مقـالـه پـژوهشي

هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی 34، سال دهم، بهار 1402، صص 51-33
Hydrogeomorphology, Vol. 10, No. 34, Spring 2023, pp (33-51)
CC BY-NC

مقايسه روش‌هاي بهينه‌سازي پارامترهاي مدل **SIMHYD** براي شبيه‌سازي دبي روزانه جريان در حوضه‌ی آبريز كوزه‌تپراقي اردبيل

زهرا شریفی[1]، رئوف مصطفی‌زاده*[2]، اباذر اسمعلی عوری[2]، زینب حزباوی[3]، محمد گلشن[4]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
2- دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده‌ی مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
3- استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده‌ی مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
4- دانش‌آموخته‌ی دکتری آبخیزداری، اداره منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان آستارا، گیلان، ایران

تاریخ دریافت: 1400/10/14 تاریخ پذیرش: 1401/11/08

چکیده

داده‌های دبی روزانه جریان از پیش‌نیازهای مدیریت منابع آب هستند، اما امکان اندازه‌گیری آن در بسیاری از حوضه‌های بالادست وجود ندارد. بر این اساس، مدل‌سازی هیدرولوژیکی یکی از ابزارهای مهم در برآورد خصوصیات جریان در حوضه‌های بدون آمار است. تخمین پارامترهای ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی در اغلب موارد نیازمند بهینه‌سازی است. هدف این پژوهش، ارزیابی روش‌های بهینه‌سازی و واسنجی خودکار مدل بارش-رواناب SIMHYD در حوضه آبریز کوزه‌تپراقی با مساحت 805 کیلومترمربع در استان اردبیل است. داده‌های دبی، بارش روزانه، تبخیر و تعرق به‌عنوان ورودی‌های مدل از سال 2002-2011 برای واسنجی و از سال 2009-2011 برای صحت‌سنجی در امر شبیه‌سازی استفاده شدند. روش‌های واسنجی شامل الگوریتم ژنتیک، تکامل رقابتی جامع، الگوی جستجو، الگوی جستجوی چندشروعه، نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت، روزنبروک، بهینه‌سازی روزنبروک چندشروعه براساس معیارهای کارایی آماری ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که تغییر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در دقت واسنجی مدل تاثیر قابل‌توجهی دارد. به‌طوری که مقدار تابع نش-ساتکلیف برای الگوریتم‌های مورداستفاده به‌ترتیب 0/42، 0/31، 8/55-، 0/38، 0/56، 0/23، 0/24 به‌دست آمد. الگوریتم روزنبروک در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مورد استفاده، از دقت بالایی در واسنجی مدل هیدرولوژیک SIMHYD برخوردار است.

کلمات کلیدی: واسنجی، هیدروگراف جریان، بارش-رواناب حوضه آبریز کوزه‌تپراقی، استان اردبیل.

* نویسنده مسئول

E-mail:raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

منابع آب یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی و یک مولفه مهم از یک اکوسیستم، که نقش در توسعه‌ی پایدار حوضه‌های آبخیزدار، کشاورزی و مدیریت منابع آب دارد (ژانگ[1] و همکاران، 2019: 1؛ کی[2] و همکاران، 2020: 2). تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های مخرب انسان از جمله تغییر کاربری اراضی و هم‌چنین توسعه شهری بر روابط منطقه‌ای بارش-رواناب و چرخه هیدرولوژیک تاثیر می‌گذارد (ضیائی و همکاران، 1400؛ وانگ[3] و همکاران، 2015: 692؛ سعید و همکاران، 2021: 226). شناسایی پاسخ‌های مناسب در برابر این آسیب‌ها بر عهده مدیران و کارشناسان هیدرولوژی است (گودرزی و همکاران، 1397: 510؛ بورمان[4] و همکاران، 2009: 1). به‌منظور برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آب، نیاز به استفاده از ابزارهایی برای تجزیه و تحلیل است (پیرامون و همکاران، 1398: 1). در این راستا، شناخت فرایندهای هیدرولوژیکی برای شناخت عکس‌العمل حوضه آبریز ضروری است (روحانی و فراهانی‌مقدم، 1392: 522؛ اسفندیاری و همکاران، 1401). داده‌های دبی و رژیم جریان رودخانه از اطلاعات مهم و اساسی برای مدیریت منابع آب هستند، که در بسیاری از مناطق امکان نصب ایستگاه‌های متعدد وجود ندارد (دره‌غریبی و همکاران، 1396: 361). لذا، روش‌های غیرمستقیم فراوانی برای شبیه‌سازی سامانه‌های طبیعی، براورد کامل و دقیق‌تر و اعمال محاسبات پیچیده‌تر کامپیوتری مانند مدل‌سازی هیدرولوژی ابداع شده است (داونس[5]،2000: 22؛ روحانی و فراهی‌مقدم، 1392: 522). مدل‌سازی جریان آب اولین گام در مدیریت منابع آب و یکی از ابزارهای کارآمد در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه و پتناسیل تولید آب است (یو و ژو[6]، 2015: 1202؛ دره‌غریبی و همکاران، 1396: 361). مدل‌های فراوانی برای شبیه‌سازی فرآیندهای بارش-رواناب ارائه شده که بر مبنای روش‌های آماری استوار هستند. مدل‌های مفهومی از جمله SIMHYD[7]، AWBM[8]، Sacramento، و IHACRES دارای ساختاری ساده و پارامترهای معدود هستند (خاوریان و همکاران، 1399؛ خیرفام و همکاران، 1392). بیش‌تر این پارامترها موثر در بارش- رواناب از کمیت‌هایی که اندازه‌گیری شده‌اند به‌دست نمی‌آیند و برای این‌کار نیاز است که از راه واسنجی مدل برآورد شوند. واسنجی دستی مدل‌های هیدرولوژیکی از اوایل دهه 1960 توسعه یافت که یکی از اولین آن‌ها مدل استنفورد بود ولی به‌دلایلی از جمله زمان‌بر بودن و پیچیدگی این فرآیند، واسنجی خودکار مدل‌های هیدرولوژیکی مورد توجه قرار گرفت (محمدی‌وند و همکاران، 1398: 1760؛ فرانسیز و شیو[9]، 2010: 2). نتایج مطالعات مدل‌های هیدرولوژیک حاکی از وجود چالش‌های واسنجی مدل‌های مفهومی بارش-رواناب است که

1- Zhang
2- Qi
3- Wang
4- Bormann
5- Dovonec
6- Yu and zhu
7- Simple of Hydrology
8- Australian Water Balance Model
9- Francis and Chiew

باید با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی حل شوند (سروشیان و گوپتا[1]، 1980: 1187؛ گلشن و همکاران، 1396: 68).

در راستای مدل‌سازی جریان، در پژوهشی واسنجی دو مدل بارش رواناب TANK و SIMHYD با استفاده از الگوریتم ژنتیک در حوضه آبریز چهل‌چای در استان گلستان توسط روحانی و فراهانی‌مقدم (1392) انجام شد. نتایج ایشان نشان داد که کارایی مدل SIMHYD نسبت به مدل تانک بهتر است. در تحقیقی بهمنش و همکاران (1392) از مدل SIMHYD با الگوریتم بهینه‌سازی جست و جوی الگو و مدل AWBM با الگوریتم بهینه‌سازی تکامل رقابتی جامع به‌منظور شبیه‌سازی دبی جریان استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدل SIMHYD نسبت به مدل AWBM از دقت بیش‌تری برخوردار است. درتحقیقی دیگر بررسی مقایسه‌ای کارایی مدل‌های بارش رواناب AWBM، Sacramento، SIMHYD، SMAR، TANK در حوضه آبریز نوده در استان گلستان توسط رستمی‌خلج و همکاران (1395) نشان داد که بهینه‌ساز جستجوی مستقیم در بین سایر بهینه‌سازها نتایج بهتری ارائه می‌کند. ارزیابی کارایی مدل‌های بارش-رواناب TANK و SIMHYD در شبیه‌سازی جریان رودخانه بهشت‌آباد توسط پیرامون و همکاران (1398) انجام شد. در این تحقیق مشخص شد که روش الگوریتم ژنتیک نتایج بهتری را نسبت به سایر روش‌های بهینه‌ساز ارائه می‌دهد. هم‌چنین، کارایی بهتر مدل TANK با ضریب NS 0/54 و 0/81 به‌ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نسبت به مدل SIMHYD است. ارزیابی عملکرد مدل‌های Sacramento، AWBM و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب با استفاده از بهینه‌ساز واسنجی خودکار الگوریتم ژنتیک در حوضه آبریز معرف امامه توسط محمدی‌وند و همکاران (1398) نشان داد که عملکرد مدل SIMHYD نسبت به دو مدل دیگر با NS برابر با 0/57و 0/73 به‌ترتیب در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی بهتر است. هم‌چنین در خارج کشور، بگسترا و بنجیو[2] (2012) از الگوریتم بهینه‌سازی نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت[3] برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل SIMHYD استفاده کردند و دقت این الگوریتم، در بهینه‌سازی پارامترهای مدل، قابل قبول ارزیابی شد. شبیه‌سازی دبی جریان از الگوریتم‌های الگوی جستجو، ژنتیک، تکامل رقابتی جامع و مدل ADM [4] توسط فرانچین[5] و همکاران (2015) نشان داد که الگوریتم تکامل رقابتی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها از کارایی مناسب‌تری برخوردار است. در تحقیقی سان و همکاران (2021) به مطالعه شبیه‌سازی فرآیند هیدرولوژیکی مدل‌های هیدرولوژیکی یکپارچه (AWBM Sacramento، SIMHYD،TANK) در حوضه رودخانه ووجیانگ پرداختند دوره شبیه‌سازی از 1991 تا 2004، و واسنجی خودکار با الگوریتم SCE-UA نشان داد مدل SIMHYD نتایج مطلوبی ارائه داده است. از آن‌جایی که روش‌های واسنجی دستی

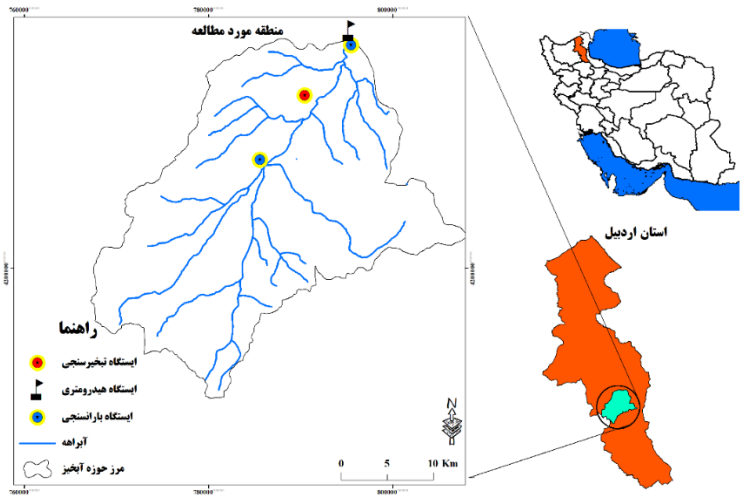
1- Sorooshian and Gupta
2- Bergstra and Bengio
3- Uniform Random Sampling
4- American Development Model
5- Franchin

زمان‌بر و هزینه‌بر و هم‌چنین نیاز به دانش و تجربه کافی است و از طرفی نتایج حاصل از کاربران مختلف با استفاده از روش دستی با یکدیگر تفاوت دارند لذا استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی خودکار از همیت بالایی برخوردار است که با انتخاب مناسب‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توان با صرف کم‌ترین زمان و هزینه، نتایج خوبی به‌دست آورد. در این پژوهش سعی شده است که از مدلی کاربردی برای برای برآورد دبی جریان رودخانه استفاده شود و الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی پارامترها آزمون شود. لذا، هدف از این پژوهش حاضر مقایسه و ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی با استفاده از مدل بارش-رواناب SIMHYD است.

2-مواد و روش

2-1-منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کوزه‌تپراقی در مختصات جغرافیایی ″48°22′01 تا ″48°30′00 طول شرقی و ″38°07′28 تا ″38°03′01 عرض شمالی با مساحت 805/70 کیلومترمربع و محیط 148/98 کیلومتر در قسمت جنوبی اردبیل و قسمت شمالی شهرستان کوثر را فراگرفته و بخش زیادی از شهرستان نیر را در بر می‌گیرد. این حوضه با حداکثر و حداقل ارتفاع از سطح دریا به‌ترتیب 2549 و 1378 متر بوده و حداقل و حداکثر مقدار بارش در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب برابر 318 و 580 میلی‌متر بوده و هم‌چنین حداکثر و حداقل دمای هوا هم 9/4 و 4/3 درجه سانتی‌گراد بوده است. از لحاظ شکل ظاهری، این حوضه کشیده بوده و دارای ضریب فشردگی برابر با 1/47 است. سیمای سرزمین حوضه آبریز کوزه‌تپراقی را مراتع، زراعت، برونزد سنگی و مسکونی به‌ترتیب با مقدار 29/13، 66/57، 3/50 و 0/80 درصد تشکیل داده است (قربانی و همکاران، 1399: 66).



شکل (1): موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه در ایران و استان اردبیل

Fig. (1): The location of the study area in Iran and Ardabil Province

2-2- مدل بارش-رواناب SIMHYD

برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب مدل‌های زیادی وجود دارد که همه آن‌ها برای واسنجی نیاز به حداقل داده‌های مشاهداتی بارش و رواناب دارند (آقابیگی و همکاران، 1398؛ صادقی‌طبس و همکاران، 1393: 131). مدل‌های مختلفی در بخش هیدرولوژی با هدف تعیین بارش-رواناب استفاده شده است برای مثال؛ کتابخانه نرم‌افزاری بارش-رواناب[1] (RRL) نرم‌افزاری که توسط مرکز تحقیقات هیدرولوژی آبخیز[2] (CRCCH) در استرالیا تهیه شده و حاوی چندین مدل یکپارچه بارش-رواناب شامل مدل‌های AWBM ، SMAR، Tank، Sacramento است. در این تحقیق از مدل SIMHYD یک مدل یکپارچه مفهومی بارش رواناب است که در استرالیا توسعه یافته و شامل سه زیرمدل برگاب، رطوبت خاک و آب زیرزمینی و فرآیند روندیابی است که به‌طور گسترده در حوضه‌های فاقدآمار در مناطق مختلف اقلیمی استفاده شده است (کی و همکاران، 2020: 2). قابل ذکر است که مدل SIMHYD نسخه ساده شده مدل بارش-رواناب روزانه HYDROLOG است که در سال 1972 میلادی توسعه یافته بود. مدل مذکور دارای تعدادی پارامتر قابل کنترل است که با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل (ETP) در مقیاس روزانه، رواناب روزانه را شبیه‌سازی می‌کنند (یو و ژو، 2015: 1203). این مدل اساساً دو بخش مربوط به جریان پایه و نفوذ مازاد دارد. تعداد عوامل ورودی آن در مقایسه با مدل HYDROLOG به تعداد کم‌تری تقلیل داده شده است، به‌نحوی‌که مدل اولیه دارای 17 پارامتر و مدل جدید

1- Rainfall Runoff Library

2- Cooperative Research Centre For Catchment Hydrology

آن فقط دارای 9 پارامتر است (رزاقیان و همکاران، 1397: 217). در مدل SIMHYD از نه پارامتر شامل: ضریب جریان پایه، ضریب نفوذ، شکل نفوذ، آستانه نفوذپذیری، ضریب رواناب سطحی، کسرنفوذ، ظرفیت ذخیره برگاب، ضریب تغذیه و ظرفیت ذخیره رطوبت خاک استفاده می‌شود. این پارامترها به وسیله معادلاتی مختلفی به یکدیگر مربوط می‌شوند و از طریق واسنجی به دست می‌آیند که روابط ساده شده آنها در جدول 1، ارائه شده است (گودرزی و همکاران،1391؛ رزاقیان و همکاران، 1397).

جدول (1): روابط مورد استفاده در مدل مفهومی SIMHYD

Table (1): Relationships used in the conceptual model SIMHYD

تبخیر و تعرق پتانسیل	PET = areal potential evapotranspiration (input data)
بارش اضافی	EXC = RAIN – INSC, EXC > 0
نفوذ	INF = lesser of {COEFF exp (-SQ × SMS/SMSC), EXC }
رواناب زیرقشری	SRUN = EXC - INF
جریان زیرقشری و مازاد اشباع	INT = = SUB × SMS/SMSC × INF
تغذیه آب زیرزمینی	REC = CRAK × SMS/SMSC × (INF - INT)
جریان رطوبت خاک	SMF = INF - SRUN – REC
تبخیر و تعرق	ET = lesser of {10 × SMS/SMSC, PET}
جریان پایه	BAS = K × GW

در این روابط، PET تبخیر و تعرق پتانسیل واقعی، INSC ظرفیت ذخیره برگاب بر حسب میلی‌متر، COEFF حداکثر ضریب نفوذ بر حسب میلی‌متر، SQ کسر نفوذ، SUB ضریب تغذیه، GW آب زیرزمینی، RAIN بارش، INF نفوذ، SMS ذخیره رطوبت خاک، SMSC محتوای ذخیره رطوبت خاک، CRAK ضریب رواناب سطحی و K ضریب جریان پایه است.

2-3- داده‌های ورودی واسنجی مدل

در این پژوهش برای ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی مدل، از رواناب مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری کوزه‌تپراقی، آمار بارش روزانه میانگین ایستگاه‌های داخل حوضه، تبخیر و تعرق میانگین ایستگاه‌های داخل حوضه، برای شبیه‌سازی مدل استفاده شد. بر اساس آمار ایستگاه هیدرومتری کوزه‌تپراقی دوره زمانی 10 ساله برای شبیه‌سازی مدل استفاده شده است به‌طوری‌که یک سال برای دوره warmup و هفت سال جهت واسنجی (2002 تا 2008) و پنج سال (2009 تا 2011)جهت فرآیند صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد. محدوده تغییرات مشاهداتی ورودی مدل با میانگین، مدت زمان، انحراف معیار در جدول 2 آورده شده است.

جدول (2): مشخصات اطلاعات ورودی مدل SIMHYD

Table (2): Specifications of SIMHYD model input information

متغیر	شروع	پایان	طول	اعداد گمشده	مجموع (میلی‌متر)	میانگین (میلی‌متر)	انحراف معیار (میلی‌متر)	چولگی (میلی‌متر)
تبخیر	2002/1/1	2011/12/31	3652	0	13972/500	3/826	3/624	0/382
بارش	2002/1/1	2011/12/31	3652	0	2807/734	0/769	2/600	5/205
دبی مشاهداتی	2002/1/1	2011/12/31	3652	1	70/315	0/019	0/081	7/661

2-4- الگوریتم بهینه‌سازی واسنجی خودکار مدل مفهومی SIMHYD

در واقع، الگوریتم یادگیری، تابعی است که مجموعه‌ای از داده‌ها با تابع f را از طریق بهینه‌سازی یک معیار براساس پارامترهای (Θ) ایجاد می‌کند. مهم‌ترین موضوع در بهینه‌سازی رابطه تابع هدف $f(x,\Theta)$ است و مقدار حداقل خاص $f(x,\hat{e})$ در داخل بازه‌ای از مقادیر قابل قبول پارامترها (S) است. الگوریتم‌های مختلفی از جمله الگوریتم ژنتیک، الگوی جستجو، الگوی جستجو چندشروعه، الگوریتم روزنبروک، بهینه‌سازی چندشروعه روزنبرک، تکامل رقابت جامع، نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت الگوریتم‌های مختلفی برای بهینه‌سازی واسنجی‌مدل‌های هیدرولوژیک وجود دارد. در این پژوهش کارایی 7 الگوریتم در بهینه‌سازی پارامترهای واسنجی مدل SIMHYD مورد بررسی قرار گرفته است که این الگوریتم‌ها در زیر شرح داده شده است.

نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت: در این روش بهینه‌سازی فضای پارامتر برای هر پارامتر به تعداد مشخصی از فواصل بین حداقل و حداکثر کران تقسیم می‌شود. بهینه‌سازی با انتخاب تصادفی از گزینه‌های موجود برای هر پارامتر و سپس اجرای مدل و ارزیابی تابع هدف تا بهترین تابع هدف به‌عنوان راه‌حل بهینه در نظر گرفته می‌شود.

الگوریتم ژنتیک: این روش در میان مجموعه‌ای از نقاط کدگذاری شده، جستجو می‌کند و از قوانین احتمال انتقال استفاده می‌کند (روحانی و فراهانی مقدم، 1392). انتظار می‌رود نقاط ایجاد شده در مجاورت بهینه نسبت به نقاط اصلی متمرکز شوند. نقاط جدید، که دوباره می‌توانند برای ایجاد یک نقطه دیگر و غیره مورد استفاده قرار گیرند و نقاط بیش‌تر و بیش‌تری را در مجاورت بهینه به‌دست آورند.

الگوی جستجو: مشکلات دستیابی به بهینه‌های محلی را می‌توان با استفاده از یک شروع چندگانه برطرف کرد. در الگوی جستجو: 1) با مقدار اولیه جستجو شروع می‌شود 2) تابع هدف به ازای افزایش و کاهش تدریجی مقدار فعلی ارزیابی می‌شود. 3) پس از بهبود تابع هدف در یک جهت، پارامترها تنظیم می‌شود. 4) افزایش پارامترها در جهت بهینه و ارزیابی مجدد هدف. 5) تکرار مجدد مراحل قبلی.

الگوی جستجوی چندشروعه: این روش با تقسیم مقادیر پارامتر به تعداد مشخصی از افزایش‌ها بین کران‌های مشخص شده، برای هر یک از این نقاط شروع ممکن یک جستجوی الگو انجام می‌شود. بهترین بهینه جستجوی الگو به‌عنوان بهینه‌جهانی در نظر گرفته می‌شود.

الگوریتم روزنبروک: در این روش جستجو در فضای پارامترها در امتداد مجموعه‌ای متعارف از بردارها انجام می‌شود.

بهینه‌سازی چندشروعه روزنبروک: این روش با تقسیم مقادیر پارامتر به تعداد مشخصی از افزایش‌ها بین کران‌های مشخص شده عمل می‌کند. برای هر یک از این نقاط شروع ممکن جستجوی روزنبروک انجام می‌شود. بهترین بهینه از جستجوهای روزنبروک به عنوان بهینه جهانی در نظر گرفته می‌شود.

الگوریتم تکامل رقابتی جامع: این روش رویکردی موثر برای واسنجی خودکار است.

2-5- بهینه‌سازی پارامترهای مدل

در این پژوهش از انواع الگوریتم بهینه‌سازی جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل استفاده شد. طوری که با وارد کردن اطلاعات ورودی و واسنجی کردن و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مدل با استفاده از تمام الگوریتم‌ها انجام شد و کارایی مدل مورد ارزیابی قرار گرفت و مناسب‌ترین الگوریتم برای شبیه‌سازی دبی جریان در مدل SIMHYD و در حوضه آبریز یامچی تعیین شد (گلشن و همکاران، 1395: 67).

1-5-2- معیارهای ارزیابی واسنجی و صحت‌سنجی مدل

برخی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی را نمی‌توان به‌طور مستقیم از طریق تخمین و ویژگی‌های حوضه به‌دست آورد که باید واسنجی شوند. برای واسنجی مدل SIMHYD، 8 تابع هدف اولیه وجود دارد. در این پژوهش جهت ارزیابی کارایی مدل و روش‌های بهینه‌سازی، از ضریب نش-ساتکلیف (NS) استفاده شد (گودرزی و همکاران، 1391: 26).

مقدار شاخص NS (رابطه 1) بین منفی بی‌نهایت تا 1+ (تطابق کامل) متغیر است، که در آن، Q_{sim}و Q_{obs} به‌ترتیب جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است. (ژانگ و شیو، 2009: 2؛ موریاسی و همکاران، 2007: 886)

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs} - Q_{obs})^2} \quad (1)$$

3-یافته‌ها و بحث

3- 1- واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT

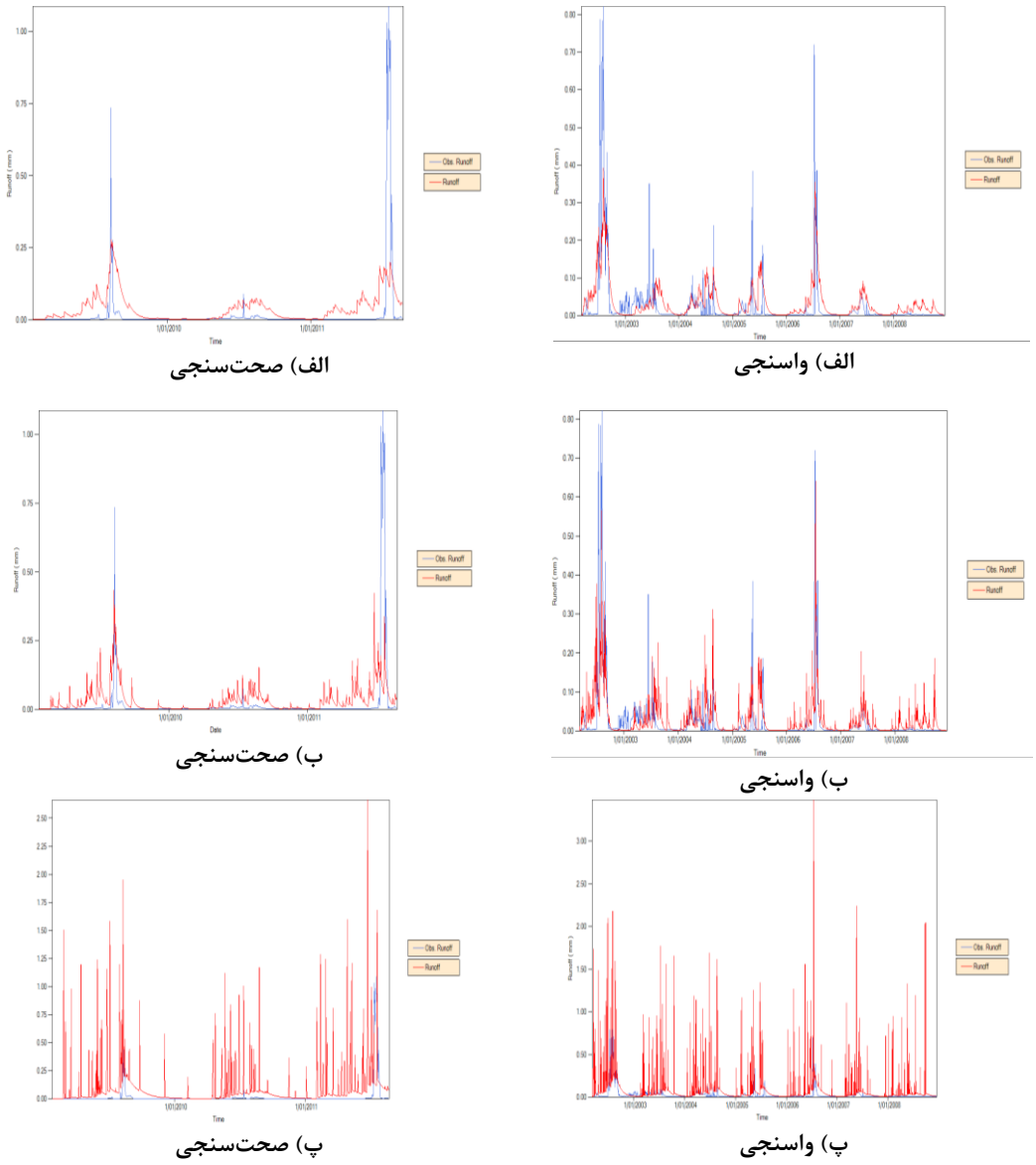
برای شبیه‌سازی رواناب ایستگاه کوزه‌تپراقی با مدل SIMHYD از نرم‌افزار RRL استفاده شد. برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل SIMHYD و هم‌چنین جهت ارزیابی عملکرد بهترین الگوریتم بهینه‌سازی، از همه الگوریتم‌ها برای واسنجی مدل استفاده شد. بازه مقادیر استفاده شده برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل یکسان است که با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، مقادیر اولیه، حداکثر، حداقل و بهینه برای هر پارامتر تعیین شد (جدول 3).

برای ارزیابی نتایج بهینه‌سازی پارامترهای مدل و عملکرد آماری مدل، از تابع هدف اولیه نش-ساتکلیف (NS) استفاده شد. نتایج ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده، در جدول (3) ارائه شده است. نمونه‌ای از واسنجی انجام شده، به‌منظور ارزیابی دقیق الگوریتم‌های مورد استفاده، منحنی‌های تغییرات دبی جریان برای الگوریتم‌های مختلف مدل، در شکل (2) ارائه شده است.

جدول (3): مقادیر اولیه، حداکثر، حداقل و بهینه در مرحله واسنجی مدل SIMHYD (یو و ژو، 2015)

Table (3): Initial values, maximum, minimum and optimal in the calibration stage of SIMHYD model (Yu and Zhou, 2015)

پارامتر	توصیف	مقادیر پیش‌فرض	پیش‌قرض کمینه	پیش‌فرض بیشینه	الگوریتم ژنتیک	الگوی جستجوی چند شروعه	نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت	بهینه‌سازی چند شروعه روزنبروک	روزنبرک	تکامل رقابتی جامع	الگوی جستجو
K	ضریب جریان پایه	0/3	0/0	1/0	0/05	0/11	0/03	0/06	0/06	0/08	0/08
	آستانه نفوذناپذیری	1	0	5	2/76	4/63	4/71	0/91	2/33	4/19	4/69
COEFF	ضریب نفوذ	200	0	400	351/37	104/57	134/32	220/47	400	30/313	26/313
SQ	ضریب شکل نفوذ	3	0	10	1/09	0/36	2/29	2/73	1/16	2/77	1
CRAK	ضریب جریان سطحی	0/1	0/0	1/0	0	0/01	0/04	3/51	0	3/68	3/68
	کسر نفوذ	0/9	0/0	1/0	1	0/99	0/90	1	1	0/98	0/98
INSC	ظرفیت ذخیره برگاب	1/5	0/0	5/0	0/72	1/11	0/86	3/16	0/72	1/55	2/05
SUB	ظرفیت تغذیه	0/2	0/0	1/0	0/16	0/19	0/28	0/23	0/08	0/25	0/25
SMSE	ظرفیت ذخیره رطوبت خاک	320	1	500	251/47	462/99	335/57	288/02	190/11	4/43697	4/43697



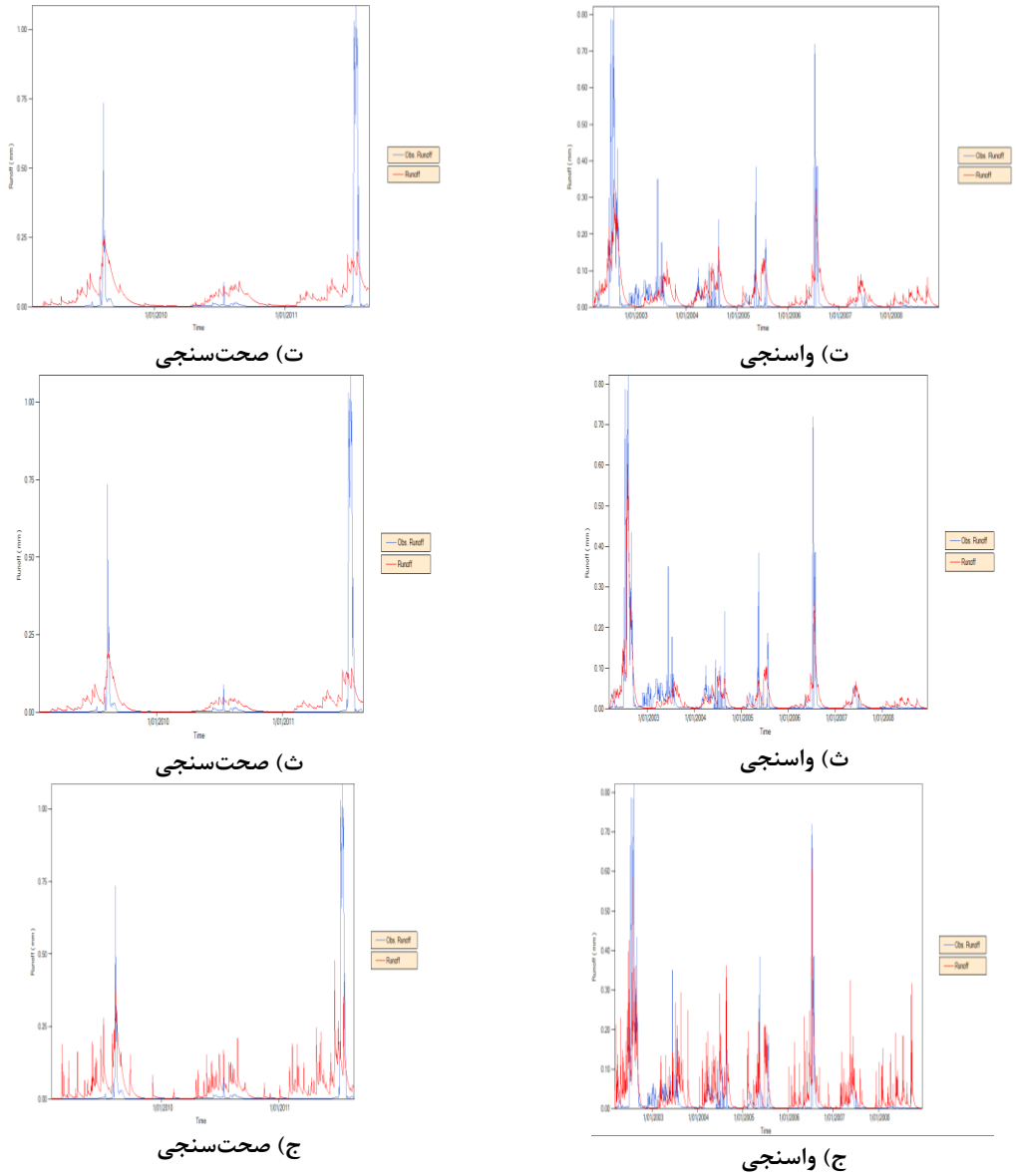
الف) واسنجی — الف) صحت‌سنجی

ب) واسنجی — ب) صحت‌سنجی

پ) واسنجی — پ) صحت‌سنجی

شکل (2): منحنی‌های تغییرات دبی جریان در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای دوره 2011-2002 با استفاده از الگوریتم ها الف) الگوریتم ژنتیک ب) الگوی جستجوی چندشروعه پ) نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت ت) بهینه‌سازی روزنبروک چندشروعه ث) روزنبروک ج) تکامل رقابتی جامع (SCE-UA) چ) الگوی جستجو

Figure (2): Flow rate change curves in the calibration and validation phase for the period 2002-2011 using algorithms a) Genetic algorithm b) Multi-source search pattern c) Uniform random sampling d) Rosenbrook optimization Multi-start e) Rosenbrook f) SCE-UA g) Search pattern



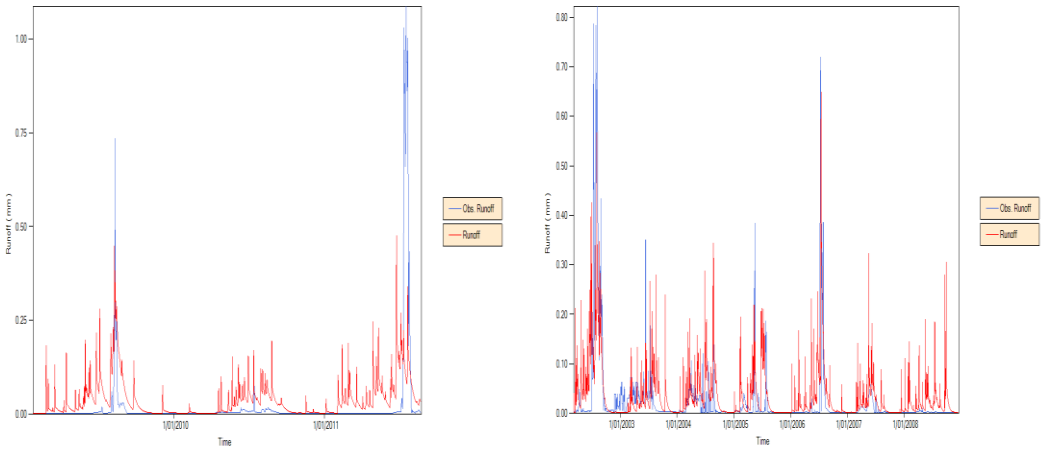
ت) صحت‌سنجی ت) واسنجی

ث) صحت‌سنجی ث) واسنجی

ج) صحت‌سنجی ج) واسنجی

شکل (2): منحنی‌های تغییرات دبی جریان در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای دوره 2011-2002 با استفاده از الگوریتم ها الف) الگوریتم ژنتیک ب) الگوی جستجوی چندشروعه پ) نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت ت) بهینه‌سازی روزنبروک چندشروعه ث) روزنبروک ج) تکامل رقابتی جامع (SCE-UA) چ) الگوی جستجو

Figure (2): Flow rate change curves in the calibration and validation phase for the period 2002-2011 using algorithms a) Genetic algorithm b) Multi-source search pattern c) Uniform random sampling d) Rosenbrook optimization Multi-start e) Rosenbrook f) SCE-UA g) Search pattern



چ) صحت‌سنجی　　چ) واسنجی

ادامه شکل (2): منحنی‌های تغییرات دبی جریان در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای دوره 2011-2002 با استفاده از الگوریتم ها الف) الگوریتم ژنتیک ب) الگوی جستجوی چندشروعه پ) نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت ت) بهینه‌سازی روزنبروک چندشروعه ث) روزنبروک ج) تکامل رقابتی جامع (SCE-UA) چ) الگوی جستجو

Figure (2): Flow rate change curves in the calibration and validation phase for the period 2002-2011 using algorithms a) Genetic algorithm b) Multi-source search pattern c) Uniform random sampling d) Rosenbrook optimization Multi-start e) Rosenbrook f) SCE-UA g) Search pattern

نتایج ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی پارامترها در جدول 4ارائه شده است و مقادیر میانگین و انحراف معیار در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول 5 ارائه شده است.

جدول (4): ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی پارامترها

Table (4): Evaluate the performance of parameter optimization algorithms

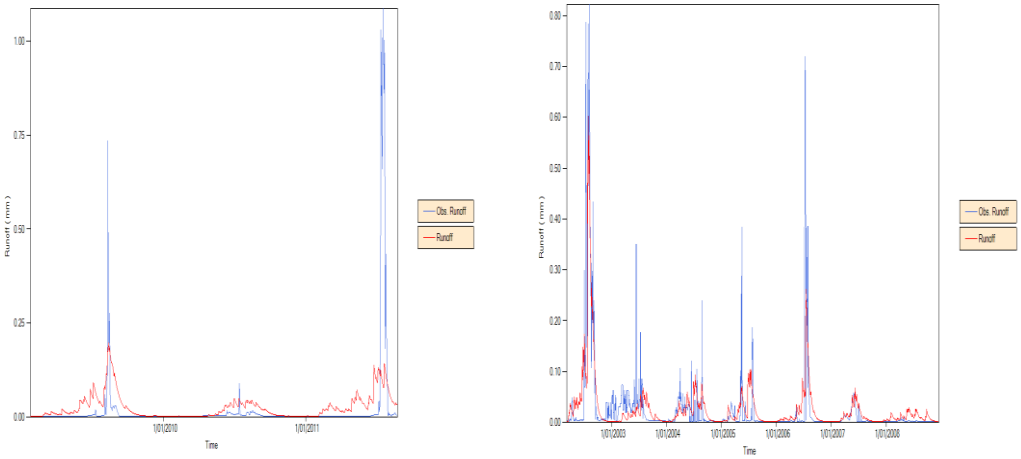
تابع هدف	دوره	الگوریتم ژنتیک	الگوی جستجوی چندشروعه	نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت	بهینه‌سازی چندشروعه روزنبروک	روزنبرک	تکامل رقابتی جامع	الگوی جستجو
شاخص نش-ساتکلیف	واسنجی	0/42	0/31	-8/57	0/38	0/56	0/23	0/24
	صحت‌سنجی	0/13	0/09	-4/58	0/13	0/16	0/04	0/05
ضریب‌همبستگی	واسنجی	0/65	0/56	0/24	0/63	0/75	0/54	0/53
	صحت‌سنجی	0/41	0/34	0/13	0/41	0/42	0/34	0/34

جدول (5): مقادیر میانگین و انحراف معیار در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی

Table (5): Mean values and standard deviation in calibration and validation courses

روش‌های بهینه‌سازی	واسنجی			صحت‌سنجی		
	میانگین رواناب مشاهداتی	میانگین رواناب شبیه‌سازی شده	انحراف معیار	میانگین رواناب مشاهداتی	میانگین رواناب شبیه‌سازی شده	انحراف معیار
الگوریتم ژنتیک	0/022	0/031	3/175	0/018	0/038	2/093
الگوی جستجوی چندشروعه	0/022	0/026	0/049	0/018	0/032	0/049
نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت	0/022	0/085	0/230	0/018	0/099	0/228
بهینه‌سازی چندشروعه روزنبروک	0/023	0/032	0/045	0/018	0/039	0/044
روزنبروک	0/022	0/024	0/055	0/018	0/025	0/033
تکامل رقابتی جامع	0/022	0/032	0/057	0/018	0/039	0/057
الگوی جستجو	0/022	0/031	0/055	0/018	0/038	0/055

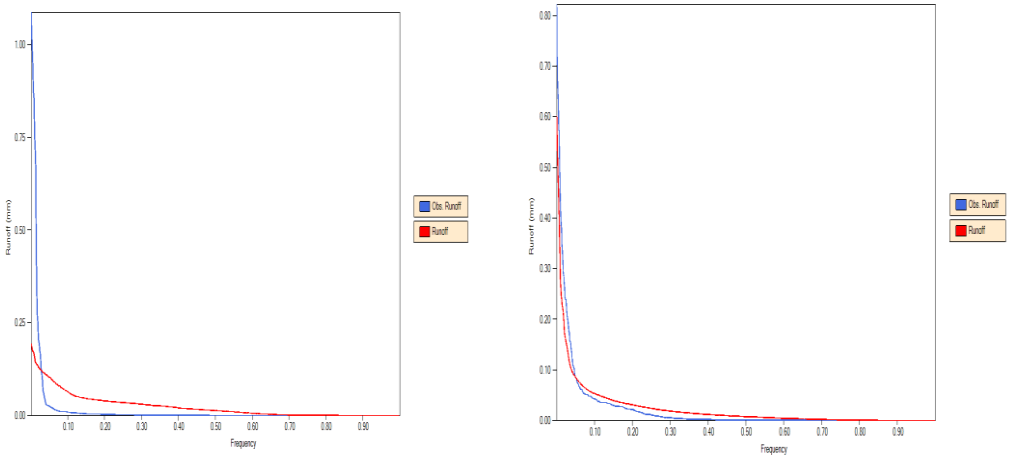
میانگین دبی شبیه‌سازی توسط الگوریتم‌های ژنتیک، جستجوی الگوی چندساله، نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت، روزنبرک چندشروعه، روزنبرک، تکامل رقابتی جامع، الگوی جستجو به‌ترتیب برابر با 0/031، 0/023، 0/085، 0/032، 0/024، 0/032، 0/031 متر مکعب بر ثانیه است، که نزدیک به دبی متوسط مشاهداتی ($0/022 m^3/s$) هستند. نتایج آماری و گرافیکی مدل SIMHYD با استفاده از تمام الگوریتم‌های بهینه‌سازی، نشان‌دهنده‌ی عملکرد قابل‌قبول‌تر الگوریتم روزنبروک نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد استفاده است (شکل2). با توجه به کارایی الگوریتم‌های مورد استفاده (جدول 4) از الگوریتم روزنبروک برای ایستگاه کوزه‌تپراقی استفاده شد. دبی جریان روزانه برای دوره آماری واسنجی از سال 2002 تا 2008 و برای دوره آماری صحت‌سنجی از سال 2009 تا 2011 انتخاب شد که نتایج در شکل (3 و 4) ارائه شده است.



ب) الف)

شکل (3): نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل SIMHYD الف) دوره 2002-2008 ب) دوره 2009-2011

Figure (3): Results of calibration and validation of SIMHYD model a) period 2002-2008 b) period 2009-2011



ب) الف)

شکل (4): نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل SIMHYD الف) دوره 2002-2008 ب) دوره 2009-2011

Figure (4): Results of calibration and validation of SIMHYD model a) Period 2002-2008 b) Period 2009-2011

بهینه‌سازی پارامترهای واسنجی در مدل‌های بارش-رواناب از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل SIMHYD که هم مکانیسم تغذیه و مکانیسم نفوذپذیری بالا را در نظر می‌گیرد و دارای ساختار ساده، دارای پارامترهای کم، نیاز به داده‌های کم و سازگاری خوبی دارد، بهینه‌سازی پارامترها به‌صورت خودکار و با تعیین الگوریتم‌های مختلف انجام می‌شود (سان و همکاران، 2021: 13). با بررسی نتایج و جدول‌های معیارهای ارزیابی به‌طورکلی

می‌توان گفت الگوریتم‌های مورد استفاده در مدل SIMHYD از کارایی مناسبی برخودارند. بر اساس نتایج، الگوریتم نمونه‌گیری تصادفی یکنواخت با تابع هدف 8/57- در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مورد استفاده از دقت پایینی برخوردار است که در مطالعات (زابینسکی، 2009: 1) نیز به این نتیجه اشاره شده است. هم‌چنین نتایج آماری نشان داد که مدل SIMHYD در بین الگوریتم‌ها، با الگوریتم روزنبروک و ژنتیک در دوره واسنجی با تابع هدف NS به‌ترتیب 0/56، 0/42 از کارایی تقریباً مناسبی در شبیه‌سازی دبی روزانه برخوردار است. در همین راستا، در مطالعات (یو و ژو، 2015؛ فرانچین و همکاران، 2015) نیز روش الگوریتم ژنتیک را برای واسنجی مدل مناسب دانسته‌اند. نتایج حاصل از هیدروگراف شبیه‌سازی رواناب و ارزیابی انجام شده توسط منحنی تداوم جریان مدل SIMHYD با الگوریتم روزنبروک، دبی خروجی از حوضه به‌خوبی شبیه‌سازی شده و بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده انطباق خوبی وجود دارد.

4-نتیجه‌گیری

مدل‌سازی بارش-رواناب اولین گام مدیریت منابع اب و یکی از ابزارهای کارآمد مدیریت و برنامه‌ریزی و شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه است. مدل SIMHYD یکی از مدل‌های مفهومی بارش-رواناب یکپارچه است که با استفاده از داده‌های ورودی روزانه، جریان دبی را با گام زمانی روزانه شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به اینکه مشکل اصلی در استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی تعداد نسبتاً زیاد پارامترها، عدم وجود درک فیریکی از آن‌ها و در واقع واسنجی این پارامترها است. کارایی مدل‌های بارش-رواناب به دقت و انتخاب مناسب پارامترهای مدل بستگی دارد (مصطفی‌زاده و عسگری، 1400). به‌دلیل زمان‌بر، هزینه‌بر بودن، عدم‌قطعیت، مقادیر برخی از پارامترهای ورودی به مدل به‌طور مستقیم برای تمام سطح حوضه قابل اندازه‌گیری نیست، لذا بهینه‌سازی پارامترهای موثر برای شبیه‌سازی، راه‌حل بهتری برای به‌دست آوردن مقدار تقریبی پارامترها است. روش‌های بهینه‌سازی به دو صورت دستی و خودکار انجام می‌شود ولی روش دستی ممکن است نیازمند صرف زمان زیاد باشد و با خطای زیادی همراه است باید کاربر از دانش و تجربه بالایی برخوردار باشد. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی با صرف زمان و هزینه کم، آشنا بودن به مشخصات منطقه مطالعاتی، امکان اندازه‌گیری پارامترهای مدل را فراهم می‌آورد که در این پژوهش کارایی هفت الگوریتم بهینه‌سازی مدل SIMHYD برای واسنجی پارامترها در شبیه‌سازی دبی جریان حوضه آبریز کوزه‌تپراقی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم‌ها از کارایی مناسبی برخوردارند و در بین این الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم روزنبروک به‌دلیل دقت بالاتر برای شبیه‌سازی جریان در دوره‌های زمانی موردنظر استفاده شد. الگوریتم روزنبروک روش خودکار فراگیری است که در بسیاری از مطالعات مدل‌سازی بارش-رواناب استفاده شده است. در مجموع می‌توان گفت که مدل مذکور کارایی قابل قبولی در شبیه‌سازی دبی روزانه جریان در حوضه آبریز کوزه‌تپراقی دارد. برخی از

دلایل وجود خطا در مدل را می‌توان به مواردی هم‌چون مساحت بالای حوضه آبریز مورد مطالعه نسبت داد. باید اشاره شود که در ورود داده‌های بارش و تبخیر-تعرق به مدل، با توجه به وجود ایستگاه‌های متعدد، حالت‌های مختلف ورود داده‌های ترکیبی از ایستگاه‌های مختلف آزمون شد. علاوه براین، سهم اثر ایستگاه‌های مختلف با استفاده از روش تیسن مشخص شد و در تعیین مقادیر میانگین ورودی مورد آزمون قرار گرفت. لذا بخشی از خطای مدل‌سازی را می‌توان به عدم همزمانی داده‌های بارش و رواناب با توجه به تعدد ایستگاه مربوط دانست. علاوه براین، می‌توان گفت که احتمال دارد بخشی از جریان در فصول کم آب که نیاز به استفاده از آب توسط بهره‌برداران وجود دارد، در اثر انحراف جریان در ثبت داده‌ها خطا ایجاد کرده باشد که در نتایج مدل‌سازی ایجاد خطا خواهد نمود.

5-منابع

Aghabeigi, N., Esmali-Ouri, A., Mostafazadeh, R., Gholshan, M. (2020). The Effects of Climate Change on Runoff Using IHACRES Hydrologic Model in Some of Watersheds, Ardabil Province. Irrigation and Water Engineering, 10(2):181-192. (In Persian).

Bergstra, J., & Bengio, Y. (2012). Random search for hyper-parameter optimization. *Machine Learning Research*, 13, 281-305.

Bormann, B., Breuer, L., Giertz, S., Huisman, J.A., & Viney, N.R. (2009). Uncertainties in environmental modelling and consequences for policy makingpart of the series NATO science for peace and security series c: environmental security. *Chapter: Spatially explicit versus lumped models in catchment hydrology–experiences from two case studies*, 3-2.

Dargaribi, F., Khorsandi Kohanstani, Z., Mozayyn, M., & Arman, N. (2017). Evaluation of the efficiency of GR4J and GR2M rainfall-runoff models in Darehtakht basin runoff simulation. *Watershed Engineering and Management,* 9(3), 360-370. (In Persian)

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

Esfandyari Darabad, F., Pourganji, Z., Mostafazadeh, R., & Aghaie, M. (2022). Comparison of effective rainfall conversion methods to surface runoff in flood hydrograph simulation of Nanehkaran watershed, Ardabil province. Hydrogeomorphology, 9(32), 86-63. doi: 10.22034/hyd.2022.50000.1624 (In Persian)

Franchini, M., Galeati, G., & Berra, S. (2015). Global optimization techniques for the calibration of conceptual rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal*, 43 (3), 443-458.

Francis, H., Chiew, S., Zhang, H., and Potter, N. (2018). Rainfall-Runoff modelling considerations to predict stream flow characteristics in ungauged catchments and under climate change. *Water*, 10(10), 1319pp.

Golshan, M., Esmaili, A., & Asadi, H. (2016). Comparison of Rosenberk, Genetics, URS, SCE-UA optimization methods to determine the parameters of the SIMHYD model for flow rate simulation. *Geography and environmental sustainability*, 18, 67-80. (In Persian)

Gorbani, A., Hazbavi, Z., Mostafazadeh, R., & Alaie, N. (2020). Analysis of the relationship between landscape metrics and soil erosion in the KoozeTapraghi watershed. *Geography and Environmental Hazards*, 36, 65-90. (In Persian)

Gudarzi, M., Jabbariyanamiri, B., & Azarnivand, H. (2018). Comparison of conceptual models in river hydrological simulation. *Natural environment*, 71(4), 509-521. (In Persian)

Gudarzi, M., Zahbiyun, B., Msahboani, A.R., & Kamal, A.R. (2012). Comparison of the performance of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD in simulating runoff in Qarahsu basin. *Water and irrigation management*, 7(1): 25-40. (In Persian)

Khavarian, H., Aghaie, M., Mostafazadeh, R. (2020). Predicting the effects of land use changes on the monthly flow using hydrological model and Remote Sensing in the Kouzetopraghi watershed, Ardabil. *Hydrogeomorphology*, 7(24), 19-39. doi: 10.22034/hyd.2020.37489.1512 (In Persian).

Kheirfam, H., Mostafazadeh, R., Sadeghi, S.H.R. (2013). - Daily discharge prediction using IHACRES model in some watersheds of Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research*, 4(7):114-127. (In Persian).

Mohammadivand, M., Araginezhad, Sh., Ebrahimi, K., & Modaresi, F. (2019). Evaluating the Performance of Sacramento, AWBM and SimHyd Models in Simulating the Imama Basin Runoff Using Automatic Genetic Algorithm Optimization Optimizer. *Iranian Soil and Water Research*, 7(50), 1759-1769. (In Persian)

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R.D., & Veith, T. L. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

Mostafazadeh, R., Asgari, E. (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 Persian).

Piramun, N., Abdollahi, Kh, Mirabbasi Najafabadi, R., & Nekuyimehr, M. (2019). Evaluation of efficiency of TANK-SIMHYD rainfall-runoff models in Beheshtabad river flow simulation. *National Conference on Rainwater Reservoir Surface Systems, Ferdowsi University of Mashhad.* (In Persian)

Qi, W., Chen, J., Li, L., Xu, Ch., Li, J., Xiang, Y., & Zhang, sh. (2020). A framework to regionalize conceptual model parameters for global hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*. https://doi.org/10.5194/hess-2020-127, 2020.

Razagiyan, H., Shahedi, K., Mohseni, B. (2018). Evaluating the efficiency of SIMHYD rainfall-runoff model under different climate change scenarios. *Watershed Management Research Journal,* 9(17), 216-224. (In Persian)

Rostamkhalaj, M., Mogaddamniya, A.R., Salmani, H., & Sepahvand, A.R. (2016). Comparative performance of precipitation-runoff models of AWBM, Sacramento, SIMHYD, SMAR, Tank. *Iranian Natural Ecosystems Quarterly*, 7(2), 47-63. (In Persian)

Ruhani, H., & Vafakhah, M. (2013). Automatic calibration of two precipitation models - tank runoff and SIMHYD using genetic algorithm. *Rangeland and watershed management*, 66(4), 521-533. (In Persian)

Sadegitebs, S., Purreza Bilandi, M., & Khazimehnezhad, H. (2015). Comparison and evaluation of global optimization methods in estimating the parameters of the daily runoff hydrological model. *Irrigation Science and Engineering*, 38(3), 130-142. (In Persian)

Said, M., Hyandye, C., Mjemah, I., & Komakech, H. (2021). Evaluation and prediction of the impacts of laud cover changes on hydrological processes in data constrained southern slopes of Kilimaujaro, Tauzanoa. *Earth*, 2, 225-247.

Sorooshian, S., Duan, Q., & Gupta, H. V. (1993). Calibration of rainfall-runoff models: application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. *Advancing Earth and Space Science*, 29(4), 1185-1194.

Sun, G., Wen, J., Yang, J., Hou, S., & Zhang, W. (2021). Study on hydrological process simulation of lumped hydrological model in Wujiang River Basin. *Earth and Environmental Science*, 826, 012-028.

Wang, G.Q., Zhang, J.Y., Pagano, T.C., Liu, Y.L., Liu, C.S., Bao, Z.X., & Jin, J.L. (2015). Using hydrological simulation to detect human- disturbed epoch in runoff. *Water Science & Technology*, 71(5), 691-699.

Yu, B., & Zhu, Z. (2015). A comparative assessment of AWBM and SIMHYD for forested watershed. *Hydrological Sciences Journal*, 60(7-8), 1200-1212.

Zabinsky, Z. B. (2009). Random Search Algorithms, Wiley Encyclopedia of Operations. *Research and Management Science*.

Zhang, Y., & Chiew, F. (2009). Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments. *Water Resources Research*, 45(7), 1-13.

Zhang, H., Yang, Q., Shao, J., & Wang, G. (2019). Dynamic stream flow simulation via online gradient-boosted regression tree. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(10), 04019041.

Zeiaei, K., esmali, A., Mostafazadeh, R., & Golshan, M. (2021). Assessing the effects of various land use change scenarios on runoff using SWAT model in the Ahl Iman watershed. Hydrogeomorphology, 8(27), 138-123. doi: 10.22034/hyd.2021.44819.1578 (In Persian)