

شبیه‌سازی بیلان آب حوضه آبخیز با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه قره

سو استان گلستان)

آرش زارع گاریزی^۱، علی طالبی^{۲*}

چکیده

در این تحقیق، بیلان آبی حوضه قره‌سو استان گلستان با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. هدف اصلی تحقیق، آزمون کارایی مدل و قابلیت استفاده از آن به عنوان شبیه‌ساز بیلان آب در آبخیز قره‌سو می‌باشد. ابتدا اطلاعات ورودی مدل تهیه و مدل با این داده‌ها اجرا شد. به منظور مشخص کردن پارامترهای مهم مدل، آنالیز حساسیت با روش "هر بار یک پارامتر" انجام شد. سپس واسنجی مدل به صورت دستی و سپس با روش خودکار SUFI2 انجام شد. به منظور کاهش عدم قطعیت، اجزای مختلف بیلان آب در واسنجی در نظر گرفته شد و از داده‌های مشاهداتی چندین ایستگاه اندازه‌گیری به طور هم‌زمان استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که، مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه قره‌سو از کارایی مناسبی برخوردار است. دقت شبیه‌سازی دبی ماهانه در ایستگاه سیاه‌آب (خروجی حوضه) با استفاده از شاخص نش-ساتکلیف در دوره واسنجی ۰/۶ و با شاخص R2، 65/0، و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۶۲ بدست آمد. برای شاخص‌های ارزیابی عدم قطعیت نیز مقادیر قابل قبولی بدست آمد. P-فاکتور و R-فاکتور، برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۷ و ۱/۲۳ و برای دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۹۷ و ۱/۷۳ محاسبه شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل، به طور متوسط حدود ۶۷٪ بارش از طریق تبخیر و تعرق وارد اتمسفر می‌شود، ۱۷٪ آن به صورت رواناب سطحی و جریان جانبی به آبراه‌ها وارد می‌شود و ۱۶٪ نفوذ یافته و وارد سفره زیرزمینی می‌شود. این تحقیق اطلاعات مفیدی را در مورد بیلان آبی حوضه قره‌سو فراهم نموده و به برنامه‌ریزی دقیق تر منابع آب در این حوضه کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SUFI2، حوضه آبخیز قره‌سو، شبیه‌سازی جریان رودخانه، مدل SWAT

^۱ - دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد
^۲ - نویسنده مسئول؛ دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد
 Email: talebisf@yazd.ac.ir

مقدمه

محدودیت منابع آب و افزایش نیاز به آب که ناشی از افزایش جمعیت، توسعه شهرها و سیاست‌های جدید مدیریت جوامع بشری است و نیز استفاده بی‌رویه و غیر اصولی از این منابع، باعث بروز مشکلات و اختلافات روزافزونی در خصوص مدیریت منابع آب گردیده است.

برای بهینه‌سازی مصرف آب، اطلاع از بیلان آبی حوضه‌های آبخیز ضروری می‌باشد. از طرفی، اندازه‌گیری اجزای بیلان آب در فاصله‌های زمانی مورد نیاز به خاطر وقت گیر و پرهزینه بودن مشکل است. در کشور ما اکثر حوضه‌های آبخیز، به ویژه حوضه‌های آبخیز کوهستانی و صعب العبور، فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری به تعداد کافی هستند که هر گونه برنامه‌ریزی مدیریتی را با معضل و یا حتی شکست مواجه می‌کند. برای مقابله با این معضل، متخصصان راه حل‌های مختلفی عرضه نموده‌اند. عقیده بر این است که مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولوژی در حوضه‌های آبخیز می‌تواند راه حل بهینه‌ای برای آنها باشد (رستمیان، ۱۳۸۵).

مدل نمادی از واقعیت است که مهم‌ترین ویژگی‌های دنیای واقعی را به صورتی ساده و کلی بیان می‌کند. مدل‌ها ابزاری عملی هستند که می‌توان به کمک آنها به درکی از واقعیت - البته نه کل واقعیت بلکه بخش مفید و قابل فهم آن دست یافت (رفاهی، ۱۳۸۶). بدین ترتیب مدل در یک حوضه آبخیز بیانگر تقریبی کلیه فرآیندهایی است که در حوضه حادث می‌گردد (تلوری، ۱۳۷۵). مدل‌های هیدرولوژیک با دو هدف اساسی طراحی می‌شوند. هدف اول درک بهتر از رفتارهای هیدرولوژیکی و نحوه تغییر رفتارها و اثرات آن و هدف دوم سنتز داده‌های هیدرولوژیکی به منظور طراحی منابع آب، کنترل سیل، تعدیل جریان آب و در کل، برنامه‌ریزی و پیش‌بینی جریان می‌باشد (خلیقی سیگارودی و همکاران، ۱۳۸۸، بوستانی و گوهرگانی، ۱۳۹۳).

مدل ارزیابی آب و خاک^۱ SWAT یک مدل هیدرولوژیکی نیمه‌فیزیکی و نیمه‌توزیعی است و با داشتن قابلیت اجرا در محیط GIS یک ابزار مناسب در مطالعات آب و خاک می‌باشد. این مدل، در کشورهای مختلف برای شبیه‌سازی مولفه‌های هیدرولوژیکی به کار برده شده

است. توانایی مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی پیچیده حوضه‌های آبخیز در محیط GIS این مدل را نسبت به مدل‌های یکپارچه که در آنها واحدهای کاری بزرگتر، مبنای عمل هستند، متمایز ساخته است (اکبری، ۱۳۸۹).

آرنولد و همکاران (۱۹۹۸) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT بیلان هیدرولوژیکی را برای حوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی در آمریکا شبیه‌سازی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیلان هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس با استفاده از مدل SWAT بطور واقع‌بینانه‌ای قابل شبیه‌سازی است. عباس‌پور و همکاران (۲۰۰۷) برای شبیه‌سازی فرآیندهای مؤثر بر بیلان آب، رسوب و عناصر غذایی در حوضه رودخانه تور کشور سوئیس از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که شبیه‌سازی رواناب و نترات بسیار خوب و شبیه‌سازی رسوب و فسفر نسبتاً خوب صورت گرفته است. ایشان نتیجه گرفتند که مدل SWAT می‌تواند برای مدیریت حوضه آبخیز بسیار مفید باشد. اندومبا و بیرهانو (۲۰۰۸)، مدل SWAT را برای زیرحوضه‌های رودخانه نیل به کار برده و واسنجی و صحت‌سنجی کردند. ضریب نش-ساتکلیف از ۰/۱۳۷ تا ۰/۸۷ و ضریب تعیین R^2 بین ۰/۲۶ تا ۰/۷۲ بدست آمدند. روی هم رفته ارزیابی مشخص کرد که مدل SWAT بطور رضایت بخشی جریان رودخانه را در شرایط محدودیت دسترسی به داده‌ها شبیه‌سازی کرده است. فرامرزی و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از مدل SWAT اجزای بیلان آب را در کل ایران شبیه‌سازی کرده و ارتباط آنها را با تولید گندم، با در نظر گرفتن عملکرد سدها و اقدامات آبیاری اراضی کشاورزی بررسی کردند. ایشان بیلان آب کشور شامل جریان آب آبی (مقدار آبی که به آب زیرزمینی اضافه می‌شود)، جریان آب سبز (تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل)، و ذخیره آب سبز (رطوبت خاک) را در سطح زیرحوضه و در مقیاس زمانی ماهانه کمی کردند. حسینی و رسوبات معلق در حوضه آبخیز طالقان پرداخت. ایشان در مراحل واسنجی مدل از دو برنامه SUFI2 و Parosol استفاده نمود. ایشان با بررسی بیلان آبی بالادست حوضه (زیرحوضه جوستان) و پایین دست

^۱ - Soil and Water Assessment Tool

مناطق کوهستانی جنوب حوضه و نیز قسمت‌هایی از شمال حوضه متمرکز است.

تئوری مدل SWAT

SWAT نمونه‌ای از مدل‌های فیزیک‌پایه است که با حل معادلات اساسی فیزیک به شبیه‌سازی فرآیندهای سیستم آبخیز می‌پردازد. این مدل به لحاظ مقیاس فضایی نیمه‌توزیعی و از نظر زمانی مدلی پیوسته است. کوچکترین واحد کاری در این مدل، واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU) است که از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، خاک و کاربری اراضی حاصل می‌شود. آب موجود در خاک، رواناب سطحی، رسوب و عناصر شیمیایی ابتدا برای هر HRU و سپس هر زیرحوضه و در نهایت کل حوضه آبخیز محاسبه می‌شود. شبیه‌سازی سیستم آبخیز در مدل SWAT را می‌توان به دو بخش کلی تقسیم نمود: فاز زمینی^۲ و فاز آبی^۳. فاز زمینی مربوط به فرایندهای سطح زمین و ورود آب، رسوب و عناصر شیمیایی به آبراهه اصلی هر زیرحوضه است. فاز آبی (روندیابی) فرایندهای آبراهه‌ها و کانال‌های جریان از جمله حرکت آب، رسوب و مواد شیمیایی را شبیه‌سازی می‌کند (نیچ و همکاران، ۲۰۰۵).

شبیه‌سازی بخش زمینی چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT، بر پایه رابطه بیلان آبی (رابطه ۱) صورت می‌گیرد.

(رابطه ۱)

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

در رابطه فوق: SW_t مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارندگی در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آبی که در روز i ام از پروفیل خاک به ناحیه غیر اشباع وارد می‌شود و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی (میلی‌متر) در روز i ام است. شکل ۱، ساختار مدل مفهومی چرخه

حوضه (زیرحوضه گلینک) به این نتیجه رسید که تلفات تبخیر و تعرق ۳۸ تا ۴۹ درصد بارش حوضه و رواناب ۲۱ تا ۳۳ درصد بارش را تشکیل می‌دهد. امیری (۱۳۸۵)، در تحقیقی از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه‌سازی رواناب و بیلان آبی در آبخیز کسلیان استفاده نمودند و واسنجی و اعتبارسنجی را برای مدل انجام داده و اختلاف بین مقادیر رواناب مشاهداتی و تخمینی را با استفاده از آزمون آماری استاندارد بررسی کرده است. در این بررسی نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به متغیرهای مختلف نشان داد که دقت مدل در مقیاس سالانه بیشتر از ماهانه و در مقیاس ماهانه بیشتر از روزانه می‌باشد.

با توجه به سوابق کاربرد مدل SWAT در جهان و ایران و عملکرد موفق این مدل، هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی بیلان آبی حوضه قره‌سو استان گلستان با استفاده از مدل SWAT و واسنجی و اعتبارسنجی مدل، برای این حوضه می‌باشد تا بدین وسیله کارایی مدل SWAT در مناطق شمالی ایران ارزیابی گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز قره‌سو یکی از حوضه‌های استان گلستان است که با مساحت حدود ۱۶۱۵۰۰ هکتار حدود ۸ درصد آن را در بر می‌گیرد. حداکثر ارتفاع حوضه ۳۳۵۹ متر و حداقل آن ۲۸- متر می‌باشد. میانگین بارش سالانه حوضه قره‌سو حدود ۷۲۰ میلی‌متر می‌باشد که ماه‌های آبان تا اسفند از بیشترین و ماه‌های خرداد، تیر و مرداد از کمترین بارندگی برخوردار هستند. جریان رودخانه قره‌سو از مهر ماه روند افزایشی به خود می‌گیرد و در فروردین به بیشترین مقدار خود می‌رسد، سپس آبدهی رودخانه کم می‌شود و در مرداد ماه به کمترین مقدار خود می‌رسد.

به‌طور کلی، در منطقه ۵ نوع کاربری اصلی شامل جنگل، مرتع، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و مناطق مسکونی وجود دارد. بیشترین مساحت حوضه به کاربری کشاورزی و کمترین آن به کاربری مسکونی اختصاص دارد. اراضی تحت زراعت آبی و دیم اغلب در قسمت‌های دشتی حوضه پراکنده‌اند. مناطق جنگلی بیشتر در قسمت‌های میانی حوضه واقع هستند. کاربری مرتع در

^۱- Hydrologic Response Unit

^۲- Land phase

^۳- Water phase

ماسکینگام برای روندیابی جریان آب در کانال استفاده می‌شود. در ضمن، تلفات انتقال آب در مسیر کانال و تأخیر زمانی رواناب سطحی (برای آبخیزهای بزرگ که زمان تمرکز آنها بیش از یک روز است) نیز در نظر گرفته می‌شود.

مراحل اجرای مدل

برای شروع کار با مدل ابتدا نقشه DEM و شبکه آبراهه حوضه به محیط نرم‌افزار مدل فراخوانده شدند. در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU ها) تعریف شدند. حاصل کار این مرحله، تشکیل ۱۵۲ واحد پاسخ هیدرولوژیکی بود. نقشه زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه حوضه قره سو در شکل ۲ نشان داده شده است.

پس از تهیه نقشه HRU ها، داده‌های هواشناسی (شامل داده‌های بارش روزانه و دمای حداقل و حداکثر روزانه) وارد مدل شدند. مشخصات ایستگاه سینوپتیک گرگان، به همراه مشخصات و داده‌های ۱۳ ایستگاه باران سنجی و ۸ ایستگاه مربوط به دما (شکل ۳) به مدل معرفی شد. پس از این مرحله با اجرای مدل نتایج استخراج گردید.

واسنجی و اعتبار سنجی مدل

واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های توزیعی و فیزیکی پایه مانند SWAT، پیچیدگی‌ها و مشکلات خاصی دارد. یکی از مسائلی که هنگام واسنجی این مدل‌ها پیش می‌آید عدم قطعیت در شبیه‌سازی است که به خاطر عدم قطعیت در ورودی‌های مدل، عدم قطعیت در مدل مفهومی (ساختار مدل) و عدم قطعیت در پارامترهای مدل ایجاد می‌شود. در این مدل‌ها همچنین، به دلیل تعدد پارامترهای مدل و اثر جبرانی یا تشدید پارامترها بر یکدیگر، اغلب چندین مجموعه پارامتر کاملاً متفاوت می‌توانند به نتیجه مشابه و قابل قبول منتهی شوند. به این پدیده هم‌پایانی^۱ یا منحصر به فرد نبودن^۲ اطلاق می‌شود.

با توجه به مطالب مطرح شده، در این تحقیق تمرکز و توجه خاصی بر واسنجی دقیق مدل شد. در ادامه

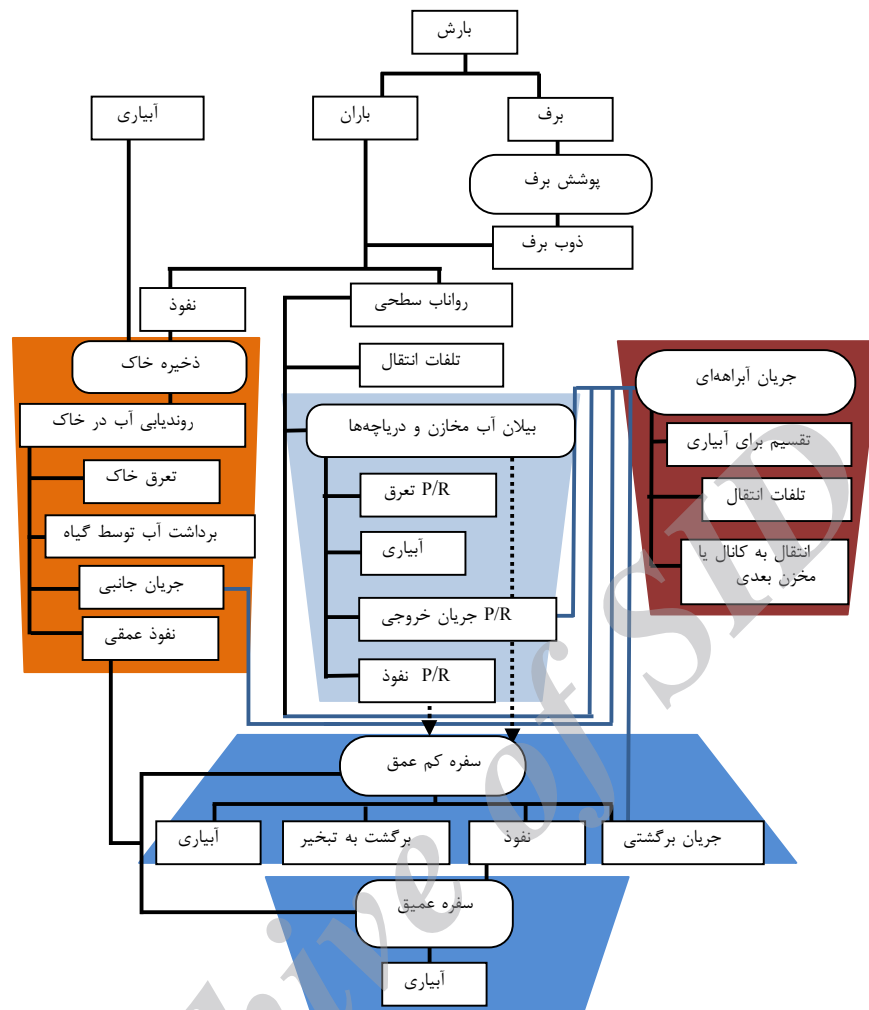
هیدرولوژیک و مسیریابی در نظر گرفته شده برای حرکت آب در مدل SWAT را نشان می‌دهد.

در مدل SWAT پروفیل خاک به چندین لایه تقسیم می‌شود و فرایندهای حرکت آب در خاک شامل رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر، جذب توسط گیاهان، جریان جانبی و نفوذ عمقی به سفره‌های آبی کم‌عمق و عمیق می‌باشد. شبیه‌سازی رواناب سطحی با روش اصلاح شده SCS (در صورت داشتن داده‌های بارش روزانه) یا روش گرین-امپت (در صورت در اختیار داشتن داده‌های بارش ساعتی) انجام می‌شود. مقدار آب باقی‌مانده پس از ربایش اولیه (شامل ذخیره سطحی، ربایش گیاهی و ... که در روش SCS برابر 0.2 پارامتر نگهداشت (S) در نظر گرفته می‌شود) و رواناب سطحی به داخل خاک نفوذ می‌کند. برای شبیه‌سازی حرکت آب در داخل لایه‌های خاک از روش روندیابی مخزن استفاده می‌شود. جریان اشباع به صورت مستقیم و جریان غیر اشباع بین لایه‌های خاک به طور غیرمستقیم با محاسبه جذب گیاهی و تبخیر از سطح خاک شبیه‌سازی می‌شود. جریان آب به سمت لایه‌های پایین زمانی اتفاق می‌افتد که میزان آب در یک لایه از خاک از ظرفیت مزرعه (FC) تجاوز کند و لایه زیرین نیز غیراشباع باشد. جریان جانبی با استفاده از روش روندیابی مخزن جنبشی (اسلوان و همکاران، ۱۹۸۳) بر مبنای درجه شیب، طول شیب و هدایت هیدرولیکی اشباع، مدل‌سازی می‌شود. مابقی آب نفوذ یافته، به سفره‌های کم عمق زیرزمینی وارد می‌شود. برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل، روش‌های هارگریوز، پریستلی-تیلور و پنمن-مانتیت موجود می‌باشد. مدل SWAT تبخیر از سطح خاک و تبخیر از گیاه را به صورت مجزا مطابق روش ریچی (۱۹۷۲) محاسبه می‌کند. تبخیر از سطح خاک با یک تابع نمایی از عمق خاک و میزان آب خاک برآورد می‌شود. تبخیر از گیاهان نیز با یک تابع خطی از تبخیر و تعرق پتانسیل، شاخص سطح برگ، عمق ریشه و میزان آب خاک مدل‌سازی می‌شود. میزان رطوبت لایه‌های مختلف خاک در هر زمان و مکان با در نظر گرفتن مجموع عوامل فوق برآورد می‌شود.

پس از تعیین رواناب سطحی با روش شماره منحنی یا گرین-امپت، مقدار رواناب وارد شده به کانال آبراهه محاسبه می‌شود. معادله مانینگ برای تعیین سرعت جریان و روش ضریب ذخیره متغیر (ویلیامز، ۱۹۶۹) یا

¹- equifinality

²- non-uniqueness

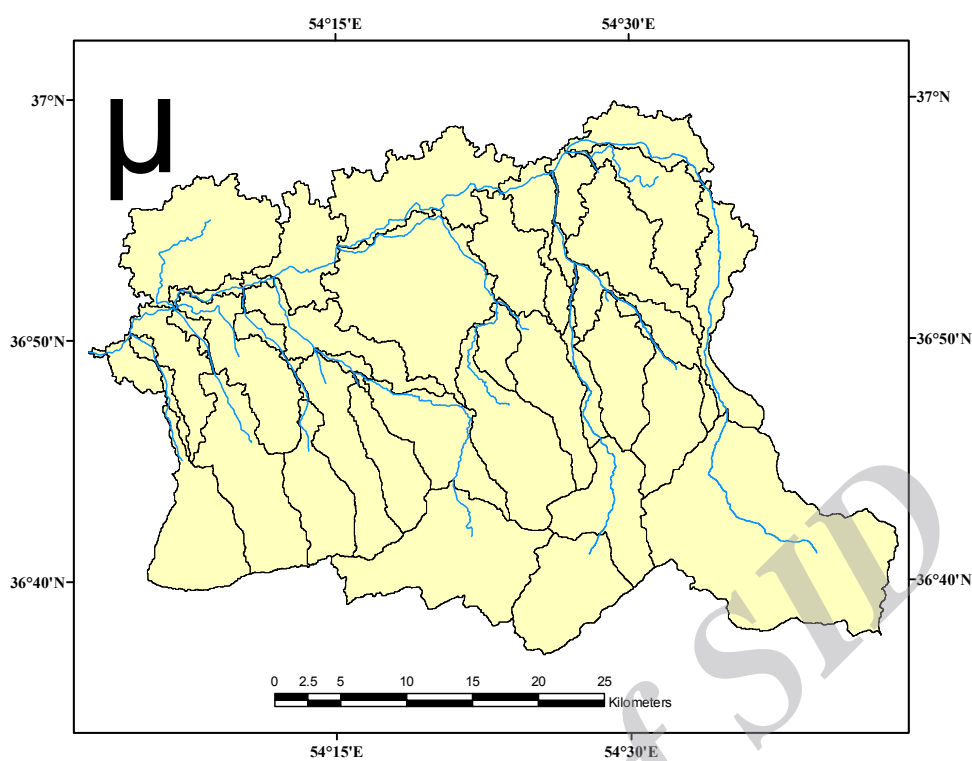


شکل ۱- ساختار کلی چرخه هیدرولوژیک در حوضه آبخیز در مدل SWAT (اقتباس از اکبری، ۱۳۸۹).

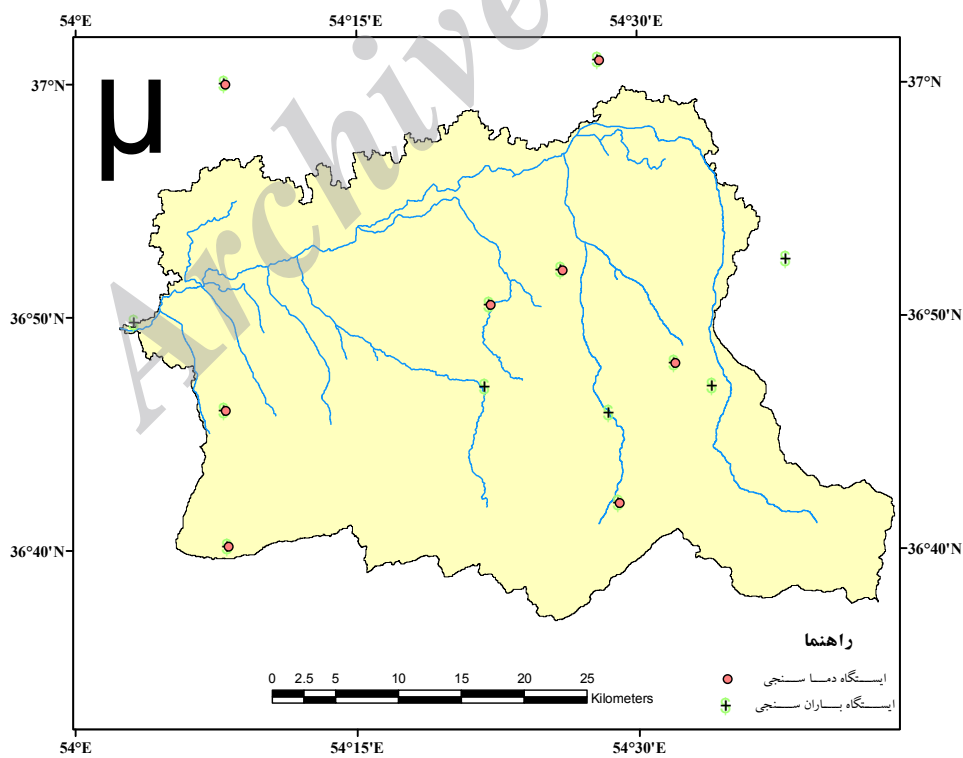
واسنجی شد. در مورد تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی از داده‌های مطالعات قبلی استفاده شد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گلستان، ۱۳۸۸). رواناب سطحی و جریان پایه با استفاده از روش فیلتر عددی معکوس^۱ از روی داده‌های جریان روزانه رودخانه برآورد گردید. برای این کار از نرم افزار Baseflow Program که توسط آرنولد و همکاران (۱۹۹۵) توسعه داده شده استفاده شد. ۳- در واسنجی مدل از تلفیق نظر کارشناسی و قدرت محاسباتی نرم‌افزارهای واسنجی خودکار استفاده گردید. واسنجی ابتدا به صورت دستی و سپس با استفاده از روش خودکار انجام شد.

به مواردی که برای کاهش عدم قطعیت و هم‌پایانی در مدلسازی حوضه قره‌سو با استفاده از SWAT لحاظ گردید به صورت موردی اشاره می‌گردد. این موارد در واقع وجه تمایز این تحقیق با بسیاری از تحقیقاتی است که در کشور و سایر نقاط دنیا انجام می‌شود. ۱- برای واسنجی مدل علاوه بر آمار دبی مشاهده‌ای در خروجی حوضه (ایستگاه سیاه آب) از آمار چند ایستگاه داخل حوضه (ایستگاه‌های پل اردوگاه، زیارت، کردکوی) نیز استفاده شد (Multi-site Calibration). ۲- در واسنجی علاوه بر جریان رودخانه سایر اجزای بیان آبی نیز مورد توجه قرار گرفت (Multi-variable Calibration). برای مثال، تبخیر و تعرق پتانسیل، جریان پایه، رواناب سطحی، نسبت تبخیر به بارش، نسبت جریان رودخانه به بارش و... در خروجی مدل با مقادیر واقعی مقایسه و

^۱- Automated Recursive Digital Filter



شکل ۲- نقشه زیر حوضه‌های ترسیم شده توسط Arc-SWAT برای حوضه قره‌سو.



شکل ۳- نقشه پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی در حوضه قره‌سو.

است. این شاخص به تنهایی نمی‌تواند تطابق داده‌های محاسباتی و مشاهداتی را نشان دهد. اگر همراه با R^2 معادله خط رگرسیون ($y=bx+a$) بین داده‌های پیش‌بینی و مشاهداتی نیز مد نظر قرار گیرد، تطابق این مقادیر بهتر نشان داده خواهد شد. شاخص bR^2 یا ضریب تعیین وزنی، این مسئله یعنی شیب خط رگرسیون را نیز لحاظ می‌کند. در مورد شاخص نش-ساتکلیف، اگر مقادیر این شاخص بیشتر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل، و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (ژو و همکاران، ۲۰۰۹ به نقل از نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰).

نتایج و بحث

پس از اجرای مدل SWAT خروجی‌های مدل شامل: مولفه‌های رواناب، جریان زیرسطحی، آب زیرزمینی و غیره به صورت فایل متنی حاوی اطلاعات به دست آمد. بررسی و مقایسه اولیه نتایج نشان داد که، مهمترین خطاهای نتایج اولیه عبارت بود از زیاد بودن حجم رواناب سطحی و جریان جانبی، کم بودن جریان پایه و عدم هماهنگی شاخه نزولی هیدروگراف‌ها. با استفاده از نتایج آنالیز حساسیت مدل، مطابق جدول ۱، پانزده پارامتر به عنوان پارامترهای حساس شناسایی شدند. با اجرای الگوریتم SUFI2 مقادیر بهینه پارامترهای حساس مدل تعیین گردید که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

در ستون دوم جدول فوق (علامت اختصاری)، r نشان دهنده روش Multiple و v نشان دهنده روش Replace و در واسنجی می‌باشد. این روش‌ها برای سهولت تغییر مقدار پارامترها در واسنجی ابداع شده‌اند. در روش Replace، مقدار اولیه پارامتر مورد نظر با ارزش داده شده جایگزین می‌شود اما در روش Multiple، مقدار اولیه پارامتر در (۱ + ارزش داده شده) ضرب می‌گردد. برای جزئیات بیشتر در این زمینه، به عباس‌پور (۲۰۱۱) مراجعه شود.

هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی ماهانه در دوره واسنجی به همراه نتایج شاخص‌های ارزیابی، در شکل ۴ ارائه شده است. مقادیر P-فاکتور و R-فاکتور برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۷

۴- با توجه به کوهستانی بودن و برف‌گیر بودن بخشی از حوضه، به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی هیدرولوژی برف، حوضه به ده طبقه ارتفاعی تقسیم‌بندی شد و گرادیان دما و گرادیان بارش با استفاده از داده‌های دما و بارش ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی حوضه محاسبه و در شبیه‌سازی لحاظ گردید. در حالت پیش‌فرض، مدل SWAT از آمار نزدیک‌ترین ایستگاه دما و بارش بدون لحاظ گرادیان‌ها استفاده می‌کند. در اکثر تحقیقات (حتی در شبیه‌سازی حوضه‌های کوهستانی) نیز قابلیت اعمال گرادیان دما و بارش نادیده گرفته می‌شود.

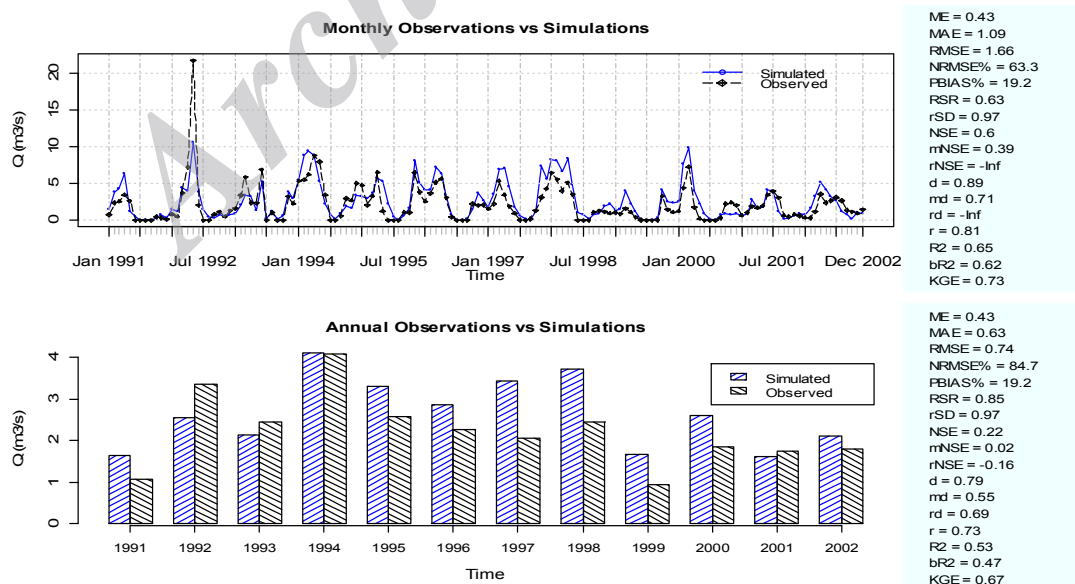
با توجه به زیاد بودن تعداد پارامترهای مدل، برای انجام موفق و سریعتر مرحله واسنجی، از تحلیل حساسیت با روش "یک پارامتر در هر بار" (OAT^1) برای شناسایی پارامترهای مهم‌تر و حساس‌تر مدل استفاده شد. واسنجی مدل بر اساس آمار سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۲ و اعتبارسنجی با استفاده از آمار سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ انجام شد. در ابتدا سعی شد مدل برای شبیه‌سازی در پایه زمانی سالانه واسنجی شود تا پس از دستیابی به نتیجه قابل قبول اقدام به واسنجی مدل برای پایه زمانی ماهانه گردد. در ادامه، برای واسنجی دقیق، تحلیل عدم قطعیت و اعتبارسنجی مدل SWAT برای حوضه قره سو، از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI-2² (Abbaspour, 2011) استفاده شد. SUFI-2 یک الگوریتم نیمه‌خودکار مدلسازی معکوس است. این الگوریتم، برای ارزیابی عدم قطعیت دو معیار P-فاکتور و R-فاکتور را محاسبه می‌کند. به لحاظ تئوری، مقادیر P-فاکتور در بازه ۰ تا ۱ و مقادیر R-فاکتور در بازه ۰ تا ۱ بینهایت تغییر می‌کنند. P-فاکتور برابر با ۱ و R-فاکتور برابر با ۰ نشان‌دهنده تطابق کامل مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی است. هر چقدر P-فاکتور و R-فاکتور به دست آمده، از این اعداد فاصله داشته باشند دقت شبیه‌سازی کمتر می‌باشد. علاوه بر این دو معیار، شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین وزنی (bR^2)، نش-ساتکلیف (NSE) و میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز برای ارزیابی نتایج مدل استفاده شد. شاخص R^2 ، همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را بیان می‌کند و مقادیر آن بین ۰ تا ۱ متغیر

1- One-at-a-time

2- Sequential Uncertainly Fitting Ver. 2

جدول ۱- ترتیب پارامترهای حساس و مقدار بهینه پارامترهای مدل برای حوضه آبخیز قره‌سو.

مقدار بهینه	محدوده بهینه	ترتیب حساسیت	علامت اختصاری	نام پارامتر	
-0.043	-0.081	0.057	۱	r_CN2.mgt	شماره منحنی
0.041	0.023	0.297	۲	v_ALPHA_BF.gw	ثابت تخلیه جریان زیرزمینی
0.891	0.623	1	۳	v_ESCO.hru	فاکتور جبران تبخیر خاک
-0.526	-0.9	0.099	۴	r_SOL_AWC(1).sol	ظرفیت آب قابل دسترس لایه اول خاک
-0.053	-0.212	0.864	۵	r_SOL_K(1).sol	هدایت هیدرولیکی لایه اول خاک
165.797	98	294	۶	v_GW_DELAY.gw	زمان تاخیر انتقال آب از خاک به سطح آب زیر زمینی
102	0	500	۷	v_GWQMN.gw	حداقل ذخیره آب زیرزمینی برای رخ دادن جریان پایه
0.859	-0.113	1.262	۸	r_SOL_AWC(2).sol	ظرفیت آب قابل دسترس لایه دوم خاک
-0.983	-1.072	2.578	۹	v_SFTMP.bsn	دمای بارش برف
0.119	0.058	0.175	۱۰	v_GW_REVAP.gw	ضریب تبخیر از آبخوان سطحی
52.812	15.840	71.960	۱۱	v_REVAPMN.gw	حداقل عمق آب در آبخوان سطحی برای رخ دادن تبخیر
1.242	-1.122	1.394	۱۲	v_SMTMP.bsn	دمای ذوب برف
0.532	-0.313	0.662	۱۳	r_SOL_K(2).sol	هدایت هیدرولیکی لایه دوم خاک
0.556	-0.508	0.776	۱۴	r_SOL_BD(1).sol	جرم مخصوص ظاهری لایه اول خاک
-0.081	-0.239	0.883	۱۵	r_SOL_BD(2).sol	جرم مخصوص ظاهری لایه دوم خاک



شکل ۴- دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ماهانه و سالانه برای ایستگاه سیاه‌آب در مرحله واسنجی به همراه شاخص‌های ارزیابی (برای جزئیات بیشتر در مورد هر یک از شاخص‌ها، به موریاسی و همکاران (۲۰۰۷) مراجعه شود).

هیدروگراف‌ها در دوره اعتبارسنجی نیز خوب و قابل قبول است. بزرگ بودن ضرایب تعیین بیانگر این است که همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی نسبتاً زیاد است یعنی شکل هیدروگراف‌ها (نقاط افزایش و کاهش دبی) نسبتاً خوب پیش‌بینی شده‌اند ولی ضرایب BR^2 نسبتاً کمتر بیانگر این است که علی‌رغم تشابه شکل هیدروگراف‌ها، مقادیر نظیر به نظیر دبی، تطابق کاملی با هم ندارند. مثبت بودن شاخص PBIAS نشان می‌دهد که مدل به‌طور کلی دچار "تخمین کمتر از واقعیت" است.

مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج سایر تحقیقات مشابه صورت گرفته در سطح جهان (از جمله بکیاریس ۲۰۰۵، فیریسن ۲۰۰۷، آلانسی ۲۰۰۹ و ...) نشان می‌دهد، با وجود چالش‌های مربوط به داده‌های ورودی برای آبخیز مورد مطالعه، دقت شبیه‌سازی قابل قبول و تقریباً مشابه با نتایج سایر محققین به دست آمده است. چکیده‌ای از نتایج سایر محققین در گزارش گاسمن و همکاران (۲۰۰۷) آمده است.

متوسط مقادیر اجزای بیلان آبی حوضه قره سو بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل برای دوره زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۷ در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میانگین بارش حوضه حدود ۷۲۱ میلی‌متر است؛ به‌طور متوسط حدود ۶۷٪ بارش از طریق تبخیر و تفرق وارد اتمسفر می‌شود، حدود ۱۷ درصد آن به‌صورت رواناب سطحی و جریان جانبی مستقیماً به آبراه‌ها وارد می‌شود و حدود ۱۶ درصد نفوذ یافته و وارد لایه آبدار زیرزمینی می‌شود که جریان پایه رودخانه را تأمین می‌کند.

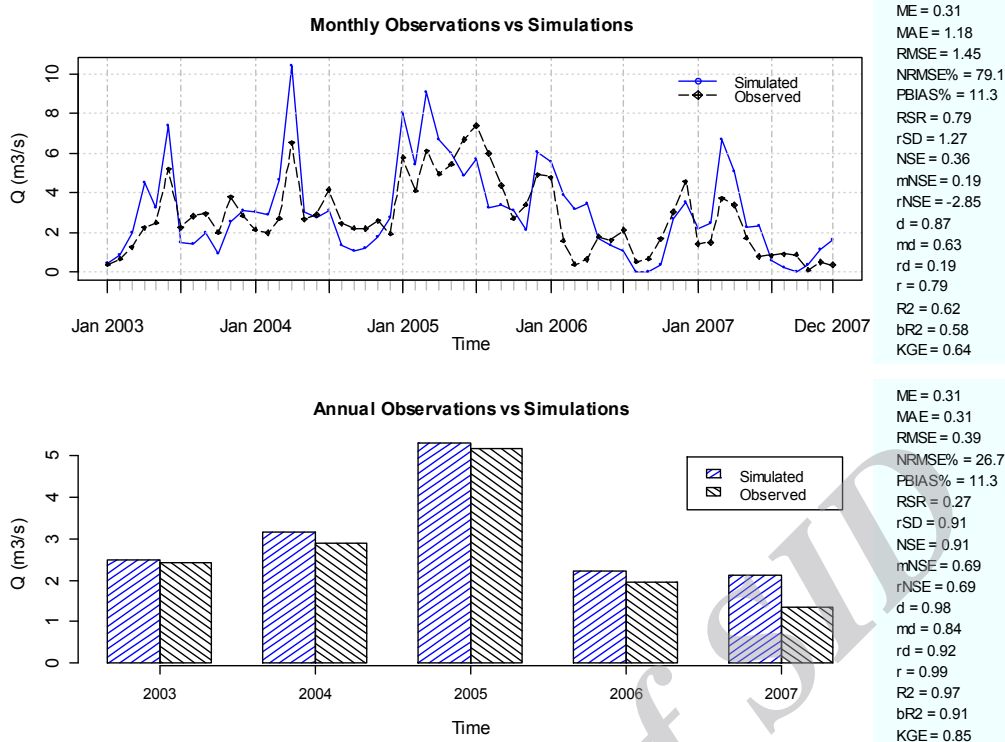
متوسط ماهانه اجزای بیلان آبی حوضه در دوره زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۷ در جدول ارائه شده است. ارقام این جدول تغییرات زمانی اجزای بیلان آبی حوضه در طول سال را نشان می‌دهند.

در مورد بارش و متغیرهایی که به‌طور مستقیم از آن تأثیر می‌پذیرند یعنی رواناب سطحی، جریان جانبی و رطوبت خاک، تغییرات سالانه مشابهی مشاهده می‌شود. مقادیر این متغیرها از ماه سپتامبر (شهریور) روند افزایشی به خود می‌گیرد، در ماه مارس (اسفند) مقادیر متغیرها به اوج خود می‌رسد و پس از آن رو به کاهش می‌گذارد، در ماه ژوئن (خرداد) کاهش شدیدی اتفاق

و ۱/۲۳ محاسبه شد. شاخص P-فاکتور نشان می‌دهد که بیش از ۷۵ درصد داده‌های مشاهداتی در باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار گرفته‌اند که این بیانگر واسنجی بسیار خوب مدل بر اساس این شاخص است. شاخص R-فاکتور که نماینده پهنای باند عدم قطعیت در واسنجی است نسبتاً زیاد و حدود ۱/۲۳ می‌باشد.

طبق نظر عباس‌پور و همکاران (۲۰۰۷)، در صورت دسترسی و استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده با کیفیت بالا، R-فاکتور برابر یا کوچکتر از ۱ بیانگر عدم قطعیت نسبتاً کم و یک واسنجی مطلوب است. در این تحقیق، زیادت‌ر بودن عدم قطعیت نسبت به حالت مطلوب، می‌تواند به دلیل کم بودن دقت داده‌های ورودی مدل و داده‌های دبی مشاهداتی ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده برای واسنجی مدل باشد. بررسی شکل ظاهری هیدروگراف‌های مشاهداتی و بهترین شبیه‌سازی و شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل نشان می‌دهد که به‌طور کلی تطابق زمانی نقاط اوج و فرود هیدروگراف خوب است به همین دلیل مقدار شاخص R^2 نسبتاً زیاد است (حدود ۰/۶۵). مقادیر دبی دو هیدروگراف نیز با یکدیگر تطابق خوبی دارند ($BR^2 = 0.62$) و به‌طور کلی دبی اندکی بیش از واقعیت پیش‌بینی شده است ($PBIAS = 19.2$).

پس از تعیین دامنه بهینه برای پارامترهای مدل در مرحله واسنجی، روش SUFI-2 یک بار دیگر با استفاده از دامنه بهینه پارامترها و داده‌های دبی مشاهده‌ای برای دوره اعتبارسنجی (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷) اجرا شد. در شکل ۵ مقادیر دبی مشاهداتی و بهترین شبیه‌سازی برای ایستگاه سیاه آب در دوره اعتبارسنجی به همراه مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای این دوره نشان داده شده است. مقادیر P-فاکتور و R-فاکتور برای دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۹۷ و ۱/۷۳ محاسبه شد. شاخص P-فاکتور نزدیک به ۱ است، یعنی تقریباً همه داده‌های مشاهداتی در باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار گرفته‌اند. البته، بررسی شاخص R-فاکتور نشان می‌دهد که در دوره اعتبارسنجی پهنای باند عدم قطعیت نسبتاً زیاد است و این باعث شده که همه داده‌های مشاهداتی در این باند قرار گیرند. بررسی شکل ظاهری هیدروگراف‌های مشاهداتی و بهترین شبیه‌سازی و شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل (شکل ۵) نشان می‌دهد که به‌طور کلی تطابق

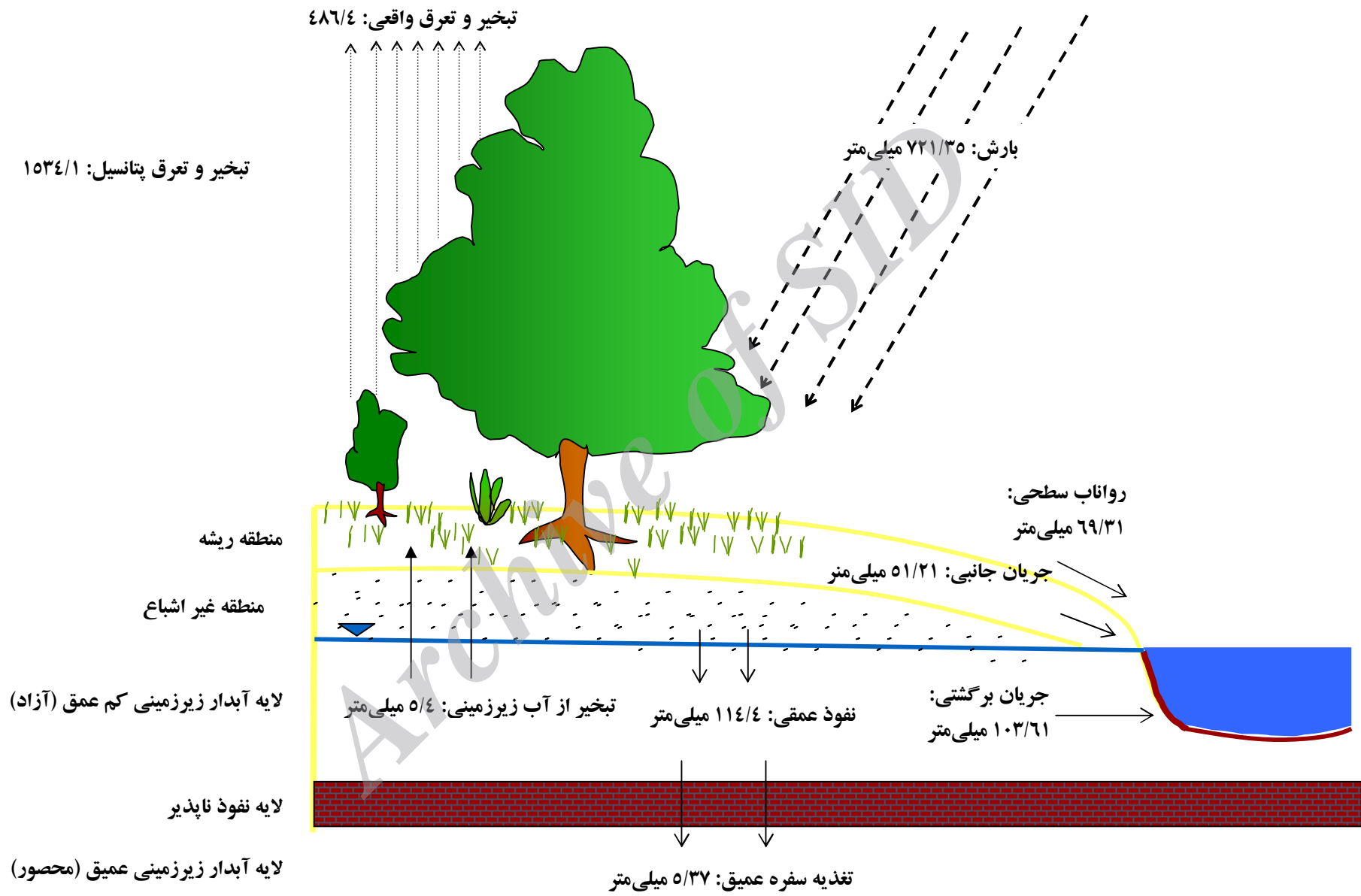


شکل ۵- شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ماهانه و سالانه برای ایستگاه سیاه‌آب به همراه شاخص‌های ارزیابی برای دوره اعتبارسنجی.

جدول ۲- متوسط ماهانه اجزای بیلان آبی حوضه در دوره زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۷.

ماه	بارش	تبخیر و تعرق پتانسیل	تبخیر و تعرق واقعی	رواناب سطحی	جریان جانبی	جریان پایه	آبدهی	رطوبت خاک
ژانویه	73.55	44.7	27.67	6.83	3.71	7.37	17.91	82.48
فوریه	90.37	54.58	40.65	8.72	5.31	9.06	23.09	101.03
مارس	96.46	83.21	48.98	11.31	8.16	12.48	31.95	141.44
آوریل	67.06	131.47	64.54	11.18	9.57	13.95	34.70	80.65
می	52.03	193.35	91.68	5.09	4.94	13.04	23.07	49.24
ژوئن	37.84	236.68	46.01	1.30	1.38	10.51	13.19	10.03
جولای	28.09	239.02	32.18	1.11	1.29	9.04	11.44	3.38
آگوست	22.58	205.23	27.26	0.68	0.92	7.50	9.09	2.20
سپتامبر	50.31	149.55	34.52	2.97	2.72	6.03	11.72	11.98
اکتبر	63.5	100	26.18	6.10	3.71	5.19	15.00	30.72
نوامبر	69.47	53.66	23.88	7.26	5.10	4.36	16.73	39.86
دسامبر	70.09	42.7	22.84	6.76	4.43	5.06	16.25	57.84

* واحد همه متغیرها، میلی‌متر می‌باشد.



تبخیر و تعرق پتانسیل: ۱۵۳۴/۱

شکل ۶- متوسط مقادیر اجزای بیلان آبی حوضه قره سو در دوره سال های ۱۹۹۱-۲۰۰۷.

تلاش‌های زیادی که برای واسنجی هر چه دقیق‌تر مدل صورت گرفت و زمان زیادی برای این کار صرف گردید، تجارب زیر بدست آمد: رویکرد بهینه برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل، تلفیق روش دستی و خودکار است. ابتدا کاربر باید با دانش کارشناسی و شناختی که از مدل و حوضه دارد به صورت دستی مدل را واسنجی کند سپس برای تدقیق نتایج، از ابزار واسنجی خودکار استفاده کند. در واقع، یک واسنجی خودکار خوب نیازمند یک واسنجی دستی مناسب است، در غیر این صورت نتایجی غیرواقعی به دست خواهد آمد. برای اینکه مدل هر چه بیشتر معرف واقعیات و فرایندهای حوضه باشد باید در واسنجی اجزای مختلف بیلان آب را در نظر گرفت. در این تحقیق در مرحله واسنجی دستی به این مطلب توجه خاصی معطوف شد. ولی از آنجا که سری زمانی داده‌های اندازه‌گیری شده برای اجزای مختلف بیلان آبی حوضه وجود نداشت اعمال این مطلب در مرحله واسنجی خودکار میسر نشد.

در مجموع نتایج تحقیق حاکی از آن است که مدل SWAT قابلیت شبیه‌سازی بیلان آبی حوضه‌های آبخیز نسبتاً بزرگ با شرایط پیچیده و ناهمگن (مانند حوضه قره‌سو) با دقت مناسب را دارد. البته به شرط این که داده‌های ورودی با دقت مناسب در مدل‌سازی استفاده شوند و نیز دقت و توجه کافی در واسنجی مدل صورت گیرد تا مدل هر چه بیشتر معرف شرایط واقعی حوضه باشد. این مطالعه اطلاعات مفیدی را در مورد جریان رودخانه و بیلان آبی حوضه قره‌سو فراهم نموده و به برنامه‌ریزی دقیق‌تر پروژه‌های منابع آب کمک می‌کند. از نتایج این مطالعه می‌توان برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و اقدامات مدیریتی قابل اجرا در منطقه (که به صورت سناریوهایی به مدل ارائه می‌شود) استفاده کرد.

منابع

- ۱) اکبری ح، ۱۳۸۹. شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه چهل‌چای استان گلستان با استفاده از مدل SWAT. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه آبخیزداری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. ۱۲۰ ص.
- ۲) امیری م، ۱۳۸۵. کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی SWRRB به منظور شبیه‌سازی رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کسلیان). پایان‌نامه

می‌افتد و در ماه‌های جولای و آگوست (تیر و مرداد) این متغیرها به کمترین مقدار خود می‌رسند تغییرات زمانی جریان پایه در طول سال نسبتاً کمتر است. بیشترین مقدار این متغیر در ماه آوریل (فروردین) هم‌زمان با شروع ذوب برف مشاهده می‌شود و کمترین میزان مربوط به ماه نوامبر است. با توجه به این‌که رواناب سطحی و جریان جانبی در ماه‌های کم‌بارش ژوئن تا سپتامبر (خرداد تا شهریور) بسیار کم است، جریان پایه منبع اصلی تأمین جریان رودخانه در این ماه‌ها محسوب می‌شود.

در مورد متغیر آبدهی که مجموع رواناب سطحی، جریان جانبی و جریان پایه است، بیشترین مقدار مربوط به ماه آوریل کمترین مقدار مربوط به ماه آگوست است. تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در طول سال با دما ارتباط تنگاتنگی دارد. بیشترین تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه‌های ژوئن تا آگوست (خرداد تا مرداد) مشاهده می‌شود و ماه‌های سرد (نوامبر تا فوریه؛ آبان تا بهمن) کمترین میزان تبخیر و تعرق پتانسیل را دارند. تبخیر تعرق واقعی شامل تبخیر از خاک، تعرق گیاه و ربایش توسط تاج پوشش گیاهی است. بنابراین، تغییرات سالانه این متغیر متأثر از بارش، رطوبت خاک و دماست. بیشترین مقادیر تبخیر تعرق واقعی مربوط به ماه‌های آوریل و می (فروردین و اردیبهشت) است که رطوبت بیشتری برای تبخیر وجود دارد و دما نیز نسبتاً زیاد است. کمترین مقادیر به ماه‌های نوامبر و دسامبر (آبان و آذر) مربوط می‌شود که به علت دما و بارش نسبتاً کم، تبخیر کمتری اتفاق می‌افتد. در ماه‌های زمستان (ژانویه، فوریه و مارس؛ دی، بهمن و اسفند) علی‌رغم زیاد بودن میزان بارش و رطوبت، به علت کم بودن دما، تبخیر و تعرق واقعی نسبتاً کم است.

نتیجه‌گیری

با اجرای مدل SWAT در حوضه قره‌سو امکان شبیه‌سازی بیلان آبی در این حوضه فراهم گردید. برای واسنجی و ارزیابی مدل عمدتاً از داده‌های جریان رودخانه ثبت شده در چند ایستگاه هیدرومتری در سطح حوضه استفاده شد. مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی و همچنین شاخص عددی ارزیابی کارایی مدل، بیانگر کارایی مناسب مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه قره‌سو است. با توجه به

- Hydrology and Earth System Sciences 6: 7581-7609.
- 14) Arnold J.G, Allen P.M, Muttiah R, Bernhardt G. 1995. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground Water* 33(6): 1010-1018.
- 15) Arnold J.G, Srinivasan R, Muttiah R.S, Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resource Association* 34 (1): 73-89.
- 16) Bekiaris I.G, Panagopoulos I.N, Mimikou N.A. 2005. Application of the SWAT model in the Ronnea catchment of Sweden. *Global NEST Journal* 3 (7): 252-257.
- 17) Faramarzi M, Abbaspour K.C, Schulin R, Yang H. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes* 23: 486-501.
- 18) Feyereisen G.W, Strickland T.C, Bosch D.D, Sullivan D.G. 2007. Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the Little river watershed. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50: 843-855.
- 19) Gassman P.W, Reyes M.R, Green C.H, Arnold J.G. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE* 50(4):1211-1250.
- 20) Hosseini M. 2010. Effect of Landuse Changes on Water Balance and Suspended Sediment Yield of Taleghan Catchment, Iran. . PhD Thesis, University Putra Malaysia.
- 21) Moriasi D.N, Arnold J.G, Van Liew M.W, Bingner R.L, Harmel R.D, Veith T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50 (3): 885-900.
- 22) Ndomba P.M, Birhanu B.Z. 2008. Problems and Prospects of SWAT Model Applications in NILOTIC Catchments. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine* 1: 41-52.
- 23) Neitch S.L, Arnold J.G, Kiniry J.R, Williams J.R. 2005. Soil and water assessment tool documentation, (user's manual). 494 pp.
- 24) Ritchie J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8: 1204-1213.
- 25) Sloan P.G, Morre I.D, Coltharp G.B, Eigel J.D. 1983. Modeling surface and
- ۳) کارشناسی ارشد گروه آبخیزداری. دانشگاه مازندران. ۱۳۴ ص.
- ۴) بوستانی ف، گوهرگانی ا، ۱۳۹۳. شبیه سازی کیفیت آب رود بشار در محدوده شهر یاسوج با استفاده از شبیه QUAL2K. *مجله مهندسی منابع آب*، ۲۳: ۸۵-۹۸
- ۵) تلوری ع ر، ۱۳۷۵. مدل های هیدرولوژیکی به زبان ساده. انتشارات دانشگاه تهران. ۴۰۱ ص.
- ۶) خلیقی سیگارودی ش، زینتی شعاع ط، سلاجقه ع، کهندل ا و مرتضایی ق، ۱۳۸۸. شبیه سازی بارش - رواناب به روش نیمه توزیعی در حوضه های آبخیز با آمار کم (مطالعه موردی: حوزه آبخیز لتیان). مجموعه مقالات پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلایای طبیعی) گرگان. ص ۱۸۰-۱۸۸.
- ۷) رستمیان ر، ۱۳۸۵. تخمین رواناب و رسوب در حوزه بهشت آباد در کارون شمالی با استفاده از مدل SWAT 2000. پایان نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۵۰ ص.
- ۸) رفاهی ح، ۱۳۸۶. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران. ۶۷۲ ص.
- ۹) شرکت سهامی آب منطقه ای گلستان، ۱۳۸۸. گزارش بیان آب در محدوده مطالعاتی گرگان. ۹۳ ص.
- 10) Abbaspour K.C, Johnson C.A, van Genuchten M.Th. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 3(4): 1340-1352.
- 11) Abbaspour K.C, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J, Srinivasan R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333 (2-4), 413-430.
- 12) Abbaspour K.C. 2011. User Manual for SWAT-CUP. SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland, 95 p. Available at: http://www.eawag.ch/organisation/abteilung_e/n/siam/software/swat/index_EN.
- 13) Alansi A.W, Amin M.S.M, Abdul Halim G, Shafri H.Z.M, Aimrun W. 2009. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia.

subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. Water Resources Research Institute, Report 142. University of Kentucky, Lexington.

26) Williams J.R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Transactions of ASAE 12(1): 100-103.

27) Xu Z.X, Pang J.P, Liu C.M, Li J.Y. 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. Hydrological Processes 23(25), 3619-3630

Archive of SID