



## شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT (مطالعه‌ی موردی: رودخانه قره‌سو اردبیل)

فواد ناصرآبادی<sup>۱</sup>، ابادر اسمعلی عوری<sup>۲</sup>، حسین اکبری<sup>۳</sup> و رخساره رستمیان<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، (نویسنده مسوول: foadnaserabadi@yahoo.com)

۲- استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۶

### چکیده

شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها، پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز و درک درستی از مولفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی برای برنامه‌ریزی در برای حفاظت از منابع آبی حائز اهمیت است. از طرف دیگر، نبودن برآورد مناسب رواناب حاصل از بارش در حوزه‌های آبخیز، مدیریت بهینه‌ی منابع آبی به ویژه مدیریت بهره‌برداری سدها و شبکه‌ی آبرسانی را دچار مشکل می‌نماید. در پژوهش حاضر از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه‌ی حوزه آبخیز قره‌سو واقع در استان اردبیل با مساحت ۴۰۶۲ کیلومتر مربع استفاده شد. هدف اصلی این پژوهش، کاربرد و اجرای مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوزه آبخیز قره‌سو و ارزیابی دقت شبیه‌سازی مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی می‌باشد. آمار رواناب ایستگاه‌های هیدرومتری سامیان، پل الماس و یامچی در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ میلادی (۱۳۸۱ تا ۱۳۸۹ هجری شمسی) برای شبیه‌سازی جریان مورد استفاده قرار گرفت. آمار سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ برای واسنجی و آمار سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. ضرایب تبیین ( $R^2$ ) و نش- ساتکلیف ( $E_{NS}$ ) برای ارزیابی کارایی مدل استفاده گردید. ضریب  $R^2$  در دوره واسنجی ۰/۷۰، ۰/۶۸ و ۰/۳۴ و در دوره اعتبارسنجی ۰/۸۲، ۰/۵۳ و ۰/۶۳ به دست آمد که به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های یامچی، سامیان و پل الماس است. ضریب  $E_{NS}$  در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۵۸ و ۰/۰۹ و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۳۳ و ۰/۶۰ به دست آمد. بر اساس نتایج ضرایب ارزیابی، مدل SWAT رواناب ماهانه‌ی ایستگاه یامچی را در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به صورت قابل قبول شبیه‌سازی کرده است. از دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی جریان در بعضی از ماه‌های سال می‌توان به شبیه‌سازی ضعیف ذوب برف، ناسازگاری فرضیات مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ‌زده و اشباع، تعداد کم داده‌های جریان و فقدان داده‌های ورودی لازم برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، حوزه آبخیز قره‌سو، رواناب، مدل SWAT، واسنجی

### مقدمه

سیستم‌های هیدرولوژیکی را که می‌خواهد بداند، اندازه‌گیری کند زیرا فقط تعداد معدودی از روش‌های اندازه‌گیری و هم‌چنین دامنه محدودی از اعداد در اختیار اوست (۲). شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها، پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز و درک درستی از مولفه‌های مختلف چرخه‌ی هیدرولوژیکی برای برنامه‌ریزی در برای حفاظت از منابع آبی حائز اهمیت است. از طرف دیگر، فقدان برآورد مناسب رواناب حاصل از بارش در حوزه‌های آبخیز، مدیریت بهینه‌ی منابع آبی و انجام پروژه‌های مختلف آبخیزداری به ویژه مدیریت بهره‌برداری سدها و شبکه‌ی آبرسانی را دچار مشکل می‌نماید.

هم‌چنان که مدل‌های هیدرولوژیکی برای شناخت پدیده‌ی هیدرولوژیک ضروری هستند در مهندسی نیز انتظار می‌رود که از مدل‌ها مانند ابزاری برای استفاده در مدیریت بهینه یک سیستم، طراحی و اجرای پروژه‌های حوزه آبخیز، به راهنمایی عنوان در تصمیم‌گیری‌های ملی و موارد مشابه بسیاری استفاده شود (۷).

امروزه منابع آب یکی از پایه‌های اصلی توسعه‌ی پایدار به شمار می‌رود. محدودیت منابع آبی موجود و توانایی دسترسی به آن‌ها، اهمیت مدیریت و برنامه‌ریزی آب را بیش از پیش آشکار می‌سازد (۲۱). بارش مهم‌ترین و مؤثرترین منبع آب یک حوزه آبخیز است. در دسترس بودن اطلاعات پیوسته‌ی بارش که می‌تواند برای پیش‌بینی مقدار رواناب مورد استفاده قرار گیرد شروع خوبی برای شبیه‌سازی پدیده‌ی بارش- رواناب به شمار می‌رود (۱۱). رواناب ناشی از بارندگی در حوزه‌های آبخیز علاوه بر خسارت‌های جانی و مالی ناشی از سیل، باعث فرسایش و از بین رفتن خاک حاصل‌خیز سطحی شده و در نهایت، رسوب‌گذاری در مسیل‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها را به دنبال دارد (۲۵).

دلایل متعددی برای پاسخ به این سوال- که چرا باید فرآیندهای هیدرولوژیکی بارش- رواناب را مدل‌سازی نمود- وجود دارد. پاسخ اصلی این سوال، محدود بودن روش‌های اندازه‌گیری در هیدرولوژی می‌باشد. در واقع، فرد قادر نیست هر چیزی راجع به

چانتا و همکاران (۳) از مدل SWAT برای پیش‌بینی مقادیر روزانه رواناب، رسوب و کربن آلی در یک حوزه آبخیز کشاورزی در جنوب غرب فرانسه به وسعت ۱۱۱۰ کیلومتر مربع استفاده کردند. مدل SWAT پیش‌بینی کرد که متوسط سالانه بارش حوزه آبخیز برای کل دوره شبیه‌سازی (۷۲۶ میلی‌متر) به صورت تبخیر و تعرق (۷۸/۳ درصد)، نفوذ (۱۴/۱ درصد)، هدررفت (۰/۵ درصد) و رواناب سطحی (۷/۱ درصد) تقسیم می‌گردد. متوسط آبدهی برای کل دوره شبیه‌سازی در مقایسه با مقدار مشاهده شده آن (۱۳۶ میلی‌متر)، ۱۳۸ میلی‌متر شبیه‌سازی گردید. در این پژوهش نتیجه‌گیری شد که مدل SWAT مقادیر روزانه رواناب را بهتر از مقادیر روزانه رسوب شبیه‌سازی کرده است و همچنین بررسی اجزای بیلان آب در مدل SWAT برای بررسی مدیریت آب در حوزه‌های آبخیزی که به شدت تحت کشاورزی فشرده قرار دارند، می‌تواند بسیار مفید باشد.

سانترا و داز (۲۰) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاس ماهانه در حوزه آبخیز رودخانه چیلیکا در کشور هند استفاده کردند. در این پژوهش از ضرایب نش- ساتکلیف ( $E_{NS}$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) برای ارزیابی کارایی مدل استفاده گردید. ضرایب  $E_{NS}$  و RMSE در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۵۴۵ و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۶۶۱ به دست آمدند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در حدود ۶۰ درصد بارش در این حوزه آبخیز به رواناب تبدیل می‌شود. با در نظر گرفتن تمامی مطالب ارائه شده باید بیان کرد که مدل SWAT یک ابزار توانمند در زمینه مطالعات مرتبط با آب و خاک می‌باشد. ارائه اطلاعات قابل توجه درباره بخش‌هایی مانند دبی جریان، رسوب، نیتروژن، فسفر، باکتری و برخی موارد دیگر در هر شبیه‌سازی، بیانگر این مطلب است. هدف اصلی این پژوهش کاربرد و اجرای مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوزه آبخیز قره‌سو و ارزیابی دقت شبیه‌سازی مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی است.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی حوزه آبخیز مورد مطالعه

حوزه آبخیز قره‌سو واقع در استان اردبیل با مساحت ۴۰۶۲ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی ۳۶ ۲۷ ۴۸ و ۰۶ ۱۲ ۴۹ طول شرقی و ۲۰ ۴۷ ۳۷ و ۲۵ ۳۷ ۳۸ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). حداقل و حداکثر ارتفاع حوزه آبخیز مذکور به ترتیب ۱۲۹۰ و ۴۷۸۱ متر از سطح دریا و شیب

چو و شیرمحمدی (۴) در مطالعه‌ای، از مدل SWAT به منظور شبیه‌سازی جریان آب و جریان زیرسطحی حوزه آبخیز وارنر مرلند برای دوره زمانی ۱۹۹۴-۱۹۹۹ استفاده کردند. در این مطالعه، مدل جریان زیرسطحی را برای سال ۱۹۹۶ به طور معنی‌داری کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین زده شد. میزان بارندگی در سال ۱۹۹۶ دو برابر میزان بارندگی سال‌های دیگر در طول دوره آماری مورد مطالعه بود. آن‌ها گزارش کردند که مدل قادر نیست شرایط هیدرولوژیک را در دوران ترسالی شبیه‌سازی کند. همچنین شبیه‌سازی رواناب سطحی نشان داد که یک هماهنگی معقول بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده وجود دارد، به جز برای ژانویه ۱۹۹۶ که یک ذوب سریع برف باعث ایجاد یک سیلاب بزرگ شده بود.

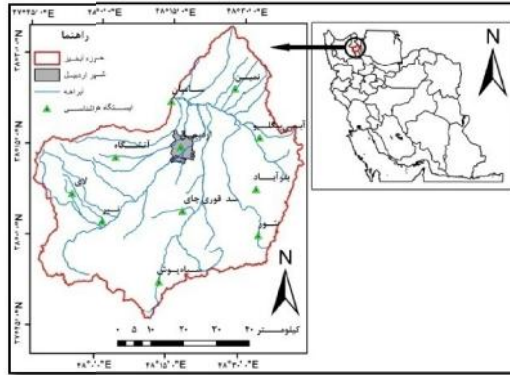
اندومبا و بیرهانو (۱۴) مقدار رواناب حوزه‌ها یا آبخیز مربوط به رودخانه نیل را با استفاده از مدل SWAT برآورد کردند. مقدار ضریب نش- ساتکلیف ( $E_{NS}$ ) از ۰/۱۳۷ تا ۰/۸۷، مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) بین ۰/۲۶ تا ۰/۷۲ و مقدار ضریب  $VFI^1$  از ۰/۹۸ تا ۱/۴۳ به دست آمدند. نتایج ضرایب ارزیابی مشخص کرد که مدل SWAT به طور رضایت‌بخشی، جریان رودخانه را در شرایط محدودیت دسترسی به داده‌ها شبیه‌سازی کرده است.

آلنسی و همکاران (۱) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوزه آبخیز برنام<sup>۲</sup> با مساحت ۱۰۹۷ کیلومتر مربع استفاده کردند. ضرایب تبیین ( $R^2$ ) و نش- ساتکلیف ( $E_{NS}$ ) در مرحله واسنجی رواناب ماهانه به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۶۲ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۲ به دست آمده است. این مطالعه نشان می‌دهد مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی موفق جریان در مناطق مرطوب استوایی می‌باشد و می‌تواند برای مطالعه اثرات تغییر کاربری اراضی مورد استفاده قرار گیرد.

لایرونگ و جیانیون (۱۰) جریان ماهانه رودخانه بیجیانگ را با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی کردند. حوزه آبخیز رودخانه مذکور با مساحت ۳۸۸۳۱/۹۵ کیلومتر مربع در جنوب کشور چین واقع گردیده است. حوزه آبخیز مورد مطالعه به ۲۹ زیرحوزه و ۳۴۵ واحد پاسخ هیدرولوژیک تقسیم گردید. از داده‌های آماری ۲۰ سال (۱۹۶۱ تا ۱۹۸۰) برای دوره واسنجی از داده‌های آماری ۱۰ سال (۱۹۸۱ تا ۱۹۹۰) برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. نتایج نشان داد که این مدل قادر است جریان ماهانه رودخانه را به خوبی شبیه‌سازی نماید.

در حوزه‌ی آبخیز مورد مطالعه، کاربری زراعت دیم بیشترین سطح حوزه‌ی آبخیز را به خود اختصاص داده است (۵).

متوسط آن ۱۱/۵۷ درصد می‌باشد. کاربری اراضی در این منطقه غالباً شامل زراعت آبی و دیم، مرتع، جنگل و مناطق مسکونی است. در بین انواع کاربری‌های موجود



شکل ۱- موقعیت حوزه‌ی آبخیز قره‌سو در کشور و استان اردبیل

در رابطه‌ی فوق  $Q_{surf}$ : رواناب سطحی روزانه (mm)،  $R_{day}$ : عمق بارش روزانه (mm) و  $S$ : پارامتر نگاه‌داشت رطوبت (mm) می‌باشد.

در رابطه‌ی گرین- آمپت، سرعت نفوذ بر اساس معادله‌ی زیر محاسبه می‌گردد (۶):

$$f_{inf,t} = K_e \left( 1 + \frac{\phi_{wf} \Delta \theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad (3)$$

که در آن،  $f_{inf,t}$ : سرعت نفوذ در زمان  $t$  ( $mm\ hr^{-1}$ )،  $K_e$ : هدایت هیدرولیکی مؤثر ( $mm\ hr^{-1}$ )،  $\phi_{wf}$ : پتانسیل ماتریک جبهه‌ی رطوبتی ( $mm$ )،  $v$ : تغییرات حجم رطوبتی خاک در جبهه‌ی رطوبتی ( $mm/mm^{-1}$ ) و  $F_{inf,t}$ : نفوذ تجمعی در زمان  $t$  (mm) می‌باشد.

#### تبخیر و تعرق پتانسیل

در مدل SWAT سه روش برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق وجود دارد: الف) روش پنمن-مانتیس، ب) روش پریستلی-تیلور و ج) روش هارگریوز-سامانی. پارامترهای مورد نیاز روش پنمن-مانتیس شامل دمای هوا، تشعشع خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد است (۱۲). روش پریستلی-تیلور به دمای هوا، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی (۱۷) و روش هارگریوز-سامانی فقط به دمای هوا نیاز دارد (۸).

#### داده‌های مورد نیاز مدل

داده‌های مورد نیاز مدل شامل متغیرهای مکانی و متغیرهای آب و هواشناسی است. متغیرهای مکانی شامل لایه‌های اطلاعاتی توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک است که از اداره‌ی کل منابع طبیعی استان اردبیل تهیه شد. داده‌های هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش، حداقل و حداکثر درجه حرارت و رطوبت نسبی است که از سازمان هواشناسی و سازمان مطالعات پایه منابع آب استان اردبیل اخذ گردید. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در حوزه آبخیز قره‌سو و

#### معرفی مدل SWAT

مدل SWAT<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۰ از سوی آرنولد برای اداره‌ی خدمات تحقیقات کشاورزی آمریکا ارائه گردید. مدل SWAT یک مدل نیمه‌توزیعی مکانی و زمان پیوسته<sup>۲</sup> است که بر اساس روابط فیزیکی تهیه شده و یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی، کیفیت آب، فرسایش خاک، مدیریت مرتع و اثرات تغییرات اقلیم است. SWAT مجموعه‌ای از معادلات ریاضی و فرمول‌های تجربی متعدد است (۱۶). فرآیندهای مهم مدل به شرح ذیل می‌باشند:

#### چرخه‌ی هیدرولوژی

شبیه‌سازی چرخه‌ی هیدرولوژی به وسیله‌ی مدل SWAT بر پایه‌ی رابطه بیلان آبی است که رابطه‌ی ۱ آن را نمایش می‌دهد (۱۵):

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

که در این معادله،  $SW_t$ : مقدار نهایی آب در خاک (mm)،  $SW_0$ : مقدار اولیه‌ی آب در خاک (mm)،  $R_{day}$ : مقدار بارندگی (mm)،  $Q_{surf}$ : مقدار رواناب سطحی (mm)،  $E_a$ : مقدار تبخیر و تعرق (mm)،  $W_{seep}$ : مقدار آب وارد شده از پروفیل خاک به ناحیه‌ی غیراشباع (mm) و  $Q_{gw}$ : مقدار جریان برگشتی (mm) است.

#### رواناب سطحی

در مدل SWAT دو روش برای تخمین رواناب سطحی وجود دارد: روش شماره منحنی SCS و فرمول نفوذ گرین- آمپت. رابطه ۲، معادله‌ی SCS را نشان می‌دهد (۲۳):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (2)$$

1- Soil and Water Assessment Tool

2- USDA Agricultural Research Service (ARS)

3- Continuous time Squared Error

جغرافیایی و مشخصات سدهای موجود در محدوده‌ی مطالعاتی را نمایش می‌دهد. مشخصات فنی و مشخصات جغرافیایی هر یک از سدها به مدل ارائه شد و سپس با توجه به حجم سد، مقدار برداشت ماهانه‌ی آب از سد و ظرفیت سرریز، اقدام به شبیه‌سازی تأثیر سد بر جریان خروجی از حوزه آبخیز گردید.

به منظور مقایسه‌ی داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده از طریق مدل و ارزیابی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان، داده‌های روزانه جریان ایستگاه‌های هیدرومتری درجه یک سامیان، پل الماس و یامچی از سازمان مطالعات پایه‌ی منابع آب استان اردبیل جمع‌آوری گردید و سپس با استفاده از داده‌های روزانه، متوسط ماهانه‌ی داده‌ها برای هر ماه محاسبه گردید. ایستگاه هیدرومتری درجه یک سامیان روی رودخانه قره‌سو و ایستگاه‌های هیدرومتری درجه یک پل الماس و یامچی روی رودخانه‌ی بالخلوچای احداث گردیده‌اند (شکل ۲).

جدول ۱ مشخصات آن‌ها را نمایش می‌دهد. نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و طبقات شب در فرمت رستری و با اندازه‌ی سلول‌های ۲۵ در ۲۵ متر در مدل مورد استفاده قرار گرفتند. سه نقشه مذکور در محیط نرم‌افزار مدل با هم ترکیب شدند. حاصل کار این مرحله تشکیل ۱۷۸۶ واحد پاسخ هیدرولوژیک بود. لازم به ذکر است که نقشه‌های خاک و کاربری اراضی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاع با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ در مدل مورد استفاده قرار گرفت.

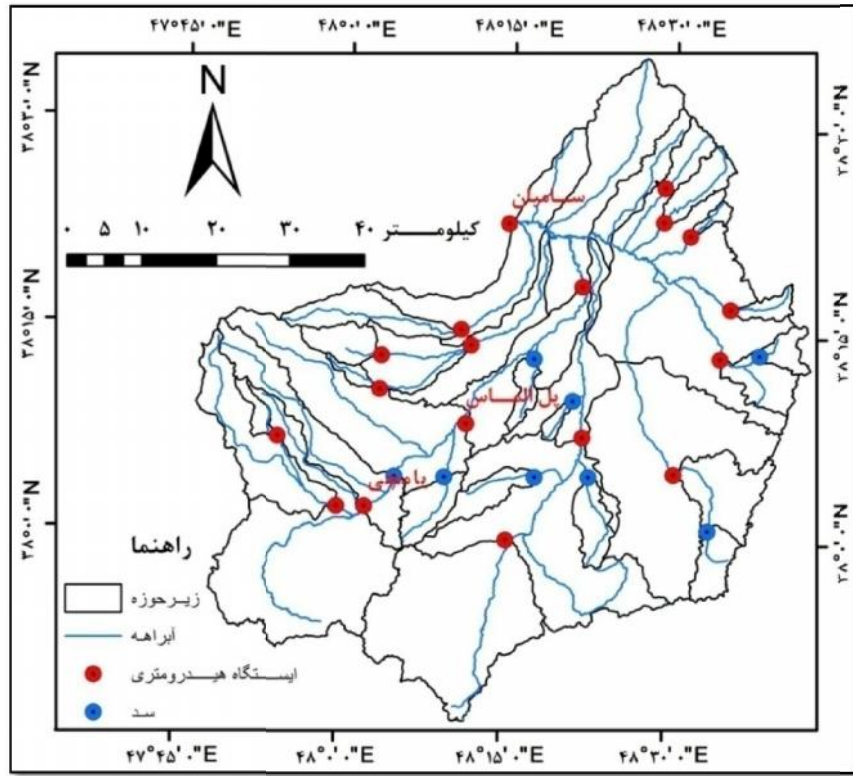
در این پژوهش، نقشه‌ی شبکه‌ی جریان و نقشه‌ی زیرحوزه‌ها به صورت دستی با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی منطقه‌ی مورد مطالعه در نرم‌افزار ArcGIS تهیه و به مدل ارائه شدند. حوزه آبخیز مورد مطالعه در قالب ۳۲ زیرحوزه تقسیم‌بندی شد که از این تعداد، ۱۹ زیرحوزه مجهز به ایستگاه هیدرومتری می‌باشند و تعداد ۸ زیرحوزه نیز حوزه‌های سدهای موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه هستند (شکل ۲). جدول ۲ مختصات

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در حوزه‌ی آبخیز قره‌سو

مختصات جغرافیایی					
نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	سال‌های آماری
آبی بیگلو	تبخیرسنجی	۴۸° ۳۳' ۲۹"	۳۸° ۱۶' ۵۴"	۱۳۴۸	۲۰۰۲-۲۰۱۲
آتشگاه	تبخیرسنجی	۴۸° ۰۳' ۳۰"	۳۸° ۱۲' ۵۸"	۱۷۷۸	۲۰۰۲-۲۰۱۲
اردبیل	سینوپتیک	۴۸° ۱۷' ۰۰"	۳۸° ۱۵' ۰۰"	۱۳۳۲	۲۰۰۰-۲۰۰۹
بقرآباد	باران‌سنجی	۴۸° ۳۳' ۰۱"	۳۸° ۰۸' ۲۳"	۱۵۶۰	۲۰۰۱-۲۰۱۲
سامیان	تبخیرسنجی	۴۸° ۱۴' ۴۷"	۳۸° ۲۳' ۲۹"	۱۲۸۶	۲۰۰۲-۲۰۱۲
سد قوری‌چای	تبخیرسنجی	۴۸° ۱۷' ۴۷"	۳۸° ۰۴' ۲۸"	۱۵۱۲	۲۰۰۲-۲۰۱۲
سیاه‌پوش	باران‌سنجی	۴۸° ۱۳' ۱۷"	۳۷° ۵۲' ۴۲"	۱۷۴۰	۲۰۰۱-۲۰۱۲
لای	تبخیرسنجی	۴۷° ۵۴' ۲۵"	۳۸° ۰۶' ۵۵"	۲۰۳۸	۲۰۰۲-۲۰۱۲
ننور	تبخیرسنجی	۴۸° ۳۳' ۴۲"	۳۸° ۰۰' ۴۷"	۲۵۰۳	۲۰۰۲-۲۰۱۲
نمین	تبخیرسنجی	۴۸° ۲۸' ۰۳"	۳۸° ۲۴' ۵۱"	۱۴۰۵	۲۰۰۲-۲۰۱۲
نیر	تبخیرسنجی	۴۸° ۰۱' ۰۷"	۳۸° ۰۲' ۲۲"	۱۶۲۳	۲۰۰۲-۲۰۱۲

جدول ۲- مختصات جغرافیایی و مشخصات سدهای موجود در حوزه‌ی آبخیز قره‌سو

نام سد	سال شروع بهره‌برداری	نوع سد	حجم مفید (میلیون متر مکعب)	مختصات جغرافیایی	
				عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
یامچی	۱۳۸۲	خاکی	۸۰	۳۸° ۰۴' ۱۹"	۴۸° ۰۴' ۵۳"
ننور	۱۳۶۶	خاکی	۹	۳۸° ۰۰' ۵۳"	۴۸° ۳۳' ۴۳"
قوری‌چای	۱۳۷۵	خاکی	۱۷/۷۱	۳۸° ۰۴' ۳۰"	۴۸° ۱۷' ۴۴"
شورابیل	۱۳۸۱	سنگی ملاتی	۹/۵	۳۸° ۱۳' ۰۶"	۴۸° ۱۷' ۲۶"
سقرچی	۱۳۸۱	خاکی	۳/۴	۳۸° ۱۳' ۴۲"	۴۸° ۲۸' ۰۸"
کمی‌آباد	۱۳۶۵	خاکی	۳	۳۸° ۱۰' ۰۶"	۴۸° ۲۱' ۰۵"
اینانلو	۱۳۶۵	خاکی	۱/۵	۳۸° ۰۴' ۲۱"	۴۸° ۰۹' ۲۷"
الوجه ۲	۱۳۶۶	خاکی	۱/۴	۳۸° ۰۴' ۳۶"	۴۸° ۲۲' ۴۱"



شکل ۲- نقشه‌ی زیرحوزه‌ها و شبکه‌ی جریان به همراه محل قرارگیری سدهای موجود در حوزه‌ی آبخیز قره‌سو.

کامل، اگر بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ باشد، رضایت‌بخش و اگر کم‌تر از ۰/۳۶ باشد، غیرقابل قبول فرض می‌شود (۱۳). ضرایب تبیین و نش- ساتکلیف به ترتیب در روابط ۴ و ۵ ارائه شده‌اند.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(M_i - \bar{M})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n [M_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i]^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در روابط فوق  $S_i$ : مقادیر شبیه‌سازی شده،  $M_i$ : مقادیر اندازه‌گیری شده،  $\bar{S}$ : متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده،  $\bar{M}$ : متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$ : تعداد داده‌ها می‌باشد.

### نتایج و بحث

مقادیر بهینه‌ی هر یک از پارامترها که در مرحله‌ی واسنجی بر اساس آن‌ها بهترین دقت شبیه‌سازی حاصل شد در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

### آنالیز حساسیت، واسنجی، اعتبارسنجی

شبیه‌سازی بر اساس آمار سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ صورت گرفت که از این ۸ سال دوره‌ی شبیه‌سازی، آمار سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ برای مرحله‌ی واسنجی و آمار سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ برای مرحله اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. مدل بر اساس دبی خروجی از نقطه‌ی خروجی حوزه آبخیز یا به عبارت دیگر بر اساس آمار جریان ایستگاه هیدرومتری درجه یک سامیان واسنجی گردید (۹). برای انجام آنالیز حساسیت روش یک پارامتر در هر بار<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت. در روش OAT در هر بار اجرای مدل یک پارامتر تغییر کرده و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند (۱۸).

### ارزیابی کارایی مدل

برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل از ضرایب تبیین و نش- ساتکلیف استفاده گردید. ضریب تبیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است. ضریب نش- ساتکلیف بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند و مقدار بهینه‌ی این ضریب نیز یک است. عموماً اگر ضریب نش- ساتکلیف بیش‌تر از ۰/۷۵ و مدل عالی و

1- One Factor At a Time (OAT)

جدول ۳- مقادیر بهینه شده‌ی پارامترها در مرحله‌ی واسنجی رواناب ماهانه

نام پارامتر	شرح پارامتر	واحد	مقدار پارامتر
CN2	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی	-	۶۰-۷۰
SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	mmmm <sup>-1</sup>	۰/۳-۰/۴
SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	mmhr <sup>-1</sup>	۱۵-۳۰
SOL_BD	چگالی توده‌ی خاک	gcm <sup>-3</sup>	۱-۱/۲
ESCO	فاکتور جبران تبخیر از خاک	-	۰/۱-۰/۲
SFTMP	دمای بارش برف	C°	۲-۳
SMTMP	دمای ذوب برف	C°	۰-۰/۵
SMFMX	حداکثر نرخ ذوب برف در طول سال	mm/C°-day	۰/۱-۰/۲۵
SMFMN	حداقل نرخ ذوب برف در طول سال	mm/C°-day	۰-۱
ALPHA_BF	ثابت تخلیه‌ی آب زیرزمینی	day	۰/۰۱-۰/۱
RCHRG_DP	درصد نفوذ به سفره‌ی عمیق	-	۰/۲-۰/۴
CANMX	حداکثر نگاهداشت تاج پوشش (برگاب)	mm	۸۰-۹۵

از لایه اشباع یخ‌زده می‌تواند به لایه بعدی نفوذ کند. این جریان در عمقی‌ترین لایه به آب‌های زیرزمینی می‌رسد و پس از یک تأخیر خیلی زیاد به جریان سطحی می‌پیوندد. این فرضیات باعث انتقال زیادی از بارش زمستان به جریان سطحی در اوایل تابستان می‌شود، بنابراین، یکی از دلایل شبیه‌سازی جریان بیش از مقدار مشاهده شده از راه این مدل در اوایل تابستان، می‌تواند فرضیاتی باشد که مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ‌زده و اشباع در نظر می‌گیرد.

ضریب تبیین در مرحله‌ی واسنجی ۰/۳۴، ۰/۶۸ و ۰/۷۰ به دست آمد که به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های پل الماس، سامیان و یامچی است. با توجه به تعداد داده‌های رواناب استفاده شده برای هر ایستگاه، این ضریب برای ایستگاه‌های سامیان و یامچی در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است. مقدار ضریب نش- ساتکلیف برای ایستگاه پل الماس ۰/۰۹ است که این مقدار نشان می‌دهد مدل قادر به شبیه‌سازی رواناب ماهانه در این ایستگاه نبوده است. مقدار این ضریب برای دو ایستگاه یامچی و سامیان به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۵۸ است و نشان‌دهنده این است که مدل به صورت رضایت‌بخشی رواناب ماهانه این ایستگاه‌ها را شبیه‌سازی کرده است. در مجموع، بر اساس نتایج ضرایب ارزیابی، شبیه‌سازی رواناب ماهانه در مرحله واسنجی برای ایستگاه‌های سامیان و یامچی و در مرحله اعتبارسنجی برای ایستگاه‌های یامچی و پل الماس قابل قبول است. ایستگاه پل الماس در نزدیکی شهر اردبیل واقع گردیده است و از رودخانه بالادست آن، برداشت آب برای مصارف مختلف صورت می‌گیرد که آمار دقیق آن در دسترس نیست و به مدل نیز ارائه نشد. این عامل می‌تواند باعث کاهش دقت شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه مذکور شود. دلیل دیگر پایین بودن دقت شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه پل الماس این است که مدل بر اساس دبی خروجی ایستگاه سامیان واسنجی شده است (۹) و انتظار هم می‌رود- به دلیل این‌که در

هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده در مقیاس ماهانه در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج ضرایب ارزیابی مدل نیز در جدول ۴ قابل مشاهده است. توجه به هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که در برخی از ماه‌ها (آوریل ۲۰۰۷، آوریل و می ۲۰۰۹، مارس و آوریل و می ۲۰۱۰ برای ایستگاه سامیان، مارس و آوریل ۲۰۱۰ برای ایستگاه پل الماس) دبی اوج به خوبی شبیه‌سازی نشده است. مدل SWAT توانایی شبیه‌سازی دقیق دبی‌های اوج رودخانه را ندارد. این موضوع در کارهای محققان دیگر نیز چون تولسون و شومیکر (۲۲) و چو و شیرمحمدی (۴) ملاحظه می‌گردد. برای این ضعف نیز دلایلی ذکر شده است که از مهم‌ترین این دلایل می‌توان به ضعف مدل در شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف اشاره کرد (۲۴، ۱۹). اکثر جریان‌هایی که مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نبوده است، در اواخر فصل زمستان و در طول فصل بهار- به خصوص در ماه آوریل- اتفاق افتاده است. مدل SWAT بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب ماهانه ماه‌های پس از فصل سرما که در طی آن‌ها با گرم شدن هوا، برف باریده شده در فصل سرما ذوب می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که مدل قادر به شبیه‌سازی خوب ذوب برف در این منطقه نبوده است و جریان‌های حداکثر را خوب شبیه‌سازی نکرده است.

در مدل SWAT هنگامی که رطوبت موجود در هر لایه خاک از گنجایش زراعی بیش‌تر باشد، مقداری از این آب باعث ایجاد جریان جانبی می‌شود و قسمتی هم به لایه‌ی بعدی نفوذ می‌کند. آب اضافه بر ظرفیت زراعی در عمقی‌ترین لایه‌ی خاک به جریان زیرزمینی می‌پیوندد. اما هنگامی که لایه‌ی خاک یخ زده باشد در این صورت مدل فرض می‌کند که هیچ جریان جانبی اتفاق نمی‌افتد و لایه خاک می‌تواند آب اضافه بر ظرفیت زراعی را تا زمانی که اشباع شود در خود نگه دارد. سپس فرض می‌کند که رطوبت بالغ بر گنجایش زراعی

متعددی بندهای آبی کوچک‌تر، بخش زیادی از رواناب تولید شده در سطح حوزه آبخیز را کنترل و ذخیره می‌کنند تا به مصرف کشاورزی، صنعت و شرب شهری برسد. این شرایط باعث شده است تا ضریب رواناب خروجی در این حوزه آبخیز به حدود پنج درصد برسد. (لازم به ذکر است که ضریب رواناب بر اساس آمار بارش و رواناب در دسترس که از آن‌ها برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد، محاسبه گردید. به این صورت که حجم آب خروجی از حوزه آبخیز از طریق بارش، تقسیم گردید و مقدار ضریب رواناب محاسبه گردید). در حالی که قبل از تعریف سدها در مدل، ضریب رواناب شبیه‌سازی شده در حوزه آبخیز بیش از چهل درصد به دست آمد که این عدد حدود نه برابر مقدار واقعی در منطقه است. این نکته، تاثیر سدها بر تغییرات دبی خروجی از حوزه آبخیز را نشان می‌دهد. یک نکته قابل توجه درباره نقش سد ذخیره‌ی آب در مدل SWAT این است که حداکثر حجم قابل تعریف برای مخزن یک سد ذخیره آب، ۳۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است (۱۵) که حجم زیادی نیست و این در شرایطی است که حجم مخزن سد یامچی حدود ۸۰ میلیون مترمکعب می‌باشد.

با توجه به این که آمار دقیق و قابل اعتمادی از مقدار جریان روزانه خروجی از سرریز سدهای موجود در محدوده‌ی تحت مطالعه در دسترس نبوده است امکان ارائه‌ی این آمارها به مدل و شبیه‌سازی دقیق جریان خروجی میسر نشد و این مسئله تاثیر مستقیم در کاهش دقت شبیه‌سازی داشت.

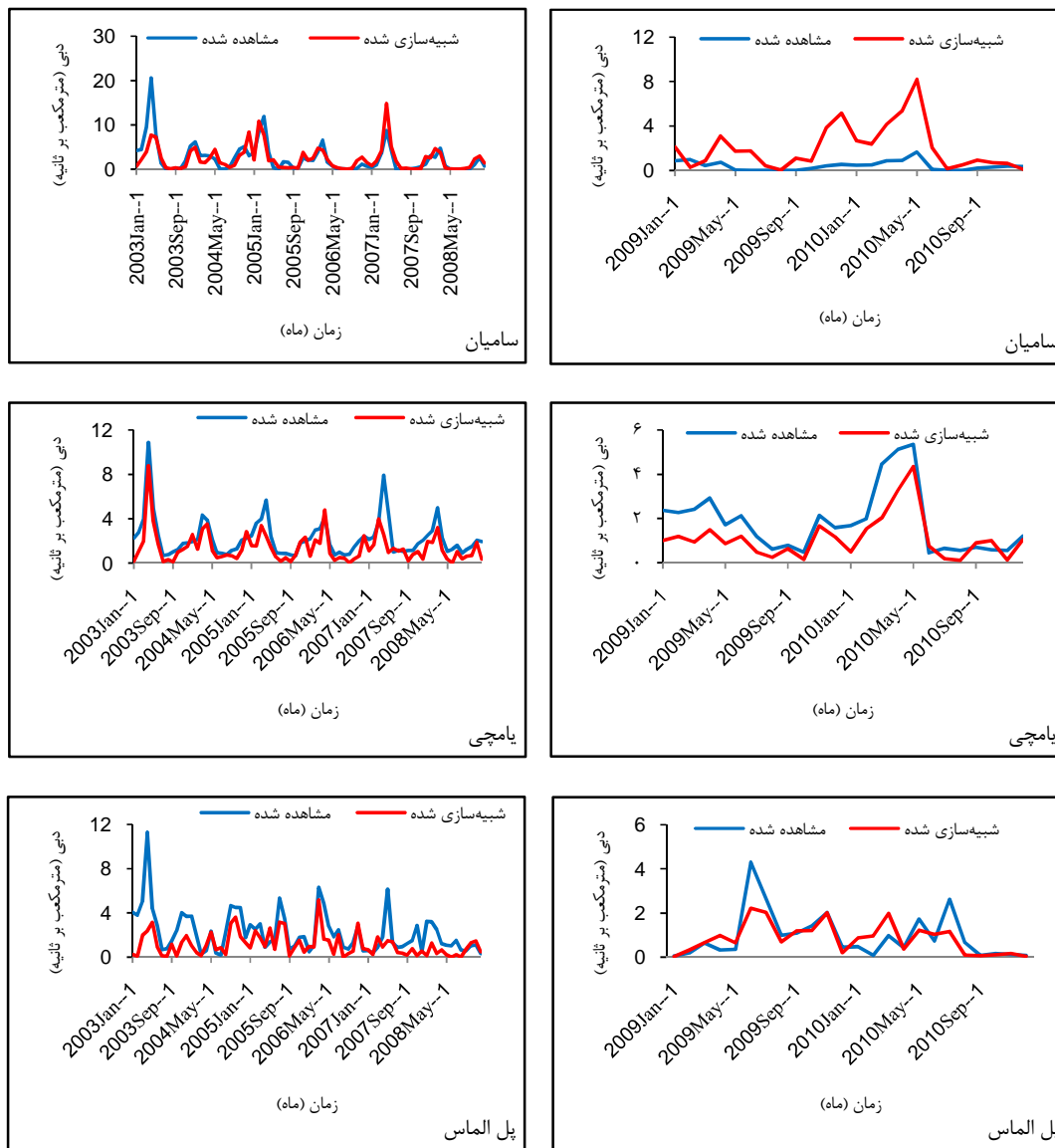
هنگام واسنجی مدل به وضعیت جریان در این ایستگاه توجه شده است، - نتایج آن نیز از دقت بالاتر برخوردار باشد. ولی به دلیل این که ایستگاه پل الماس فاصله‌ی زیادی از ایستگاه سامیان دارد و شرایط جریان رودخانه و عوامل محیطی آن متفاوت است، پارامترهای واسنجی شده در ایستگاه سامیان نتوانسته‌اند باعث شبیه‌سازی مناسب جریان رودخانه در ایستگاه پل الماس شوند. هیوولمنز و همکاران (۹) نیز در تحقیق خود به تغییرات مکانی پارامترهای مدل SWAT و تاثیر آن بر دقت شبیه‌سازی اشاره کرده‌اند. بنابراین در مرحله‌ی واسنجی، شبیه‌سازی در ایستگاه سامیان بالاترین دقت و در ایستگاه پل الماس کمترین دقت را داشته است.

درباره دلیل ضعف نتایج شبیه‌سازی دبی ایستگاه سامیان در مرحله اعتبارسنجی باید گفت همان‌طور که در هیدروگراف مربوط به دبی مشاهداتی ایستگاه سامیان مشخص است، یک روند کاهشی در این داده‌ها دیده می‌شود چرا که این روند در بارش متناظر آن وجود ندارد و انتظار می‌رود که دلیل این کاهش، برداشت آب از اراضی بالادست برای مصارف مختلف باشد که آمار آن در دسترس نبوده و به مدل نیز ارائه نشده است و در نتیجه مقدار دبی شبیه‌سازی شده بیش‌تر از مقدار دبی واقعی به دست آمده است. در ایستگاه‌های دیگر چنین روند کاهشی در دبی جریان وجود ندارد.

مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بر دبی جریان خروجی حوزه‌ی آبخیز قره‌سو را می‌توان سدهای مخزنی موجود در این منطقه دانست. تعداد هشت سد ذخیره آب با حجم مخزن بیش از یک میلیون مترمکعب و تعداد

جدول ۴- نتایج ضرایب ارزیابی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل

مرحله	نام ایستگاه	تعداد داده	R <sup>2</sup>	شاخص‌های آماری
واسنجی	سامیان	۷۲	۰/۶۸	۰/۵۸
	پل الماس	۷۲	۰/۳۴	۰/۰۹
	یامچی	۷۲	۰/۷۰	۰/۵۱
اعتبارسنجی	سامیان	۲۴	۰/۵۳	-۰/۳۳
	پل الماس	۲۴	۰/۶۳	۰/۶۰
	یامچی	۲۴	۰/۸۲	۰/۵۱



شکل ۳- نتایج واسنجی (هیدروگراف سمت چپ، سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸) و اعتبارسنجی (هیدروگراف سمت راست، سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰) جریان ماهانه در ایستگاه‌های هیدرومتری سامیان، پل الماس و یامچی.

### منابع

1. 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. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences (HESS)*, 6: 7581-7609.
2. Beven, K.J. 2001. *Rainfall-Runoff Modelling*. Theprimer, Wiley, Chichester, UK, 361 pp.
3. Chantha, O., S. Sabine and S. Jose-Miguel. 2011. Assessment of Hydrology, Sediment and Particulate Organic Carbon Yield in a Large Agricultural Catchment Using the SWAT Model. *Journal of Hydrology*, 401: 145-153.
4. Chu, T.W. and A. Shirmohammadi. 2004. Evaluation of the SWAT Model's Hydrology Component in the Piedmont Physiographic Region of Maryland. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 47: 1057-1073.



5. Ardabil Regional Water Authority. 1999. Flood Control in Ghareh Su Watershed. Vol 2 (In Persian).
6. Green, W.H. and G.A. Ampt. 1911. The Flow of air and Water through Soils. *Journal of Agricultural Science*, 4: 11-24.
7. Haan, C.T., H.P. Jonson and D.L. Brakensiek. 1982. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 532 pp.
8. Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves and J.P. Riley. 1985. Agricultural Benefits for Senegal River basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111: 113-124.
9. Heuvelmans, G., B. Muys and J. Feyen. 2004. Analysis of the Spatial Variation in the Parameters of the SWAT Model with Application in Flanders, Northern Belgium. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences (HESS)*, 8: 931-939.
10. Lirong, S. and Z. Jianyun. 2012. Hydrological Response to Climate Change in Beijiang River basin Based on the SWAT model. *Journal of Procedia Engineering*, 28: 241-245.
11. Lorrain, M. and H.M. Sechi. 1995. Neural Nets for Modeling Rainfall- Runoff Transformation. *Water Resources Management*, 9: 299-313.
12. Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the Environment. In *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 19<sup>th</sup> Symposium, Swansea, Society of Experimental Biology, Cambridge University Press, 205-234
13. 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.
14. Ndomba, P.M. and B.Z. Birhanu. 2008. Problems and Prospects of SWAT Model Applications in Nilotic Catchments. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine*, 1: 41-52.
15. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and K.W. King. 2002a. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 458 pp.
16. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and K.W. King. 2002b. Soil and Water Assessment Tool: User's Manual. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 412 pp.
17. Priestly, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81-92.
18. Remegio, B. and Jr. Confesor. 2007. Sensitivity Analysis and Interdependence of the SWAT Model Parameters. Written for Presentation at the 2007 ASABE Annual International Meeting Sponsored by American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) Minneapolis Convention Center Minneapolis, Minnesota, Paper number: 072101.
19. Rostamian, R., A. Jaleh, M. Afyun, S.F. Mousavi, M. Heidarpour and K. Abbaspour. 2008. Application of a SWAT Model for Estimating Runoff and Sediment in Two Mountainous Basins in Central Iran. *Journal of Hydrological Science*, 53: 977-988.
20. Santra, P. and B.S. Das. 2013. Modeling Runoff from an Agricultural Watershed of Western Catchment of Chilika Lake through Arc SWAT *Journal of Hydro- Environment Research*, 7: 261-269.
21. Soltani, S. 2002. Evaluation of Neural Networks in Forecasting the Short-Term and Medium-Term Streams Flow. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (In Persian).
22. Tolson, B.A. and C.A. Shoemaker. 2004. Watershed Modeling of the Canyonville Basin Using SWAT2000: Model Development, Calibration and Validation for the Prediction of Flow, Sediment and Phosphorus Transport to the Cannonsville Reservoir. School of Civil and Environmental Engineering, 159 pp.
23. USDA Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook. Hydrology Section 4, Chapters pp: 4-10.
24. Wang, X. and A.M. Melesse. 2005. Evaluation of the SWAT Model's Snowmelt Hydrology in a NORTHWESTERN MINNESOTA WATERSHED. American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 48: 1-18.
25. Zareh, M.R. 1999. Solution and Combining Two-Dimensional Model of Rainfall-Runoff in Watersheds Using Geographic Information Systems. M.Sc. Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, (In Persian).

## **River flow Simulation using SWAT Model (Case study: Ghareh Su River in Ardabil Province-Iran)**

**Foad Naserabadi<sup>1</sup>, Abazar Esmali Ouri<sup>2</sup>, Husain Akbari<sup>3</sup> and Rokhsareh Rostamian<sup>4</sup>**

1- M.Sc. Student, University of Mohaghegh Ardabili (Corresponding author: foadnaserabadi@yahoo.com)

2- Assistant Professor, University of Mohaghegh Ardabili

3- PhD. Student, Tarbiat Modares University

4- PhD. Student, Isfahan University of Technology

Received: December 9, 2013      Accepted: March 7, 2015

### **Abstract**

Simulation of stream flow, prediction of the hydrological behavior of watersheds and understanding of various components of the hydrological cycle is important in order to plan for protection of water resources. On the other hand, lack of proper estimation of runoff in the watersheds, may cause serious problems in the optimum management of water resources and particularly the utilization of dams and water transfer systems. The main objectives of present study were application and test the performance of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) as a simulator of monthly stream flow in the Ghareh Su watershed with an area of 4062 km<sup>2</sup>. The simulation was carried out using flow data from the Samian, Pol Almas and Yamchi hydrometric stations for 8-hydrological years (from January 2003 to December 2010), where data for the six years (from January 2003 to December 2008) were used as a calibration period and validation period was done for two years (from January 2009 to December 2010). The performance of the model was evaluated by coefficient of determination ( $R^2$ ) and Nash-Sutcliffe efficiency ( $E_{NS}$ ). The  $R^2$  values in Yamchi, Samian and Pol Almas hydrometric stations during the calibration and validation periods were 0.70, 0.68, 0.34 and 0.82, 0.53, 0.63, respectively. The  $E_{NS}$  values were 0.51, 0.58, 0.09 and 0.51, -0.33, 0.60, respectively. The statistical analysis showed a satisfactory agreement between observed and simulated monthly discharge values, in Yamchi hydrometric station during the calibration and validation periods. The weakness of the model to simulate flow for some months was probably due to a poor characterization of snowmelt processes, the discordance between model assumptions with flow transmission in frozen and saturated layers, lack of sufficient discharge data, and lack of input data for simulation of groundwater recharge and groundwater-river interaction.

**Keywords:** Calibration, Ghareh Su watershed, Runoff, Validation, SWAT model