

ارزیابی خصوصیات واسنجی مدل هیدرولوژیکی SWAT در یک حوضه

کوهستانی

بابک امین نژاد^{۱*}

aminnejad@riau.ac.ir

سیدبامداد غفوریان^۲

حسین ابراهیمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۱

چکیده

زمینه و هدف: اطلاعات دقیق در مورد رواناب آینده در یک حوضه، تصمیمات مربوط به مدیریت و منابع آب را تسهیل می‌کند و به حفظ منابع طبیعی برای توسعه پایدار کمک می‌کند. دو عامل هزینه و زمان دقیق مستقیماً با تخمین دقیق رواناب ارتباط دارند. استفاده از مدل‌های کامپیوتری برای شبیه‌سازی پدیده‌های طبیعی نظیر چرخه هیدرولوژی یکی از روش‌های کاهش هزینه و افزایش دقت می‌باشد که بسیار مورد توجه بوده است. هدف این مقاله ارزیابی روش‌های *GLUE* و *PSO* در برابر روش *SUFI-2* برای اعتبارسنجی مدل *SWAT* و بررسی دقت و عملکرد هر یک از روش‌های بهینه‌سازی ذکر شده در شبیه‌سازی های هیدرولوژیکی حوضه مورد نظر می‌باشد. **روش بررسی:** در این تحقیق برای بررسی دقت روش‌های متفاوت واسنجی و اعتبارسنجی در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز قره سو، از مدل هیدرولوژیکی *SWAT* استفاده شد که در آن مقایسه بین روش‌های *GLUE* و *PSO* با روش *SUFI-2* برای کالیبراسیون مدل مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی، در یک وضعیت یکسان، ۱۳ پارامتر حساس در همه روش‌ها انتخاب شدند. لازم به ذکر است که داده‌های مورد نیاز برای این تحقیق از داده‌های جهانی (وبسایت مدل *SWAT*) و ملی (شرکت مدیریت منابع آب) در پاییز سال ۱۴۰۰ جمع‌آوری شدند.

یافته‌ها: هر سه روش *GLUE* و *PSO* با روش *SUFI-2* قادر به شبیه‌سازی رواناب با R^2 و NSE قابل قبول بودند (بالای ۰/۷) و

تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که Sol_K ، CH_N2 و $CN2$ حساسیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها دارند.

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن. * (مسوول مکاتبات)

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن.

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس.

بحث و نتیجه گیری: اگرچه الگوریتم‌های *GLUE* و *PSO*، *SUFI-2* می‌توانند اختلاف بین داده‌های مشاهده ای و شبیه سازی شده را کاهش دهند، اما عملکرد الگوریتم *SUFI-2* در شبیه سازی رواناب دقیق تر از الگوریتم های دیگر است. بنابراین پیشنهاد می شود که از این الگوریتم برای پیش بینی رواناب استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: قره سو، مدل *SWAT*، مدل فیزیکی، رواناب، زاگرس.

Evaluation of calibration characteristics of SWAT hydrological model in a mountainous watershed

Babak Aminnejad^{1*}

aminnejad@riau.ac.ir

S.Bamdad Ghaforian²

Hossein Ebrahimi³

Admission Date: November 22, 2022

Date Received: December 10, 2021

Abstract

Background and Objective: Accurate data about runoff in the future in a watershed facilitates managers' decisions in water-related decisions and helps conserve natural resources for sustainable development. The two factors of cost and exact time are directly related to accurate runoff estimation. Using computer models to simulate natural phenomena such as the hydrological cycle is one way to reduce costs and increase accuracy.

Material and Methodology: The information for this research was obtained through the SWAT model website and global data. This study evaluates the accuracy of different calibration and validation methods in the hydrological simulation of Qarasu watershed, the SWAT (hydrological model) and a comparison between GLUE and PSO methods with the SUFI-2 method were used to calibrate the SWAT model. For simulation, 13 specific parameters were selected in all methods in the same situation. It should be noted that the data required for this research were collected from (SWAT model website) and (Water Resources Management Company).

Findings: All three methods were able to simulate runoff with acceptable R^2 and NSE results (above 0.7), and the sensitivity analysis showed that Sol_K, CH_N2 and CN2 were more sensitive than other parameters.

Discussion and Conclusion: Although the SUFI-2, PSO, and GLUE algorithms can reduce the difference between the observed and simulated data, the performance of the SUFI-2 algorithm in runoff simulation is more accurate than other algorithms. Therefore, it is suggested to use this algorithm to predict runoff.

Key words: Qare-su, SWAT model, Physical model, Runoff, Zagros

1-Assistant professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Iran.
**(Corresponding Author)*

2- PhD candidate, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University Iran.

3- Associate professor, Department of Water Science and Engineering, Shahr-Ghods Branch, Islamic Azad University, Iran.

مقدمه

رواناب یکی از مهم ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی است و در هر حوضه ای، یکی از ضروری ترین اقدامات برآورد رواناب برای برنامه ریزی دقیق مدیریت منابع آب و درک فرآیند بارش- رواناب است (۱). مدل سازی بارش و رواناب بخش مهمی از تحقیقات جهانی در زمینه هیدرولوژی آب های سطحی است. با وجود تلاش های گسترده برای جمع آوری داده های هیدرولوژیکی، هنوز مناطقی از جهان به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک هستند که فاقد آمار هیدرولوژیکی به ویژه آمار ایستگاه های هیدرومتری هستند (۲).

استفاده از فناوری های نوین و مدل های هیدرولوژیکی برای شبیه سازی منابع آب و اجزای آب از جمله روش های کاهش تقاضا و کاهش تنش آبی است، بنابراین پیش بینی مناسب و مطمئن جریان می تواند برای مدیریت منابع آب و تخصیص برنامه ریزی بسیار سودمند باشد، زیرا دقت و مهارت در مدل پیش بینی جریان تأثیر مستقیمی بر تصمیم گیری های مربوط به مدیریت منابع آب دارد (۳). از آنجا که اندازه گیری تمام داده های مربوط به سیستم ها و فرآیندهای هیدرولوژیکی به دلایل مختلف از جمله ناهمگونی مکانی و زمانی امکان پذیر نیست و روش های اندازه گیری پرهزینه و زمان بر هستند، لذا مدل های هیدرولوژیکی این فرصت را برای ما فراهم می کند تا با تغییر متغیرها و پارامترهای سیستم، بتوانیم درک بهتری از تعامل بین آنها و سیستم داشته باشیم (۴). مدل های هیدرولوژیکی در سال های اخیر به عنوان یک ابزار مفید جهت مدیریت آب در حوضه های آبریز به کار گرفته شده اند. هریک از مدل های هیدرولوژیکی دارای نقاط قوت و ضعف هستند. از دیدگاه شبیه سازی جامع حوضه های آبریز، مدل های توزیعی و نیمه توزیعی برتری بیشتری نسبت به مدل های یکپارچه دارند (۵).

مدل های توزیعی و نیمه توزیعی نظیر *Soil and Water Variable Assessment Tool (SWAT)* و *Infiltration Capacity (VIC)* می توانند به شبیه سازی تمام اجزای هیدرولوژی حوضه آبریز بپردازند. از این روی این مدل ها دارای ارجحیت بالاتری در شبیه سازی هیدرولوژیکی هستند. اما این مدل ها نیاز به داده های فراوانی جهت شبیه

سازی هیدرولوژیکی دارند (۶). مدل های توزیعی و نیمه توزیعی دارای پارامترهای فراوانی هستند و جهت استفاده بهینه از این مدل ها، بایستی این پارامترها مورد واسنجی و اعتبار سنجی قرار گیرند. اعتبار سنجی و واسنجی در حال حاضر با استفاده از جدیدترین روشهای بهینه سازی در حال انجام می باشد و پژوهش های جدیدی هر ساله به بررسی این روش ها می پردازند. روش *SUFI-2* به عنوان یک روش قابل اطمینان و سریع برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل *SWAT* شناخته شده است (۶).

اعتبارسنجی به مفهوم قرار دادن مقادیر تقریبی برای هر پارامتر است تا یک مدل هیدرولوژیکی را با داده های اندازه گیری شده مانند جریان رودخانه مقایسه کند تا مدل آماده استفاده برای اجرای سناریوها شود. در طول دهه های گذشته، تحقیقات زیادی چالش های مربوط به اعتبارسنجی را ارزیابی کرده اند. توانایی اندازه گیری عدم قطعیت ها در مرحله اعتبارسنجی برای تمام اجزای چرخه هیدرولوژیکی و محدودیت در روش های جستجو اعداد تصادفی در مرحله اعتبارسنجی از این موارد هستند. معروف ترین روش های تولید این اعداد تصادفی روش های مونت کارلو، زنجیره مارکوف، و مربع لاتین هستند. مقایسه الگوریتم های *SUFI-2* و *GLUE* را می توان در مطالعات نکونگه^۱ و همکاران (۲۰۱۶) مشاهده کرد که در ناحیه حوضه تانا در کنیا ارزیابی شده است. آن ها اثر این الگوریتم ها را در کاهش عدم قطعیت پارامترهای حساس در مقایسه حوضه بررسی کرده اند. سرانجام، بر اساس نتایج آماری به دست آمده از شبیه سازی هر یک از روش های فوق، الگوریتم *SUFI-2* برتر از الگوریتم *GLUE* بود (۷).

در سال های اخیر، *PSO*، *SUFI-2*، *GLUE*، *MCMC* و بسیاری از الگوریتم های دیگر برای فرآیند اعتبارسنجی مدل های هیدرولوژی استفاده شده اند (۸-۶). مدل *SWAT* یکی از محبوب ترین مدل های هیدرولوژیکی در بین محققان است (۱، ۱۱ و ۱۲). علاوه بر این، نرم افزار *SWAT-CUP*

استفاده از رویکرد منطقه ای با روش شباهت فیزیکی، نتایج رضایت بخشی به دست آورده اند (۲۰). نتایج مطالعات یانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۹) در نروژ، نشان داد که روش شباهت فیزیکی بهترین روش در بین روش های دیگر است. مطالعات انجام شده برای شبیه سازی رواناب حوضه های آبخیز بدون آمار با استفاده از مدل SWAT در نقاط مختلف جهان و با رویکرد پهنه بندی، مقبولیت نتایج این مدل را نشان می دهد (۲۱). لای و همکاران (۲۰۲۰) نیز نتایج خوبی را در مطالعه حوضه رودخانه کایانگا با مدل SWAT برای اهداف مدیریت منابع آب ارائه دادند (۲۲).

بررسی مطالعات پیشین نشان داده است که در هر منطقه از جهان با شرایط آب و هوایی متفاوت، این روش ها در شبیه سازی های هیدرولوژیکی نتایج متفاوتی دارند. حوضه مورد مطالعه در این پژوهش از جنبه هیدرولوژیکی دارای شرایط خاص کوهستانی و یکی از سرچشمه های اصلی کرخه می باشد. هدف این مقاله ارزیابی روش های GLUE و PSO در برابر روش SUFI-2 برای اعتبارسنجی مدل SWAT می باشد. بررسی دقت و عملکرد هریک از روش های بهینه سازی ذکر شده در شبیه سازی های هیدرولوژیکی حوضه مورد نظر از ضروریات انجام این پژوهش می باشد.

مواد و روش ها

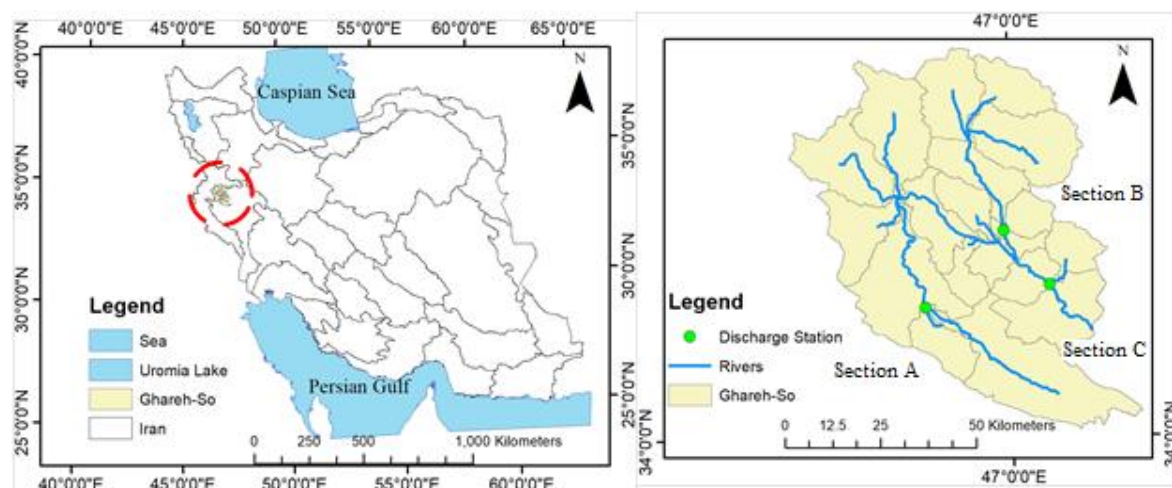
منطقه مورد مطالعه و داده های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز قره سو است که در غرب ایران واقع شده است (شکل ۱). در بلند مدت، متوسط جریان قره سو ۲۸۹ میلیون متر مکعب در سال بود. شکل ۱ مرز قره سو، رودخانه ها و ایستگاه های هیدرومتری را نشان می دهد. حوضه آبخیز قره سو یکی از پنج ناحیه اصلی حوضه رودخانه کرخه واقع در استان کرمانشاه است و به عنوان یک حوضه نیمه خشک طبقه بندی می شود. میانگین ارتفاع و دمای حوضه به ترتیب ۱۵۵۵ متر و ۱۴/۴ درجه سانتی گراد است و اوج رواناب سالانه آن از ذوب برف در بهار تولید می شود (۲۳).

توسط عباسپور و همکاران معرفی شده است (۹). برای اعتبارسنجی و اعتبار سنجی، و این نرم افزار یکی از پر استنادترین نرم افزارها در علوم هیدرولوژی است. این نرم افزار برای اعتبارسنجی و اعتبار سنجی از SUFI-2، MCMC، ParaSol، PSO و GLUE استفاده می کند (۱۳). با این حال، روش SUFI-2، به دلیل استفاده آسان و محاسبه سریع (۱۴)، برای اعتبارسنجی مدل SWAT معمول تر است.

بورا و همکاران^۱ (۲۰۰۷)، پس از مقایسه مدل SWAT با چندین مدل دیگر (در مقیاس حوضه ای) دریافتند که این مدل نتایج بهتری در شبیه سازی پیوسته حوضه های با کاربری کشاورزی به دست می دهد (۱۵). سینگ^۲ و همکاران (۲۰۱۳) مدل SWAT را جهت برآورد دبی حوضه ای در هند به کار بردند. آن ها از دو روش SUFI-2 و GLUE جهت واسنجی و بررسی عدم قطعیت مدل SWAT استفاده نمودند. بررسی نتایج نشان داد که بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی دبی ماهانه همبستگی خوبی وجود دارد در حالی که همبستگی در گام زمانی روزانه نسبتاً خوب می باشد (۱۶). بسالت پور و همکاران (۲۰۱۴) کارایی الگوریتم واسنجی شامل الگوریتم های SUFI-2، PSO و GLUE برای مدل SWAT به منظور شبیه سازی رواناب روزانه در ناحیه آبخیز کوهستانی بازفت بررسی کردند (۱۷). وو^۳ و همکاران (۲۰۱۴) از سه الگوریتم SUFI-2، ParaSol و GLUE جهت واسنجی و بررسی عدم قطعیت مدل SWAT در برآورد رواناب حوضه رودخانه ونجینگ استفاده کردند. بررسی نتایج حاصل نشان داد که روش SUFI-2 نسبت به دو روش دیگر نتایج بهتری دارد (۱۸). آنگ و یورنگ^۴ (۲۰۱۸) در مطالعه خود رواناب را در حوضه فاقد آمار کامبوج با مدل SWAT شبیه سازی کردند و نتایج قابل قبولی را گزارش کردند (۱۹). منگیستوه^۵ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه خود با هدف واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در حوضه های فاقد آمار در منطقه نیمه خشک آفریقای جنوبی با

- 1- Borah
- 2- Singh
- 3- Wu
- 4- Ang & Oeurng
- 5- Mengistu



شکل ۱- موقعیت حوضه قره سو و موقعیت شبکه آبراهه و ایستگاه های هیدرومتری

Figure 1. Location of Qare-su watershed, stream network, and discharge stations

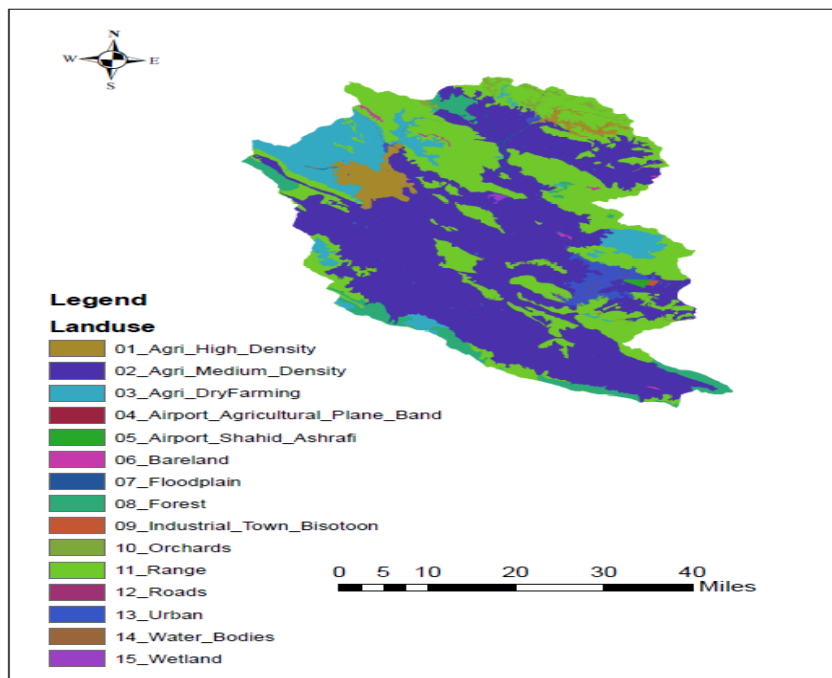
به مدل معرفی شد. از داده های رواناب ثبت شده در سه ایستگاه هیدرومتری موجود در منطقه ی مورد مطالعه برای کالیبراسیون مدل استفاده شد. جدول ۱ مشخصات ایستگاه های هیدرومتری را نشان می دهد. لازم به ذکر است که در این تحقیق، مدل از سال های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۰ کالیبره شد و سپس اعتبار سنجی آن طی سال های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۹ ارزیابی گردید. شکل ۳ و ۴ نیز به ترتیب نقشه خاک و قوم ارتفاعی حوزه مورد مطالعه را نشان می دهد.

در این تحقیق، نقشه ی خاک منطقه ی مورد مطالعه، از نقشه جهانی خاک استخراج شد که در سایت <https://swat.tamu.edu/data> در دسترس است. نقشه ی کاربری اراضی این منطقه از نقشه های تهیه شده توسط سازمان مراتع و جنگل ها استخراج گردید. شکل ۲ نقشه کاربری اراضی را با جزئیات بیشتری نشان می دهد. همچنین، داده های هواشناسی از جمله بارش روزانه و دمای حداکثر و حداقل روزانه از ایستگاه های هواشناسی موجود در منطقه از ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ در پاییز سال ۱۴۰۰ جمع آوری گردید و سپس

جدول ۱ - مشخصات ایستگاه های هیدرومتری مورد استفاده در این مطالعه

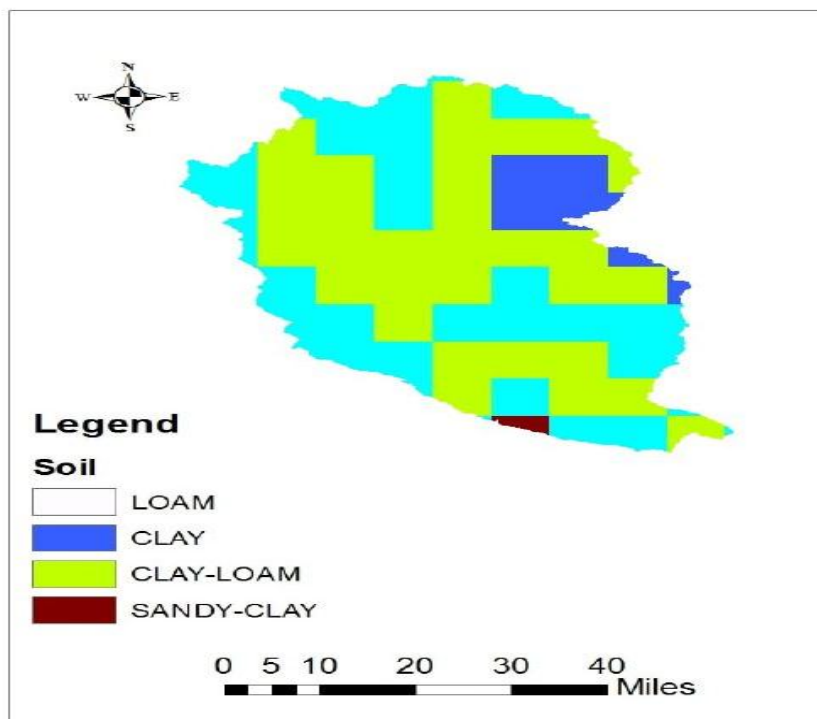
Table 1. Specifications of hydrometric stations of Qare-su Watershed

دوره زمانی	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام ایستگاه
1989-2019	34-16-00	46-48-00	ماهیدشت (Section A)
1989-2019	34-38-55	46-53-21	سرآسیاب (Section B)
1989-2019	34-14-00	47-15-00	قورباغستان (Section C)



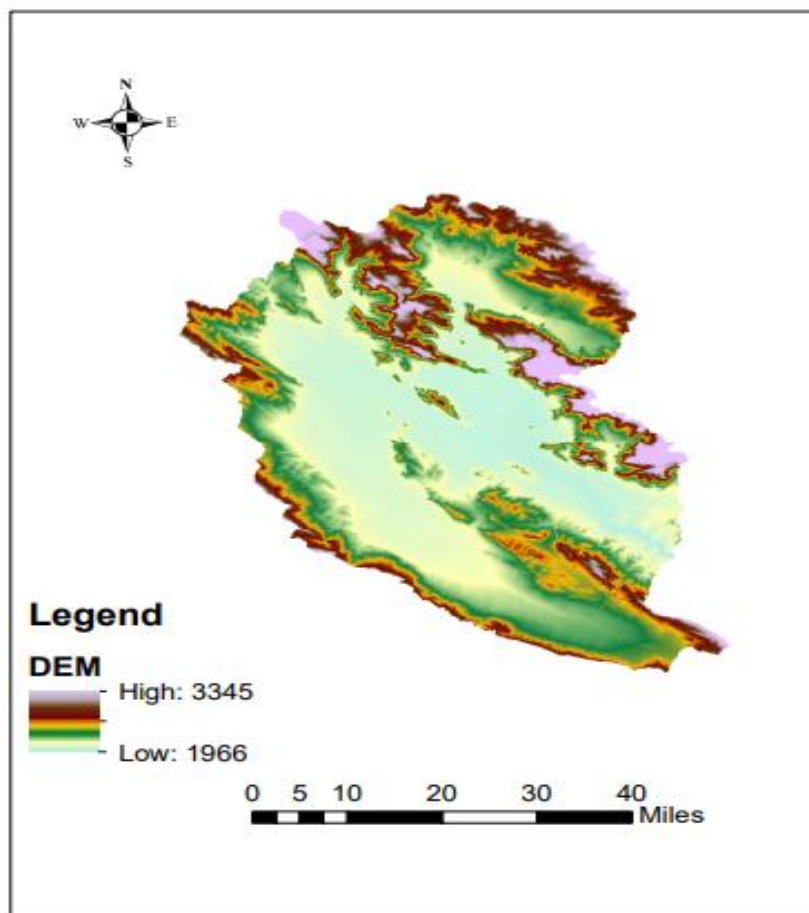
شکل ۲- نقشه کاربری ناحیه مورد استفاده در این مطالعه

Figure 2. Landuse of Qare-su Watershed



شکل ۳- نقشه خاک ناحیه مورد استفاده در این مطالعه

Figure 3. Soil Map of Qare-su Watershed



شکل ۴- نقشه رقوم ارتفاعی ناحیه مورد استفاده در این مطالعه

Figure 4. DEM Map of Qare-su Watershed

روش های واسنجی

معنی که مجموعه پارامترهای مختلف می توانند عملکردهای به همان اندازه خوب و قابل قبولی از پیش بینی مدل را به دلیل فعل و انفعال پارامترهای مختلف تولید کنند. هدف *GLUE* شناسایی مدل های رفتاری در حالت کلی از ترکیب های ممکن مدل و یا پارامتر است (۶).

PSO یک روش بهینه سازی آماری مبتنی بر جمعیت (ازدحام) است که از اقدامات اجتماعی پرندگان یا ماهیگیری الهام گرفته شده است. *PSO* یا ذرات تصادفی که در فضای جستجوگر *optima* حرکت می کنند، آغاز می شود. *PSO* موقعیت و سرعت ذرات را تولید می کند و سپس سرعت هر ذره را با استفاده از اطلاعات بهترین نتیجه ای که تاکنون رسیده است و بهترین جواب به دست آمده توسط سایر ذرات را

SUFI-2 یک روش نیمه خودکار است که برای واسنجی، اعتبار سنجی و حساسیت و تحلیل عدم قطعیت استفاده می شود. در *SUFI-2*، تمام منابع عدم قطعیت پارامترها به پارامترها اختصاص داده می شوند. در این روش عدم قطعیت در داده های ورودی به صورت توزیع های یکنواخت تعریف می شود. در مقابل، عدم قطعیت تولیدی با عدم قطعیت برآورد ۹۵٪ (*95PPU*) محاسبه می شود که در سطح ۲/۵ و ۹۷/۵٪ توزیع تجمعی متغیرهای خروجی بدست آمده از طریق نمونه برداری از مکعب لاتین هستند.

GLUE به خروجی محاسبات از روش مونت کارلو متکی است. یک مجموعه پارامتر بهینه کلی جستجو می شود و جستجوی بهینه پارامتر مورد نظر در آن بازه انجام می شود. این روش مبتنی بر نظریه غیر منحصر به فرد بودن است، به این

عملکرد مدل ها، از شاخص های آماری R^2 و NSE استفاده شد.

نتایج شبیه سازی هیدرولوژیکی با روش SUFI-2

برای واسنجی این مدل هیدرولوژیکی توصیه شده است تعداد شبیه سازی های زیاد انجام شود. با تعداد ۹ تکرار (۵۰۰ شبیه سازی در هر تکرار)، نتیجه در این روش در محدوده "بسیار خوب" قرار گرفت. ۱۳ پارامتر مطابق جدول ۲ برای کالیبراسیون انتخاب، و نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که Sol_K ، CH_N2 و $CN2$ حساسیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها دارند.

به روز می کند. موقعیت جدید هر ذره با به روزرسانی موقعیت فعلی با استفاده از بردار سرعت محاسبه می شود (۶).

شاخص های آماری مورد استفاده

بررسی اعتبارسنجی و عدم قطعیت نتایج تولید شده توسط مدل با استفاده از الگوریتم های $SUFI2$ ، $GLUE$ و PSO در نرم افزار $SWAT-CUP$ اجرا شد. این تکنیکها محدودههایی را برای پارامترهای مورد نظر تعیین و پس از آن اجرای چندین مرحله شبیه سازی با مجموعه پارامترهای مختلف به بهترین جواب میرسند. در این مطالعه، تابع هدف $Nash-Sutcliffe$ $Efficiency (NSE)$ تعیین شد. علاوه بر این، برای مقایسه

جدول ۲- نتایج شبیه سازی با هر سه روش بهینه سازی

Table 2. Simulation results based on all of three optimization methods

SUFI-2 (2011-2019) validation		SUFI-2 (1989-2010) calibration				Discharge station
NSE	R2	NSE	R2	R-factor	P-factor	
۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۷۴	Station A
۰/۷۱	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۴	Station B
۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۹۴	۰/۸۶	Station C
GLUE (2011-2019) validation		GLUE (1989-2010) calibration				Sub
NSE	R2	NSE	R2	R-factor	P-factor	
۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۶۴	۰/۳۹	Station A
۰/۷۰	۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۵۴	Station B
۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۶۲	Station C
PSO (2011-2019) validation		PSO (1989-2010) calibration				Sub
NSE	R2	NSE	R2	R-factor	P-factor	
۰/۶۴	۰/۷۰	۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۷۷	۰/۷۰	Station A
۰/۷۱	۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۰۱	۰/۷۹	Station B
۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۷۷	۱/۰۶	۰/۸۳	Station C

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده و رتبه موثر هر یک در هر یک از روش های واسنجی

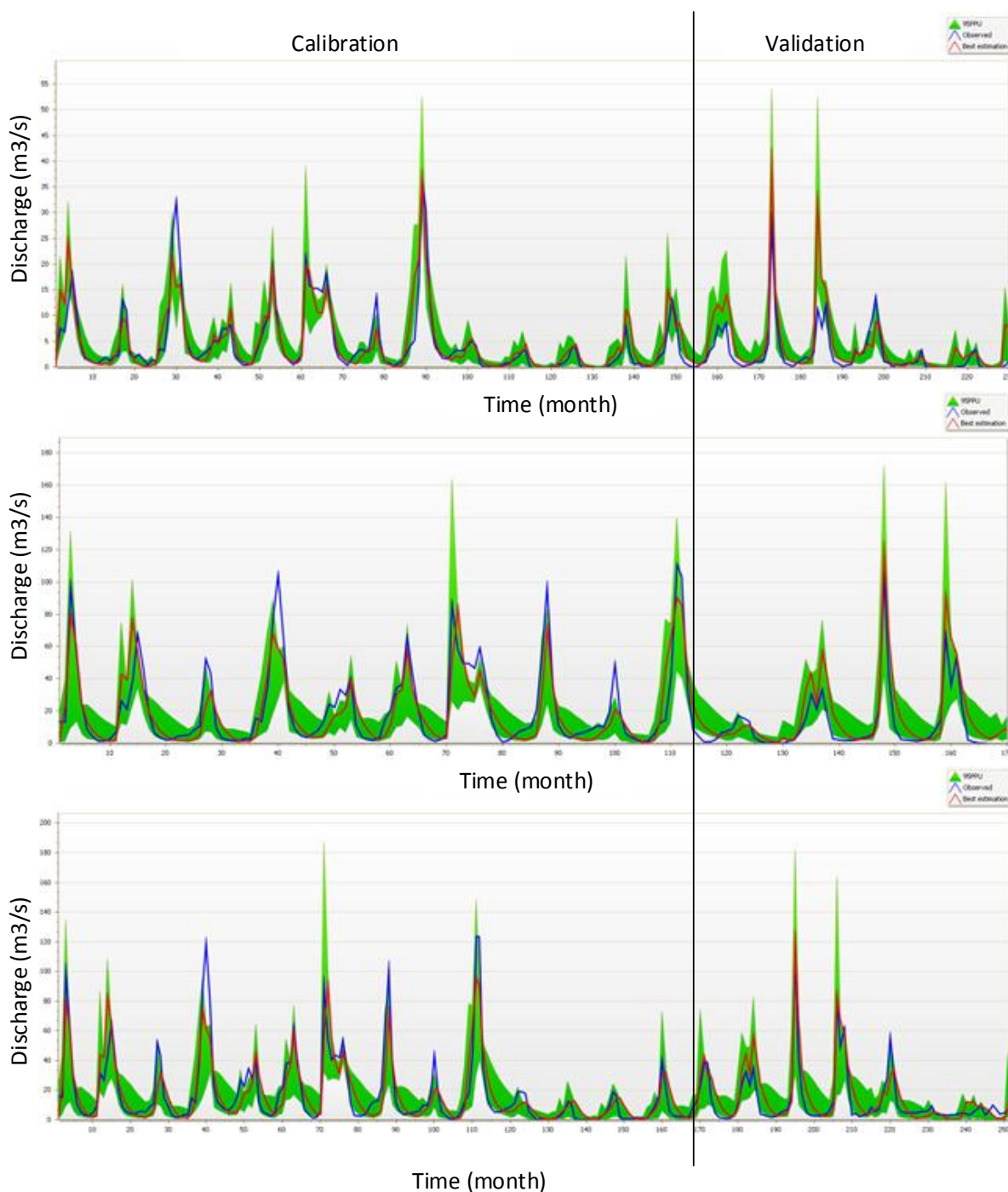
Table 3. Used parameters and ranks of parameters in each method

PSO rank	GLUE rank	Sufi-2 rank	کمینه	بیشینه	پارامتر
۱	۱	۳	-۰/۲	۰/۲	r_CN2.mgt
۴	۲	۵	۰	۱	v_ALPHA_BF.gw
۶	۶	۴	۳۰	۴۵۰	v_GW_DELAY.gw
۵	۴	۹	۰	۲	v_GWQMN.gw

۸	۳	۷	۰/۲	۰	v__GW_REVAP.gw
۹	۱۲	۱۰	۱	۰/۸	v__ESCO.hru
۱۰	۱۰	۲	۰/۳	۰	v__CH_N2.rte
۱۲	۱۱	۱۱	۱۳۰	۵	v__CH_K2.rte
۱۳	۸	۱۳	۱	۰	v__ALPHA_BNK.rte
۷	۹	۸	۰/۴	-۰/۲	r__SOL_AWC(1).sol
۲	۷	۱	۰/۸	-۰/۸	r__SOL_K(1).sol
۳	۵	۶	۰/۶	۰/۵-	r__SOL_BD(1).sol
۱۱	۱۳	۱۲	۵	۵-	v__SFTMP.bsn

عدم قطعیت و همچنین کارایی پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی می باشد. در اینجا نیز هرچه مقادیر به عدد ۱ نزدیک تر باشند به معنای دقت بالاتر و در نظر گرفتن عدم قطعیت با بازه ای قابل قبول از پارامترها می باشد. به طور کلی نتایج هر دو قسمت واسنجی و اعتبار سنجی قابل قبول هستند ولی نتایج دوره واسنجی مدل از دقت بالاتری نسبت به اعتبار سنجی برخوردار بوده است. در هر سه روش، نتایج شبیه سازی دارای دقت بالا و بدون فاصله معنادار از یکدیگر هستند.

در جدول ۳ نتایج شبیه سازی در دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل بر اساس شاخص های آماری ضریب تبیین (R^2) و شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NSE) آورده شده است. این شاخص ها برای مقایسه بین دو سری زمانی مشاهداتی و مدل سازی شده به کار می روند. در مطالعات بسیاری نشان داده شده است که مقادیر بالاتر از ۰/۷ برای هر دو این شاخص ها به معنای شبیه سازی خوب و نتایج خوب مدل می-باشد (۵). شاخص های $Rfactor$ و $Pfactor$ نیز بیانگر باند



شکل ۵- نتایج سری زمانی رواناب شبیه سازی شده با روش *SUFI-2*

Figure 5. Result of time series simulations based on SUFI-2

زمانی مشاهداتی، قرمز برای سری زمانی مدل و باند سبز رنگ بیانگر باند عدم قطعیت مدل می باشد.

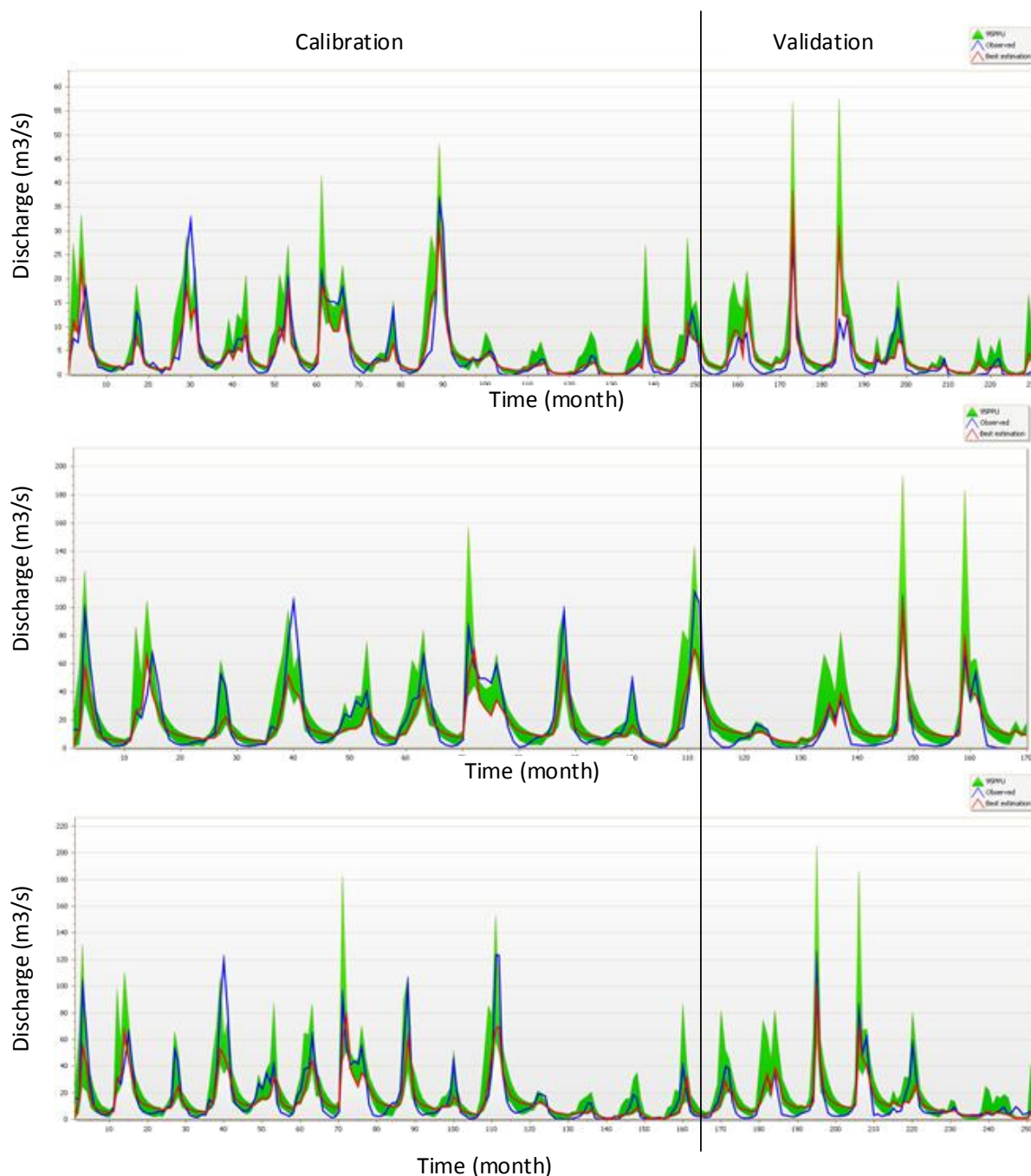
روش واسنجی و اعتبار سنجی *GLUE*

در این روش، با ۲۳ تکرار، نتایج "بسیار خوبی" کسب شد. در این روش، پارامترها و دامنه‌های مشابه انتخاب، تجزیه و تحلیل

نتایج سری زمانی جریان در شکل ۵ را نشان می دهد که پیک رواناب با روش *SUFI-2* بهتر از سایر روش ها شبیه سازی شده که در آن محور افقی، زمان (ماه) و محور عمودی دبی (متر مکعب بر ثانیه) بوده، و سری زمانی آبی رنگ برای سری

رواناب کمتر از مشاهداتی شبیه سازی شده و جریان پایه کمتر از داده‌های مشاهده ای شبیه سازی شده است.

عدم قطعیت نشان می دهد که $CN2$ و $ALPHA_BF$ حساس ترین پارامترها هستند (جدول ۳). شکل ۶ نتایج شبیه سازی سری زمانی جریان را نشان می دهد. در این روش پیک



شکل ۶- سری زمانی (2011-2019) شبیه سازی شده با روش $GLUE$

Figure 6. Result of timeseries simulations based on GLUE

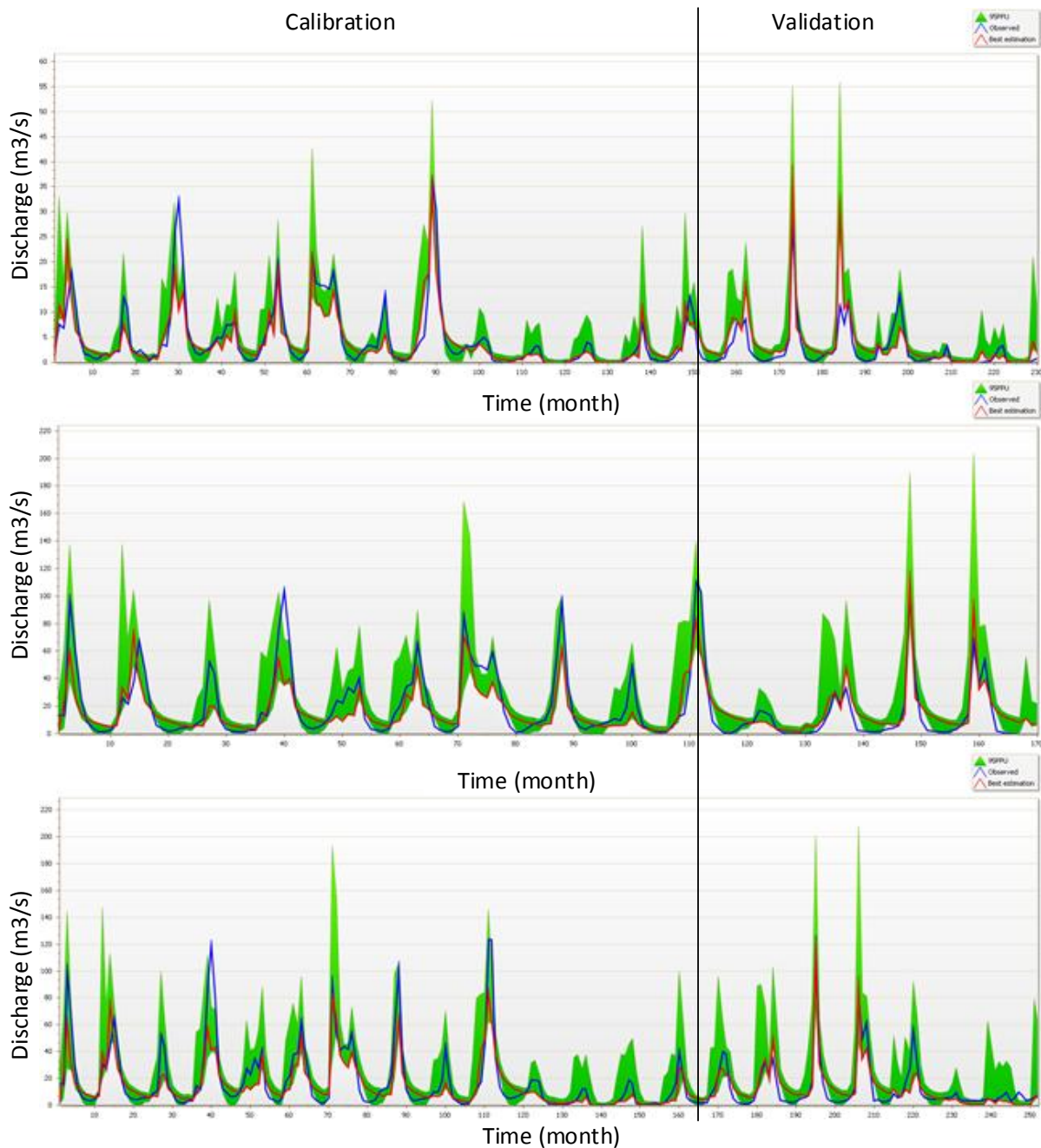
روش واسنجی و اعتبارسنجی PSO

در این روش نیز مانند روش قبلی واسنجی انجام شده است. با هشت بار تکرار، نتایج "بسیار خوب" حاصل شد. در این روش، Sol_K و $CN2$ حساس ترین پارامترها بوده و مطابق شکل ۴،

در شکل ۶، محور افقی، زمان (ماه) و محور عمودی دبی (مترمکعب بر ثانیه) سری زمانی آبی رنگ برای سری زمانی مشاهداتی، قرمز برای سری زمانی مدل و باند سبز رنگ بیانگر باند عدم قطعیت مدل می باشد.

داشته، اما در سری‌های زمانی زمان تأخیر وجود دارد.

در این روش، سری زمانی جریان، پیک های جریان مطابقت



شکل ۷- سری زمانی شبیه سازی شده با روش PSO

Figure 7. Result of timeseries simulations based on PSO

هیدرولوژیکی به طور چشمگیری استفاده شده است (۲۴-۲۶). هر چند کاربرد روش *SUFI-2* آسان می‌باشد ولی این روش کاملاً خودکار نیست و نیاز به داشتن دانش و فهم عوامل و تاثیر آنها در خروجی مدل دارد که ممکن است خطای مضاعفی به عنوان عدم قطعیت مدل به سایر عدم قطعیت‌ها اضافه نماید. سینگ و همکاران (۲۰۱۳) توانایی الگوریتم‌های *SUFI-2* و

در شکل ۷، مشابه اشکال قبلی، محور افقی زمان (ماه) و محور عمودی دبی (مترمکعب بر ثانیه) سری زمانی آبی رنگ برای سری زمانی مشاهداتی، قرمز برای سری زمانی مدل و باند سبز رنگ بیانگر باند عدم قطعیت مدل را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج می‌توان اظهار کرد که روش *GLUE* کاربردی تر از سایر روش‌ها می‌باشد. این روش در مطالعات مدل‌سازی

با دقت بالاتر ۷۰ درصد به دست آمدند، که قابل قبول هستند. همچنین نتایج دوره واسنجی مدل از دقت بالاتری نسبت به اعتبار سنجی برخوردار است. در هر سه روش، نتایج شبیه سازی دارای دقت بالا و بدون فاصله معنادار از یکدیگر هستند. اگرچه الگوریتم‌های *SUFI-2*، *PSO* و *GLUE* می‌توانند اختلاف بین داده‌های مشاهده ای و شبیه سازی شده را کاهش دهند، اما عملکرد الگوریتم *SUFI-2* در شبیه سازی رواناب دقیق تر از الگوریتم‌های دیگر است و از محبوبیت بیشتری در میان هیدرولوژیست‌ها برخوردار است.

References

1. Teshome, F. T., Bayabil, H. K., Thakural, L., & Welidehanna, F. G. (2020). Modeling Stream Flow Using SWAT Model in the Bina River Basin, India. *Journal of Water Resource and Protection*, 12(03), 203.
2. Tegegne, G., & Kim, Y. O. (2018). Modelling ungauged catchments using the catchment runoff response similarity. *Journal of Hydrology*, 564, 452-466.
3. Marques C. A. F., Ferreira J. A., Rocha A., Castanheira J. M., Melo-Goncalves P., Vaz N. and Dias J. M. (2006). Singular spectrum analysis and forecasting of hydrological time series. *Phys. Chem. Earth A/B/C.*, 31(18), 1172-1179.
4. Sokolowski J. and Banks C. (2011). Principles of modeling and simulation: a multidisciplinary approach. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
5. Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K.C., White, M., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., Van Griensven, A. and Van Liew, M. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* Vol. 55(4), pp. 1491-1508.

GLUE را برای شبیه سازی جریان تخلیه در حوضه آبریز *Tungabhadra* در هند، که ۴۴٪ از پوشش جنگل است، مقایسه کردند. آن‌ها نتایج دست آمده از روش *SUFI-2* را مناسب‌تر ارزیابی کردند (۱۶). در پژوهش ژانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۹)، روش *PSO* سریعتر از سایر روش بوده است که نتایج مشابهی با این پژوهش داشته است (۲۶). همچنین عینی و همکاران (۲۰۱۹) در حوضه دریاچه مهارلو به شبیه سازی هیدرولوژیکی با استفاده از داده های مختلف بارشی با استفاده از روش *SUFI-2* در مدل *SWAT* پرداختند که مشخص شد این روش توانایی شناسایی پارامترهای حساس و همچنین دقت بالایی در شبیه سازی دارد (۲۷). یافته‌های این پژوهش مشابه مطالعات انجام شده در مورد کالیبراسیون و تجزیه و تحلیل عدم قطعیتی است که وو و چن^۲ (۲۰۱۵) انجام شده است که از روش های *GLUE*، *SUFI-2* و *ParaSol* برای ارزیابی برآورد عدم قطعیت در مدل سازی هیدرولوژیکی توزیع شده برای حوضه رودخانه ونجینگ (چین) واقع در منطقه آب و هوای مرطوب نیمه گرمسیری تحت تأثیر موسمی استفاده کردند، و نشان دادند که روش *SUFI-2* مزایای بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد (۱۸).

نتیجه گیری

به طور کلی، هر سه روش قادر به شبیه سازی رواناب با نتایج "بسیار خوب" بودند. در این مطالعه، بین سه روش مختلف بهینه سازی، دو روش *SWAT*، *PSO* عملکرد بهتر و سریع تری داشتند. در این مطالعه حوضه رودخانه قره سو (غرب ایران) با مدل هیدرولوژیکی *SWAT* شبیه سازی شد و با سه روش مختلف بهینه سازی، واسنجی و اعتبارسنجی شد. برای شبیه سازی با شرایط یکسان، ۱۳ پارامتر مشترک در همه روش‌ها انتخاب شد. نتایج دست آمده نشان می دهد که هر سه روش (*SUFI-2*، *GLUE* و *PSO*) می‌توانند رواناب را با عملکرد بالا برای همه ایستگاه‌های هیدرومتری شبیه سازی کنند. به طور کلی نتایج هر دو قسمت واسنجی و اعتبار سنجی

1- Zhang

2- Wu and Chen

12. Zhang, D., Yao, H., James, A., Lin, Q. and Fu, W. 2020. Modifying SWAT-CS for simulating chloride dynamics in a Boreal Shield headwater catchment in south-central Ontario, Canada. *Science of The Total Environment*, Vol. 717, pp. 137-213.
13. Abbaspour, K.C., Vejdani, M., Haghghat, S. and Yang, J. 2017. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT, pp. 1596-1602.
14. Kumarasamy, K. and Belmont, P. 2018. Calibration Parameter Selection and Watershed Hydrology Model Evaluation in Time and Frequency Domains. *Water*, Vol. 10(6), pp. 710.
15. Borah D.K, Arnold J.G, Bera M, Krug C.E, and Liang, X.Z. 2017. Storm event and continuous hydrologic modeling for comprehensive and efficient watershed simulations. *Transaction of the ASCE*, Vol. 6 (605), pp. 605-617.
16. Singh, V., Bankar, N., Salunkhe, S.S., Bera, A.K. and Sharma, J. 2013. Hydrological stream flow modelling on Tungabhadra catchment: parameterization and uncertainty analysis using SWAT CUP. *Current science*, pp. 1187-1199.
17. Besalatpour, A.A., Ayoubi, S., Hajabbasi, M.A., Gharipour, A., and A. Yousefian Jazi. 2014. Feature selection using parallel genetic algorithm for the prediction of geometric mean diameter of soil aggregates by machine learning methods. *Arid Land Research and Management*. Vol. 28, pp. 383-394.
18. Wu, H. and Chen, B. 2015. Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing
6. Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. and Kløve, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* Vol. 524, pp. 733-752.
7. Aalami, M.T., Abbasi, H. and Niksokhan, M.H. 2018. Comparison of two calibration-uncertainty methods for Soil and Water Assessment Tool in stream flow modeling. Vol. 28, pp. 53-64. (In Persian)
8. Narsimlu, B., Gosain, A.K, Chahar, B.R, Singh, S.K and Srivastava, P.K. 2015. SWAT model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction in the Kunwari River Basin, India, using sequential uncertainty fitting. *Environ Process*, Vol 2(1), pp. 79-95.
9. Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J. and Yang, H. 2018. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of hydrology*, Vol. 358(1-2), pp. 1-23.
10. Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. 2007b. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*, Vol. 333(2-4), pp. 413-430.
11. Eini, M.R., Javadi, S., Delavar, M., Monteiro, J.A. and Darand, M. 2019. High accuracy of precipitation reanalyses resulted in good river discharge simulations in a semi-arid basin. *Ecological engineering*, Vol. 131, pp. 107-119.

- Water and Climate Change, Vol. 11(S1), pp. 145-163.
24. Cameron, D., Beven, K. and Naden, P., 2000a. Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty). *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 4:3, pp. 393–405.
25. Blazkova, S., Beven, K., Tacheci, P. and Kulasova, A. 2002. Testing the distributed water table predictions of TOPMODEL (allowing for uncertainty in model calibration): the death of TOPMODEL? *Water Resources Research*, Vol. 38:11, pp. 1257.
26. Zhang, X., Srinivasan, R., Zhao, K. and Liew, M.V. 2009. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. *Hydrological Processes*, Vol. 23(3), pp. 430-441.
27. Eini, M.R. 2019. Discussion of Intra- and interannual streamflow variations of Wardha watershed under changing climate. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(4), pp. 474–475.
- River watershed in China by GLUE, SUFI-2 and ParaSol methods. *Ecological Engineering*, Vol. 76, pp. 110–121.
19. Ang, R., & Oeurng, C. (2018). Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *Water Science*, 32(1), 89-101.
20. Mengistu, A. G., van Rensburg, L. D., & Woyessa, Y. E. (2019). Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 25, 100621 .
21. Yang, X., Magnusson, J & Xu, C.-Y. (2019). Transferability of regionalization methods under changing climate. *Journal of Hydrology*, 568, 67-81.
22. Leye, I., Sambou, S., Sané, M. L., Ndiaye, I., Ndione, D. M., Kane, S., . . . Cissé, M. T. (2020). Hydrological Modeling of an Ungauged River Basin Using SWAT Model for Water Resource Management Case of Kayanga River Upstream Niandouba Dam. *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 9(1), 29-41 .
23. Ashrafi, S.M., Gholami, H. and Najafi, M.R. 2020. Uncertainties in runoff projection and hydrological drought assessment over Gharesu basin under CMIP5 RCP scenarios. *Journal of*