نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و ششم / شماره دوم / تابستان ۱۴۰۱/ مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۲۶۳ تا ۲۸۱

ارزیابی کارایی پنج مدل بیلان آبی در شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز گرگانرود

فاطمه دایی‌چینی، مهدی وفاخواه*، وحید موسوی و مصطفی ذبیحی‌سیلابی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۱۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۱۲)

چکیده

رواناب سطحی یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه آب است که باعث افزایش فرسایش خاک و انتقال رسوب در رودخانه‌ها و همچنین کاهش کیفیت آب رودخانه‌ها است. بنابراین، پیش‌بینی دقیق پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌ها یکی از مراحل مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت منطقه‌ای است. در این راستا، مدل‌سازی بارندگی- رواناب به پژوهشگران هیدرولوژی به‌ویژه در زمینه علوم مهندسی آب کمک می‌کند. بدین منظور، مطالعه حاضر به‌منظور تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی بارندگی- رواناب در حوزه آبخیز گرگانرود واقع در شمال شرقی ایران با استفاده از مدل های AWBM، Sacramento، SimHyd، SMAR و Tank انجام شد. از بارندگی، تبخیر و تعرق و رواناب روزانه هفت ایستگاه هیدرومتری در دوره ۲۰۱۰-۱۹۷۰ و ۲۰۱۵-۲۰۱۱ به‌ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد. فرایند واسنجی خودکار با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی تکاملی ژنتیک و روش‌های SCE-UA، با استفاده از معیارهای ارزیابی ضرایب ناش- ساتکلیف (NSE) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد. نتایج نشان داد که در دوره اعتبارسنجی مدل SimHyd با ضریب ناش ۰/۶۶، مدل TANK با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش SCE-UA با ضریب ناش به‌ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۶۶ و مدل Sacramento با روش الگوریتم ژنتیک و روش SCE-UA با ضریب ناش به‌ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۵۵ بهترین عملکرد را دارند.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، الگوریتم ژنتیک، بسته نرم‌افزاری RRL، مدل بارش- رواناب، مدل‌های هیدرولوژیکی

۱. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: vafakhah@modares.ac.ir

مقدمه

محیط‌زیست و منابع آبی در سرتاسر جهان هیچ‌گاه به اندازه عصر حاضر مورد تهدید قرار نگرفته‌اند. از همین‌رو افزایش خطر احتمالی سیلاب و کاهش چشمگیر در تنوع زیستی در اثر تخریب و توسعه در بوم‌سازگان‌های رودخانه‌ای، همه از این موارد هستند. از سوی دیگر، با توجه به محدودیت منابع آب شیرین قابل استحصال، پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر دبی جریان و تغییرات آن در طول سال از ارکان اساسی برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب‌های سطحی است (۱۶ و ۱۷). همچنین، با توجه به افزایش جمعیت و گسترش فعالیت‌های اقتصادی در دشت‌های سیلابی و حاشیه رودخانه‌های اصلی، اهمیت مطالعات در مورد فرایندهای بارش- رواناب و حجم آب به‌دست آمده و فراوانی طغیان‌های رودخانه‌ای نیز افزایش می‌یابد (۴). در همین ارتباط کشف و شناسایی پاسخ‌های مناسب برای تهدیدات مذکور در عصر حاضر، به‌طور عمده بر عهده متخصصان هیدرولوژیک از طریق مطالعه و بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی امکان‌پذیر است (۷). یکی از پیچیده‌ترین فرایندهای هیدرولوژیکی فرایندهای بارش- رواناب است که از پارامترهای مختلف فیزیکی و هیدرولوژیکی تأثیر می‌پذیرد. بنابراین، درک و پیش‌بینی فرایندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوزه آبخیز یکی از اساسی‌ترین مباحث علم هیدرولوژی است (۲۲). از همین‌رو شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب و پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز و درک درست از مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی می‌تواند برای برنامه‌های مختلف در مهندسی و مدیریت منابع آب، از جمله برآورد و پیش‌بینی سیل، پیش‌بینی بلندمدت جریان کمینه، تشخیص روند و طراحی و مدیریت مخازن استفاده شود (۱۳، ۱۴ و ۱۷). از آن جا که در کشور ایران در اغلب حوزه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی عکس‌العمل حوضه میسر نیست، در نتیجه انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی مورد نیاز، پیش‌بینی با دقت قابل قبولی را ارائه کند امری ضروری به نظر می‌رسد (۵ و ۲۶). با این حال با توجه به دامنه وسیع مدل‌های مذکور، بررسی کارایی مدل‌های مختلف برای اهداف مختلف مدیریتی ضروری است. بنابراین، مدل‌هایی که با توجه به نقص و کمبود آمارطولانی‌مدت و دقیق بتوانند نتایج قابل قبولی ارائه دهند، می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد درخدمت مدیرحوزه آبخیز باشند (۶). از همین‌رو در پژوهش حاضر از بسته نرم‌افزار (Rainfall Runoff Library, RRL) برای شبیه‌سازی بارش و رواناب استفاده شده است. بسته نرم‌افزاری مذکور توسط مؤسسه (Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, CRCCH) در استرالیا طراحی شده است و شامل مجموعه‌ای از مدل‌های یکپارچه و مفهومی مانند (Australian Water Balance Model,AWBM)، (Sacramento)، (Simple Hydrology, SimHyd)، Soil Moisture SMAR) (Accounting and Routing, و (Tank) که تنها از سه ورودی بارش، تبخیر و تعرق و دبی روزانه برای شبیه‌سازی رواناب خروجی استفاده می‌کند (۲۹). پژوهش‌های مختلفی در ارتباط با شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف صورت گرفته است. در همین راستا چوهان و همکاران (۲) با شبیه‌سازی رواناب با مدل AWBM در حوضه رودخانه Shipra در Madhya Pradesh هند نشان دادند که ضریب تعیین برای واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۶۵۶ و ۰/۴۹۶ مشاهده شد که نشان‌دهنده توافق خوب بین رواناب مشاهده شده و شبیه سازی شده و کارآیی ناش- ساتکلیف برای واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۶۵/۴۰ و ۴۸/۴۰ است. سانگ و همکاران (۲۷) به ارزیابی کارایی سه مدل Sacramento، SMAR و Tank در شبیه‌سازی بارش رواناب حوزه آبخیز Bass استرالیا پرداختند. نتایج نشان داد ضریب ناش- ساتکلیف برای هر سه مدل مورد بررسی بیش از ۸۰ درصد بوده، در صورتی که فقط مدل Sacramento با RE برابر ۱۰ درصد در هر دو دوره

کالیبراسیون و اعتبارسنجی، عملکرد مناسبی از بین سه مدل مورد بررسی داشت. در پژوهشی دیگر جیزوال و بهارتی (۷) به ارزیابی کارایی سه مدل Tank، AWBM و SWAT در شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز Tandula در هند پرداختند. نتایج ایشان نشان داد مدل Tank مناسب‌ترین کارایی را از بین مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز مذکور دارد. موبیالیو و همکاران (۱۵) در پژوهشی به ارزیابی ظرفیت مدل‌های AWBM، Sacramento، Tank، IHACRES, (Identifcation of Unit Hydrographs and Component Flows from Rainfall, Evaporation and Stream-fow dat)، SimHyd، SMAR و Hydrological Model HMSV) (Focusing on Sub-Flows' Variation, در بازسازی وقایع تاریخی از طریق مقایسه دامنه- مدت- فرکانس (Amplitude–Duration–Frequency, ADF) یا منحنی‌های ساخته شده بر اساس مقادیر مشاهده شده و مدل‌سازی‌شده در رودخانه Malaba در کنیا پرداختند. نتایج نشان داد منحنی ADF برای هر دو جریان بیشینه و کمینه برای دوره بازگشت‌های ۵ تا ۱۰۰ سال توسط AWBM، Sacramento، Tank و HMSV به خوبی تولید شد. درصورتی که عملکرد مدل‌های SimHyd و SMAR برای جریان‌های بیشینه و کمینه ضعیف ارزیابی شد. در مطالعه‌ای دیگر تریودی و همکاران (۲۸) به شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز Shipra کشور هند با استفاده از مدل AWBM پرداختند. نتایج نشان داد کارایی مدل مذکور برای دوره واسنجی ۸۲/۳۰ و برای دوره اعتبارسنجی ۶۴/۵۷ است. لی (۱۱) نیز در پژوهشی به ارزیابی کارایی دو مدل AWBM و Tanh در حوزه آبخیز Tullaroop در مرکز ویکتوریا پرداختند. نتایج نشان داد که مدل AWBM نسبت به مدل Tanh کارایی بهتری در شبیه‌سازی رواناب سالانه دارد. در پژوهشی دیگر خیرفام و همکاران (۹) در تخمین دبی روزانه با استفاده از مدل IHACRES در برخی از حوزه‌های آبخیز استان گلستان به این نتیجه رسیدند که توانایی مدل مذکور در برآورد مقادیر بیشینه دبی روزانه تا حدی مناسب، ولی در اکثر حوضه‌ها، نتایج برآورد مقادیر دبی با فراوانی بیش از ۶۰ درصد، ضعیف بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها و در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی، مقادیر برآوردی مدل به‌ویژه در مقادیر دبی اوج کمتر از مقادیر مشاهداتی بود. درمجموع نتایج مدل در تعدادی از زیرآبخیزهای مورد مطالعه با ضریب تعیین و کارآیی حداکثر به‌ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۷۰ به‌نسبت قابل قبول ارزیابی شد. رستمی‌خلج و همکاران (۲۰)، به بررسی مقایسه‌ای کارایی مدل‌های بارش رواناب AWBM، Sacramento، SimHyd، SMAR و Tank در حوزه آبخیز نوده در استان گلستان پرداختند. نتایج نشان داد مدل AWBM با ضریب ناش ۰/۷۱ برای واسنجی و ۰/۶۳ برای دوره ارزیابی بهترین کارایی و مدل SMAR با ضریب ناش ۰/۴۱۷ و ۰/۳۳۸ به‌ترتیب برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی پایین‌ترین کارایی را داشته است. همچنین، نتایج نشان داد مدل‌های بررسی‌شده توانایی شبیه‌سازی مقادیر کمینه و بیشینه را نداشته‌اند اما مقادیر متوسط را به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی کردند. در پژوهشی دیگر محمدی‌وند و همکاران (۱۳) به ارزیابی عملکرد مدل های AWBM، Sacramento و SimHyd در شبیه‌سازی رواناب آبخیز امامه با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) پرداختند. نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل SimHyd نسبت به دو مدل دیگر با کاربرد بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک و انطباق گرافیکی خوب با مقادیر مشاهداتی است. همچنین مدل‌های AWBM و Sacramento نیز نتایج آماری و گرافیکی رضایت‌بخش و مطلوب در حوضه منتخب داشته و کارایی خوب بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک را مورد تأکید قرار می‌دهند. یونسی و همکاران (۲۹) به شبیه‌سازی بارش رواناب با استفاده از ابزار RRL در ایستگاه رحیم آباد- دشت سیلاخور پرداختند. نتایج ایشان نشان داد مدل‌های SimHyd و Tank به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین کارایی برای شبیه‌سازی بارش رواناب در آبخیز مربوطه هستند. بررسی پیشینه پژوهش ضمن گزارش پژوهش‌های متعدد در مناطق مختلف و روش‌های گوناگون در

ارتباط با شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی، بر ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف به‌منظور ارائه مدلی کارا در شبیه‌سازی بارش- رواناب در مناطق مختلف و با هدف ارائه برنامه مدیریتی مناسب و متناسب در خصوص مدیریت منابع آب تأکید داشته‌اند. حوزه آبخیز گرگانرود با دارا بودن زمین‌های حاصل‌خیز قابل توجه، و از آنجایی که رودخانه گرگانرود تأمین‌کننده آب مورد استفاده برای آبیاری، دامداری و کشاورزی در طول مسیر خود بوده و وجود دو نوع اکوسیستم کاملاً متفاوت کوهستانی و دشتی، وجود سه سد (بوستان، گلستان و وشمگیر) در طول مسیر آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌ویژه آنکه محل مناسب تخم‌ریزی انواع ماهیان خاویاری مهاجر بالاخص تاس‌ماهیان در سالیان نه‌چندان دور بوده است. سرعت جریان و دبی زیاد همراه با طغیان آب رودخانه گرگانرود در ماه‌های پرآب سال منجر به گل آلودگی شدید می‌شود. وسعت و اهمیت این رودخانه سبب شد پژوهش حاضر به ارزیابی کارایی مدل‌های AWBM، Sacramento، Tank، SimHyd و SMAR با هدف انتخاب مدلی کارا در شبیه‌سازی بارش و رواناب حوزه آبخیز گرگانرود بپردازد. در حوزه آبخیز مذکور در محدوده زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ تعداد هشت سیلاب مخرب رخ داده است که آخرین مورد نیز (۲۶ اسفند ۱۳۹۷) تقریباً بی‌سابقه بوده است که خسارات جبران ناپذیری را در استان گلستان به بار آورده است (۱۹). بر همین اساس ارائه مدلی مناسب و کارا به‌منظور شبیه‌سازی بارش و رواناب در حوزه آبخیز گرگانرود و سایر حوزه‌های آبخیز مشابه از اهمیت بسزایی برخوردار است.

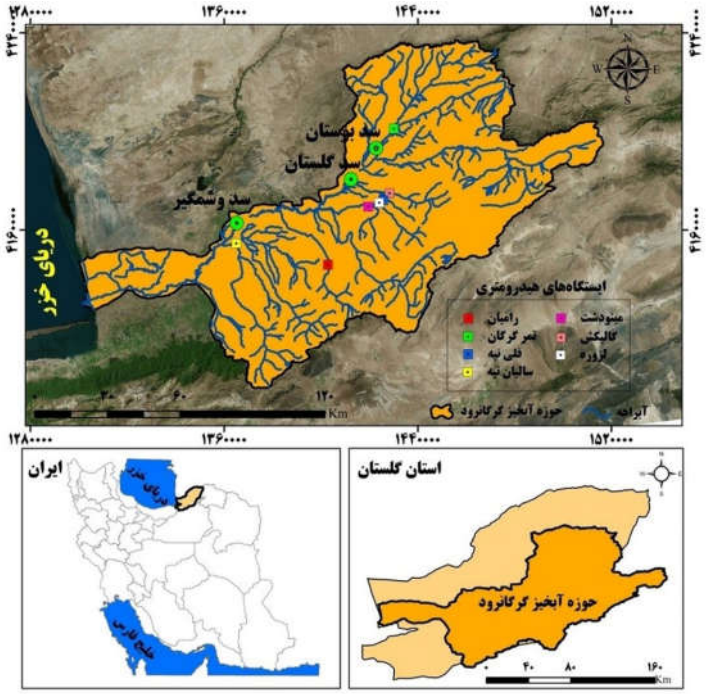
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز گرگانرود از نظر موقعیت جغرافیایی، در شمال شرقی ایران و بین عرض‌های جغرافیایی ′۳۳ °۳۶ تا ′۴۵ °۳۷ شمالی و طول‌های جغرافیایی ′۱۳ °۴۵ تا ′۰۳ °۵۴ شرقی در استان گلستان واقع شده است. مساحت حوضه ۱۱۳۸۰ کیلومتر مربع، معادل ۴۸ درصد سطح استان گلستان است (۱۸). براساس روش دومارتن، اقلیم حوضه از نیمه‌خشک در شرق تا مرطوب در بخش‌های غربی متغیر است و میانگین بارندگی در این حوضه از ۲۸۷ میلی‌متر در تیل‌آباد تا ۹۵۳ میلی‌متر در پس‌پشته متغیر است. کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل کاربری اصلی حوضه هستند. وقوع بارش‌های شدید به‌همراه تشکیلات زمین‌شناسی حساس و تغییر شدید کاربری اراضی از جنگل به اراضی دیم، سبب فراهم آمدن پتانسیل لازم برای ایجاد سیل است (۱۰). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان گلستان و ایران و همچنین موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری را نمایش می‌دهد و جدول ۱ موقعیت و مشخصات ایستگاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

روش پژوهش

در پژوهش حاضر آمار بارندگی، تبخیر و تعرق و دبی روزانه از شرکت تحقیقات منابع آب ایران (تماب)، شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان و سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. ابتدا موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Google Earth تعیین شد و سپس ایستگاه‌های هیدرومتری دارای آمار کامل انتخاب شدند. برای مقایسه بهتر کارایی مدل‌های مورد مطالعه در تمامی مدل‌ها دوره واسنجی از (۲۰۱۰-۱۹۷۰) و دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۵-۲۰۱۱) در نظر گرفته شد. از آنجایی که در بسته نرم‌افزاری RRL هشت نوع بهینه‌ساز برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها وجود دارد از بین این هشت بهینه‌ساز، آن‌هایی که بهترین عملکرد را در بین سایر بهینه‌سازها دارند با توجه به شاخص‌های ارزیابی موجود در بسته نرم‌افزاری RRL (جدول ۲) برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شدند.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و سدهای مورد مطالعه در استان گلستان

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه شده در استان گلستان

نام رودخانه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	ارتفاع (متر)	سال ساخت
گرگانرود	تمرگرگان	۵۵° ۳۰′ ۲۱″	۳۷° ۲۹′ ۱۱″	۱۵۲۴	۱۳۲	۱۳۴۸
قره‌چای	رامیان	۵۵° ۰۸′ ۱۱″	۳۷° ۰۱′ ۲۵″	۲۵۰	۲۰۰	۱۳۴۴
قره‌سو	سالیان‌تپه	۵۴° ۴۳′ ۳۹″	۳۷° ۰۸′ ۰۸″	۱۷۲۰	۲۰	۱۳۵۳
چهل‌چای	مینودشت	۵۵° ۲۱′ ۰۰″	۳۷° ۱۳′ ۰۰″	۱۵۷۶	۱۵۵	۱۳۵۷
قلی‌تپه	قلی‌تپه	۵۵° ۲۵′ ۲۰″	۳۷° ۱۴′ ۰۰″	۵۶/۵	۲۵۰	۱۳۴۵
اوغان	گالیکش	۵۵° ۲۷′ ۱۳″	۳۷° ۱۵′ ۲۲″	۴۰۴	۲۵۰	۱۳۴۴
چهل‌چای	لزوره	۵۵° ۲۴′ ۰۸″	۳۷° ۱۳′ ۳۵″	۲۷۲	۱۹۰	۱۳۴۴

ساختار مدل‌های هیدرولوژیکی

مدل AWBM

یک مدل بارش- رواناب است که در سال ۱۹۹۳ توسط بوتون معرفی شد و یک مدل بیلان آب حوضه‌ای است که می‌تواند رواناب ناشی از یک بارندگی را با استفاده از داده‌های روزانه و یا ساعتی و با محاسبه تلفات بارش به‌منظور رسم هیدروگراف سیلاب، محاسبه نماید. مدل AWBM برای شبیه‌سازی بخش‌های رواناب از سه ذخیره سطحی (C_1، C_2 و C_3) با مساحت‌های (A_1، A_2 و A_3) استفاده می‌نماید. بیلان آب برای هر یک از این سه جزء به‌طور مستقل محاسبه می‌شود. مدل برای هر بخش از رواناب بیلان رطوبتی را محاسبه و در هر گام زمانی بارندگی را به هرکدام از سه ذخیره سطحی اضافه و تبخیر و تعرق را از آنها کم می‌کند. معادله بیلان آب که در هرکدام از ذخیره‌های سطحی مورد استفاده قرار

جدول ۲. پارامترهای مختلف بسته نرم‌افزاری RRL (۲۹)

مدل	پارامتر
AWBM	A1 و A2 (ذخیره سطحی اول و دوم)
	BFI (شاخص جریان پایه)
	C1، C2 و C3 (ظرفیت نگه‌داشت سطحی اول، دوم و سوم)
	KBase (ضریب بازگشت جریان پایه روزانه)
	KSurf (ضریب بازگشت جریان سطحی روزانه)
Sacramento	Adimp (بخش اضافی PCTIM که توسعه‌دهنده منطقه نفوذناپذیرتحت شرایط اشباع خاک است)
	Lzfpm (حداکثر آب مازاد اولیه منطقه پایینی)
	Lzfsm (حداکثر آب مازاد آزاد منطقه پایینی)
	Lzpk (نسبتی از آب در LZFPM که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود)
	Lzsk (نسبتی از آب در LZFSM که به‌عنوان جریان پایه روزانه تخلیه می‌شود)
	Lztwm (حداکثر کشش آب منطقه پایینی)
	Pctim (بخش نفوذناپذیر حوضه که به تولید رواناب مستقیم منجر می‌شود)
	Pfree (حداقل سهم نفوذ آب از منطقه بالایی به منطقه پایینی برای تغذیه مخزن‌های آب آزاد منطقه)
	Rexp (توان تعیین‌کننده نرخ تغییرات نفوذ با تغییر ذخیره‌سازی آب منطقه پایینی)
	Rserv (کسری از آب آزاد منطقه پایینی که برای نفوذ موجود است)
	Sarva (کسری که به‌طور معمول توسط آبراهه‌ها، دریاچه‌ها و پوشش‌گیاهی پوشیده شده است)
	Side (کسری از جریان پایه مشاهده‌شده‌ای، که حوضه را به‌عنوان جریان آب‌های زیرزمینی ترک می‌کند)
	Ssout (حجم جریانی که می‌تواند توسط مواد متخلخل در بستر جریان منتقل شود)
	Uzfwm (حداکثر آب آزاد منطقه فوقانی)
	Uzk (نسبتی از آب در UZFWM که به‌عنوان جریان زیر قشری روزانه تخلیه می‌شود)
	Uztwm (حداکثر کشش آب منطقه بالایی)
	Zperc (فاکتوری که به‌منظور تعریف حداکثر نرخ نفوذ به‌کار می‌رود)
SimHyd	ضریب جریان پایه
	آستانه نفوذناپذیری
	ضریب نفوذ
	کسر نفوذ
	ضریب جریان زیر قشری
	کسر پیشین
	ظرفیت مخزن برگاب (mm)
	ضریب تغذیه
	ظرفیت ذخیره رطوبت خاک (mm)

ادامه جدول ۲

مدل	پارامتر
SMAR	میزان تبخیر آب زیرزمینی
	ضریب رواناب آب زیرزمینی
	نسبت رواناب مستقیم
	ضریب ذخیره‌سازی
	مسیریابی خطی U.H
	مسیریابی خطی U.H N*K=NK
	ظرفیت ذخیره برگابی
	میزان نفوذ
	عمق ذخیره‌سازی رطوبت خاک
Tank	H11 (ارتفاع رواناب سطحی تانک اول (خروجی اول))
	a11 (ضریب رواناب اول سطحی تانک اول)
	a12 (ضریب رواناب دوم سطحی تانک اول)
	a21 (ضریب رواناب میانی دوم)
	a31 (ضریب رواناب زیر پایه (زیرین) تانک سوم)
	a41 (ضریب رواناب پایه تانک چهارم)
	Alpha (ضریب رواناب مربوط به خروجی هر تانک)
	b1 (ضریب نفوذ تانک اول به تانک دوم)
	b2 (ضریب نفوذ تانک دوم به تانک سوم)
	b3 (ضریب نفوذ تانک سوم به تانک چهارم)
	C1، C2، C3 و C4 (سطح آب مخزن به ترتیب در تانک اول، دوم، سوم و چهارم)
	H12،H21،H31 و H41 (ارتفاع رواناب سطحی به ترتیب در تانک اول (خروجی دوم)، دوم، سوم و چهارم)

می‌گیرد به‌صورت رابطه (۱) است (۲۴ و ۲۹).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Z(X_i) - (Z^*(X_i)\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Z(X_i) - \overline{z}\right)^2} \quad (۱)$$

مدل Sacramento

مدل Sacramento مدل پیوسته مفهومی و غیر توزیعی بارش- رواناب است که برای پیش‌بینی سیلاب در ایالت متحده توسعه پیدا کرده است. این مدل یکی از مدل‌هایی است که برای تبدیل ورودی بارش به خروجی جریان آبراهه‌ای از بارندگی و تبخیر ثبت شده استفاده می‌کند. این مدل شانزده پارامتر مخلف دارد که پنج پارامتر مشخص‌کننده اندازه رطوبت ذخیره شده در خاک، سه پارامتر محاسبه‌کننده میزان جریان جانبی، سه پارامتر محاسبه کننده میزان نفوذ آب از لایه‌های بالایی به لایه پایینی ذخیره، دو پارامتر محاسبه کننده رواناب مستقیم است و سه پارامتر تلفات سیستم را محاسبه می‌کنند (۲۳).

مدل SimHyd

یک مدل یکپارچه و مفهومی بارش- رواناب با گام زمانی

روزانه است که دبی روزانه و ماهانه را از سری زمانی داده های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه شبیه‌سازی می کند. SimHyd نسخه ساده شده مدل‌های مفهومی بارش- رواناب توسعه داده شد HYDROLOG که در سال ۱۹۷۲ توسط پورتر و همچنین مدل MODHYDROLOG که در سال ۱۹۹۱ توسط چیو می‌باشد و توسط مرکز تحقیقات هیدرولوژی حوضه آبریز استرالیا ارائه شده است. پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی مدل زیاد نیستند و شامل هفت پارامتر ضریب جریان پایه، آستانه نفوذناپذیری، ضریب نفوذ، شکل نفوذ، ضریب جریان میانی، نسبت نفوذپذیری، ظرفیت ذخیره برگاب بارش، ضریب ذخیره و ظرفیت ذخیره رطوبتی خاک است (۱۳).

مدل SMAR

مدل SMAR نیز یک مدل مفهومی است که از تعدادی معادله تجربی و فرضیات حاکم بر آن استفاده می کند که حداقل از لحاظ فیزیکی قابل قبول باشد. این مدل از دو مدول تشکیل شده است. مدول تعادل غیر خطی آب مثل مقادیر رطوبت که از روابط پیوستگی قابل قبولی تشکیل شده است و مدول روندیابی که اثربخشی حوضه را با استفاده از روندیابی اجزای مختلف رواناب حاصل را در فواصل زمانی مختلف شبیه‌سازی می‌کند (۲۹).

مدل Tank

مدل Tank یک مدل مفهومی یکپارچه است که از چهار مخزن که در زیر سطح زمین قرار دارند تشکیل شده است. در هر مخزن یک روزنه وجود دارد که رواناب مازاد از هر مخزن از این روزنه خارج شده و مجموع این رواناب‌های مازاد از هر مخزن رواناب خروجی را شبیه‌سازی می‌کند (۲۰). جدول ۲ پارامترهای مختلف مدل‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

معیارهای آماری در ارزیابی

در این پژوهش به‌منظور مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، از دو معیار ضریب ناش- ساتکلیف و ضریب مجذور میانگین مربع خطا (Root Mean Square Error, RMSE) بر اساس روابط ۲ و ۳ استفاده شده است. ضریب NSE، ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. در این مطالعه جهت ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی در دوره آماری انتخابی از این ضریب استفاده شده است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز یک تابع تناسب یا تابع هدف است و در واقع مجذور شاخص میانگین مربعات خطاست. این شاخص به‌عنوان معیاری از خطای مطلق دبی شبیه‌سازی و مشاهده‌ای است. مقدار این شاخص آماری بین صفر تا بی‌نهایت متغیر است. هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد شبیه‌سازی بهتری صورت گرفته است و مقدار بهینه آن صفر است.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Z(X_i) - (Z^*(X_i)\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Z(X_i) - \bar{z}\right)^2} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}(Z^*(X_i) - Z(X_i))^2} \quad (۳)$$

که در آن، $Z^*(X_i)$ مقدار برآورده شده متغیر موردنظر، $Z(X_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر موردنظر و n تعداد نقاط هستند (۲۳ و ۲۴). محدوده عملکرد و ارزیابی شاخص ناش- ساتکلیف ($0.75<NSE\leq1$) با نتیجه ارزیابی بسیار خوب، ($0.65<NSE\leq0.75$) با نتیجه ارزیابی خوب، ($0.5<NSE\leq0.65$) با نتیجه ارزیابی رضایت‌بخش و ($NSE\leq0.5$) با نتیجه ارزیابی غیر قابل قبول شبیه‌سازی صورت گرفته است (۲۴).

نتایج

برای شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز گرگانرود با استفاده از مدل‌های مفهومی و یکپارچه، بهترین دوره واسنجی و اعتبارسنجی برای به حداقل‌رساندن خطای شبیه‌سازی انتخاب

جدول ۳. نتایج واسنجی مدل‌ها در حوضه مورد مطالعه

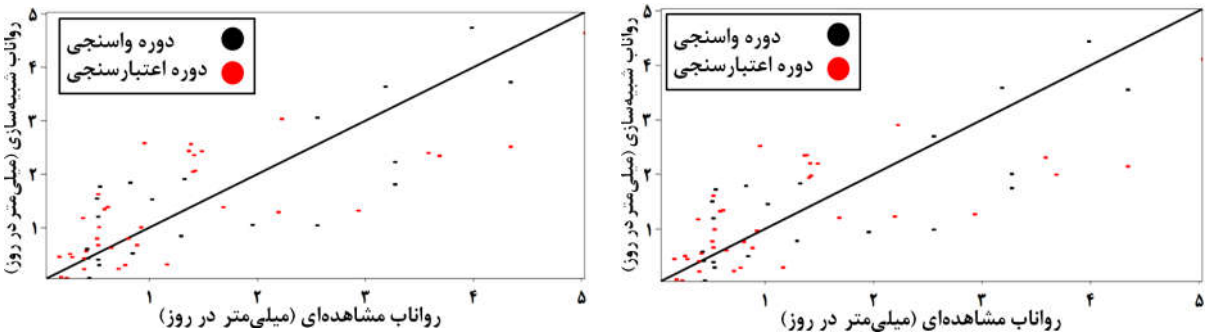
معیار	AWBM	Sacramento	SimHyd	SMAR	Tank
الگوریتم ژنتیک					
ضریب نش-ساتکلیف	۰/۲۳	۰/۶۱	۰/۶۳	۰/۷۷	۰/۷۹
ریشه دوم میانگین مربع خطا	۰/۲۲	۰/۶۰	۰/۶۱	۰/۷۰	۰/۷۸
SCE-UA					
ضریب نش-ساتکلیف	۰/۳۳	۰/۶۲	۰/۸۲	۰/۵۸	۰/۷۹
ریشه دوم میانگین مربع خطا	۰/۳۰	۰/۶۱	۰/۴۴	۰/۶۵	۰/۸۰

جدول ۴. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها در حوضه مورد مطالعه

معیار	AWBM	Sacramento	SimHyd	SMAR	Tank
الگوریتم ژنتیک					
ضریب نش-ساتکلیف	-۱/۰۷	۰/۵۲	۰/۴۸	-۱/۱۲	۰/۶۷
ریشه دوم میانگین مربع خطا	-۰/۷۴	۰/۵۰	۰/۵۹	-۰/۸۴	۰/۶۸
SCE-UA					
ضریب نش-ساتکلیف	-۱/۱۲	۰/۵۵	۰/۶۶	-۰/۰۸	۰/۶۶
ریشه دوم میانگین مربع خطا	-۱	۰/۵۴	۰/۶۱	-۰/۰۶	۰/۶۸

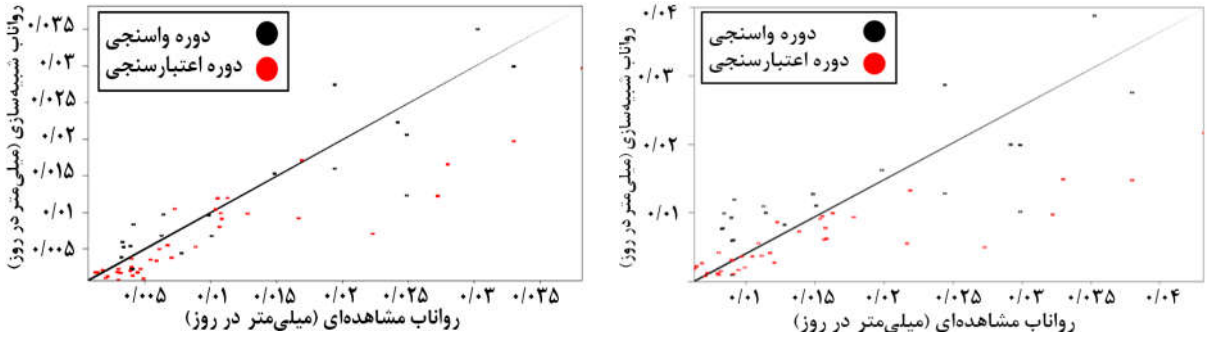
شدند. این انتخاب برای مدل‌ها براساس بالاترین ضریب ناش بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی صورت گرفت. نتایج ارزیابی مدل‌های AWBM، Sacramento، SimHyd، SMAR و Tank در مرحله واسنجی با در نظر گرفتن دو شاخص آماری ضریب ناش- ساتکلیف (NSE) و ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) با دو روش الگوریتم ژنتیک و SCE-UA (Shuffled Complex Evolution) در جدول ۳ نشان داد که مقادیر ضریب ناش در مدل‌های Sacramento، SimHyd، SMAR و Tank در دوره واسنجی خیلی خوب بودند (بیشتر از ۰/۶۰) و فقط در مدل AWBM با توجه به ضریب ناش در روش الگوریتم ژنتیک با مقدار ۰/۲۳ و در روش SCE-UA با مقدار ۰/۳۳ در دوره واسنجی دارای پایین‌ترین کارایی در بین مدل‌ها بوده است. همچنین مجذور ریشه دوم مربعات خطا در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به‌غیر از مدل‌های AWBM و SMAR در دوره اعتبارسنجی دارای نتایج خوب و قابل قبولی است. نتایج واسنجی به‌غیر از مدل AWBM نشان می‌دهند که مجموعه پارامترهای بهینه‌شده می‌توانند روابط بارش- رواناب را به طرز مناسبی شبیه‌سازی نمایند.

در مرحله اعتبارسنجی، به‌منظور بررسی عملکرد مدل، اعتبارسنجی در دوره آماری ۵ سال (۲۰۱۵-۲۰۱۱) اجرا شد. در این مرحله با استفاده از مقادیر پارامترهای مدل در مرحله واسنجی، اعتبارسنجی به دو روش الگوریتم ژنتیک و SCE-UA انجام شد. نتایج به‌دست آمده از معیارهای ارزیابی ناش- ساتکلیف برای مرحله اعتبارسنجی مدل‌های AWBM، Sacramento، SimHyd، SMAR و Tank در جدول ۴ نشان داد که مدل Tank و SimHyd (در روش SCE-UA) با ضریب ناش بیشتر از ۰/۶۰ خیلی خوب بودند و مدل Sacramento با ضریب ناش بیشتر از ۰/۵۰ رضایت‌بخش و مدل SimHyd (در روش الگوریتم ژنتیک) با ضریب ناش بیشتر از ۰/۴۰ دارای نتیجه غیرقابل قبول است. همچنین، در مدل‌های AWBM و SMAR با



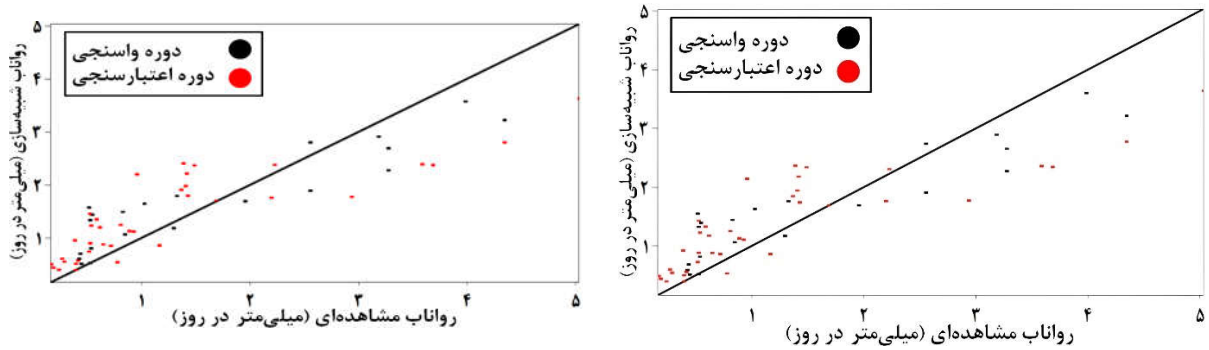
الگوریتم ژنتیک SCE-UA

الف. مدل Sacramento



الگوریتم ژنتیک SCE-UA

ب. مدل SimHyd



الگوریتم ژنتیک SCE-UA

ج. مدل Tank

شکل ۲. نمودار پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای به دو روش الگوریتم ژنتیک و SCE-UA (رنگی در نسخه الکترونیکی)

توجه به ضریب ناش در روش الگوریتم ژنتیک به‌ترتیب با مقدارهای ۱/۰۷- و ۱/۱۲-، در روش SCE-UA به‌ترتیب با مقدارهای ۱/۱۲- و ۰/۰۸- در دوره اعتبارسنجی دارای پایین‌ترین کارایی در بین مدل‌ها بوده است. در شکل ۲ نمودار پراکندگی بین مقادیر رواناب شبیه‌سازی و رواناب مشاهده‌ای تحت روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و SCE-UA نشان داده شده است.

بررسی نمودارهای مربوط به نمودارهای پراکندگی مدل‌ها در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۲ نشان داد که مدل‌های مذکور توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی مقادیر بیشینه و کمینه در منطقه مورد مطالعه ندارند. همچنین، مقدار دبی شبیه‌سازی شده (به‌ویژه مقادیر اوج جریان) به‌مراتب کمتر از مقادیر

مشاهده‌ای و پایین‌تر از خط یک به یک هستند که با نتایج خلیلی‌نفت چالی و همکاران (۸)، روحانی و فراهانی مقدم (۲۱) و سلمانی و همکاران (۲۳) که به این نتیجه رسیده بودند که این مدل‌ها توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی مقادیر بیشینه ندارند، همخوانی دارد.

نتایج هیدروگراف رواناب شبیه‌سازی و مشاهداتی برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی توسط بهینه‌ساز خودکار الگوریتم ژنتیک و SCE-UA مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همچنین هیدرگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. براساس شکل ۳ می‌توان گفت در مرحله واسنجی، به‌منظور بررسی عملکرد مدل، واسنجی در دوره آماری ۴۰ سال (۲۰۱۰-۱۹۷۰) اجرا شد. با توجه به هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حاصل از مدل‌های این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌ها Sacramento، SimHyd و Tank مقادیر متوسط جریان را به خوبی شبیه‌سازی کرده‌اند اما توانایی شبیه‌سازی مقادیر کمینه و بیشینه جریان را در بعضی قسمت‌ها ندارند که دلیل این امر می تواند در بیش‌تخمین‌زدن مدل‌ها در میزان تبخیر و تعرق پتانسیل، ساختار یکپارچه و مفهومی آن‌ها و گاهی نبود گسترش ابر بالای محل ایستگاه اندازه‌گیری بارش باشد. همچنین، مدل SimHyd در چند واقعه و مدل Tank در یک واقعه مقدار شبیه‌سازی بیشتر از مقدار مشاهده‌ای بوده است.

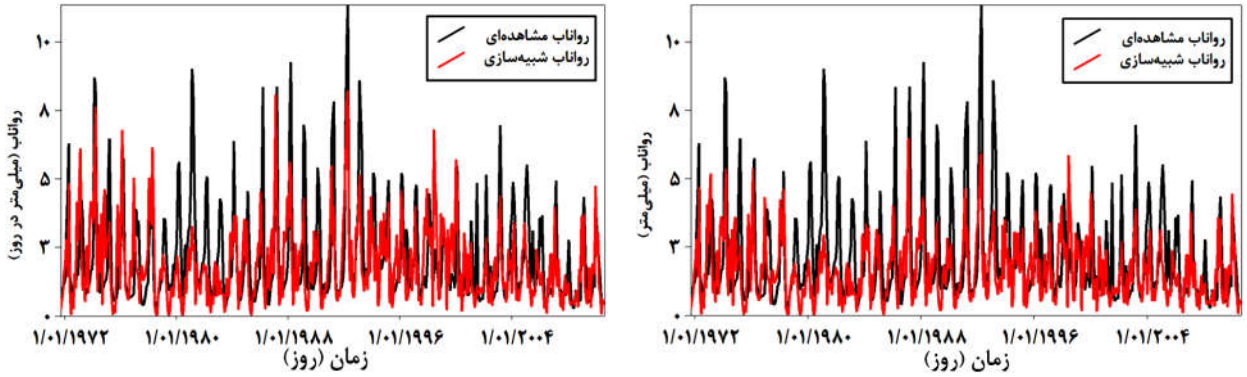
همانطور که از شکل (۴) مشخص است عموماً در کلیه مناطق حوضه ماه‌های آذر، دی و به‌ویژه بهمن و اسفند مرطوب‌ترین و خرداد لغایت شهریور خشک‌ترین ماه‌های سال است. بنابراین، در حوضه مورد مطالعه در دوره اعتبارسنجی، مدل Tank جریان ناشی از بارندگی‌ها را به‌جز در دو واقعه بارندگی، به‌خوبی توانسته است شبیه‌سازی کند. مدل‌های Sacramento و SimHyd جریان ناشی از بارندگی‌ها را به‌جز در چند واقعه بارندگی توانسته است شبیه‌سازی کند یعنی در برخی از موارد دبی را کمتر و بیشتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است.

می‌توان بیان کرد، علت آن مربوط به بارش‌های رگباری فصل بهار و ذوب شدن برف‌ها است و مدل‌ها در شبیه‌سازی ذوب برف خیلی خوب عمل نمی‌کند. با بررسی داده‌ها معلوم شد مقدار دبی جریان مقادیر پیک رواناب در فصل‌های زمستان و بهار رخ می دهد که علاوه بر بارش زیاد در منطقه آب ناشی از ذوب برف نیز به شکل‌گیری رواناب کمک می‌کند. علت این امر عدم وجود تعداد کافی ایستگاه‌های هیدرومتری در منطقه و به خصوص در ارتفاعات است. به‌عبارتی داده‌های ورودی به مدل در این بازه‌ها دچارکمبودهایی هستند که مدل از شبیه‌سازی رواناب‌های بالا بازمی‌ماند. اما در حالت کلی دبی‌های پایه در شرایط خوبی شبیه‌سازی شده و عملکرد مدل قابل قبول است. به‌طوری که با توجه به شکل‌های (۳) و (۴)، هیدروگراف شبیه سازی شده به‌وسیله مدل Tank نسبت به هیدروگراف شبیه سازی شده به‌وسیله مدل Sacramento برازش به‌مراتب بهتری با مقادیر رواناب مشاهده‌ای در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها دارد. این در حالی است که هیدروگراف شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل Sacramento نسبت به هیدروگراف شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل SimHyd برازش به‌مراتب بهتری دارد.

منحنی تداوم جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای مدل‌های Sacramento، SimHyd و Tank در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌ها توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی مقادیر بیشینه و کمینه را در منطقه مورد مطالعه ندارند که با نتایج رستمی‌خلج و همکاران (۲۰) که مدل‌های AWBM، Sacramento، SimHyd، SMAR و Tank بررسی کردند و نشان دادند که مدل‌ها توانایی شبیه‌سازی مقادیر کمینه و بیشینه را نداشته‌اند اما مقادیر متوسط را به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کنند، مطابقت دارد.

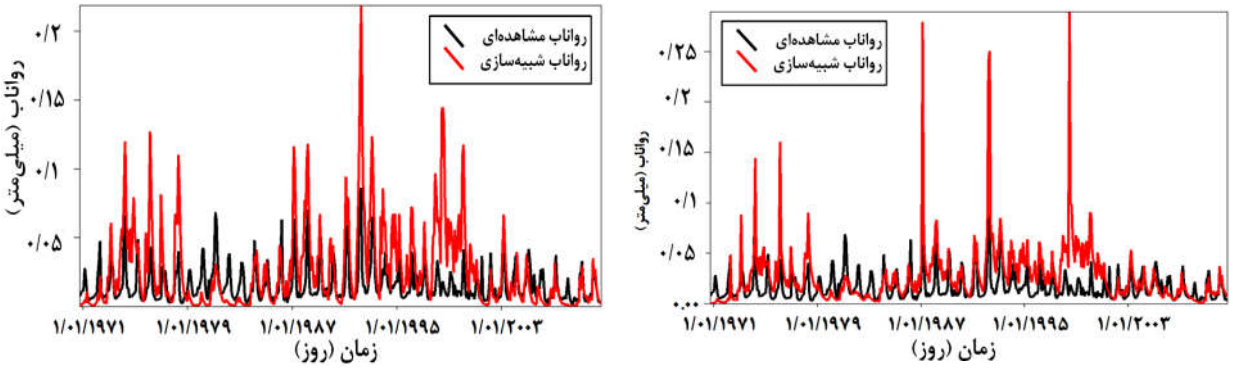
بحث و نتیجه‌گیری

مدل‌های هیدرولوژیکی پژوهش حاضر از نوع مدل‌های



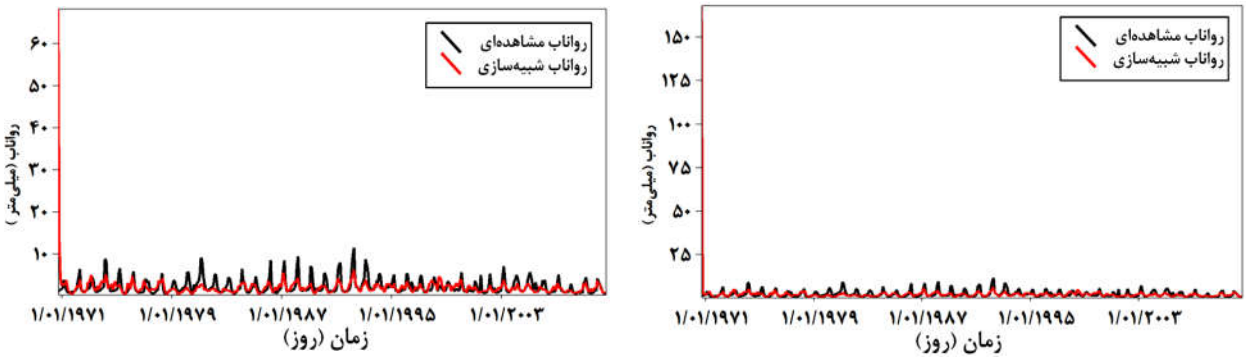
الگوریتم ژنتیک SCE-UA

الف. مدل Sacramento



الگوریتم ژنتیک SCE-UA

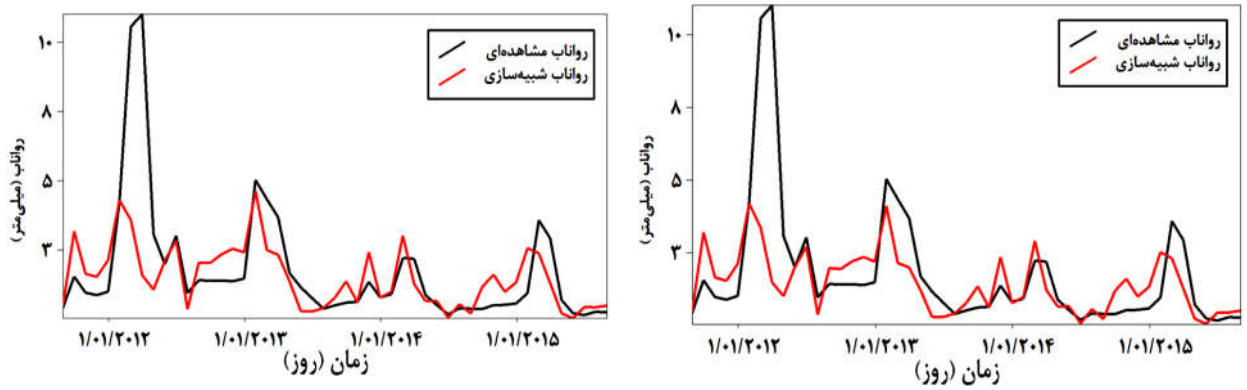
ب. مدل SimHyd



الگوریتم ژنتیک SCE-UA

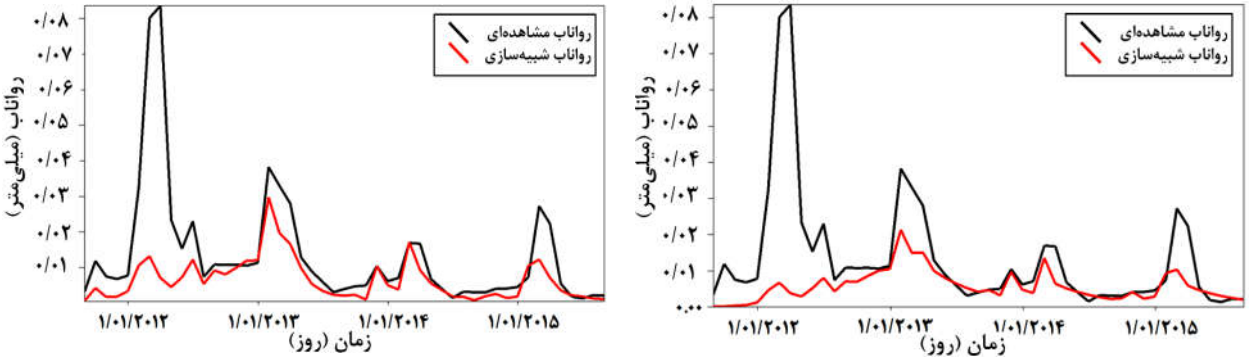
ج. مدل Tank

شکل ۳. مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در واسنجی به دو روش الگوریتم ژنتیک و SCE-UA (رنگی در نسخه الکترونیکی)



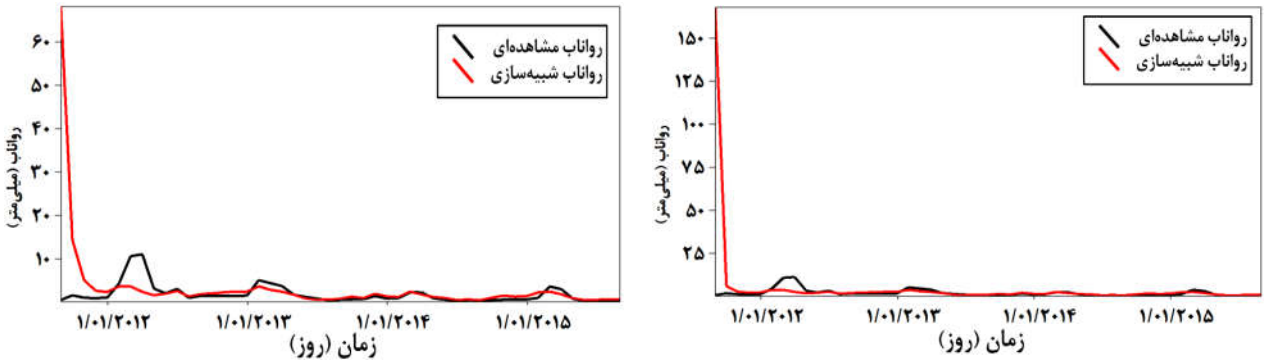
الگوریتم ژنتیک SCE-UA

الف. مدل Sacramento



الگوریتم ژنتیک SCE-UA

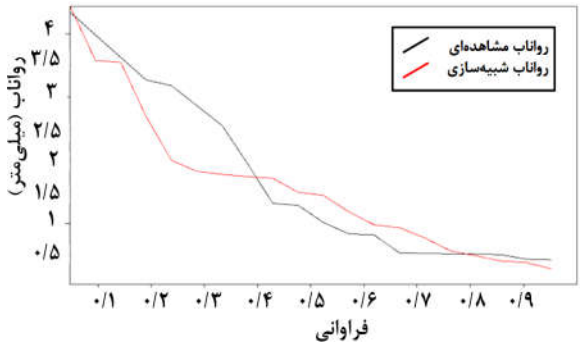
ب. مدل SimHyd



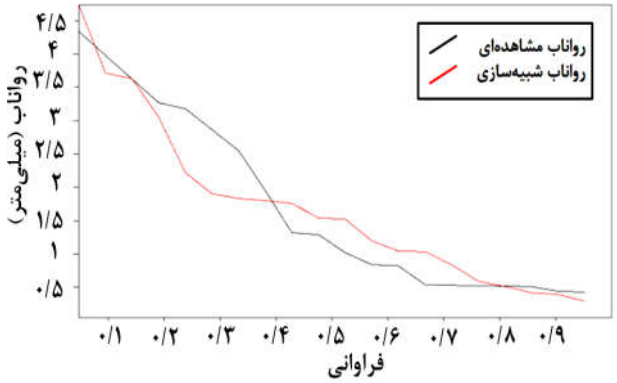
الگوریتم ژنتیک SCE-UA

ج. مدل Tank

شکل ۴. مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در اعتبارسنجی به دو روش الگوریتم ژنتیک و SCE-UA (رنگی در نسخه الکترونیکی)

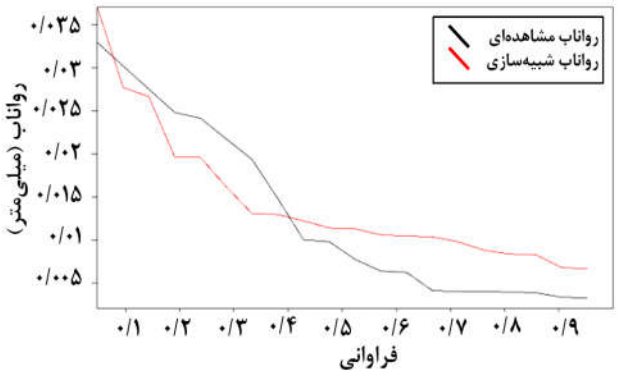


الگوریتم ژنتیک

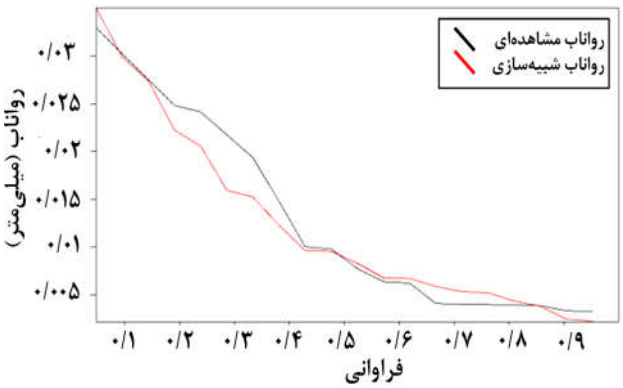


SCE-UA

الف. مدل Sacramento

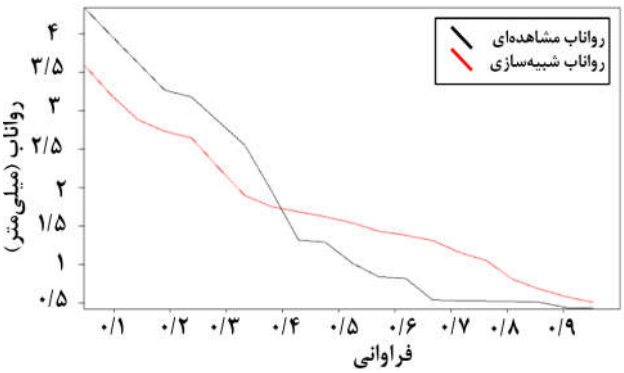


الگوریتم ژنتیک

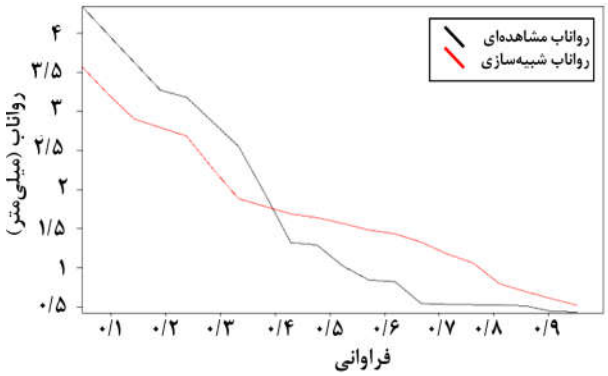


SCE-UA

ب. مدل SimHyd



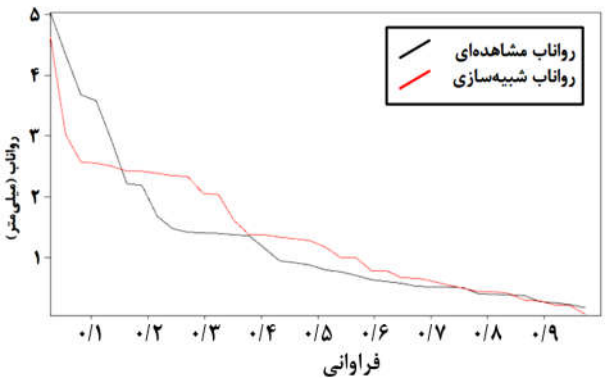
الگوریتم ژنتیک



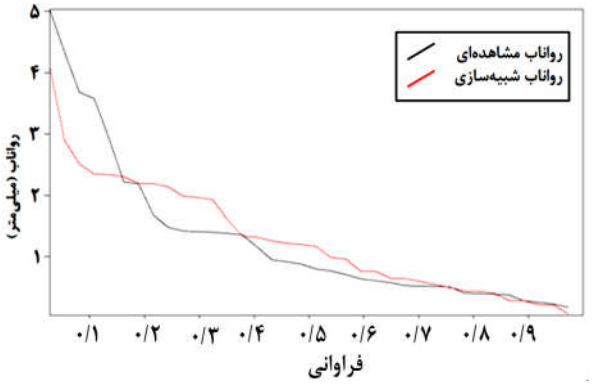
SCE-UA

ج. مدل Tank

شکل ۵. منحنی تداوم جریان در واسنجی به دو روش الگوریتم ژنتیک و SCE-UA (رنگی در نسخه الکترونیکی)

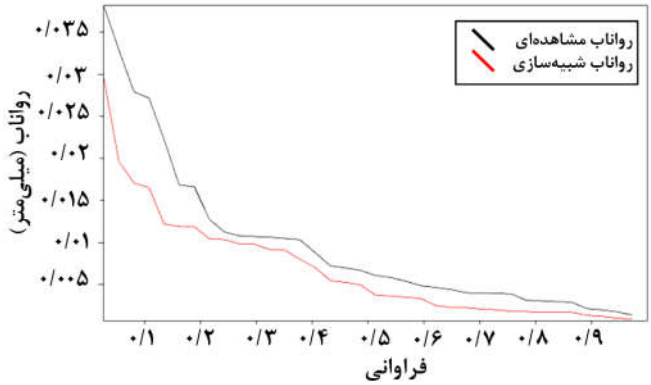


SCE-UA

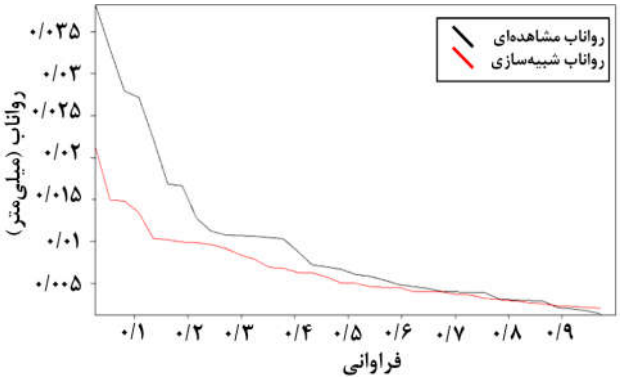


الگوریتم ژنتیک

الف. مدل Sacramento

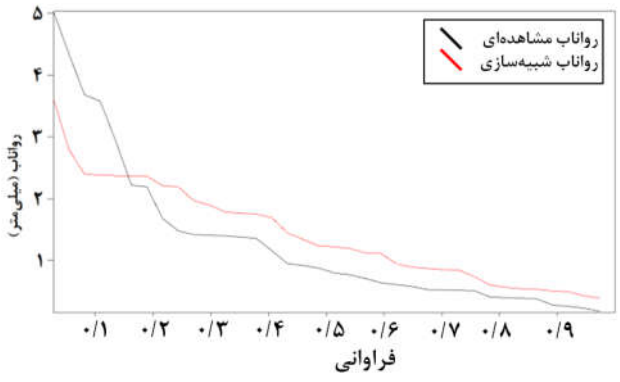


SCE-UA

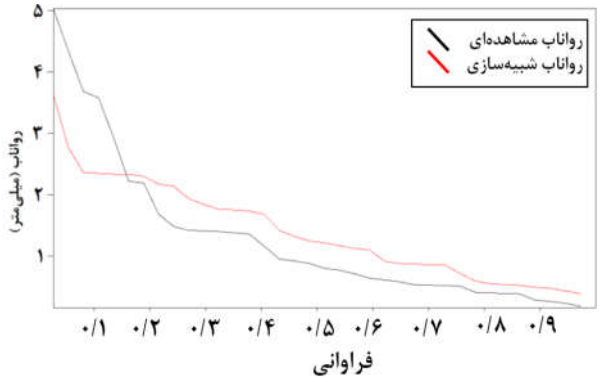


الگوریتم ژنتیک

ب. مدل SimHyd



SCE-UA



الگوریتم ژنتیک

د. مدل Tank

شکل ۶. منحنی تداوم جریان در اعتبارسنجی به دو روش الگوریتم ژنتیک و SCE-UA (رنگی در نسخه الکترونیکی)

یکپارچه و مفهومی هستند که در دهه‌های اخیر در داخل کشور به‌منظور شبیه‌سازی دبی جریان با گام زمانی روزانه مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات انجام شده به‌صورت جداگانه از روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌ها استفاده کرده‌اند. در واقع کارایی مدل‌های بارش- رواناب به دقت واسنجی پارامترهای مدل‌ها بستگی دارد. واسنجی به روش سعی و خطا (Trial and error) زمان‌بر بوده و نیاز است که کاربر از تجربه بالایی در کارکرد مدل‌ها برخوردار باشد. استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز واسنجی خودکار با کمترین صرف هزینه و زمان، امکان حصول به مقادیر تقریبی پارامترها را فراهم می‌آورد و با داشتن آشنایی از مشخصات منطقه مطالعاتی می‌توان نتایج قابل قبولی به‌دست آورد (۱۳). پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و عملکرد مدل‌های AWBM، Sacramento، SimHyd، SMAR و Tank در شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز گرگانرود در در استان گلستان شکل گرفت. در بین بهینه‌سازهای موجود در RRL، بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک و روش SCE-UA بهترین بهینه‌ساز برای واسنجی و اعتبارسنجی تمامی مدل‌ها تعیین شد. خودکارسازی فرایند واسنجی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک باعث افزایش چشم‌گیر در سرعت واسنجی شده است. مطالب بیشتر در مورد تئوری الگوریتم روش SCE-UA توسط دوآن و همکاران (۳) ارائه شده است. از طرف دیگر، نتایج نشان داد که روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و روش SCE-UA برای واسنجی مدل‌ها مورد استفاده در پژوهش حاضر تا حدودی کارآمد است و توانایی به‌نسبت خوبی برای دست‌یابی به بیشینه اصلی در سطح تابع هدف دارد. فرایند واسنجی این مدل‌ها با کاربرد الگوریتم جستجوی تکاملی ژنتیک و روش SCE-UA و استفاده از توابع هدف NSE و RMSE به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده سطح خطا و آستانه‌های توقف شبیه‌سازی (ارزیابی صحت مدل‌سازی) شکل گرفت. با توجه به این نکته که نمایه NSE معمولا با ترسیم گرافیکی نتایج مشاهداتی تطابق بیشتری داشته، ولی نمایه RMSE نیز معیاری کارا از میزان خطای شبیه‌سازی است (۵). با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل‌های مورد مطالعه در دوره واسنجی مدل SimHyd در روش SCE-UA ضریب ناش با مقدار ۰/۸۲، مدل Tank در روش‌های الگوریتم ژنتیک و روش SCE-UA ضریب ناش با مقدار ۰/۷۹ و مدل SMAR در روش الگوریتم ژنتیک ضریب ناش با مقدار ۰/۷۷ با عملکرد بسیار خوب، مدل SimHyd در روش الگوریتم ژنتیک با ضریب ناش ۰/۶۳ و مدل Sacramento در روش‌های SCE-UA و الگوریتم ژنتیک ضریب ناش به‌ترتیب با مقدارهای ۰/۶۲ و ۰/۶۱ و مدل SMAR در روش SCE-UA ضریب ناش با مقدار ۰/۵۸ با عملکرد رضایت‌بخش و مدل AWBM در روش‌های SCE-UA و الگوریتم ژنتیک ضریب ناش به‌ترتیب با مقدارهای ۰/۳۳ و ۰/۲۳ با عملکرد غیرقابل قبول و برای دوره اعتبارسنجی مدل Tank در روش‌های الگوریتم ژنتیک و روش SCE-UA ضریب ناش به‌ترتیب با مقدارهای ۰/۶۷ و ۰/۶۶ و مدل SimHyd در روش SCE-UA ضریب ناش با مقدار ۰/۶۶ با عملکرد خوب و مدل Sacramento در روش‌های SCE-UA و الگوریتم ژنتیک ضریب ناش به‌ترتیب با مقدارهای ۰/۵۵ و ۰/۵۲ با عملکرد رضایت‌بخش و مدل SimHyd در روش الگوریتم ژنتیک با ضریب ناش ۰/۴۸ و مدل AWBM در روش‌های SCE-UA و الگوریتم ژنتیک ضریب ناش به‌ترتیب با مقدارهای ۱/۱۲- و ۱/۰۷- و مدل SMAR در روش‌های الگوریتم ژنتیک SCE-UA ضریب ناش به‌ترتیب با مقدارهای ۱/۱۲- و ۰/۰۸- با عملکرد غیر قابل قبول بهترین کارایی را در بین مدل‌ها دارند. با توجه به نتایج به‌دست آمده در رتبه اول مدل Tank با دو روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و روش SCE-UA و مدل SimHyd در روش SCE-UA در دوره واسنجی (با عملکرد بسیار خوب) و در دوره اعتبارسنجی (با عملکرد خوب) در رتبه دوم مدل Sacramento در روش‌های الگوریتم ژنتیک و SCE-UA (با عملکرد رضایت‌بخش) می‌تواند شبیه‌سازی قابل قبولی در شرایط کشور ما داشته و قادر است با اطلاعات قابل دسترس پاسخ حوضه‌های فاقد آمار را محاسبه کرده و از قابلیت خوبی در طراحی و پژوهش

برخوردار باشد. این نتایج با نتایج شیخ‌گودرزی و همکاران (۲۶) که با استفاده از مدل Tank در شبیه‌سازی رواناب و با نتایج روحانی و فراهی‌مقدم (۲۱)، سلمانی و همکاران (۲۳)، محمدی‌وند و همکاران (۱۳) و یونسی و همکاران (۲۹) انطباق دارند. همچنین مدل SMAR در دوره واسنجی در روش الگوریتم ژنتیک (با عملکرد بسیار خوب) و در روش SCE-UA (با عملکرد رضایت‌بخش) و در دوره اعتبارسنجی (با عملکرد غیرقابل قبول)، مدل SimHyd در روش الگوریتم ژنتیک (با عملکرد رضایت‌بخش) و در روش SCE-UA (با عملکرد بسیار خوب) و در دوره اعتبارسنجی در روش الگوریتم ژنتیک (با عملکرد غیرقابل قبول) و در روش SCE-UA (با عملکرد خوب) و مدل AWBM در روش‌های SCE-UA و الگوریتم ژنتیک در دوره واسنجی و اعتبارسنجی (با عملکرد غیرقابل قبول) کمترین کارایی را در بین مدل‌ها برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز گرگانرود داشتند. از جمله محدویت‌های مدل‌های مذکور عدم مدل‌سازی ذوب برف است. از جمله مزایای استفاده از این مدل‌ها کاربرپسندبودن، نیاز به داده‌های اندک، ساختار به‌نسبت ساده و توانایی شبیه‌سازی پیوسته است (۱۲). با توجه به تنوع مدل‌های هیدرولوژی، انتخاب هر مدل برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک دشوار است. بنابراین، نیاز به ارزیابی مقایسه‌ای بین مدل‌ها برای مشخص‌کردن توانایی و قابلیت هر مدل در شبیه‌سازی دبی‌های بیشینه و کمینه در منطقه مطالعاتی است.

منابع مورد استفاده

1. Behmanesh, J., A. Jabari, M. Montaseri and H. Rezaei. 2014. Comparing AWBM and SimHyd models in rainfall-runoff modeling (Case study: Nazlou Chay catchment in west Azarbijan). *Geography and Environmental Planning Journal* 52(4): 155-168 (In Farsi).
2. Chouhan, D., H. L. Tiwari and R.V. Galkate. 2016. Rainfall runoff simulation of Shipra river basin using AWBM RRL toolkit. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)* 5(3): 1-4.
3. Duan, Q., S. Sorooshian and V. K. Gupta. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology* 20: 265-284.
4. Dusti, M., K. Shahedi, M. Habibnejad Roshan and M. Miryaqubzadeh. 2014. Using IHACRES semidistributed model in simulation of daily flow: a case study in Tamer Basin. *Journal of Water and Soil Conservation* 21(2): 277-292 (In Farsi).
5. Goodarzi, M., B. Motamed Vaziri and M. Mir Hoseini. 2017. Assessment of IHACRES Model in surface run-off simulation in climate change status: A case study Kan Basin. *Iran Watershed Management Science Engineering* 11(38): 83-94 (In Farsi).
6. Jabbarian Amiri, B. 2018. Investigating performance of the conceptual models in river hydrologic simulation. *Journal of Natural Environment* 71(4): 509-521 (In Farsi).
7. Jaiswal, R. K and B. Bharti. 2020. Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall-runoff models. *Applied Water Science* 10(1): 1-14.
8. Khalili Naft Chali, A and M. Pourreza Belandi. 2016. Evaluation of the efficiency of AWBM model using genetic algorithm and competitive evolution algorithm of communities in simulation of rainfall-runoff process (Case Study: Gharasoo Watershed). *In:* The Second National Congress of Irrigation and Drainage of Iran. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (In Farsi).
9. Kheirfam, H., R. Mostafazadeh and S.H.R. Sadeghi. 2013. Daily discharge prediction using IHACRES model in some watersheds of Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research* 4(7): 114-127 (In Farsi).
10. Lalouzai, A., A. Sadoddin, A. Zare Garizi and V. Sheikh. 2020. Analysis of seasonal behavior of flood events and their temporal changes for the Hyrcanian watersheds (Pilot study: watersheds of the Gorganroud River Basin, Iran). *Journal of Natural Environmental Hazards* 9(25): 143-158 (In Farsi).
11. Li, Y. 2021. Performance evaluation of Tanh and AWBM rainfall-runoff models. *In:* International Conference on Minerals Source, Geotechnology and Civil Engineering, Guangzhou, China.
12. Mansouri, B. and R. Pirmoradian. 2019. Evaluation and comparison of Lumped and Semi-Distributed Rainfall-Runoff Models. *Journal of Water and Sustainable Development* 5(2): 81-90 (In Farsi).
13. Mohammadivand, M., S. Araghinejad, K. Ebrahimi and F. Modaresi. 2019. Performance evaluation of AWBM,

SACRAMENTO and SimHyd models in runoff simulation of the Amameh Watershed using automatic calibration optimization method of genetic algorithm. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(7): 1759-1769 (In Farsi).
14. Mostafazadeh, R and E. Asgari. 2021. Performance assessment of GR4J rainfall-runoff model in daily flow simulation of Nirchai Watershed, Ardabil province. *Irrigation and Water Engineering* 11(3): 79-95 (In Farsi).
15. Mubialiwo, A., A. Abebe and C. Onyutha. 2021. Performance of rainfall-runoff models in reproducing hydrological extremes: a case of the River Malaba sub-catchment. *Applied Sciences* 3(4): 1-24.
16. Nabizadeh, M., A. Mosaedi and A. A. Dehghani. 2012. Intelligent estimation of stream flow by adaptive Neuro-Fuzzy inference system. *Journal of Water and Irrigation Management* 2: 69-80 (In Farsi).
17. Naserabadi, F., A. Esmali Ouri, H. Akbari and R. Rostamian. 2016. River flow Simulation using SWAT Model (Case study: Ghareh Su River in Ardabil Province-Iran). *Journal of Watershed Management Research* 7(13): 59-50 (In Farsi).
18. Ordouni, M., H. Memarian, M. Akbari and M. Pourreza Bilondi. 2020. Accuracy assessment of GPM-IMERG satellite precipitation data on half-hourly and daily time scales (Case study: Gorganroud Basin). *Journal of Water and Soil Conservation* 27(4): 149-166 (In Farsi).
19. Rajabizadeh, Y., S. Ayyoubzadeh and A. Zahiri. 2019. Flood survey of Golestan Province in 2018-2019 and providing solutions for its control and management in the future. *Iranian Journal of Ecohydrology* 6(4): 921-942 (In Farsi).
20. Rostami khalaj, M., A. Moghadamnia, H. Salmani and A. Sepahvand. 2016. Compare the performance of AWBM, SACRAMENTO, SimHyd, SMAR and TANK. *Iranian Journal of Natural Ecosystems* 7(2): 47-63 (In Farsi).
21. Rouhani, H and M. Farahi Moghadam. 2014. Automatic calibration of two precipitation- runoff models Tank and SimHyd using genetic algorithm. *Journal of Rangeland and Watershed Managemen* 66(4): 521-533 (In Farsi).
22. Salajegheh, A., A. Fathabadi and M. Mahdavi. 2009. Investigation on the efficiency of Neuro-Fuzzy method and statistical models in simulation of rainfall-runoff process. *Journal of Range and Watershed Management* 62: 65-79 (In Farsi).
23. Salmani, H., A. Bahremand, K. Saber Chanari and M. Rostami khalaj. 2014. Evaluation of the efficiency of AWBM, Sacramento and Tank rainfall runoff model in runoff simulation in Arazkoose-Goorganrood Basin, Golestan porovince. *Ecohydrology* 1(3): 207-221 (In Farsi).
24. Shahoei, V and J. Porhemmat. 2019. Comparison and assessment of two lumped AWBM and semi distributed SWAT models in monthly runoff simulation of Gharah-Sou river in Kermanashah province, Iran. *Journal of Environment and Water Engineering* 5(1): 71-82 (In Farsi).
25. Sharifi, F., Sh. Safarpur and A. Ayubzadeh. 2014. Assessment of AWBM2002 in simulation of hydrologic processes in a number of basins in Iran. *Journal of Research and Construction* 63: 35-42 (In Farsi).
26. Sheikh Goodarzi, M., B. Jabarian Amiri and H. Azarnivand. 2019. Comparison of the function of conceptual models in river hydrological simulation. *Journal of Natural Environment* 509-521 (In Farsi).
27. Song, M., Y. Shi, H. Yao and W. Zhang. 2019. A comparative study of different hydrological model and their application in Bass river catchment. In: 7th Annual International Conference on Materials Science and Engineeringin, Wuhan, Hubei, China.
28. Trivedi, A., S. K. Pyasi, R. V. Galkate and V. K. Gautam. 2021. A Case study of rainfall runoff modelling for Shipra river basin. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 11: 3027-3043.
29. Yonesi, H., H. yousefi, A. Arshia and Y. Yarahmadi. 2020. Runoff rainfall simulation using RRL Toolkit (Case Study: Rahim Abad Station - Silakhor Plain). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 14(4): 1348-1361 (In Farsi).

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 2, Summer 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Performance Assessment of Five Water Balance Models for Runoff Simulation in the Gorganrood Watershed

F. Daechini, M. Vafakhah*, V. Moosavi and M. Zabihi Silabi[1]

(Received: August 10-2021; Accepted: November 3-2021)

Abstract

Surface runoff is one of the most significant components of the water cycle, which increases soil erosion and sediment transportation in rivers and decreases the water quality of rivers. Therefore, accurate prediction of hydrological response of watersheds is one of the important steps in regional planning and management plans. In this regard, the rainfall-runoff modeling helps hydrological researchers, especially in water engineering sciences. The present study was conducted to analyze the rainfall-runoff simulation in the Gorganrood watershed located in northeastern Iran using AWBM, Sacramento, SimHyd, SMAR, and Tank models. Daily rainfall, daily evapotranspiration, and daily runoff of seven hydrometric stations in the period of 1970-2010 and 2011-2015 were used for calibration and validation, respectively. The automated calibration process was performed using genetic evolutionary search algorithms and SCE-UA methods, using Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) and root mean of square error (RMSE) evaluation criteria. The results indicated that the SimHyd model with NSE of 0.66, TANK model using Genetic Algorithm and SCE-UA methods with NSE of 0.67 and 0.66, and Sacramento model using genetic algorithm and SCE-UA methods with NSE of 0.52 and 0.55 have the best performance in the validation period.

Keywords: Validation, Genetic algorithm, Rainfall-runoff library software package, Rainfall-runoff model, Hydrological models

1. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran.
*: Corresponding author, Email: vafakhah@modares.ac.ir