تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۱۷

نشریه مرتع و آبخیزداری
دورهٔ ۶۶، شمارهٔ ٤، زمستان ۱۳۹۲

واسنجی خودکار دو مدل بارش- رواناب تانک و SIMHYD با استفاده از الگوریتم ژنتیک

❖ حامد روحانی*: استادیار دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه گنبد کاووس
❖ محسن فراهی مقدم: کارشناس ارشد آبخیزداری دانشگاه زابل

چکیده

شبیه‌سازی روابط بارش- رواناب کانون اصلی توجه تحقیقات هیدرولوژی در دهه‌های گذشته بوده و مدل‌های زیادی برای این منظور پیشنهاد شده است. انتخاب مدل به هدف از مدل‌سازی و اطلاعات در دسترس بستگی دارد. در این مطالعه، عملکرد نسبی دو مدل یکپارچه و مفهومی تانک[1] و SIMHYD مقایسه شد. در هر دو مدل ذکرشده محدودهٔ تغییرات پارامترها زیاد است؛ در نتیجه، استفاده از روش سعی و خطا برای بهینه‌سازی پارامترها مشکل و وقت‌گیر است. بنابراین، واسنجی این دو مدل به صورت خودکار و با استفاده از الگوریتم ژنتیک[2] در حوزهٔ آبخیز چهل‌چای، از زیرحوزه‌های حوزهٔ آبخیز گرگان‌رود، انجام گرفت. برای واسنجی و اعتبارسنجی خودکار به‌ترتیب از داده‌های روزانهٔ دبی در دورهٔ زمانی ۱۹۹۲ـ ۱۹۹۶و دورهٔ زمانی ۲۰۰۲ـ ۲۰۰۵ استفاده شد. نتایج این مطالعه با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب ناش- ساتکلیف و RMSE[3] تجزیه و تحلیل شد. این ضرایب برای دورهٔ واسنجی مدل تانک به‌ترتیب ۰٫۵۹۹ و ۰٫۸۲۱ و برای دورهٔ اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰٫۵٦٦و ۰٫۵۲۲است. همچنین، این ضرایب برای دورهٔ واسنجی مدل SIMHYD به‌ترتیب ۰٫٦۰۲و ۰٫۸۱۹ و برای دورهٔ اعتبارسنجی آن به‌ترتیب ۰٫٦۱۷ و ۰٫٤۹۰ محاسبه شد. نتایج آماری و گرافیکی دو مدل نشان می‌دهد که کارایی مدل SIMHYD از مدل تانک بهتر است.

واژگان کلیدی: الگوریتم ژنتیک، حوزهٔ آبخیز چهل‌چای، مدل تانک، مدل SIMHYD.

* نویسندهٔ مسئول: تلفن: ۰۹۱۲۵۰۱۵۳٤۷ E- mail: Rouhani.hamed@yahoo.com

1. Tank
2. Genetic Algorithm
3. Root Mean Square Error

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

هدف علم هیدرولوژی یافتنِ پاسخ این پرسش است که «چه اتفاقی برای قطرهٔ باران بعد از بارش می‌افتد؟» [۱۵]. هرچند این سؤال در ظاهر ساده به‌نظر می‌رسد، تجربه نشان داده که تشریح کمّیِ چرخهٔ هیدرولوژیکی در سطح خشکی‌ها بسیار پیچیده و تحت تأثیر عدم قطعیت‌های فراوانی است. هیدرولوژی آبخیز شاخه‌ای از علم هیدرولوژی است که در آن فرایندهای هیدرولوژیکی در سطح حوزهٔ آبخیز برای شناخت عکس‌العمل حوزهٔ آبخیز در نظر گرفته می‌شود.

روش‌های غیرمستقیم متعددی برای شبیه‌سازی سیستم‌های طبیعی، برآورد دقیق‌تر و جامع‌تر، و اعمال محاسبات پیچیده‌تر با استفاده از رایانه ابداع شده است؛ یکی از این روش‌ها مدل‌سازی یا شبیه‌سازی هیدرولوژیکی است. در واقع، مدل، معرف ساده‌ای از کل سیستم حوزه است و، به عبارتی، نمایانگر بخشی از واقعیت‌های موجود در یک سیستم. به همین دلیل، از مدل‌های هیدرولوژیکی می‌توان به عنوان ابزاری مهم در مطالعهٔ اقلیم و فرایندهای هیدرولوژیکی حوزه‌ها نام برد. این مدل‌ها به شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی سطح زمین، به منظور بهبود مدیریت منابع آب، قادرند [۹]. در نتیجه، هیدرولوژیست‌ها و مدیران منابع طبیعی برای فهم و مدیریت فعالیت‌های طبیعی و انسانی، که در سیستم‌های حوزهٔ آبخیز تأثیر می‌گذارد، از مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی بهره می‌گیرند. از طرف دیگر، این مدل‌ها این امکان را فراهم می‌سازند تا با شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب عکس‌العمل حوزه را با حداقل زمان و هزینه ارزیابی کرد. با توجه به اینکه در حوزه‌های آبخیز اندازه‌گیری همهٔ کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی عکس‌العمل حوزه میسر نیست [۲۰]، انتخاب مدل مناسبی که بتواند، در عین سادگی، در ساختار و حداقل اطلاعات ورودیْ برآوردی با دقت قابل قبول ارائه کند ضروری است. در مدل‌های مفهومی همهٔ فرایندهای بارش- رواناب به صورت مفاهیم ساده‌شده توصیف می‌شوند، به همین دلیل، در صورتی که هدف اصلی مطالعه شبیه‌سازی جریان در خروجی حوزهٔ آبخیز باشد، مدل‌های مفهومی اغلب بر انواع دیگر مدل‌های بارش- رواناب، از جمله مدل‌های فیزیکی، ترجیح داده می‌شوند، زیرا با ورودی و محاسبات کمترْ پاسخ‌هایی پذیرفتنی ارائه می‌دهند. اما مدل‌های مفهومی بارش- رواناب، معمولاً، پارامترهای زیادی دارند و صحت محاسبات آن‌ها به چگونگی تعیین این پارامترها بستگی دارد و اندازه‌گیری مستقیم برخی از این پارامترها امکان‌پذیر نیست. بنابراین، بر اساس فرایندهای واسنجی، کمینهٔ یک تابع هدف برآورد می‌شوند [۲۲]. با وجود این، واسنجی مدل‌های مفهومی بارش- رواناب، به عنوان یک چالش، همیشه مطرح بوده است [۸، ۱۰، ۱۶، ۲۰].

در این تحقیق مدل تانک [۲۱] و مدل SIMHYD [۶] به کار برده شد که مدل‌های مفهومی یکپارچه، پیوسته، و قطعی بارش- رواناب‌اند. با وجود اینکه این دو مدل ساختار و مفاهیمی ساده‌تر نسبت به مدل‌های پیچیده دارند، نتایج آن‌ها در خروجی حوزهٔ آبخیز قابل اعتماد است [۱۱].

تنها روش واسنجی در گذشته روش دستی بود که در آن از فرایند سعی و خطا برای تنظیم پارامترها استفاده می‌شد. این روش، به‌ویژه برای افرادی که دانش و تجربهٔ زیادی دربارهٔ مدل و پارامترهای آن ندارند، وقت‌گیر و خسته‌کننده است [۱۰]. در سال‌های اخیر، رشد سریع محاسبات رایانه‌ای به

Archive of SID

www.SID.ir

روش‌های بهینه‌سازی خودکار کمک شایانی کرده است. این نوع روش‌های واسنجی هدفمند بوده و، امروزه، با پیشرفت تکنولوژی در عرصهٔ رایانه کاربرد آن‌ها تسهیل شده است. در دو دههٔ اخیر با مطالعات بسیاری عملکرد روش‌های بهینه‌سازی ارزیابی شده است، مثلاً در تحقیقی مدل تانک با استفاده از الگوریتم‌های تکامل رقابتی جامع[1] (SCE)، الگوریتم ژنتیک[2] (GA)، و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده[3] (SA) واسنجی شد و نتایج این تحقیق نشان داد روش SCE نسبت به دو روش دیگر بهتر است [۷]. همچنین، تحقیقی دیگر بیانگر عملکرد بهتر روش SCE نسبت به روش چندبارهٔ آغازگر پاول[4] برای واسنجی مدل تانک است [۲]. مطالعاتِ بررسی کارایی روش‌های بهینه‌سازی مدل تانک در دو کشور ژاپن و اندونزی نشان داد که الگوریتم مارکودرات[5] برای تعیین پارامترهای این مدل مؤثر و کارآمد است ۱۹]. علاوه بر این، روش اصلاح‌شدهٔ جست‌وجوگر هارمونی[6] بر الگوریتم‌های جست‌وجوگر هارمونی پاول و الگوریتم ژنتیک برای واسنجی خودکار مدل تانک در کره ارجحیت دارد [۱۳]. اگرچه در منابع مختلف روش‌های مختلف بهینه‌یابی فراگیر[7] و موضعی[8] برای واسنجی مدل‌های مفهومی بارش- رواناب پیشنهاد شده است، هیچ توافق عمومی برای تعیین روش مناسب‌تر وجود ندارد [۱۰]. هدف از این پژوهش ارزیابی کارایی الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل تانک و SIMHYD در حوزهٔ آبخیز چهل‌چای، از زیرحوزه‌های گرگان‌رود، است. با استفاده از امکان واسنجی خودکار اعمال‌شده، واسنجی این دو مدل برای یک حوزه می‌تواند به‌سرعت و بدون نیاز به دانش و تجربهٔ وسیع در مورد مدل و پارامترهای آن انجام شود.

روش‌شناسی

منطقهٔ مورد مطالعه

در این مطالعه، ایستگاه هیدرومتری لزوره (کد ۰۵۳-۱۲)، با مساحت ۲۵۶٫۸۳ کیلومتر مربع، واقع در خروجی حوزهٔ چهل‌چای، ایستگاه مبنا برای شبیه‌سازی بارش- رواناب انتخاب شد. این حوزه در طول‌های جغرافیایی شرقی ۵۵° ۲۲´ ۳۰˝ الی ۵۵° ۳۷´ ۳۰˝ و عرض‌های جغرافیایی شمالی ۳۶° ۵۷´ ۳۰˝ الی ۳۷° ۱۵´ قرار دارد و از شمال به شهر مینودشت، از غرب به ارتفاعات محمد زمان‌خان و دشت حلقه، از شرق به حوزهٔ آبخیز رودخانهٔ چهل‌چای، و از جنوب به حوزهٔ آبخیز تیل‌آباد محدود می‌شود. این منطقه، از لحاظ تقسیمات سیاسی، در محدودهٔ شهرستان مینودشت در زیرحوزهٔ بزرگ گرگان‌رود قرار دارد. حداقل ارتفاع ۱۳۵ متر و حداکثر آن ۲۵۵۰ متر از سطح دریاست. شصت درصد از سطح حوزه پوشیده از اراضی جنگلی است و بقیهٔ سطح حوزه را اراضی زراعی در بر می‌گیرد. در این تحقیق داده‌های پایهٔ مورد استفاده شامل داده‌های مشاهداتی بارندگی، دبی رودخانه، و تبخیر تعرق روزانهٔ منطقه است. با توجه به عدم ثبت دبی در ایستگاه هیدرومتری مورد بررسی از سال ۱۹۹۷-۲۰۰۱، سال آبی ۱۹۹۲-۱۹۹۶ برای دورهٔ واسنجی مدل و سال آبی ۲۰۰۲- ۲۰۰۵ برای دورهٔ اعتبارسنجی انتخاب شد. در جدول ۱ محدودهٔ تغییرات داده‌های مشاهداتی ورودی مدل در دو دورهٔ واسنجی و

1. Shuffled Complex Evolution
2. Genetic Algorithm
3. Simulated Annealing
4. Multistart Powell Method
5. Marquardt
6. Harmony Search
7. global method
8. local method

Archive of SID
www.SID.ir

اعتبارسنجی با میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل تغییرات نشان داده شده است. رودخانهٔ مورد نظر دائمی است و دبی متوسط سالیانهٔ آن در دوره های واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۳٫۰٤ و ۱٫۸۷ متر مکعب بر ثانیه است. بیشترین مقدار متوسط بارش ماهانه در دورهٔ واسنجی به‌ترتیب در ماه مارس (۱۳۹٫۵۰ میلی‌متر) و فوریه (۱۱۱٫۸۰ میلی‌متر) است. همچنین، بیشترین مقدار بارش در دورهٔ اعتبارسنجی به‌ترتیب در ماه آوریل (۱۷٦٫۳۳میلی‌متر) و مارس (۱۳۱٫٦۷میلی‌متر) است.

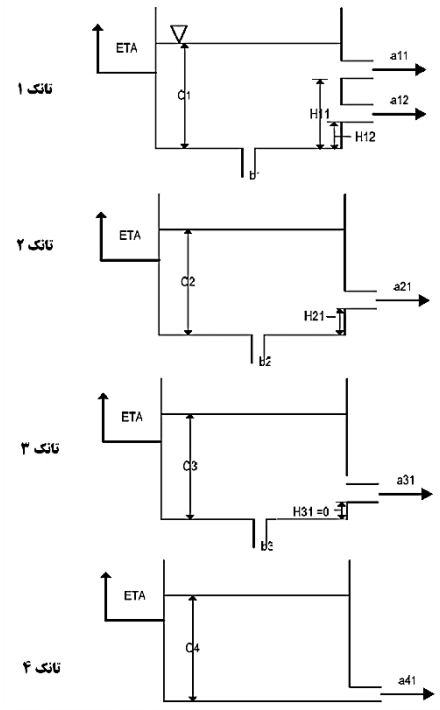
هدف از این پژوهش، واسنجی مدل بارش– رواناب تانک و SIMHYD در حوزهٔ آبخیز چهل‌چای در بازهٔ زمانی روزانه است که با استفاده از روش ریاضی الگوریتم ژنتیک و تعریف یک تابع هدف (ضریب ناش– ساتکلیف) پارامترهای دو مدل بهینه می‌شوند.

ساختار مدل هیدرولوژیکی

تانک

در این مدل داده‌های ورودی شامل داده‌های بارش، رواناب، و تبخیر و تعرق روزانه است. این مدل یکپارچه عمل می‌کند و پارامترهای آن معرّف مقادیر میانگین برای کل حوزه است. مدل هیدرولوژیکی تانک به‌کاررفته در این مطالعه شامل چهار مخزن است که به طور عمودی قرار می‌گیرند. مدل از نوع ذخیره‌ای بر اساس این فرضیه است که دبی و نفوذ تابعی است از مقدار آب ذخیره‌شده در زمین.

شکل ۱ ساختار کلی مدل استفاده‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. مدل شامل ٤ مخزن، ۵ خروجی کناری، ۳ خروجی انتهایی، و ٤ نقطه ارتفاعی خروجی کناری است. ضمناً هر مخزن معرف یک لایه از خاک است. اولین مخزن نشان‌دهندهٔ رواناب سطحی (رواناب سطحی با a11 و a12 در تانک اول نشان داده شده است)، دومین مخزن نشان‌دهندهٔ رواناب زیرسطحی، سومین مخزن نشان‌دهندهٔ جریان زیرپایه (زیرین)، و چهارمین مخزن نشان‌دهندهٔ جریان پایه است. رواناب زمانی ایجاد می‌شود که سطح آب در هر مخزن بالاتر از ارتفاع خروجی کناری قرار گیرد (H11، H12، H21، H31) [۱۱].



شکل ۱. ساختار مدل هیدرولوژیکی تانک

خروجی کناری مخزن دوم (a21) رواناب میانی است، a31 در مخزن سوم رواناب زیرپایه (زیرین)، و a41 در مخزن چهارم جریان پایه. خروجی انتهایی مخزن اول، معادلهٔ نفوذ مدل فرض شده است. خروجی‌های انتهایی مخزن‌های دوم و سوم بخش تراوش در نظر گرفته شده است. در این مدل، پارامترهای مختلفی به منظور شبیه سازی بارش– رواناب در نظر گرفته شده است که شامل ضرایب خروجی‌های کناری (a11، a12، a21، a31، a41)،

Archive of SID
www.SID.ir

ضرایب خروجی‌های انتهایی (b1، b2، b3)، و ارتفاع خروجی‌های کناری (H11، H12) است. این ضرایب نیز یکی از عوامل تعیین‌کننده در واسنجی مدل، با توجه به دادهٔ مشاهداتی هستند.

مجموع دبی در مخزن و مقادیر تبخیر و تعرق در هر مخزن به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند:

$$Q = a_{11} + a_{12} + a_{31} + a_{41} + \text{آب پایه} \quad (۱)$$

$$ETA = ETP\left(1 - \exp\left(-\alpha \sum_{x=1}^{4} C_X\right)\right) \quad (۲)$$

که در این رابطه ETA میزان تبخیر و تعرق روزانه بر حسب میلی‌متر ، ETP میزان تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه بر حسب میلی‌متر، α ضریب تبخیر و تعرق (۰,۱)، و C_X ارتفاع آب در هر مخزن است.

جدول ۱. مقادیر میانگین، انحراف معیار، و حداقل و حداکثر داده‌های ورودی در منطقهٔ مورد مطالعه

دادهٔ ورودی	واسنجی(سال آبی ۱۹۹۶-۱۹۹۲)			اعتبار سنجی (سال آبی ۲۰۰۵-۲۰۰۲)		
	بارش (میلی‌متر)	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)	بارش (میلی‌متر)	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)
متوسط سالانه	۹۷۱٫۱۳	۷۹۳٫۹۶	۳٫۰٤	۹۰۲٫۸	۷۵۵٫۱۲	۱٫۸۷
انحراف معیار سالانه	۷٫۲۳	۱٫٦٦	٤٫٤۰	٦٫۹۷	۱٫٤۸	۱٫۷۱
حداکثر روزانه	٦۱	۸٫۱٦	۳۷٫۳	۵۸	۱۲٫٤۸	۱۷٫٤۰
حداقل روزانه	۰	۰	۰٫۱۸	۰	۰	۰

نفوذ در هر مخزن نیز به صورت رابطهٔ ۳ تعریف می‌شود:

$$I_X = C_X B_X \quad (۳)$$

که I_X میزان نفوذ بر حسب میلی‌متر ، C_X سطح آب هر تانک، و B_X ضریب نفوذ هر مخزن است.

پارامترهای بخش‌های مختلف مدل تانک همراه با توصیف آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

مدل SIMHYD

یک مدل مفهومی ساده بارش- رواناب روزانه است [۵]. مدل یکپارچه عمل می‌کند و به صورت موفقیت‌آمیز در مطالعاتی همچون تخمین رواناب [۱٤]، اثر تغییر اقلیم بر مقدار رواناب [۲]، و آنالیز منطقه‌ای [٤] به کار برده شده است.

در این مدل نخست ذخیرهٔ برگابی، که روزانه به وسیلهٔ تبخیر تخلیه شده، با بارش اشباع می‌شود. سپس، مقدار بارش مازاد از ظرفیت نفوذ به رواناب سطحی تبدیل می‌شود. تمام بارندگی‌ها، که بر سطح حوزه نازل می‌شود، تا زمانی که آن جزء سطح اشباع‌نشده است، در خاک نفوذ می‌کند، بنابراین، جریان سطحی فقط از نواحی اشباع‌شده و نواحی نفوذناپذیر ایجاد می‌شود. بارش نفوذیافته به خاک، با توجه به تابع رطوبت خاک، آب را به رودخانه (جریان زیرقشری و رواناب مازاد اشباع)، مخزن آب زیرزمینی (تغذیه)، و ذخیرهٔ رطوبت خاک انتقال می‌دهد. رواناب زیرقشری نخست به عنوان یک تابع خطی از رطوبت خاک محاسبه می‌شود، سپس، تغذیهٔ

Archive of SID

www.SID.ir

آب زیرزمینی به عنوان یک تابع خطی از رطوبت خاک محاسبه می‌شود و باقی‌ماندهٔ آب به مخزن رطوبت خاک انتقال می‌یابد.

تبخیر و تعرق از مخزن رطوبت خاک به صورت تابع خطی از رطوبت خاک تخمین زده می‌شود، به صورتی که از مقدار تبخیر و تعرق کنترل‌شده اتمسفری مازاد نباشد. مخزن رطوبت خاک دارای ظرفیت محدودی است و به مخزن آب زیرزمینی انتقال می‌یابد. آب پایه از مخزن آب زیرزمینی به صورت افت خطی از مخزن تخمین زده می‌شود. بنابراین، مقدار رواناب از سه منبع ـ نفوذ مازاد از رواناب، آب زیرقشری، و آب پایه ـ تخمین زده می‌شود.

پارامترهای بخش‌های مختلف مدل همراه با توصیف آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک روشی است که، بر مبنای اصول حاکم بر تئوری انتخاب طبیعی داروین، عملکردهای انتخاب و بازتولید را بر نامزدهای حل اعمال می‌کند و بهترین را از بین آن‌ها انتخاب می‌نماید. الگوریتم ژنتیک، به عنوان یک الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی، با درنظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی، به نحو مؤثری، نواحی مختلف فضای جواب را جست‌وجو می‌کند. بر مبنای نتایج این ارزیابی‌ها، فرایند جست‌وجو به سمت پاسخ‌های بهینه هدایت می‌شود (برای مطالعهٔ بیشتر مراجعه شود به [۱۰]).

در این مطالعه، روش الگوریتم ژنتیک، برای واسنجی پارامترهای دو مدل مورد مطالعه، به‌کار رفت. پارامترهای مدل به همراه محدوده‌های بالا و پایین آن‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. مراحل روش الگوریتم ژنتیک به صورت خلاصه در زیر شرح داده می‌شود: [۲۳، ۲۵]

ـ تولید N نمونه (N=100) به طور تصادفی از فضای ممکن؛ هر نمونه شامل ٤٨ بیت رشتهٔ مضاعف برای نمایش این پارامترهاست؛

ـ رمزگشایی رشته‌ها برای مقادیر واقعی، و محاسبهٔ تناسب پارامترها با استفاده از مدل تانک؛

ـ انتخاب؛ انتخاب رقابتی؛

ـ انتقال؛ انتقال یکنواخت، در صورتی که احتمال انتقال معادل ۰٫۵ باشد؛

ـ جهش، در صورتی که احتمال جهش معادل ۰٫۰۱ باشد؛

ـ تولید زاد و ولد جدید، در صورت توافق بهترین راه حل‌های جمعیت پیشین؛

ـ رمزگشایی رشته‌ها و محاسبهٔ دوبارهٔ تناسب مدل تانک؛

ـ بررسی همگرایی، اگر معیارهای همگرایی راضی‌کننده بود، توقف می‌کند و، در غیر این صورت، به مرحلهٔ ۳ برمی‌گردد.

ارزیابی مدل

توابع هدف

توابع هدف مختلفی وجود دارد که می‌تواند برای ارزیابی دقت مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده شود. تابع هدف انتخاب‌شده به هدف مطالعه بستگی دارد. رایج‌ترین تابع هدف استفاده‌شده برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی ضریب ناش- ساتکلیف است [۱۲]، که حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاهاست و نسبت واریانس باقی‌مانده به واریانس دبی‌ها را نشان می‌دهد (رابطهٔ ٤):

Archive of SID

www.SID.ir

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2} \quad (٤)$$

که در آن Q_{sim} جریان شبیه‌سازی‌شده است، Q_{obs} جریان مشاهده‌شده، $\overline{Q_{obs}}$ میانگین جریان مشاهده‌شده، i گام‌های زمانی، و n تعداد کل گام‌های زمانی استفاده‌شده طی واسنجی. تغییرات E از ∞- تا ۱+ بوده و هر چه شبیه سازی بهتر انجام گرفته باشد، مقدار آن به یک نزدیک‌تر است.

خطای ریشهٔ میانگین مربعات (RMSE) نیز تابع تناسب یا تابع هدف است و برای ارزیابی قابلیت دو مدل بارش- رواناب مورد استفاده در این مطالعه به‌کار رفته است. این روش به عنوان معیاری از خطای مطلق بین دبی شبیه‌سازی و مشاهده‌ای است و مقادیر RMSE، برای انطباق کامل بین مقادیر دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده، به مقدار صفر تمایل دارد. RMSE به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{n}} \quad (۵)$$

مقایسهٔ دبی‌های اوج مستقل بیش از حد آستانه[1] *(IPOT)*

در روش های مرسوم گذشته، معمولاً، جریان سالانهٔ حداکثر و حداقل برای برآورد دورهٔ بازگشت استفاده می‌شد. مهم‌ترین مسئله در این رویکرد طول دورهٔ داده‌های مورد استفاده است. اگر طول دورهٔ آماری بررسی کوتاه باشد، تعداد دبی های سالانهٔ حداکثر و حداقل کمتر خواهد بود، که باعث عدم قطعیت‌های فراوانی در آنالیز مقادیر حد می‌شود. برای کاهش این عدم قطعیت‌ها، از داده‌های دبی‌های اوج مستقل بیش از حد آستانهٔ روزانه یا ساعتی می‌توان استفاده کرد [۱]. بنابراین، IPOT فقط به یک واقعه در سال محدود نمی‌شود. در واقع، مزیت اصلی آن اجازهٔ انتخاب نسبی وقایع برای بررسی آن‌هاست و، برخلاف روش‌های مرسوم گذشته، امکان کنترل تعداد وقایع جریان‌های زیاد و کم را با انتخاب متناسب سطح آستانه فراهم می‌کند [۱۸]. انتخاب وقایع مستقل برای آنالیز مقادیر حد به منظور اطمینان از توزیع آماری ناشی از وقایع مجزا بسیار مهم است، به طوری که به تجزیه و تحلیل نااریب منجر نشود. بنابراین، در این مطالعه سه معیار برای جداکردن IPOT استفاده شد [٢٤]:

۱. اختلاف نسبی حداکثر (نسبت دبی در پایان منحنی فروکش هیدروگراف به اوج هیدروگراف) دو رویداد متوالی به شرطی مستقل در نظر گرفته می‌شود که اولین رویداد قبل از رویداد بعدی به اندازهٔ کافی فروکش کرده باشد؛

۲. دورهٔ زمانی مستقل (تعداد گام‌های زمانی) باید آنچنان زیاد باشد که وقایع متوالی مستقل از هم در نظر گرفته شوند، به طوری که اگر دومین رویداد اتفاق بیفتد، رویداد قبلی تأثیری در آن نداشته باشد؛

۳. حداقل مقدار دبی طوری انتخاب شود که به اندازهٔ کافی بزرگ باشد تا دو رویداد مستقل ایجاد شود. با استفاده از این روش ٦٢ و ۵۰ رویداد دبی‌های حداکثر و دبی‌های حداقل مستقل به‌ترتیب در دورهٔ مطالعاتی انتخاب شد که نتایج آن روی نمودار انتقال باکس- کوکس[2] (BC) با ضریب λ برابر با ۰٫۲۵ نشان داده شده است.

1. Independent Peak Over Threshold
2. Box- Cox Transformation

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. مقادیر اولیه، حداکثر، حداقل، و بهینهٔ مدل تانک

	پارامتر	مقدار اولیه	محدودهٔ تغییر پارامتر	مقدار بهینه
H11	ارتفاع رواناب سطحی تانک اول (خروجی اول)	۰	۵۰۰–۰	۴۹۸٫۳۱
a11	ضریب رواناب اول سطحی تانک اول	۰٫۲	۱–۰	۰٫۴۸
a12	ضریب رواناب دوم سطحی تانک اول	۰٫۲	۱–۰	۰٫۱۱
a21	ضریب رواناب میانی دوم	۰٫۲	۱–۰	۰٫۴۵
a31	ضریب رواناب زیرپایه (زیرین) تانک سوم	۰٫۲	۱–۰	۰٫۷۲
a41	ضریب رواناب پایهٔ تانک چهارم	۰٫۲	۱–۰	۰٫۰۵
alpha	ضریب رواناب مربوط به خروجی هر تانک	۱	۴–۰	۲٫۰۷
b1	ضریب نفوذ تانک اول به تانک دوم	۰٫۲	۱–۰	۰٫۰۲۳
b2	ضریب نفوذ تانک دوم به تانک سوم	۰٫۲	۱–۰	۰٫۹۶
b3	ضریب نفوذ تانک سوم به تانک چهارم	۰٫۲	۱–۰	۰٫۰۱
H12	ارتفاع رواناب سطحی تانک اول (خروجی دوم)	۰	۳۰۰–۰	۱۵۲٫۴۱
H21	ارتفاع رواناب سطحی تانک دوم	۰	۱۰۰–۰	۷٫۱۵۶

جدول ۳. مقادیر اولیه، حداکثر، حداقل، و بهینه در مرحلهٔ واسنجی مدل SIMHYD

پارامتر	مقدار اولیه	محدودهٔ تغییر پارامتر	مقدار بهینه
ضریب جریان آب پایه	۰٫۳	۱–۰	۰٫۰۶۳
آستانهٔ نفوذناپذیری	۱	۵–۰	۱٫۷۶
ضریب نفوذ	۲۰۰	۴۰۰–۰	۲۷۱٫۳۷۲
کسر نفوذ	۳	۱۰–۰	۲٫۳۵
ضریب جریان زیرقشری	۰٫۱	۱–۰	۰
ظرفیت مخزن برگاب(mm)	۱٫۵	۵–۰	۰٫۱۳۷
ضریب تغذیه	۰٫۲	۱–۰	۰٫۴۶
ظرفیت ذخیرهٔ رطوبت خاک (mm)	۳۲۰	۵۰۰–۱	۴۰۸٫۰۲

نتایج

تخمین‌های بهینهٔ انجام‌شده با روش‌های بهینه‌سازی موضعی با انتخاب تصادفی نقاط آغاز می‌شود و نمونه‌برداری‌های تصادفی نقاط در نتایج واسنجی تأثیر می‌گذارد، به همین دلیل، در این مطالعه برای غلبه بر این مسئله، از روش‌های بهینه‌سازی فراگیر

Archive of SID

www.SID.ir

(مانند روش الگوریتم ژنتیک) استفاده شد. در این تحقیق احتمال جهش در الگوریتم ژنتیک بین ۰٫۰۱ تا ۰٫۱ انتخاب شد و بهترین میزان جهش به وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک در حین مراحل بهینه‌سازی انتخاب گردید. شایان ذکر است که تعداد اجرای دو مدل برای رسیدن به بهترین تابع هدف به ۲۵۰ اجرا محدود شد.

در جدول‌های ۲ و ۳ مقادیر اولیه، حداکثر، حداقل، و بهینهٔ پارامترهای دو مدل در حوزهٔ آبخیز چهل چای با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. تابع ضریب ناش- ساتکلیف تابع اصلی دو مدل درنظر گرفته شد. طبق جدول ۲، مقادیر بهینهٔ پارامترهای a41، b1، و b3 در مدل تانک با استفاده از الگوریتم ژنتیک (جدول ۲) نزدیک به صفر شد که نشان‌دهندهٔ حساسیت بسیار کم ضرایب رواناب پایهٔ تانک چهارم، نفوذ تانک اول به دوم، و نفوذ تانک سوم به چهارم است. همچنین، طبق جدول ۳، مقدار ضریب جریان زیرقشری واسنجی‌شده به وسیلهٔ الگوریتم ژنتیک، که برابر با صفر است، در کنترل سیستم مدل SIMHYD تأثیری ندارد.

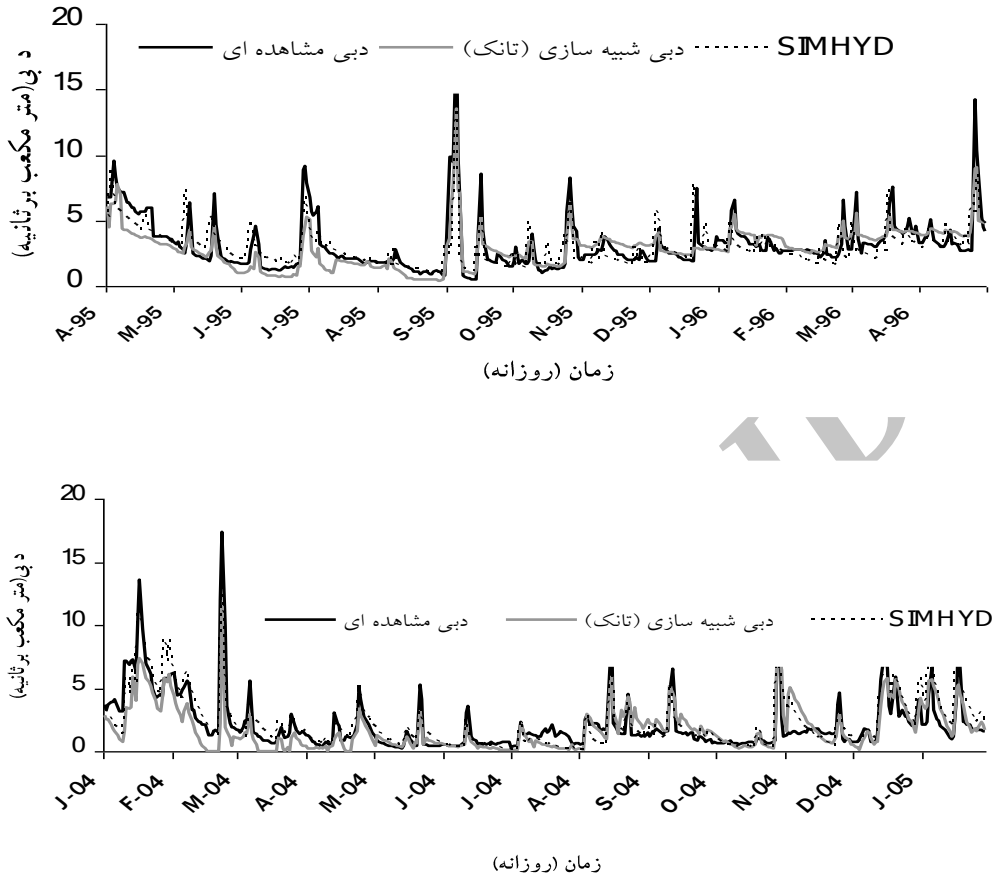
نمونه‌ای از واسنجی انجام‌شده به وسیلهٔ دو مدل در شکل ۲ ارائه شده است. مقایسهٔ گرافیکی سری زمانی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی نشان‌دهندهٔ عملکرد نسبی دو مدل در شبیه‌سازی رواناب منطقه است. مقایسهٔ نتایج هیدروگراف نمونه برای هر دو مدل در دورهٔ واسنجی نشان می‌دهد که در برخی رخدادها اگرچه مدل سعی در مدل‌سازی کل نقاط هیدروگراف دارد، تابع مورد نظر نقاط پیک را به‌خوبی شبیه‌سازی نمی‌کند (شکل ۲).

برای بررسی دقیق‌تر، دبی‌های مستقل حداکثر و حداقل مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده به صورت نمودار انتقال باکس-کاکس (شکل ۳) ارائه شد. طبق شکل ۳، هر دو مدل دبی‌های حداقل مستقل را به‌خوبی شبیه‌سازی کردند، در صورتی که مدل تانک توانایی کمی در شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر دارد. بنابراین، اگرچه، طبق شکل ۲، روند کلی مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر مشاهده‌ای تبعیت می‌کند، مدل دبی‌های حداکثر را در دورهٔ واسنجی کمتر از حد واقعی شبیه‌سازی کرده است. بنابراین، این مدل به‌خوبی قادر نیست دبی حداکثر را در منطقهٔ مورد مطالعه تخمین بزند. نتایج بهینه‌سازی پارامترهای مدل نشان داد که، با بهبود داده‌های پیک، مقدار تابع ضریب ناش- ساتکلیف ضعیف‌تر می‌شود و بالعکس. اگرچه تابع ضریب کارایی سعی در حداقل‌کردن خطای نقاط پیک داشته، در مواردی به‌خوبی عمل نکرده است و مدل جواب‌هایی با خطای پیک کم را به دست می‌آورد تا در آن نقاط مقدار تابع ضریب ناش- ساتکلیف مناسب باشد.

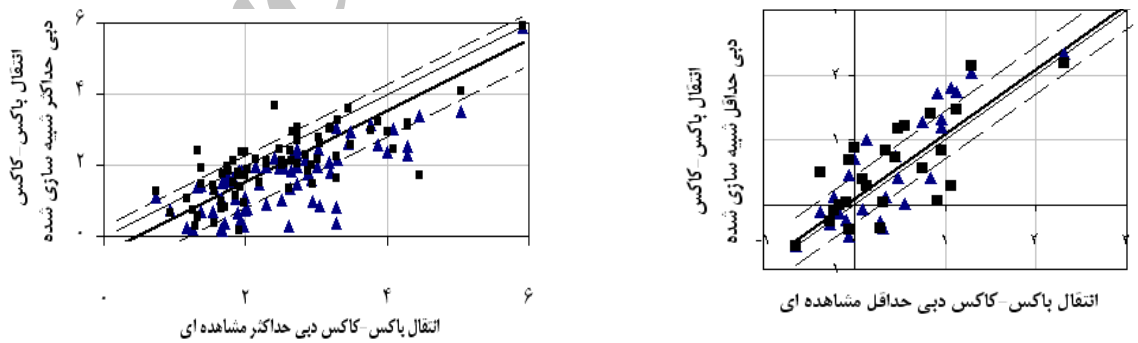
جدول ٤ وضعیت عملکرد آماری دو مدل را نشان می‌دهد. نتایج آماری نشان می‌دهد که مدل تانک در دورهٔ واسنجی با ضریب ناش- ساتکلیف ۰٫۵۹۹ و RMSE ۰٫۸۲۱ از کارایی تقریباً مناسبی در شبیه‌سازی دبی روزانه برخوردار است. بهینه‌سازی پارامترهای مدل تانک نشان داد که برای بهبود دبی پیک دو پارامتر a11 و a12 از پارامترهای بسیار حساس در منطقهٔ مورد مطالعه است که با افزایش این پارامترها دبی پیک افزایش می‌یابد. اما افزایش این دو پارامتر باعث تغییر شیب خشکیدگی هیدروگراف و کاهش دبی پایه می‌شود و، در نهایت، ضریب ناش- ساتکلیف کاهش می‌یابد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲. سری زمانی منتخب دبی شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در دورهٔ واسنجی (بالا) و در دورهٔ اعتبارسنجی (پایین)



شکل ۳. نمودار پراکنش انتقال باکس- کاکس دبی‌های حداقل مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده (سمت راست) و دبی‌های حداکثر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده (سمت چپ) با استفاده از مدل تانک (▲) و SIMHYD (■). در شکل خطوط نقطه‌چین نیم‌ساز، خطوط ممتد کم‌رنگ انحراف معیار، و خطوط ممتد پُررنگ نشان‌دهندهٔ انحراف میانگین است.

www.SID.ir

نشریه مرتع و آبخیزداری، دورهٔ ۶۶، شماره ٤، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۵۲۱ تا ۵۳۳

جدول ٤. مقایسهٔ بین دبی روزانهٔ شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی

مدل	دورهٔ واسنجی		دورهٔ اعتبارسنجی	
	تانک	SIMHYD	تانک	SIMHYD
ضریب ناش- ساتکلیف	۰٫۵۹۹	۰٫٦۰۲	۰٫۵٦٦	۰٫٦۱۷
RMSE (mm)	۰٫۸۲۱	۰٫۸۱۹	۰٫۵۲۲	۰٫٤۹۰
ضریب همبستگی	۰٫۷۸	۰٫۷۹	۰٫۷٦٤	۰٫۷۹۳

مقادیر بهینهٔ مدل تانک حاصل از واسنجی مدل برای تأیید کارایی مدل با آمار چهار سال آبی برای دورهٔ اعتبارسنجی بررسی شد. با توجه به عملکرد مدل تانک، این مدل با ضرایب کارایی ۰٫۵۹۹ و ۰٫۵٦٦ به‌ترتیب برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی توانسته است تا حدودی الگوی تغییرات رواناب حوزه را شبیه‌سازی کند. همچنین، مقادیر RMSE برابر ۰٫۸۲۱ و ۰٫۵۲۲ به‌ترتیب، برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی، توانایی نسبی مدل در شبیه‌سازی دبی‌های روزانهٔ حوزه را نشان می‌دهد. در مرحلهٔ واسنجی مدل SIMHYD برای حوزهٔ چهل‌چای ضریب ناش- ساتکلیف و RMSE برای داده‌های روزانه معادل ۰٫٦۰۲ و ۰٫۸۱۹ به‌دست آمد. همچنین، در دورهٔ اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰٫٦۱۷ و ۰٫٤۹ است. با توجه به اینکه ضریب ناش- ساتکلیف بزرگ‌تر از ۰٫٦ معیار شبیه‌سازی خوب است [۲٦]، نتایج نهایی دو مدل قابل قبول است. نتایج آماری و گرافیکی دو مدل نشان‌دهندهٔ عملکرد قابل قبول‌تر مدل SIMHYD نسبت به مدل تانک است.

بحث و نتیجه‌گیری

مدل‌های بارش- رواناب ابزارهای مهمی در پروژه‌های منابع آبی هستند. کارایی مدل‌های بارش- رواناب به انتخاب مناسب پارامترهای مدل بستگی دارد. هیدرولوژیست‌ها، به روش‌های مختلف، به بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌ها توجه دارند. برای برآورد و اطلاع از مقدار پارامترهای یک سیستم دو راه کلی وجود دارد: مستقیم؛ غیرمستقیم. در روش مستقیم مقادیر پارامترها به صورت مستقیم اندازه‌گیری می شود. اما از آنجا که امکان اندازه‌گیری همهٔ پارامترها به صورت مستقیم وجود ندارد و با توجه به عدم قطعیت و هزینهٔ زیادِ اندازه‌گیری، بعضی از پارامترها به روش غیرمستقیم برآورد می‌شوند. در روش غیرمستقیم، بر اساس مشاهدات انجام‌شده در سیستم، به خصوصیات سیستم و مقادیر پارامترها پی برده می‌شود. روش غیرمستقیم به صورت سعی و خطا یا خودکار نیز صورت‌پذیر است. از معایب روش سعی و خطا هزینهٔ زیاد و وقت‌گیربودن آن است. از دیگر معایب آن می‌توان به این نکته اشاره کرد که پارامترها در این روش توأمان بهینه نمی‌شوند. بنابراین، رویکرد تازهٔ اکثر محققان به روش غیرمستقیم خودکار است.

روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک روشِ خودکار فراگیری است که از آن در بسیاری از مطالعات مدل‌سازی بارش- رواناب استفاده می‌شود. این روش در رشته‌های تحقیقاتی دیگر نیز کاربرد موفقی داشته است. در این مطالعه، آمار نُه‌سالهٔ آبی به منظور واسنجی مدل بارش- رواناب تانک و SIMHYD با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. خودکارسازی فرایند واسنجی با استفاده از روش

Archive of SID

www.SID.ir

الگوریتم ژنتیک باعث افزایش چشمگیر در سرعت واسنجی شده است. از طرف دیگر، نتایج نشان داد که روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای واسنجی دو مدل مورد استفاده در تحقیق تا حدودی کارآمد است و توانایی نسبتاً خوبی برای دستیابی به بیشینهٔ اصلی در سطح تابع هدف دارد. باید توجه داشت که مدل تانک توانایی کمتری در شبیه‌سازی دبی پیک داشت و مقادیر کمتری را برای این دبی‌ها در دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی برآورد کرد. شاید دلیل آنْ برآورد مقدار کم مقادیر پارامترهای a11 و a12 باشد که از پارامترهای حساس در منطقهٔ مورد مطالعه بر روی دبی پیک است. با توجه به عملکرد مدل تانک با ضرایب ناش- ساتکلیف ۰٫۵۹۹ و ۰٫۵٦٦ برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی و مدل SIMHYD مقادیر ضرایب ناش- ساتکلیف برابر ۰٫٦۰۲ و ۰٫٦۱۷ به‌ترتیب برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی توانسته است تا حدودی الگوی تغییرات رواناب حوزه را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. هرچند نتایج شبیه‌سازی بارش- رواناب نشان داد که انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی فقط یکی از فاکتورهای مؤثر در کارآمدی نتایج مدل است و به این نکته باید توجه کرد که تفاوت بین دادهٔ مشاهده‌ای و پاسخ شبیه‌سازی مدل اصولاً به سه دلیل است [۱۷]:

– خطا در داده‌های ورودی هواشناسی و داده‌های ثبت‌شدهٔ جریان؛

ـ خطا در ساده‌سازی ساختار مدل؛

ـ خطا به علت استفاده نکردن از پارامترهای غیربهینه.

این سه عامل مستقل نیستند و به یکدیگر وابسته‌اند. در این مطالعه، با توجه به اینکه فقط پارامترهای مدل بهینه شده است، خطای مورد سه کاهش می‌یابد. در نتیجه، برای کاهش عدم قطعیت نتایج نهایی مدل، لازم است تا یک استراتژی واسنجی در نظر گرفته شود و فقط به بهینه‌سازی پارامترها محدود نشود و عوامل دیگر خطا نیز برای کاهش عدم قطعیت نتایج در نظر گرفته شود.

References

[1]. Boukhris, O.F. (2008). Climate change impact on hydrological extremes along rivers in Flanders, PhD thesis. K.U.Leuven. 211 pp.

[2]. Chen, R.S., Pi, L.C., Hsieh, C.C. (2005). A study on automatic calibration of parameters in Tank Model. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(2), 389-402.

[3]. Chiew, F.H., McMahon, T.A. (2002). Modelling the impacts of climate change on Australian streamflow. Hydrological Processes, 16, 1235-1245.

[4]. Chiew, F.H.S., Siriwardena, L. (2005). Estimation of SIMHYD parameter values for application in ungauged catchments, In Zerger, A. and Argent, R.M. (eds) MODSIM 2005 International Congress on modeling and simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.

[5]. Chiew, F.H.S., Peel, M.C., Western, A.W. (2002). Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD, In: Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications (Editors: V.P. Singh and D.K. Frevert), Water Resources Publication, Littleton, Colorado, USA. pp: 335-367.

[6]. Chiew, F.H.S., Zhou, S.L., McMahon, T.A. (2003). Use of seasonal streamflow forecasts in water resources management. *Journal of Hydrology*, 270, 135-144.

Archive of SID

www.SID.ir

[7]. Cooper, V.A., Nguyen, V.T.V., Nicell, A. (1997). Evaluation of global optimization methods for conceptual rainfall-runoff model calibration. *Water Science and Technology*, 36(5), 53-60.

[8]. Cooper, V.A., Nguyen, V.T.V., Nicell, A. (2007). Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints. *Journal of Hydrology* , 334(3-4), 455-466.

[9]. Dovonec, E. (2000). A physically based distributed hydrologic model, M.Sc. Thesis. The Pennsylvania State University. 209 pp.

[10]. Khazaei, M.R., Zahabiyoun, B., Saghafian, B. (2007). Automatic calibration conceptual Rainfall-Runoff model of ARENO. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 3(8), 21-28.

[11]. Kuok, K.K., Sobri, H., Mariyam, S. (2010). Global optimization methods for calibration and optimization of the hydrologic Tank model's parameters. *Canadian Journal on Civil Engineering*, 1(1), 2-14.

[12]. Nash, J.E., Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.

[13]. Paik, K., Kim, J.H., Lee, D.R. (2005). A conceptual rainfall-runoff model considering seasonal variation. *Hydrological Processes*, 19, 3837-3850.

[14]. Peel, M.C., McMahon, T.A., Finlayson, B.L., Watson, F.G.R. (2002). Implications of the relationship between catchment vegetation type and the variability of annual runoff. *Hydrological Processes*, 16, 2995-3002.

[15]. Penman, H.L. (1961). Weather, plant and soil factors in hydrology. *Weather*, 16, 207-219.

[16] Qaderi, K., Samani, J.M.V., Eslami, H.R., Saghafian, B. (2006). Autocalibration of a Rainfall-Runoff model based on SCE method. *Iranian Water Resources Research*, 2(2), 39-52.

[17]. Refsgaard, J.C., Storm, B. (1996). Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Abbott, M. B., J.C. Refsgaard, (Eds.), Distributed Hydrological Modelling. Kluwer Academic, pp: 41-54.

[18]. Sarhadi, A., Soltani, S., Modarres, R. (2008). Application of peak over threshold model for seasonal low flow variation analysis (Case Study: Halilroud River). *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 12 (46), 337-347.

[19]. Setiawan, B.T., Fuknda, T., Nakano, Y. (2003). Developing procedures for optimization of Tank models parameters. *The CIGR Journal of Scientific Research and Development*,5, 1-13.

[20]. Sharifi, F., Safapoor, Sh., Ayobzadeh, A. (2002). Evaluation of camputer_based AWBM 2002 model in simulation of hydrological process in some watersheds in Iran. *Journal of Research and Making*, 17(35), 35-42.

[21]. Sugawara, M., Funiyuki, M. (1965). A method of revision of the river discharge by means of a rainfall model. Collection of research papers about forecasting hydrologic variables, 14-18.

[22]. Teemu, S., Jakeman, J. (2001). A comparison of metric and conceptual approaches in rainfall-runoff modeling and its implications. *Water Resources Research*, 37(9), 2345-2352.

[23]. Wang, Y.C., Han, D., Yu, P.S., Cluckie, I.D. (2006). Comparative modeling of two catchments in Taiwan and England. *Hydrological Processes*, 20, 4335-4339.

[24]. Willems, P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modeling Software*, 24(3), 311-321.

[25]. Yu, P.S., Wang, Y.C., Yang, T.C., Kuo, C.C. (2006). Optimal use of paddy fields for flood mitigation. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(2), 375-386.

[26]. Zhang, G.P., Savenije, H.H.G. (2005). Rainfall-runoff modeling in a catchment with a complex groundwater flow system: application of the Representative Elementary Watershed (REW) approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(3), 243-261.

Archive of SID

www.SID.ir