



Auto Calibration of a Rainfall-Runoff Model Based on SCE Method

Kourosh Qaderi¹, Jamal M. V. Samani²,
Hamid R. Eslami³, Bahram Saghafian⁴

Abstract

The successful application of a conceptual rainfall-runoff (CRR) model depends on how well it is calibrated. Generally, CRR model deals with many parameters that should be estimated through robust optimization tools. The degree of difficulty in solving a global optimization method is generally dependent on the dimensionality of the CRR model and certain characteristics of objective function. The purpose of optimization is to finalize the best set of parameters associated with a given calibration data set that optimize the evaluation criteria. In this study, a global optimization method known as the SCE (Shuffled Complex Evolution) has been developed for autocalibration of CRR parameters. This method is developed based on the nature of optimization problems in CRR models, combination of probabilistic and deterministic approaches, and clustering and competitive evolution. SCE method has shown promise as an effective and efficient optimization technique. Model verification and validation results indicated that automatic calibration was superior to other existing algorithms. Also, the proposed SCE algorithm was programmed via innovative ways to reduce the memory allocation and improve the speed of computations. In addition, a new method of storing very large matrices with small number of non-zero members was implemented. Thus, personal computers can also be used for automatic calibration of up to 35 parameters. In this study, the developed SCE technique has been applied for auto calibration of storage CRR model, namely NAM, in Gamasiab watershed within the great Karkhe basin. The calibration and validation results and evaluating criteria shows the effectiveness and efficiency of this method for autocalibrating of CRR parameters.

Keywords: Auto Calibration, Conceptual Rainfall Runoff Model, Global Optimization Techniques, SCE Method.

واسنجی اتوماتیک مدل بارش - رواناب با استفاده از روش بهینه‌سازی SCE

کوروش قادری^۱، جمال محمد ولی سامانی^۲،
حمیدرضا اسلامی^۳، بهرام ثقفیان^۴

چکیده

کاربرد موفقیت‌آمیز مدل‌های مفهومی بارش - رواناب (CRR) به چگونگی واسنجی پارامترهای آنها بستگی دارد. مدل‌های CRR عموماً دارای پارامترهای زیادی هستند که نمی‌توان آنها را بصورت مستقیم اندازه‌گیری نمود و لازم است که آنها را در طول واسنجی مدل تخمین زد. هدف از انجام واسنجی، یافتن مقادیر آن سری از پارامترهایی است که باعث بهینه شدن معیارهای نیکویی واسنجی می‌شوند. با وجود عمومیت کاربرد این مدل‌ها، در صورتی که نتوان یک مقدار بهینه برای پارامترهای مدل CRR با استفاده از واسنجی اتوماتیک بدست آورد کاربرد آن مدل‌ها بسیار مشکل می‌شود. در این تحقیق از یک روش توسعه یافته بهینه‌سازی سراسری به نام (SCE) برای واسنجی پارامترهای مدل CRR استفاده شده است. این روش براساس طبیعت مسائل بهینه‌سازی مدل CRR، به اشتراک گذاشتن اطلاعات و مفاهیم تکامل تصادفی و رقابتی جوامع توسعه داده شده و توان بسیار بالایی در پیدا کردن نقاط بهینه سراسری دارد. نتایج نشان می‌دهند که روش توسعه داده شده در این تحقیق دقیقتر از دیگر روش‌های موجود SCE می‌باشد. همچنین برای افزایش کارایی و راندمان روش توسعه داده شده SCE، از تکنیک‌های ابتکاری جهت کاهش حجم حافظه و زمان اجرای برنامه و از تکنیک ماتریس اسپارس برای مدیریت و بازیابی اطلاعات استفاده شده است. با استفاده از این روش می‌توان مسائل واسنجی خودکار مدل‌های بارش رواناب تا ۳۵ پارامتر (بعد) را نیز کالیبره نمود. روش واسنجی اتوماتیک در زیرحوضه گاماسیاب در شمال غربی حوضه رودخانه کرخه مورد آزمون قرار گرفته است. معیارهای ارزیابی و نتایج نشان می‌دهند که روش توسعه داده شده برای واسنجی خودکار پارامترهای مدل CRR دارای دقت و کارایی بالایی می‌باشد.

کلمات کلیدی: واسنجی اتوماتیک، مدل مفهومی بارش رواناب، CRR، تکنیک‌های بهینه‌سازی سراسری، روش SCE

1. PhD student water structures department, Tarbiat Modares University, kghaderi@modares.ac.ir
2. Associate professor water structures department, Tarbiat Modares University, samanij@modares.ac.ir
3. Head of R&D Department in Jamab Consultant engineering, eslami@jamab.com
4. Associate Professor and Director, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, saghafian@scwmri.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس.
۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس.
۳- مدیر بخش تحقیق و توسعه شرکت مهندسین مشاور جاماب.
۴- عضو هیئت علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.

۱- مقدمه

۲- ساختار حاکم بر مدل بارش - رواناب

اخیراً، محققان زیادی سعی در توسعه مدل‌های بهینه‌سازی سراسری برای واسنجی اتوماتیک مدل‌های بارش رواناب داشته‌اند. مدل‌های CRR¹ برای شبیه‌سازی مکانیزم فیزیکی عمومی حاکم بر چرخه هیدرولوژی طراحی شده و کاربردهای زیادی در میان هیدرولوژیست‌ها دارند. مدل‌های CRR آن بخش از رطوبت خاک را که در چرخه هیدرولوژی بصورت ارتباط یک سری از مخازن وجود دارد شبیه‌سازی می‌کنند. در هر مدل CRR می‌بایست از یک سری مقادیر مناسب برای پارامترهای حاکم استفاده شود. روشی که برای انجام این عمل مورد استفاده قرار می‌گیرد واسنجی نام دارد. مدل‌های CRR عموماً دارای پارامترهای زیادی هستند که نمی‌توان آنها را بصورت مستقیم اندازه‌گیری نمود و لازم است که آنها را در طول واسنجی مدل تخمین زد. هدف از انجام واسنجی پیدا کردن مقادیر آن سری از پارامترهایی است که باعث بهینه شدن معیارهای نکویی واسنجی می‌شوند.

در طول سه دهه گذشته تلاش‌های بسیاری در جهت واسنجی مدل‌های CRR توسط Ibbitt (1972)، Johnston and Pilgrim (1976)، Kuczera (1982)، Sorooshian and Dracup (1980)، Troutman (1985)، Sorooshian and Gupta (1985)، Madsen (2000)، Duan et al. (1988, 1992 and 1994)، Gan and Biftu. (1996) و Wang (1991) انجام شده است. از جمله محققانی که از روش‌های بهینه‌سازی سراسری در مدل‌های CRR استفاده کرده‌اند می‌توان به Ibbitt (1984)، Duan et al. (1993)، Sorooshian et al. (1993)، Yapo et al. (1996)، Thyer and Kuczera (1999) و Liang and Muttill (2004) اشاره کرد.

تئوری و کاربرد تکنیک‌های بهینه‌سازی سراسری در طول دهه گذشته افزایش چشمگیری داشته و الگوریتم‌های مختلفی برای آنها ارائه شده است. رشد سریع کاربردهای محاسبات کامپیوتری کمک شایانی به استفاده از روش‌های بهینه‌سازی سراسری در مدل‌های CRR کرده است. در این مقاله از روش توسعه یافته بهینه‌سازی سراسری SCE² برای واسنجی اتوماتیک مدل CRR ذخیره‌ای³ NAM در حوضه رودخانه گاماسیاب واقع در شمال غربی حوضه رودخانه کرخه استفاده شده است.

مبانی و دیدگاه عمومی حاکم بر مدل CRR استفاده شده در این تحقیق براساس مدل ذخیره‌ای NAM می‌باشد. در این مدل یک حوضه آبریز از لحاظ گردش آب بصورت کمی شبیه‌سازی می‌شود. شبیه‌سازی با در نظر گرفتن میزان ذخیره آب در سه لایه مختلف حوضه و یک لایه ذخیره برف که با یکدیگر در ارتباط می‌باشند، صورت می‌گیرد. این مدل بصورت یکپارچه (Lumped) عمل نموده و پارامترهای آن معرف مقادیر میانگین برای کل حوضه می‌باشند. شکل ۱ ساختار کلی مدل، ارتباط بین حجم‌های ذخیره‌ای و جریانات مختلف را نشان می‌دهد. چهار حجم ذخیره‌ای در مدل عبارتند از: منابع ذخیره‌ای برف؛ لایه سطحی خاک؛ لایه زیرین خاک و آب زیرزمینی و سه جریان خروجی از مدل شامل جریان سطحی (Q_{OF})، جریان زیرسطحی (Q_{IF}) و جریان پایه زیرزمینی (Q_{BF}) می‌باشد. بطور کلی داده‌های مورد نیاز مدل شامل سری زمانی بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل، شرایط اولیه، دما و جریان خروجی حوضه می‌باشد. پارامترهای بخش‌های مختلف مدل ذخیره‌ای NAM همراه با توصیف آنها در جدول ۱ ارائه شده است. شبیه‌سازی ذوب و روندیابی برف نیز در این مدل قابل انجام است. برای انجام روندیابی داده‌های برف از داده‌های دما استفاده می‌گردد. زمانی که درجه حرارت کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد باشد، بارندگی بصورت برف ریزش می‌نماید. میزان ذخیره برف با نرخ Q_{melt} ذوب شده و به ذخیره سطحی اضافه می‌گردد.

در هر بازه شبیه‌سازی اگر میزان بارندگی در حدی باشد که رطوبت خاک در لایه سطحی (U) به حداکثر مقدار خود (U_{max}) برسد، میزان بارندگی اضافه از این حد متناسب با مقدار و درصد اشباع لایه زیرین خاک به رواناب سطحی تبدیل می‌شود. رواناب سطحی (Q_{OF}) از طریق دو مخزن خطی متوالی روندیابی می‌شود که حاصل این روندیابی، هیدروگراف جریان سطحی خواهد بود. ثابت زمانی در دو مخزن (CK₁ و CK₂) نشانه‌ای از زمان تأخیر جریان سطحی در حوضه می‌باشند. این ثابت‌ها نیز یکی از عوامل تعیین‌کننده در واسنجی مدل با توجه به داده‌های مشاهداتی هستند. رطوبت ذخیره‌شده در پوشش گیاهی و سطح فوقانی خاک، ذخیره لایه سطحی (U) نامیده می‌شود. ذخیره U در هر بازه زمانی شبیه‌سازی توسط بارش و ذوب برف تغذیه شده و توسط تبخیر و جریان زیرسطحی کاهش می‌یابد. رواناب سطحی زمانی اتفاق می‌افتد که رطوبت این لایه به U_{max} رسیده باشد. ذخیره لایه سطحی خاک در تولید جریان زیرسطحی (Q_{IF}) نیز مشارکت می‌کند. این جریان اغلب سهم بسیار کمی در هیدروگراف جریان سطحی حوضه دارد. میزان جریان زیرسطحی (Q_{IF}) با مقدار U و درصد اشباع لایه

بصورت برف ریزش می‌نماید. میزان ذخیره برف با نرخ Q_{melt} ذوب شده و به ذخیره سطحی اضافه می‌گردد.

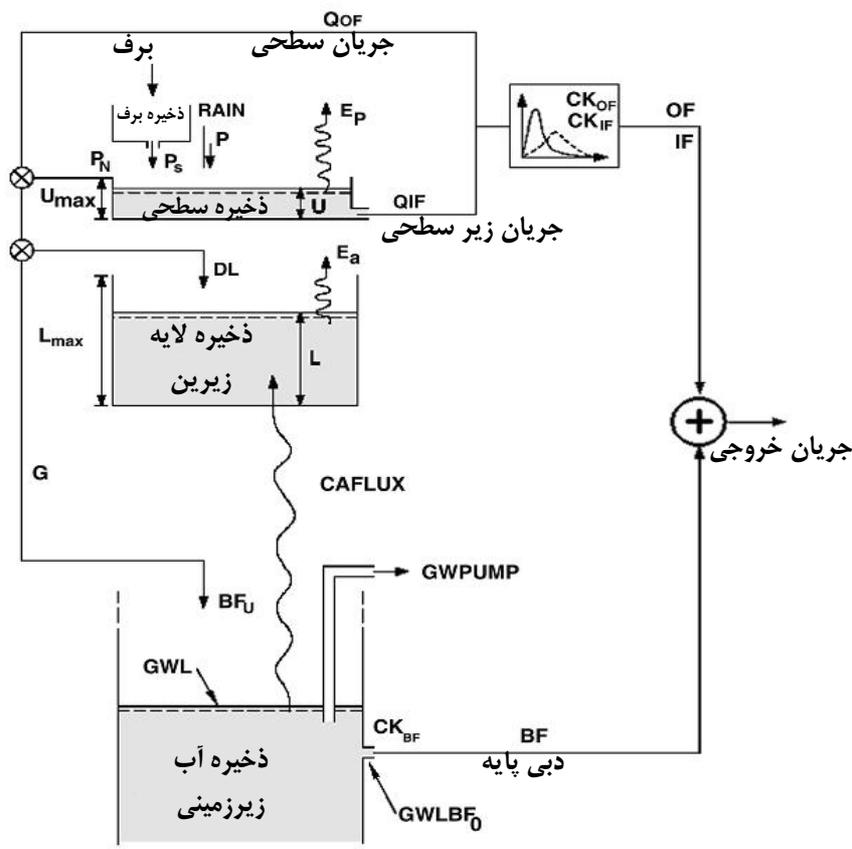
هدف اصلی این تحقیق فرموله کردن و بکارگیری یک روش بهینه‌سازی سراسری در تعیین پارامترهای توابع چندبعدی برای واسنجی اتوماتیک مدل بارش رواناب NAM می‌باشد. این اهداف شامل انجام یک همگرایی سریع با روش SCE و فرموله کردن اهداف مختلف که خصوصیات متفاوت پاسخ‌های هیدرولوژیکی را اندازه‌گیری کند می‌باشد.

۳- فرمول‌بندی اهداف مختلف

در واسنجی مدل می‌توان توابع مختلفی را انتخاب و مدل را براساس آنها واسنجی کرد. در واسنجی می‌توان یکی و یا ترکیباتی از حداقل‌سازی خطا را در یکی از عوامل دبی اوج، دبی پیک، دبی پایه، کل حجم جریان سطحی و شکل هیدروگراف انتخاب کرد. در بخش بعد روش SCE و اصول و مبانی آن ارائه شده است.

زیرین خاک (L/L_{max}) متناسب است. جریان زیرسطحی (QIF) نیز از طریق دو مخزن خطی متوالی با ثابت‌های CK1 و CK2 روندیابی می‌شود. رطوبت ذخیره شده در لایه زیرین خاک که ریشه پوشش گیاهی از آن برای تبخیر و تعرق استفاده می‌کند ذخیره لایه زیرین خاک نامیده شده و با نماد L ارائه می‌گردد. حداکثر میزان ذخیره این لایه L_{max} خواهد بود. قسمتی از بارش اضافه به جریان سطحی تبدیل شده و باقیمانده آن به لایه زیرین نفوذ می‌کند. بخشی از آب نفوذ یافته به جریان آب زیرزمینی (G) می‌پیوندد و بخش دیگر، رطوبت لایه زیرین خاک را افزایش می‌دهد. ذخیره آب زیرزمینی بصورت یک مخزن کم عمق آب زیرزمینی عمل می‌کند. آب مورد نیاز برای تبخیر و تعرق پتانسیل در صورت وجود از ذخیره لایه سطحی خاک خارج شده و در صورتی که ذخیره این لایه کمتر از نیاز تبخیر و تعرق باشد از ذخیره لایه زیرین خاک تامین می‌شود.

شبیبه‌سازی ذوب و روندیابی برف نیز در این مدل قابل انجام است. برای انجام روندیابی داده‌های برف از داده‌های دما استفاده می‌گردد. زمانی که درجه حرارت کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد باشد، بارندگی



شکل ۱- فلوچارت ارتباط ذخیره‌ها و مولفه‌های جریان در مدل مفهومی بارش رواناب NAM

جدول ۱- پارامترهای مدل ذخیره‌ای NAM و مشخصات آنها

شماره	نام پارامتر	علامت	دامنه	توضیحات
پارامترهای ذخیره سطحی و ذخیره لایه زیرین				
۱	حداکثر حجم ذخیره شده در لایه سطحی	U max	۱۰-۲۰mm	اگر ذخیره سطحی آب از میزان حداکثر آن بیشتر شود به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند.
۲	حداکثر حجم ذخیره شده در ناحیه ریشه	L max	۵۰-۵۰۰mm	حداکثر رطوبت خاک در دسترس گیاه برای تعرق
۳	ضریب رواناب سطحی	CQOF	۰/۰۱ - ۰/۹	ثابت تبدیل بارش مازاد به رواناب سطحی و نفوذ
۴	ثابت زمانی جریان زیرسطحی	CKIF	۵-۱۰۰hr	روندبایی مخزن طی
۵	ثابت زمانی برای روندبایی جریان سطحی	CKOF	۳-۴۸hr	روندبایی مخزن طی
۶	آستانه جریان سطحی در ناحیه ریشه	TOF	۰/۰۱-۰/۹۹	اگر رطوبت ذخیره لایه زیرین کمتر از آستانه باشد جریان سطحی بوجود نمی‌آید.
۷	مقدار آستانه جریان زیرین در ناحیه ریشه	TIF	۰/۰۱-۰/۹۹	آستانه جاری شدن جریان زیرسطحی در مخزن میانی
پارامترهای آب زیرزمینی				
۸	ثابت زمانی جریان پایه	CKBF	۲۰۰-۴۰۰hr	روندبایی مخزن طی
۹	آستانه تغذیه آب زیرزمینی در ناحیه ریشه	TG	۰/۰۱-۰/۹۹	شبیه‌سازی بالا آمدن تراز آب زیرزمینی در شروع فصل مرطوب
۱۰	آبدهی ویژه	Sy	۰/۰۱-۰/۳	
پارامترهای برف				
۱۱	ضریب درجه-روز	DDF	۱-۴mm	تعیین نرخ دمائی ذوب برف
۱۲	دمای آستانه	TSSR	۱-۲/۵ C°	تعیین دمای جداساز برف و باران
۱۳	گرادیان ارتفاعی	TLPS	۰/۲-۰/۷	میزان کاهش دما بر اثر افزایش دما
ضرایب وزنی ایستگاه‌های باران سنجی، دما و تبخیرسنجی				
۱۴	باران سنجی	RSW	۰/۵-۱/۵	وزن ایستگاه‌های باران سنجی
۱۵	تبخیرسنجی	ESW	۰/۵-۱/۵	وزن ایستگاه‌های تبخیرسنجی

۴- روش SCE

تکامل تصادفی جوامع یا SCE یک روش بهینه‌سازی سراسری فراذهنی است که توسط Duan و همکاران در سال ۱۹۹۲ ارائه شد و سرعت به یکی از روشهای معمول مورد استفاده در مهندسی منابع آب تبدیل شد. بر اساس الگوریتم این روش، یک نمونه‌برداری تصادفی از نقاط برداشت شده و به یک سری جوامع تقسیم‌بندی می‌شوند. هر کدام از جوامع می‌توانند به تنهایی با استفاده از تکنیک‌های تکامل رقابتی بر اساس روش سیمپلکس گرادیان نزولی به سمت نقطه بهینه سراسری حرکت کنند. در پایان هر مرحله، کل مجموعه نقاط برزده شده و اطلاعات آنها به اشتراک گذاشته شده و جوامع جدید تشکیل می‌دهند. ترکیب تکامل رقابتی و برزیدن، این اطمینان را حاصل می‌کند که اطلاعات مجزای بدست آمده توسط هر جامعه با کل جوامع به اشتراک گذاشته می‌شود. این عمل باعث می‌شود که یک جستجوی دقیق و مقاوم در فضای امکان‌پذیر انجام داد. بنابراین می‌توان گفت که روش SCE براساس ترکیب چهار مفهوم موفق ترکیبات تصادفی و رویکردهای قطعی

(Dixon and Szego, 1978; Torn and Zilinskas, 1989) دسته‌بندی (Becker and Iago, 1970; Torn 1978; Timmer, 1987)، تکامل نظام‌گرای نقاط پخش‌شده در فضای جوامع (Price, 1978) و تکامل رقابتی (Holland, 1975) بوجود آمده است.

استفاده از روش قطعیت امکان استفاده مناسب از اطلاعات سطوح پاسخ برای هدایت جستجو را در الگوریتم SCE فراهم می‌کند. عناصر تصادفی، انعطاف‌پذیری الگوریتم را افزایش می‌دهند. انتخاب تصادفی تعداد زیاد نقاط انتخاب شده باعث کامل‌تر شدن جوامع از لحاظ دارا بودن تعداد، موقعیت، اندازه، خصوصیات و نواحی مورد علاقه می‌شود. دسته‌بندی جوامع باعث جهت‌گیری مناسب‌تر جستجو به سمت نواحی است که توسط خصوصیات جوامع قبلی مشخص شده‌اند. استفاده از روش تکامل رقابتی نظام‌گرا در جهت اطمینان از پایداری نسبی جستجو و هدایت آن به طرف ساختار تابع هدف می‌باشد. همچنین استفاده از استراتژی جایگزینی نقاط با ارزش کم در جامعه با هر نقطه جدید که دارای ارزش بالاتری است منجر به

تمام اعضای گروه تمایل به پیروی و حرکت در جهت و موقعیت رهبر گروه را دارند و این در حالی است که خود رهبر گروه نیز دارای موقعیت ثابتی نیست و در هر تکرار به موقعیت نقطه بهینه نزدیکتر می‌شود. نمودار کلی الگوریتم در شکل ۲ ارائه شده‌است. جزئیات الگوریتم در مراجع متعددی مانند (Duan et al., 1992, 1993, 1994) ارائه شده است.

تجمع سریع نقاط در یک محدوده کوچکتر می‌شود. موفقیت‌آمیز بودن هر کدام از مفاهیم فوق به طور جداگانه در کارهای (Holland, 1975; Price, 1978; Manetsch, 1990; Wang, 1991) و (Duan et al., 1992 and 1993) ترکیب مفاهیم فوق روش SCE را به یک روش کارا، مؤثر و مقاوم و قابل انعطاف تبدیل کرده است (Duan et al., 1994).

۵-۱- الگوریتم SCE

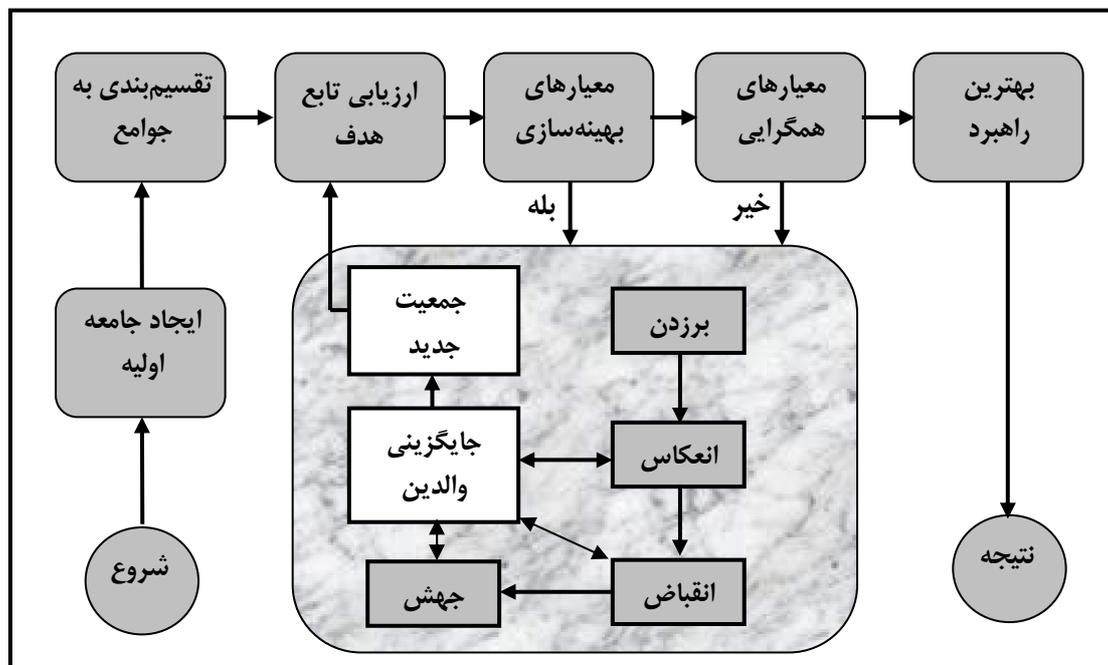
- ۱- ایجاد یک نمونه تصادفی در فضای امکان‌پذیر حاوی S نقطه و محاسبه مقدار تابع هدف در هر کدام از نقاط.
- ۲- نقاط S نمونه بصورت صعودی مرتب شده و در آرایه‌ای مانند D بصورت $D = \{x_i, f_i, i = 1, \dots, S\}$ قرار می‌گیرند. در واقع نمونه S شامل نقاط x_1, x_2, \dots, x_S در فضای امکان‌پذیر و f_i مقدار تابع در هر نقطه x_i می‌باشد.
- ۳- نقاط S نمونه را به P جامعه تقسیم کرده طوری که هر جامعه دارای m نقطه باشد. یعنی:

$$A^k = \{x_j^k, f_j^k | x_j^k = x_{k+P(j-1)}, f_j^k = f_{k+P(j-1)}, j = 1, \dots, m\} \quad (1)$$

۵- استراتژی روش SCE در بهینه سازی

- در واقع روش SCE یک روش تکاملگرا می‌باشد که از دو بخش کلی بنام SCE و CCE^۴ تشکیل یافته‌است. یک توصیف کلی از الگوریتم روش فوق به شرح زیر ارائه می‌گردد:
- * برداشت مجموعه تصادفی از نقاط^۵ و تقسیم‌بندی آنها به تعدادی جامعه^۶.
 - * تکامل جداگانه هر کدام از جوامع در جهت توسعه سراسری با استفاده از تکنیک تکامل رقابتی.
 - * در پایان هر مرحله، کل مجموعه‌های بدست آمده بر زده شده^۷ و با هم ترکیب می‌شوند.

در SCE آموزش بصورت گروهی یا بصورت زیرگروه‌ها انجام می‌شود و هر کدام از اعضای گروه یک پاسخ برای مسئله می‌باشند. در SCE



شکل ۲ - ساختار کلی جستجوی نقطه بهینه سراسری در روش SCE

شده و Z جایگزین u_q می شود (گام جهش). (و) - مراحل (الف) تا (ی) را ∞ بار تکرار کنید.
 ۴- جایگذاری فرزندان به جای والدین. A_k را براساس مقادیر افزایش تابع مرتب می شوند.
 ۵- تکرار مراحل ۲ تا ۴ به اندازه $\beta \geq 1$ و پارامتری است که تعداد گام های تکاملی جامعه را مشخص می کند.

انتخاب تصادفی نقاط اولیه در فضای پارامترها امکان گرفتار شدن در دام نقاط شروع اولیه و بهینه موضعی را کاهش می دهد. تقسیم بندی نقاط اولیه به تعدادی جامعه باعث تسهیل و توسعه بهتر و آزادانه تر جستجو در تمام جهات فضای امکان پذیر شده و برنامه توانائی جستجو در مسائلی را که دارای چندین ناحیه دارای نقاط بهینه موضعی نیز هستند پیدا می کند. اختلاط دوباره جوامع بعد از توسعه جداگانه هر کدام از آنها و اشتراک اطلاعات باعث افزایش بقا و تداوم زیست در خصوصیات آنها می شود.

تکامل رقابتی (CCE) هر جامعه بخش مهمی از الگوریتم SCE است. از این روش برای توسعه هر جامعه یا در واقع تولیدمثل فرزندان با خصوصیات بهتر استفاده می شود. فرآیند تکامل رقابتی بر این اساس عمل می کند که در طول تولیدمثل، والدین با خصوصیات بهتر امکان مشارکت بیشتری در تولیدمثل نسبت به والدین با خصوصیات ضعیف تر دارند. بعد از گام چهارم، الگوریتم CCE فعال شده و هر جامعه را بطور جداگانه توسعه داده و دوباره وارد مسیر اصلی می شود. در این الگوریتم، تمام نقاط جامعه دارای این شانس هستند که به عنوان والدین انتخاب شده و در فرآیند تولیدمثل شرکت داشته باشند. وظیفه زیرمجموعه های جوامع مانند یک جفت والدین می باشد با این تفاوت که ممکن است بیش از دو والد انتخاب شود. استفاده از روش های تصادفی برای ایجاد زیرمجموعه امکان جستجو را به طور کامل در تمام فضای پارامترها فراهم می سازد. ایده رقابت در تشکیل زیرمجموعه ها براساس این نکته است که قوی ترها نسبت به ضعیف تر دارای شانس بیشتری برای بقا بوده و فرزندان تولید شده توسط آنها سالم تر هستند و باعث همگرایی سریعتر جستجو می شود. هر عضو جامعه این شانس را دارد که بتواند حداقل یک بار در فرآیند تولید مثل شرکت کند قبل از این که جایگزین یا دور انداخته شود. بنابراین هیچ کدام از اطلاعات موجود در جوامع و نمونه ها بدون استفاده باقی نمی ماند. فرآیند تکامل رقابتی و اختلاط ذاتی جوامع در الگوریتم SCE منجر به اطمینان بالا از کارایی، استفاده و بهره کشی اطلاعات در تمام طول جستجو می شود. عوامل فوق باعث می شوند الگوریتم SCE به یک الگوریتم کارا و موثر جستجوی سراسری کامل تبدیل شود.

براساس رابطه فوق هر جامعه شامل نقاط $P(j-1)+k$ می باشد. به عنوان مثال جامعه اول و دوم بترتیب شامل تمام نقاط مرتب شده با شماره های $P(j-1)+1$ و $P(j-1)+2$ هستند و به همین ترتیب برای دیگر جوامع $k=1, \dots, P$.
 ۴- هر جامعه $A^k, k=1, \dots, P$ براساس الگوریتم تکامل رقابتی جامعه (CCE) توسعه می یابد.
 ۵- نقاط جوامع مختلف دوباره با هم ترکیب شده تا تنها یک نمونه از نقاط وجود داشته باشد. یعنی جوامع A^1, A^2, \dots, A^P دوباره در D جایگزین شوند. طوری که $D = \{A^k, k=1, \dots, P\}$ و D براساس مقادیر صعودی تابع هدف مرتب می شود.
 ۶- در صورت ارضای هر کدام از معیارهای همگرایی برنامه متوقف می شود. معیارهای همگرایی شامل حداکثر تعداد تکرارها، حداقل شدن مقدار تابع هدف و میزان تغییرات تابع هدف در چندین تکرار متوالی می باشد.
 ۷- در غیر این صورت دوباره به مرحله ۳ برگشته و محاسبات تکرار شوند.

۲-۵- الگوریتم CCE

۱- یک زیرمجموعه q نقطه ای (والدین) بطور تصادفی از هر جامعه انتخاب می شود.
 ۲- والدین در آرایه ای مانند $B = \{u_i, v_i, i=1, \dots, g\}$ قرار داده می شوند که v_i برابر با مقدار تابع هدف در نقطه u_i است.
 ۳- تولید فرزندان: الف- مرکز ثقل نقاط مرتب شده B از رابطه

$$g = \left[\frac{1}{(q-1)} \sum_{j=1}^{q-1} u_j \right]$$

محاسبه می شود. ب- نقطه جدید $r = 2g - u_q$ ایجاد می شود (گام انعکاس). ج- اگر نقطه جدید بدست آمده درون محدوده مورد نظر بود تابع f_r محاسبه شده و به گام (د) بروید در غیر این صورت کوچکترین عددی را که درون فضای امکان پذیر قرار دارد محاسبه کرده و بطور تصادفی نقطه ای مانند Z تولید می شود، f_r محاسبه کرده، $r = Z$ و f_r برابر با f_z قرار داده می شود $f_r = f_z$ (گام جهش). (د) - اگر $f_r < f_q$ آنگاه نقطه جدید جایگزین بدترین نقطه شده و به مرحله م بروید. در غیر این صورت از گام ۱۱ انقباض استفاده می شود. بدین صورت که نقطه ای را که در وسط فاصله مرکز ثقل و بدترین نقطه قرار دارد محاسبه کرده و تابع هدف در آن نقطه بدست می آید یعنی $c = (g + u_q) / 2$. (ی) - اگر ارزش نقطه جدید ایجاد شده توسط گام انقباض (د) بهتر از ارزش بدترین نقطه بود یعنی $f_c < f_q$ جایگزین Z شده و به مرحله (و) بروید وگرنه با ایجاد یک نقطه تصادفی Z درون فضای امکان پذیر، f_z محاسبه

۳-۵- انتخاب پارامترهای الگوریتم

روش SCE شامل اجزاء قطعی و احتمالاتی بسیاری می‌باشد که توسط تعدادی پارامتر کنترل می‌شوند. این پارامترها شامل اعضای یک جامعه (m)، اعضای هر زیرمجموعه یا والدین (q)، تعداد جوامع (P)، تعداد فرزندان تولید شده در هر زیرمجموعه (∞) و تعداد گام‌های تکاملی در هر جامعه (β) می‌باشند.

اگر تعداد نقاط هر جامعه (m) بسیار کم باشد، عملیات جستجو شبیه به یک جستجوی ساده شده و توانایی پیدا کردن نقطه بهینه سراسری کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، اگر تعداد اعضای جامعه بسیار زیاد باشد، ممکن است زمان بسیار زیادی بدون رسیدن به هیچ هدف مؤثری صرف پردازش‌های کامپیوتری شود. تحقیقات (Duan et al., 1993) نشان می‌دهد که بهترین مقدار برای اندازه تعداد اعضای هر جامعه (m) برابر با $2n+1$ می‌باشد. n تعداد پارامترهایی است که باید بهینه شوند.

اعضای هر زیرمجموعه q بین ۲ و m متغیر است. با انتخاب $n+1$ والدین، یک زیرمجموعه انتخاب شده که بیانگر تقریب مرتبه اول از سطوح تابع هدف بوده و یک تخمین معقولانه از توسعه جهات بهینه‌سازی می‌باشد. تعداد فرزندان در هر زیرمجموعه را می‌توان برابر یا بزرگ‌تر از یک در نظر گرفت. اگر $\infty=1$ ، تنها یکی از والدین جایگزین و از چرخه جستجو خارج می‌شود.

تعداد گام‌های تکاملی برای هر جامعه قبل از اختلاط جوامع (β) می‌تواند هر عددی بزرگ‌تر از یک باشد. اگر مقدار β خیلی کوچک باشد، اختلاط جوامع مکرراً انجام شده اما جستجوی مستقل در فضای پارامترها در هر جامعه بخوبی انجام نمی‌گیرد. اگر مقدار β بزرگ در نظر گرفته شود، هر جامعه سریعاً به یک جامعه کوچک‌تر تبدیل شده و کارایی جستجوی سراسری با مشکل مواجه می‌شود. در هر صورت مقدار $\beta = m$ یک پیشنهاد مؤثر برای رسیدن به بهینه سراسری است.

تعداد جوامع در نظر گرفته شده به طبیعت مسئله مورد حل بستگی دارد (Duan et al., 1993). هر چه درجه پیچیدگی مسئله بیشتر باشد می‌بایست برای رسیدن به نقطه بهینه سراسری تعداد بیشتری از جوامع را در نظر گرفت. براساس نظر (Duan et al., 1993)، ابعاد مسئله اولین فاکتوری است که در انتخاب P تأثیر دارد. Lionge و همکاران (2004) روشی را برای پیدا کردن تعداد جوامع ارائه کردند. آنها تکنیکی را به نام طراحی فاکتوریل^{۱۲} (FD) و طراحی مرکب

مرکزی^{۱۳} (CCD) برای تولید جمعیت اولیه نقاط در الگوریتم SCE پیشنهاد کردند. این روش احتمال به دام افتادن جستجو در نقاط بهینه موضعی را کاهش داده و باعث تسریع همگرایی نیز می‌شود. در طراحی فاکتوریل (FD)، تنها محدوده بالایی و پایینی پارامترهای واسنجی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین اگر تعداد پارامترها n باشد، آن روش 2^n نقطه را در برمی‌گیرد. در روش CCD، تعداد $2n+1$ نقطه که برابر نقاط موجود در درون محدوده‌ها است تولید می‌شود. بنابراین با ترکیب روش‌های FD و CCD تعداد کل نقاط شبیه‌سازی برابر با $2^n + 2n + 1$ بدست می‌آید. جمعیت اولیه تولید شده با روش FD-CCD این اطمینان را به ما می‌دهد که نقاط جمعیت اولیه بطور یکنواخت در تمام فضای پارامترها گسترده شده‌اند.

تعداد حداقل جوامع در الگوریتم SCE برابر با ۲ است. بنابراین اگر تعداد پارامترهای واسنجی n و تعداد نقاط درون هر جامعه m برابر با $2n+1$ باشد، تعداد جمعیت اولیه برابر با $P(2n+1)$ خواهد بود (Duan et al., 1994). حال برای یک مسئله با ابعاد n ، تعداد نقاط بدست آمده با استفاده از روش FD-CCD برابر با $2^n + 2n + 1$ می‌شود. برای استفاده بهینه از روش SCE همراه با FD-CCD، بهتر است که تعداد نقاط تولید شده تصادفی در جمعیت اولیه را از برابر قرار دادن نقاط تولید شده با روش FD-CCD و تعداد نقاط لازم برای جمعیت اولیه بدست آورد. لذا رابطه $P(2n+1) = 2^n + 2n + 1$ بوجود می‌آید که از این رابطه برای مقادیر معلوم n می‌توان مقدار P را محاسبه نمود و آن را به نزدیک‌ترین عدد صحیح بزرگ‌تر از آن گرد کرد. بر طبق رابطه فوق، تعداد نقاط بدست آمده از روش FD-CCD برابر با $2^n + 2n + 1$ می‌باشد. هرگاه تعداد نقاط بیشتری در جمعیت اولیه مورد نیاز بود، می‌بایست آن نقاط را بطور تصادفی ایجاد کرد.

روش توسعه داده شده در این تحقیق ترکیبی از الگوریتم ارائه شده توسط (Duan et al., 1992, 1993, 1994) همراه با روش‌های ارائه شده توسط (Liong et al., 2004) برای بدست آوردن پارامترهای SCE می‌باشد. همچنین تغییراتی در الگوریتم SCE ایجاد گردید که مدل سریع‌تر همگرا شده و تعداد شکست‌ها در رسیدن به نقطه بهینه سراسری به حداقل برسد. برخلاف روش ارائه شده توسط (Duan et al., 1993)، در طول اجرای برنامه از هیچ والدین تکراری استفاده نشده یعنی انتخاب تصادفی والدین طوری صورت گرفته است که والدین مشابه هم نباشند تا فرزندان تولید شده دارای خصوصیات بهتری باشد.

مدل با آن پارامترها اجرا شود زمان اجرای برنامه بسرعت افزایش می‌یابد و سرعت همگرایی مدل کاهش می‌یابد. در توابع با ابعاد بالا بهتر است که تعداد اعضای جامعه را بر اساس روابط ارائه شده و تعداد جامعه را کمتر از مقدار محاسبه شده توسط روابط فوق در نظر گرفت. در این صورت سرعت همگرایی مدل سریع‌تر شده و زمان اجرای مدل کاهش می‌یابد.

۶- صحت سنجی مدل

از جمله مراحل پس از تهیه یک مدل بهینه‌سازی، بررسی صحت و دقت آن مدل توسط چند تابع استاندارد می‌باشد. نتایج حاصل از اجرای مدل بهینه‌سازی روی مجموعه‌ای از ۸ تابع استاندارد که هر کدام دارای یک نقطه بهینه سراسری و چندین نقطه بهینه موضعی در فضای امکان‌پذیر می‌باشند در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار بهینه تمام توابع صفر می‌باشد. هر اجرا با انتخاب مستقل تصادفی جمعیت نقاط اولیه S که به طور یکنواخت در تمام فضای امکان‌پذیر گسترده شده‌اند شروع می‌شود. معیارهای توقف مدل بصورتی است که اگر مقدار تابع هدف کمتر از 10^{-4} شود یا اگر تعداد تکرارهای محاسبه تابع هدف به ۲۵۰۰۰ برسد یا اگر میزان کاهش در تابع هدف بعد از ۱۰ تکرار کمتر از 10^{-3} باشد عملیات توقف می‌یابد. در حالت اخیر ممکن است که تابع نقطه بهینه نهایی را پیدا کرده یا در دام نقطه بهینه موضعی گیرافتاده باشد. دو معیار آماری در هر اجرا ثبت می‌شوند.

در تهیه این نرم‌افزار از تکنیک‌های ابتکاری در روش برنامه‌نویسی جهت کاهش حجم حافظه و زمان اجرای برنامه شامل مدیریت ایندکس‌ها و از حافظه‌های خیلی سریع نزدیک به پردازنده کامپیوتر استفاده شده است. همچنین یک روش ابتکاری جدید نیز برای نگهداری ماتریس‌های n بعدی بسیار بزرگ که دارای اعضای غیرصفر کمی هستند استفاده شده است. در صورتیکه n عدد بزرگی باشد ماتریس‌های تولید شده بسیار حجیم و با مقادیر زیادی داده مواجه خواهند شد. تعداد بسیاری از عناصر این ماتریس‌ها صفر بوده که ماتریس‌های اسپارس^{۱۴} نامیده می‌شوند. در این حال برای ذخیره‌سازی و نمایش ماتریس‌های اسپارس که تاثیر زیادی در سرعت و زمان انجام محاسبات برای رسیدن به پاسخ‌های بهینه دارند از تکنیک‌های مختلف بازبایی و مرتب‌کردن اطلاعات که شامل تکنیک‌های جداول درهم^{۱۵} و جستجوی دودویی^{۱۶} می‌باشند استفاده شده است. با کمک این روش حتی می‌توان از کامپیوترهای معمولی شخصی نیز برای حل مسائل واسنجی خودکار مدل‌های بارش رواناب تا ۳۵ پارامتر (بعد) نیز استفاده نمود. این برنامه در محیط نرم‌افزاری Compaq Visual Fortran تهیه شده است.

محققان برای پارامترهای الگوریتم SCE روابطی ارائه کرده‌اند اما نمی‌توان از این روابط در تمام مسائل استفاده نمود. در مسائلی که دارای ابعاد کم هستند روابط فوق باعث همگرایی سریع شده و نقطه بهینه سراسری در زمان کوتاهی بدست می‌آید. اما در توابع با ابعاد بالا اگر پارامترهای SCE را با روابط ارائه شده توسط Duan et al. (1993) و Liong et al. (2004) محاسبه شوند و

جدول ۲ - مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل بهینه‌سازی تهیه شده با سایر تحقیقات برای توابع استاندارد

شماره	نام تابع	ابعاد	تعداد توابع	FD-CCD (Liong et al, 2004)		SCE-UA (Duan et al, 1993)		PROPOSED MODEL	
				NF*	AFE**	NF	AFE	NF	AFE
۱	Goldstein-Price	۲	۲	۱	۱۶۳	۲	۱۶۲	۰	۱۴۹
۲	Rosen Brock	۲	۲	۰	۲۶۹	۰	۲۷۴	۰	۵۴
۳	Six-hump	۲	۲	۰	۱۱۸	۰	۱۰۵	۰	۴۰
۴	Rastirgin	۲	۲	۳۰	۲۶۵	۴۱	۳۱۷	۰	۴۷۹
۵	McCormic	۲	۲	----	----	----	----	۰	۳۴
۶	Grilwank	۲	۲	۳۲	۳۲۷	۴۲	۳۳۱	۶	۱۵۶
۷	Shekel	۴	۳	۱۴	۴۷۸	۲۴	۴۸۷	۰	۵۱
۸	Grilwank	۱۰	۴	----	----	----	----	۹	۸۷۵

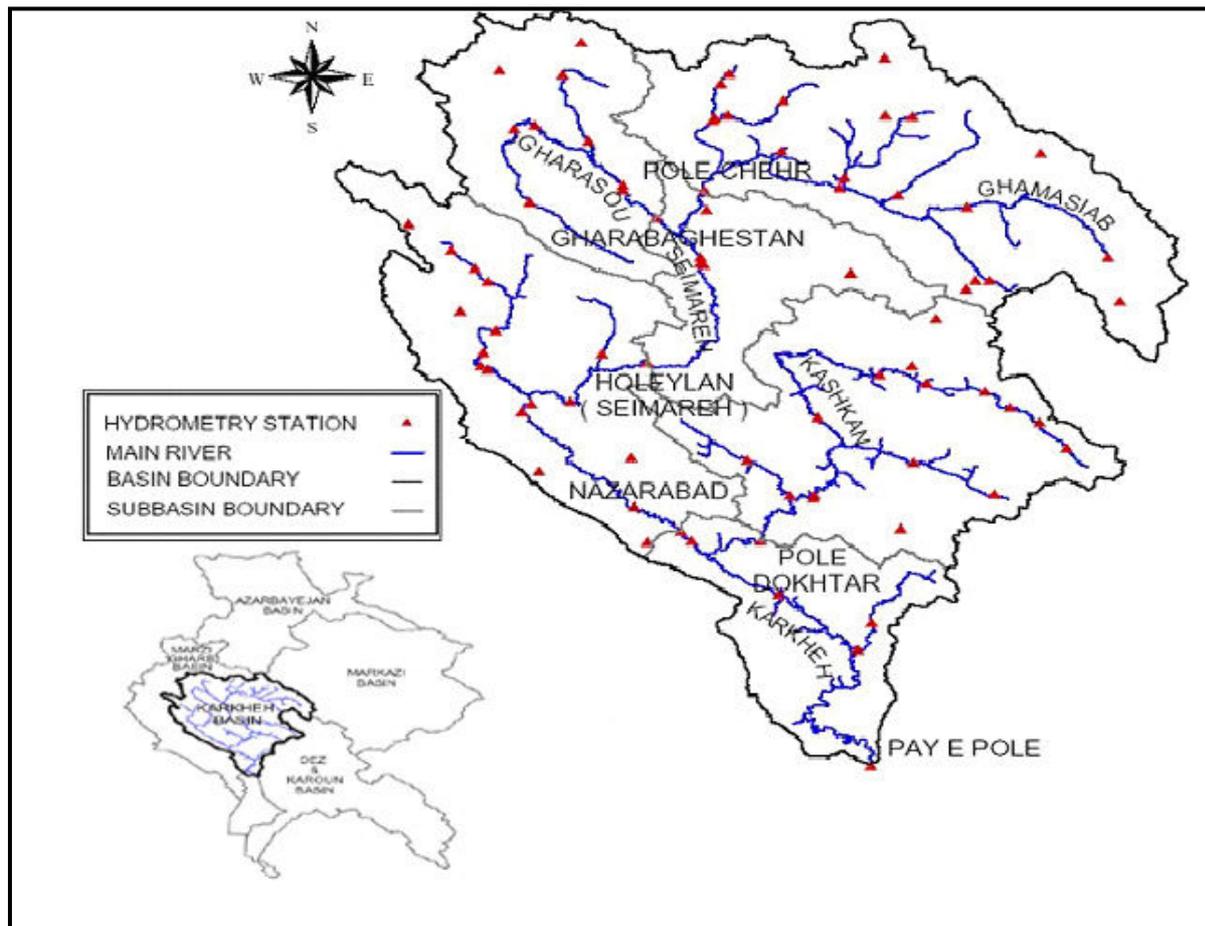
* NF : تعداد شکست‌ها در ۱۰۰ بار اجرای مدل ؛ ** AFE : تعداد تکرارهای متوسط در هر تابع برای دستیابی به نقطه بهینه

لحاظ (کارائی، پایداری و همگرایی) بهتر از مدل‌های پیشین عمل نموده و با احتمال بیشتری می‌تواند در نقاط بهینه سراسری را در مسائل مورد نظر مورد پیدا کند.

۷- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کرخه در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس قرار دارد، این حوضه از نظر مختصات جغرافیایی بین ۶-۴۶ و ۱۰-۴۹ طول شرقی و بین ۵۸-۳۰ و ۵۶-۳۴ عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت این حوضه ۴۲۴۸۵ کیلومترمربع می‌باشد. مناطق کوهستانی این حوضه غالباً در بخش‌های شرقی و میانی متمرکزند. دشتهای عمدتاً در بخش‌های شمالی و جنوبی قرار دارند. حوضه آبریز کرخه جزئی از حوضه آبریز خلیج فارس بشمار می‌رود. موقعیت جغرافیایی این حوضه نسبت به حوضه‌های مجاور و شبکه آبرسانی آن در شکل ۳ ارائه شده است.

اولین معیار NF^{۱۷} یا تعداد شکست‌ها در هر ۱۰۰ بار اجرای مدل برای هر تابع استاندارد میباشد. عدد ۱۰۰ به این خاطر انتخاب شده‌است که می‌توان درصد شکست‌ها یا رسیدن به جواب بهینه را بیان کرد و بنابراین می‌توان اثربخشی (پایداری) الگوریتم را در مقابل نقاط بهینه موضعی ارزیابی کرد. پایداری بصورت احتمال پیدا کردن نقطه بهینه سراسری از یک مجموعه سعی و خطای مستقل و کارایی متوسط تعداد تکرارهای مورد نیاز توسط الگوریتم برای ارضای معیارهای همگرایی می‌باشد. دومین معیار آماری تعداد متوسط ارزیابی‌های هر تابع AFE^{۱۸} نام دارد. مقادیر کم دو معیار آماری فوق بیانگر کارایی و اثربخشی الگوریتم فوق هستند نتایج مدل حاضر از لحاظ پایداری در تمام موارد از مدل‌های قبلی بهتر بوده و در مورد کارائی نیز تنها در یک مورد ضعیف‌تر از مدل‌های قبلی است. در مدل‌های تهیه شده توسط (Duan et al. (1993 و (Liong et al. (2004 از معیار توقف ۱۰^{-۳} برای بهترین مقادیر تابع هدف استفاده شده اما در مدل حاضر از معیار توقف ۱۰^{-۴} به عنوان نزدیکترین نقطه به صفر استفاده شده‌است. بنابراین مدل حاضر از هر



شکل ۳- موقعیت حوضه آبریز کرخه نسبت به حوضه‌های مجاور و شبکه آبرسانی حوضه کرخه

داده‌های پیوسته بارش، تبخیر، دما و دبی سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۷۳ استفاده شده است. تعداد پارامترهای بهینه‌شده در این زیرحوضه برابر با ۲۴ بوده که ۱۳ تا مربوط به مدل NAM و ۱۱ تای دیگر مربوط به تعداد ایستگاه‌ها می‌باشد. در کالیبراسیون از معیار RMSE برای شبیه‌سازی دبیهای پیک به عنوان تابع هدف استفاده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود تطابق بسیار خوبی بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های محاسبه شده از طریق مدل وجود دارد.

عملکرد مدل بارش - رواناب تهیه شده با استفاده از معیارهای ارائه شده توسط محققان مختلف ارزیابی شده است. این معیارها شامل جذر میانگین مجموع مربعات نرمال شده (NRMSE)، شاخص راندمان مدل (ME) و خطای میانگین نرمال (NME) می‌باشند. عدد بهینه ME برابر با یک و برای NME و NRMSE برابر با صفر می‌باشد. هرچه عدد ME به مقدار یک و اعداد NME و NRMSE به مقدار صفر نزدیک باشند مقدار دبیهای شبیه‌سازی شده دقیق‌تر هستند. بنابراین از سه معیار فوق برای انتخاب پاسخ‌های مناسب مدل CRR استفاده شده است.

جذر میانگین مجموع مربعات نرمال شده

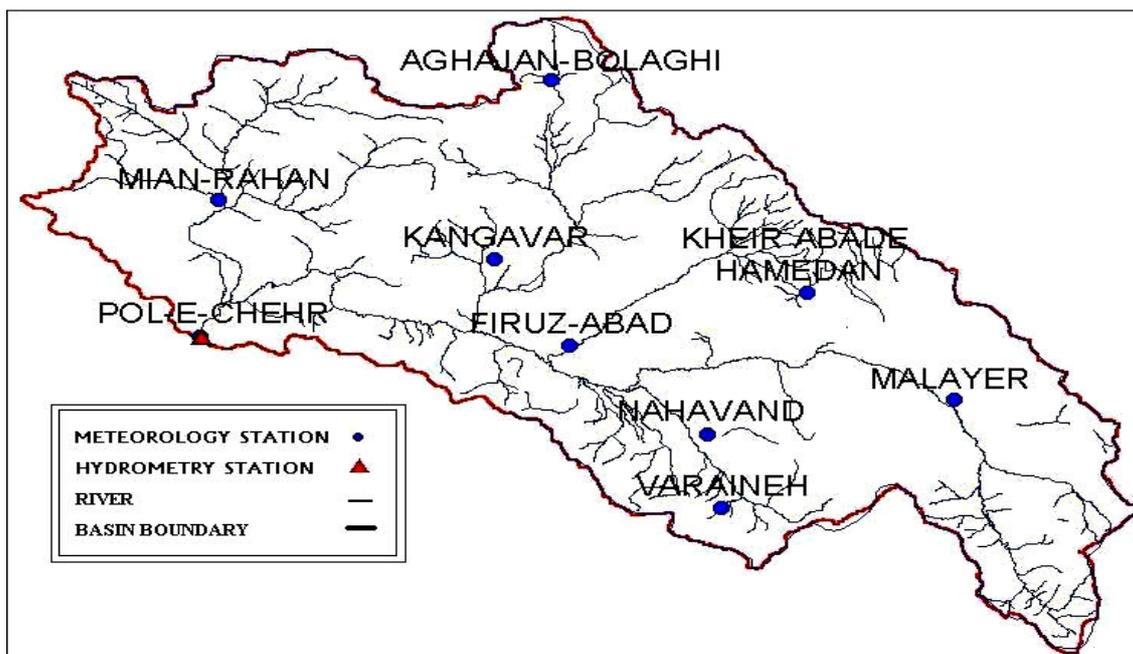
(Normalized Root Mean Square Error)

$$NRMSE = \frac{(MSE)^{\frac{1}{2}}}{\bar{Q}} = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{Fi} - Q_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{Q}}$$

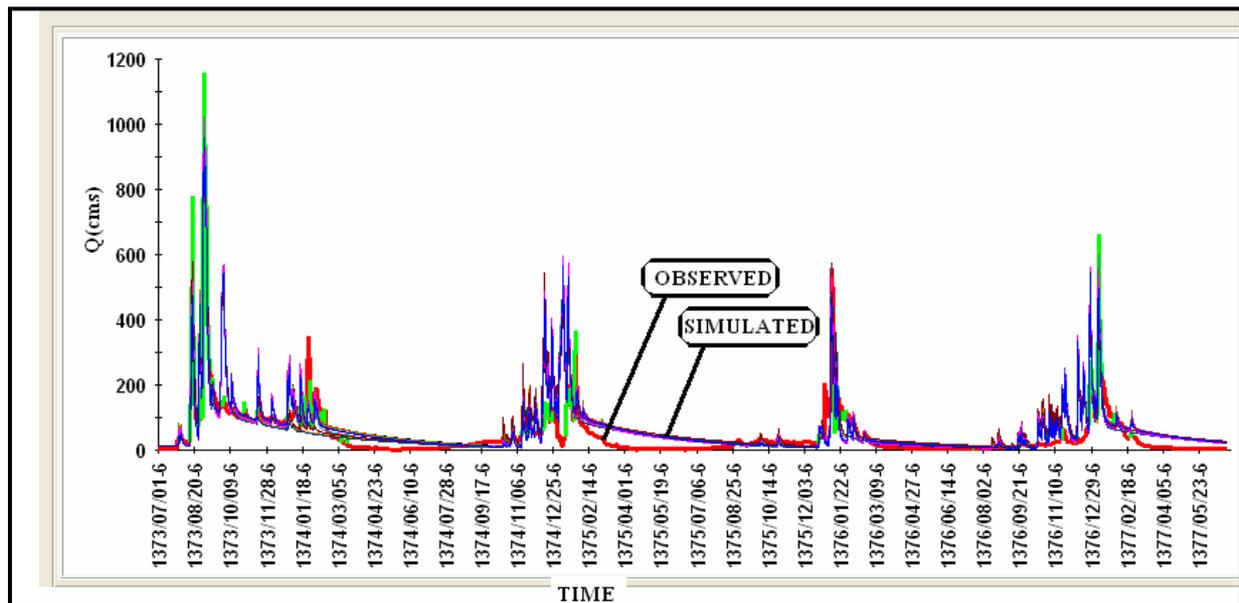
در حوضه آبریز رودخانه کرخه ۵۴ ایستگاه هیدرومتری موجود می‌باشد که طولانی‌ترین آمار از سال ۱۳۳۳ ثبت شده است. اقلیم حوضه کرخه با ارتفاع متغیر است ولی اکثر تپه‌های آن از نوع اقلیم نیمه‌خشک مدیترانه‌ای می‌باشد. اکثر سیلاب‌های حوضه کرخه در فصل بهار، ناشی از ورود جبهه‌های مرطوب و کم‌فشار مدیترانه‌ای اتفاق می‌افتد، که حاصل از ذوب برف حوضه‌ها توام با افزایش دما و بارندگی است. رودخانه گاماسیاب در بخش شمال شرقی حوضه آبریز رودخانه کرخه قرار دارد که از به هم پیوستن رودخانه نهاوند و رودخانه ملایر بوجود می‌آید. رودخانه گاماسیاب با طول حدود ۱۱۰ کیلومتر در دشت کرمانشاه به قره‌سو متصل می‌گردد. وسعت تقریبی این حوضه در حدود ۱۴۶۰ کیلومتر مربع و در محدوده ارتفاعی ۳۶۴۵-۱۴۵۰ متر قرار دارد.

۸- واسنجی اتوماتیک داده‌های حوضه گاماسیاب

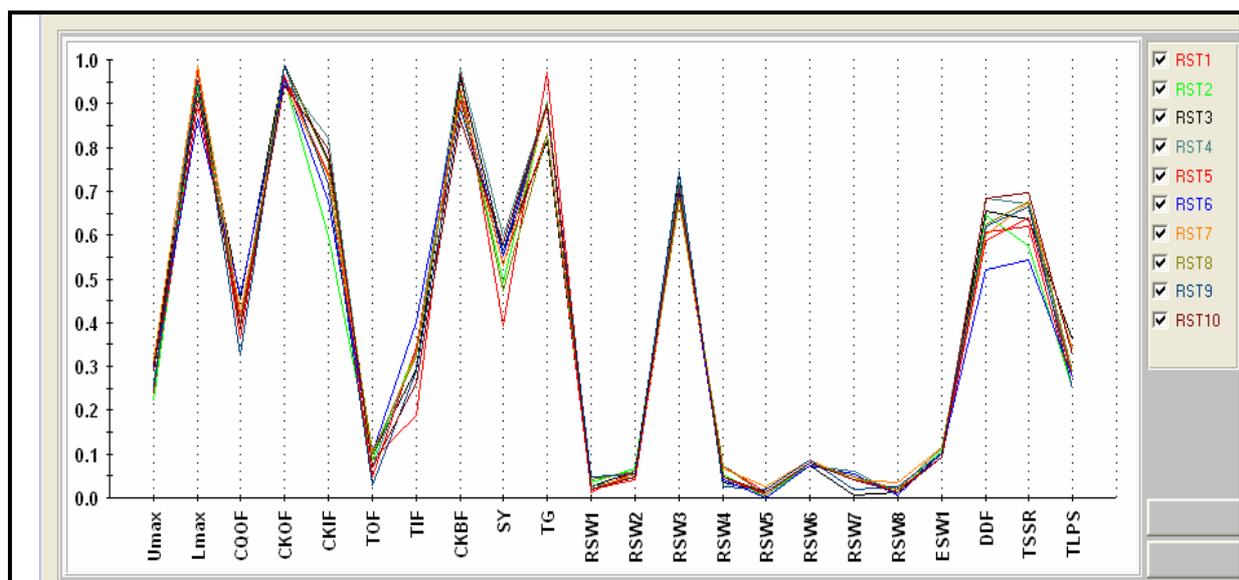
حوضه گاماسیاب و ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری واقع در آن در شکل ۴ ارائه شده‌اند. برای واسنجی اتوماتیک از داده‌های بارندگی ۱۲ ساعته ۸ ایستگاه، داده‌های تبخیر ۲ ایستگاه و دمای ایستگاه هواشناسی کنگاور در دوره ۱۳۷۷-۱۳۷۳ استفاده شده است. در این تحقیق علاوه بر بهینه‌سازی پارامترهای مدل NAM، وزن مشارکت هر کدام از ایستگاه‌های باران‌سنجی در هیدروگراف جریان نیز واسنجی شده است. نمونه‌ای از واسنجی انجام شده در زیرحوضه گاماسیاب در شکل ۵ ارائه شده است. برای انجام کالیبراسیون از



شکل ۴- زیرحوضه رودخانه گاماسیاب و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری منطقه



شکل ۵- کالیبراسیون خودکار انجام شده در زیرحوضه گاماسیاب



شکل ۶- مقادیر بهینه نرمال شده پارامترهای مدل بارش رواناب

F_1^2 مجموع انحرافات دبی رودخانه از دبی میانگین و F_0^2 مجموع مربعات خطای دبیهای شبیه‌سازی نسبت به دبی‌های مشاهده شده می‌باشد.

MSE میانگین مربعات خطای، Q_i دبی مشاهده شده و QF_i دبی شبیه‌سازی شده در گام زمان $i = 1, \dots, n$ می‌باشند.

راندمان مدل (Model Efficiency):

خطای میانگین نرمال شده (Normalized Mean Error):

$$NME = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (QF_i - \bar{Q})}{\bar{Q}}$$

$$ME = \frac{F_0^2 - F_1^2}{F_0^2} = 1 - \frac{F_1^2}{F_0^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - QF_i)^2}$$

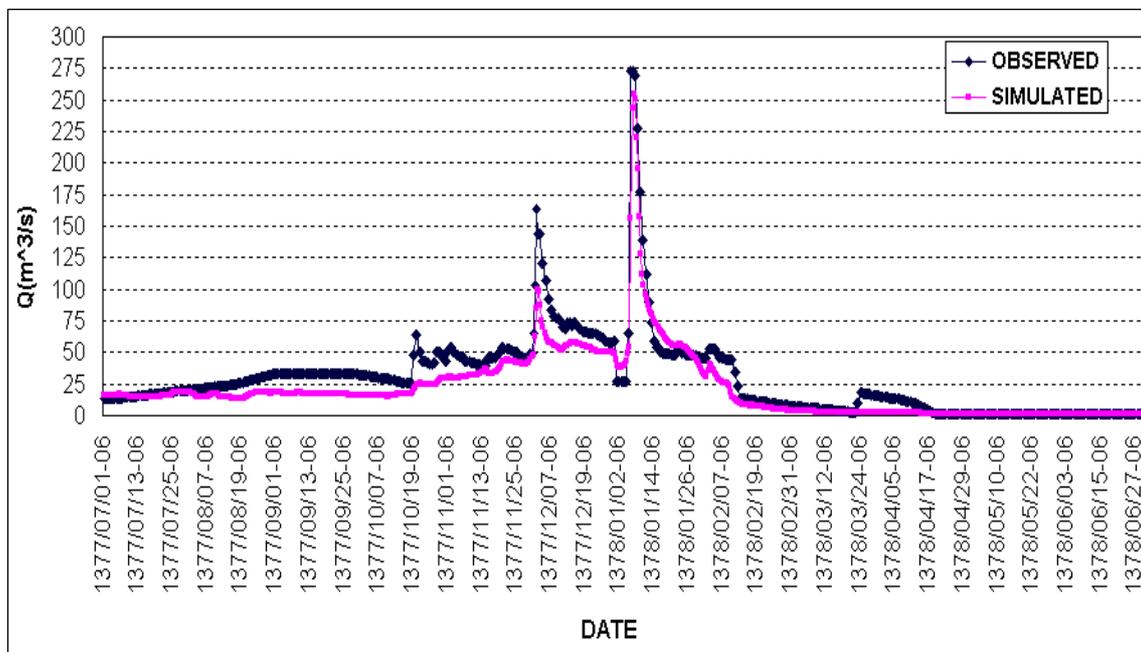
۱۰- بحث و نتایج

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود و مقادیر معیارهای ارزیابی نشان می‌دهند نتایج حاصل از واسنجی اتوماتیک مدل در اکثر زمانها با مقادیر دیبهای مشاهداتی همبستگی بسیار نزدیکی دارند. عدم همخوانی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی دلایل مختلفی دارد. ممکن است خطاهای زیادی از جمله داده‌های هواشناسی، دبی‌های مشاهداتی، ساده‌سازی در ساختار مدل و خطای مربوط به استفاده از مقادیر غیربهینه، تناسب برازش را تحت تاثیر قرار دهند. در کالیبراسیون مدل تنها می‌توان خطای ناشی از مقادیر غیربهینه را به حداقل رساند. علاوه بر موارد فوق انتخاب نوع تابع هدف نیز در تناسب برازش موثر است. اگر در هشدار و پیش بینی سیلاب مقدار و میزان دیبهای پیک و حجم سیلاب به عنوان تابع هدف انتخاب شوند ممکن است در این حالت مدل نتواند مقادیر جریان‌های با دبی کم را بخوبی شبیه‌سازی کند. علاوه بر این انتخاب شرایط اولیه متناسب با زمان شروع اجرای واسنجی خودکار مدل بارش رواناب نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ پایداری و کارایی کافی مدل توسعه داده شده در پیدا کردن نقاط بهینه مشخص شد. نتایج مدل حاضر در اکثر موارد بهتر از دیگر مدل‌های تهیه شده قبلی می‌باشد. لذا به نظر می‌رسد که مقدار خطای موجود ناشی از خطاهای مشاهدات و یا در نظر گرفتن نوع خاصی از تابع هدف باشد.

در واسنجی سعی شده است با انتخاب ایستگاه‌های مناسب و طول دوره آماری کافی مقدار خطای شبیه‌سازی را به حداقل رساند و معیارهای ارزیابی ME، NME و NRMSE را ارضا نمود. مقادیر بدست آمده برای معیارهای ارزیابی در واسنجی بترتیب برابر با ۰/۰۹، ۰/۱۵- و ۰/۰۸ بوده‌اند. در شکل ۶ نمونه‌ای از مقادیر بهینه بدست آمده حاصل از واسنجی خودکار پارمترهای مدل بارش رواناب در زیرحوضه گاماسیاب ارائه شده است. تمام مقادیر این نمودار به صورت استاندارد ارائه شده‌اند.

۹- اعتبارسنجی

نتایج مطلوب اعتبارسنجی مدل NAM در حوضه گاماسیاب در شکل ۷ ارائه شده است. پس از بدست آوردن یک دوره پیوسته آماری کافی همراه با انتخاب ایستگاه‌های مناسب اعتبار مدل تهیه شده بررسی می‌شود. اعتبارسنجی در سال آبی ۱۳۷۷-۷۸ انجام شده است. مقادیر بدست آمده برای معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در اعتبارسنجی ME، NME و NRMSE بترتیب برابر با ۰/۸۵، ۰/۰۵ و ۰/۲ می‌باشد. مقادیر بدست آمده بسیار نزدیک به مقادیر بهینه معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی پارامترها هستند.



شکل ۷- نتایج اعتبارسنجی مدل بارش رواناب در حوضه رودخانه گاماسیاب

model structure, *Water Resour. Res.*, 32(12), pp. 3513–3524.

Gupta, V.K. and Sorooshian, S. (1985), "The automatic calibration of conceptual catchment's models using derivative-based optimization algorithms", *Water Resources Research*, 21(4), pp.473-486.

Gupta, V.K., Sorooshian, S. and Yapo, P., (1999), "Status of automatic calibration for hydrological models: comparison with multilevel expert calibration", *Journal of Hydrology Engineering, ASCE*, 4(2), pp. 23-48.

Holland, J.H., (1975), "*Adaptation in Natural and Artificial systems*", University of Michigan Press, Ann Arbor.

Ibbitt, R.P., (1972), "Effects of random data errors on the parameters values for a conceptual model", *Water Resour. Res.*, 8(1), pp. 70–78.

Johnson, P.R. and Pilgrim, D. , (1976), "Parameter optimization for watershed models", *Water Resour. Res.*, 12(3), pp. 477–486.

Kuczera, G., (1982), "On the relationship of the reliability of parameter estimates and hydrologic time series data used in calibration", *Water Resour. Res.*, 18, pp. 146–154.

Liong, S.Y. and Muttill, N., (2004), "Shuffled complex evolution coupled with experimental design technique", National University of Singapore, Singapore 119260.

Madsen, H., (2000), "Automatic calibration of the Mike 11/NAM rainfall-runoff model", *Nordic Hydrological Conference*, Sweden, June 26-30, NHP – Report, 46(1), pp.276-283.

Manestach, T.J., (1990), "Towards efficient global optimization in large dynamic systems-adaptive complex method", *IEEE Trans. Syst. Man Cybernet*, 20(1), pp.257-261.

Price, W.L., (1978), "A controlled random search procedure for global optimization", In:C.W.L. Dixon and G.P. Sezgo(Editors), *Towards global optimization*, 2. North-Holland, Amesterdam, pp.71-84

Sorooshian, S., Duan, Q. and Gupta, V.K. (1993), "Calibration of rainfall-runoff models: application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model", *Water Resou. Res.*, 29(4), pp. 1185-1194.

Sorooshian, S., Duan, Q. and Gupta, V.K. (1992), "The shuffled complex evolution (SCE-UA) method for calibration of conceptual rainfall-runoff models", *AGU Fall Meeting*, San Francisco, California, Eos Transactions, pp. 241-252.

۱۱- نتیجه گیری

در این تحقیق روش بهینه‌سازی سراسری SCE برای واسنجی خودکار پارامترهای مدل مفهومی بارش رواناب توسعه داده شد. صحت و سقم این تکنیک در چندین مسئله استاندارد مورد بررسی قرار گرفت و کارایی و پایداری آن نسبت به روشهای قبلی به اثبات رسید. روش توسعه داده شده قابلیت یافتن مقادیر بهینه پارامترها را در مسائل با ابعاد بسیار بالا (۳۵ بعد) را نیز دارد. نتایج بدست آمده از واسنجی و اعتبارسنجی مدل بیانگر کارایی و پایداری تکنیک توسعه داده شده برای واسنجی خودکار پارامترهای مدل مفهومی بارش رواناب می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Conceptual Rainfall Runoff
- 2- Shuffled Complex Evolution
- 3- NedbØr AfstrØmnings Model
- 4- Competitive Complex Evolution
- 5-Population
- 6- Complex
- 7- Shuffling
- 8- Offspring
- 9- Reflection
- 10-Mutation
- 11-Contraction
- 12- Factorial Design
- 13- Central Composite Design
- 14-Sparse
- 15-Hash Table
- 16-Binary Search
- 17- Number of Failure
- 18- Average Function Evaluation

۱۲- مراجع

Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. (1992), "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models", *Water Resources Research*, 28(4), pp.1015-1031.

Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. (1994), "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibration watershed models", *Journal of Hydrology*, 158, pp.265-284.

Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. (1993), "Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global optimization", *Journal of Optimization Theory and Application*, 76(3), pp.501-521.

Gan, T.Y. and Biftu, G.F., (1996), "Automatic calibration of conceptual rainfall runoff models: Optimization algorithms, catchment condition and

- Wang, Q. J., (1991), "The genetic algorithms and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models", *Water Resource Research*, 27(9), pp. 2467-2471.
- Yapo, P., Gupta, V.K. and Sorooshian, S. (1996), "Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data", *Journal of Hydrology*, 181, pp. 23-48.
- Thyer, G. and Kuczera, B.C., (1999), "Probabilistic optimization for conceptual rainfall- models: A comparison of the shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms", *Water Resources Research*, 35(3), pp.767-777.
- Troutman, B.M., (1985), "Errors and parameter estimation in precipitation-runoff modeling: I. Theory", *Water Resour. Res.*, 21(8), pp. 1185-1194.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۲ تیر ۱۳۸۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۰ تیر ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۶ مهر ۱۳۸۵