Archive of SID

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۹/ شماره ۳/ پیاپی ۱۸/ پاییز ۱۳۹۴ (۹۹-۱۰۹)

ارزیابی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در واسنجی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی SWAT

آزاده جباری[۱*]، حسن ترابی پوده[۲]، مجید حسینی[۳] و امیر حمزه حقی‌آبی[۴]

چکیده

با عمومیت یافتن مدل‌های پیچیده هیدرولوژیکی، مدت زمان اجرای این مدل‌ها، به طور قابل توجهی در حال افزایش است. مقایسه و ارزیابی کارآیی الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی، برای واسنجی این مدل‌های هیدرولوژیکی، در حال تبدیل شدن به یک مسئله مهم است. در این پژوهش برای واسنجی پارامترهای هیدرولوژیکی مدل SWAT2009 در حوضه آبخیز سنجابی، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است. بدین منظور مدل SWAT با استفاده از لایه خاک، لایه کاربری اراضی، لایه رقومی ارتفاع و اطلاعات هواشناسی حوضه سنجابی اجرا شد و سپس با برقراری ارتباط بین خروجی این مدل و الگوریتم PSO در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP، ۲۲ پارامتر جریان حساسیت‌سنجی شد و ۸ پارامتر حساس‌تر برای بهینه‌سازی مقادیر آن‌ها انتخاب شدند. مقادیر تابع هدف ناش- ساتکلیف (NS) در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۵۸ و ۰/۶۰به دست آمده است که نشان دهنده شبیه‌سازی مطلوب رواناب با مدل SWAT پس از واسنجی پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم PSO است. همچنین مقدار ضریب تعیین R^2 و ضریب RMSE به‌ترتیب برای دوره واسنجی برابر با ۰/۶۵ و ۶/۷۴ و برای دوره اعتبارسنجی برابر با ۰/۶۷ و ۳/۶۶ به دست آمد که بیان‌گر کارآیی مؤثر الگوریتم PSO برای واسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب است.

واژه‌های کلیدی:حساسیت‌سنجی، حوضه آبخیز سنجابی، واسنجی، PSO، SWAT 2009.

ارجاع: جباری آ. ترابی پوده ح. حسینی م. و حقی‌آبی ا. ح. ۱۳۹۴. ارزیابی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در واسنجی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی SWAT. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۹۹-۱۰۹.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی،گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان (عضو باشگاه پژوهش‌گران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران).
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان.
۳- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان.
*** نویسنده مسئول: jabary.az@gmail.com**
تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۱۸

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

مدل‌های هیدرولوژیکی، به طور گسترده توسط کارشناسان هیدرولوژی و مدیران منابع آب، به عنوان ابزاری برای شناخت و مدیریت فعالیت‌هایی (طبیعی و انسانی) که بر سیستم‌های حوضه آبخیز تأثیرگذار هستند، به کار می‌روند. کاربرد موفق مدل‌های هیدرولوژیکی بستگی به روش واسنجی آن‌ها دارد (دوئن و همکاران، ۱۹۹۲). مدل‌های هیدرولوژیکی، حتی مدل‌های پایه فیزیکی، بیشتر شامل پارامترهایی هستند که به‌دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری نمی‌توانند به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری شوند (بیون، ۲۰۰۱). این پارامترها باید از طریق واسنجی با روش معکوس تخمین زده شوند، به طوری که مقادیر خروجی پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهده‌ای با هم سازگار باشند. قبل از در دسترس بودن کامپیوترهای با سرعت پردازش زیاد، کاربران مدل‌های هیدرولوژیکی، از اطلاعات حوضه و اطلاعات تجربی مدل برای تنظیم پارامترهای مدل از طریق فرآیند سعی و خطا استفاده می‌کردند (گاپتا و همکاران، ۱۹۹۹). این روش واسنجی بسیار زمان‌بر است. در سال‌های اخیر، روش‌های خودکار واسنجی، که هدفمند هستند و به طور نسبی آسان برای اجرا در کامپیوترهای سرعت بالا، هستند، بسیار رایج شده‌اند (ویراگت و همکاران، ۲۰۰۳).

الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توانند به طور مؤثر، مقادیر بهینه برای پارامترهای مدل که تابع هدف را، (سازگاری بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را بیان می‌کند)، حداقل (و یا حداکثر) می‌کنند، ارائه دهند. مدل‌های هیدرولوژیکی زیادی برای شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز وجود دارند که می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهانی، پارامترهای آن‌ها را واسنجی کرد. در این پژوهش از یک مدل هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی به نام ابزار ارزیابی خاک و آب[1](SWAT) استفاده شده است. مدل SWAT (آرنولد و همکاران، ۱۹۹۸) اساسی فیزیکی دارد و در حوضه‌های آبخیزی که دارای آمار برداری منظم نیستند، نیز قابل کاربرد است. SWAT مدلی برای شبیه‌سازی پارامترهای حوضه رودخانه و پیش‌بینی طرح‌های مدیریتی، رسوب، پارامترهای شیمیایی کشاورزی در مقیاس‌های بزرگ و برای حوضه‌هایی با تنوع گوناگون در نوع خاک، نوع پوشش گیاهی و کاربری‌های متفاوت اراضی و همچنین برای شرایط مختلف مدیریتی در طول دوره‌های طولانی‌مدت است. این مدل یک مدل فیزیکی است که با گرفتن ورودی‌های مختلف کاربر می تواند اثرات مورد نظر را در طولانی‌مدت بررسی و مقایسه کند. این مدل همچنین می‌تواند در زمینه‌های گوناگون و در حوضه‌های مختلف برای مدل‌سازی پارامترهای کیفیتی آب استفاده شود (نیتچ و همکاران، ۲۰۱۱).

مدل SWAT قابلیت اتصال به نرم‌افزارهای GIS[2] را دارا بوده و در آن محدودیتی از نظر ورود حجم وسیعی از اطلاعات در مورد حوضه‌های بزرگ وجود ندارد (بافات و همکاران، ۲۰۰۵). ورودی‌های این مدل عبارتند از اطلاعات اقلیمی مانند بارش، شامل برف و باران، درجه حرارت، میزان تشعشع، سرعت باد و رطوبت نسبی که به‌صورت روزانه به مدل وارد می‌شوند. همچنین نقشه ارتفاعی رقومی[3] (DEM)، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک از جمله لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز این مدل هستند. این مدل با استفاده از لایه خاک، لایه کاربری اراضی و لایه DEM، حوضه آبخیز را به واحدهای مختلف پاسخ هیدرولوژیکی[4] که دارای ویژگی‌های همگنی از نظر خاک، پوشش گیاهی و مدیریت هستند، تقسیم‌بندی می‌کند (آلنسی وهمکاران، ۲۰۰۹).

نسخه‌های مختلفی از این مدل به مرور زمان تهیه و ارائه شده است. در نسخه SWAT2009 فرمول‌های انتقال باکتری توسعه بیشتری یافته و سناریوهای مختلف پیش‌بینی شرایط آب و هوایی اضافه شده است. همچنین یک مولد[5] برای تولید داده‌های باران در زمان کمتر از روزانه[6] (زیر روزانه) اضافه شده است. همچنین حفاظتی که در محاسبه CN روزانه استفاده می‌شود به محتوای آب خاک یا تبخیر و تعرق گیاه بستگی دارد. در این نسخه محاسبه رسوبات خشک و تر، نیترات و آمونیوم توسعه یافته است (نیتچ و همکاران، ۲۰۱۱).

برای حساسیت‌سنجی و واسنجی پارامترهای مدل SWAT، نرم‌افزار SWAT-CUP[7] (عباسپور، ۲۰۱۱)، برای تجمیع روش‌های مختلف برنامه‌های تجزیه و تحلیل

1- Soil and Water Assessment Tool

2- Geographical Information System
3- Digital Elevation Model
4- Hydrological Response Unit
5- generator
6- subdaily
7- SWAT Calibration and Uncertainty Programs

www.SID.ir

Archive of SID

واسنجی کردن و محاسبه عدم قطعیت برای SWAT با استفاده از رابط کاربر مشابه طراحی شده است. هم اکنون این برنامه می‌تواند الگوریتم‌های SUFI2[1]، ParaSol[2]، PSO[3]، GLUE[4] و MCMC[5] را اجراکند. برای هر پروژه SWAT می‌توان یکی از روش‌های واسنجی را انتخاب کرد و SWAT-CUP به کاربر اجازه می‌دهد تا این روش را بارها تکرار کند تا زمانی که همگرایی مورد نظر به دست آید.

الگوریتم PSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات) در بسته نرم‌افزار SWAT-CUP در معکوس مدل SWAT عمل می‌کند به این معنی که با گرفتن داده‌های مشاهده‌ای و همچنین محدوده مجاز پارامترهای مدل که در واسنجی کردن مدل نسبت به حوضه مطالعاتی نقش دارند، مانند شماره منحنی خاک، میزان دمای ذوب برف و بسیاری پارامترهای دیگر، حساس‌ترین پارامترها را مشخص و میزان بهینه پارامترهای مذکور را برآورد می‌کند (عباسپور، ۲۰۱۱).

مدل SWAT در حال حاضر در سراسر جهان به‌صورت گسترده‌ای برای تخمین و ارزیابی اثرات تغییرات جهانی اقلیم روی منابع آب و کیفیت آن‌ها استفاده می‌شود و پژوهش‌گران مختلفی با استفاده از این مدل هیدرولوژیکی پژوهش‌های زیادی انجام داده‌اند. ازجمله سیرینی‌واسن و همکاران (۱۹۹۸) کاربرد مدل SWAT را برای دو حوضه ریچلند و چمبرز در بالادست رودخانه ترینیتی در تگزاس ارزیابی کردند و حداقل ضریب تعیین R^2[6] به دست آمده برای شبیه‌سازی ماهانه جریان را برای دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، به‌ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۶۵ گزارش کردند. همچنین شفرد و همکاران (۱۹۹۹) توانایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیک و کیفیت آب در یک حوضه کشاورزی در ناحیه‌ای از مریلند بررسی کردند. آن‌ها بزرگ مقیاس بودن، توزیعی بودن، و قابلیت لینک با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) را از برتری‌های این مدل معرفی کردند.

در ایران نیز پژوهش‌گران زیادی با استفاده از این مدل به مدل‌سازی حوضه‌های آبخیز پرداختند از جمله غلامی (۱۳۸۲) مدل SWAT را برای شبیه‌سازی دبی و رسوب متوسط ماهانه حوضه آبخیز امامه به کار برد. ایشان مدل را با استفاده از مقادیر مشاهده شده در حوضه و پارامترهای فیزیکی واسنجی و سپس ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که مدل نسبت به پارامترهای K (حساسیت‌پذیری خاک) و n (ضریب زبری سطح) حساسیت بیشتری در مقایسه با بقیه پارامترهای حوضه آبخیز دارد. همچنین ضریب تعیین R^2 برای شبیه‌سازی رسوب روزانه معادل ۰/۷۴ گزارش کرد.

با توجه به نتایج بررسی‌های پیشین و کارآمد بودن مدل SWAT در شبیه‌سازی حوضه‌های آبخیز و از آنجایی که حوضه آبخیز سنجابی با تنوع کاربری، واحدهای خاک و توپوگرافی یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه کرخه است و نقش مهمی در تأمین آب سد کرخه دارد و دارای طول دوره آماری به نسبت مناسبی است، در این بررسی مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی این حوضه آبخیز انتخاب شد و مقادیر بهینه پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP تعیین شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

استان کرمانشاه با حدود ۲۴۴۳۴ کیلومترمربع وسعت در میانه نیمه‌غربی ایران قرار دارد. این استان از شمال به استان کردستان، از جنوب به استان‌های لرستان و ایلام، از شرق به استان همدان و از غرب به کشور عراق محدود شده است. از نظر تقسیمات جغرافیایی منطقه سنجابی جزء استان کرمانشاه بوده و از نظر هیدرولوژی یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز کرخه محسوب می‌شود که در شمال غربی حوضه رودخانه قره‌سو قرار دارد. حوضه ماهی دشت در جنوب و حوضه کامیاران و کرمانشاه در شرق این حوضه هستند.

حوضه آبخیز سنجابی ۱۲۳۰ کیلومترمربع وسعت دارد. بیشترین ارتفاع در این حوضه حدود ۲۸۰۰ متر و کمترین ارتفاع حدود ۱۳۰۷ متر است. رودخانه اصلی این حوضه رودخانه دوآب مرک (از شعبات رودخانه قره‌سو) می‌باشد. در مطالعه حاضر از ایستگاه هیدروکلیماتولوژی دوآب مرک و ۵ ایستگاه هواشناسی موجود در حوضه و نزدیک حوضه استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت حوضه

1- Sequential Uncertainty Fitting Version2
2- Parameter Solution
3- Particle Swarm Optimization
4- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
5- Markov Chain Monte Carlo
6- Coefficient of Determination

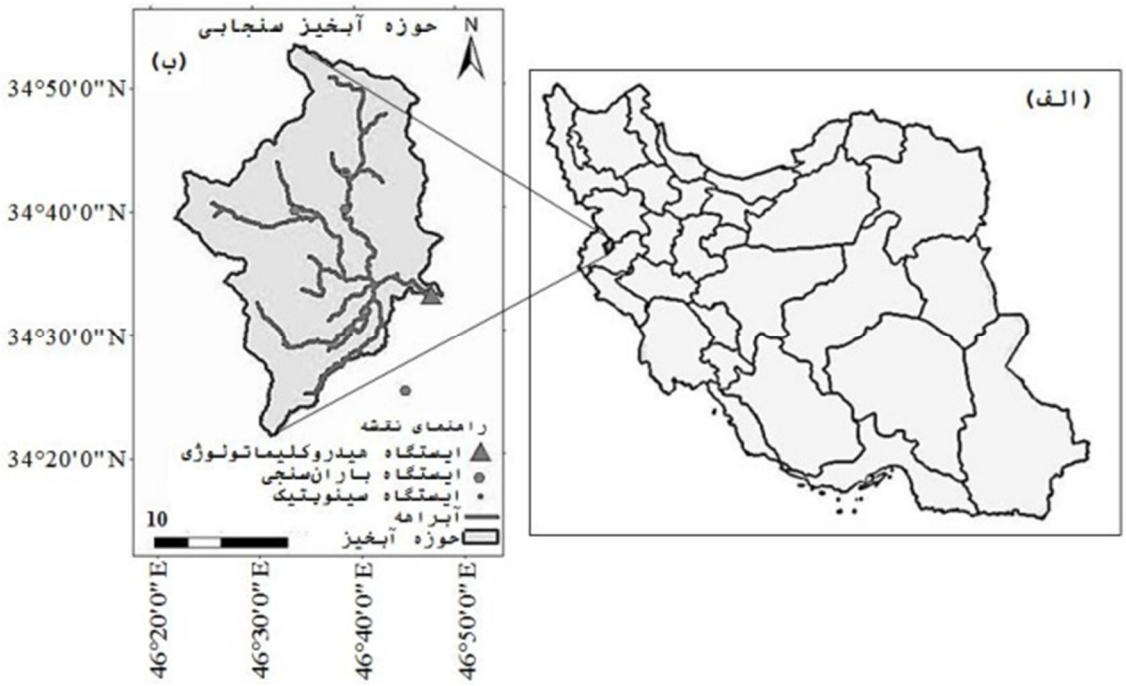
www.SID.ir

Archive of SID

آبخیز سنجابی در ایران و نقشه مسیر آبراهه‌ها در این حوضه و موقعیت ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد.

مدل SWAT

پس از معرفی اطلاعات مورد نیاز به مدل SWAT، اولین مرحله در مدل‌سازی SWAT، تقسیم حوضه به زیرحوضه‌ها است. این زیرحوضه‌ها شامل خصوصیاتی هستند که براساس توپوگرافی و خطوط شبکه جریان مشخص می‌شوند (پیترسون و همکاران، ۱۹۹۸). در مرحله بعد هر زیرحوضه به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم‌بندی می‌شود. این واحدها شامل اطلاعاتی ویژه و اختصاصی در مورد پوشش گیاهی و خاک‌شناسی منطقه است. تعداد این واحدها در هر زیرحوضه از ۱ تا ۱۰ با توجه به تنوع نقشه‌های خاک‌شناسی و تنوع پوشش گیاهی متغیر است.



شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه ایران ب) موقعیت ایستگاه‌های منتخب

مدل SWAT برای تخمین بارندگی در سطح هر زیرحوضه، با استفاده از آمار ایستگاه‌های موجود در حوضه و اطراف حوضه، از روش تیسن[1] استفاده می‌کند. همچنین، برای محاسبه حجم رواناب سطحی و اوج آن، SWAT از میزان بارش روزانه و ذوب برف استفاده می‌کند. برای شبیه‌سازی رواناب سطحی دو روش منحنی SCS و نفوذپذیری گرین و آمپت[2] در SWAT درنظر گرفته شده است. در این پژوهش روش منحنی SCS انتخاب شد. در این روش شماره منحنی خاک و مقدار نفوذ و آب موجود در خاک نقش اساسی دارند. رابطه عدد منحنی رواناب به‌صورت زیراست:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (۱)$$

که در آن Q_{surf} ارتفاع رواناب (بر حسب میلی‌متر)، R_{day} ارتفاع باران (بر حسب میلی‌متر)، I_a نگهداشت اولیه شامل سطحی، برگاب و نفوذ قبل از رواناب (بر حسب میلی‌متر) و S پارامتر نگهداشت (بر حسب میلی‌متر) است.

پارامتر نگهداشت از نظر مکانیکی به‌دلیل تغییرات در خاک، کاربری اراضی، مدیریت و شیب و از نظر زمانی به‌دلیل تغییر در مقدار آب خاک در واحدهای مختلف متغیر است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = 25.4\,(\frac{1000}{CN} - 10) \quad (۲)$$

که در آن CN شماره منحنی است که تابع نفوذپذیری خاک، کاربری اراضی و شرایط رطوبت خاک است (نیتچ و

1- Thissen Method
2- Green and Ampt

www.SID.ir

Archive of SID

همکاران، ۲۰۰۲). عددهای منحنی بسته به پوشش مختلف زمین و انواع خاک‌ها متفاوت هستند. بیشتر، مقدار نگهداشت اولیه I_a برابر با ۰/۲ و به‌صورت رابطه (۳) است:

$$I_a = 0.2\,S \qquad (۳)$$

رواناب وقتی اتفاق می‌افتد که $I_a < R_{day}$ باشد (میسرا و رز، ۱۹۹۵).

الگوریتم PSO

دانشمندان زیادی، قوانین ضروری حاکم بر گروه پرنده‌ها و ماهی‌ها را بررسی آن ها را شبیه‌سازی کرده‌اند. رعایت این قوانین توسط تک‌تک پرنده‌ها و ماهی‌ها، آن‌ها را قادر کرده تا با هم همگام شده و بدون برخورد با یکدیگر، در حرکات دسته جمعی، به رقص‌آرایی بپردازند و صحنه‌های شگفت‌انگیزی را ایجاد کنند (کندی و ابرهارت، ۱۹۹۵).

یک نظریه کلی وجود دارد که مثال‌های بی‌شماری نیز در طبیعت روی این نظریه تأکید می‌کنند و آن اینکه، تسهیم دسته جمعی اطلاعات در میان اعضای یک جمعیت، ممکن است یک فرآیند تکاملی برتری را فراهم آورد. این نظریه، ایده اصلی و پشتیبان توسعه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) است که اولین بار توسط کندی و ابرهارت (۱۹۹۵) معرفی شد. اساس PSO، شبیه‌سازی یک رفتار دسته جمعی است که از آن برای نشان دادن حرکت گروه پرنده‌ها و ماهی‌ها استفاده می‌شود. PSO نیز مانند سایر روش‌های محاسبات تکاملی، از یک جمعیت[1] که شامل راه حل‌های بالقوه مسئله تحت بررسی است، برای اکتشاف در فضای جستجو، استفاده می‌کند. در PSO، هر عضو از جمعیت، علاوه بر اینکه دارای یک سرعت انطباقی[2] (تغییر مکان) است که هماهنگ با آن در فضای جستجو حرکت می‌کنند، هر کدام از آن‌ها دارای حافظه نیز هستند، یعنی بهترین موقعیتی که در فضای جستجو به آن می‌رسند را به ذهن می‌سپارند. بنابراین، حرکت هر عضو در دو جهت انجام می‌شود:

- به سوی بهترین موقعیتی که ملاقات کرده‌اند.
- به سوی بهترین موقعیتی که بهترین عضو در همسایگی آن‌ها ملاقات کرده است.

فرض کنید که فضای جستجوی مسئله، D بعدی باشد، پس iامین ذره[3] از جمعیت را می‌توان با یک بردار D بعدی $X_i=(x_{i1}, x_{ii}, \ldots, x_{iD})^T$ نمایش داد و سرعت آن را هم می‌توان با بردار D بعدی $V_i=(v_{i1}, v_{ii}, \ldots, v_{iD})^T$ نمایش داد. بهترین موقعیت ملاقات شده توسط هر ذره را با pbest و بهترین موقعیت ملاقات شده در کل جمعیت را با gbest نشان می‌دهند و از بالانویس n، برای نمایش شماره تکرارها استفاده می‌شود. درنهایت جمعیت، هماهنگ با دو رابطه زیر، به حرکت درمی‌آید:

$$v_{i,d}^{n+1} = wv_{i,d}^{n} + c_1 r_1^{n}\left(pbest_{i,d}^{n} - x_{i,d}^{n}\right) + c_2 r_2^{n}\left(gbest_{d}^{n} - x_{i,d}^{n}\right) \qquad (۴)$$

$$x_{i,d}^{n+1} = x_{i,d}^{n} + v_{i,d}^{n+1} \qquad (۵)$$

که در آن‌ها N؛i=1, 2, …, N؛d=1, 2, …, D اندازه جمعیت؛ w اینرسی وزنی[4]؛ c_1 و c_2 دو ضریب ثابت و مثبت هستند که به‌ترتیب پارامترهای شناختی[5] و اجتماعی[6] خوانده می‌شوند، r_1 و r_2 عددهای تصادفی در محدوده [۱و۰] با توزیع یکنواخت هستند و n=1, 2, … مشخص کننده شماره تکرارها است.

از آنجایی که هیچ فرایندی برای کنترل سرعت ذره وجود نداشت، لازم شد که یک مقدار حداکثر V_{max} برای آن درنظر گرفته شود. اگر سرعت از این حد فراتر رود، باید برابر با V_{max} قرار گیرد. مقدار این پارامتر برای فرآیند بهینه‌سازی تعیین کننده است، زیرا ممکن است به ازای مقادیر بالای V_{max}، ذرات از روی راه حل‌های خوب رد شود و یا اینکه با مقادیر کم آن، از اکتشاف مناسب در فضای جستجو جلوگیری شود.

نقش اینرسی وزنی w در رابطه (۴) به عنوان شاخصی مؤثر بر رفتار همگرایی PSO مطرح شده است. اینرسی وزنی، برای کنترل تأثیر سوابق سرعت‌های پیشین بر سرعت‌های جاری استفاده می‌شود. بنابراین پارامتر w، قابلیت جمعیت را در اکتشاف مناطق بهینه فراگیر و محلی و استخراج جواب بهینه فراگیر (جستجوی نواحی جدید) کمک می‌کند، در حالیکه مقادیر کم پارامتر w به اکتشاف مناطق بهینه محلی و استخراج جواب بهینه، کمک می‌کند. در ابتدا، مقدار اینرسی وزنی w ثابت درنظر گرفته می‌شد. اما نتایج تجربی نشان داده است که بهتر است در ابتدا، برای بهبود اکتشاف فراگیر در فضای جستجو، مقدار بیشتری برای اینرسی وزنی w درنظر گرفته شود و کم‌کم

1- Swarm
2- Adaptive Velocity
3- Particle
4- inertia weight
5- Cognitive
6- Social

www.SID.ir

Archive of SID

برای بهبود در استخراج راه حل بهینه، از مقدار آن کاسته شود (شی و ابرهارت، ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹) بنابراین برای تعیین اینرسی وزنی w از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \times n}{iTer_{max}} \qquad (۶)$$

که در آن w_{max} میزان اولیه اینرسی وزنی، w_{min} میزان نهایی اینرسی وزنی، $iTer_{max}$ حداکثر تعداد تکرارها و n نیز شماره تکرار جاری است. با توجه به بررسی‌های تجربی بهتـرین مقدار w_{max} و w_{min} به‌ترتیب برابر با ۰/۹ و ۰/۴ است.

پارامترهای c_1 و c_2 بر همگرایی PSO اثر مهمی ندارند، هرچند که میزان مناسب آن ممکن است نتیجه‌اش افزایش سرعت همگرایی و بهبود جواب محلی باشد بررسی گسترده‌ای در مورد پارامترهای شتاب برای اولین نسخه PSO توسط کندی انجام شده است (کندی، ۱۹۹۸). به‌عنوان پیش فرض، مقادیر $c_1=c_2=۲$ پیشنهاد شده است، اما نتـایج تجـربی نشـان می‌دهـد که مقـادیر $c_1=c_2=۰/۵$ ممکن است نتایج بهترین را به دست آورید. پژوهش‌های جدید نشان می‌دهد که ممکن است انتخاب پارامتر شناختی c_1، بزرگ‌تر از پارامتر اجتماعی c_2، با این شرط که $c_1+c_2\leq۴$ باشد، سبب نتایج بهتری شود (کارلیزر و دوزیر، ۲۰۰۱).

تابع هدف و محدودیت‌ها

تابع هدف برای الگوریتم PSO در نرم‌افزار SWAT-CUP، تابع ناش- ساتکلیف[1] (ناش و ساتکلیف، ۱۹۷۰)، که نرمال شده تابع مجموع مربعات باقیمانده‌ها[2] است، انتخاب شده است. رابطه محاسبه NS به‌صورت زیر است:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2} \qquad (۷)$$

که در آن $\overline{Q_m}$ میانگین دبی مشاهده‌ای بر حسب مترمکعب بر ثانیه، $Q_{m,i}$ و $Q_{s,i}$ به‌ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دبی در طول دوره شبیه‌سازی و i تعداد داده‌ها است.

مقدار NS، میزان هماهنگی نمودار مقادیر دبی‌های مشاهده‌ای بر حسب دبی‌های شبیه‌سازی شده را با خطی با شیب ۱:۱، نشان می‌دهد و دامنه تغییرات آن از ∞− تا یک است.

محدودیت‌های تعریف شده برای الگوریتم، شامل بازه اندازه پارامترها است که در برنامه PSO به‌صورت حداقل و حداکثر مقدار مجاز پارامتر تعریف شده‌اند.

اجرای مدل SWAT

دراین پژوهش از مدل رقومی راداری با پیکسل ۸۵ در ۸۵ متر با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ برای نقشه DEM در حوضه آبخیز سنجابی استفاده شد. نقشه کاربری اراضی حوضه و همچنین نقشه خاک حوضه از سازمان جهاد کشاورزی استان کرمانشاه تهیه و به مدل معرفی شد. شکل ۲، سه نقشه مذکور را در منطقه سنجابی نشان می‌دهد. در این پژوهش با استفاده از سه نقشه کاربری اراضی، نوع خاک و شیب حوضه، در مدل SWAT تعداد ۲۹ زیرحوضه و ۴۵۶ واحد پاسخ هیدرولوژیکی در حوضه سنجابی تشکیل شد. سپس آمار بارندگی روزانه و حـداکثر و حـداقل دمای روزانه ایستگاه‌های داخل و خارج نزدیک حـوضه، در دوره ۱۳ سـاله ۲۰۰۴-۱۹۹۲ گرفته شده از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو، به مدل وارد شد. جدول ۱ مشخصـات ایستگـاه‌های مـورد استفـاده را نشان می‌دهد.

پس از معرفی اطلاعات مورد نیاز، با درنظر گرفتن آمار ماهانه سه سـال ۱۹۹۲، ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ به‌عنـوان Warm-up، مدل SWAT2009 در نرم‌افزار ArcGIS 9.3 در گام زمانی ماهانه اجراشد. با توجه به اینکه ممکن است ارزش دقیق مقادیر اولیه برخی خصوصیات حوضه، مانند ترکیبات شیمیایی خاک، در دسترس نباشد، مدل SWAT در این دوره Warm-up می‌تواند این مقادیر را تثبیت و یا محاسبه کند.

پـس از هر بار اجرای مدل SWAT، برای هر شبیه‌سازی، خروجی‌هایی شامل مؤلفه‌های رواناب، جریان زیرسطحی، ذخیره آب زیرزمینی و غیره به‌صورت فایل متنی حاوی اطلاعات به دسـت مـی‌آید. این فایل‌های متنی در پوشه‌ای به نام TxtIntOut ذخیره می‌شود. با اتصال این پوشه به نرم‌افزار SWAT-CUP و انتخاب برنامـه PSO، ۲۲ پارامتر مـؤثر در جـریان در دوره آماری ۲۰۰۴-۱۹۹۵، برای حساسیت‌سنجی با استفاده از برنامـه PSO انتخـاب شدند که در جدول ۲ آورده شده‌اند.

در برنامه PSO حساسیت پارامترها به‌صورت دو معیار p-value و t-state نشان داده می‌شود. معیار p-value نشان دهنده اهمیت حساسیت پارامتر است که هرچه مقدار آن

1- Nash-Sutcliffe (NS)
2- Sum of Squares of Residuals (SSR)

www.SID.ir

Archive of SID

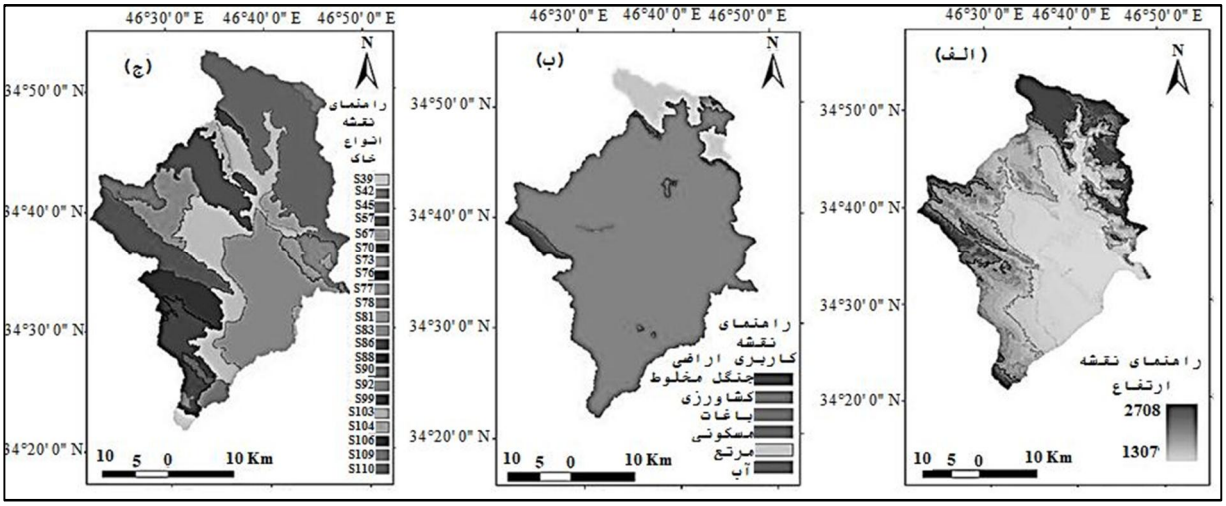
به صفر نزدیک‌تر باشد، پارامتر برای مدل مهم‌تر است و معیار t-stat اندازه حساسیت را نشان می‌دهد که هرچه بزرگ‌تر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر است (عباسپور و همکاران، ۱۹۹۷).

با توجه به نتایج حساسیت‌سنجی، پارامترهای حساس‌تر با استفاده از برنامه PSO واسنجی و مقادیر بهینه پارامترها برای تعیین بهترین مقدار تابع هدف، تعیین شد. بدین ترتیب که برنامه PSO، در هر تکرار، مقادیر این پارامترها را در محدوده مجاز تعریف شده تغییر داده و مدل SWAT با مقادیر جدید پارامترها اجرا می‌شد و دوباره فایل‌های خروجی جدید به برنامه PSO وارد و مقدار تابع هدف محاسبه می‌شد. این فرآیند به تعداد تکرارهای تعیین شده برای مدل (۴۰۰۰ تکرار) ادامه یافت. پس از واسنجی پارامترها، مدلSWAT برای دوره ماهانه سه سال ۲۰۰۵، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل، با استفاده از شاخص‌های ارزیابی ضریب تعیین (R^2) و ضریب جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، برای هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی تحلیل آماری شد. معیارهای ارزیابی به‌صورت روابط (۸) و (۹) محاسبه شدند:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q}_m)(Q_{s,i} - \overline{Q}_s)\right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \overline{Q}_s)^2} \quad (۸)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_s - Q_m)^2}{n}\right)^{0.5} \quad (۹)$$

که در آن‌ها $\overline{Q_m}$ و $\overline{Q_s}$ به‌ترتیب میانگین دبی مشاهده‌ای و میانگین دبی شبیه‌سازی شده بر حسب مترمکعب بر ثانیه، Qm و Qs به‌ترتیب نشان دهنده دبی مشاهده‌ای و دبی شبیه‌سازی شده برحسب مترمکعب بر ثانیه و Qm,i و Qs,i به‌ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دبی در طول دوره شبیه‌سازی و n تعداد داده‌ها است.



شکل ۲- الف) نقشه DEM ب) نقشه کاربری اراضی ج) نقشه خاک‌شناسی حوضه آبخیز سنجابی

جدول ۱- ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع ایستگاه
۱	بوانه	باران‌سنجی	۴۶° ۵۷′	۳۴° ۵۲′	۱۲۷۴
۲	دوآب مرک	هیدروکلیماتولوژی	۴۶°۴۷′	۳۴°۳۳′	۱۲۹۰
۳	روانسر	سینوپتیک	۴۶°۳۹′	۳۴°۴۳′	۱۳۷۹
۴	زکریای سنجابی	باران‌سنجی	۴۶°۳۶′	۳۴°۴۰′	۱۳۴۲
۵	گهواره	باران‌سنجی	۴۶° ۲۵′	۳۴° ۲۰′	۱۵۲۰
۶	نهرآبی	باران‌سنجی	۴۶°۳۴′	۳۴°۴۰′	۱۳۷۰

www.SID.ir

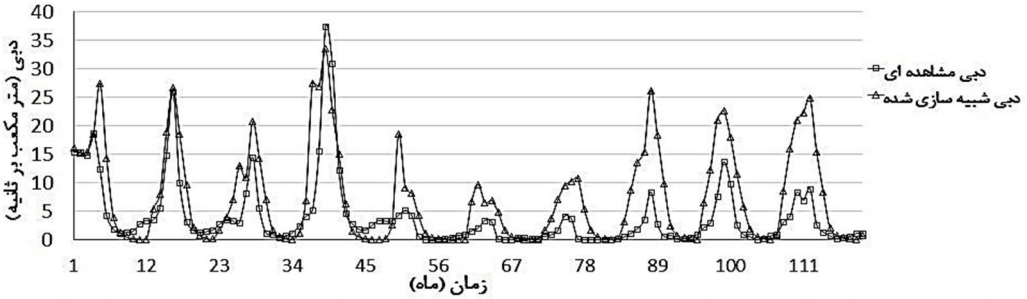
Archive of SID

جدول ۲- پارامترهای انتخاب شده برای واسنجی حساسیت‌سنجی مدل SWAT

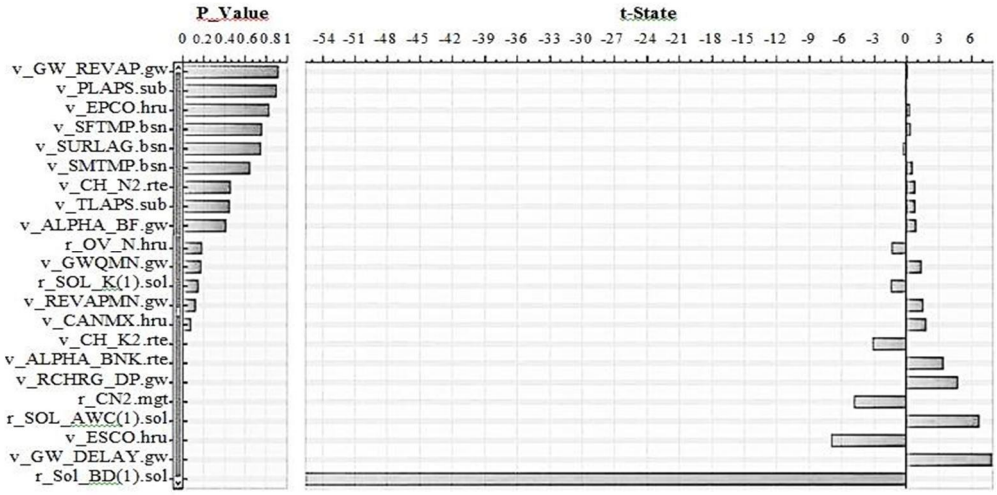
ردیف	پارامتر	علامت اختصاری	ردیف	پارامتر	علامت اختصاری
۱	چگالی توده خاک	SOL_BD	۱۲	عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی	GWQMN
۲	زمان تأخیر جریان زیرزمینی	Gw_Delay	۱۳	ضریب زبری دامنه	OV_n
۳	فاکتور جبران تبخیر از خاک	ESCO	۱۴	فاکتور ضریب جریان پایه (روز)	ALPHA_BF
۴	ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک	SOL_AWC	۱۵	گرادیان ارتفاعی بارش	TLAPS
۵	شماره منحنی SCS	CN2	۱۶	ضریب مانینگ در کانال اصلی	CH_N2
۶	ضریب انتقال از سفره کم‌عمق به عمیق	RCHRG_DP	۱۷	درجه حرارت ذوب برف (درجه سانتی‌گراد)	SMTMP
۷	ثابت تخلیه جریان از کانال	ALPHA_BNK	۱۸	ضریب تأخیر جریان سطحی	SURLAG
۸	هدایت هیدرولیکی مؤثر کانال	CH_K2	۱۹	درجه حرارت ریزش برف	SFTMP
۹	حداکثر ذخیره تاج پوشش گیاهی	CANMX	۲۰	فاکتور جریان برداشت آب گیاه	EPCO
۱۰	عمق آستانه شروع انتقال از سفره کم‌عمق به عمیق	REVAPMN	۲۱	گرادیان ارتفاعی دما	PLAPS
۱۱	هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع (mm/h)	SOL_K	۲۲	ضریب تبخیر آب زیرزمینی	GW_REVAP

نتایج و بحث

پس از وارد کردن اطلاعات حوضه سنجابی به مدل SWAT، مدل با ضریب‌های اولیه پارامترها که همان مقادیر از پیش مشخص شده هستند، اجرا شد. مقادیر دبی شبیه‌سازی شده با این مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین نتایج حساسیت‌سنجی برنامه PSO در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- مقادیر جریان ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای رودخانه دوآب مرک در دوره ۲۰۰۴-۱۹۹۵ پیش از واسنجی



شکل ۴- نتایج حساسیت‌سنجی در برنامه PSO

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به معیارهای p-value و t-state در شکل ۴، تعداد ۸ پارامتر حساس‌تر که اهمیت بیشتری در تعیین دبی خروجی مدل SWAT دارند انتخاب شدند و با معرفی داده‌های دبی ماهانه مشاهده‌ای ایستگاه هیدرومتری حوضه سنجابی (ایستگاه دوآب مرک) در برنامه PSO، با ۴ تکرار و ۱۰۰۰ شبیه‌سازی (به طور کلی ۴۰۰۰ شبیه‌سازی)، واسنجی شدند. موقعیت اولیه ذرات در این برنامه به‌صورت تصادفی در محدوده مجاز پارامترها (بین حداقل و حداکثر) گرفته شده است. زمان اجرای برنامه PSO برای ۴۰۰۰ تکرار، در رایانه کیفی سه هسته‌ای (Core(TM) i3 CPU M 330 2.13GHz) با حافظه سه گیگابایت حدود ۴ ساعت بوده است. نتایج حاصل برای مقادیر بهینه پارامترها در حوضه سنجابی در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول علامت (*) بدین معنی است که مقدار فعلی پارامتر با این مقدار بهینه در مدل SWAT جایگزین می‌شود و علامت (**) بدین معنی است که مقدار بهینه پارامتر با عدد یک جمع جبری می‌شود و حاصل آن در مقدار فعلی پارامتر ضرب می‌شود و جایگزین مقدار پارامتر می‌شود.

جدول ۳- واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای حساس مدل SWAT برای دوره ماهانه در برنامه PSO

رتبه حساسیت	علامت اختصاری پارامتر	حداقل	حداکثر	مقدار بهینه پارامتر
۱	SOL_BD	-۰/۵	۰/۶	۰/۴**
۲	Gw_Delay	۳۰	۴۵۰	۳۱*
۳	ESCO	۰/۸	۱/۰	۰/۹۳*
۴	SOL_AWC	-۰/۲	۰/۴	۰/۲ **
۵	CN2	-۰/۲	۰/۲	۰/۱۲ **
۶	RCHRG_DP	۰/۰	۱/۰	۰/۴۸ **
۷	ALPHA_BNK	۰/۰	۱/۰	۰/۰۱*
۸	CH_K2	۵/۰	۱۳۰	۳۶/۵*

پس از اجرای برنامه PSO، مقادیر پارامترهای واسنجی شده، به‌صورت دستی در مدل SWAT اصلاح شدند. سپس مدل برای دوره ماهانه سه سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ اجرا و اعتبارسنجی شد. نتایج مقادیر تابع هدف NS (ناش- ساتکلیف) و شاخص‌های ارزیابی کارآیی مدل SWAT، پیش و پس از واسنجی و در دوره اعتبارسنجی، در جدول ۴ آورده شده‌اند.

نتایج دبی مشاهده‌ای و محاسباتی در حوضه آبخیز سنجابی برای گام زمانی ماهانه در دوره واسنجی، در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین، نتایج هیدروگراف جریان در دوره اعتبارسنجی در شکل ۶ نشان داده شده است.

ارزیابی نتایج واسنجی مدل SWAT، با استفاده از الگوریتم PSO، نشان داد، ضریب ناش- ساتکلیف (NS) که مهم‌ترین معیار ارزیابی مدل SWAT است، پس از واسنجی بهبود یافته و در بازه رضایت‌بخش قرار دارد و این مقدار نشان از شبیه‌سازی مطلوب مدل در گام زمانی ماهانه است. همچنین در دوره اعتبارسنجی، NS بهبود یافته و مقدار رضایت‌بخشی را نشان می‌دهد. به طور عموم اگر شاخص ناش- ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل اجرا شده است و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (ناش و ساتکلیف، ۱۹۷۰). همچنین، مقدار ضریب تعیین R^2 که نسبت پراکندگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و مقادیر نزدیک به یک این معیار بهینه است، نشان از کارآیی مؤثر الگوریتم PSO در واسنجی مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب است.

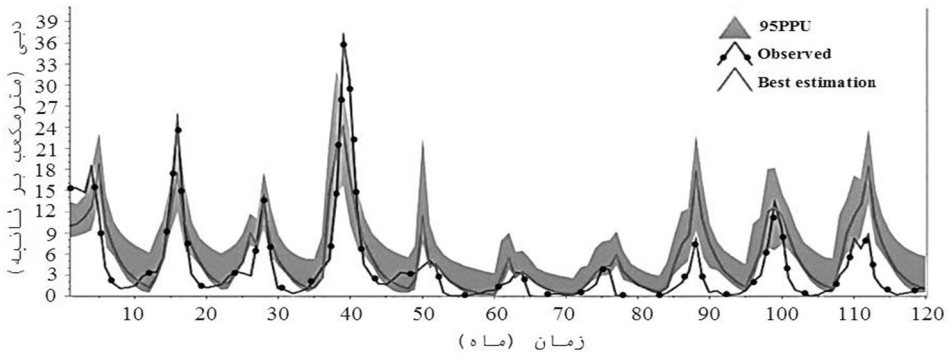
مقدار ضریب RMSE، که تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده رواناب با مدل و مقدار واقعی آن است و ابزار خوبی برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی بایک مجموعه داده است، پس از واسنجی کاهش چشم‌گیری را نشان می‌دهد. از آنجا که هرچه این معیار به صفر نزدیک باشد، برآورد مدل بهتر انجام شده است، نتایج حاصل دقت الگوریتم بهینه‌سازی PSO را در واسنجی مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه نشان می‌دهد.

www.SID.ir

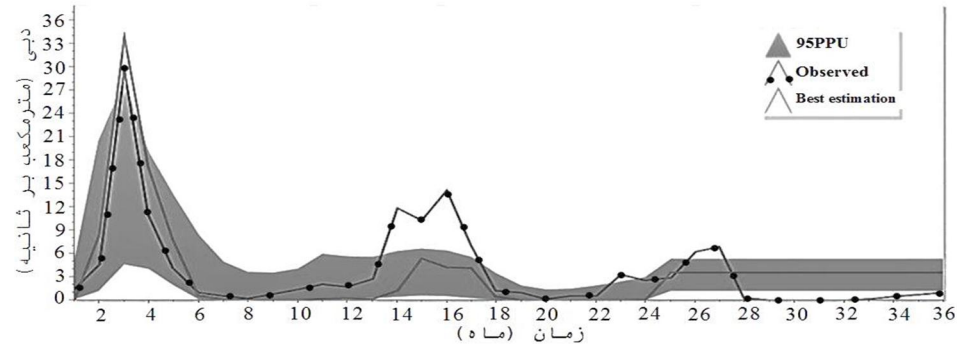
Archive of SID

جدول ۴- مقادیر تابع هدف و شاخص‌های ارزیابی کارآیی مدل SWAT

شاخص ارزیابی	NS	R^2	RMSE
پیش از واسنجی (۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴)	-۰/۰۶	۰/۵۹	۱۳/۸۷
پس از واسنجی (۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴)	۰/۵۸	۰/۶۵	۶/۷۴
دوره اعتبارسنجی (۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷)	۰/۶۰	۰/۶۷	۳/۶۶



شکل ۵- مقادیر جریان ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای رودخانه دوآب مرک در دوره واسنجی (۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴)



شکل ۶- مقادیر جریان ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای رودخانه دوآب مرک در دوره اعتبارسنجی (۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷)

نتیجه‌گیری

به طور کلی این پژوهش نشان داد که به کار گرفتن نرم‌افزار SWAT2009 و واسنجی آن با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات در مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز سنجابی در مقیاس زمانی ماهانه نتایج مطلوب و خوبی به دست می‌دهد. ژانگ و همکاران (۲۰۰۸) نیز، در پژوهش خود با استفاده از پنج الگوریتم بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک، SCE، PSO، تکامل تفاضلی و سیستم ایمنی مصنوعی) به واسنجی پارامترهای مدل SWAT پرداختند و نشان دادند که الگوریتم PSO، با تعداد تکرار کمتری، به پارامترهای بهینه‌تر می‌رسد.

از آنجا که مدل توپوگرافی حوضه، در مقایسه با واقعیت موجود در حوضه به اندازه کافی جزئیات کامل را دربر نمی‌گیرد، ممکن است در نتایج مدل و مقادیر مشاهده‌ای کمی اختلاف ایجاد شود. همچنین اختلاف شبیه‌سازی‌ها در دوره واسنجی و اعتبارسنجی می‌تواند به‌دلیل متفاوت بودن اقلیم متفاوت این دوره‌ها باشد. واسنجی پارامترهای مدل SWAT در سایر حوضه‌های آبخیز ایران برای بهره‌گیری از توانایی این مدل در شبیه‌سازی رواناب، بار رسوب، کیفیت آب و انتقال آلودگی‌های آب، مدیریت حوضه‌ها، پیش‌بینی رواناب، بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی حوضه‌ها در حجم رواناب سطحی حوضه و همچنین بررسی اثرات تغییر اقلیم در حوضه‌ها می‌تواند موضوع پژوهش‌های آینده باشد.

منابع

۱. غلامی ش. ۱۳۸۲. مدل شبیه‌سازی رسوب روزانه با استفاده از مدل توزیعی SWAT درحوضه آبخیز امامه. فصل‌نامه پژوهش و سازندگی.۱۶(۲): ۲۸-۳۳.

www.SID.ir

Archive of SID

2. Abbaspour K. C. Johnson C. A. Van Genuchten M. Th. Schulin R. and Scholappi E. 1997. A sequential uncertainty domine inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters. Water Resources Research. 33(8): 1879-1892.
3. Abbaspour k. C. 2011. SWAT-CUP4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Eawag Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. www. neprashtechnology.ca/Downloads/SwatCup/Manual/Usermanual_Swat_Cup.pdf.
4. Alansi A. W. Amin M. S. M. Abdul Halim G. Shafri H. Z. M. and Aimrun W. 2009. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. Hydrology and Earth System. Sciences. Discuss. 6(6): 7581-7609.
5. Arnold J. G. Srinivasan R. Muttiah R. S. and Williams J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. Journal of American Water Resource Association. 34(1): 73-89.
6. Baffaut C. Farrand T. D. and Benson V. W. 2005. Potential accuracy of water quality estimates based on non-calibrated SWAT simulations. 3th international SWAT conference. Zurich. Switzerland. 301-309.
7. Beven K. J. 2001. Rainfall-Runoff Modeling: The Primer, John Wiley & Sons, Ltd., New York, New York. 372 p.
8. Carlisle A. and Dozier G. 2001. An Off-The-Shelf PSO. Proc. of the Particle Swarm Optimization Workshop. 1-6.
9. Duan Q. Sorooshian S. and Gupta V. K. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research. 28(4): 1015-1031.
10. Gupta H. V. Sorooshian S. and Yapo P. O. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. Journal of Hydrological Engineering. 4(2): 135-143.
11. Kennedy J. 1998. The Behavior of Particles. Evolutionary Programming VII: Proceedings of the Seventh Annual Conference on Evolutionary Programming. San Diego, CA. 581-589
12. Kennedy J. and Eberhart R. 1995. Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway NJ. 1942-1948.
13. Misra R. K and Rose C. W. 1995. An examination of relationship between erodibility parameters and soil strength. Australian Journal of soil Research. 33(4): 715-732.
14. Nash J. E. and Sutcliffe J. V. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models 1. A Discussion of Principles. Journal of Hydrology. 10(3): 282-290.
doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
15. Neitsch S. L. Arnold J. G. Kiniry. J. R. Williams J. R. and King W. K. 2002. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Blackland Research Center. Texas Agricultural Experiment Station; Temple, TX, BRC Report 02–05.
16. Neitsch S. L. Arnold J. G. Kiniry J. R. Williams J. R. and King W. K. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Blackland Research Center, Texas, AgriLife Research.
17. Peterson T. R. and Hamlet J. M. 1998. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. Journal of. American Water Resources Association. 34(3): 531-544.
18. Shepherd B. Harper D. and Millington A. 1999. Modeling catchment-scale nutrient transport to water courses in the U.K. Hydrobiologia 395-396(0): 227-238.
19. Shi Y. and Eberhart R. 1998. Parameter Selection in Particle Swarm Optimization. In: Porto V. W. Saravanan N. Waagen D. and Eiben A. E. (eds) Evolutionary Programming VII, 611-616.
20. Shi Y. and Eberhart R. 1999. Empirical study of particle swarm optimization. Proceeding IEEE International Congerss on Evolutionary Compution. Piscataway, NJ. 1945-1950.
21. Srinivasan R. Rammanaraynan T. S. Arnold J. G. and Bednarz S. T. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part II: model application, Journal of American. Water Resources Association. 34(1): 91-101.
22. Vrugt J. A. Gupta H. V. Bouten W. and Sorooshian S. 2003. A ShuffledComplex Evolution Metropolis algorithm for optimization anduncertainty assessment of hydrologic model parameters. Water Resources Research. 39(8): SWC (1-1)-SWC (1-18). doi:10.1029/2002WR001642.
23. Zhang X. Srinivasan R. Zhao K. and Liew M. V. 2008. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. Hydrological Processes. 23(3): 430-441.

www.SID.ir