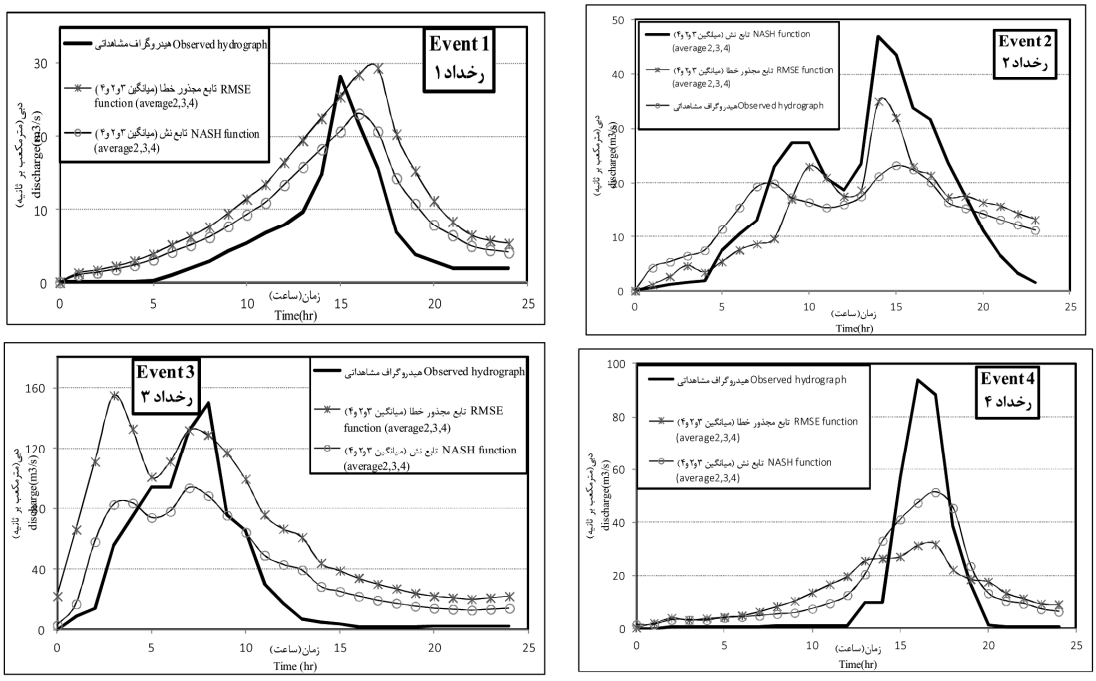
شکل ۲- مقایسه هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی در هر یک از رخدادها.

Figure 2. Comparison of simulated and observed hydrograph on each event.

جدول ۳- معیار ارزیابی در هر رخداد.

Table 3. Assessment Criterion of each event.

رخداد Event	معیار ارزیابی Assessment Criterion					
	RMSE			PBIAS		
	RMSE	NASH	HMS	RMSE	NASH	HMS
اول First	2.06	1.82	6.5	-17.3	-14.3	-47.6
دوم Second	7.4	5.36	16.71	-34.3	-4.45	-61.2
سوم Third	12.82	8.38	26.34	-23.2	-5.51	-17.23
چهارم Fourth	9.17	4.9	16.87	-11.6	-9.22	-15.4



شکل ۳- هیدروگراف‌های حاصل از صحت‌سنجی رخدادهای مختلف.

Figure 3. Hydrograph of validation each event.

نتیجه‌گیری کلی

هدف اصلی این پژوهش واسنجی خودکار مدل مفهومی HEC-HMS به‌عنوان یک مدل یکپارچه برای شبیه‌سازی بارش- رواناب بوده است. نتایج مدل‌های تک‌رخداده PSO-HMS توانست تا حد زیادی دو هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی را بر یکدیگر منطبق کند. نتایج واسنجی سناریو تک‌رخداده PSO-HMS با نتایج واسنجی شبه‌خودکار موجود در HEC-HMS مقایسه گردید. حصول نتایج بهتر و امکان تعمیم مدل از رویکرد تک‌رخداده به

چندرخداده و عدم نیاز به زمان طولانی و عدم وابستگی بالا برای تخمین اولیه مناسب، بیانگر کارایی مناسب مدل بهینه‌ساز- شبیه‌ساز (PSO-HMS) ارائه شده در مقایسه با امکان موجود در نرم‌افزار را داشته است. 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 هیدروگراف‌های موجود با تعداد پارامترهای مناسب و نه لزوماً با تعداد پارامترهای بیشتر حاصل می‌شود. بنابراین در نهایت عدم وجود تابع منحصر به فرد برای در نظر گرفتن همه خصوصیات هیدروگراف 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 به‌عنوان یکی از ویژگی‌ها و مشکلات واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی در این پژوهش مشهود بوده است که ضرورت استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل عدم قطعیت پارامترها را بیش‌تر توجیه می‌کند. بدین معنا که حتی در صورت به‌کار بردن یک تابع هدف، می‌توان دسته پارامترهایی را پیدا نمود که اگر چه مقادیر آن‌ها با یکدیگر تفاوت زیادی دارند، ولی هر دسته پارامتر با مقادیر تقریباً یکسان برای تابع هدف می‌توانند به‌عنوان جواب‌های قابل‌قبول با عملکرد تقریباً مشابه در نظر گرفته شوند. در انتها اعتباریابی مدل 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.

منابع

1.Ajami, N.K., Gupta, H.V., Wagener, H.T., and Sorooshian, S. 2004. Calibration of a semi distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system, J. Hydrol. 298: 112-135.

2.Alizadeh, A. 2008. Principles of Applied Hydrology, published twenty-fifth Imam Reza University, Mashhad.

3.Baltar, A.M., and Fontane D.G. 2008. Use of multi objective particle Swarm Optimization in water resource management, J. Water Resour. Plan. Manage. Pp: 257-265.

4.Behzadian, K. 2010. Developing methods for designing optimal biopsy samples for calibration water distribution networks using multi criteria decision, Ph.D. Thesis, Amirkabir University, Tehran, Tehran, Iran.

5.Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. 1988. Applied Hydrology, McGraw, Inc, New York, USA.

6.Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, H.V. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, J. Hydrol. 158: 265-284.

7.Ensaniat, N. 2012. Daily runoff simulation using the PSO algorithm in catchment model optimization, Thesis for the Degree of Master of Science, Azad University, Science and Research Branch.

8.Qodsipour, A. 2009. Analytic Hierarchy Process, Amirkabir University, Tehran.

9.Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.O. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models comparison with multi-Level expert calibration, J. Hydrol. Engin. 250: 135-143.

10.Johnston, P.R., and Pilgrim, D.H. 1976. Parameter optimization for watershed models, Water Resources Research. 12: 477-486.

11.Kamali, B., and Mousavi, J. 2010. Automatic Calibration of Hydrologic Event-Based Model Using PSO Meta-Heuristic Algorithm, Fifth National Congress on Civil Engineering. (In Persian)

12.Qaderi, K., Samani, J., and Eslami, H. 2006. Auto Calibration of a Rainfall-Runoff Model Based on SCE Method, Iran-Water Resources Research. 2: 2. 39-52.
13.Sorooshian, S. 1983. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models the question of parameter observability and uniqueness. Water resource research.
14.Sorooshian, S., Gupta, V.H., and Fulton, J.L. 1983. Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models' influence of calibration data variability and length on model credibility, Water resource research. 19: 251-259.
15.Timothy, D.S., Charles, S.M., and Kyle, E.K. 2000. Equations for Estimating Clark Unit Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois, Water-Resources Investigations Report.
16.Yapo, P., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models; Sensitivity to calibration data, J. Hydrol. 181: 23-48.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(5), 2016
http://jwsc.gau.ac.ir

Comparing PSO algorithm automatic calibration and Nelder & Mead algorithm on the HEC-HMS hydrologic model (Case study: Kardeh watershed)

R. Garmehei[1], *A.R. Faridhosseini[2], S.M. Hasheminia[3] and A. Hojjati[4]

[1]M.Sc. Student, Dept. of Water Resources Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,
[2]Assistant Prof., Dept. of Water Resources Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,
[3]Instructor, Dept. of Water Resources Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,
[4]M.Sc. Graduate, Dept. of Water Resources Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
Received: 07/08/2014; Accepted: 11/30/2014

Abstract

Background and Objectives: 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 the best fit between observed and estimated hydrographs in a procedure called calibration. As manual calibration is tedious, time consuming and requires personal experiences, automatic calibration methods, make application of CRR models more significant which are based on using a systematic search procedure to find good parameter sets in terms of at least on objective function. Due to the time consuming manual calibration data, especially in low and high parameters automatic calibration methods based on the use of systematic search methods in multi-dimensional space using an objective function is very useful.

Materials and Methods: In this research, the conceptual HEC-HMS model is integrated with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. The *HEC-HMS* model was developed as a replacement for HEC-1, which has long been considered a standard model for hydrologic simulation. Most of the hydrologic models employed in *HEC-HMS* are event-based models simulating a single storm requiring the specification of all conditions at the start of the simulation. The soil moisture accounting model in the *HEC-HMS* is the only continuous model simulates both wet and dry weather behaviour. Programming of PSO algorithm was done by *MATLAB*. Model calibration was performed using the objective function NASH and RMSE resulting parameters were used to those achieve. To evaluate the ability of the PSO algorithm to achieve the optimal solution, a single calibration approach results occurred with semi-automatic calibration results based on Nelder & Mead search algorithm in HEC-HMS PBIAS and RMSE were compared by functions that PSO algorithm represents the connection to a hydrological model. The integrated model is tested on dam basin Kardeh located in Khorasan Razavi province.

Results: The results show that both the objective function values obtained in the semi-automatic model is considerably higher than the model introduced. Also simulated hydrographs obtained from PSO-HMS model is much better. Finally, those parameters were determined from single approach occurred in the event verification.

Conclusion: The results showed that the method according to the solution of the calibration problem of Ghyrmnfrd an inverse problem can be effective in limiting the number of candidate solutions.

Keywords: Automatic calibration, HEC-HMS model, PSO optimization algorithm, PSO-HMS

* Corresponding Author; Email: farid-h@um.ac.ir