نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز
جلد ۷، شماره ۴، ۱۳۹۴، صفحات ۵۵۲-۵۶۲

Journal of Watershed Engineering and Management
Volume 7, Issue 4, 2016, Pages 552-562

شبیه‌سازی ماهانه دبی جریان و رسوب حوزه آبخیز نازلوچای با مدل SWAT و اولویت‌بندی نواحی تولید رسوب

مهدی عرفانیان[*1]، منصور بیاضی[2]، هیراد عبقری[3]، اباذر اسمعلی عوری[4]

[1] استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، [2] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، [3] دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه و [4] دانشیار، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۱/۱۰

چکیده

فرسایش خاک از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی اهمیت دارد و برای کنترل یا کاهش آن نیاز به تصمیم‌گیری و اجرای صحیح اقدامات آبخیزداری می‌باشد. در سال‌های اخیر، استفاده از مدل SWAT به‌عنوان ابزار متداول برای شبیه‌سازی دبی جریان، تولید رسوب و ارزیابی عملیات آبخیزداری در کاهش تولید رسوب و رواناب مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی ماهانه دبی جریان و رسوب با استفاده از مدل SWAT و شناسایی زیرحوزه‌های بحرانی تولید رسوب ویژه در حوزه آبخیز نازلوچای واقع در غرب دریاچه ارومیه انجام شد. مرحله واسنجی مدل برای دوره آماری ۲۰۰۷-۱۹۹۷ و مرحله اعتبارسنجی آن برای دوره ۱۹۹۶-۱۹۹۳ انجام شد. برای ارزیابی مدل، معیارهای آماری ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا، ضریب کارایی ناش-ساتکلیف و میانگین خطا محاسبه شد. واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل با استفاده از برنامه SUFI2 انجام شد. مقدار ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) برای تخمین دبی جریان در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر ۰/۷۰ و ۰/۸۵ و برای تخمین دبی رسوب به‌ترتیب برابر ۰/۶۵ و ۰/۷۵ به‌دست آمد. مقادیر معیارهای آماری در مجموع بیانگر کارایی قابل قبول مدل در برآورد دبی ماهانه جریان و رسوب حوزه مورد مطالعه می‌باشد. برای شناسایی نواحی بحرانی با استفاده از مدل واسنجی شده، ابتدا مقدار میانگین سالانه رسوب ویژه ۱۷ زیرحوزه آبخیز محاسبه شد. در نهایت، زیرحوضه‌های ۱۷، ۱۳ و ۱۶ با داشتن بالاترین مقدار رسوب ویژه به‌ترتیب به‌عنوان زیرحوزه‌های آبخیز بحرانی برای انجام اقدامات مدیریتی و حفاظت خاک اولویت‌بندی شدند.

واژه‌های کلیدی: برآورد دبی ماهانه، تخمین دبی، حوضه‌های بحرانی، واسنجی مدل، SUFI2

مقدمه

پدیده فرسایش و انتقال رسوبات به‌وسیله رودخانه‌ها در مناطقی از دنیا که میزان فرسایش و تولید رسوب به‌صورت بار معلق در آن‌ها بالا است، به‌عنوان یک معضل بزرگ شناخته می‌شود. رسوبگذاری در آبراهه‌ها، کانال‌ها و شبکه‌های پخش آب، کاهش ظرفیت ذخیره مخازن سدها در اثر رسوبگذاری می‌تواند مشکلات جدی در توسعه پایدار منابع آب، سیستم‌های آبیاری، تولید برق آبی و غیره ایجاد کند (Tolson و Shoemaker، ۲۰۰۴). بنابراین استفاده از روش‌های مناسب و کم هزینه برای

[*] مسئول مکاتبات: erfanian.ma@gmail.com

برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آب و خاک به منظور برآورد میزان تلفات آب و خاک و ارائه راه‌کارهای مناسب جهت کاهش این تلفات، امری ضروری است. لازمه برنامه‌ریزی درست، کسب اطلاعات از میزان بار رسوبی یا تولید رسوب حوضه‌ها و نیز شناسایی حوضه‌های بحرانی است. با توجه به این مسئله و به منظور طراحی درست سازه‌های مهندسی از قبیل احداث سدها، پل‌ها، کانال‌های آبیاری، اصلاح و بهسازی مسیر رودخانه‌ها، برآورد صحیح بار رسوبی از اهمیت زیادی برخوردار است.

تاکنون محققان و پژوهشگران داخل یا خارج، شیوه‌های مختلف مدیریتی را جهت کاهش تلفات آب و خاک حوضه توسعه داده‌اند. یکی از متداول‌ترین شیوه‌ها که امروزه کاربرد فراوانی یافته، مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز است. یکی از مدل‌هایی که اخیراً در نقاط مختلف جهان به‌طور گسترده در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوزه آبخیز مورد استفاده قرارگرفته است، مدل نیمه فیزیکی و توزیعی SWAT[1] می‌باشد. تحقیقات بسیار زیادی در استفاده از این مدل در نقاط مختلف دنیا با اهداف متنوع انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Bekiaris و همکاران (۲۰۰۵)، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT را برای هفت زیرحوضه در کشور سوئد در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه با کاربرد ضریب ناش-ساتکلیف به‌عنوان تابع هدف برای یک دوره آماری ۱۱ ساله انجام دادند. پژوهش آن‌ها نشان داد که شبیه‌سازی به‌وسیله مدل در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه نسبت به مقیاس روزانه، بهتر می‌باشد. Omani و همکاران (۲۰۰۶)، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT را برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در دو زیرحوضه ماهیدشت و سنجابی در حوضه رودخانه کارون انجام دادند که نتایج آن حاکی از کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی دبی جریان بود. Faramarzi و همکاران (۲۰۰۹)، از مدل SWAT برای شبیه‌سازی برخی اجزای معادله بیلان آب در ایران استفاده کردند و با انجام آنالیز عدم قطعیت، به این نتیجه رسیدند که این مدل، دبی جریان را با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند. محققین مذکور ادعا کردند که نتایج آن‌ها می‌تواند یک منبع مهم برای مطالعات بیشتر در مورد آب، امنیت غذایی و رویکردهای مدیریت منابع آب در ایران و یک روش یکپارچه برای ارزیابی آب سبز[2] (تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل) و آب آبی[3] (مقدار آبی که به آب زیرزمینی اضافه می‌شود) در سایر کشورهای خشک و نیمه‌خشک باشد.

Ndomba و همکاران (۲۰۰۷)، مدل SWAT را برای شبیه‌سازی رسوب به‌کار برده و نتیجه گرفتند که برای حوضه‌هایی که فرسایش خاک غالب آن‌ها از نوع ورقه‌ای می‌باشد، استفاده از این مدل می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های منحنی سنجه رسوب باشد. Abbaspour و همکاران (۲۰۰۷)، از مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرایندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه غذایی در کشور سویس استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از این مدل برای مدیریت حوزه آبخیز مؤثر بوده و برای تحلیل سناریوهای مختلف می‌توان از این مدل استفاده کرد. Xu و همکاران (۲۰۰۹) و Alansi (۲۰۰۹)، به‌ترتیب در شمال چین و مالزی توانایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی دبی جریان و رسوب و دبی جریان مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه گرفتند که این مدل قادر به شبیه‌سازی مطلوب دبی جریان می‌باشد.

Talebizadeh و همکاران (۲۰۱۰)، با هدف مقایسه مدل SWAT و شبکه عصبی در شبیه‌سازی رسوب، مطالعه‌ای را در حوزه آبخیز کسیلیان انجام دادند که نتایج آن‌ها حاکی از دقت بالای مدل نسبت به شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی رسوب بود. Akhavan و همکاران (۲۰۱۰)، مدل SWAT را به منظور تخمین مؤلفه‌های آب و همچنین، الگوریتم SUFI2 را برای واسنجی و اعتبارسنجی دبی ماهانه و تحلیل عدم قطعیت مدل به‌کار بردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شبیه‌سازی دبی جریان به‌وسیله مدل رضایت‌بخش بوده و نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان داد که میانگین ماهانه عدم قطعیت مربوط به تخمین

[1] Soil and Water Assessment Tool

[2] Green Water
[3] Blue Water

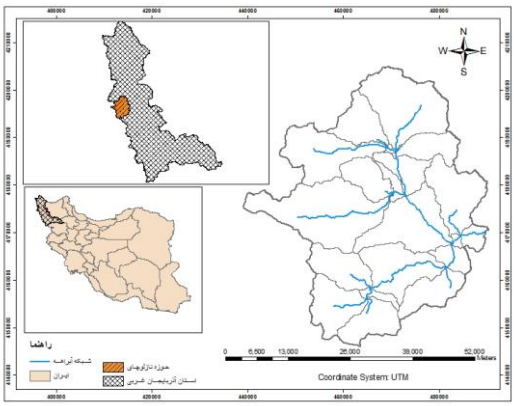
آب آبی (مجموع رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی عمیق) بیشتر از سایر مؤلفه‌هاست. Ghaffari و همکاران (۲۰۰۹)، به منظور بررسی تغییر کاربری اراضی در حوزه آبخیز زنجان‌رود از مدل SWAT استفاده کردند، نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجه تغییر کاربری اراضی روی دبی جریان رودخانه در این حوضه می‌باشد.

جمع‌بندی تحقیقات انجام شده در داخل و خارج ایران نشان می‌دهد که مدل SWAT برای شبیه‌سازی دبی جریان و رسوب حوزه‌های آبخیز کوچک و بزرگ از کارایی مختلفی در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و سالانه داشته است. در این پژوهش، فرض بر این است که مدل SWAT می‌تواند مقادیر دبی جریان و رسوب حوزه آبخیز نازلوچای را در مقیاس ماهانه و سالانه به خوبی شبیه‌سازی کند. اهداف این پژوهش شامل ۱) کاربرد مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی جریان و رسوب، ۲) شناسایی پارامترهای حساس مدل از طریق آنالیز حساسیت و تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی دبی جریان و رسوب با استفاده از الگوریتم SUFI2[1] و ۳) مشخص کردن زیرحوضه‌های بحرانی از نظر میانگین سالانه رسوب ویژه در حوزه آبخیز نازلوچای و اولویت‌بندی آن‌ها برای انجام اقدامات مدیریتی و حفاظت خاک در آینده می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز نازلوچای بین '۲۴ °۴۴ تا '۵۳ °۴۵ طول شرقی و '۳۰ °۳۷ تا '۵۸ °۳۷ عرض شمالی واقع شده است. وسعت حوضه آبخیز ۱۷۰۵۳۸/۶۶ هکتار، کمینه ارتفاع حوضه ۱۲۹۱ متر، بیشینه ارتفاع آن ۳۶۰۰ متر، ارتفاع متوسط حوضه ۱۹۴۴/۲ و متوسط بارش سالیانه آن ۴۸۸/۶ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مدل SWAT: این مدل، یک مدل توزیعی در مقیاس آبخیز بزرگ و یا زیرحوضه می‌باشد که توسط جف آرنولد برای سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا تهیه شده و از زمان ایجاد آن در اوایل ۱۹۹۰ قابلیت‌ها و کاربرد آن به طور چشم‌گیری در حال توسعه می‌باشد. SWAT یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی، کیفیت آب، فرسایش خاک، مدیریت مرتع و اثرات تغییر اقلیم می‌باشد. کوچک‌ترین واحد کاری در این مدل، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یا HRU[2] بوده که از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، کاربری اراضی و خاک به‌دست می‌آید.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز نازلوچای

با استفاده از این مدل می‌توان شبیه‌سازی دبی جریان و رسوب را در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه انجام داد. در مدل SWAT، برآورد فرسایش و رسوب برای هر HRU با معادله جهانی اصلاح شده برای تخمین هدررفت خاک (MUSLE[3]) برآورد می‌شود. مزیت‌های MUSLE نسبت به USLE افزایش صحت برآورد، برطرف شدن نیاز به نسبت رسوب‌گذاری و میسر شدن برآورد تولید رسوب برای تک رگبارها می‌باشد. عامل مدیریت گیاه، تابعی از توده زنده و لاشبرگ روی سطح زمین و حداقل مقدار عامل C برای گیاه است (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷). مقدار رواناب HRU نیز با روش شماره منحنی (CN) برآورد می‌شود.

در این پژوهش، به‌منظور واسنجی و تحلیل عدم قطعیت از برنامه SUFI2 استفاده شد (Abbaspour، ۲۰۰۷). این برنامه در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP[4] به مدل SWAT لینک می‌شود. میزان عدم قطعیت توسط دو معیار ارزیابی R-factor و P-factor محاسبه

[1] Sequential Uncertainty FItting ver. 2

[2] Hydrologic Response Units
[3] Modified Universal Soil Loss Equation
[4] Calibration and Uncertainty Programs

می‌شود. معیار P-factor عبارت است، از درصد داده‌های مشاهده‌ای که در محدوده تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد یا 95PPU (95% Prediction Uncertainly) قرار می‌گیرند و مقدار آن از صفر تا یک می‌باشد. معیار R-factor از تقسیم میانگین ضخامت یا پهنای باند عدم قطعیت 95PPU بر انحراف معیار مقادیر مشاهده‌ای به‌دست می‌آید. برنامه SUFI2 با هدف حداکثرسازی مقدار P-factor و حداقل‌سازی مقدار R-factor در مرحله کالیبراسیون (واسنجی) مدل SWAT می‌باشد. طبق تعریف، هرچه P-factor به عدد یک نزدیک‌تر شود و R-factor کوچک‌تر شود، کارایی مدل مطلوب‌تر خواهد شد (Abbaspour، ۲۰۰۷).

نقشه‌های پایه مورد نیاز شامل نقشه‌های رستری مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک می‌باشند. همچنین، در مدل SWAT باید حداقل یک ایستگاه هواشناسی در داخل یا مجاورت حوزه آبخیز به‌عنوان ایستگاه مرجع انتخاب شده و اطلاعات هواشناسی بلندمدت آن شامل ۱۴ پارامتر به‌صورت میانگین ماهانه در فایل Wgn. برای مدل معرفی شود (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰). مشخصات مختلف ایستگاه‌های مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

روش تحقیق: لایه‌های مدل رقومی ارتفاع (DEM) پوشش‌دهنده حوزه آبخیز با اندازه سلول ۳۰ متر (مساحت ۹۰۰ متر مربع) از سایت سنجنده ASTER[1] دانلود و پس از پردازش به‌عنوان یک لایه رستری ورودی برای مدل آماده شد. کلیه لایه‌ها و اطلاعات فیزیوگرافی مورد نیاز مدل SWAT در محیط ArcGIS9.3 با داشتن لایه رستری ارتفاع به‌دست آمد. در این پژوهش، حوزه آبخیز نازلوچای به‌وسیله نرم‌افزار ArcSWAT به ۱۷ زیرحوزه آبخیز تقسیم‌بندی شد (شکل ۱).

واسنجی و اعتبارسنجی مدل: مدل SWAT دارای پارامترهای متعددی هستند که مقدار بهینه پارامترهای مدل به شرایط منطقه و داده‌های ورودی بستگی دارد و تا زمانی که مقدار بهینه پارامترها تخمین زده نشود، نمی‌توان شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی حوزه آبخیز را به خوبی انجام داد (Abbaspour، ۲۰۰۷). لذا همواره لازم است تا مدل را کالیبره (واسنجی) کرد و به یک مدل کالیبره شده با مقادیر بهینه پارامترها دست یافت. مدل واسنجی شده باید در یک دوره آماری دیگر با عنوان مرحله اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گیرد. مقادیر بهینه ۲۹ پارامتر که از بهینه‌سازی مدل SWAT در دوره واسنجی (کالیبراسیون) به‌دست آمده، در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر بهینه مدل، در مرحله اعتبارسنجی استفاده شد.

در پژوهش حاضر، واسنجی مدل در مقیاس ماهانه بر اساس مقادیر مشاهده‌ای دبی جریان و دبی رسوب به‌ترتیب ۱۳۲ و ۱۱۶ ماه، طی دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۷ با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP انجام شد. توابع هدف مختلفی برای بهینه‌سازی مدل در این نرم‌افزار وجود دارد (روابط ۱ تا ۴). تابع هدف ناش-ساتکلیف (NSE) توسط بسیاری از هیدرولوژیست‌ها در مدل‌سازی حوزه آبخیز استفاده شده و کاربرد آن برای مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای (به‌ویژه در مقیاس ماهانه و سالانه) نسبت به سایر توابع هدف بیشتر توصیه شده است (ASCE، ۱۹۹۳). لذا از این تابع هدف به‌عنوان مبنای تصمیم-گیری و بهینه‌سازی مدل SWAT استفاده شد. به‌علاوه، با آنالیز حساسیت، حساس‌ترین پارامترهای مدل در شبیه‌سازی دبی جریان و رسوب انتخاب شد و اعتبارسنجی مدل با استفاده از مقادیر بهینه پارامترهای حساس، بر اساس مقادیر مشاهده‌ای دبی جریان و دبی رسوب به‌ترتیب ۴۸ و ۳۷ ماه، طی دوره آماری ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۷ انجام شد. Erfanian و Bayazi (۲۰۱۱)، نشان دادند که داده‌های رسوب ثبت شده در ایستگاه تپیک (خروجی حوزه) شامل ۶۹۲ نمونه در یک دوره ۴۵ساله می‌باشد. آن‌ها با انتخاب داده‌های با کیفیت بالا، روش منحنی سنجه رسوب (حد وسط دسته‌ها) را به‌عنوان مناسب‌ترین روش برآورد بار معلق و تخمین دبی ماهانه رسوب معرفی کردند. به عقیده آن‌ها با توجه به عدم اندازه‌گیری در دبی‌های طغیانی، استفاده از روش منحنی سنجه رسوب حتی در مقیاس ماهانه می‌تواند با عدم قطعیت همراه باشد، ولی با

[1] Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

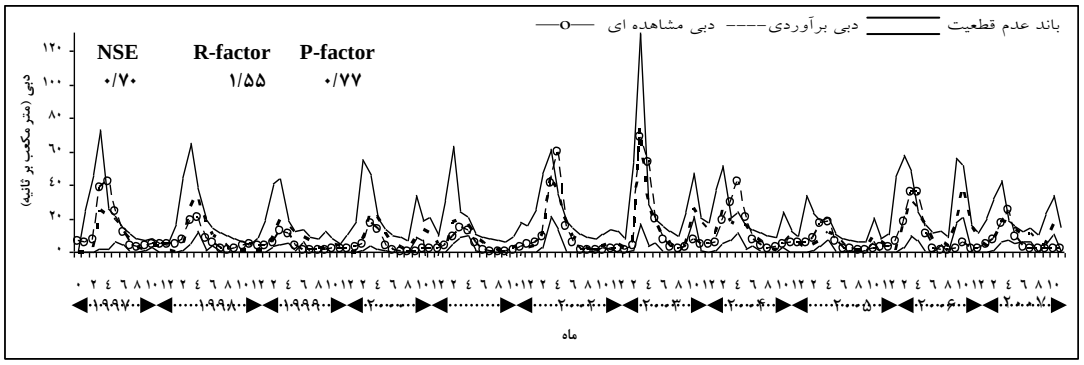
توجه به شرایط اندازه‌گیری بار معلق در رودخانه‌های ایران، روش منحنی سنجه رسوب را تنها راه برای تولید دبی رسوب ماهانه در حال حاضر دانستند. در پژوهش حاضر، از روش حد وسط دسته‌ها در دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۷ برای تولید سری داده‌های مشاهده‌ای استفاده شد (Erfanian و Bayazi، ۲۰۱۱).

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده

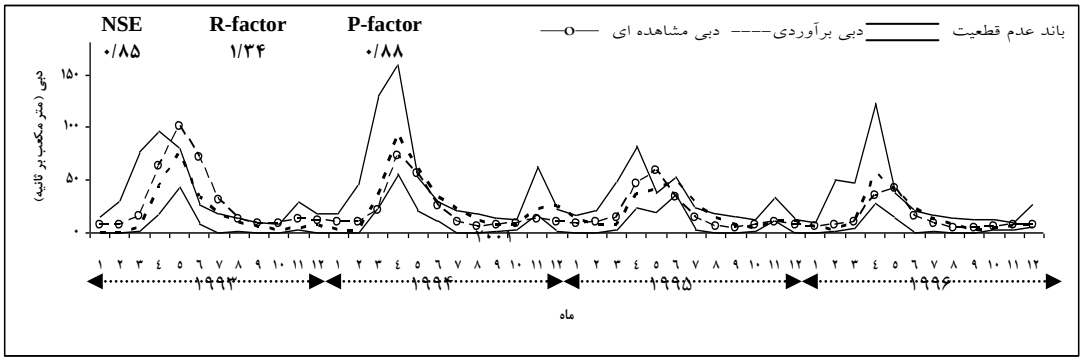
ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)
۱	آباجالو سفلی	هیدرومتری و هواشناسی	۴۵° ۰۸′	۳۷° ۴۳′	۱۲۹۰
۲	تپیک	هیدرومتری و هواشناسی	۴۴° ۵۴′	۳۷° ۴۰′	۱۴۵۰
۳	مرزسرو	هیدرومتری و هواشناسی	۴۴° ۳۸′	۳۷° ۴۳′	۱۶۴۰
۴	گچی	باران‌سنجی	۴۴° ۴۳′	۳۷° ۳۹″	۱۹۵۰
۵	سینوپتیک	هواشناسی	۴۵° ۵۰′	۳۷° ۳۲′	۱۳۲۸

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترهای مدل SWAT در دوره واسنجی برای برآورد ماهانه دبی جریان و رسوب

ردیف	نام پارامتر	واحد	مشخصه پارامتر	مقدار پارامتر (دبی)	مقدار پارامتر (رسوب)
۱	عامل جبران تبخیر در خاک	-	ESCO	۰	۰
۲	هدایت هیدرولیکی کانال	میلی‌متر در ساعت	CH-K	۶۶/۳۴	۴۸/۴
۳	هدایت هیدرولیکی اشباع	میلی‌متر در ساعت	SOL-K	۲۱۱/۲۶	۱۱۴/۳۱
۴	درصد نفوذ به سفره عمیق	-	RCHRG_DP	۰/۹۰	۰/۱۲۹
۵	چگالی توده خاک	گرم در سانتی‌متر مکعب	SOL_BD	۱/۷۵۹	۱/۸۴۵
۶	بیشینه نگهداشت تاج پوشش	میلی‌متر	CANMX	۵/۵۲	۱/۹۵
۷	ضریب زبری برای دامنه	-	OV_N	۱۱/۰۴	۲۱/۸
۸	دمای بارش برف	درجه سانتی‌گراد	SMTMP	۲/۳۹	۴/۹
۹	دمای ذوب برف	درجه سانتی‌گراد	SFTMP	۲/۶۸	۳/۵۷
۱۰	بیشینه نرخ ذوب برف	درجه سانتی‌گراد	SMFMX	۲/۶۴	-۳/۳
۱۱	کمینه نرخ ذوب برف	درجه سانتی‌گراد	SMFMN	۳/۲۱	۷/۳
۱۲	شماره منحنی روش SCS	-	CN	۶۰	۶۰
۱۳	آب قابل دسترس خاک	میلی‌متر در میلی‌متر	SOL_AWC	۰/۲۲۹	۰/۳۸۴
۱۴	عمق اولیه آب زیرزمینی	متر	GWHT	۱	۱
۱۵	زمان تاخیر آب زیرزمینی	روز	GW_DELAY	۲۷۳/۴۹	۳۵۹/۵
۱۶	ضریب تبخیر آب زیرزمینی	-	GW_REVAP	۰/۰۶	۵/۰۵
۱۷	ثابت تخلیه آب زیرزمینی	روز	ALPHA_BF	۰/۱۰۶	۰/۸۱۷
۱۸	ضریب زبری کانال‌های فرعی	-	CH-N	۰/۶۵	۰/۵۲
۱۹	بازده سفره کم عمق	متر مکعب در متر مکعب	GW-SPYLD	۰/۷۲	۰/۶۲
۲۰	عمق آستانه جریان سفره کم عمق	میلی‌متر	GWQMN	۳۳۴۴/۶	۳۸۱۵
۲۱	آستانه عمق آب در سفره کم عمق	-	REVAPMN	۲۷۵/۱۸	۱۷۹
۲۲	گرادیان ارتفاعی بارش	میلی‌متر در کیلومتر	TLAPS	-۱/۷۲	-۴/۴۵
۲۳	عامل جبران برداشت آب گیاه	-	EPCO	۰/۳۶	۰/۰۸۷
۲۴	عامل پوشش کانال	-	CH_COV	۰/۴۶	۰/۲۲
۲۵	عامل فرسایش‌پذیری کانال	-	CH_EROD	۰/۸	۰/۹۹
۲۶	بیشینه مقدار رسوب در کانال	-	SPCON	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷
۲۷	مقدار رسوب در کانال	-	SPEXP	۱/۷۵	۱/۴
۲۸	عامل عملیات حفاظتی در USLE	-	USLE_P	۰/۸۷۱	۰/۰۶
۲۹	عامل فرسایش‌پذیری خاک در USLE	-	USLE_K	۰/۲۵۴	۰/۱۹۵



شکل ۲- محدوده عدم قطعیت به همراه مقادیر دبی جریان ماهانه برآوردی (۲۰۰۷-۱۹۹۷) در دوره واسنجی مدل SWAT



شکل ۳- محدوده عدم قطعیت به همراه مقادیر دبی جریان برآوردی (۱۹۹۶-۱۹۹۳) در دوره اعتبارسنجی مدل SWAT

در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل، توابع هدف R^2 (ضریب تعیین)، RMSE (جذر میانگین مربعات خطا)، NSE[1] (ناش-ساتکلیف) و MBE[2] (میانگین خطا) مطابق روابط (۱) الی (۴) به‌وسیله نرم‌افزار مذکور قابل محاسبه می‌باشند.

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_E-Q_O)^2}{n}} \quad (۱)$$

$$R^2=\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_O-\overline{Q}_O)(Q_E-\overline{Q}_E)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_O-\overline{Q}_O)^2}.\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_E-\overline{Q}_E)^2}}\right)^2 \quad (۲)$$

$$MBE=\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_E-Q_O)}{n} \quad (۳)$$

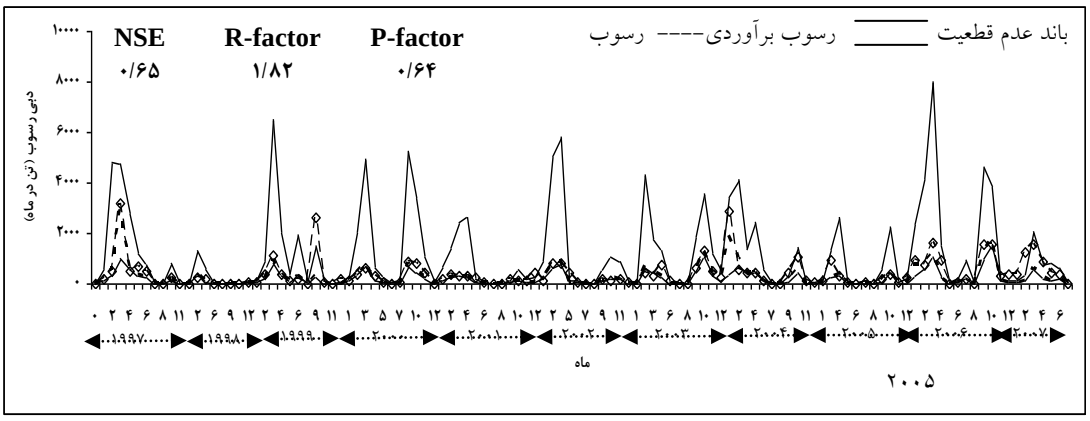
$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^{m}(Q_E-Q_O)^2}{\sum_{i=1}^{m}(Q_E-\overline{Q}_O)^2} \quad (۴)$$

که در آن‌ها، n بیانگر تعداد داده‌ها (در مقیاس ماهانه برابر تعداد ماه‌های دارای مقادیر اندازه‌گیری)، Q_E مقدار برآوردی دبی جریان یا دبی رسوب، Q_O مقدار مشاهده‌ای دبی جریان یا دبی رسوب و $\overline{Q}_O$ میانگین مقادیر مشاهده ای دبی جریان یا دبی رسوب در دوره واسنجی یا اعتبارسنجی مدل می‌باشند.

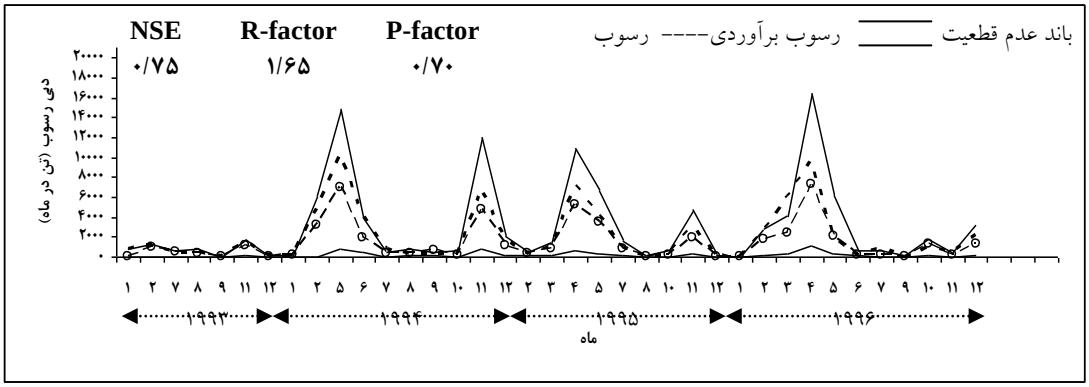
نتایج

در شکل‌های ۲ تا ۵ نتایج واسنجی و اعتبارسنجی و در جدول ۳ نتایج معیارهای ارزیابی مدل ارائه شده است. مقدار ضریب NSE برای تخمین دبی جریان در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل به‌ترتیب برابر ۰/۷۰ و ۰/۸۵ و برای تخمین دبی رسوب به‌ترتیب برابر ۰/۶۵ و ۰/۷۵ به‌دست آمد (جدول۲). اگر معیار ناش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد، به منزله کارایی مطلوب، مقادیر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ بیانگر رضایت‌بخش بودن و مقدار کمتر از ۰/۳۶ به معنی نارکارآمد بودن مدل می‌باشد (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰، Walling، ۲۰۰۴).

[1] Nash & Sutcliffe Efficiency
[2] Mean Bias Error



شکل ۴- محدوده عدم قطعیت به همراه مقادیر دبی رسوب ماهانه برآوردی (۲۰۰۷-۱۹۹۷) در دوره وا سنجی مدل SWAT



شکل ۵- محدوده عدم قطعیت به همراه مقادیر دبی رسوب ماهانه برآوردی (۱۹۹۶-۱۹۹۳) در دوره اعتبار سنجی مدل SWAT

جدول ۳- مقادیر معیارهای کارایی مدل (مراحل واسنجی و اعتبارسنجی) برای تخمین دبی جریان و دبی رسوب ماهانه

متغیر	مرحله	P-factor	R-factor	R^2	RMSE	NSE	MBE
دبی جریان	واسنجی	۰/۷۷	۱/۵۵	۰/۷۲	۷/۶۶	۰/۷۰	۰/۷۸
	اعتبارسنجی	۰/۸۸	۱/۳۴	۰/۸۶	۱۰/۹۱	۰/۸۵	-۰/۵۸
دبی رسوب	واسنجی	۰/۶۴	۱/۸۲	۰/۷	۳۲۸	۰/۶۵	-۹۳/۱۸
	اعتبارسنجی	۰/۷۰	۱/۶۵	۰/۷۵	۹۴۰/۶	۰/۷۵	۵۲۸

مطابق جدول ۳ (مقادیر ضریب NSE برای دبی جریان و رسوب در دوره اعتبارسنجی)، بر اساس معیارهای ASCE (۱۹۹۳) می‌توان گفت که شبیه-سازی دبی جریان و دبی رسوب توسط مدل SWAT در حوزه آبخیز نازلو چای به‌ترتیب در در کلاس کارایی خیلی خوب و رضایت‌بخش[1] قرار می‌گیرند. ضریب R^2 در اکثر موارد، بیانگر تبیین درصد بالای واریانس مقادیر دبی و رسوب (بالاتر از ۷۰ درصد) به‌وسیله مدل SWAT می‌باشد. مقادیر RMSE و MBE در مورد دبی نسبت به رسوب خیلی کم بوده و بیانگر دقت بالاتر مدل در تخمین دبی ماهانه جریان یا مطابقت بیشتر مقادیر تخمینی با داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد. معمولا از معیار MBE برای محاسبه میزان اریبی در تخمین استفاده می‌شود. هر چه این معیار از صفر فاصله داشته باشد، نشان می‌دهد که اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی بیشتر می‌باشد. با توجه به جدول ۳ مقادیر R-factor در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی دبی جریان به‌ترتیب برابر ۱/۵۵ و۱/۳۲ و برای تخمین دبی رسوب برابر ۱/۸۲ و ۱/۶۵ می‌باشند که بیانگر کارایی رضایت‌بخش مدل در شبیه‌سازی رسوب در هر دو مرحله است. همچنین مقادیر P-factor در این مراحل

[1] Satisfcatory

به‌ترتیب برابر ۰/۶۴ و ۰/۸۸ می‌باشد. مقادیر این عوامل (جدول ۳) بیانگر عدم قطعیت پایین‌تر مدل در تخمین دبی جریان نسبت به دبی رسوب می‌باشد.

مدل SWAT در تخمین دبی جریان برای ماه‌های اسفند و فروردین ضعیف عمل کرده و با توجه به شکل ۲ دبی های حداکثر را در بیشتر موارد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین زده است. به‌علاوه، این مدل قادر به تخمین قابل قبول دبی جریان در ماه‌های اولیه فصل بهار می‌باشد. در حوزه آبخیز نازلوچای، ریزش برف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نزولات جوی در این حوضه دارای رژیم برفی-بارانی می‌باشد. لازم به ذکر است که مدل SWAT، مقدار بارش را با استفاده از میانگین دمای روزانه به‌صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در تخمین رواناب ماهانه اسفند، فروردین (رواناب ناشی از ذوب برف) می‌توان نتیجه گرفت که مدل واسنجی شده قادر به شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف و تخمین دبی‌های حداکثر هیدروگراف در این محدوده زمانی نمی‌باشد.

Tolson و Shoemaker (۲۰۰۴) گزارش کردند که مدل SWAT برای شبیه‌سازی وقایع شدید (رگبارهای تند همراه با هیدروگراف طغیانی) طراحی نشده است و معمولاً مقادیر دبی اوج جریان را کمتر از مقادیر مشاهده‌ای برآورد می‌کند. Chu و Shirmohammadi (۲۰۰۴)، با استفاده از مدل SWAT در یک حوزه آبخیز در مریلند نشان دادند که این مدل قادر نیست، شرایط هیدرولوژیک را در دوران ترسالی شبیه‌سازی کند و ذوب سریع برف نیز در هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده باعث عدم انطباق آن با هیدروگراف مشاهده‌ای می‌شود. Tolson و Shoemaker (۲۰۰۴)، بزرگ‌ترین خطای مدل در تخمین میزان فسفر و رسوب را ضعف مدل در برآورد دبی اوج جریان مرتبط دانستند. اندازه‌گیری بار معلق در رودخانه نازلوچای غالباً مربوط به شرایط دبی پایه بوده و داده‌های بار معلق در دبی‌های سیلابی در این رودخانه وجود نداشت. لذا می‌توان کارآیی نسبتاً پایین مدل SWAT در تخمین دبی رسوب نسبت به دبی جریان تا حد زیادی به این موضوع مرتبط دانست. Gholami (۲۰۰۳)، گزارش داد که تخمین ماهانه و سالانه رسوب به‌وسیله مدل SWAT بهتر از مقیاس روزانه است و به عقیده ایشان، وجود داده‌های بلند مدت و با کیفیت بالای بار معلق در شرایط کم آبی و طغیانی می‌تواند باعث بهبود کارایی مدل در مقیاس روزانه شود. شکل‌های ۳ و ۵ نتایج کاربرد مدل واسنجی شده را در تخمین دبی جریان و رسوب در مرحله واسنجی در دوره آماری ۹۶-۱۹۹۳ نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت نشان داد که از ۲۹ پارامتر مورد استفاده در مرحله واسنجی، برای دبی جریان هشت پارامتر و برای دبی رسوب ۱۶ پارامتر حساس بودند که در جدول ۴ حساس‌ترین پارامترها نشان داده شده است. با توجه به رژیم بارانی–برفی حوزه آبخیز نازلوچای، دو پارامتر حساس مدل در برآورد دبی جریان، مربوط به خصوصیات برف می باشد.

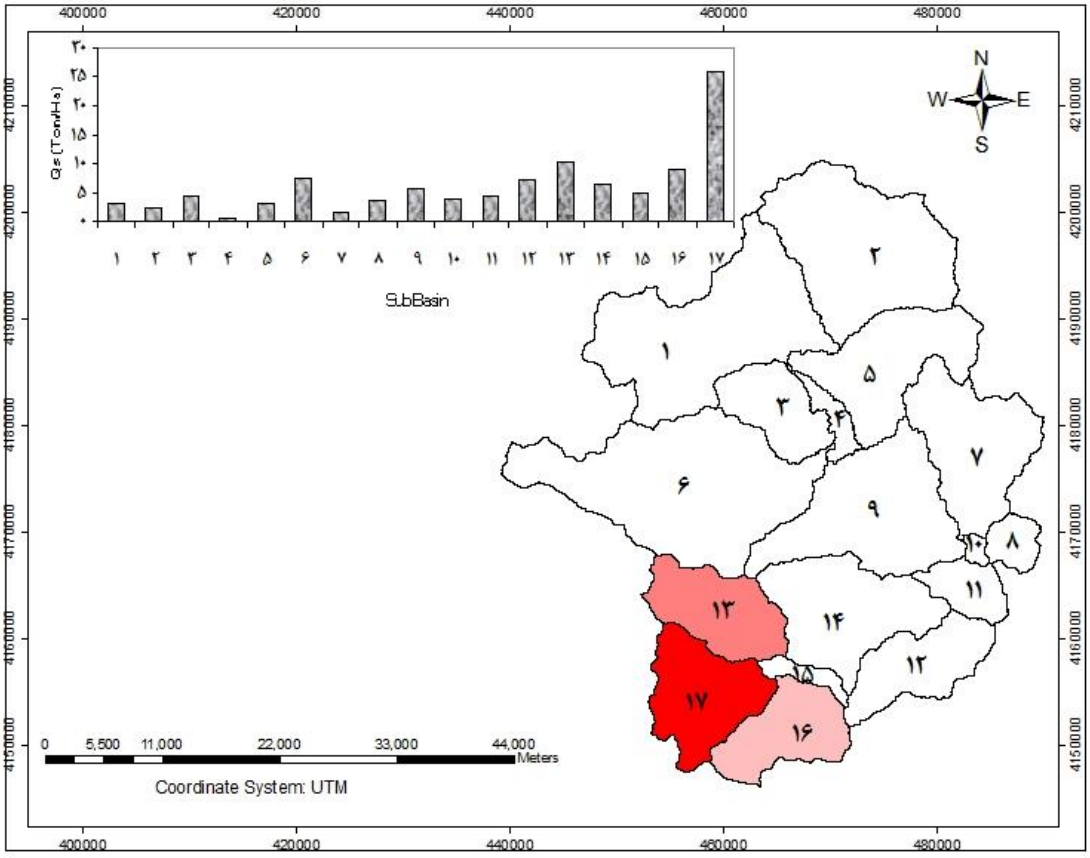
نواحی بحرانی فرسایش: بعد از واسنجی یا بهینه‌سازی مدل SWAT، مقدار بهینه پارامترهای مورد استفاده استخراج شد و در دیتابیس مدل وارد و مدل در مرحله اعتبارسنجی اجرا شد. سپس، مقادیر سالانه رسوب ویژه ۱۷ زیرحوزه آبخیز از روی جداول خروجی برنامه SWAT، محاسبه شد و نواحی بحرانی که رسوب ویژه آن‌ها بیشتر از زیرحوضه‌های دیگر بود، تعیین شد. مطابق شکل ۶، زیرحوضه‌های ۱۷، ۱۳ و ۱۶ به‌ترتیب بیشترین تولید رسوب ویژه را دارند. زیرحوضه‌های ۱۷ و ۱۳ دارای کاربری غالب مرتع بوده و حدود ۲۰ درصد آن‌ها باغ می‌باشد. جنس خاک در زیرحوضه ۱۷ از نوع Silty Clay Loam و مساحت کمی از آن از نوع Sandy Clay Loam می‌باشد.

شیب قسمت‌های مختلف این زیرحوضه بین۲۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد. از کل مساحت زیرحوضه ۱۶، حدود ۲۵ درصد به‌صورت توده سنگی بوده و ۱۰ درصد آن شامل باغات و حدود ۶۵ درصد شامل اراضی مرتعی می‌باشد. فعالیت‌های نامناسب کشاورزی، استفاده غیراصولی از مراتع، پتانسیل مناطق بالادست در تولید رواناب باعث غالب شدن عامل شیب نسبت به پوشش گیاهی شده و باعث تشدید فرسایش و تولید مقادیر بالای رسوب در این زیرحوضه‌ها شده است. لذا هرگونه اقدامات مدیریتی و حفاظتی به‌وسیله بخش‌های اجرایی بایستی به‌ترتیب باید در زیرحوضه-

های ۱۷، ۱۳ و ۱۶ متمرکز شوند تا از تلفات بیشتر خاک در آن‌ها جلوگیری شود.

جدول ۴- نتایج حاصل از آنالیز حساسیت

ردیف	حساسترین پارامترها به دبی جریان	حساس‌ترین پارامترها به دبی رسوب
۱	شماره منحنی در شرایط رطوبتی ۲ (CN_2)	شماره منحنی در شرایط رطوبتی ۲ (CN2)
۲	ثابت تخلیه جریان زیرزمینی (ALPHA_BF)	ضریب n مانینگ در کانال اصلی (CH_N2)
۳	هدایت هیدرولیکی موثر در کانال اصلی (CH_K2)	ماکزیمم مقدار رسوب در کانال (SPCON)
۴	دمای ذوب برف (SMTMP)	عامل حفاظتی خاک (P) در معادله USLE
۵	حداقل نرخ ذوب برف (SMFMN)	عامل فرسایش پذیری خاک (K) در معادله USLE



شکل ۶- نقشه اولویت‌بندی زیرحوزه‌های آبخیز از نظر میانگین سالانه رسوب ویژه (تن در هکتار در سال)
زیر حوزه‌های آبخیز ۱۷، ۱۳ و ۱۶ به‌ترتیب به‌عنوان بحرانی‌ترین نواحی در حوزه آبخیز نازلوچای می‌باشند.

نتیجه گیری

در این پژوهش از مدل نیمه‌فیزیکی و توزیعی SWAT و الگوریتم SUFI2 در برنامه SWAT-CUP برای تحلیل عدم قطعیت، با هدف تخمین دبی ماهانه جریان و دبی رسوب در حوزه آبخیز نازلوچای به‌طور موفقیت‌آمیزی استفاده شد. یکی از دلایل ضعف مدل در تخمین بیشینه جریان رواناب، استفاده از رابطه SCS در محاسبه رواناب است (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷). روش شماره منحنی یا SCS برای حوزه‌های آبخیز کوهستانی با رژیم برفی مناسب نمی‌باشد، چون این روش مقدار رواناب را برای یک واقعه رگبار با شرایط رطوبت خاک متوسط برآورد می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل SWAT در تخمین دبی جریان نسبت به دبی رسوب بهتر عمل می‌کند و این موضوع به‌دلیل وجود خطا یا عدم قطعیت در تولید داده‌های دبی ماهانه رسوب بر مبنای

منحنی سنجه روش حد وسط دسته‌ها مربوط می‌باشد (Erfanian و Bayazi، ۲۰۱۱، Gholami، ۲۰۰۳). در زیرحوضه‌های بحرانی از نظر تولید میانگین سالانه رسوب ویژه (تن در هکتار در سال)، تغییر کاربری اراضی (مراتع) به کاربری‌های دیگر (کشاورزی تأثیرات منفی قابل توجهی بر رواناب سطحی، سطح آب زیرزمینی، جریان رودخانه‌ای و سیل‌خیزی زیرحوضه-های آبخیز دارد. از این رو به نظر می‌رسد، تغییر کاربری اراضی مهمترین دلیل وقوع فرسایش شدید و تولید رسوب بالا در زیرحوضه‌های بحرانی باشد. بنابراین با توجه به این که سطح قابل توجهی از مساحت حوضه شامل اراضی با پوشش غالب مرتعی است، لذا لازم است که بخش اجرا در نواحی بحرانی با مدیریت پوشش گیاهی، جلوگیری از تغییر کاربری اراضی (تبدیل مراتع خوب و متوسط به سایر کاربری‌ها)، روش‌های اصلاح و توسعه مراتع را در جهت کنترل و مدیریت منابع آب و خاک این زیرحوضه‌ها برنامه‌ریزی کرده و اقدامات مناسب بیولوژیکی، ترویجی و سازه‌ای را در زیرحوضه‌های بحرانی به‌ترتیب اولویت انجام دهد.

منابع مورد استفاده

1. 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.
2. Abbaspour, K.C. 2007. User Manual for SWAT-CUP SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland, 95 pages.
3. Akhavan, S., J. Abedi-Koupai, S.F. Mousavi, M. Afyuni, S.S. Eslamian and K.C. Abbaspour. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan–Bahar Watershed, Iran. Agriculture, Agriculture Ecosystems and Environment, 139: 675–688.
4. Alansi, A.W., M. Amin, S.M. Abdul, G. 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. ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 119: 429-442.
6. Bekiaris, I.G., I.N. Panagopoulos and N.A. Mimikou. 2005. Application of the SWAT model in the Ronnea catchment of Sweden. Global Journal, 3: 252-257.
7. Chu, T.W. and A. Shirmohammadi. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. ASAE, 47: 1057-1073.
8. Erfanian, M. and M. Bayazi. 2011. The evaluation of extrapolation methods for the estimation of river suspended loads in the West Azerbaijan Province. Final Report of the research project of West Azarbaijan Regional Water Corporation, 58 pages (in Persian).
9. Faramarzi, M., K.C. Abbaspour, R. Schulin and H. Yang. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrological Processes, 23: 486–501.
10. Ghaffari, G., J. Qadusi and H. Ahmadi. 2009. Investigating the hydrological effects of land use change in catchment, case study: Zanjanrood Basin. Journal of Soil and Water Conservation, 16: 163-180 (in Persian).
11. Gholami, Sh. 2003. The simulation of daily sediment yield by using distributed SWAT model in mountainous catchments (Amameh Catchments). Research and Construction, 59: 29-33 (in Persian).
12. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282–290.
13. Ndomba, P.M., F.W. Mtalo and A. Killingtveit. 2007. Sediment yield modeling using SWAT model at a large and complex catchment: Issues and approaches. A case study of Pangani River catchment, Tanzania, International SWAT Conference, Institute for Water Education Delf, The Netherlands, Jully 4-6, 2007.
14. Omani, N., M. Tajrishi and A. Abrishamchi. 2006. Simulation of river flow using GIS and SWAT model. Seventh International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University, 8 pages (in Persian).
15. Talebizadeh, M., S. Morid, S.M. Ayyoubzadeh and M. Ghasemzadeh. 2010. Uncertainty analysis in sediment load modeling using ANN and SWAT model. Water Resources Management, 24: 1747–1758.
16. Tolson, B.A. and C.A. Shoemaker. 2004. Watershed modeling of the cannonsville basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and

phosphorus transport to the Cannonsville reservoir. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, N. Y.

17. Walling, D.E. 2004. Using environmental radionuclides to trace sediment mobilization and delivery in river basins as an aid to catchment management. Proceedings of the 9th International Symposium on River Sedimentation, 121-135.
18. Xu, Z.X., J.P. Pang, C.M. Liu and J.Y. Li. 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. Hydrological Processes, 23: 3619-3630.