

شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه آبخیز قره‌سو استان کرمانشاه با استفاده از مدل SWAT

مجید حسینی*

^۱ استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۸/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۱۲

چکیده

در این پژوهش شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه آبخیز قره‌سو واقع در استان کرمانشاه با استفاده از مدل ارزیابی آب و خاک SWAT بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از این حوزه، به صورت ماهانه انجام شد. هدف اصلی در این پژوهش، آزمون کارایی مدل و قابلیت استفاده از آن به عنوان شبیه‌ساز بیلان آب در حوزه آبخیز قره‌سو می‌باشد. ابتدا اطلاعات ورودی مورد نیاز مدل، شامل نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و اطلاعات خاک‌شناسی و همچنین، اطلاعات آب و هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش، دما، رطوبت نسبی و آبدهی روزانه تهیه شد و مدل با این داده‌ها اجرا شد. در ادامه به منظور مشخص کردن پارامترهای مهم و حساس مدل، آنالیز حساسیت پارامترها با استفاده از روش هر بار یک پارامتر (OAT) انجام شد و در آن اثر پارامترهای مختلف بر چهار جزء مهم از بیلان آب شامل رواناب سطحی، جریان جانبی، آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق مورد بررسی قرار گرفت. برای واسنجی مدل از الگوریتم SUFI2 استفاده شد. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های جریان رودخانه برای سال‌های ۱۹۸۲-۲۰۰۰ و اعتبارسنجی نیز بر اساس آمار سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۱ انجام شد. دقت شبیه‌سازی ماهانه با استفاده از شاخص نش-ساتکلیف در دوره واسنجی ۰/۵۶ و با شاخص R^2 معادل ۰/۶۰ و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۶۰ و ۰/۶۵ به دست آمد. نتایج حاصل از پژوهش حاکی از کارایی مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آبی و بررسی اثرات اقدامات مختلف مدیریتی و یا تغییرات اقلیمی بر دبی جریان در حوزه آبخیز قره‌سو می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، اعتبارسنجی، الگوریتم SUFI2، داده بارش، OAT

مقدمه

اندازه‌گیری اجزای بیلان آب در فاصله‌های زمانی مورد نیاز به خاطر وقت‌گیر و پرهزینه بودن مشکل است. مدل‌هایی که منطقه غیراشباع خاک را شبیه‌سازی می‌کنند، ابزار مفیدی برای پیش‌بینی آثار اقدامات مدیریتی بر آب استفاده شده به وسیله گیاه می‌باشند و از این مدل‌ها می‌توان برای بهینه‌سازی عملیات کشاورزی مانند مصرف آب استفاده کرد. از طرف دیگر، مهار آب‌های سطحی خصوصاً در کشور ما که

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 غیراصولی از این منابع، باعث بروز مشکلات و اختلافات روزافزونی در خصوص مدیریت منابع آب شده است. برای بهینه‌سازی مصرف آب، اطلاع از بیلان آبی حوزه‌های آبخیز ضروری می‌باشد. از طرفی،

* مسئول مکاتبه: mjhossaini@yahoo.com

حوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی در آمریکا شبیه‌سازی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیلان هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس با استفاده از مدل SWAT به‌طور واقع‌بینانه‌ای قابل شبیه‌سازی است.

Abbaspour و همکاران (۲۰۰۷) برای شبیه‌سازی فرایندهای 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 نیترا ت بسیار خوب و شبیه‌سازی رسوب و فسفر نسبتاً خوب صورت گرفته است. ایشان نتیجه گرفتند که مدل SWAT می‌تواند برای مدیریت حوزه آبخیز بسیار مفید باشد.

Ndomba و Birhanu (۲۰۰۸)، مدل SWAT را برای زیرحوضه‌های رودخانه نیل به‌کار برده و واسنجی و صحت‌سنجی کردند. ضریب نش-ساتکلیف از ۰/۱۳۷ تا ۰/۸۷ و ضریب تبیین R^2 بین ۰/۲۶ تا ۰/۷۲ به‌دست آمدند. روی هم رفته ارزیابی مشخص کرد که مدل SWAT به‌طور رضایت‌بخشی جریان رودخانه را در شرایط محدودیت دسترسی به داده‌ها شبیه‌سازی کرده است.

Faramarzi 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.

Hosseini (۲۰۱۰)، به مطالعه تاثیرات تغییر کاربری روی بیلان آبی و رسوبات معلق در حوزه آبخیز طالقان پرداخت. ایشان در مراحل واسنجی مدل، از دو برنامه SUFI2 و Parasol استفاده نمود. ایشان با بررسی بیلان آبی بالادست حوضه (زیرحوضه جویستان) و پایین‌دست 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.

مسئله کمبود آبی در پهنه وسیعی از کشور وجود دارد، از اهمیت و حساسیت زیادی برخوردار است. لذا نیاز به شناسایی و به مدل درآوردن رفتار رودها و شریان‌های آبی جهت برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل‌های آن‌ها عمیقاً احساس می‌شود. عدم وجود تشکیلات منسجم به‌منظور ثبت تغییرات سیستم هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز کشور، قرار گرفتن بیشتر رودها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، وضعیت بحرانی برداشت آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی، همه و همه دلایل بیشتر و ظریف‌تری می‌باشد که به مقوله شبیه‌سازی و پیش‌بینی، جلوه و نمودی کامل‌تر می‌بخشد.

مدل، نمادی از واقعیت است که مهم‌ترین ویژگی‌های دنیای واقعی را به‌صورتی 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 (Rafahi, ۲۰۰۷). 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 به‌منظور طراحی منابع آب، کنترل سیل، تعدیل جریان آب و در کل، برنامه‌ریزی و پیش‌بینی جریان می‌باشد (Khalighi و همکاران، ۲۰۰۹).

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 به‌کار برده شده است. توانایی مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی پیچیده حوزه‌های آبخیز در محیط GIS این مدل را نسبت به مدل‌های یکپارچه که در آن‌ها واحدهای کاری بزرگ‌تر، مبنای عمل هستند، متمایز ساخته است (Akbari, ۲۰۱۰).

Arnold و همکاران (۱۹۹۸) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT، بیلان هیدرولوژیکی را برای

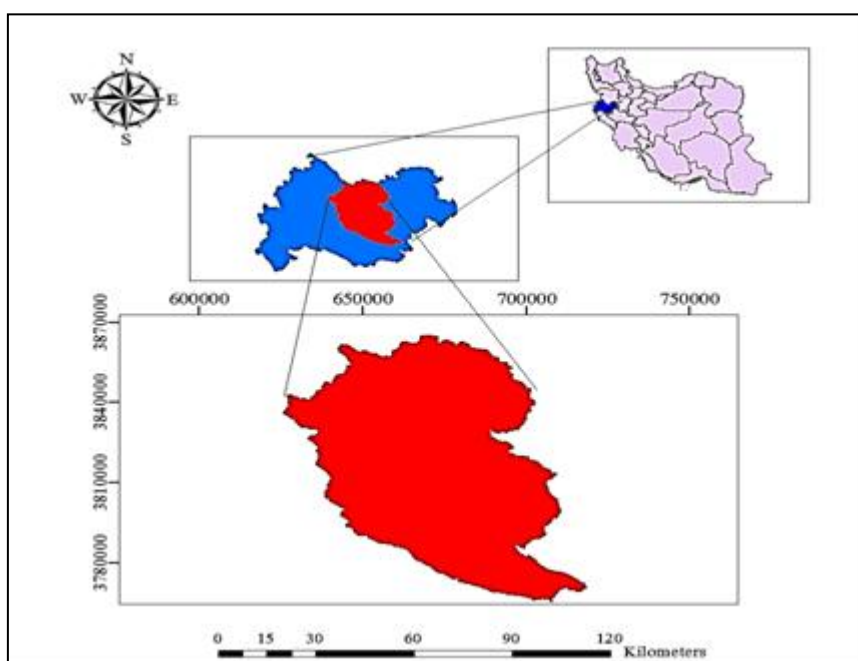
^۱ Soil and Water Assessment Tool

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز قره‌سو یکی از زیرحوضه‌های کرخه است که با مساحت ۵۷۹۳ کیلومترمربع، ۱۱/۴ درصد آن را در بر می‌گیرد. حوزه قره‌سو از لحاظ تقسیمات سیاسی در استان کرمانشاه قرار گرفته است. حداکثر ارتفاع حوضه ۳۳۵۱ متر و حداقل آن ۱۳۰۰ متر می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه حوضه قره‌سو ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد که ماه‌های دی و بهمن 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 شهریور ماه به کمترین مقدار خود می‌رسد (Hosseini و همکاران، ۲۰۱۲). در شکل ۱، موقعیت حوزه آبخیز قره‌سو در ایران و استان کرمانشاه نمایش داده شده است.

Amiri (۲۰۰۶)، در پژوهشی از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه‌سازی رواناب و بیلان آبی در آبخیز کسلیان استفاده نمود و واسنجی و اعتبارسنجی را برای مدل انجام داده و اختلاف بین مقادیر رواناب مشاهداتی و تخمینی را با استفاده از فاکتور 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 (بالادست ایستگاه هیدرومتری قورباغستان) در استان کرمانشاه با استفاده از مدل SWAT و واسنجی و اعتبارسنجی مدل، برای این حوضه می‌باشد، تا بدین‌وسیله کارایی مدل SWAT در مناطق کوهستانی غرب ایران ارزیابی شود.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز قره‌سو در ایران و استان کرمانشاه

زمانی مدلی پیوسته است. کوچک‌ترین واحد کاری در این مدل، واحد واکنش هیدرولوژیکی (HRU)^۱ است که از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، خاک و کاربری

تئوری مدل SWAT: این مدل نمونه‌ای از مدل‌های فیزیکی پایه است که با حل معادلات اساسی فیزیک به شبیه‌سازی فرآیندهای سیستم آبخیز می‌پردازد. این مدل به لحاظ مقیاس فضایی نیمه‌توزیعی و از نظر

^۱ Hydrologic Response Unit

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 غیراشباع 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 (Sloan و همکاران، ۱۹۸۳) بر مبنای درجه شیب، طول شیب و هدایت هیدرولیکی اشباع، مدل‌سازی می‌شود. مابقی آب نفوذ یافته، به سفره‌های کم‌عمق زیرزمینی وارد می‌شود. برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل، روش‌های هارگریوز، پرستلی-تیلور و پنمن-مانتیت موجود می‌باشد. مدل SWAT تبخیر از سطح خاک و تبخیر از گیاه را به صورت مجزا مطابق روش Ritchie (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 (Williams، ۱۹۶۹) یا ماسکینگهام 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 DEM و نقشه‌های زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه، به محیط نرم‌افزار مدل فراخوانده شدند. در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های خاک، کاربری اراضی (مربوط به سال ۱۳۸۰) و طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUها) تعریف شدند. حاصل کار این

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 حوزه آبخیز محاسبه می‌شود. شبیه‌سازی سیستم آبخیز در مدل SWAT را می‌توان به دو بخش کلی فاز زمینی^۱ و فاز آبی^۲ تقسیم نمود. 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 (Neitch و همکاران، ۲۰۰۵).

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

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

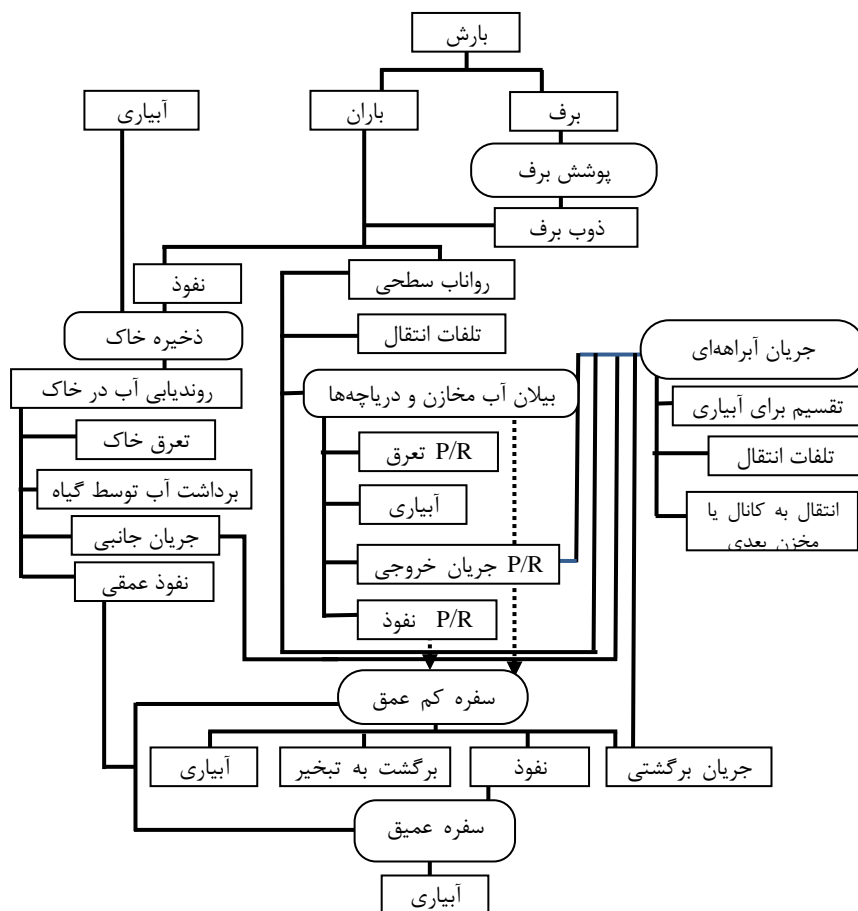
که در آن، SW_t مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارندگی در روز t ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز t ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز t ام (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آبی که در روز t ام از پروفیل خاک به ناحیه غیراشباع وارد می‌شود و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی (میلی‌متر) در روز t ام می‌باشد. شکل ۲، ساختار مدل مفهومی چرخه هیدرولوژیک و مسیرهای 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 به‌وسیله 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 ۰/۲ پارامتر نگه‌داشت (S) در نظر گرفته می‌شود و

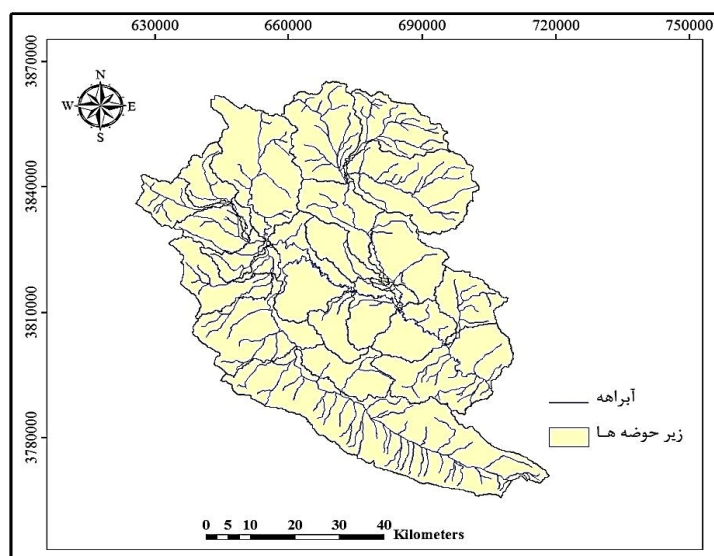
¹ Land Phase

² Water Phase

مرحله، تشکیل ۲۷ واحد پاسخ هیدرولوژیک بود که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- ساختار کلی چرخه هیدرولوژیک در حوزه آبخیز در مدل SWAT (اقتباس از Akbari، ۲۰۱۰)



شکل ۳- نقشه واحدهای هیدرولوژیکی (HRUها) و شبکه آبراهه حوزه آبخیز قره‌سو

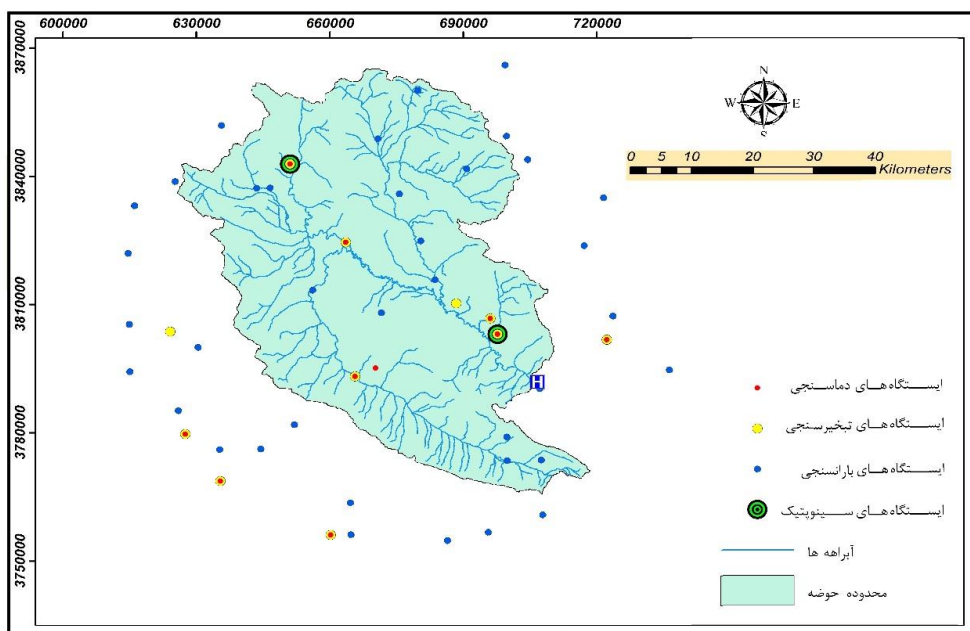
روزانه) وارد مدل شدند. مشخصات دو ایستگاه مرجع یعنی ایستگاه‌های سینوپتیک کرمانشاه و روانسر

پس از تهیه نقشه HRUها، داده‌های هواشناسی (شامل داده‌های بارش روزانه و دمای حداقل و حداکثر

(جدول ۱)، به همراه مشخصات و داده‌های ۵۲ ایستگاه باران‌سنجی و هفت ایستگاه مربوط به دما (شکل ۴) به مدل معرفی شد. پس از این مرحله با اجرای مدل نتایج استخراج شد.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مرجع مورد استفاده در منطقه

| ردیف | نام ایستگاه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | ارتفاع ایستگاه (متر) |
|------|-------------|---------------|---------------|----------------------|
| ۱ | کرمانشاه | ۴۷° ۰۹' | ۳۴° ۲۱' | ۱۳۱۸ |
| ۲ | روانسر | ۴۶° ۳۹' | ۳۴° ۴۳' | ۱۳۷۹ |



شکل ۴- نقشه پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی در حوضه قره‌سو

(E^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد.

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 نتایج، نشان داد که مهم‌ترین خطاهای نتایج شامل بالا بودن حجم رواناب کل، عدم هماهنگی نقاط اوج و شیب هیدروگراف‌ها و کم بودن حجم آب پایه بودند. با استفاده از نتایج آنالیز حساسیت مدل، ده پارامتر به عنوان پارامترهای حساس شناسایی شدند. با اجرای الگوریتم SUFI2 مقادیر بهینه پارامترهای حساس مدل تعیین شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

واسنجی و اعتبار سنجی مدل: 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 و تحلیل عدم قطعیت مدل با استفاده از الگوریتم $SUFI2^2$ (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۴) و بر اساس داده‌های جریان رودخانه مربوط به سال‌های ۱۳۷۱-۱۳۸۰ انجام شد. سپس با استفاده از مقادیر تعیین شده برای پارامترها در مرحله واسنجی و بر اساس آمار سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۸۴ اعتبارسنجی صورت گرفت. نتایج با شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین وزنی (bR^2)، نش-ساتکلیف (NS)، خطا

¹ One At a Time

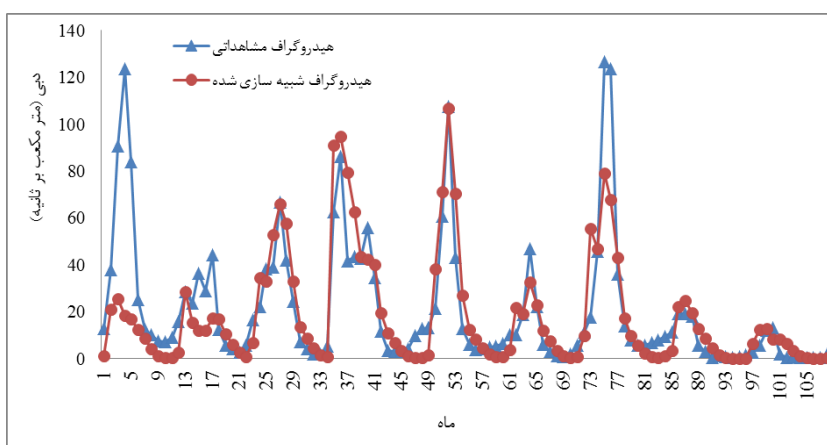
² Sequential Uncertainty Fitting 2

جدول ۲- ترتیب پارامترهای حساس و مقدار بهینه پارامترهای مدل برای حوزه آبخیز قره‌سو

| نام پارامتر | علامت اختصاری | ترتیب حساسیت | محدوده تغییرات | مقدار بهینه |
|---|------------------|--------------|------------------|-------------|
| ثابت تخلیه آب زیرزمینی | v_ALPHA_BF.gw | ۱ | ۰/۰۷۹ - ۰/۰۹۷ | ۰/۰۹۲ |
| شماره منحنی روش SCS | r_CN2.mgt | ۲ | -۰/۲۲۹ - -۰/۲۲۷ | -۰/۲۲۸ |
| ظرفیت آب قابل دسترس خاک | r_SOL_AWC(1).sol | ۳ | -۰/۳۱۵ - -۰/۲۱۷ | -۰/۲۷۳ |
| عمق خاک | r_SOL_Z(1).sol | ۴ | ۱/۷۴۲ - ۲/۰۲ | ۲/۰۱۳ |
| حداقل ذخیره آب زیرزمینی برای رخ دادن جریان پایه | v_GWqmn.gw | ۵ | ۴/۹۰۵ - ۱۴/۳۵ | ۷/۵۵۷ |
| فاکتور جبران تبخیر در خاک | v_ESCO.hru | ۶ | -۰/۰۷۳ - -۰/۰۲۵ | -۰/۰۳۷ |
| آستانه تراز آب در سفره سطحی برای تبخیر | v_REVAPMN.gw | ۷ | ۰/۴۴۱ - ۰/۶۲۱ | ۰/۵۵۲ |
| ضریب تبخیر از سفره زیرزمینی | r_gw_revap.gw | ۸ | -۰/۰۹۷ - -۰/۰۸۹۹ | -۰/۰۹۰۷ |
| زمان تاخیر آب زیرزمینی | v_GW_DELAY.gw | ۹ | ۳۶/۴۰۴ - ۳۷/۲۷۱ | ۳۷/۲۵۸ |
| هدایت هیدرولیکی کانال | v_CH_K2.rte | ۱۰ | ۱۱/۳۴۳ - ۱۲/۲۱ | ۱۱/۷۸ |

شده و هیدروگراف مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی (۱۳۸۴-۱۳۸۰)، نشان داده شده است. همچنین، نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل در دوره اعتبارسنجی در جدول ۴ ارائه شده است.

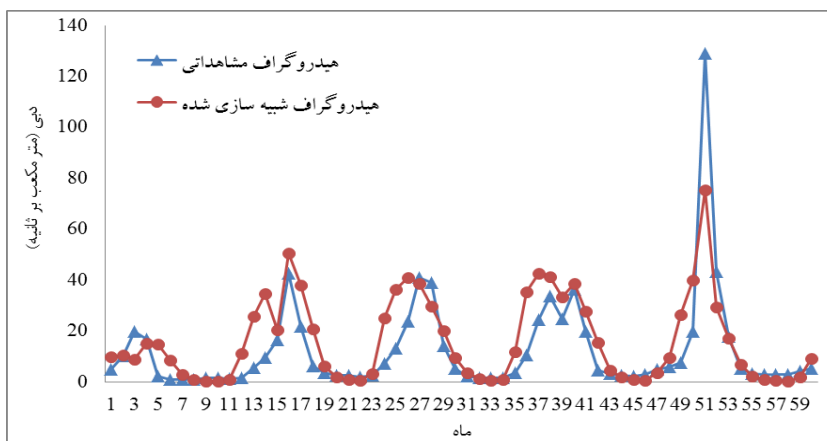
هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی ماهانه در دوره واسنجی (۱۳۷۱-۱۳۸۰)، در شکل ۴ و نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۵ هیدروگراف شبیه‌سازی



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره واسنجی (۱۳۷۱-۱۳۸۰)

جدول ۳- ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی

| مقدار | مشخصه | معیار ارزیابی |
|-------|-----------------|-------------------------|
| ۰/۵۶ | NS | ضریب نش-ساتکلیف |
| ۰/۵۸ | R ² | ضریب تعیین |
| ۰/۳۸ | bR ² | ضریب تعیین وزنی |
| ۰/۰۲ | E ² | خطای شبیه‌سازی |
| ۱۸/۲۶ | RMSE | ریشه میانگین مربعات خطا |



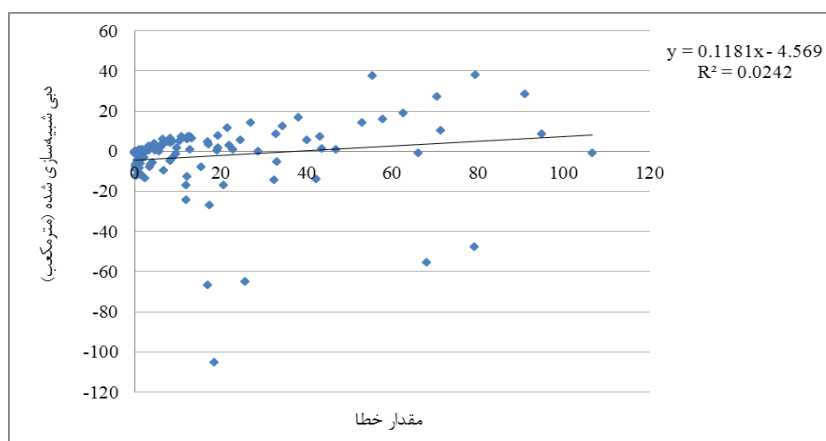
شکل ۵- مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی (۱۳۸۴-۱۳۸۰)

جدول ۴- ارزیابی نهایی کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی

| مقدار | مشخصه | معیار ارزیابی |
|-------|-----------------|-------------------------|
| ۰/۶ | NS | ضریب نش-ساتکلیف |
| ۰/۶۵ | R ² | ضریب تعیین |
| ۰/۵ | bR ² | ضریب تعیین وزنی |
| ۰/۰۰۹ | E ² | خطای شبیه‌سازی |
| ۱۲ | RMSE | ریشه میانگین مربعات خطا |

تأثیر خطای سیستماتیک (خطای مربوط به ساختار مدل و پارامترهای تعیین شده در مرحله واسنجی) و غلبه خطای تصادفی (خطای مربوط به داده‌های ورودی یا سایر عوامل) در مدل‌سازی است.

به‌منظور ارزیابی چگونگی توزیع خطاها، رابطه خطا و داده‌های شبیه‌سازی شده بررسی شد. نتیجه این بررسی در شکل ۶ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که رابطه معنی‌داری بین خطاها و داده‌های شبیه‌سازی شده وجود ندارد که این بیانگر ناچیز بودن



شکل ۶- نمودار همبستگی مقادیر دبی شبیه‌سازی شده و خطا در دوره اعتبارسنجی

باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰). همان‌گونه که شاخص نش-ساتکلیف در جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد، مقادیر این پارامتر در

شاخص نش-ساتکلیف پرکاربردترین شاخص برای ارزیابی نتایج در شبیه‌سازی‌های جریان پیوسته است. عموماً اگر شاخص نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد کارایی مدل عالی و کامل و اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵

جمله Bekiaris و همکاران، ۲۰۰۵، Feyereisen و همکاران، ۲۰۰۷، Alansi و همکاران، ۲۰۰۹) نشان می‌دهد که با وجود چالش‌های مربوط به داده‌های ورودی برای آبخیز مورد پژوهش، دقت شبیه‌سازی قابل قبول و تقریباً مشابه با نتایج سایر محققین به‌دست آمده است (Hosseini و همکاران، ۲۰۱۲).

میانگین مقادیر اجزای بیلان آبی حوزه قره‌سو بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل برای دوره زمانی ۱۳۸۴-۱۳۷۱ در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این حوضه حدود نیمی از بارش از طریق تبخیر و تعرق وارد اتمسفر می‌شود، حدود ۱۵ درصد آن به‌صورت رواناب سطحی مستقیماً به آبراهه‌ها وارد می‌شود و حدود ۳۰ درصد نفوذ یافته و وارد سفره آب زیرزمینی کم‌عمق می‌شود که جریان پایه رودخانه را تأمین می‌کند.

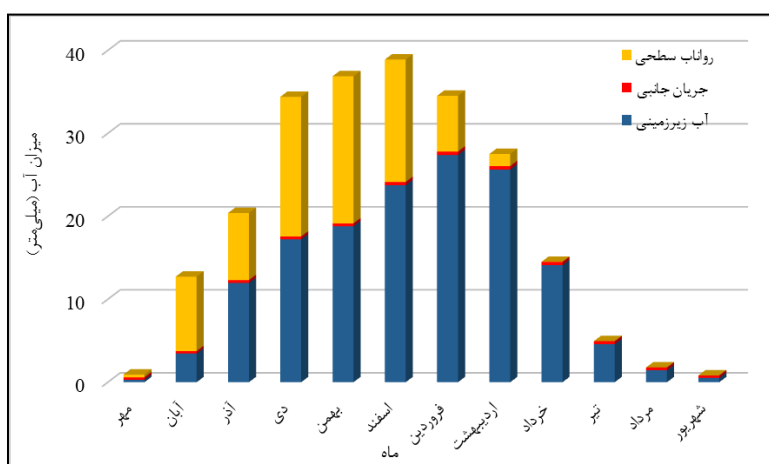
سهم رواناب سطحی، جریان جانبی و جریان آب زیرزمینی در مقدار جریان ماهانه رودخانه قره‌سو در شکل ۷ ارائه شده است.

دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب معادل ۰/۵۶ و ۰/۶۰ می‌باشد که رضایت‌بخشی مدل را نشان می‌دهد. بر اساس این مطلب، می‌توان نتیجه گرفت که مدل SWAT قابلیت شبیه‌سازی جریان رودخانه قره‌سو با دقت مناسب را دارد. در بین سایر شاخص‌های استفاده شده برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی، شاخص R^2 همواره مقادیر بالاتری را نسبت به دیگر شاخص‌ها نشان داده است. دلیل این مسئله را می‌توان در ماهیت این شاخص جستجو کرد که در آن به مقدار اختلاف بین دو گروه داده توجه نشده و فقط یکسان بودن نسبت اختلاف بین داده‌های متناظر دو گروه، ملاک دقیق بودن شبیه‌سازی فرض شده است. این نقص در شاخص bR^2 تا حدی اصلاح شده است، چرا که شیب معادله خط رگرسیون برازش شده برای دو گروه داده، در شاخص R^2 دخالت داده شده و کارایی شاخص را افزایش داده است. به‌طور کلی مقادیر همه شاخص‌های ارزیابی بیانگر دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه قره‌سو می‌باشد.

مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج سایر پژوهش‌های مشابه صورت گرفته در سطح جهان (از

جدول ۵- مقادیر اجزای بیلان آبی حوضه قره‌سو

| متغیر | مقدار (میلی‌متر) | درصد نسبت به بارش |
|--------------|------------------|-------------------|
| بارش | ۵۰۲/۵ | ۱۰۰ |
| تبخیر و تعرق | ۲۴۷/۵ | ۴۹/۲۵ |
| رواناب سطحی | ۷۴/۴۶ | ۱۴/۸۲ |
| جریان جانبی | ۴/۲۱ | ۰/۸۴ |
| آب زیرزمینی | ۱۵۰/۱۳ | ۲۹/۸۷ |
| تلفات آب | ۲۶/۲ | ۵/۲۱ |



شکل ۷- سهم رواناب سطحی، جریان جانبی و جریان آب زیرزمینی در تأمین جریان ماهانه رودخانه قره‌سو

ساتکلیف همبستگی حدود ۵۶ درصدی هیدروگرافها را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان چنین استنباط نمود که مدل فیزیکی SWAT با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در حوضه قره‌سو کارایی قابل قبولی دارد. همچنین، مقایسه ظاهری و آماری هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف شبیه‌سازی شده به وسیله مدل، حاکی از تطابق زیادی بین هیدروگرافهای مذکور از قبیل دبی پیک لحظه‌ای، حجم رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج وجود دارد. 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.

مشاهده می‌شود که مقدار آب ورودی به رودخانه (از منابع مختلف) در زمستان و بهار بیشترین مقدار را دارد و در اواخر تابستان به کمترین میزان می‌رسد. در همه ماه‌های سال، آب زیرزمینی به صورت جریان پایه بخش قابل ملاحظه‌ای از آب رودخانه را تأمین می‌کند. رواناب سطحی از اواسط پاییز تا اوایل بهار سهم زیادی در جریان رودخانه دارد. جریان جانبی در همه ماه‌های سال سهم بسیار کمی از جریان رودخانه را شامل می‌شود.

با اجرای مدل فیزیکی SWAT در حوضه قره‌سو کرمانشاه امکان شبیه‌سازی جریان ماهانه دوره مورد پژوهش در این حوضه فراهم شد. مقایسه آماری این مدل‌سازی، نتایج قابل قبولی را نشان داده است. به طوری که مقایسه آماری هیدروگرافهای شبیه‌سازی و مشاهداتی به کار رفته در این پژوهش با معیار نش-

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C., A. Johnson and M.Th. Van Genuchten. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4): 1340-1352.
2. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Srinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333: 413-430.
3. Akbari, H. 2010. Daily runoff simulation by SWAT model in Chehel Chi River Basin. MSc Thesis, Gorgan University, 120 pages (in Persian).
4. Alansi, A.W., M.S.M. Amin, G. Abdul Halim, H.Z.M. Shafri and W. Aimrun. 2009. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6: 7581-7609.
5. Amiri, M. 2006. Calibration and evaluation SWRRB hydrologic model for runoff simulation model in Kasilian Basin. MSc Thesis, Mazandaran University, 134 pages (in Persian).
6. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, part I: model development. *Journal of the American Water Resource Association*, 34(1): 73-89.
7. Bekiaris, I.G., I.N. Panagopoulos and N.A. Mimikou. 2005. Application of the SWAT model in the Ronnea catchment of Sweden. *Global NEST Journal*, 3(7): 252-257.
8. Faramarzi, M., K.C. Abbaspour, R. Schulin and H. Yang. 2009. Modeling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes* 23: 486-501.
9. Feyereisen, G.W., T.C. Strickland, D.D. Bosch and D.G. Sullivan. 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.
10. Hosseini, M., A.M. Ghafouri and B. Bayat. 2012. Water balance simulation in Karkheh River Basin. Final Report of Research Project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran, 83 pages (in Persian).
11. Hosseini, M. 2010. Effect of land-use changes on water balance and suspended sediment yield of Taleghan Catchment, Iran. PhD Thesis, University Putra Malaysia.
12. Khalighi, S.Sh.T., T.Z. Shoaie, A. Salajegheh, A. Kohandel And Q. Mortezaei. 2009. Precipitation and runoff simulation by semi distributed method in river basins with deficit date, case study: Latyan Basin. *Proceedings of the 5th National Seminar on Watershed Management Sciences and Engineering*, Gorgan, 180-188 (in Persian).
13. Nash, J.E., J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part 1, a discussion of principals. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.

14. Ndomba, P.M., and B.Z. Birhanu. 2008. Problems and prospects of SWAT model applications in NILOTIC Catchments: a review, Nile Basin. *Water Science and Engineering Journal*, 1: 41–52.
15. Neitch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2005. Soil and water assessment tool documentation, user's manual, Temple, Texas, USA, 494 pages.
16. Refahi, h., 2007. Water erosion and control. Tehran University, 672 pages (in Persian).
17. Ritchie, J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8: 1204-1213.
18. Sloan, P.G., I.D. Morre, G.B. Coltharp and J.D. Eigel. 1983. Modeling surface and subsurface storm flow on steeply-sloping forested watersheds. Water Resources Institute, Report 142, University of Kentucky, Lexington.
19. Williams, J.R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Trans. ASAE*, 12(1): 100-103.

Water balance simulation in Ghare-Sou Watershed, Kermanshah, using the SWAT model

Majid Hosseini^{*1}

¹ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran

Received: 02 Jun 2013

Accepted: 05 November 2013

Abstract

In this study, a simulation has been performed using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model with the data of the Ghare-sou watershed. The main objective of the study was testing the performance of SWAT and its feasibility to simulate the water balance in this watershed. Required data such as soil properties, land use and topographic maps were collected from the Natural Resource Office of Kermanshah province, and the weather data, including daily rainfall, temperature, relative humidity and discharge were collected from Meteorology Agency and regional water company of the province. Before calibration, a sensitivity analysis has been performed for all parameters, using OAT (One parameter At a Time) method to evaluate and demonstrate the influences of the model parameters on four major components of water budget including surface runoff, lateral flow, groundwater and evapotranspiration. Calibration and validation of the model were performed using the SUFI2 algorithm. River discharge data from 1982 to 2000 were used for the calibration and those of 2001 to 2005 for the validation. Different criteria were used to evaluate the performance of the simulation. During calibration, the simulated flow matched the observed values with a Nash-Sutcliffe coefficient of 0.56 and a coefficient of determination (R^2) of 0.6. These values were 0.6 and 0.65 during the validation. The calibrated SWAT model is suggested to be used in simulation of the monthly flow of the Ghare-Sou watershed, in order to assess the impacts of different management practices and environment changes on the flow.

Key words: OAT, Rainfall data, SUFI2 algorithm, Sensitivity analysis, Validation

* Corresponding author: mjhossaini@yahoo.com