Archive of SID

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و سوم، شماره اول، ۱۳۹۵
http://jwsc.gau.ac.ir

کاهش عدم قطعیت در یک مدل نیمه‌توزیعی هیدرولوژیکی با روش GLUE

مریم‌سادات جعفرزاده[۱]، *حامد روحانی[۲]، حسین سلمانی[۳] و ابولحسن فتح‌آبادی[۲]

[۱]دانشجوی دکتری گروه آبخیزداری، دانشگاه لرستان، [۲]استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه گنبد کاووس،
[۳]دانشجوی دکتری گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۱۰

چکیده

سابقه و هدف: واسنجی مدل‌های نیمه‌توزیعی- فیزیکی هیدرولوژیکی به‌دلیل عدم قطعیت در پارامترهای زیاد مدل و عدم توانایی در اندازه‌گیری توزیعی خصوصیات فیزیکی در سطح حوضه آبخیز، منجر به افزایش عدم قطعیت در بهینه‌سازی پارامترها می‌شود. بنابراین، به‌منظور کاربرد موفقیت‌آمیز مدل‌های هیدرولوژیکی در پژوهش‌های کاربردی منابع آب، واسنجی دقیق و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی ضروری است. پژوهش‌های مختلف در تحلیل پارامترهای عدم قطعیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و رسوب بیانگر اثر قابل‌توجه تعداد محدودی پارامتر بر خروجی مدل است. در این مقاله، با استفاده از روش عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته (GLUE) در مدل SWAT، کمیت ورودی و خروجی جریان ماهانه در حوضه شرقی رودخانه گرگانرود به مساحت ۷۰۷۲ کیلومترمربع برآورد شد.

مواد و روش‌ها: ایستگاه هیدرومتری قزاقلی یکی از ایستگاه‌های آب منطقه‌ای گلستان جهت شبیه‌سازی رواناب ماهانه انتخاب شد. بارش سالیانه از غرب به شرق، از ۸۰۰ میلی‌متر به ۲۰۰ میلی‌متر و جنوب به شمال کاهش می‌یابد. در این پژوهش اجرای مدل در مقیاس زمانی ماهانه و از سال ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۳ انجام شد، به‌طوری‌که سال آبی ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۰ به‌عنوان دوره واسنجی و سال آبی ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۳ برای دوره اعتبارسنجی انتخاب گردید.

یافته‌ها: در مدل‌های توزیعی و نیمه‌توزیعی مانند SWAT، جهت به‌دست آوردن خروجی بهتر، شناسایی پارامترهای حساس، قبل از واسنجی ضروری است. براساس این مطالعه پارامترهایی مانند CN2 (شماره منحنی)، GWQMN (حداقل عمق مورد نیاز سطح ایستایی در سفره‌های کم‌عمق)، RCHRG_DP (درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم‌عمق)، ALPHA_BNK (پارامتر α در جریان پایه)، ESCO (فاکتور جبران‌کننده تبخیر از خاک) و SOL_K (هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های خاک) به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها تعیین شدند. با توجه به نتایج این مطالعه، پارامتر CN2، مؤثرترین پارامتر در دبی خروجی از منطقه مورد مطالعه می‌باشد و شماره منحنی به‌عنوان منبع اصلی عدم قطعیت در نتایج مشخص شد. نتایج این مطالعه با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین و ضریب ناش- ساتکلیف در خروجی ایستگاه هیدرومتری قزاقلی برای دوره واسنجی به‌ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۲ و برای دوره اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۸۳و ۰/۷۳ می‌باشد. از طرف دیگر روش GLUE به خوبی توانسته رواناب را در طول دوره مورد مطالعه واسنجی کند، به‌طوری‌که بین ۶۹ تا ۷۴ درصد از داده‌های مشاهداتی به‌ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده اطمینان ۹۵ درصد قرار گرفتند.

* مسئول مکاتبه: rouhani.hamed@gonbad.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری: نتایج آنالیز عدم قطعیت بیانگر عدم قطعیت زیاد مدل در دوره واسنجی بود اگرچه نتایج شبیه‌سازی رواناب قابل‌قبول بود و ۶۹ درصد داده‌های مشاهداتی در محدوده اطمینان ۹۵ درصد قرار گرفتند. نتایج کلی نشان داد مدل SWAT در پژوهش حاضر، عملکرد قابل‌قبولی برای برآورد رواناب داشته و می‌توان از آن برای ارزیابی هیدرولوژیکی حوزه گرگانرود استفاده کرد. این مطالعه اطلاعات مفیدی برای مدل‌سازی هیدرلوژیکی مربوط به سیاست‌گذاری‌های توسعه‌ای در حوزه رودخانه گرگانرود و مناطق مشابه ارایه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: GLUE، SWAT، تحلیل حساسیت، عدم قطعیت، گرگانرود

مقدمه

وقوع بارندگی‌های شدید به همراه تشکیلات زمین‌شناسی حساس به فرسایش، مدیریت نامطلوب اراضی از جمله قطع و بهره‌برداری جنگل در سطح وسیع و تغییر شدید کاربری اراضی از جنگل به اراضی دیم، سبب افزایش پتانسیل لازم برای تشکیل رواناب و در نتیجه فرسایش و تخریب خاک و تولید رسوب می‌شود. به‌منظور کاهش خطرات و خسارات ناشی از این امر و انجام دادن اقدامات مدیریتی مناسب، برآورد رواناب و رسوب و پیش‌بینی شرایط آتی ضروری است. در سال‌های اخیر، مدل‌های هیدرولوژیکی توسط مدیران منابع آب به‌عنوان ابزاری برای درک و مدیریت فعالیت‌های زیست‌محیطی و انسانی که سیستم حوضه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند، به‌صورت گسترده استفاده شده است. از طرفی، در اکثر آبخیزهای کشور به‌دلیل تعداد کم ایستگاه‌های اندازه‌گیری و عدم وجود آمار و اطلاعات کافی به‌منظور برآورد تغییرات آتی، شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی آبخیزها با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی بهترین راهکار می‌باشد. عموماً، این مدل‌ها برای دست یافتن به یک مدل هیدرولوژیکی بهینه با توابع هدف مناسب (مانند مجموع مربعات خطا) واسنجی می‌شوند. یکی از نگرانی‌های مهم، عدم قطعیت خروجی مدل است، خصوصاً هنگامی‌که نتایج مدل‌سازی برای برنامه‌ریزی مدیران استفاده می‌شوند. پیش‌بینی‌های مدل به‌دلیل عدم قطعیت مرتبط با ورودی، ساختار مدل، پارامتر و خروجی، یک مقدار مشخص نیستند و باید همراه با یک محدوده اطمینان ارائه شوند (۹، ۱۹، ۳۰، ۴۰). ارزیابی معقول عدم قطعیت پیش‌بینی فرآیندهای هیدرولوژیکی برای منابع آب و دیگر فرآیندهای تصمیم‌گیری مرتبط، مهم هستند (۲۶). بیش برآورد عدم قطعیت ممکن است سبب هزینه بیش از حد مالی و زمانی در مدیریت حوضه آبخیز شود، در حالی‌که برآورد کم عدم قطعیت، به تصمیم‌گیری اشتباه در مدیریت منابع آب و عدم پیش‌بینی صحیح فرصت‌ها و موقعیت‌های بالقوه حوضه آبخیز منجر می‌شود.

به‌منظور کاربرد موفقیت‌آمیز مدل‌های هیدرولوژیکی در پژوهش‌های کاربردی منابع آب، واسنجی دقیق و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی ضروری است (۴۰، ۴۳). روش‌های مختلف واسنجی و تحلیل عدم قطعیت به‌منظور عملکرد مؤثر و کارایی مدل SWAT، توسعه یافته‌اند (۱، ۴۰) و برای بهبود قابلیت اطمینان پیش‌بینی و تعیین عدم قطعیت پیش‌بینی شبیه‌سازی‌های SWAT استفاده شده‌اند. پژوهش‌های متعددی عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی را بررسی کرده‌اند، که گاسمن و همکاران (۲۰۱۴) مرور جامعی از پژوهش‌های گذشته را ارائه کرده‌اند (۱۷). شن و همکاران (۲۰۱۲) به تحلیل پارامترهای عدم قطعیت

www.SID.ir

Archive of SID

در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و رسوب با مدل SWAT و با استفاده از روش GLUE در منطقه‌ای در چین پرداختند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی رسوب عدم قطعیت بیش‌تری نسبت به جریان دارد و عدم قطعیت در بارش‌های با شدت زیاد در فصل خشک حتی بیش‌تر هم خواهد بود (۳۴). شاپ و همکاران (۲۰۱۴) قابلیت مدل SWAT را در شبیه‌سازی وقایع تک‌رخداد و طولانی‌مدت دوره بارش مانسون در حوضه آبخیز کوهستانی بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترکیبی از توابع هدف، شرایط هیدرولوژیکی و رشد گیاه درک بهتری از فعل و انفعلات سیستم تحت مطالعه را خواهد داد. نتایج مدل‌سازی بر رواناب نشان داد که در نواحی مرتفع و شیب‌دار آب پایه غالب است، در صورتی‌که در نواحی با ارتفاع کم‌تر، رواناب سطحی مؤثرتر بود (۳۵). سانجیا و همکاران (۲۰۱۴) جهت شناخت پارامترهای مهم مؤثر بر هیدروگراف حاصل از پنج حوضه آبخیز در کلرادو امریکا، از مدل نیمه‌توزیعی SWAT و آنالیز حساسیت فراگیر بر پایه واریانس آزمون حساسیت دامنه فوریه[1] استفاده کردند. متوسط جریان ماهانه و ریشه میانگین مربع خطای جریان طی دوره ۲۰ ساله برای دو هدف مجزا در این آنالیز استفاده شد. نتایج نشان داد که حجم جریان عمدتاً تحت‌تأثیر فرآیندهای زیر سطحی کم‌عمق قرار می‌گیرد، در حالی‌که واکنش بین آب‌های زیرزمینی و فرایندهای برف، عوامل اصلی زمان جریان بودند (۳۲). عارفی و همکاران (۲۰۱۳) و دولت‌آبادی و زمردیان (۲۰۱۳) به‌ترتیب در حوزه آبخیز چهل‌چای استان گلستان و حوزه آبخیز فیروزآباد رواناب را با استفاده از مدل SWAT و روش SUFI2 شبیه‌سازی کردند. براساس نتایج واسنجی، مدل، همبستگی مناسبی را با داده‌های اندازه‌گیری شده شدت جریان در هر دو حوضه آبخیز مورد مطالعه نشان داد (۵، ۱۳). کاویان و همکاران (۲۰۱۴)، تأثیر مقیاس حوضه آبخیز بر عملکرد مدل SWAT را با استفاده از روش SUFI2 در دو ایستگاه از حوزه آبخیز هراز، ارزیابی کردند. براساس نتایج آنالیز حساسیت، حساسیت مدل نسبت به پارامترهای CN2، هدایت الکتریکی مؤثر بستر رودخانه (CH-K2) و عامل ثابت تخلیه کانال (ALPHA-BNK) بیش‌تر بود. نتایج کلی واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که این مدل در مناطق دشتی با مساحت بیش‌تر و ارتفاع کم‌تر نسبت به مناطق کوهستانی از دقت بیش‌تر و کارایی بهتری برخوردار است (۲۴). سلمانی و همکاران (۲۰۱۳) کارایی مدل Arc SWAT را با استفاده از روش تکامل رقابتی جامع SCE[2] در شبیه‌سازی جریان روزانه و ماهانه حوزه آبخیز قزاقلی، با استفاده از داده‌های دوره آماری ۱۳۷۱-۱۳۶۵، ارزیابی کردند. تحلیل حساسیت با استفاده عامل t نمایانگر حساسیت ۱۷ پارامتر از ۲۷ پارامتر در شبیه‌سازی رواناب بود. بررسی عدم قطعیت مدل نشان داد که شبیه‌سازی در پایه زمانی ماهانه نسبت به روزانه در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی از دقت بالاتری برخوردار بوده و به‌طورکلی نتایج بیانگر آن بود که تبخیر و رواناب دو عامل اصلی در هدررفت آب از حوضه مورد مطالعه می‌باشند (۳۱).

مدل‌های تجاری و متن باز[3] زیادی برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه قابل دسترس بوده که در چارچوب‌ها، پیش‌فرض‌ها و محدودیت‌های مختلفی ارائه شده‌اند، بنابراین برای کاربرد آن در یک حوزه آبخیز خاص باید دقت شود. در این پژوهش اصلاح تخمین جریان ماهانه که از بالادست حوزه آبخیز گرگان‌رود در خروجی ایستگاه هیدرومتری قزاقلی وارد می‌شود، همراه با تحلیل عدم قطعیت

1- Fourier Amplitude

2- Shuffled Complex Evolution

3- Open source

www.SID.ir

Archive of SID

فرایندهای مدل‌سازی رواناب با استفاده از روش GLUE انجام شد. از آن‌جایی‌که یک مدل هیدرولوژیکی فیزیکی قادر به شبیه‌سازی بسیاری از فرآیندهای کلیدی هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه می‌باشد، بنابراین مدل SWAT (۶)، که به‌طور گسترده برای ارزیابی مدیریت منابع آب (بیش از ۶۰۰ مقاله در دو دهه گذشته در مجلات علمی معتبر) به‌کار برده شده است (۱۶)، در این پژوهش استفاده شد.

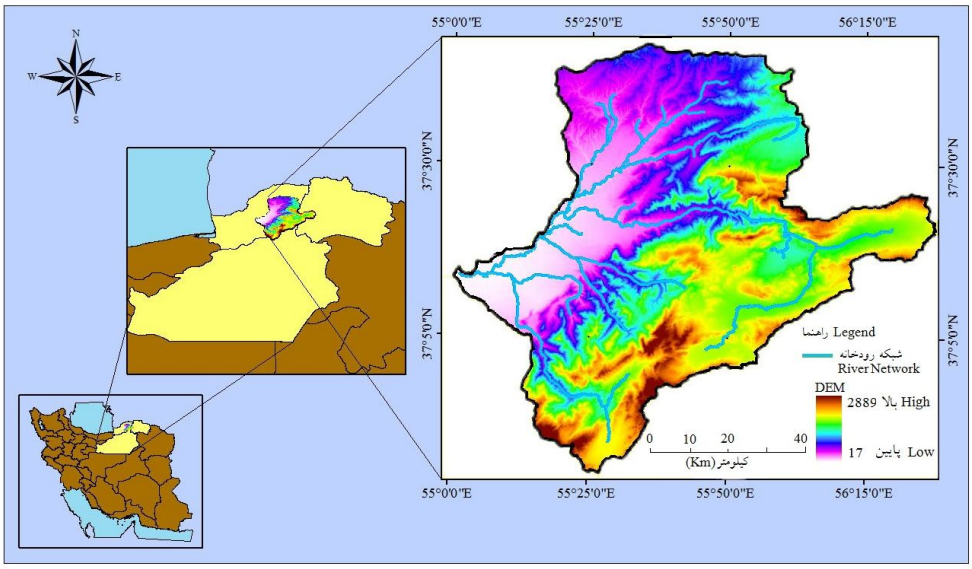
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز گرگانرود یکی از سه حوضه اصلی در استان گلستان است که در جنوب‌شرقی دریای خزر قرار دارد و در دسته‌بندی کلی هیدرولوژی ایران، بخشی از حوضه آبریز دریای خزر می‌باشد. در این مطالعه، ایستگاه هیدرومتری قزاقلی با مساحت تحت پوشش ۷۰۷۲ کیلومترمربع به‌عنوان ایستگاه مبنا برای شبیه‌سازی بارش- رواناب انتخاب گردید. ارتفاع این حوضه از ۲۸۸۹ متر در مناطق کوهستانی تا حداقل ارتفاع ۳۰ متر در خروجی حوضه مورد مطالعه متغیر می‌باشد (شکل ۱). میانگین سالانه دما در حدود ۱۶درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه حوضه از ۱۸۴ میلی‌متر در شرق حوزه تا ۸۶۶ میلی‌متر در غرب حوضه تغییر می‌کند. عمده کاربری اراضی در حوضه مذکور کاربری‌های مرتع – بوته‌زار و مخلوط جنگل‌های سوزنی‌برگ - پهن‌برگ به‌ترتیب با ۳۵/۰۸ و ۲۷/۰۱ درصد می‌باشد.

مدل هیدرولوژیکی SWAT: این مدل توسط وزارت کشاورزی آمریکا در سال ۱۹۹۵ با حمایت گروه تحقیقاتی دانشگاه A&M تگزاس توسعه یافت. مدل SWAT متعلق به مدل‌های هیدرولوژیک نیمه‌توزیعی، مفهومی و پیوسته است که برای شبیه‌سازی فرایندهای متعدد هیدرولوژیکی مانند تولید رواناب، فرسایش و رسوب و کیفیت آب در حوضه‌های آبخیز پیچیده و وسیع کاربرد دارد (۱۷). در این مدل، غیرهمگنی مکانی در دو سطح محاسبه می‌شود: ابتدا حوضه آبخیز به زیرحوضه‌هایی براساس نقشه‌های ارتفاعی (DEM) تقسیم و سپس با توجه به نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و شیب، به واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRU) تقسیم‌بندی می‌گردد. خصوصیات فیزیکی مانند شیب و ابعاد آبراهه‌ها برای زیرحوضه‌ها براساس نقشه ارتفاعی توسط مدل شبیه‌سازی می‌گردد. این تقسیم‌بندی حوضه آبخیز، به مدل SWAT توانایی انعکاس اختلاف در تبخیر و تعرق برای کاربری‌های مختلف اراضی و خاک را می‌دهد، دقت محاسباتی را افزایش داده و یک توصیف فیزیکی بهتر از بیلان آب می‌دهد. در این مدل از رابطه مانینگ برای تعیین مقدار سرعت جریان و از سه روش پنمن و مانتیس، پرایسلی- تیلور و هارگریوز- سامانی برای برآورد میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شود. همچنین دو روش شماره منحنی SCS و روش گرین- آمپت برای محاسبه حجم رواناب سطحی در مدل SWAT وجود دارد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز مورد مطالعه در بالادست ایستگاه هیدرومتری قزاقلی.

Figure 1. Location of the study area at upper part of Gazaghly hydrometric station.

همچنین نسبت اوج رواناب با استفاده از یک روش منطقی اصلاح شده محاسبه می‌شود. این بخش نشان‌دهنده ارتباط بین پوشش گیاهی و تراز آبی می‌باشد. در حالی‌که ذوب برف با یک روش تراز انرژی محاسبه می‌شود. ذوب برف روزانه در مدل، زمانی مشاهده می‌شود که حداکثر دما از دمای آستانه‌ای که از قبل تعریف شده بیش‌تر شود. مقدار روزانه شاخص سطح برگ (LAI) برای بخش PET در تبخیر بالقوه خاک و تعرق بالقوه گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص سطح برگ و گسترش ریشه با استفاده از مؤلفه "رشد محصول" شبیه‌سازی می‌شود. سیستم آب‌های زیرزمینی در SWAT، شامل سفره‌های آب کم‌عمق و عمیق می‌باشد. در SWAT، آب از طریق شبکه کانال با استفاده از روش روندیابی ذخیره متغیر (۴۴) یا از روش روندیابی رودخانه ماسکینگام (۱۲) مسیر خود را تعیین می‌کند. هر روش روندیابی، حالت مختلفی از موج کینماتیکی (حرکتی) است (۲۹). SWAT از مدل ذخیره‌سازی حرکتی توسعه‌یافته توسط اسلون و همکاران (۱۹۸۳) برای برآورد جریان زیرسطحی جانبی استفاده می‌کند (۳۷). این مدل جریان زیر سطحی را در یک سطح مقطع دوبعدی در امتداد یک مسیر جریان در پایین‌دست شیب یک دامنه شیبدار شبیه‌سازی می‌کند و برای محاسبه نفوذ هر یک از لایه‌های خاک پروفیل، از روش روندیابی ذخیره متغیر استفاده می‌کند. اگر خاک در طول دوره شبیه‌سازی، یخ زده باشد، نفوذ در لایه‌های خاک (۲۹) برابر صفر می‌شود. توصیف جزئیات اجزای مختلف مدل را می‌توان در نیچ و همکاران (۲۰۰۵) یافت (۲۹).

داده‌های مورد استفاده و اجرای مدل: داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های مکانی و داده‌های عددی و هیدروکلیماتولوژی می‌باشد. لایه کاربری اراضی شامل تصاویر کلاس‌بندی شده لندست و نقشه‌های کاربری اراضی (با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) و لایه خاک شامل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی برای هر لایه خاک (با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰) حوضه مورد بررسی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان و سازمان مدیریت و

www.SID.ir

Archive of SID

برنامه‌ریزی اخذ شد. مدل رقومی ارتفاع از داده‌های رادار SRTM/C با قدرت تفکیک زمینی معادل ۹۰ متر که وزارت ملی فضا و هوانوردی آمریکا (NASA) در سال ۲۰۰۳ ارائه کرد، استفاده شد. هم‌چنین داده‌های هواشناسی شامل داده‌های بارش، دمای کمینه و بیشینه، رطوبت نسبی، تشعشع خورشیدی و سرعت باد، در پایه سری زمانی روزانه از سازمان هواشناسی کل کشور و سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه گردید. علاوه بر این از دو ایستگاه سینوپتیک مراوه‌تپه و هاشم‌آباد گرگان به‌عنوان ایستگاه مولد اقلیمی (ایستگاه مورد استفاده برای بررسی خلأ آماری) استفاده گردید.

واحدهای هیدرولوژیک (HRU) بر مبنای نقشه‌های خاک با ۵۷ کلاس، کاربری اراضی در ۷ کلاس و شیب زیرحوضه‌ها در ۵ کلاس، در مدل SWAT تقسیم‌بندی و مشخص شدند. برای جلوگیری از ایجاد تعداد بیش از واحدهای هیدرولوژیکی، حد آستانه برای هر واحد هیدرولوژیکی ۱۰ درصد مساحت زیرحوضه مربوطه انتخاب گردید. جهت تفکیک مکانی بهتر، حوضه مورد نظر به ۱۲ زیرحوضه و ۱۱۴ واحد پاسخ هیدرولوژیک تقسیم شد. پس از بررسی آمار هواشناسی و هیدرومتری و شرایط حوضه در این پژوهش اجرای مدل در مقیاس زمانی ماهانه و از سال ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۳ انجام شد. به‌طوری‌که سال آبی ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۰ به‌عنوان دوره واسنجی و سال آبی ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۳ برای دوره اعتبارسنجی انتخاب گردید و جهت کاهش اثر خطاهای شرایط اولیه، سال اول (۱۹۸۳) به‌عنوان دوره تعادل جوی در نظر گرفته شد. دلیل عدم انتخاب سال‌های آماری اخیر به‌علت ناهمگنی آماری دبی به‌دلیل ایجاد تأسیسات مختلف مانند سدهای خاکی و انحرافی می‌باشد.

بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت: از آن‌جا که اندازه‌گیری مستقیم همه پارامترها در سطح حوضه ممکن نیست، لازم است مدل واسنجی شود. به این منظور در این مطالعه برای تسهیل واسنجی مدل از الگوریتم GLUE (تحت برنامه الحاقی SWAT-CUP) که بسیاری از پژوهشگران (۱۰، ۲۱، ۳۴، ۳۶) نیز در مطالعات هیدرولوژی به‌کار برده‌اند، استفاده شد. براساس روابط متقابل پیچیده بین پارامترهای مدل و رفتار غیرخطی مدل‌های محیطی در صورت وجود عدم قطعیت در داده‌های ورودی، پارامترها و ساختار مدل، مجموعه‌های متعددی از مقادیر پارامترها می‌توانند منجر به حصول رفتار مشابهی توسط مدل گردند (۹) و به‌عبارت دیگر یافتن یک سری منحصر به فرد پارامترهای بهینه غیرممکن است و این امر به سبب وجود خطا در پارامترهای ورودی و ساختار مدل‌ها می‌باشد. در طی چند سال اخیر، بررسی عدم قطعیت در داده‌های ورودی، پارامترها و ساختار مدل، توجه خاصی را در مسایل مدل‌سازی هیدرولوژیکی به خود جلب کرده است که رشد نمایی حجم مقالات ارایه شده در این حیطه گواه این ادعاست. در الگوریتم GLUE به‌عنوان روشی برای تعیین کمیت عدم قطعیت مدل (۹)، محدوده عدم قطعیت برای مقدار شبیه‌سازی شده با استفاده از مجموعه پارامترها که براساس معیار بزرگ‌نمایی عملکرد، مورد قبول واقع شده‌اند، تعیین می‌شود. در این روش، با فرض عدم وجود پارامترهای بهینه منحصر به فرد، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو چندین سری پارامترهای مختلف ایجاد می‌گردد. سپس با توجه به آستانه در نظر گرفته شده و عملکرد هر یک از سری پارامترها در پیش‌بینی آن‌ها به پارامترهای کارآمد و ناکارآمد تقسیم‌بندی می‌شوند. در گام بعد برای مجموعه پارامترهای کارآمد متناسب با عملکرد آن‌ها در پیش‌بینی وزنی اختصاص داده می‌شود. به‌عنوان مثال چنان‌چه عملکرد یک مجموعه

www.SID.ir

Archive of SID

از پارامترها مناسب نباشد به آن مجموعه از پارامترها وزن کمی اختصاص پیدا می‌کند و چنان‌چه عملکرد آن‌ها خوب باشد وزن زیادی اختصاص داده می‌شود (تخصیص وزن‌ها به‌گونه‌ای است که جمع وزن‌های اختصاص داده شده به مجموعه پارامترهای کارآمد برابر با یک است). در نهایت در هر گام زمانی با در نظر گرفتن وزن اختصاص‌یافته به هر یک از مجموعه پارامترهای کارآمد و خروجی‌های آن‌ها منحنی تراکم تجمعی خروجی در آن گام زمانی محاسبه می‌گردد. در این منحنی تراکم تجمعی مقادیر مربوط به احتمال‌های ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۹۷۵ استخراج و به‌ترتیب به‌عنوان حد پایین، مقادیر پیش‌بینی شده و حد بالا برای آن گام زمانی در نظر گرفته می‌شود. قبل از اجرای این روش کاربر باید یک سری تصمیم‌گیری‌های ذهنی مانند تعیین مقدار آستانه معیار بزرگنمائی، به‌منظور جداسازی شبیه‌سازی‌های کارآمد و ناکارآمد انجام دهد (۸، ۹). به‌طور معمول یک توزیع اولیه نظیر توزیع یکنواخت، توزیع نرمال و... که نوعی وزن‌دهی به احتمال انتخاب یک مقدار مشخص در دامنه عدم قطعیت پارامتر است، در نظر گرفته می‌شود که به آن توزیع پیشین پارامترها گفته می‌شود. سپس مدل با هر مجموعه پارامتر اجرا می‌شود و مجموعه‌های متعددی از خروجی مدل را تولید می‌کند که برای ایجاد فاصله عدم اطمینان برای پیش‌بینی‌های مدل استفاده می‌شود. پارامترهای تولید شده مدل در دو دسته گروه‌بندی می‌شوند: کارآمد، مجموعه‌ای از پارامترهای مدل که نتایج سازگار با مشاهدات را تولید می‌کنند و ناکارآمد؛ نتایج که در تضاد با مشاهدات است (۹). فرایند تحلیل GLUE به این صورت است که در گام نخست دامنه هر پارامتر بر اساس احتمال برابر به n فاصله هم پوشش (مشترک) تقسیم می‌شود. تعداد N مجموعه پارامتر تصادفی براساس روش‌های مبتنی بر مونت‌کارلو که در این پژوهش از روش نمونه‌گیری مربع لاتین برای افزایش دقت در شبیه‌سازی مونت‌کارلو بدون افزایش تعداد نمونه‌ها می‌شود، استفاده شده است (۷). اجرای مدل SWAT با استفاده از مجموعه پارامترهای تولید شده در گام قبل و محاسبه مقدار درست‌نمایی براساس مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی دبی می‌باشد.

در این پژوهش معیار کارایی ناش- ساتکلیف (E_{NS}) به‌عنوان یک معیار تشابه مورد استفاده قرار گرفت (۴، ۱۵، ۳۳). این فاکتور تعیین کارایی، به‌طور مرسوم برای ارزیابی انواع مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا که واریانس باقی‌مانده‌ها را استاندارد می‌نماید و مقدار عددی آن با طول دوره و میزان رواناب تغییر نمی‌کند (۲۲). معیار E_{NS} نسبت به داده‌های پرت بسیار حساس می‌باشد (۳۸) و می‌تواند تحت‌تأثیر شکل هیدروگراف (شاخه بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف) تغییر پیدا نماید (۲۸). هر چند این معیار حساسیت بیش‌تر به وقایع حد تا جریان‌های متوسط دارد (۲۵).

در مرحله بعد با در نظر گرفتن آستانه قابل پذیرش که در روش GLUE اختیاری است و بر تخمین عدم قطعیت اثر می‌گذارد (۲۷). آستانه قابل پذیرش، سبب جداسازی مجموعه پارامترهایی که منجر به عملکرد بهتر مدل شده‌اند از سایر مجموعه پارامترها می‌شود. باید توجه داشت که با کاهش آستانه قابل پذیرش منجر به شبیه‌سازی‌های رفتاری بیش‌تر و در نتیجه باندهای عدم قطعیت بزرگ‌تر می‌شود و بالعکس (۴۲). در این مطالعه با توجه به پراکنش و تغییرات بارندگی زیاد و تنوع کاربری اراضی و تجربیات کسب شده از اجرای مدل در مرحله تحلیل حساسیت، مقدار آستانه قابل پذیرش ۰/۴ برای E_{NS} در نظر گرفته شد تا تعداد اجراهای قابل‌قبول مدل افزایش یابد. اگر مقدار آستانه E_{NS} کم‌تر از این مقدار بود، ناکارآمد و اگر بیش‌تر از این

www.SID.ir

Archive of SID

مقدار بود کارآمد در نظر گرفته شد. سپس عدم قطعیت خروجی مدل با استفاده از وزن‌های درست‌نمایی برای مجموعه پارامترهای کارآمد محاسبه شد. مجموع این وزن‌ها برابر با یک بوده و تشکیل تابع چگالی احتمال را می‌دهند. در مرحله بعد بازه اطمینان ۹۵ درصد برای خروجی شبیه‌سازی‌شده مدل محاسبه می‌شود که درآن ۲/۵ درصد حدود بالا و پایین آن به‌عنوان شبیه‌سازی‌های پرت کنار گذاشته می‌شود و محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد سطح اطمینان (95PPU) به‌دست می‌آید. برای به کمیت در آوردن دقت واسنجی یا عدم قطعیت عامل d و عامل P که به‌ترتیب میانگین نسبت عرض بازه به انحراف معیار متغیر مشاهده‌ای و درصد داده‌های شبیه‌سازی که در محدوده باند ۹۵ درصد عدم قطعیت می‌باشند، پیشنهاد شده است (۲). مقدار ایده آل عامل P زمانی است که تمامی داده‌های مشاهده در محدوده باند عدم قطعیت 95PPU یعنی برابر با یک قرار بگیرند. عامل d نشان‌دهنده بزرگ بودن عدم قطعیت است و مناسب‌ترین مقدار برای آن زمانی است که به صفر نزدیک باشد. برای انجام اعتبارسنجی الگوریتم GLUE در ۱۰۰۰ تکرار و معیار E_{NS} برابر با ۰/۴۰ برای دوره هفت‌ساله (۱۹۸۴ تا ۱۹۹۰) اجرا شد. با استفاده از دامنه مقادیر پارامترهای حاصل از واسنجی، اعتبارسنجی برای سال آبی ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۳ انجام شد.

انجام تحلیل حساسیت که منجر به شناخت پارامترهایی می‌شود که مدل نسبت به آن‌ها حساسیت بیش‌تری نشان می‌دهد و در مدل‌های نیمه‌توزیعی مانند SWAT به‌علت ابعاد و پیچیدگی مسأله، سبب می‌گردد که در زمان انجام عملیات واسنجی صرفه‌جویی شود. ارزیابی نتایج مرحله تحلیل حساسیت با استفاده از شاخص آماری قدرمطلق t-stat می‌باشد (۱). مقادیر زیاد قدرمطلق t-stat حساسیت بیش‌تر پارامتر را نشان می‌دهد. بنابراین قبل از واسنجی مدل، تحلیل حساسیت بر روی ۲۳ پارامتر مؤثر بر دبی جریان که دامنه تغییرات طبق پژوهش‌های گذشته (۳۱) و نظر کارشناسی تنظیم شده بود با ۱۵۰ بار اجرای مدل انجام گرفت.

نتایج و بحث

پس از جمع‌آوری اطلاعات پایه (پوشش گیاهی، خاک و توپوگرافی) و تهیه آمار و اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی، مدل در پایه زمانی ماهانه به‌منظور بررسی عدم قطعیت شبیه‌سازی رواناب در منطقه مورد مطالعه اجرا گردید. در این بخش ابتدا نتایج تحلیل حساسیت پارامترها در مدل ارائه شده است، سپس تحلیل عدم قطعیت و واسنجی پارامترهای مؤثر بر جریان انتخابی در مدل ارائه و بحث شده است.

تحلیل حساسیت: در بررسی حاضر تحلیل حساسیت و عدم قطعیت با شبیه‌سازی بر اساس روش GLUE انجام شد. با توجه به محدودیت توان سیستم رایانه‌ای در دسترس در پردازش حجم وسیع اطلاعات حاصل از هر اجرای GLUE و تجربه سایرین در استفاده از آن برای تحلیل حساسیت ۱۵۰ شبیه‌سازی برای ۲۳ پارامتر بر ۷۷ داده ماهانه هفت‌ساله (۱۹۸۴ تا ۱۹۹۰) انجام شد. نتایج تحلیل حساسیت با استفاده از شاخص آماری قدرمطلق t-stat ارزیابی گردید. حساسیت نسبی ارائه شده توسط t-stat نشان‌دهنده تأثیر تغییر سایر فاکتورها بر میانگین تغییرات توابع هدف پروژه موردنظر می‌باشد. شکل ۲ ترتیب اهمیت پارامترهای حساس براساس مقادیر t آماری را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲، در پیش‌بینی ماهانه دبی جریان، CN با مقدار آماری t برابر ۱۶ حساس‌ترین پارامتر بود. حساسیت بالای این عامل در حوضه مورد نظر نشان‌دهنده نقش مهم کاربری و خاک در مقدار رواناب خروجی از حوضه است. با توجه به نتایج

www.SID.ir

Archive of SID

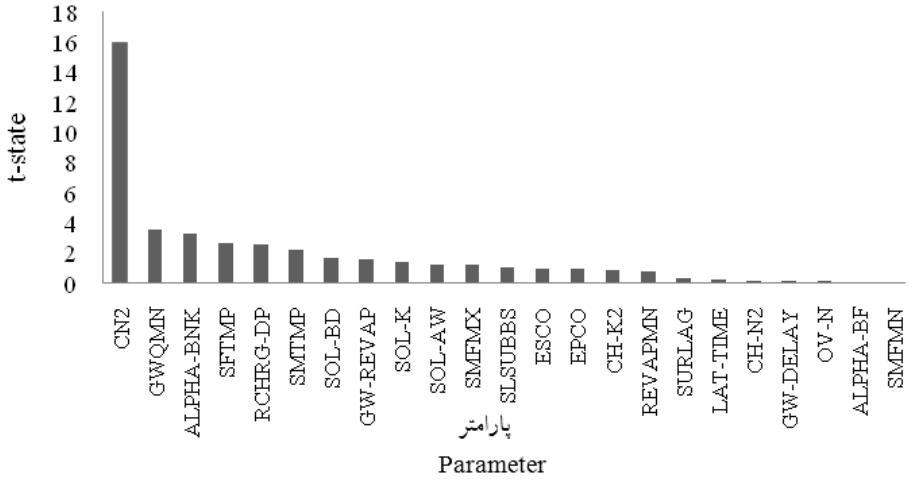
کلی، پارامتر CN مؤثرترین عامل بر جریان رواناب حوضه به‌دست آمد که نتیجه حاصل با مطالعات (۳۱، ۳۴، ۴۱) مطابقت دارد. به‌طورکلی افزایش مقدار CN باعث افزایش حجم رواناب می‌شود و به نوبه خود باعث تلفات بیش‌تر آب از طریق رواناب، کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی و کاهش آب پایه رودخانه‌ها می‌شود (۳۱). دو پارامتر GWQMN (حداقل مقدار ذخیره شده آب در آبخوان برای جریان پایه) و Alpha-bnk (ثابت تخلیه کانال) با مقدار آماری t برابر با ۳/۶۲ و ۳/۳۷ به‌ترتیب در رتبه دوم و سوم قرار می‌گیرند. GWQMN یک حد آستانه در آبخوان کم‌عمق تعریف می‌کند و زهکشی زمانی رخ می‌دهد که سطح آبخوان بیش‌تر از GWQMN شود. همچنین حساسیت بالای Alpha-bnk نشان‌دهنده اهمیت اراضی اطراف رودخانه گرگان‌رود بر دبی جریان رودخانه می‌باشد. با توجه به کوهستانی بودن دامنه جنوبی حوضه مورد مطالعه قابل پیش‌بینی بود که دو پارامتر SFTMP (دمای بارش برف) و SMTMP (دمای ذوب برف) از پارامترهای نسبتاً حساس در مدل رتبه‌بندی شوند. پارامتر RCHRG-DP که آب در حال حرکت به آبخوان ذخیره عمقی را که به رودخانه زهکش نمی‌شود را شبیه‌سازی می‌کند با t آماری برابر ۲/۶۴ در رتبه پنجم تحلیل حساسیت قرار گرفت. پارامتر GW-REVAP، یک مؤلفه هدررفت بوده که نشان‌دهنده صعود موئینگی می‌باشد و در رتبه هفتم حساسیت در منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. این پارامتر تاحدودی تبخیر- تعرق از آبخوان سطحی را توصیف می‌نماید که توسط تبخیر- تعرق پتانسیل کنترل می‌شود. مقدار آب باقی‌مانده، وارد پروفیل خاک نمی‌شود؛ اما از آن‌جا که این آب وارد شبکه جریان نمی‌شود، به‌راحتی از سیستم حذف شده و نباید زیاد گسترش یابد. پارامترهای عمده مرتبط با فرایندهای جریان‌های سطحی و به‌ویژه پارامترهای مربوط به خاک در همه حوضه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در این مطالعه سه پارامتر SOL_K، SOL_AWC و SOL_BD که از مؤلفه‌های پارامتر خاک هستند در رتبه ۸ تا ۱۰ قرار گرفتند به‌ترتیب با t آماری ۱/۷۱، ۱/۴۵ و ۱/۰۸ از اهمیت نسبی برخوردارند. پارامتر SOL_AWC با توجه به مشخصه رطوبت خاک و یا آب در دسترس گیاه، نقش مهمی در تبخیر مرتبط با جریان رواناب دارد (۱۱). ظرفیت رطوبتی خاک، همچنین ارتباط معکوسی با دیگر مؤلفه‌های تراز آبی دارد (۲۳). بنابراین افزایش مقدار SOL_AWC منجر به کاهش برآورد جریان پایه، رواناب سطحی و در نتیجه آبدهی کل خواهد شد. همچنین پارامتر ESCO ضریبی است که عمق لایه خاک مشارکت‌کننده در فرایند تبخیر را کنترل می‌کند و با افزایش مقدار این پارامتر، مقدار رواناب سطحی و آب پایه تخمینی نیز افزایش می‌یابد. از طرفی چون بیش از ۶۵٪ حوزه مورد نظر را پوشش جنگلی و مرتعی و بوته‌زار تشکیل می‌دهد، پارامتر گیرش گیاهی (EPCO)، از حساسیت نسبتاً بالایی در منطقه برخوردار است. پارامتر CH-K، معرف نفوذ در بستر رودخانه است که در رتبه ۱۵ قرار گرفت که در جریان کم به‌ویژه بر شکل هیدروگراف مؤثر است. در رودخانه‌هایی که در آن‌ها بستر رودخانه بالاتر از سطح آب‌های زیرزمینی است این پارامتر مهم است. معمولاً آب نفوذیافته ناپدید نمی‌شود اما تا حدودی به آبخوان زیر رودخانه می‌رسد.

نتایج واسنجی و تحلیل عدم قطعیت: در انتخاب پارامترها برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل سعی بر آن بوده است تا فرایندهای مختلفی که بر

www.SID.ir

Archive of SID

شبیه‌سازی جریان آب مؤثرند، مدنظر قرار گیرند. در این پژوهش ۱۵ پارامترحساس اول که بسیاری از آن‌ها در پژوهش‌های پیشین به‌عنوان پارامترهای مؤثر تشخیص داده شده‌اند (۲۴، ۳۰، ۳۱) انتخاب گردیدند و سایر پارامترهای مدل، در مقادیر پیش‌فرض‌شان نگه داشته شدند. در مرحله واسنجی برای یافتن مقادیر بهینه، مدل با ۱۰۰۰ تکرار و مقدار آستانه معیار E_{NS} برابر با ۰/۴ اجرا شد. در فرآیند واسنجی پارامترهای مدل، امکان تعیین یک مجموعه پارامتر بهینه (یکتا) وجود ندارد، بنابراین تشخیص مجموعه پارامترهای قابل‌قبول که موجب نتایج نسبتاً خوب و برابر می‌شوند اهمیت داشته و روش GLUE که بر این اصل ارائه شده، قادر به شناسایی این مجموعه پارامترها می‌باشد. به‌کار بردن آستانه قابل پذیرش معیار E_{NS} منجر به شناسایی ۱۴۴ شبیه‌سازی کارآمد (حدود ۱۴٪ کل شبیه‌سازی‌ها) شد که از این شبیه‌سازی‌ها برای تحلیل عدم قطعیت مدل استفاده شد. در جدول ۱، ۱۵ پارامتر حساس و مؤثر بر دبی و کم‌ترین و بیش‌ترین حد هر یک همراه با حد بهینه مربوطه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مشخص شده‌اند. پس از اجرای مدل، توزیع‌های فراوانی مقادیر احتمالی پسین پارامترها بر مبنای مجموعه پارامترهای قابل‌قبول استخراج شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- تحلیل حساسیت پارامترها با استفاده از برنامه GLUE در پایه زمانی ماهانه برای سال ۱۹۹۰-۱۹۸٤.

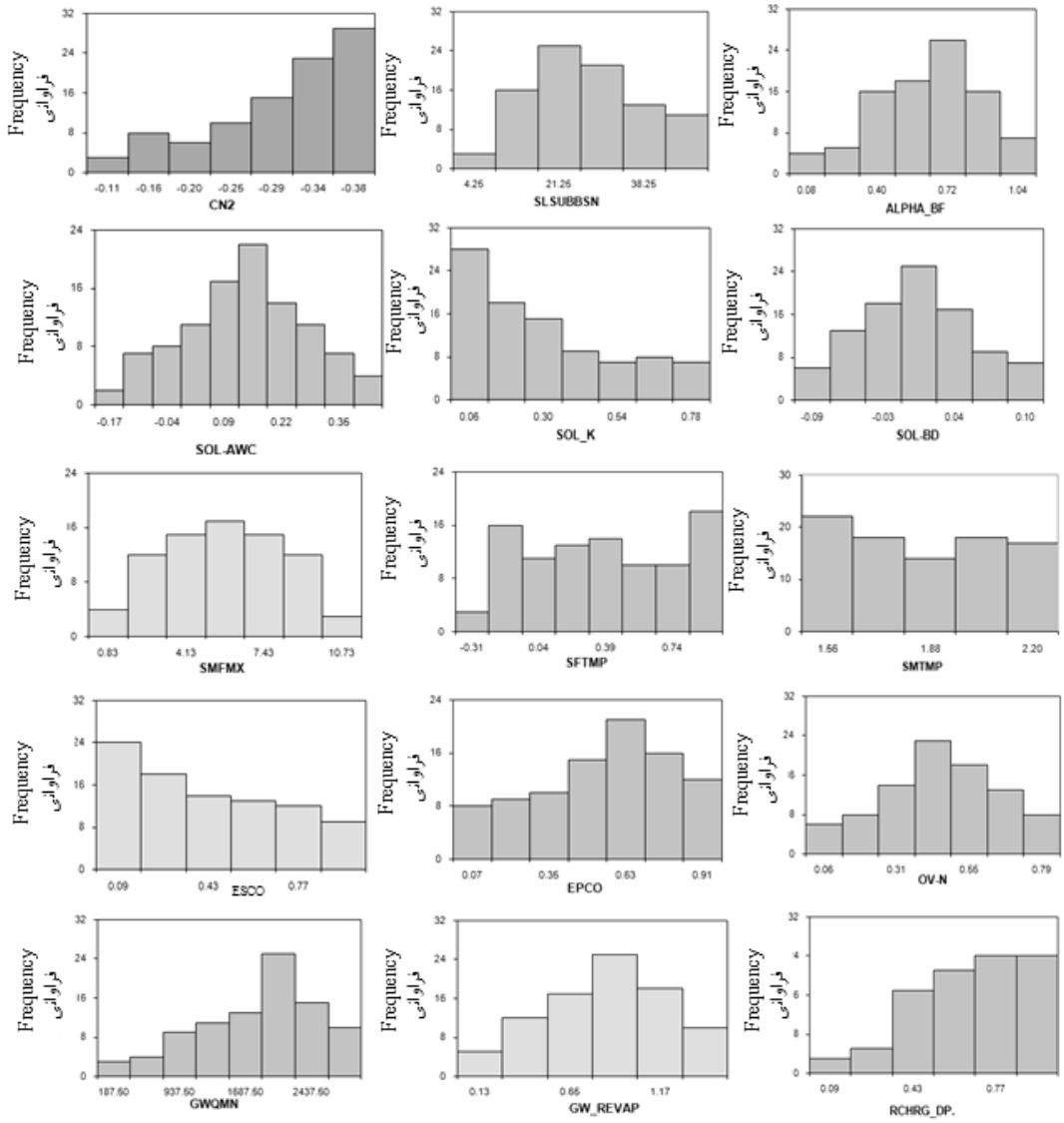
Figure 2. Parameter sensitivities analysis using GLUE program on monthly basis during 1984-1990.

همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است فرایند همه پارامترها به‌خوبی تعریف شده و دارای توزیع‌های پسین تک‌مدی هستند. با توجه به شکل توزیع‌های فراوانی و تک‌مدی بودن توزیع پارامترها به‌جز دو پارامتر SFTMP و SMTMP (که پارامتر SMTMP توزیعی نزدیک به توزیع یکنواخت را نشان می‌دهد)، برآوردهای پارامترها می‌توانند به‌خوبی به‌عنوان مقادیر مدل استفاده شوند (۲۱). در حالی‌که شکل توزیع‌ها مشخص‌کننده بزرگی عدم قطعیت برآورد است. توزیع‌های نوک تیز و دارای پیک، پارامترهایی هستند که به‌خوبی شناسایی شده‌اند؛ در صورتی‌که توزیع‌های هموارتر بیانگر عدم قطعیت بیش‌تر پارامتر است. مطابق شکل ۳، توزیع پارامترهای SOL_AWC، SOL_BD، SMFMX، OV_N و GW_REVAP

www.SID.ir

Archive of SID

به توزیع نرمال متقارن نزدیک هستند. در توزیع نرمال هرچه انحراف معیار بزرگ‌تر باشد، ارتفاع منحنی کم‌تر و نقطه پیک منحنی هموارتر خواهد شد. در حالی‌که پارامترهای CN، ALPHA_BF، EPCO و RCHRG_DP دارای چولگی منفی و بقیه پارامترها داری چولگی مثبت هستند. در مورد پارامتر SFTMP وجود چندین پیک در توزیع‌های فراوانی حاشیه‌ای بیانگر احتمال امکان عدم برآورد بهینه این پارامتر است. اما باید توجه داشت که امکان‌پذیر نبودن تعیین یک پارامتر بدین معنی نیست که مدل به آن پارامتر حساسیتی ندارد (۳۴). عدم قطعیت بیش‌تر پارامتر SFTMP مشخص می‌کند که به‌علت کوهستانی بودن جنوب منطقه مورد مطالعه متوسط دمای هوا برای بارش برف احتمالاً نقش بیش‌تری در تمام فرآیندهای بارش دارد.



شکل ۳- توزیع‌های فراوانی حاشیه‌ای پارامترهای منتخب مدل SWAT برای آستانه ENS بزرگ‌تر از ۰/٤.

Figure 3. Marginal frequency distributions of selected parameters in SWAT model for an ENS threshold of 0.4.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- محدوده هر پارامتر و مقدار بهینه پارامترهای مؤثر بر رواناب.

Table 1. The range and optimal value of model parameter on runoff.

رتبه (Rank)	پارامتر (Parameter)	دامنه (Range)	مقدار بهینه (Optimal value)
1	r__CN2.mgt*	-25-25	-0.28
2	v__GWQMN.gw	500-3000	1137.79
3	v__RCHRG_DP.gw	0.2-1	0.93
4	v__ALPHA_BNK.rte	0-0.5	0.12
5	v__ESCO.hru	0.2-1	0.37
6	r__SOL_K(1).sol	-25-25	0.03
7	r__SLSUBBSN.hru	-25-25	9.44
8	r__SOL_AWC(1).sol	-25-25	0.1
9	r__SOL_BD(1).sol	-25-25	0.03
10	v__SFTMP.bsn	-1-2	0.6
11	v__SMFMX.bsn	0-10	5.39
12	v__EPCO.hru	0.1-1	0.31
13	v__GW_REVAP.gw	0-1.5	0.74
14	v__OV_N.hru	0.2-1	0.57
15	v__SMTMP.bsn	0-3	2.1

* r و v نشان‌دهنده تغییرات نسبی (ضرب در مقادیر پارامتر به‌صورت درصد) و مطلق (جایگزین مقادیر پارامتر) می‌باشند.

* r and v multiplying initial parameter by value (in percentage) and replacement of initial parameter by value.

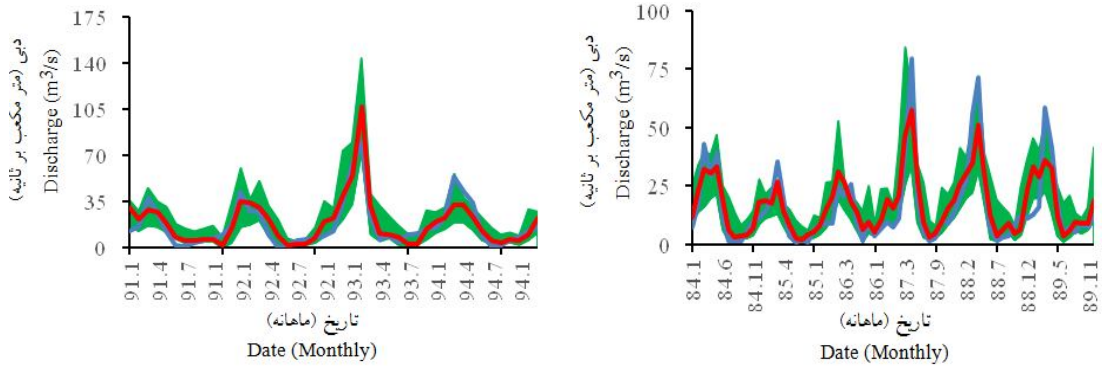
در شکل ۴ نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله واسنجی برای شبیه‌سازی رواناب بر پایه زمانی ماهانه در سطح احتمال ٪۹۵ (باند برآورد عدم قطعیت)، نشان داده شده است. معیار 95PPU با محاسبه مقادیر متناظر احتمال ٪۲/۵ به‌عنوان حد پایین و ٪۹۷/۵ به‌عنوان حد بالا، با استفاده از حد نمونه‌برداری به روش لاتین هایپرکیوب و حذف ٪۵ شبیه‌سازی‌های بسیار بد، محاسبه شد. مقایسه نتایج هیدروگراف نمونه (شکل ۴) برای مدل در دوره واسنجی نشان داد که در برخی رخدادها اگرچه مدل سعی درمدل‌سازی کل نقاط هیدروگراف دارد، اما تابع مورد نظر نقاط پیک را به‌خوبی شبیه‌سازی نمی‌کند. مقدار عامل d حاصل از واسنجی رواناب ماهانه در دوره واسنجی ۰/۹۵ می‌باشد (جدول ۲). مقادیر نسبتاً کوچک بیانگر واسنجی خوب رواناب می‌باشد. مقدار عامل p در دوره واسنجی برابر ۰/۶۹ می‌باشد، که بدان مفهوم است که در دوره واسنجی ۶۹ درصد داده‌های شبیه‌سازی شده در محدوده باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد واقع شده‌اند. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، مدل جریان پایه را بیش‌تر از مقدار مشاهده‌ای تخمین زده است که کمبود اطلاعات در مورد میزان برداشت و مصرف آب در بالادست رودخانه یکی از علل ناتوانی مدل در پیش‌بینی جریان پایه است. بنابراین به‌منظور کاهش عدم قطعیت مدل، نیاز به یک‌سری اطلاعات کامل و جامع در مورد مدیریت مصرف آب (۳) در منطقه مورد مطالعه است. هر چند عملکرد مدل در شناسایی زمان رخدادها تقریباً خوب بوده ولی در ماه مارس سال

www.SID.ir

Archive of SID

۱۹۸۵ و همچنین ماه‌های مارس و آوریل سال‌های ۱۹۸۷-۱۹۹۰، که از نقاط پیک دبی جریان هستند، مقادیر دبی شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر مشاهداتی، کم‌تر برآورد شده است. با توجه به این‌که نقاط پیک در بررسی رودخانه‌ها، نقاط حساسی هستند، دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از عملکرد ضعیف مدل در شبیه‌سازی ذوب برف و فرایندهای مرتبط به آن و در نتیجه جریانات حداکثر باشد. زیرا بارش در مدل SWAT بر اساس میانگین دمای روزانه، به دو بخش باران یا برف تقسیم‌بندی می‌شود (۱۴). علاوه بر آن می‌تواند ناشی از سایر منشأهای عدم قطعیت، مانند عدم قطعیت در ساختار و معادلات حاکم بر مدل و نیز وجود خطاهایی در داده‌های ورودی و یا داده‌های مشاهداتی و یا مربوط به نقص در عملکرد تجهیزات و حساسیت دستگاه در مکان‌هایی با توپوگرافی پیچیده و متغیرهای اقلیمی (۳۵) باشد. در کل شبیه‌سازی انجام شده در بیش‌تر موارد تقریباً خوب انجام شده است.

هیدروگراف ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای مدل به همراه بازه عدم قطعیت در دوره اعتبارسنجی در حوزه آبخیز گرگان‌رود (خروجی ایستگاه قزاقلی) در شکل ۴ ارایه شده است. مقایسه گرافیکی سری زمانی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی، نشان‌دهنده عملکرد نسبی بهتر مدل در شبیه‌سازی رواناب منطقه در این دوره نسبت به دوره واسنجی می‌باشد. نتایج مدل در اکثر ماه‌های دوره مورد بررسی انطباق نسبتاً خوبی با مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد. عملکرد مدل در شناسایی زمان رخ دادن نقاط پیک در مرحله اعتبارسنجی، تقریباً خوب بوده و مقدار دبی شبیه‌سازی شده را نسبت به مقدار مشاهداتی، در اغلب موارد، بیش‌تر برآورد کرده است. البته باید توجه داشت که شبیه‌سازی‌ها هیچ موقع صد درصد نبوده و همیشه درصدی از عدم قطعیت ناشی از عدم انطباق کامل مقادیر برآوردی و مقادیر مشاهداتی وجود دارد که چنین مواردی در مطالعات (۵، ۲۴، ۳۰، ۳۱، ۳۹) نیز گزارش شده است. در این دوره روش GLUE به‌خوبی توانسته دبی جریان را شبیه‌سازی کند، به‌طوری‌که اغلب داده‌های اندازه‌گیری شده در داخل بازه اطمینان قرارگرفته (عامل P برابر با ۰/۷۴) و ضخامت بازه اطمینان کم‌تر از یک (عامل R برابر با ۰/۹۰) بوده که بیانگر اعتبارسنجی خوب رواناب در این مرحله می‌باشد.



شکل ٤- مقادیر مشاهده‌ای (—)، بهترین شبیه‌سازی (—) و ۹۵ درصد فاصله اطمینان (■) رواناب ماهانه در خروجی ایستگاه هیدرومتری قزاقلی در دوره واسنجی (سمت راست) و دوره اعتبارسنجی (سمت چپ).

Figure 4. The observed (—), the best simulation (—) and the 95% prediction uncertainty (■) of the monthly average comparison of run-off at Gazaghly hydrometric station during calibration (Right) and validation (Left).

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲ وضعیت عملکرد آماری مدل در دو دوره واسنجی و اعتبار سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به عملکرد مدل SWAT، این مدل با معیار E_{NS} برابر با ۰/۷۲ و ۰/۸۰ و ضریب R^2 (ضریب تعیین) برابر با ۰/۷۳ و ۰/۸۲ به‌ترتیب برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی توانسته است تا الگوی تغییرات رواناب حوضه را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. با توجه به توابع هدف پروژه، نتایج شبیه‌سازی شده، قابل‌قبول و عالی براساس گزا و مک‌کری (۲۰۰۸) ارزیابی شدند (۱۸). با توجه به نتایج حاصل، کیفیت برازش مدل برای دوره اعتبارسنجی تا حدودی نسبت به دوره واسنجی افزایش یافته است. یکی از علل آن می‌تواند تغییر در کاربری اراضی باشد. با توجه به استخراج نقشه پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست (TM+) ۱۹۹۰، به‌طوری‌که مقادیر بهینه پارامترهای به‌دست آمده در مرحله واسنجی (۱۹۹۰-۱۹۸۴) برای شبیه‌سازی جریان دبی به خوبی دوره اعتبارسنجی را (۱۹۹۳-۱۹۹۰) پوشش نمی‌دهند. همچنین کم‌تر بودن این ضرایب برای دوره واسنجی نسبت به دوره اعتبارسنجی می‌تواند به‌دلیل پایین بودن دبی جریان اندازه‌گیری شده در دوره واسنجی نسبت به اعتبارسنجی می‌باشد. به‌طورکلی قابلیت مدل‌های شبیه‌سازی در برآورد جریان‌های کم، ضعیف می‌باشد (۲۰).

جدول ۲- شاخص‌های آماری ارزیابی خروجی مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی.

Table 2. Model Performance according to predefined criteria during the calibration and validation periods.

شاخص (Criteria)	واسنجی (Calibration)	اعتبارسنجی (Validation)
ENS	0.72	0.80
R^2	0.73	0.83
d	0.91	0.95
p	0.69	0.74

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه ابتدا قابلیت و توانایی مدل نیمه‌توزیعی- فیزیکی SWAT در برآورد رواناب در بخشی از حوزه آبخیز گرگان‌رود واقع در استان گلستان بررسی شد، سپس به تحلیل عدم قطعیت نتایج حاصل از اجرای این مدل پرداخته شد. روش‌های تحلیل عدم قطعیت با ارائه خطاهای موجود در مدل‌سازی به‌صورت بازه‌های اطمینان، اطلاعات بیش‌تری در مورد خروجی‌های مدل پیش‌بینی می‌دهند. برای انجام این پژوهش داده‌های مکانی، داده‌های عددی و هیدروکلیماتولوژی دوره (۱۹۹۳-۱۹۸۳) وارد مدل شد. تولید ۱۰۰۰ سناریو از دامنه عدم قطعیت ۱۵ پارامتر مؤثر بر شبیه‌سازی دبی جریان ماهانه در مدل SWAT با استفاده از روش GLUE و اعمال آستانه قابل پذیرش بر روی کل شبیه‌سازی‌های حاصله منجر به استخراج ۱۴۴ شبیه‌سازی کارآمد گردید. نتایج نشان داد که روش GLUE، برای واسنجی مدل مورد استفاده کارآمد می‌باشد و توانایی نسبتاً خوبی برای دستیابی به بیشینه اصلی در سطح تابع هدف دارد و با توجه به توابع هدف پروژه، نتایج شبیه‌سازی شده، قابل‌قبول و عالی ارزیابی شدند. مقایسه گرافیکی هیدروگراف ماهانه نشان داد که عملکرد مدل در شبیه‌سازی نقاط پیک تا حدودی ضعیف بوده و دبی را کم‌تر از مقدار مشاهداتی برآورد کرده است.

www.SID.ir

Archive of SID

همچنین با توجه به نتایج کلی، مشخص شد که منابع اصلی عدم قطعیت جریان، شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط (II)، درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم‌عمق یا غیرمحصور، فاکتور آلفا جریان پایه برای ذخیره کناری، ظرفیت رطوبت قابل استفاده لایه‌های خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های خاک می‌باشند. نتایج نشان داد که CN2 یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که بر شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در همه کاربردهای مختلف مدل گزارش شده است و به‌عنوان روشی تجربی به‌طور گسترده برای برآورد رواناب مستقیم برای یک رخداد باران استفاده می‌شود. همچنین بالا بودن حساسیت فاکتور ALPHA_BNK، نشان‌دهنده اهمیت اراضی اطراف رودخانه گرگانرود بر دبی جریان رودخانه می‌باشد. در مجموع، مدل SWAT توانست پس از واسنجی و اعتبارسنجی، به کمک الگوریتم GLUE، پیش‌بینی رضایت بخشی از دبی ماهانه حوضه داشته باشد. بنابراین می‌توان از مدل SWAT واسنجی شده در مطالعه و بررسی اثرات و اقدامات آبخیزداری و مدیریتی بر حوضه مورد نظر استفاده کرد.

منابع

1.Abbaspour, K.C. 2007. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag, Swiss Fed. Institute of Aquatic Science and Technology Dubendorf, Switzerland.

2.Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Seyed Ghasemi, S., and Yang, Y. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. J. Water Resour. Res. 45: 1-16.

3.Akhavan, S., Abedi-Koupai, J., and Mousavi, S.F. 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan–Bahar Watershed, Iran. Agriculture, Ecosystems and Environment. 139: 675-688.

4.Arabi, M., Govindaraju, R.S., and Hantush, M.M. 2007. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. J. Hydrol. 333: 459-471.

5.Arefi Asl, A., Najafine Zad, A., Kiyani, F., and Salman Mahini, A. 2013. Watershed runoff and sediment simulation using the SWAT model in Golestan Province Chehelchay. J. Range Water. 3: 433-446. (In Persian)

6.Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development. J. Amer. Water Resour. Assoc. 34: 73-89.

7.Bates, B.C., and Campbell, E.P. 2001. A Markov chain Monte Carlo scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall–runoff modeling. Water Resources Research. 37: 937-947.

8.Beven, K.J. 2001. Rainfall-Runoff Modelling-The Primer. John Wiley, Hoboken, NJ, 360p.

9.Beven, K.J., and Binley, A.M. 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes. 6: 279-298.

10.Blasone, R.S., Vrugt, J.A., Madsen, H., Rosbjerg, D., Robinson, B.A., and Zyvoloski, G.A. 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. Advance in Water Resource. 31: 648-630.

11.Burba, G.G., and Verma, S.B. 2005. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tall grass prairie and cultivated wheat ecosystems, Agriculture. Forest Meteorological. 135: 190-201.

12.Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. 1988. Applied hydrology, International Ed., McGraw-Hill, New York.

13.Dowlatabadi, S., and Zomorodian, M. 2013. Hydrological Simulation of Firoozabad Basin by SWAT. J. Irrig. Water Engin. 14: 38-48. (In Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

14.Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., Arnold, J.G., and Hotchkiss, R.H. 2002. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). J. Hydrol. 262: 1-4. 209-223.
15.Freer, J., Beven, K.J., and Ambroise, B. 1996. Bayesian estimation of uncertainty in runoffprediction and the value of data: an application of the GLUE approach. Water Resources Research. 32: 2161-2173.
16.Gassman, P.W., Sadeghi, A.M., and Srinivasan, R. 2014. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. J. Environ. Qual. 43: 1-8.
17.Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., and Arnold, J.G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool. Historical Development, Applications, and Future Research Directions. Trans. ASABE. 50: 4. 1211-1250.
18.Geza, M., and McCray, J.E. 2008. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. J. Environ. Manage. 88: 393-406.
19.Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.O. 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information. Water Resources Research. 34: 751-763.
20.Hantush, M.M., and Kalin, L. 2005. Uncertainty and sensitivity analysis of runoff and sediment yield in a small agricultural watershed with KINEROS2. Hydrol. Sci. J. 50: 6. 1151-1172.
21.Jin, X., Xu, C.Y., Zhang, Q., and Singh, V.P. 2010. Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. Hydrol. J. 383: 147-155.
22.Kabir, A., and Bahremand, A.R. 2013. Study uncertainty of parameters of rainfall-runoff model (WetSpa) by Mont Carlo method. J. Water Soil Cons. 20: 5. 81-97. (In Persian)
23.Kannan, N., White, S.M., Worrall, F., and Whelan, M.J. 2007. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for Hydrological modeling in SWAT-2000. J. Hydrol. 332: 456-466.
24.Kavian, A., Golshan, M., Rouhani, H., and Ouri, S. 2014. Assessment of Physiographic Characteristics Effect on SWAT Model Performance: A Case Study of Haraz Catchment. International Bulletin of Water Resources and Development. 1: 3. 184-193. (In Persian)
25.Lidén, R., and Harlin, J. 2000. Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates. J. Hydrol. 238: 231-240.
26.Liu, Y., and Gupta, H. 2007. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. Water Resources Research. 43: 1-18.
27.Mantovan, P., and Todini, E. 2006. Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. J. Hydrol. 330: 368-381.
28.Moussa, R. 2008. Significance of the Nash-Sutcliffe efficiency measure for linear rise and exponential recession in event based flood modeling. Geophysical Research. EGU-A-08369. 10-2.
29.Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool–Theoretical Documentation. Texas, USA, 661p.
30.Osmani, H., Motamed Vaziri, B., and Moini, A. 2013. Discharge simulation, calibration and validation of model SWAT, Tehran Latyan Dam area. J. Engin. Water. Manage. 2: 134-143. (In Persian)
31.Salmani, H., Mohseni Saravi, M., Rouhani, H., and Salaegheh, A. 2013. SWAT model to simulate the performance evaluation and ParaSol program (Qazaqli Watershed, Golestan). Iran Watershed Science and Engineering. 22: 1-14. (In Persian)
32.Sanadhya, P., Gironas, J., and Arabi, M. 2014. Global sensitivity analysis of hydrologic processes in major snow-dominated mountainous river basins in Colorado. Hydrology Process. 28: 9. 3404-3418.

www.SID.ir

Archive of SID

33. Sellami, H., Jeunesse, L.A., Benabdallah, S., Baghdadi, N., and Vanclooster, V. 2014. Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France). Hydrology Earth System Science. 18: 2393-2413.
34. Shen, Z.Y., Chen, L., and Chen, T. 2012. Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China. Hydrology Earth System Science. 16: 121-132.
35. Shope, C.L., Maharjan, G.R., Tenhunen, J., Seo, B., Kim, K., Riley, J., Arnold, S., Koellner, T., Ok, Y.S., Peiffer, S., Kim, B., Park, J.H., and Huwe, B. 2014. Using the SWAT model to improve process descriptions and define hydrologic partitioning in South Korea. Hydrology Earth System Science. 18: 539-557.
36. Singh, V., Bankar, N., lunkhe, S.S., Bera, A.K., and Sharma, J.R. 2013. Hydrological stream flow modelling on Tungabhadra catchment: parameterization and uncertainty analysis using SWAT CUP. Current Science. 104: 9. 1187-1199.
37. Sloan, P.G., Morre, I.D., Coltharp, G.B., and Eigel, J.D. 1983. Modeling subsurface stromflow on steeply sloping forested watersheds. Water Resources Research. 20: 12. 1815-1822.
38. Smith, P.K., and Daren Harmel, R.D. 2007. Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling. Hydrol. J. 337: 326-336.
39. Spruill, C.A., Workman, S.R., and Taraba, J.L. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watershed using the SWAT model. Soil and Water Division of ASAE. 98: 05-109. 1431-1440.
40. Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., and Srinivasan, R. 2008. Global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. J. Hydrol. 324: 10-23.
41. Van Griensven, A., Ndomba, P., Yalew, S., and Kilonzo, F. 2012. Critical review of SWAT applications in the upper Nile basin countries. J. Hydrol. Earth Syst. Sci. 16: 3371-3381.
42. Viola, F., Noto, L.V., Cannarozzo, M., and La Loggia, G. 2009. Daily streamflow prediction with uncertainty in ephemeral catchments using the GLUE methodology. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 34: 701-706.
43. Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bouten, W., and Sorooshian, S. 2003. A shuffled complex evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. Water Resources Research. 39: 8. 1-14.
44. Williams, J.R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Transactions of the ASAE. 12: 1. 100-103.

www.SID.ir

Archive of SID

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(1), 2016
http://jwsc.gau.ac.ir

Reducing uncertainty in a semi distributed hydrological modeling within the GLUE framework

M.S. Jafarzadeh[1], *H. Rouhani[2], H. Salmani[3] and A. Fathabadi[2]

[1]Ph.D. Student, Dept. of Watershed Management, Lorestan University, [2]Assistant Prof., Dept. of Range and Watershed Management, Gonbad Kavous University, [3]Ph.D. Student, Dept. of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 03/04/2015; Accepted: 09/01/2015

Abstract

Background and Objectives: The calibration of hydrologic models is a worldwide challenge due to the uncertainty involved in the large number of parameters and the inability to reliably measure the distributed physical characteristics of a catchment results in significant uncertainty in the parameterization of physically based, semi-distributed models. Therefore, a successful application of a hydrologic model in applied water research strongly depends on calibration and uncertainty analysis of model output. Different studies indicated that in parameter uncertainty of the stream flow and sediment modeling only a few parameters affected the final simulation output significantly. In this paper, the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) method was combined with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to quantify the monthly stream flow in the eastern Gorganrood river basin.

Materials and Methods: The Golestan Regional Water Company (GRWC) monitoring site at Gazaghly was chosen as the outlet for the entire watershed since it is the lowest monitoring station on the river not subject to dam influence. Annual precipitation decreases in the west to east direction, low (200 mm) to high (880 mm) and from south to north direction. Model has been calibrated and validated using monthly runoff flow data of ten years 1984 and 1993. Data pertaining to year 1984-1990 has been used for calibration and 1991-1993 for validation.

Results: In semi-distributed models such as SWAT, it is necessary to identify the most sensitive parameters to obtain a better understanding of the overall hydrologic processes before calibration. Based on this study, only a few parameters affected the final simulation output significantly. The parameters such as CN2 (curve number), GWQMN (threshold in the shallow aquifer), RCHRG_DP (deep aquifer percolation fraction), ALPHA_BNK (base flow alpha factor for bank storage), ESCO (soil evaporation compensation factor) and SOL_K were found to be the most sensitive parameters. According to results, the parameter CN2, was the most effective parameter on the output discharge of the studied area and CN2, was identified as a main source of uncertainty in results. Statistical model performance measures, coefficient of determination (R^2) of 0.80, the Nash-Sutcliffe simulation efficiency (ENS) of 0.72, for calibration and 0.83 and 0.80, respectively for validation, indicated good performance for runoff estimating on monthly time step in the outlets of the Gazaghly gauging station. 69-74% of the observed runoff data fall inside the 95% simulation confidence intervals in the calibration and validation periods. The evaluation statistics for the daily runoff simulation showed that the model results were acceptable, but the model underestimated the runoff for high-flow events.

Conclusion: SWAT was applied to simulate monthly runoff in part of the Gorganrood river basin. Results of uncertainty analysis indicated that SWAT model had large uncertainties for calibration period, although the simulation of monthly runoff for the Gazaghly station was satisfactory during the calibration period and in the model calibration stage 69 of runoff observations were within the corresponding 95% confidence interval. This study would provide useful information for hydrology modeling related to policy development in the Gorganrood river basin and other similar areas.

Keywords: GLUE, SWAT, Sensitivity analysis, Uncertainty, Gorganrood

* Corresponding Author; Email: rouhani.hamed@gonbad.ac.ir

www.SID.ir