

مقدمه

بررسی فرسایش، بار رسوب، رواناب و تبخیر - تعرق حوضه‌های آبخیز و رودخانه‌ها برای استفاده بهینه از منابع آب و خاک، از مهم‌ترین چالش‌های جدی مدیریت منابع آب کشور محسوب می‌شوند که در بهره‌برداری از تأسیسات آبی و سدها مؤثر هستند. در کشور ما تعداد زیادی حوضه آبخیز فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری به تعداد کافی و دوره آماری مناسب می‌باشند که این امر هرگونه برنامه‌ریزی عمرانی و مدیریتی را با مشکل مواجه می‌سازد. برای مقابله با این مسئله، پژوهشگران و محققان راه‌حل‌های مختلفی نظیر فرمول‌های تجربی و مدل‌های ریاضی عرضه کرده‌اند که به علت داشتن محدودیت‌هایی تاکنون هیچ‌کدام نتوانسته‌اند راه‌حل مطلوبی ارائه دهند.

در این راستا شبیه‌سازی کامپیوتری در چهار دهه اخیر به‌طور فزاینده‌ای توسعه داده شده و مورداستفاده قرار گرفته است که دلایل اصلی آن را می‌توان ظاهر شدن مدل‌ها و روش‌های جدید توسعه مؤسسات تحقیقاتی و افزایش تقاضا برای ابزار توسعه‌یافته در کنار افزایش فشار بر استفاده بهینه از منابع آب دانست. برای مدیریت حوضه آبریز و جلوگیری از بروز ناسازگاری در اقدامات طراحی شده در سطح حوضه به مدلی نیاز است که بتواند حجم وسیع داده‌ها از جمله بارش، توپوگرافی، مرزهای حوضه، خصوصیات خاک و لایه زیرسطحی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی، سامانه‌های انتقال آب، سازه‌های آبی و اقدامات مدیریتی موجود، داده‌های موجود کیفی آب و سطح آب زیرزمینی را در شبیه‌سازی به کاربرد [۱۲].

بنابراین استفاده از مدلی با جامعیت لازم در شبیه‌سازی حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل‌های هیدرولوژیکی که برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز مورداستفاده قرار می‌گیرند عموماً به دو گروه یکپارچه و توزیعی تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های توزیعی اغلب به دلیل قابلیت اتصال به سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) قادرند تمامی تغییرات مکانی را لحاظ کرده، اما اجرای آن‌ها مخصوصاً در حوضه‌های وسیع بسیار زمان‌بر خواهد بود. اولین مدل هیدرولوژیکی مدل حوضه استنفورد (Standford) می‌باشد که توسط سینگ به انجام رسیده است [۱۵]. در سال‌های اخیر مدل‌هایی با ماهیت نیمه توزیعی ارائه شده‌اند که در شبیه‌سازی حوضه‌های وسیع موفقیت‌آمیز بوده‌اند. یکی از این مدل‌های نیمه توزیعی که در نقاط مختلف جهان مورداستفاده قرار گرفته، مدل هیدرولوژیکی (Soil and Water Assessment Tools) SWAT است. SWAT اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط جف آرنولد در سرویس

شبیه‌سازی رواناب، رسوب و تبخیر-تعرق با استفاده از سناریوهای مدیریتی برای کاهش بار رسوب با استفاده از مدل SWAT

محمد سهیل رضازاده^۱، بهرام بختیاری^۲، کریم عباسپور^۳، محمد و مهدی احمدی^۴
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۹

چکیده

بررسی بار رسوب، رواناب و تبخیر - تعرق حوضه‌های آبخیز برای استفاده بهینه از منابع آب و خاک و مدیریت هرچه بهتر حوضه‌ها ضروری است. یکی از این مدل‌های که به بررسی رسوب، رواناب و تبخیر - تعرق می‌پردازد مدل هیدرولوژیکی SWAT می‌باشد. در این پژوهش، شبیه‌سازی رواناب، تبخیر - تعرق واقعی و بار رسوب حوضه سلطانی بافت با به‌کارگیری دو سناریو مدیریتی برای کاهش رسوب با استفاده از مدل SWAT برای دوره آماری ۳۳ ساله از ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۱ انجام گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با شاخص‌های آماری R2، NS و br2 ارزیابی شد که در مرحله واسنجی این شاخص‌ها برای رواناب به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۷ و ۰/۶۸، برای تبخیر - تعرق به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۸۱ و ۰/۶۹ و برای بار رسوب به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۷۳ و ۰/۶۶ به دست آمدند. با توجه به نتایج مدل از عملکرد مطلوبی در مرحله واسنجی نشان داده است. همچنین در مرحله اعتبارسنجی نیز این شاخص‌ها برای رواناب به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۷ و ۰/۵۹، برای تبخیر - تعرق ۰/۷۴، ۰/۷۲ و ۰/۶۲ و برای بار رسوب به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۶۹ و ۰/۵۶ محاسبه شدند که نشان‌دهنده نتایج مطلوبی است. استفاده از دو سناریوی تغییر کاربری و احداث فیلتر گیاهی در مرز بین خشکی و رودخانه به ترتیب باعث کاهش ۷ و ۳۸ درصدی بار رسوب گردید.

کلید واژه‌ها: Filter strips, SWAT, رواناب، مدل نیمه توزیعی

- ۱- نویسنده مسئول و دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، پست الکترونیک: soheilrzzdh@hotmail.com.
- ۲- استادیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- ۳- محقق و پژوهشگر موسسه ایگ سوئیس
- ۴- استادیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان

استان کرمان قرار دارد که از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده ۵۵ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی و ۲۹ درجه تا ۲۹ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. وسعت این محدود ۹۸۸ کیلومتر مربع است. در شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد استفاده آورده شده است.

معرفی مدل

SWAT مدلی بزرگ‌مقیاس می‌باشد. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی- کشاورزی در سطح حوضه‌های با خاک و کاربری اراضی مختلف در درازمدت طراحی شده است که بر اساس بیلان آبی استوار است. مزایای این مدل این است که حوضه‌هایی که فاقد داده‌های برداشت شده می‌باشند نیز قابل شبیه‌سازی هستند. همچنین تأثیر نسبی داده‌های ورودی (تغییر در روش‌های مدیریتی، آب‌وهوا، پوشش گیاهی) بر روی کیفیت آب و دیگر متغیرهای مورد نظر قابل کمی کردن هستند. مدل SWAT از پارامترهای ورودی قابل دسترس استفاده می‌کند و از نظر محاسباتی بسیار کارآمد است و شبیه‌سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده را با راهکارهای مختلف مدیریتی بدون صرف زمان زیادی قابل اجرا می‌سازد. برای شبیه‌سازی، ابتدا یک حوضه باید به تعدادی زیر حوضه تقسیم شود. استفاده از زیر حوضه‌ها در شبیه‌سازی، به خصوص زمانی که مناطق مختلف حوضه دارای خاک یا کاربری‌های گوناگون هستند که ناهمگنی و تفاوت آن‌ها می‌تواند در هیدرولوژی حوضه تأثیر داشته باشد، بسیار مفید است. تفکیک حوضه به زیر حوضه‌ها، مدل را قادر می‌سازد تا تفاوت در مقدار و شدت تبخیر- تعرق را برای گیاهان و خاک‌های مختلف منعکس کند. رواناب در هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی (Hydrologic Response Unite) به طور مستقل محاسبه و روند یابی می‌شود تا در نهایت مقدار کل رواناب حوضه محاسبه گردد. این روش، دقت محاسبات را افزایش داده و توصیف فیزیکی بسیار بهتری از بیلان آبی حوضه را ارائه می‌کند.

اجرای مدل

اطلاعات و داده‌های اساسی مدل شامل نقشه مدل رقمی ارتفاعی (DEM)، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک، داده‌های هواشناسی از قبیل بارندگی، حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه، میزان رطوبت نسبی هوا، سرعت باد، میزان تشعشع نور خورشید در مقیاس روزانه و دبی رودخانه در ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه جهت انجام مراحل واسنجی می‌باشد. در این تحقیق از نقشه مدل رقمی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر استفاده شده است. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ETM+ ماهواره Landsat استفاده شد برای تاریخ ۱۳۹۰/۲/۱۸ و نقشه کاربری اراضی منطقه تهیه شد. تصحیح هندسی از اصول اولیه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد، برای انجام این تصحیح از معادله آفاین (Affin) که دارای دقت بالایی است، استفاده شد. سطح زمین و ذرات معلق در هوا باعث کاهش درجه وضوح تصاویر در باندهای مرئی ماوراءبنفش

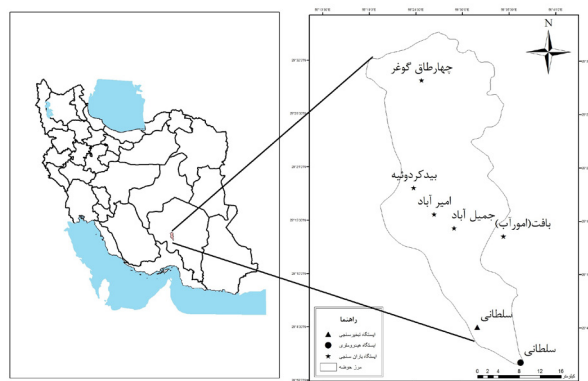
تحقیقات کشاورزی آمریکا طراحی و پایه‌گذاری شد. در تحقیقات زیادی با اهداف مختلف از مدل SWAT استفاده شده است که به‌عنوان نمونه به چند مورد اشاره می‌شود. [۱، ۳، ۴، ۷ و ۸] در نقاط مختلف دنیا و در شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی متفاوت به بررسی کارایی مدل SWAT پرداختند که همه آن‌ها به توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی رواناب، رسوب و تبخیر- تعرق صحنه گذاشتند.

وانگ و همکاران [۱۶] با مدل‌سازی اثر گزینه‌های مختلف کاربری اراضی در حوضه زامو (Zamu) در چین به این نتیجه رسیدند که کاربری‌های اراضی مختلف دارای اثرات مختلفی بر مقدار رواناب و آب زیرزمینی حوضه می‌باشند و تبدیل اراضی مرتعی به اراضی جنگلی در حوضه منجر به افزایش میزان رواناب سالیانه و کاهش آب زیرزمینی در اثر کاهش نفوذپذیری خاک و کاهش تعرق در حوضه می‌گردد.

لیرونگ [۹] به بررسی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر میزان رواناب و تبخیر و تعرق با مدل SWAT در حوضه بیانگ (Beijiang) پرداخت که با قرار دادن ۱۵ سناریو در مدل واسنجی شده تحت کاربری اراضی ثابت به این نتیجه دست یافت که تغییرات آب‌وهوا بر میزان رواناب حوضه مؤثر است. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش دما و تغییر ندادن بارش در یک سناریو، میزان تبخیر و تعرق زیاد و رواناب کم می‌شود و همچنین در سناریوی دیگر با افزایش بارش و تغییر ندادن دما، میزان تبخیر و تعرق و رواناب افزایش پیدا می‌کند. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی حوضه سلطانی واقع در شهرستان بافت برای بررسی میزان رواناب، رسوب و تبخیر- تعرق با به‌کارگیری دو سناریوی مدیریتی برای کاهش بار رسوب که منجر به مدیریت بهتر حوضه و استفاده بهینه از منابع آب سطحی می‌شود، است. در نهایت مدل برای حوضه مورد نظر واسنجی شد و سپس عملکرد آن با الگوریتم Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) مورد ارزیابی قرار گرفت.

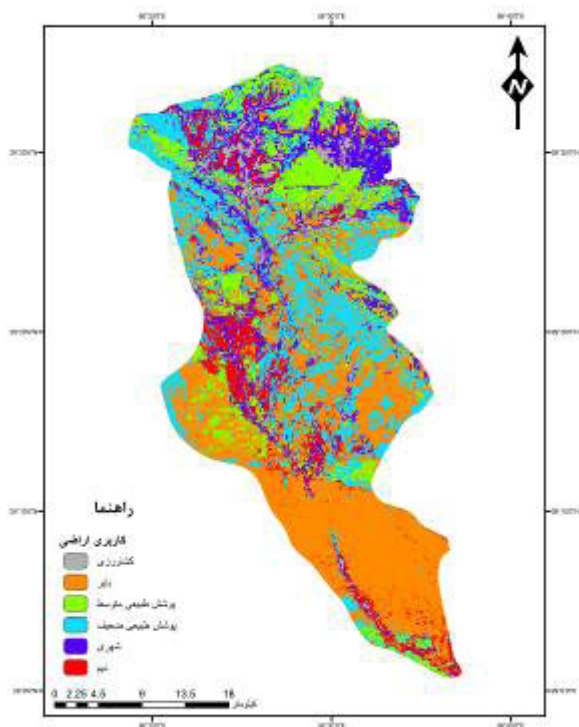
مواد و روش‌ها

حوضه سلطانی در محدوده جغرافیای شهرستان بافت واقع در



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد استفاده

Figure 1. Location of the study area & Station position



شکل ۲- کاربری اراضی حاصل از تصاویر سنجنده ETM+
Figure 2. Land use of images of ETM+

به طوری که نتایج خروجی را به داده‌های مشاهداتی نزدیک کند، این موهوم فقط از طریق تغییر مکرر پارامترها به دست می‌آید. از آنجاکه این عمل بسیار زمان‌بر است برای انجام این کار استفاده از یک برنامه واسط ضروری است که بدین منظور برنامه SWAT_CUP تدارک دیده شده است [۲]. در این پژوهش از روش SUFI_2 در برنامه SWAT_CUP استفاده شد. روش SUFI_2، تمام عدم قطعیت‌ها شامل عدم قطعیت ورودی‌ها، مدل مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده را در مدل‌سازی در نظر می‌گیرد. بعد از مرحله واسنجی نوبت به اعتبارسنجی مدل می‌رسد. در اعتبارسنجی داده‌های شبیه‌سازی شده بعد از واسنجی، در بازه زمانی متفاوتی با داده‌های مشاهداتی مقایسه می‌شوند. اعتبارسنجی در واقع قابلیت اطمینان و اعتمادپذیری به مدل را مشخص می‌کند.

نتایج

شبیه‌سازی برای دوره آماری ۳۳ ساله از ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۱ انجام شد که دو سال ابتدا برای متعادل‌سازی^۱ مدل استفاده شد. برای واسنجی مدل در بخش رواناب و تبخیر- تعرق ۲۲ سال از داده‌ها و برای اعتبارسنجی ۹ سال از داده‌ها در نظر گرفته شد. همچنین به علت کمتر بودن طول دوره آماری بار رسوب از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۶ برای واسنجی و از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ برای اعتبارسنجی

می‌شوند [۱۰]. این ذرات معلق بر روی طول‌موج‌های کوتاه باندهای تصاویر ماهواره‌ای تأثیر می‌گذارند که برای برطرف کردن این تأثیر از تصحیح رادیومتری استفاده شد. سپس با نرم‌افزار Env4.8 از روش حداکثر مشابهت (Maximum likelihood) نقشه کاربری اراضی منطقه موردنظر استخراج شد و برای صحت‌سنجی کاربری اراضی از منطقه بازدید میدانی به عمل آمد و ۲۵ نقطه به وسیله GPS برای صحت‌سنجی برداشت شد. این منطقه از لحاظ کاربری به ۶ کاربری مختلف تقسیم شد (کشاورزی ۴۹، زمین بایر ۴۲۰، زمین با پوشش طبیعی متوسط ۱۶۴، زمین با پوشش طبیعی ضعیف ۲۴۰، زراعی ۹۰ و شهری ۲۵ کیلومتر مربع) که در شکل ۲ کاربری اراضی حوضه نشان داده شده است. در این پژوهش از نقشه جهانی خاک فائو استفاده شد، همچنین برای اطلاعات هواشناسی و هیدرومتری از ایستگاه‌های موجود در شکل ۱ استفاده شد.

پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه و تهیه فایل‌های ورودی، مراحل اجرای مدل به ترتیبی که تشریح می‌شود انجام شد. در مرحله اول با وارد کردن نقشه مدل رقمی ارتفاعی و تعیین حداقل مساحت دلخواه بر اساس حداقل آستانه، حوضه به تعدادی زیر حوضه تقسیم می‌شود که رابط ArcSWAT برای هر زیر حوضه مشخصات فیزیکی از قبیل مساحت، طول آبراهه اصلی، شیب و غیره را تعیین می‌کند. بر این اساس، منطقه مورد مطالعه به ۹ زیر حوضه تقسیم شد. نقشه کاربری اراضی، خاک و اطلاعات شیب که به پنج طبقه شیب که شامل ۰ تا ۵ درصد، ۵ تا ۱۰ درصد، ۱۰ تا ۲۰ درصد، ۲۰ تا ۴۰ درصد و بیش از ۴۰ درصد در حوضه تعریف شد، به مدل اضافه شدند. سپس با روی هم اندازی آن‌ها واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تولید شد. همان‌طور که اشاره شد مدل SWAT برای اجرا به داده‌های هواشناسی نیاز دارد که برای

این امر، مدل دارای مولد داده‌های اقلیمی (Weather Generator) می‌باشد [۱۴]؛ که از این مولد داده‌های اقلیمی، جهت تولید داده‌های روزانه و بازسازی آمار مفقود شده استفاده می‌شود. ایستگاهی که در این قسمت به مدل معرفی می‌گردد باید دارای آمار بلندمدت از تمامی پارامترهای هواشناسی از قبیل بارندگی، حداقل و حداکثر درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی باشد که در کشور ما محدود به ایستگاه‌های سینوپتیک می‌باشند. ایستگاه مورد استفاده در این پژوهش ایستگاه سینوپتیک بافت بود. لازم به یادآوری است که این ایستگاه تنها زمانی در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مدل در اطلاعات ایستگاه‌های بارندگی و درجه حرارت با داده‌های مفقود شده روبرو گردد. در این پژوهش برای محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل روش پنمن-مانتیت، روند یابی جریان از روش ذخیره متغیر و رسوب از معادله جهانی اصلاح شده فرسایش خاک (MUSLE) استفاده شد در شکل ۳ دیاگرام مربوط به مراحل انجام کار مشاهده می‌شود.

آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی

عمل واسنجی شامل تصحیح پارامترهای حساس در مدل است

1- Warm Up

هیدرولوژیک منطقه می‌باشد.

سناریو مدیریتی

همان‌طور که گفته شد در سال‌های اخیر در منطقه عملیات آبخیزداری مانند احداث سدهای خاکی و بندهای متعدد انجام گرفته است. بنابراین برای جلوگیری از انتقال و تجمع رسوب و همچنین کاهش فرسایش و جل‌گیری از پر شدن مخزن این سد و بندها باید تمهیداتی پیش‌بینی شود. برای حفاظت خاک معمولاً از روش‌هایی استفاده می‌شود که تحت عنوان بهترین راهکارهای مدیریتی (BMP) شناخته می‌شوند. یکی از راهکارهای مدیریتی کاهش رسوب که در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته و نتایج مطلوبی نیز داشته است استفاده از نوار کشت گیاهی (Filter Strips) در مجاور آبراهه‌ها می‌باشد. این فیلتر نواری، محدوده مابین مرز آب رودخانه یا دریاچه با خشکی (کاربری اراضی‌های مختلف: مرتع، جنگل و ...) است که با کشت گیاه ایجاد می‌شود. کاربرد این نوار زمانی نمایان می‌شود که رواناب به سمت رودخانه در حرکت باشد در این هنگام پوشش گیاهی رسوب، مواد آلی و مواد مغذی را فیلتر می‌کند. آب خروجی از فیلتر سرعت کمتری دارد در نتیجه مواد معلق بیشتری ته‌نشین می‌شوند. همچنین رسوب به دام افتاده در پوشش گیاهی مقداری از مواد غذایی رواناب را جذب کرده و امکان جذب را برای گیاهان فراهم می‌کند. با توجه به پژوهش‌های پیشین بهترین عرض این فیلتر ۲۰ متر می‌باشد [۱۳]. لذا در این پژوهش نیز از کشت نواری به عرض ۲۰ متر استفاده شد. محل این نوار نیز در کنار آبراهه‌های اصلی حوزه که به خروجی حوضه منتهی می‌شوند در نظر گرفته شد. نوع گیاه کشت‌شده در این فیلتر از گیاهان زراعی غالب منطقه در نظر گرفته شد به این صورت که در فصل گرم ذرت و در فصل سرد گندم انتخاب شد.

یکی دیگر از راهکارهای مدیریتی برای کاهش رواناب و رسوب تغییر کاربری اراضی می‌باشد. کاربری اراضی و پوشش گیاهی با به ضریب رواناب نقش به‌سزای در تولید رواناب و رسوب ایجاد می‌کند. در این پژوهش با توجه به وجود زمین‌های بایر زیادی که در حوضه وجود داشت، در برخی زیر حوضه‌ها این کاربری به مرتع با پوشش گیاهی متوسط و کشاورزی تغییر یافت.

بنابراین احداث فیلتر گیاهی به‌عنوان سناریو اول (BPM1) و تغییر کاربری اراضی به‌عنوان سناریو دوم (BPM2) مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۶ زیر حوضه‌های که اقدامات مدیریتی در آن‌ها اعمال شده است قابل مشاهده می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، میزان بار رسوب در هر در سناریو کاهش پیدا کرده است که در سناریو اول کاهش معادل ۳۸ درصد و در سناریو دوم کاهش معادل ۷ درصد را شاهد هستیم. همین‌طور در شکل ۸ نیز به مقایسه رواناب در حالت نرمال و تحت سناریو دوم پرداخته شده است که در سناریو دوم رواناب کاهش ۳ درصدی را داشته است. لازم به ذکر است کاهش رواناب تحت سناریو اول بسیار ناچیز بوده و به همین علت به آن اشاره‌ای نشده

مدل استفاده شد. برای تحلیل نتایج واسنجی از شاخص‌های br^2 (ضریب تعیین R^2 ضریب در ضریب خط رگرسیون)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) استفاده شد. تاکنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب برای پارامترهای ضریب تعیین و نش-ساتکلیف ارائه نشده است؛ اما موریاسی پیشنهاد می‌کند که مقادیر NS در مطالعات هیدرولوژیک و همچنین فرآیندهای مربوط به انتقال آلاینده‌ها در مقیاس ماهانه باید از ۰/۵ بزرگ‌تر باشد تا بتوان نتایج مدل را قابل قبول قلمداد نمود که معمولاً همین معیار برای مقدار پارامتر R^2 نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱].

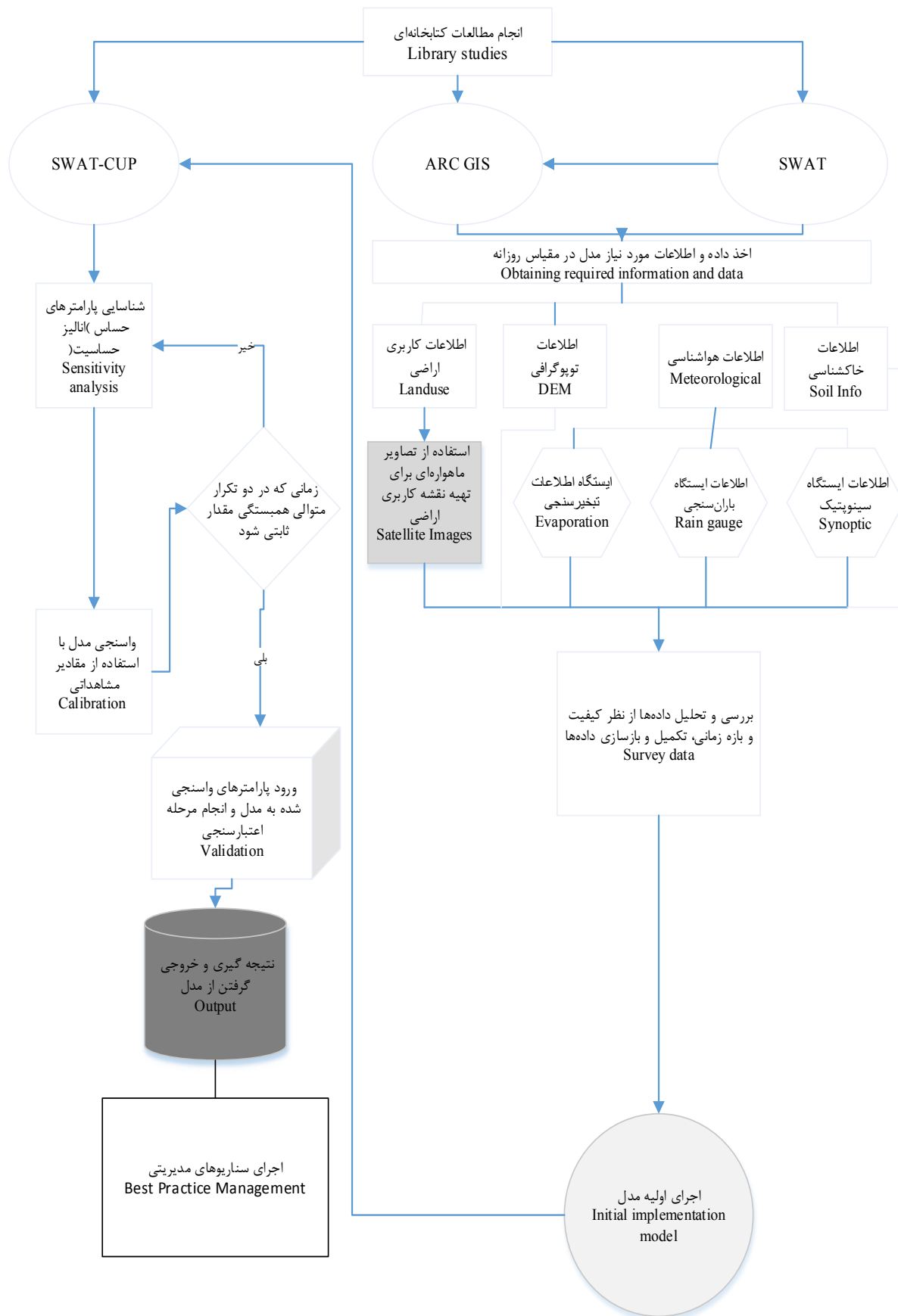
در مرحله آنالیز حساسیت با توجه به مطالعات گذشته که بر روی مدل SWAT انجام شده بود، ۴۰ پارامتر که در رواناب، رسوب و تبخیر-تعرق تأثیر بیشتری داشتند، انتخاب شدند. پس از آنالیز حساسیت، ۲۵ پارامتر که حساسیت بیش‌تری نشان دادند که در جدول شماره ۳ آورده شده‌اند. مقادیر رواناب و تبخیر-تعرق واقعی شبیه‌سازی‌شده در طول دوره آماری ۱۳۸۲-۱۳۶۰ و همچنین مقادیر رسوب در طول دوره ۱۳۸۶-۱۳۶۶ مورد واسنجی قرار گرفت.

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که مدل در شبیه‌سازی روند پارامترهای هیدرولوژیکی (رواناب، تبخیر-تعرق واقعی و رسوب) به‌خوبی عمل کرده، ولی در پیش‌بینی مقادیر پیک عملکرد مناسبی به‌خصوص در شبیه‌سازی رواناب و رسوب نداشته است. با توجه به کوهستانی بودن شمال حوضه و بارش برف در این مناطق و اینکه مدل در شبیه‌سازی ذوب برف عملکرد ضعیفی دارد، می‌توان این ضعف را یکی از عوامل عدم موفقیت در شبیه‌سازی مقادیر واقعی جریان‌ات حداکثر دانست [۵].

ولی به‌طور کلی با توجه به نتایج شاخص‌های آماری NS ، R^2 و br^2 می‌توان عملکرد مدل را موفقیت‌آمیز دانست.

بعد از واسنجی، اعتبارسنجی انجام گرفت. برای اعتبارسنجی بازه زمانی (۱۳۸۲-۱۳۹۱) برای رواناب و تبخیر-تعرق واقعی و بازه (۱۳۸۶-۱۳۹۱) برای رسوب در نظر گرفته شد.

در مرحله اعتبارسنجی مدل همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، دقت مدل نسبت به مرحله واسنجی کمتر شده است. در این شکل در بازه زمانی واسنجی مشاهده می‌شود که مدل در این مرحله رواناب و رسوب را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی کرده است، یکی از دلایل این امر را می‌توان انجام عملیات آبخیزداری مانند احداث سدهای خاکی و بندهای متعدد در بازه زمانی اعتبارسنجی این حوضه دانست که موجب کاهش رواناب خروجی از حوضه شده است. یکی دیگر از عوامل کاهش دقت مدل در اعتبارسنجی، ورود به دوره خشک‌سالی و تغییر اقلیم است. به‌طور کلی، مدل‌های شبیه‌سازی در برآورد مقادیر کم جریان عملکرد ضعیفی از خود نشان داده‌اند. این مشکل را می‌توان در ساده‌سازی‌های این دسته از مدل‌ها در شبیه‌سازی تعامل پیچیده بین رواناب و جریان زیرسطحی در مواقع بارندگی با ارتفاع کم دانست [۶]. باین حال نتایج شاخص‌های آماری حاکی از عملکرد خوب مدل و همخوانی مدل با شرایط

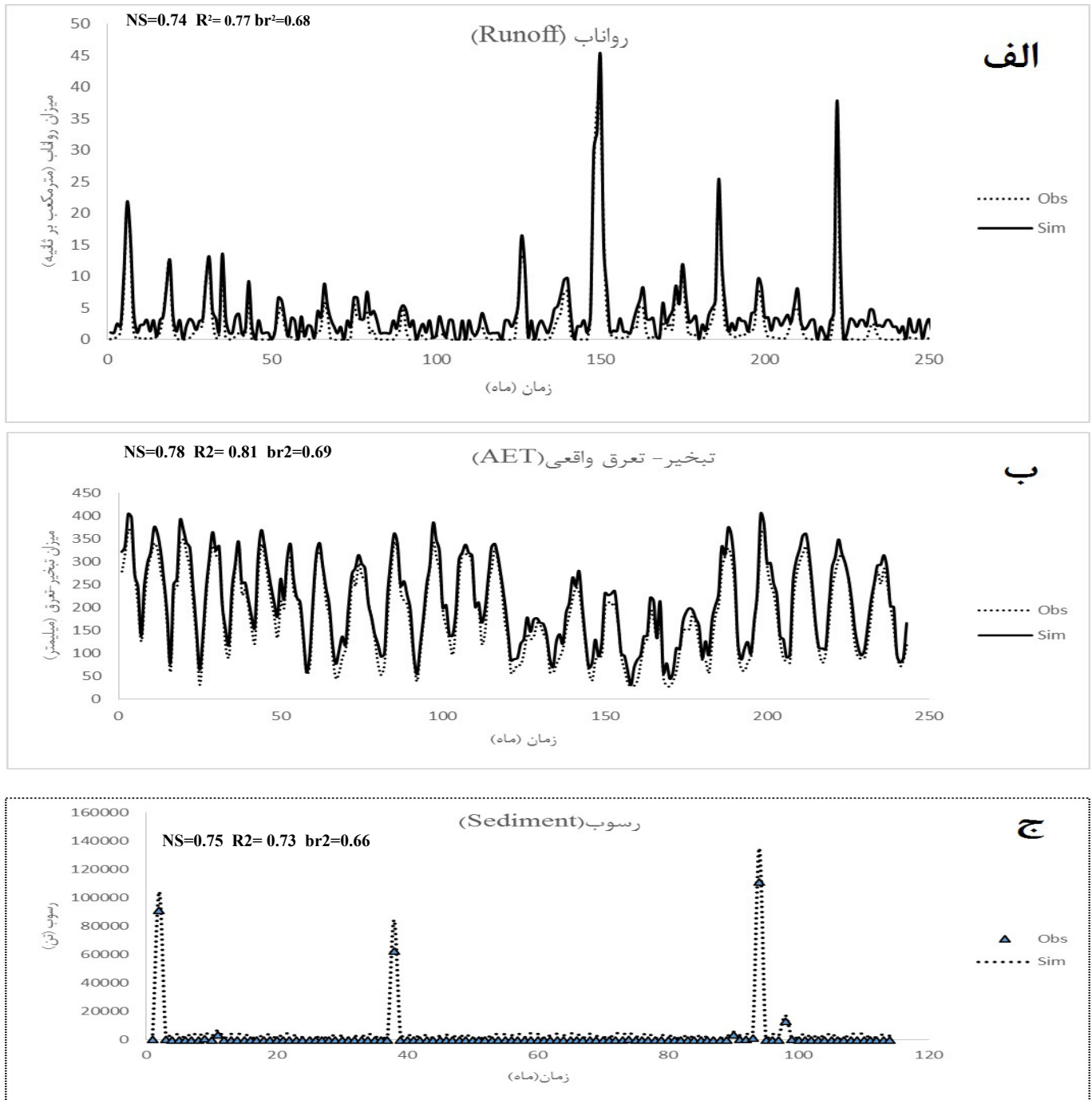


شکل ۳- دیاگرام انجام مراحل کار
Figure 3. Diagram of the Process of Work

جدول شماره ۳- پارامترهای حساس و مقادیر بهینه آنها

Table 3. Sensitive parameters and their optimal values

ردیف RAW	نام پارامتر Parameter	توضیح پارامتر Parameter Description	مقدار واسنجی شده The calibrated Value
1	a_ESCO.hru	ضریب تصحیح تبخیر از خاک The correction factor evaporation from soil	0.646
2	a_EPCO.hru	ضریب جبران جذب گیاه Plant uptake compensation factor	0.381
3	v_SURLAG.bsn	ضریب تأخیر رواناب سطحی Delay surface runoff coefficient	3.424
4	V_SLSOIL.hru	شیب طولی برای آبراهه فرعی (متر) Longitudinal slope for drainage sub(m)	41.775
5	r_CN2.mgt	شماره منحنی Curve number	-0.1804
6	a_GWQMN.gw	آستانه عمق آب در جریان زیرسطحی (میلی متر) Threshold depth of water in shallow aquifer (mm)	74.61
7	v_REVAPMN.gw	آستانه عمق آب در جریان زیرسطحی برای Revap (میلی متر) Threshold depth of water in shallow aquifer for Revap ¹ (mm)	0.8898
8	a_GW_REVAP.gw	ضریب «Revap» برای آب زیرزمینی Factor Groundwater «Revap»	0.1335
9	v_ALPHA_BF.gw	ضریب عکس العمل جریان آب زیرزمینی Ks groundwater flow	0.0091
10	r_SOL_BD(..).sol	چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتیمتر مکعب) Bulk Density(g/Cm ³)	0.089
11	r_SOL_K(..).sol	هدایت هیدرولیکی خاک اشباع (میلی متر بر ساعت) hydraulic conductivity(mm/hr) Saturated	5.215
12	v_CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی آبراهه اصلی (میلی متر بر ساعت) Hydraulic conductivity of the main stream(mm/hr)	43.15
13	v_CH_N2.rte	ضریب مانینگ آبراهه اصلی The main channel Manning coefficient	0.121
14	v_SMFMX.bsn	عامل ذوب برف در ۲۱ جولای (میلی متر بر درجه در روز) Snow melting agent on July 21(mm/c-day)	5.061
15	v_SMFMN.bsn	عامل ذوب برف در ۲۱ دسامبر (میلی متر بر درجه در روز) Snow melting agent on December 21(mm/c-day)	2.255
16	v_TIMP.bsn	ضریب تأخیر دمای توده برف Snow mass temperature coefficient of delay	0.8115
17	r_OV_N.hru	ضریب مانینگ برای جریان سطحی Manning roughness coefficient for surface flow	1.713
18	r_SLSUBBSN.hru	میانگین شیب طولی (متر) Average slope length (m)	0.208
19	r_HRU_SLP.hru	میانگین شیب (متر بر متر) Average slope steepness (m/m)	-0.256
20	r_SOL_AWC(..).sol	ظرفیت آب قابل در دسترس (میلی متر آب بر میلی متر خاک) Available water capacity(mm H ₂ O/mm soil)	0.218
21	v_PRF.bsn	ضریب تصحیح میزان پیک رسوب در روندیابی کانال اصلی adjustment factor for sediment routing in main channel Peak rate	1.4558
22	v_SPCON.bsn	پارامتر خطی برای محاسبه حداکثر مقدار رسوب Linear parameter for calculating the max amount of sediment	0.005225
23	v_CH_COV2.rte	ضریب پوشش کانال factor Channel cover	0.2193
24	r_SOL_Z(..).sol	عمق از سطح خاک تا لایه زیرین of the soil surface to the substrate The depth	0.3252
25	r_USLE_C{..}.crop.dat	ضریب حداقل مقدار C در معادله USLE C factor USLE Min value of	1.218



شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی برای برآورد رواناب، تبخیر-تعرق واقعی و رسوب بعد از واسنجی

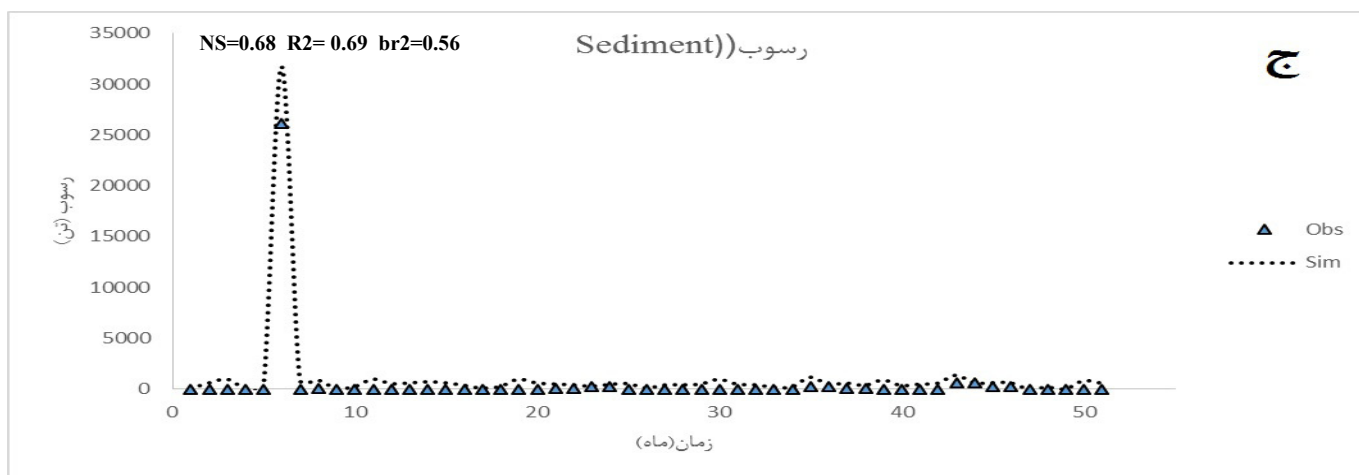
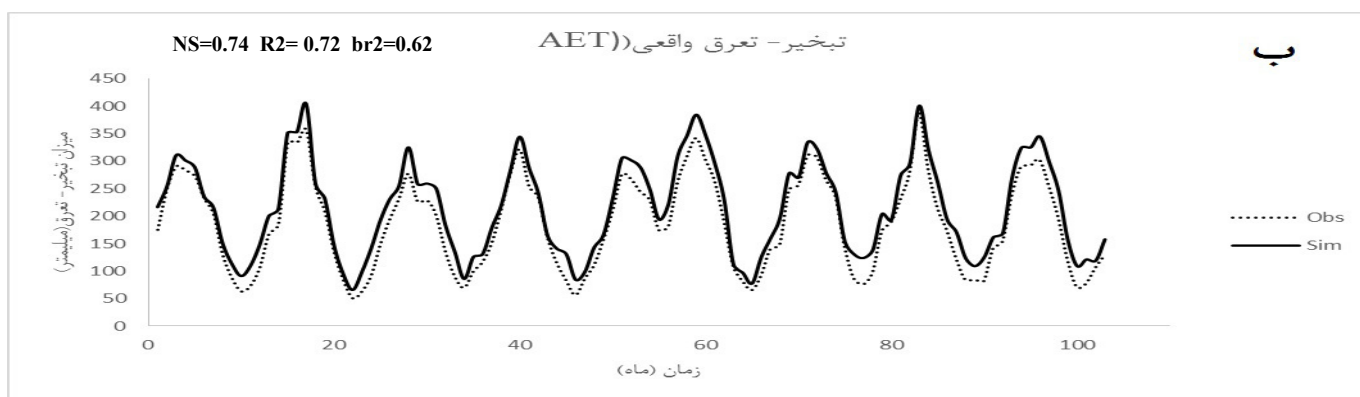
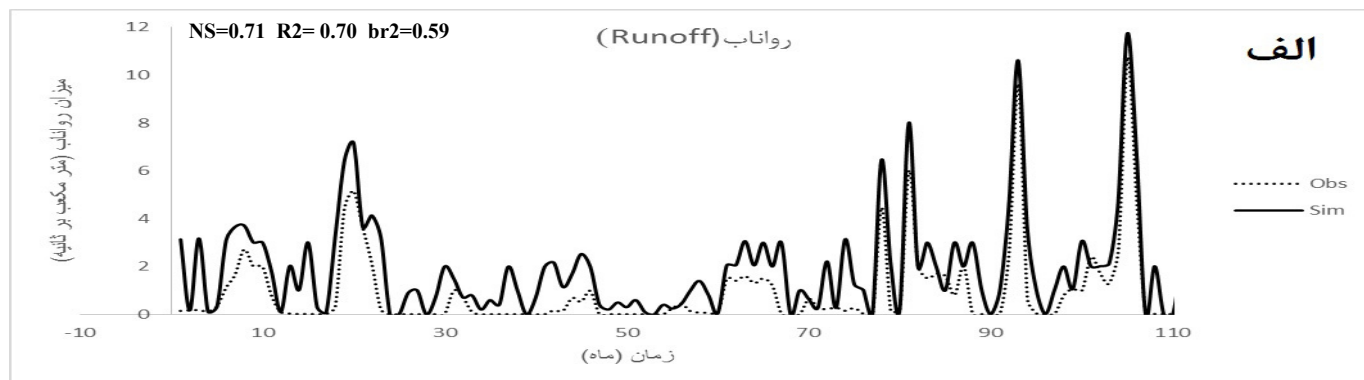
Figure 4. The simulation results for the runoff, AET & Sediment after calibration

امر اشاره کرد که استفاده از فیلتر گیاهی (نوار گیاهی) در مرز بین خشکی و آبراهه در کاهش بار رسوب مؤثر می‌باشد و به جلوگیری از پر شدن مخازن سدها و بندها کمک می‌کند. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به کم بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و نبود ایستگاه سینوئیتیک در منطقه نام برد. همچنین نبود نقشه خاک با دقت بالا از منطقه در نتایج شبیه‌سازی بی‌تأثیر نبوده است. یکی دیگر از محدودیت‌ها می‌توان به استفاده مدل از روش SCS برای برآورد

است. نتایج به‌دست‌آمده از مدل با نتایج سایر محققین همخوانی دارد [۱۳].

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل نتایج شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که مدل SWAT در شبیه‌سازی مقادیر رواناب، رسوب و تبخیر-تعرق واقعی عملکرد خوبی داشته است. با توجه به نتایج حاصله می‌توان به این

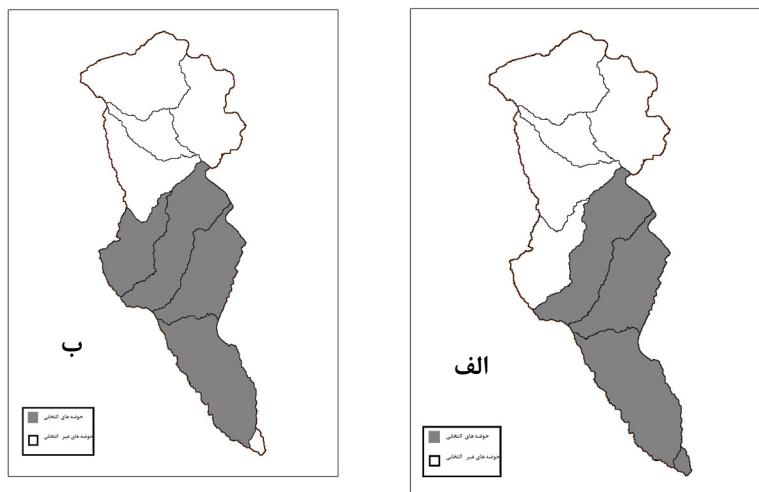


شکل ۵- نتایج شبیه‌سازی در کل دوره آماری (دوره واسنجی و اعتبارسنجی)

Figure 5. The simulation results in the entire period (the period of calibration and validation)

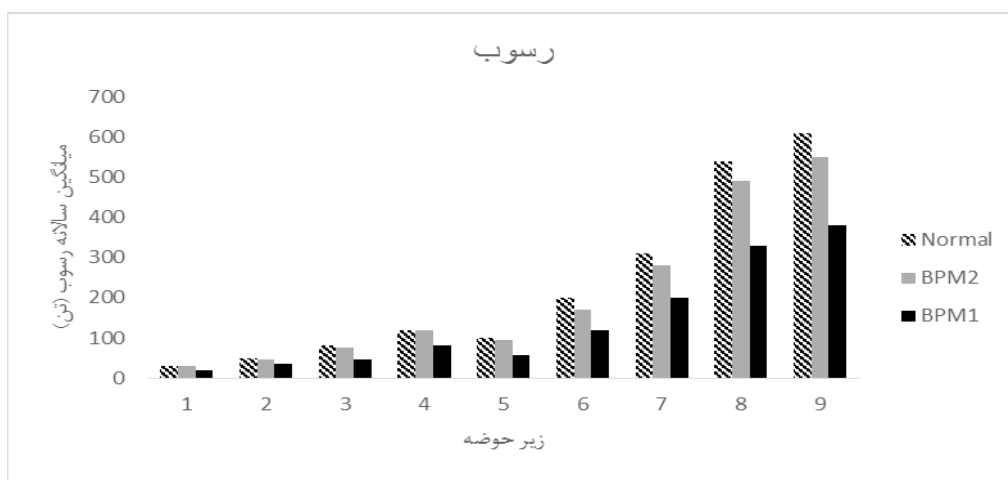
کرد و نتایج حاصل را برای مدیریت بهتر حوضه آبخیز بکار بست. در مجموع مدل نتایج مطلوبی را با توجه به محدودیت‌های ذکر شده ارائه کرد.

رواناب اشاره کرد، زیرا این روش در شبیه‌سازی ذوب برف ضعیف عمل می‌کند. برای بهبود نتایج در تحقیقات آینده می‌توان از نقشه خاک با دقت بالاتر و تعداد ایستگاه‌های بیشتر برای آمار هواشناسی استفاده کرد. همچنین می‌توان سناریوهای مختلف مدیریتی دیگر مانند طرح‌های آبخیزداری و مدیریت زراعی را برای مدل تعریف

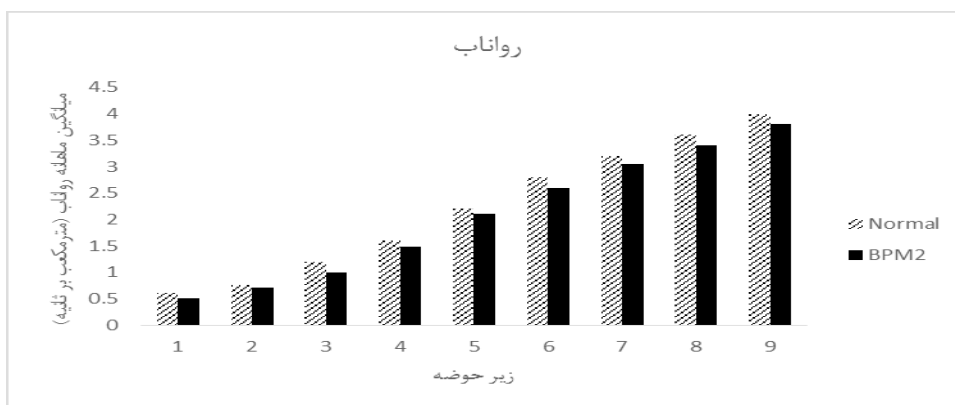


شکل ۶- الف: زیر حوضه های که فیلتر گیاهی در آنها استفاده شده است
 ب: زیر حوضه های که تغییر کاربری اراضی در آنها اعمال شده است

Figure 6. A; subbasin with filter strips
 B; subbasin with land use changes



شکل ۷- مقایسه مقدار میانگین رسوب سالانه در حالت نرمال و سناریوهای BMP1 و BMP2
 Figure 7. Annual average sediment yield in normal, BMP1 and BMP2



شکل ۸- مقایسه مقدار میانگین ماهانه رواناب در حالت نرمال و سناریو BMP2
 Figure 8. Monthly average runoff in normal and BMP2

10. Lu, D. and Weng, Q. 2007. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*. 28(5):823–870.
11. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 50 (3), 885-900.
12. Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. 2005. Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation. Blackland Research Center. Texas Agricultural Experiment Station. 494 p. from www.brc.tamus.edu
13. P.B Parajuli, K.R.Mankin, P.L Barnes., Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT., *Agriculture water management*, 2008
14. Sharpley, A. N. and Williams, J. R. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.
15. Singh, V.P. 1995. "Watershed Modeling" In: *Computer Models of Watershed Hydrology*. Singh, V.P (ed.). Chapter 1, Water Resources Publications. Colorado, 1-22.
16. Wang, S., Shaozhong, K., Lu, Z. and Fusheng, L. 2008. Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. *J. Hydro. Proc.*, 22: 2502-2510.
1. Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and 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.
2. Abbaspour, K. C. 2011. User Manual for SWAT-CUP4. SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Eawag, Duebendorf. Switzerland, from <http://www.eawag.ch>.
3. Beven, K.J., 2001. Rainfall-runoff modeling. the primer. Wiley. Chichester. UK. 361p.
4. Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R. and Yang, H. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*. 23, 486–501.
5. 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). *Journal of Hydrology*. 262 (1-4), 209-223.
6. Hantush, M. M. and Kalin, L. 2005. Uncertainty and sensitivity analysis of runoff and sediment yield in a small agricultural watershed with KINEROS2. *Hydrological Sciences Journal*. 50 (6), 1151-1172.
7. Jayakrishnan, R., Srinivasan, R., Santhi, C. and Arnold, J. G. 2005. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological Processes*. 19, 749–762.
8. Li, K.Y., Coe, M.T., Ramankutty, N. and De Jong, R. 2007. Modeling the hydrological impact of land-change in West Africa, *J. of Hydro.*, 337: 258-268.
9. Lirong, S. and Jianyun, Z. 2012. Hydrological Response to Climate Change in Beijiang River Basin Based on the SWAT Model. *Procedia Engineering* 28 (2012) 241 – 245

Abstract

Simulation of Runoff, Sediment and Evapotranspiration through Management Scenarios to Reduce Sediment Load Using SWAT Model

M. S. Rezazdeh¹, B. Bakhtiari², K. Abbaspour³ and M. M. Ahmadi⁴

Received: 2015/06/27 Accepted : 2017/09/10

Investigation of sediment load, runoff, and evapotranspiration in watersheds is necessary for efficient use of soil, water resources, and design of appropriate management options. In this study, we used a SWAT model in Soltani basin at Baft to simulate runoff, actual evapotranspiration, and sediment load for two management scenarios during 1979 to 2012. The simulation results were evaluated using NS, R2 and BR2. For the calibration step, we obtained (0.74, 0.77, and 0.68) for runoff; (0.78, 0.81, and 0.69) for actual evapotranspiration; and (0.75, 0.73, and 0.66) for sediment load, respectively. The results indicated that, all three parameters were simulated quite well in calibration step. In validation step, were obtained (0.71, 0.7, and 0.59) for runoff; (0.74, 0.72, and 0.62) for actual evapotranspiration; and (0.68, 0.69, and 0.56) for sediment load, respectively. This again indicated a good performance of SWAT model. Two scenarios of land-use change and filter strips in the river banks, led to 7% and 38% reduction in sediment load, respectively.

Keywords: *Filter strips, Land use change, Runoff, Semi distributed model*

1- M.Sc Student, Water engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman. Corresponding Author Email: soheilrzzdh@hotmail.com

2- Assistant professor, Water engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman.

3- Researcher of EAWAG, Switzerland

4- Assistant professor, Water engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman.