



دانشگاه شاهرود، دانش فنی گرا

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره سوم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.13748.2846

واسنجی چندهدفه مدل هیدرولوژیکی مفهومی با استفاده از الگوریتم ترکیبی AMALGAM

مرتضی فرهمندراد^۱، غلامعباس بارانی^۲، محسن پوررضا بیلندی^۳ و *محمدصادق غضنفری مقدم^۴

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان،

^۲استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه باهنر کرمان، ^۳استادیار گروه علوم و مهندسی مهندسی آب، دانشگاه بیرجند،

^۴استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: یکی از راه‌های پیش‌بینی و برآورد مقدار رواناب حاصل از بارش نزولات جوی استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی است. واسنجی پارامترهای مؤثر در مدل‌های هیدرولوژیکی یکی از گام‌های اساسی در استفاده از این مدل‌ها می‌باشد. در این میان بهینه‌سازی چندهدفه یکی از موضوعات مهم و کاربردی می‌باشد. هدف این‌گونه بهینه‌سازی‌ها تعیین مقادیر پارامترهای مدل برای یافتن بهترین راه‌حل ممکن و دستیابی به اهداف مختلف است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش مدل بارش- رواناب مفهومی MILC توسط الگوریتم چندهدفه AMALGAM، مورد واسنجی خودکار قرار گرفت. این مدل از مفهوم مدل رواناب سطحی SCS برای محاسبه بارش مازاد و از مفهوم هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی نیز برای روندیابی این بارش مازاد در سطح حوضه استفاده می‌کند. در این مطالعه برای واسنجی و همچنین ارزیابی مدل از ۴ تابع هدف ناش- ساتکلیف (NSE) برای جریان‌های اوج، TRMSE برای جریان‌های کم، ROCE برای جریان متوسط و SFDCE برای شیب‌خط تداوم جریان استفاده شد. فرایند واسنجی توسط ۴ تابع هدف مذکور صورت گرفت و خروجی‌های مدل که همان نقاط بهینه پارتو هستند مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت از هر خروجی یک نقطه به‌عنوان نقطه بهینه میانگین انتخاب شد. در انتها این نقاط که شامل پارامترهای واسنجی شده مدل هستند در دوره صحت‌سنجی جهت مقایسه با مقادیر مشاهداتی مورد استفاده قرار گرفتند.

نتایج: مقادیر به‌دست آمده در دوره صحت‌سنجی اعدادی بین ۰/۷۱ و ۰/۷۸ برای تابع NSE را نشان می‌دهد که با توجه به مقدار بهینه این توابع (NSE = +۱)، نتایج گویای عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی جریان‌های اوج است. همچنین مقادیر به‌دست آمده برای توابع ROCE و به‌خصوص SFDCE که در دوره صحت‌سنجی اعدادی بین ۷۲ و ۱۲۹ به‌دست آمد (SFDCE = ۰ در حالت بهینه)؛ بیانگر ضعف مدل MILC در شبیه‌سازی جریان‌های میانه است.

نتیجه‌گیری: مقادیر به‌دست آمده برای تابع هدف TRMSE در دوره صحت‌سنجی اعدادی بین ۱/۴۸-۱/۲۲ بود (TRMSE = ۰ در حالت بهینه) که این ارقام گویای شبیه‌سازی مناسب دبی‌های کم می‌باشد. بهره‌گیری از الگوریتم

* مسئول مکاتبه: s.ghazanfari@kgut.ac.ir

بهینه‌سازی چندهدفه برای فرایند واسنجی خودکار مدل بارش - رواناب به‌دلیل استفاده از چند تابع هدف گوناگون که هر کدام قسمتی از هیدروگراف حوضه را مورد هدف قرار می‌دهند، باعث به چالش کشیدن مدل در شبیه‌سازی تمامی جریان‌های موجود در حوضه می‌شود که این موضوع اهمیت استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. همچنین انتخاب هوشمندانه چند تابع هدف در فرایند واسنجی مدل، نقش کلیدی در شناخت هرچه بیشتر مدل دارد که این امر با بهره‌گیری از الگوریتم‌های چندهدفه به‌جای تک‌هدفه برای فرایند واسنجی میسر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی چندهدفه، واسنجی مدل بارش - رواناب، MILC, AMALGAM

مقدمه

مدل‌های هیدرولوژیکی یکی از روش‌های برآورد رواناب به‌دست آمده از بارندگی می‌باشند. این مدل‌ها با شبیه‌سازی فرایند تبدیل بارش به رواناب قادر به تخمین میزان رواناب حوضه‌های آبریز فاقد ایستگاه اندازه‌گیری با کم‌ترین زمان و هزینه ممکن می‌باشند. از سوی دیگر خروجی‌های به‌دست آمده از این مدل‌ها برای بهره‌وری بیش‌تر از نزولات آسمانی و کنترل رواناب سطحی با اهداف گوناگون دارای اهمیت هستند. در بسیاری از حوضه‌های آبریز که نیازمند برنامه‌ریزی منابع آب هستند، ایستگاه‌های آب‌سنجی وجود ندارند، یا این‌که آمار ایستگاه‌های اندازه‌گیری ناقص است و به‌نظر نمی‌رسد در آینده نزدیک همه مناطق دارای ایستگاه‌های اندازه‌گیری شوند، بنابراین روش یا روش‌هایی که به کمک آن‌ها بتوان میزان رواناب به‌دست آمده از بارندگی در حوضه‌های بدون آمار یا دارای آمار ناقص را تخمین زد، از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار می‌گردند. چون در حوضه‌های آبریز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های موردنیاز برای تحلیل رواناب میسر نیست، بنابراین انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از حداقل عوامل، رواناب به‌دست آمده از بارندگی را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند، امری ضروری است.

تاریخچه مدل‌های هیدرولوژیکی: اولین تلاش‌های

مرتبط با مدل‌سازی ریاضی هیدرولوژیکی توسط مولوانی (۱۸۵۰) و مدل تک رخداد تهیه‌شده توسط ایمبو (۱۸۹۲) به‌منظور یافتن رابطه میان رواناب، دبی اوج سیلاب و شدت بارش مربوط می‌شود (۹ و ۱۲). همچنین در پژوهشی دیگر گرین و آمپت (۱۹۱۱) با استفاده از قوانین ساده فیزیکی رابطه‌ای برای محاسبه مقدار نفوذ استخراج نمودند که حتی امروزه هم مورد استفاده قرار می‌گیرد (۵). در حدود دو دهه بعد، شرم (۱۹۳۲) جهت بیان ارتباط بین رواناب مستقیم و مازاد بارش مفهوم هیدروگراف واحد (آب نمود واحد) را معرفی نمود (۱۶). تقریباً در همین زمان هورتون (۱۹۳۳) نظریه نفوذ را برای تخمین بارش اضافی و اصلاح روش‌های جداسازی هیدروگراف ارائه داد (۷). هورتون در سال ۱۹۳۹ جریان زیرزمینی را بررسی نموده و یک فرمول نیمه‌تجربی نیز برای آن به‌دست آورد (۸). همچنین لایتیل و وایتهم (۱۹۵۵) نظریه موج دینامیک جریان در رودخانه‌های طولانی را مطرح نمودند که اکنون به‌عنوان یکی از روش‌های استاندارد برای مدل‌سازی جریان سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۱). از مهم‌ترین تلاش‌ها در مدل‌سازی جریان سطحی، استخراج نظریه سیستم‌های خطی بود که در نهایت به نظریه هیدروگراف واحد لحظه‌ای

هوشمند الگوریتم AMALGAM است که توسط فروخت و رابینسون (۲۰۰۷) ارائه گردید. روش AMALGAM ترکیبی از دو مفهوم جدید است و در دو حالت فرایند تکامل در آن صورت می‌گیرد. در مرحله اول از قابلیت‌های تکاملی چهار الگوریتم چندهدفه NSGA-II (که خود یک الگوریتم چندهدفه است)، PSO، DE، AMS به صورت هم‌زمان جهت تکامل جمعیت استفاده می‌کند و در مرحله دوم از قابلیت تکاملی خود الگوریتم AMALGAM جهت تکامل جمعیت استفاده می‌گردد. این الگوریتم به دلیل استفاده هم‌زمان از چند الگوریتم چندهدفه هوشمند دیگر، الگوریتم ترکیبی چندهدفه نامیده می‌شود. فروخت برای اثبات قدرت الگوریتم AMALGAM، آن را با الگوریتم NSGA-II که یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد و قدرتمند در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه است، مقایسه نمود. نتایج این مقایسه نشان داد که الگوریتم AMALGAM تنها با تولید ۵۰ نسل به جواب‌های بهینه پارتو رسید، در حالی که الگوریتم NSGA-II حتی با تولید ۱۰۰۰ نسل به مجموعه بهینه پارتو دست نیافت و فقط به تقریبی از آن رسید (۱۸). در همین رابطه ژانگ (۲۰۱۰) پارامترهای مدل هیدرولوژیکی SWAT^v را با استفاده از ۳ الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، SPEA2 و AMALGAM در چهار حوضه آبریز مختلف (شرایط آب و هوایی خشک و مرطوب) واسنجی نمود و نتایج واسنجی هر یک از الگوریتم‌ها را با یکدیگر مقایسه نمود. ژانگ از بررسی خروجی‌ها به این نتیجه رسید که الگوریتم AMALGAM نسبت به دو الگوریتم دیگر بهتر عمل می‌نماید (۱۹).

در پژوهشی دیگر صادقی و همکاران (۲۰۱۵) مدل جیره‌بندی بهره‌برداری از مخزن را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، SPEA2، MOPSO^h

7- The Soil and Water Assessment Tool
8- Multi Objective Particle Swarm Optimization

توسط ناش (۱۹۵۷) منجر گردید و بر اساس آن، دوج (۱۹۵۹) نظریه هیدروگراف واحد عمومی را بیان نمود (۴ و ۱۴).

تاریخچه واسنجی چندهدفه مدل‌های هیدرولوژیکی:
گوپتا برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ با استفاده از الگوریتمی به نام MOCOM-UA مدل هیدرولوژیکی SAC-SMA^۱ را که شامل ۱۶ پارامتر بود به صورت چندهدفه واسنجی نمود. گوپتا به منظور تعیین کیفیت عملکرد مدل از دو تابع هدف استفاده نمود. مطالعات ایشان نشان داد که واسنجی چندهدفه نه تنها بسیار کاربردی و نسبتاً ساده است بلکه اطلاعات بیشتری در مورد محدودیت‌های مدل‌های هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد (۶).

در پژوهشی دیگر تانگ (۲۰۰۶) سه الگوریتم بهینه‌سازی SPEA2^۲، NSGA-II^۳ و MOSCEM-UA^۴ را در ۳ مسأله مختلف مورد ارزیابی قرار داد و از سه تابع هدف RMSE^۵، RMSE برای جریان‌های کم و RMSE برای جریان‌های اوج استفاده نمود. وی در این مطالعه بیان نمود الگوریتم SPEA2 نسبت به دو الگوریتم NSGA-II و MOSCEM-UA برای واسنجی چندهدفه مدل‌های هیدرولوژیکی از قدرت بیش‌تر برخوردار است (۱۷).

همچنین کلات (۲۰۱۲) دو مدل هیدرولوژیکی HYMOD و HBV را با استفاده از الگوریتم چندهدفه اپسیلون NSGA-II که بر اساس مفهوم غلبه اپسیلون عمل می‌کند، واسنجی نمود (۱۰).

الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی چندهدفه AMALGAM^۱:
یکی از جدیدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه

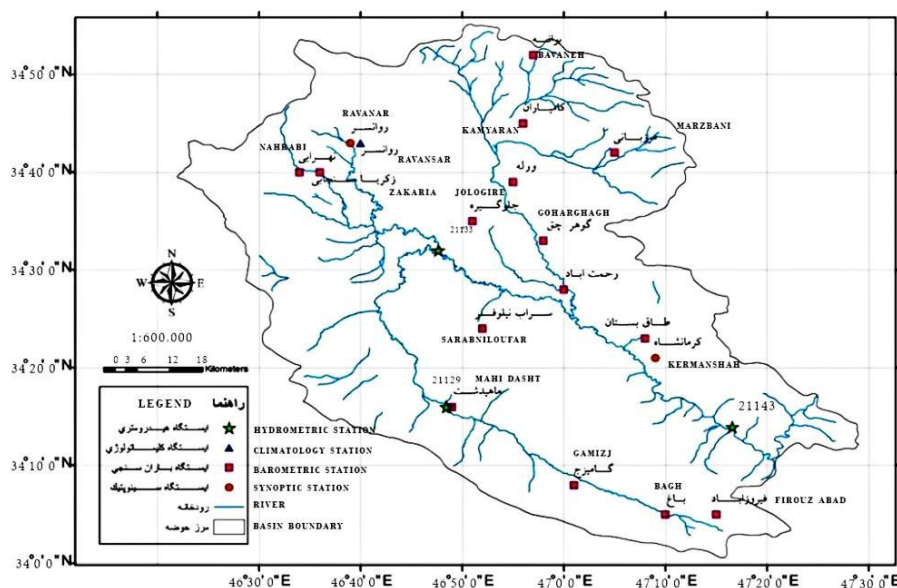
- 1- Stage-wise Semiautomated Calibration of The Sacramento Soil Moisture Accounting
- 2- The Strength Pareto Evolutionary Algorithm
- 3- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
- 4- Multi-objective Shuffled Complex Evolution Metropolis
- 5- Root-mean Square Error
- 6- A Multi-algorithm, Genetically Adaptive Multi-objective

۴۶ درجه و ۶ دقیقه و ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۵۸ دقیقه و ۳۴ درجه و ۵۶ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. زیر حوضه قره‌سو در شمال غربی حوضه کرخه و در غرب ایران واقع شده و مساحت آن برابر ۵۳۵۴ کیلومتر مربع و حداکثر و حداقل ارتفاع آن نیز به ترتیب ۳۳۴۶ و ۱۱۸۰ متر است. متوسط بارندگی سالیانه آن بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. سه رودخانه اصلی مرک، قره‌سو و رازآور در این حوضه جریان دارند. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری (قورباغستان) زیر حوضه قره‌سو را نشان می‌دهد.

و AMALGAM بهینه‌سازی نمود و مشخص شد AMALGAM جبهه پارتوی بهتری از مقادیر تابع هدف نسبت به سایر الگوریتم‌های ساده تولید می‌نماید (۱۵). یکی از نوآوری‌های این پژوهش استفاده از ترکیب توابع هدف NSE، TRMSE، SFDCE و ROCE است که هر کدام به‌طور جداگانه بخشی از هیدروگراف را مورد هدف قرار می‌دهند.

مواد و روش‌ها

مشخصات حوضه مورد مطالعه: حوضه آبریز کرخه به مساحت ۵۰۷۶۴ کیلومتر مربع در غرب کشور، در مناطق میانی و جنوب غربی رشته‌کوه‌های زاگرس بین



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری زیر حوضه قره‌سو.

Figure 1. Location of rain gauge and Hydrometric stations of Qaresou sub-basin.

کانال اصلی (مسیر اصلی جریان) هستند. هر زیرحوضه همگن (یکپارچه) فرض می‌شود از این رو کل حوضه به‌منزله یک سیستم یکپارچه (lumped) عمل می‌کند. کرادینی ۸ نسخه از این مدل را فرمول‌نویسی کرد و برای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص خطای اوج جریان بهره برد (۳).

مدل هیدرولوژیکی MILc: مدل بارش رواناب نیمه‌توزیعی MISD برای اولین بار توسط کرادینی و همکاران (۱۹۹۵) توسعه داده شد (۳). این مدل براساس شبکه زهکشی و ژئومورفولوژی، حوضه را به N عنصر تقسیم می‌کند که هر یک از این عناصر نشان‌دهنده یک زیرحوضه با خروجی در راستای

به کار می‌روند که در شکل ۲ به صورت شماتیک قابل مشاهده است. در این مدل برای محاسبه تلفات از روش SCS_CN^2 (Curve Number) و از هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک $GIUH^3$ برای روند یابی مازاد سیلاب زیر حوضه‌ها استفاده می‌شود (۱).
مدل MILC که نسخه یکپارچه و با گام زمانی روزانه مدل MISD است برای شبیه‌سازی رواناب حاصل از بارندگی توسعه داده شده است. پارامترهای قابل واسنجی این مدل در جدول ۱ قابل رؤیت هستند.

مدل MISD توسط بروکا و همکاران توسعه یافت (۲۰۱۱) و مدل نیمه‌توزیعی پیوسته MISDc نام گرفت، این مدل جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی سیل در حوضه رودخانه تیبر (مرکز ایتالیا) مورد بررسی قرار گرفت. مدل MISDc شامل دو قسمت اصلی است: (۱) مدل بیلان آب‌و خاک SWB^1 برای شبیه‌سازی الگوی زمانی رطوبت خاک و (۲) مدل RR نیمه‌توزیعی تک‌رخداد (MISD) برای شبیه‌سازی رواناب، حاصل از بارندگی. در واقع خروجی‌های مدل SWB به‌عنوان شرایط اولیه در مدل MISD

جدول ۱- مجموعه پارامترها و دامنه تغییراتشان در فرایند واسنجی برای مدل MILC.

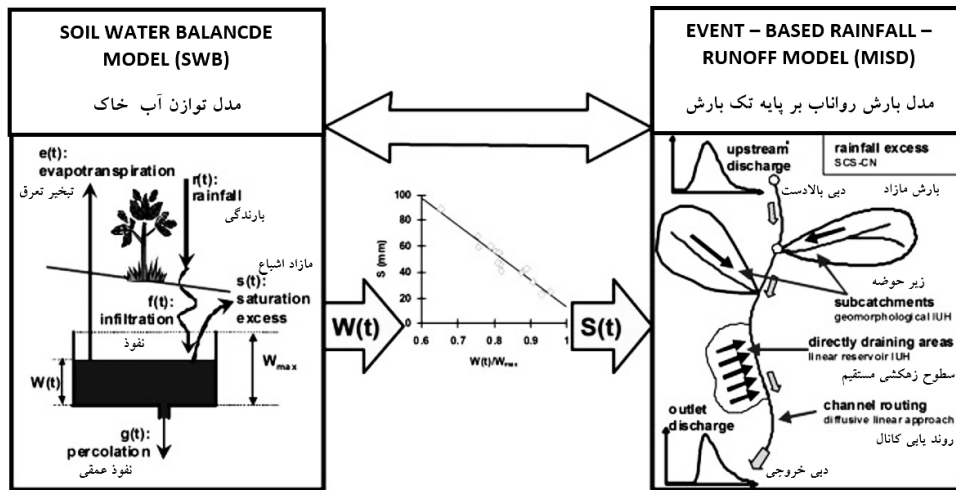
Table 1. Description, unit of measure and range of the calibration parameters for MILC.

دامنه Domain	واحد unit	توضیحات Description	پارامتر Parameter
100-1000	mm	بیشینه ظرفیت آبی لایه خاک Maximum water capacity of the soil layer	W_{max}
0.5-1	mm	بخشی از W_{max} به نوان شرایط اولیه fraction of W_{max} .Initial conditions	W_p
5-60	-	توان زهکشی Exponent of drainage	M2
0.01-20	-	پارامتر مربوط به نفوذ و زهکشی Parameter of infiltration and drainage	Ks
0-1	-	بخشی از مقدار زهکشی در مقابل جریان بین‌لایه‌ای Fraction of drainage verusu interflow	Nu
0.5-6.5	-	ضریب تأخیر زمان Coefficient lag-time	gamma
0.4-2	-	تبخیر تعرق بالقوه Potential evapotranspiration	Kc
0.0001-0.2	-	ضریب انتزاعی اولیه Initial abstraction coefficient	Lambda
1-5	-	پارامتری برای ارتباط دو مدل SWB و MISD Parameter of the relationship linking the SWB model and MISD	α

1- Soil Water Balance Model

2- Soil Conservation Service-Curve Number

3- Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph



شکل ۲- دیاگرام شماتیک مدل پیوسته بارش- رواناب (۱).

Figure 2. Structure of the continuous rainfall-runoff model (1).

تابع هدف $TRMSE^T$: این تابع هدف بر روی کمینه کردن خطای دوره‌های که جریان کم است، تکیه می‌کند و با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است (۲):

$$TRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{Q}_{s,t} - \hat{Q}_{o,t})^2} \quad (2)$$

$$\hat{Q} = \frac{(1+Q)^\lambda - 1}{\lambda}$$

که در آن، $\hat{Q}_{s,t}$ دبی باکس کاکس شبیه‌سازی شده در زمان t و $\hat{Q}_{o,t}$ دبی باکس کاکس مشاهداتی در گام زمانی t است. همچنین \hat{Q} نشان‌دهنده جریان باکس کاکس است و مقدار λ در این رابطه ۰/۳ منظور می‌شود. همچنین این تابع نسبت به تابع $RMSE$ بهتر عمل می‌کند (تأثیرات ناهمواری‌انسی در محاسبه $RMSE$ را کاهش می‌دهد). مقدار بهینه تابع هدف $TRMSE$ برابر صفر است.

توابع هدف مورد استفاده جهت واسنجی و ارزیابی مدل: به‌منظور واسنجی و ارزیابی عملکرد مدل بارش رواناب MILC در شبیه‌سازی رواناب حوضه مورد مطالعه از توابع زیر استفاده شد:

تابع هدف NSE^1 : این تابع هدف که غالباً در واسنجی مدل‌های بارش رواناب کاربرد دارد، خطای جریان اوج^۲ را کمینه می‌کند و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (۱۳):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{s,t} - Q_{o,t})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{o,t} - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

که در آن، $Q_{s,t}$ دبی شبیه‌سازی شده مدل، $Q_{o,t}$ دبی مشاهداتی در منطقه و \bar{Q}_o میانگین دبی مشاهداتی در طول دوره واسنجی است. مقدار t از یک تا N (تعداد گام‌های زمانی در طول دوره واسنجی) اعمال می‌شود. مقادیر NSE از $-\infty$ تا $+1$ تغییر می‌کند و هراندازه که جواب تابع به $+1$ نزدیک‌تر شود خطا کم‌تر خواهد بود.

3- Transformed Root-mean Square Error

1- Nash-Sutcliffe Efficiency

2- Peak. Flow

چندهدفه مانند MOPSO، SPEA2 و NSGA-II است. مدل بارش رواناب MILC یک مدل مفهومی نیمه‌توزیعی یکپارچه است که ورودی‌های مورد نیاز آن جهت شبیه‌سازی فرایند تبدیل بارش به رواناب شامل دمای میانگین روزانه (سانتی‌گراد) و بارش میانگین روزانه (میلی‌متر) هستند و در نهایت دبی روزانه حوضه، خروجی مدل خواهد است که با دبی‌های روزانه مشاهداتی حوضه مورد مطالعه مقایسه می‌شود. برای واسنجی پارامترهای مدل از داده‌های دما و بارش روزانه ۱۲ سال حوضه قره‌سو استفاده شد، که این داده‌ها بین سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۷ هجری شمسی از زیرحوضه قره‌سو واقع در حوضه کرخه جمع‌آوری شده‌اند.

نتایج دوره واسنجی مدل MILC توسط الگوریتم

چندهدفه AMALGAM: مدل MILC دارای ۹ پارامتر قابل واسنجی است که این پارامترها به همراه مقادیر کمینه و بیشینه آنها (دامنه تغییرات) در جدول ۱ گنجانده شده است. پس از اتمام واسنجی جواب‌های پارتو به دست آمده را به صورت سه‌هدفه رسم شده‌اند (شکل‌های ۴ تا ۷) و برای هر کدام از شکل‌های رسم شده یک بهینه میانگین، مشخص شد (در شکل‌های ۴ تا ۷ نقطه شماره ۴ نشان‌دهنده بهینه میانگین است). در واقع منظور از بهینه میانگین یکی از نقاط بهینه پارتو است که توابع هدف موردنظر در آن دارای مقادیری نزدیک به مقدار بهینه هر یک از آنها در بهترین حالت خود باشند.

تابع هدف $ROCE^1$: با استفاده از این تابع خطای جریان متوسط سالانه کمینه می‌شود، که رابطه آن به صورت زیر خواهد بود:

$$ROCE = \frac{1}{Y} \sum_{y=1}^Y \left| \frac{\bar{Q}_s}{\bar{Q}_o} - 1 \right| \times 100\% \quad (3)$$

که در آن، \bar{Q}_s میانگین سالانه رواناب شبیه‌سازی شده و \bar{Q}_o میانگین سالانه جریان مشاهداتی است. Y تعداد سال‌های دوره واسنجی است. همان‌طور که رابطه ۳ نشان می‌دهد، بهینه این تابع هدف مقدار صفر خواهد بود.

تابع هدف $SFDCE^2$: این تابع خطا در شبیه‌سازی شیب منحنی تداوم جریان را کاهش می‌دهد و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$SFDCE = \left| \frac{Q_{s,67\%} - Q_{s,33\%}}{Q_{o,67\%} - Q_{o,33\%}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

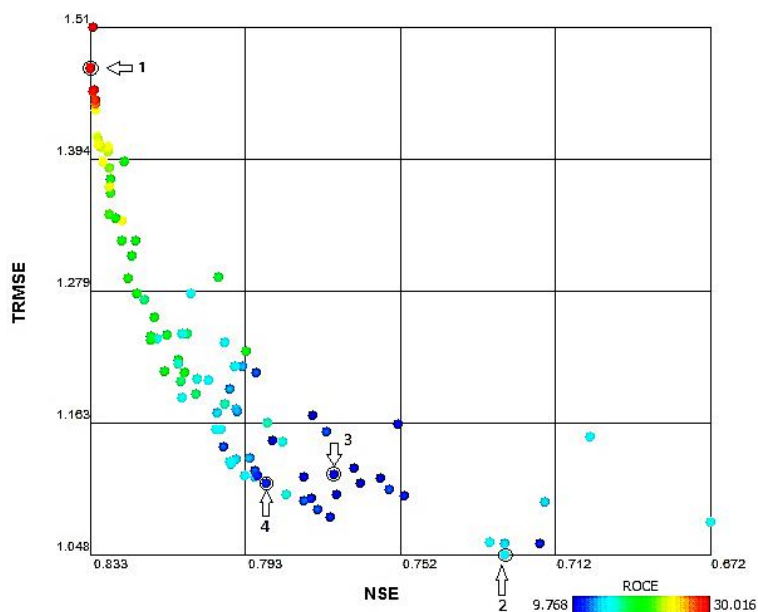
که در آن، $Q_{s,67\%}$ نشان‌دهنده صدک شصت و هفتم از دبی محاسباتی و $Q_{o,67\%}$ صدک شصت و هفتم از دبی مشاهداتی است.

* منحنی مدت‌زمان جریان^۳ یک تابع توزیعی جریان است که در محور عمودی آن (y) مقادیر بارش مازاد (رواناب) و در محور افقی آن (x) احتمال وقوع جریان رسم می‌شود. مقدار بهینه تابع هدف SFDCE برابر صفر است.

نتایج

دلیل انتخاب الگوریتم AMALGAM، برتری این الگوریتم در دستیابی سریع و دقیق به مجموع جواب‌های بهینه پارتو نسبت به دیگر الگوریتم‌های

- 1- Runoff Coefficient Percent Error
- 2- Slop of the Flow Duration Curve
- 3- Flow Duration Curve

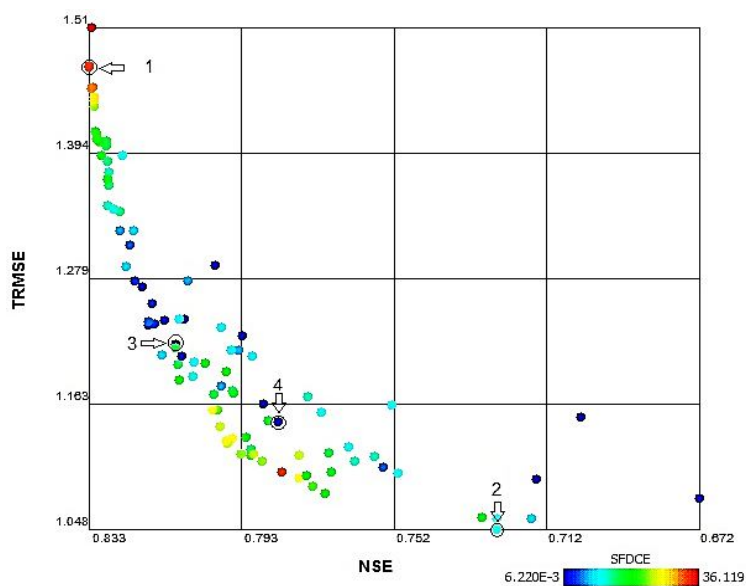


شکل ۳- بهینه‌های پارتو به دست آمده برای سه تابع هدف TRMSE، NSE و ROCE (توضیحات در متن).

Figure 3. Pareto optimal from TRMSE, NSE and ROCE.

هدف TRMSE است همچنین نقطه شماره ۳ بهترین مقدار تابع هدف ROCE را نشان می‌دهد و در نهایت بهینه میانگین بین این توابع با شماره ۴ مشخص شده است که مقادیر سه تابع هدف مورد بررسی در نقطه بهینه میانگین در جدول ۲ گنجانده شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود نقاط بهینه پارتو برای سه تابع هدف TRMSE، NSE و ROCE رسم شده است؛ در این شکل مقادیر تابع هدف ROCE به صورت طیف رنگی رسم شده است. نقطه شماره ۱ نشان‌دهنده بهترین مقدار تابع هدف NSE و نقطه شماره ۲ نمایشگر بهترین مقدار تابع

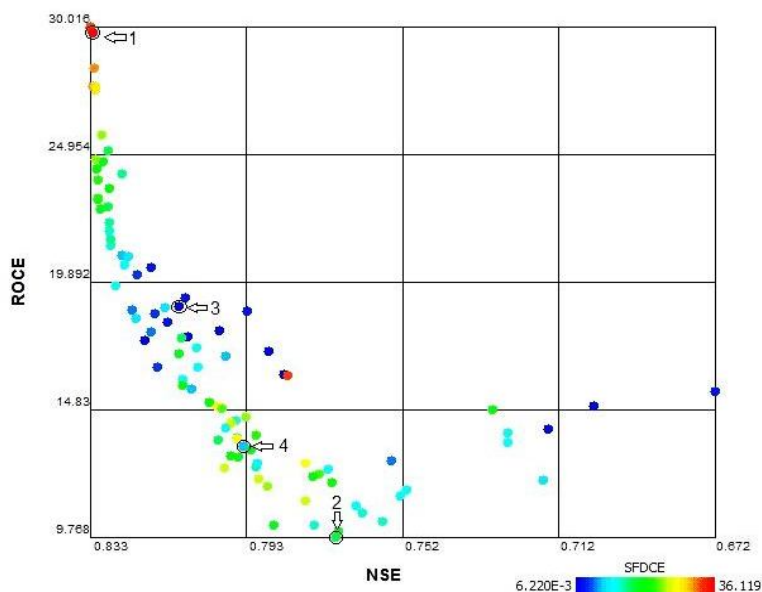


شکل ۴- بهینه‌های پارتو به دست آمده برای سه تابع هدف TRMSE، NSE و SFDCE (توضیحات در متن).

Figure 4. Pareto optimal from TRMSE, NSE and SFDCE.

TRMSE و SFDCE هستند. همچنین نقطه بهینه میانگین بین این توابع با شماره ۴ مشخص شده است که مقادیر سه تابع هدف مورد بررسی در نقطه بهینه میانگین در جدول ۲ گنجانده شده است.

شکل ۴ جبهه پارتو سه هدفه توابع TRMSE، NSE و SFDCE را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر تابع هدف SFDCE به صورت طیف رنگی رسم شده است. نقاط شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نشان‌دهنده بهترین مقادیر سه تابع هدف NSE،

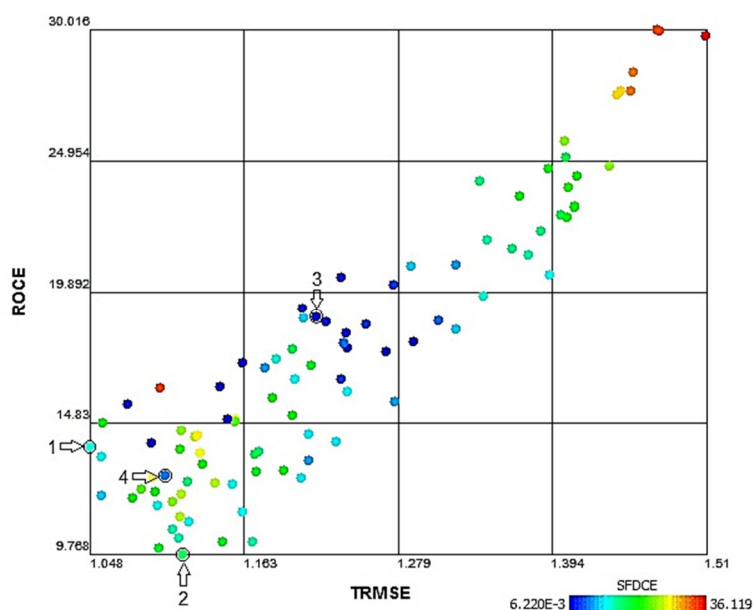


شکل ۵- بهینه‌های پارتو به دست آمده برای سه تابع هدف ROCE، NSE و SFDCE (توضیحات در متن).

Figure 5. Pareto optimals from ROCE, NSE and SFDCE.

رنگی رسم شده است. همچنین نقاط شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر بهینه سه تابع هدف NSE، ROCE و SFDCE هستند.

در شکل ۵ نیز نقطه شماره ۴ نشان‌دهنده مقدار بهینه میانگین است که مقادیر سه تابع هدف مورد بررسی در این نقطه در جدول ۲ گنجانده شده است. در این شکل تابع هدف SFDCE به صورت طیف



شکل ۶- بهینه‌های پارتو به دست آمده برای سه تابع هدف ROCE، TRMSE و SFDCE (توضیحات در متن).

Figure 6. Pareto optimals from ROCE, TRMSE and SFDCE.

شماره ۴ مشخص شده است که مقادیر سه تابع هدف مورد بررسی در نقطه بهینه میانگین در جدول ۲ گنجانده شده است. در این شکل نیز تابع هدف SFDCE به صورت طیف رنگی رسم شده است.

در شکل ۶ نقطه شماره ۱ نشان‌دهنده بهترین مقدار تابع هدف TRMSE و نقطه شماره ۲ نمایشگر بهترین مقدار تابع هدف ROCE است همچنین شماره ۳ بهترین مقدار تابع هدف SFDCE را نشان می‌دهد و در نهایت بهینه میانگین بین این توابع با

جدول ۲- مقادیر توابع هدف در نقطه بهینه میانگین در دوره واسنجی.

Table 2. The values of the objective functions at the mean optimal point in the calibration period.

مقادیر value				تابع هدف The objective function
NSE	TRMSE	ROCE	SFDCE	
0.79	1.11	11.75	22.63	NSE TRMSE ROCE
0.78	1.15	16.18	1.14	NSE TRMSE SFDCE
0.79	1.21	13.36	5.72	NSE ROCE SFDCE
0.75	1.10	12.77	5.41	TRMSE ROCE SFDCE

آبریز است. مقایسه مقادیر به دست آمده برای توابع هدف فوق در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی در جدول‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در شبیه‌سازی جریان‌های اوج و جریان‌های کم است.

نتایج دوره صحت‌سنجی مدل MILC: دلیل اصلی انتخاب توابع NSE، TRMSE، ROCE و SFDCE به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل، پوشش نسبتاً کامل بخش‌های مختلف هیدروگراف واحد حوضه

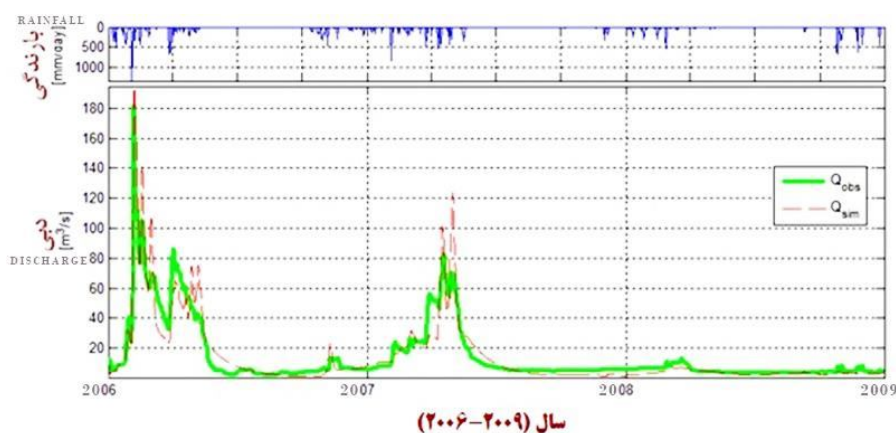
جدول ۳- مقادیر توابع هدف در نقطه بهینه میانگین در دوره صحت‌سنجی.

Table 3. The values of the objective functions at the mean optimal point in the validation period.

مقادیر value				تابع هدف The objective function
NSE	TRMSE	ROCE	SFDCE	
0.75	1.29	21.20	129.23	NSE TRMSE ROCE
0.76	1.33	22.78	74.24	NSE TRMSE SFDCE
0.71	1.48	17.49	103.92	NSE ROCE SFDCE
0.78	1.22	19.90	106.46	TRMSE ROCE SFDCE

رواناب مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری قورباغستان واقع در حوضه قره‌سو، این دو رواناب (شبیه‌سازی شده و مشاهداتی) به صورت شماتیک در شکل ۷ رسم شده‌اند که در ادامه به تحلیل این نتایج پرداخته می‌شود.

در این مرحله مدل با سری پارامترهای حاصل از دوره واسنجی اجرا می‌شود و مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده که مقادیر توابع هدف فوق در دوره اعتبارسنجی در جدول ۳ قرار گرفته‌اند. همچنین به‌منظور مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل و

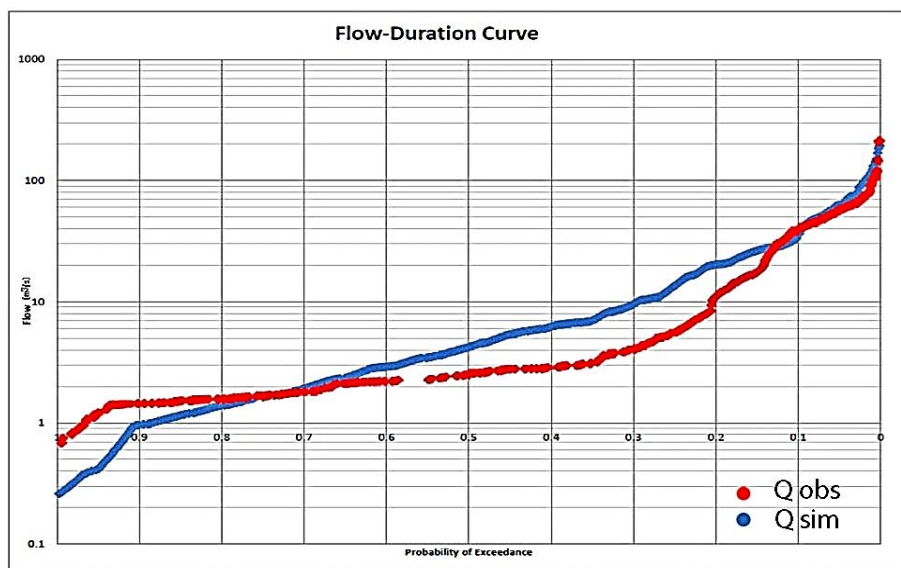


شکل ۷- رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره صحت‌سنجی (توضیحات در متن).

Figure 7. Observed runoff and simulated runoff model during the validation period.

شبه‌سازی رواناب در این شکل، ماهیت این توابع و همچنین وجود سال‌های کم‌آبی در دوره صحت‌سنجی است (۲۰۰۶-۲۰۰۹ میلادی) است. شکل ۷ بهترین نتیجه حاصل از دوره صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. مقادیر توابع هدف ROCE و SFDCE در دوره واسنجی در حدود قابل‌قبولی هستند ولی بررسی و مقایسه مقادیر به‌دست آمده برای تابع هدف SFDCE در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی گویای ضعف مدل در شبه‌سازی جریان‌های میانه است، برای درک بهتر این موضوع لازم است تا منحنی مدت‌زمان جریان برای رواناب شبه‌سازی شده توسط مدل و رواناب مشاهداتی حوضه رسم شود، زیرا مقدار تابع هدف SFDCE در واقع بیانگر شیب این منحنی است.

شکل ۷ نتایج دوره ۳ ساله صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. در این شکل خطوط سبزرنگ نشان‌دهنده رواناب مشاهداتی (m^3/s) در حوضه و خط‌چین‌های قرمز رنگ رواناب شبه‌سازی شده در برای نقطه بهینه میانگین سه تابع هدف TRMSE، NSE و ROCE. توسط مدل را نشان می‌دهند همچنین خطوط آبی‌رنگ مقادیر بارندگی (میلی‌متر در روز) در حوضه را نشان می‌دهند، در ضمن محور افقی این نمودار، سال‌های دوره صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. همان‌طور در شکل ۷ مشاهده می‌شود، به دلیل استفاده از توابع ناش- ساتکلیف (NSE) و TRMSE در فرایند واسنجی، جریان‌های کم، میانه و اوج به‌خوبی شبه‌سازی شده‌اند. دلیل اصلی عملکرد خوب مدل در



شکل ۸- منحنی تداوم جریان برای رواناب مشاهداتی و رواناب شبه‌سازی شده. محور افقی نشان‌دهنده احتمال وقوع جریان و محور افقی مقدار جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه را نشان می‌دهد.

Figure 8. The Flow-duration curve for observed runoff and simulated runoff.

مدت‌زمان جریان رسم شده می‌توان به شیب بیشتر منحنی رواناب شبه‌سازی شده (در دوره صحت‌سنجی) نسبت به رواناب مشاهداتی در جریان‌های میانه پی برد. همان‌طور که منحنی مدت‌زمان جریان نشان می‌دهد مدل به‌خوبی جریان‌های اوج و جریان‌های کم را

شکل ۸ منحنی مدت‌زمان جریان برای رواناب مشاهداتی (قرمز) و رواناب شبه‌سازی شده (آبی) را نشان می‌دهد. محور افقی این منحنی درصد احتمال وقوع رواناب و محور عمودی آن مقادیر رواناب (m^3/s) را نشان می‌دهد. با نگاهی دقیق‌تر به منحنی

مقایسه نتایج به دست آمده برای توابع ROCE و SFDCE ضعف مدل را در شبیه سازی جریان های میانه نشان می دهد. اگرچه عدم همخوانی مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی دلایل مختلفی دارد. ممکن است خطای زیادی از جمله خطا در داده های هواشناسی، دبی های مشاهداتی و ساده سازی در ساختار مدل، شبیه سازی جریان را تحت تأثیر قرار دهد.

بهره گیری از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه برای فرایند واسنجی خودکار مدل بارش- رواناب به دلیل استفاده از چند تابع هدف گوناگون که هر کدام بخشی از هیدروگراف حوضه را مورد هدف قرار می دهند، باعث به چالش کشیدن مدل در شبیه سازی تمامی جریان های موجود در حوضه می شود که این موضوع اهمیت استفاده از الگوریتم های چندهدفه در واسنجی مدل های هیدرولوژیکی را نشان می دهد.

انتخاب هوشمندانه توابع هدف به منظور واسنجی مدل بارش- رواناب نقش کلیدی در شناخت هرچه بیش تر مدل دارد.

یکی دیگر از نتایج به دست آمده در این پژوهش قدرت الگوریتم ترکیبی بهینه سازی چندهدفه AMALGAM در دستیابی سریع به جبهه های پارتو بود که در پژوهش صادقی و همکاران (۲۰۱۵) نیز مورد بررسی قرار گرفته بود.

شبیه سازی کرده زیرا شیب این دو منحنی برای جریان های فوق بسیار به هم نزدیک هستند. هر چند توابع هدف مورد استفاده هدف گذاری شده است تا تمام قسمت های هیدروگراف را با دقت کافی شبیه سازی کند اما همان طور که در این شکل ۸ مشاهده می شود، ابتدای نمودار به عنوان نماینده مقادیر دبی های بسیار کم نزدیک به صفر و همچنین میانه نمودار، به نسبت بقیه قسمت ها با دقت کمتری شبیه سازی شده که این موضوع ضعف مدل در این قسمت ها را نمایان می نماید.

نتیجه گیری

مقادیر به دست آمده برای تابع هدف ناش- ساتکلیف (NSE) در دوره های واسنجی و صحت سنجی اعدادی بین ۰/۷۱ و ۰/۷۹ هستند که با توجه به مقدار بهینه این تابع هدف (برابر ۱)، این نتایج گویای عملکرد مطلوب مدل بارش- رواناب فوق برای شبیه سازی جریان های اوج است.

با استناد به جدول های ۲ و ۳، مقادیر به دست آمده برای تابع هدف TRMSE در دوره های واسنجی و صحت سنجی (۱/۱-۱/۴۸) و بررسی شماتیک خروجی ها (شکل ۸) نتیجه گیری می شود که مقادیر رواناب شبیه سازی شده و مشاهداتی تطابق قابل قبولی دارند و این موضوع گویای عملکرد مناسب مدل در شبیه سازی جریان های پایین است.

منابع

1. Brocca, L., Melone, F., and Moramarco, T. 2011. Distributed rainfall-runoff modeling for flood frequency estimation and flood forecasting. Hydrological Processes. Pp: 2801-2813.
2. Box, G.E.P., and Cox, D.R. 1964. An analysis of transformations, J. R. Stat. Soc. Ser. B. Pp: 211-252.
3. Corradini, C., Melone, F., and Ubertini, L. 1995. A semi-distributed model for direct runoff estimate. In Applied Simulation and Modelling, Hamza, M.H. (ed.). IASTED Acta Press: Anaheim (CA), Pp: 541-545.
4. Dooge, J.C.I. 1959. A General Theory of the Unit Hydrograph. J. Geophysic. Res. 64: 241-256.

5. Green, W.H., and Ampt, G.A. 1911. Studies on soil physics. *J. Agric. Sci.* 4: 1-24.
6. Gupta, H., Sorooshian, S., and Yapo, P. 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information, *Water Resour. Res.* 34: 751-763.
7. Horton, R. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. AGU.* 14: 446-460.
8. Horton, R. 1939. Analysis of runoff-plot experiments with varying Infiltration capacity. *Trans. AGU.* 20: 693-711.
9. Imbeau, M.E., La Durance. 1892. Regime. Crues et inundations. *Ann. Ponts Chaussées Mem. Doc. Ser.* Pp: 5-18.
10. Kollat, J.B., Reed, P.M., and Wagener, T. 2012. When are multiobjective calibration trade-offs in hydrologic models meaningful? *Water Resour. Res.* 48: W03520.
11. Lighthill, M., and Whitham, G. 1955. On Kinematic waves I and II a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. Royal Society, London, Series A*, 229, Pp: 317-345.
12. Mulvany, T.J. 1850. On the use of self registering rain and flood gauges. *Inst. Civ. Eng. Proc. (Dublin)*, 4: 1-8.
13. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles, *J. Hydrol.* 10: 282-290.
14. Nash, J.E. 1957. The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph. *International Association of Scientific Hydrology Publication.* 45: 114-121.
15. Sadeghi, T.S., Pourreza, B.M., and Taghian, M. 2015. Multi-Objective Optimization of the Hedging Model for reservoir Operation Using Evolutionary Algorithms. *J. Water Wastewater.* 26: 14-22. (In Persian)
16. Sherman, L.K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method, *Eng. News Rec.* 108: 501-505.
17. Tang, Y., Reed, P., and Wagener, T. 2006. How efficient and effective are evolutionary multiobjective algorithms at hydrologic model calibration? *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10: 289-307.
18. Vrugt, J.A., and Robinson, B.A. 2007. Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 104: 708-711.
19. Zhang, X., Srinivasan, R., and Liew, M.V. 2010. On the use of multi-algorithm, genetically adaptive multi-objective method for multi-site calibration of the SWAT model. *Hydrological Processes.*



Multi-objective calibration of conceptual hydrological model by AMALGAM algorithm

M. Farahmand Rad¹, Gh.A. Barani², M. Pourreza-Bilondi³
and *M.S. Ghazanfari Moghadam⁴

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Water Engineering, University of Kerman Advanced Industrial and Advanced Technology, ²Professor, Dept. of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman,

³Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, University of Birjand, ⁴Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Kerman Advanced Industrial and Advanced Technology

Received: 08.01.2017; Accepted: 05.07.2018

Abstract

Background and Objectives: One of the ways to predict and estimate the amount of runoff from rainfall is the use of hydrological models. Calibration process is a critical step which should be carried out carefully to optimize the model parameters. Multi-objective optimization algorithms as one of the most important and practical topics in various fields of study could be employed to achieve a reasonable calibration. The purpose of these algorithms is to determine the values of model parameters to find the best possible solution and achieve different goals.

Materials and Methods: In this study, Multi-objective optimization algorithm (AMALGAM) used to calibrate conceptual daily hydrologic model (MILC). MILC model employs the Soil Conservation Service-Curve Number method for abstraction (SCS-CN) for estimation of losses, the geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) for routing of rainfall excess of catchment. This paper applies a four-objective calibration strategy focusing on peak flows (NSE), low flows (TRMSE), water balance (ROCE) and flashiness (SFDCE) to parameter estimation of MILC model. After calibration process, a trade-off point extracted from Pareto-front was selected to include the appropriate values of all four objectives simultaneously. This point is applied to verify the validation period.

Results: The obtained values during the validation period ($0.71 \leq NSE \leq 0.78$) indicate that the MILC model has good performance to simulate the amount of peak flows but according to ROCE and SFDCE values it has weak performances to simulate the balance water and median flow respectively.

Conclusion: The values obtained for the TRMSE target function during the periodic verification period were 1.22 to 1.22 (TRMSE = 0 in optimal mode), which indicates that the simulations are suitable for low flows. Multi-objective optimization algorithm for the automatic calibration process of rainfall-runoff model, due to the use of multiple objective functions that target each part of the hydro graph of the basin, challenges the model in simulating all current flows in the basin. This issue shows the importance of using multi-objective algorithms to calibrate hydrologic models. Also, the intelligent selection of multi-objective functions in the calibration process of the model plays a key role in understanding the model more fully by using multi-objective algorithms instead of single-objective for the calibration process.

Keywords: A multi-algorithm genetically adaptive multi-objective, AMALGAM, Hydrological model calibration, MILC

* Corresponding Author; Email: s.ghazanfari@kgut.ac.ir

Arc