



دانشگاه گوارزی و منابع طبیعی گوارز

#مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد شانزدهم، شماره سوم، ۲۸۸#
www.gau.ac.ir/journals

ارزیابی عملکرد مدل SWAT در حوضه آبریز زاینده رود

بهنام آبابایی^۱ و *تیمور سهرابی^۲

^۱ کارشناس ارشد گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، آستاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۲/۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۸/۲۰

چکیده

حیات استان اصفهان وابسته به زاینده رود می‌باشد. بنابراین حفظ کیفیت و کمیت آب این رودخانه دارای اهمیت فراوان است. در این راستا، اولین قدم برای اتخاذ شیوه‌های صحیح و پایدار مدیریت منابع آب زاینده رود، کسب آگاهی مستمر از وضعیت کمی و کیفی آب، تغییرات زمانی و مکانی آن و بالاخره مشخص نمودن منابع اصلی و انواع آلوده‌کننده‌های آب رودخانه می‌باشد. یکی از مدل‌هایی که به این منظور در سطح بین‌المللی مورد استفاده گسترده قرار دارد، مدل SWAT می‌باشد. اولین گام در استفاده از این مدل‌ها، اثبات توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی چرخه آبی حوضه است. هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد مدل SWAT در رابطه با شبیه‌سازی دبی جریان رودخانه زاینده رود می‌باشد. در مرحله اول، مدل با استفاده از اندازه‌گیری‌های شدت جریان در ۴ ایستگاه قلعه شاهرخ، سد زاینده رود، پل کله و ورزنه واسنجی گردید که با توجه به پارامترهای ضریب راندمان (COE) بین ۸۰/۱-۶۰/۲ درصد، راندمان NS بین ۷۹-۵۹/۴ درصد و ضریب همبستگی (R^2) بین ۸۲-۷۲/۶ درصد و با توجه به نتایج بررسی‌های گذشته و کیفیت داده‌های استفاده شده در این پژوهش، قابل قبول ارزیابی گردید. در مرحله اعتبارسنجی، مقادیر ضریب راندمان، راندمان NS و ضریب همبستگی به ترتیب در حدود ۷۲-۶۰/۴، ۶۹-۶۰/۱ و ۷۰/۸-۶۴/۷ درصد برای ایستگاه‌های مختلف برآورد شدند. بهترین نتایج در ایستگاه پل کله و ضعیف‌ترین نتایج در ایستگاه قلعه شاهرخ به دست آمد. نتایج کلی واسنجی نشان می‌دهد که مدل SWAT می‌تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه‌سازی شدت جریان رودخانه باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل SWAT، اعتبارسنجی، واسنجی، رودخانه زاینده رود، اصفهان

* مسئول مکاتبه: myousef@ut.ac.ir

مقدمه

مدیریت صحیح حوضه‌های آبخیز کشور یکی از مهم‌ترین روش‌های استفاده بهینه از منابع آب و خاک می‌باشد. برای این کار، نیاز به اطلاعات جامع از روش‌های متفاوت مدیریتی و اجرایی است. در کشور ما بیشتر حوضه‌های آبخیز، به‌ویژه حوضه‌های آبخیز کوهستانی، فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری به تعداد کافی می‌باشند که این امر هر گونه برنامه‌ریزی عمرانی و مدیریتی را با مشکل و یا حتی با شکست مواجه می‌سازد. برای مقابله با این مسأله، دست‌اندرکاران و محققان آب و آبیاری راه‌حل‌های مختلفی نظیر فرمول‌های تجربی و مدل‌های ریاضی و کامپیوتری عرضه کرده‌اند که تاکنون هیچ کدام نتوانسته راه‌حل مطلوبی ارائه دهند. عقیده بر این است که شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیک در حوضه‌های آبخیز می‌تواند راه‌حل بهینه‌ای برای آنها باشد.

چو و شیرمحمدی (۲۰۰۴) با به‌کار بردن مدل SWAT برای یک حوضه ۳۴۰ هکتاری در ناحیه کوهپایه‌ای مریند^۱ و استفاده از آمار ۶ ساله هیدرولوژیک و غلظت کودهای موجود در آب، مدل را واسنجی نمودند. نتایج نشان داد که مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی بسیار مرطوب نیست. اما در مجموع SWAT یک مدل حوضه‌ای مناسب برای شبیه‌سازی درازمدت اهداف مدیریتی است. عباسپور و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از مدل SWAT برای شبیه‌سازی تمام فرایندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه غذایی در حوضه تور^۲ کشور سوئیس نتایج بسیار خوبی برای شبیه‌سازی رواناب و نترات و نتایج به نسبت خوبی برای شبیه‌سازی دو هفته یکبار رسوب و کل فسفر به‌دست آوردند. سان و کورنیش (۲۰۰۵) با استفاده از مدل SWAT مطالعه‌ای را روی دبی رودخانه در دشت‌های لیورپول در کشور استرالیا انجام دادند که نتایج این مطالعه نشان داد مدل SWAT می‌تواند به‌خوبی دبی رودخانه را پیش‌بینی کرده و در مقایسه با روش‌های مدل‌سازی منابع نقطه‌ای، نتایج بهتری را به‌دست دهد. گوساین و همکاران (۲۰۰۵) توانایی مدل را برای پیش‌بینی میزان جریان بازگشتی بعد از استفاده از کانال‌های آبیاری در منطقه آندرا پرادش^۳ در کشور هند بررسی کرده و نتیجه گرفتند که SWAT ابزار مورد نیاز در طراحی و مدیریت منابع آب را در اختیار قرار می‌دهد. وان لیو و همکاران (۲۰۰۳) توانایی مدل SWAT در تخمین شدت جریان تحت شرایط آب و هوایی مختلف را در سه زیرحوضه از ایالت اوکلاهوما^۴ آمریکا بررسی کردند و دریافتند که مدل SWAT می‌تواند به‌خوبی

1. Maryland
2. Thur
3. Andra Pradesh, India

بهنام آبایی و تیمور سهرابی

مقدار رواناب روزانه در هر زیرحوضه را تحت شرایط خشک، معتدل و مرطوب پیش‌بینی کند. آرنولد و همکاران (۱۹۹۹) مدل SWAT را با نرم‌افزار GIS تلفیق کردند تا شدت جریان و جابه‌جایی رسوب را در ایالت تگزاس آمریکا (حوضه گولف^۱) شبیه‌سازی نمایند. متوسط شدت جریان‌های ماهانه پیش‌بینی شده توسط مدل در این تحقیق ۵ درصد بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده بود. بورا و برا (۲۰۰۳) و بورا و برا (۲۰۰۴) پس از مقایسه مدل SWAT با چندین مدل دیگر (که در مقیاس حوضه‌ای کاربرد دارند) نتیجه گرفتند که این مدل نتایج امیدوارکننده‌ای در شبیه‌سازی پیوسته حوضه‌های تحت کشاورزی به دست می‌دهد. وانگ و ملس (۲۰۰۵) عملکرد مدل SWAT را از نقطه نظر شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف در حوضه وایلد رایس^۲ در مینه‌سوتای شمالی ارزیابی کرده و نبود شبیه‌سازی دقیق دبی‌های اوج رودخانه را به عملکرد نه‌چندان مناسب مدل در شبیه‌سازی ذوب برف به‌ویژه در حوضه‌ها و سال‌های با برف انباشت^۳ کمتر نسبت داده‌اند. رستمیان (۲۰۰۷) در حوضه بهشت‌آباد (واقع در کارون شمالی) با استفاده از مدل SWAT اقدام به برآورد مقادیر دبی و بار رسوب کرده و دریافت که مدل SWAT در برآورد دبی رودخانه عملکرد مناسبی داشته، اما در شبیه‌سازی دبی‌های اوج رودخانه موفقیتی نداشته است. همچنین توانایی مدل در برآورد بار رسوب را در حد متوسط ارزیابی نمود.

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیک حوضه زاینده رود از نظر برآورد دبی رودخانه زاینده رود بود. به این منظور، از مدل SWAT که یک مدل بزرگ مقیاس است و به ورودی‌های زیادی نیاز دارد، برای شبیه‌سازی دبی جریان در رودخانه زاینده رود در ۴ ایستگاه آبسنجی استفاده شد. از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم بسیاری از پارامترها در مقیاس حوضه‌ای مشکل، و یا حتی امکان‌پذیر نیست، مدل برای حوضه مورد نظر واسنجی شد و سپس عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

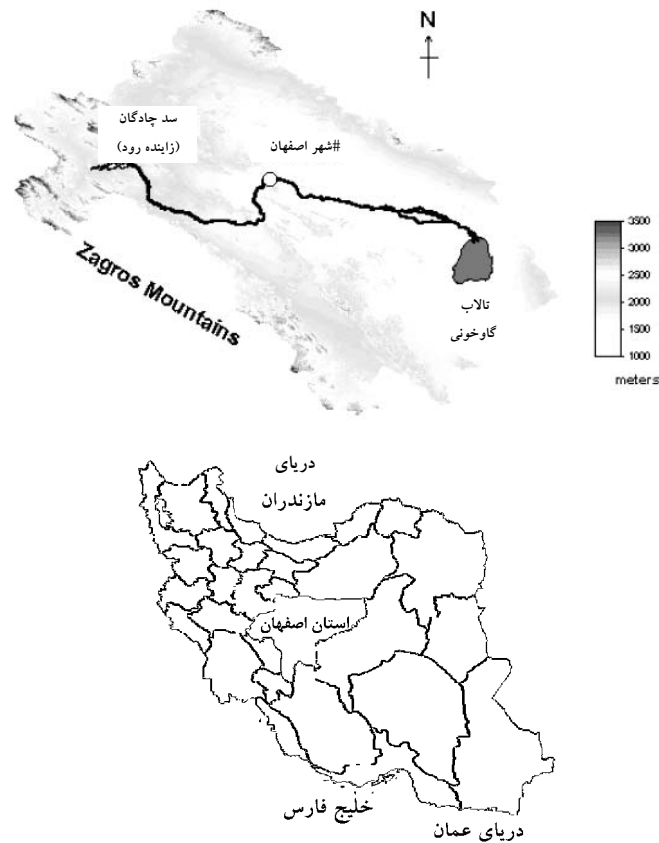
مواد و روش‌ها

معرفی حوضه زاینده رود^۴: حوضه زاینده رود با وسعت ۴۱۵۰۰ کیلومترمربع در مرکز فلات ایران واقع شده است (شکل ۱- الف). در این حوضه تنها مناطق بالادست سد چادگان (زاینده رود، شکل

1. Gulf
2. Wild Rice
3. Snow Pack

۴. برگرفته از گزارش‌های انستیتوی مدیریت بین‌المللی آب (IWMI) در مورد حوضه زاینده رود

۱-ب) سهم قابل توجهی در جریانات رودخانه زاینده رود ایفا می‌کنند. در پایین دست این سد، تقریباً هیچ جریان ورودی به رودخانه وجود ندارد و جریانات کوچکی که وجود دارند نیز به حدی گاه به گاه و نامنظم هستند که امکان بهره‌برداری از آن‌ها به صورت برنامه‌ریزی شده وجود ندارد. حوضه آبرگیر بالادست سد، حدود ۴۰۰۰ کیلومتر مربع، یا کمتر از ۱۰ درصد کل حوضه را دربر می‌گیرد. این قسمت، کوهستانی و دارای قله‌هایی تا حدود ۳۵۰۰ متر ارتفاع می‌باشد. مقدار آب مصرفی در حوضه آبرگیر بالادست سد چادگان نسبت به سایر نقاط بسیار کمتر است. برخلاف این‌که در این نواحی جنگل‌های طبیعی یافت می‌شوند، اما اغلب نواحی مرتفع را اراضی بایر و بی آب و علف تشکیل می‌دهند. بخش‌های پایینی و مرکزی حوضه نیز، مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشند. چشم‌انداز غالب این منطقه، شامل مخروط افکنه‌هایی با شیب ملایم به همراه بسترهای خشکی است که در هنگام طوفان‌های نادر، پر از آب حاصل از سیلاب می‌شوند. پوشش گیاهی این منطقه بیشتر بوته‌های خاردار کم پشت و علف‌های مقاوم در برابر خشکسالی می‌باشد. همچنین بخش زیادی از منطقه را نیز خاک‌ها و صخره‌های برهنه تشکیل می‌دهند. این حوضه در نهایت به باتلاق گاوخونی که یک کفه نمکی طبیعی است ختم می‌شود. اغلب نواحی اطراف این باتلاق را نواحی شنی تشکیل می‌دهند و تنها در قسمت شرقی آن، مناطق تپه ماهوری قرار گرفته‌اند. آبی که وارد منطقه باتلاقی می‌شود، بسیار شور است و هدایت الکتریکی آن در دوره‌های کم آبی رودخانه، تا ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر می‌رسد (سالمی و همکاران، ۲۰۰۰). حوضه زاینده رود، به‌طور عمده دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک بیابانی می‌باشد. اصفهان در ارتفاع ۱۸۰۰ متری از سطح دریا قرار گرفته و باران در آن به‌طور متوسط ۱۳۰ میلی‌متر در سال بوده و بیشتر بارندگی در ماه‌های دسامبر تا آوریل (فصل زمستان و اوایل بهار) روی می‌دهد. در طول تابستان، باران مؤثری وجود ندارد. معمولاً دو نوع الگوی کشت در حوضه زاینده رود اجرا می‌شود. محصولات تابستانه شامل سیب زمینی، برنج و سبزیجات و محصولات زمستانه شامل گندم، جو و سبزیجات می‌باشند. همچنین، برخی کشت‌های یکساله یا چند ساله دیگر نیز کشت می‌شوند که از آن جمله، یونجه، باغ‌های میوه و چغندر قند می‌باشند.



شکل ۱- (الف) موقعیت استان اصفهان در ایران، (ب) حوضه رودخانه زاینده رود.

معرفی مدل SWAT: SWAT¹ مدلی در مقیاس حوضه آبرگیر می‌باشد که توسط آرنولد و همکاران (۱۹۹۸) ارائه شده است. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت زمین‌ها بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی- کشاورزی در سطح حوضه‌های آبرگیر پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری زمین‌ها و شرایط مختلف مدیریتی در درازمدت طراحی شده است. مدل SWAT، به جای ضمیمه کردن روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، مدل نیازمند اطلاعاتی در مورد آب و هوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری

زمین‌ها در سطح حوضه می‌باشد. فرآیندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوبات، رشد گیاه، چرخه مواد مغذی و... در این مدل به‌طور مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند. مزایای این روش این است که حوضه‌هایی که فاقد داده‌های برداشت شده می‌باشند نیز قابل شبیه‌سازی هستند. همچنین تأثیر نسبی داده‌های ورودی (تغییر در روش‌های مدیریتی، آب و هوا، پوشش گیاهی و...) 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. شبیه‌سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده و با راهکارهای مختلف مدیریتی بدون صرف زمان زیادی قابل اجراست. این مدل کاربر را قادر به مطالعه تأثیرات بلندمدت می‌سازد. بسیاری از فرآیندهایی که اکنون مورد نظر کاربر هستند، شامل تجمع تدریجی آلاینده‌ها و تأثیر آب‌های پایین‌دست نیز می‌شوند. برای مطالعه این مسائل، خروجی‌های مدل باید چندین دهه را شامل شوند. برای شبیه‌سازی، یک حوضه باید به تعدادی زیرحوضه تقسیم شود. استفاده از زیرحوضه‌ها در شبیه‌سازی، به‌خصوص 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.

اطلاعات مربوط به هر زیرحوضه به این صورت طبقه‌بندی می‌شوند: (۱) آب و هوا؛ (۲) واحدهای عکس‌العمل هیدرولوژیک (HRU)؛ (۳) برکه‌ها/ مرداب‌ها؛ (۴) آب زیرزمینی؛ (۵) آبراهه اصلی (که هر زیرحوضه را زهکشی می‌کند). واحدهای واکنش هیدرولوژیکی (HRU ها)، زمین‌های یک‌پارچه‌ای هستند که دارای پوشش، خاک و مدیریت یکسانی می‌باشند.

بدون توجه به نوع مسأله‌ای که توسط مدل SWAT مطالعه می‌شود، بیان آبی نیروی محرک هر پدیده‌ای است که در سطح حوضه روی می‌دهد. برای پیش‌بینی دقیق جابه‌جایی آفت‌کش‌ها، رسوبات و مواد مغذی، چرخه هیدرولوژیک که توسط مدل شبیه‌سازی می‌گردد، باید با آنچه که در واقعیت وجود دارد همخوانی داشته باشد. چرخه هیدرولوژیک که در مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود، براساس معادله بیان آب استوار است.

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

1. Hydrologic Response Units

که در این معادله، SW_t مقدار نهایی رطوبت خاک (میلی متر آب)، SW_0 مقدار اولیه رطوبت خاک (میلی متر آب)، t زمان (روز)، R_{day} مقدار بارش در روز i ام (برحسب میلی متر آب)، Q_{surf} مقدار رواناب در روز i ام (میلی متر آب)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی متر آب)، W_{seep} مقدار نشت که در روز i ام از نیمرخ خاک وارد منطقه غیراشباع می شود (میلی متر آب) و Q_{gw} مقدار آب بازگشتی در روز i ام (میلی متر) می باشد. تفکیک حوضه به زیرحوضه ها، مدل را قادر می سازد تا تفاوت در مقدار و شدت تبخیر و تعرق را برای گیاهان و خاک های مختلف را منعکس کند. رواناب در هر HRU به طور مستقل محاسبه و روندیابی می شود 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 به دست می دهد.

اطلاعات مورد نیاز مدل: با توجه به تغییرات مکانی بافت خاک و کاربری زمین ها و وضعیت توپوگرافی منطقه، حوضه رودخانه زاینده رود به ۱۴ زیر حوضه تقسیم گردید (شکل ۲). همچنین اطلاعات اقلیمی مربوط به ۱۶ ایستگاه هواشناسی در سطح استان های اصفهان و فارس مورد استفاده قرار گرفتند. براساس نقشه بافت خاک مورد استفاده، ۸ کلاس بافت خاک در سطح حوضه شناسایی شدند که مشخصات آن ها در جدول ۱ آورده شده است. همچنین براساس اطلاعات به دست آمده از نقشه کاربری زمین های حوضه، در حدود ۶ درصد از زمین ها جزو زمین های کشاورزی، حدود ۲ درصد مناطق مسکونی و باقی زمین ها پوشیده از مرتع، بیابان و جنگل می باشند.

جدول ۱- کلاس های بافت خاک حوضه زاینده رود.

نام بافت خاک در مدل	نوع بافت خاک	درصد تحت پوشش
Yk38-3a-3609	لوم رسی	۲۶/۸۶ درصد
I-Rc-Yk-c-3508	لوم	۵۲/۰۱ درصد
Xk5-2-3a-3578	لوم رسی	۵/۱۴ درصد
I-Re-Yh-c-3129	لوم	۱/۸۲ درصد
Yk35-3a-3604	لوم رسی	۷/۶۷ درصد
Zo21-3a-3328	لوم رسی	۲/۵۹ درصد
Rc38-1a-3554	شن	۰/۰۴ درصد
I-Rc-Xk-c-3122	لوم	۳/۸۷ درصد



شکل ۲- موقعیت زیرحوضه‌ها در مدل SWAT

از آنجایی که اطلاعات تدوین شده و جامعی در مورد الگوی کشت در سطح استان در این منطقه در اختیار قرار ندارد و همچنین به دلیل دقت پایین نقشه‌های کاربری زمین‌ها، با قبول فرضیه‌های زیر، سناریوی زراعی مبنا در منطقه تعریف گردید: (۱) فرض شد که تمامی زمین‌های زراعی منطقه تحت کشت گندم (زمستانه و بهاره) هستند. طبق آمارهای وزارت جهاد کشاورزی و مهندسان مشاور جاماب، بیش از ۴۰ درصد از زمین‌های استان زیر کشت این محصول قرار دارند. بنابراین این فرض تا حد امکان به شرایط واقعی منطقه نزدیک می‌باشد؛ (۲) فرض شد که گیاه از نظر آبیاری و مصرف کود (در سناریوی مبنا) تحت هیچ استرسی قرار نداشته و رشد آن کامل است.

در ضمن میزان فعلی مصرف کود در سطح استان براساس گزارش‌های وزارت جهاد کشاورزی، ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره و ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار کودهای فسفره در نظر گرفته شد.

تحلیل حساسیت و واسنجی مدل: مدل SWAT سعی می‌کند تا فرآیندهای هیدرولوژیک حوضه را تا حد امکان به صورت فیزیکی و واقعی شبیه‌سازی نماید. توجه به این موضوع مهم این است که این مدل، یک مدل پارامتریک نیست و از روش‌های بهینه‌سازی به منظور تطبیق با مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده نمی‌کند. در عوض، برخی پارامترهای خاص که تعریف فیزیکی دقیقی ندارند (مانند شماره منحنی رواناب) تا حدی تعدیل می‌شوند که نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده انطباق داشته باشند.

پارامترهای فراوانی در نتایج مدل دخالت دارند و لازم است پارامترهایی که خروجی مدل به دقت آنها حساسیت بیشتری دارد مشخص شوند (آنالیز حساسیت) و در واسنجی مدل، تنها از این پارامترها استفاده شود. به این ترتیب در زمان لازم برای انجام عملیات واسنجی صرفه‌جویی ایجاد می‌گردد. با استفاده از داده‌های دبی جریان متوسط ماهانه بین سال‌های ۱۹۹۲-۱۹۹۵، تحلیل حساسیت مدل انجام و تعداد ۲۰ پارامتر با بیشترین حساسیت انتخاب شدند. نتایج تحلیل حساسیت در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج این جدول برمی‌آید، عمده تغییرات به‌منظور واسنجی شدت جریان شامل تغییر در شماره منحنی رواناب (CN)، مقدار رطوبت (AWC) و دیگر مشخصات خاک بوده است. پارامترهای مربوط به آب زیرزمینی نیز بر مقدار آب بازگشتی تأثیرگذار می‌باشند.

با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده شدت جریان متوسط ماهانه بین سال‌های ۱۹۹۲-۱۹۹۵، در ۴ ایستگاه به نام‌های قلعه شاهرخ، سد زاینده رود، پل کله و ورزنه اقدام به واسنجی مدل گردید (سال ۱۹۹۱ به‌عنوان دوره Warm-up در نظر گرفته شد). به‌منظور تحلیل کیفیت نتایج مدل، از ۳ شاخص آماری، ضریب راندمان (COE)، ضریب تعیین (R^2) و راندمان نش-ساتکلیف^۱ (NS) استفاده شد. ضریب تعیین نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تا چه میزان به بیشترین مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا ۱ تغییر می‌کند. راندمان NS به‌عنوان تابع هدف در هنگام واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است و نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب ۱ (خط اریب با شیب ۱:۱) نزدیک است. مقادیر ضریب راندمان نیز بین صفر و یک متغیر است. روابط مربوط به محاسبه این پارامترها به شرح زیر می‌باشند:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s) \right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (3)$$

$$COE = 1 - \frac{\sum_i |Q_{m,i} - \bar{Q}_m|}{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2} \times \frac{n}{n-1} \quad (4)$$

1. Nash-Sutcliffe

در این رابطه‌ها، $Q_{m,i}$ مقادیر اندازه‌گیری شده، $Q_{s,i}$ مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل، \bar{Q}_m متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{Q}_s متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد. تاکنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب برای این پارامترها ارائه نشده است. اما گاسمن و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی جامع تعداد بسیار زیادی از بررسی‌های انجام گرفته با استفاده از مدل SWAT اظهار می‌دارند که برای مقیاس زمانی ماهانه، بهتر است مقادیر NS از ۵۰ درصد بیشتر باشد. همچنین سانتی و همکاران (۲۰۰۱) پیشنهاد می‌کنند که مقادیر NSE باید از ۵۰ درصد بزرگتر باشد تا بتوانیم در مقیاس ماهانه، نتایج مدل برای مطالعات هیدرولوژیک و همچنین شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با انتقال آلاینده‌ها قابل قبول قلمداد گردند که معمولاً همین معیار برای مقدار پارامتر R^2 نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۲- نتایج تحلیل حساسیت مدل.

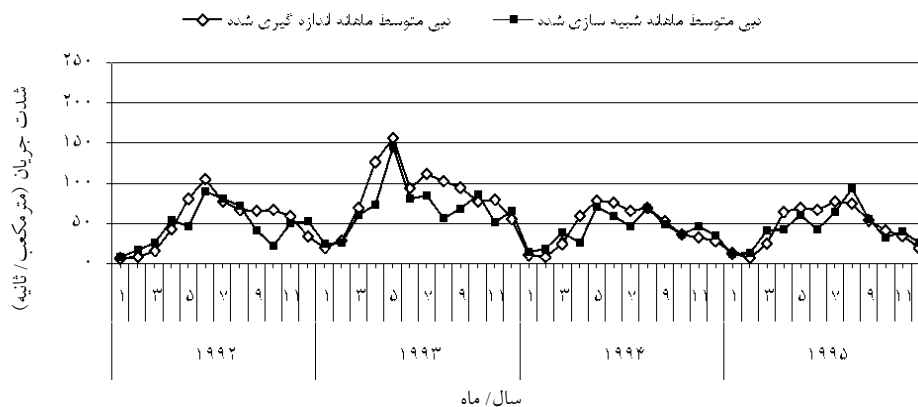
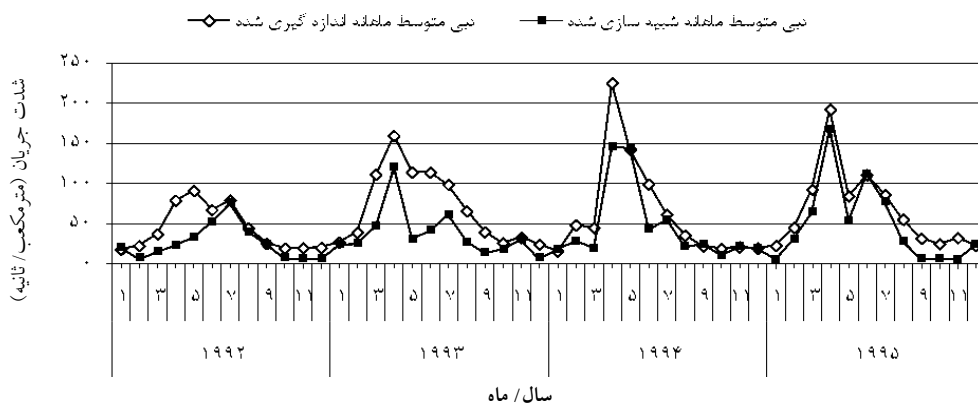
پارامتر	درجه حساسیت	شرح پارامتر
CN2	۱	شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط
SOL_AWC	۲	رطوبت قابل استفاده لایه‌های خاک
ESCO	۳	فاکتور جبران‌کننده تبخیر از خاک
SOL_Z	۴	عمق لایه‌های خاک
SOL_K	۵	هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های خاک
SMTMP	۶	دمای آستانه ذوب برف
CANMX	۷	حداکثر میزان برگاب
GWQMN	۸	حداقل عمق مورد نیاز سطح ایستابی در سفره‌های کم عمق برای وقوع جریان بازگشتی
ALPHA_BF	۹	پارامتر آلفا در جریان بازگشتی
SMFMX	۱۰	فاکتور ذوب برف در تاریخ ۲۱ ژوئن
SURLAG	۱۱	ضریب تأخیر رواناب سطحی
BIOMIX	۱۲	راندمان اختلاط بیولوژیک
SLSUBBSN	۱۳	متوسط طول شیب زمین
SLOPE	۱۴	شیب هر HRU
SFTMP	۱۵	دمای آستانه وقوع بارندگی به صورت برف
SMFMN	۱۶	فاکتور ذوب برف در تاریخ ۲۱ دسامبر
SOL_BD	۱۷	جرم مخصوص ظاهری لایه‌های خاک
SOL_ALB	۱۸	ضریب بازتاب لایه‌های خاک (آلبدو)
CH_N	۱۹	ضریب مانینگ برای آبراهه اصلی زیرحوضه
EPCO	۲۰	فاکتور جبران جذب آب توسط گیاه

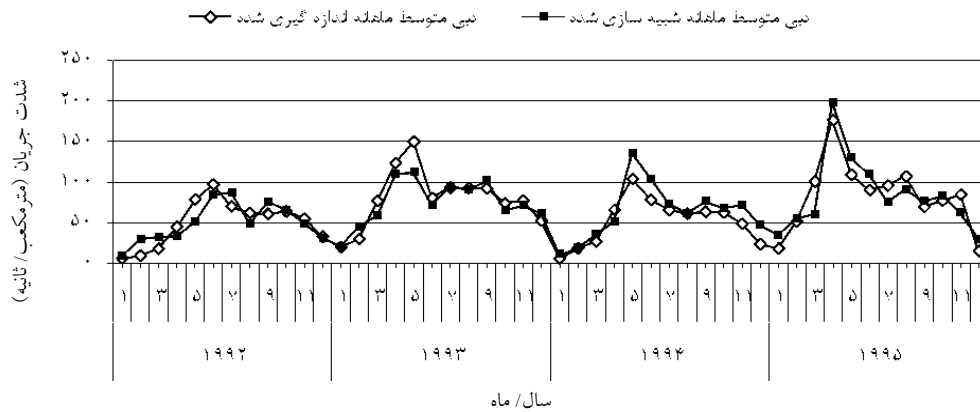
نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل، همبستگی مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده شدت جریان در روخانه زاینده رود از خود نشان می‌دهند (جدول ۳). با مراجعه به شکل‌های ۳ تا ۶ مشخص می‌شود که در اکثر ماه‌های سال، نتایج مدل از مقادیر اندازه‌گیری شده تا حدودی کمتر است. در شکل ۳ مربوط به ایستگاه قلعه شاهرخ، نتایج مدل در اکثر ماه‌های سال انطباق به نسبت خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده داشته‌اند، اما در بین ماه‌های مارس تا ژوئن (اوایل تا اواخر بهار) این انطباق چندان مشاهده نمی‌شود. این مسأله در سایر ایستگاه‌ها نیز قابل مشاهده است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه تشریح نمود که مدل توانایی شبیه‌سازی دقیق دبی‌های اوج رودخانه را ندارد که این موضوع در کارهای محققان دیگر چون اسپرویل و همکاران (۲۰۰۰) و چو و همکاران (۲۰۰۲) ملاحظه می‌گردد. برای این ضعف دلایلی نیز ذکر شده که از مهم‌ترین این دلایل، می‌توان به ضعف مدل در شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف اشاره کرد (وانگ و ملس، ۲۰۰۵؛ رستمیان، ۲۰۰۷). این موضوع به‌خصوص در مناطق کوهستانی از اهمیت بیشتری برخوردار است. هر چند که استان اصفهان در واقع منطقه‌ای غیرکوهستانی محسوب می‌شود، اما سرچشمه (آبخیز) رودخانه زاینده رود در مناطق کوهستانی زاگرس واقع شده است. بنابراین منطبق نبودن مقادیر یاد شده در فصل بهار را می‌توان به نبود شبیه‌سازی دقیق فرآیند ذوب برف در کوهستان‌های واقع در سرچشمه رودخانه زاینده رود و همچنین نبود شبیه‌سازی دقیق جریان‌های پیک رودخانه نسبت داد. از جمله دلایل دیگر، می‌توان به معرف نبودن ایستگاه‌های هواشناسی استان و سطح وسیع استان در مقایسه با تعداد ایستگاه‌های هواشناسی، وجود ارقام از قلم افتاده و کوتاه بودن دوره آماری در برخی ایستگاه‌های آبسنجی نیز اشاره کرد. ضعف‌ترین عملکرد مدل در ایستگاه اول (قلعه شاهرخ) و بهترین نتیجه مربوط به ایستگاه پل کله می‌باشد. این موضوع خود می‌تواند تأکیدی بر ضعف مدل در شبیه‌سازی جریان‌های ناشی از ذوب برف باشد. زیرا با پیشروی به سوی پایین‌دست رودخانه، از سهم این جریان‌ها کاسته شده و به سهم زه‌آب زمین‌های مجاور افزوده می‌شود و مدل، این جریان‌ها را بهتر شبیه‌سازی می‌کند. افت کیفیت عملکرد مدل در ایستگاه آخر، بیشتر به دلیل کاهش شدید شدت جریان و فاصله زیاد این ایستگاه با ایستگاه ماقبل (پل کله) می‌باشد که خود سبب کاهش کیفیت واسنجی مدل شده است. در مجموع، نتایج مدل در تمامی ایستگاه‌ها در محدوده قابل قبول و به نسبت قابل قبول ارزیابی می‌شوند.

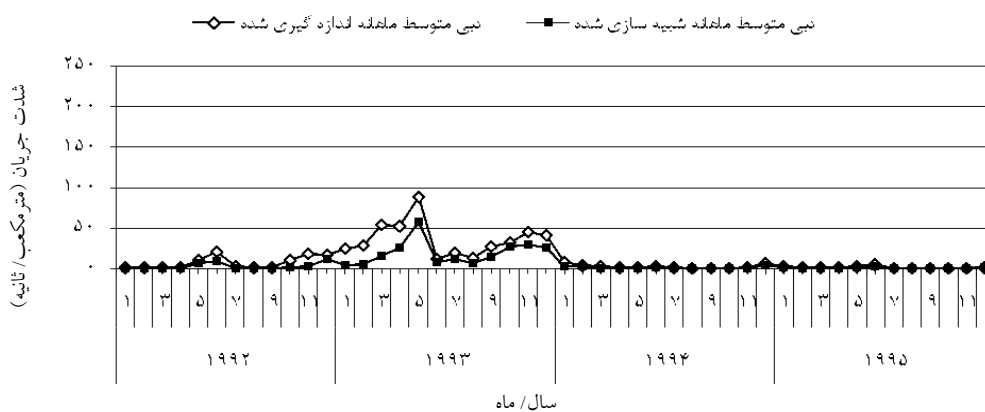
جدول ۳- خلاصه نتایج مدل در مرحله واسنجی.

ایستگاه	طول دوره آماری	COE درصد	NS درصد	R2 درصد
قلعه شاهرخ	ماه ۴۸	۶۰/۲	۵۹/۴	۷۹/۴
سد زاینده رود	ماه ۴۸	۶۹	۶۸/۲	۷۲/۶
پل کله	ماه ۴۸	۸۰/۱	۷۹	۸۰/۳
ورزنه	ماه ۴۸	۶۶/۳	۶۵/۶	۸۳





شکل ۵- نتایج واسنجی مدل در ایستگاه پل کله.



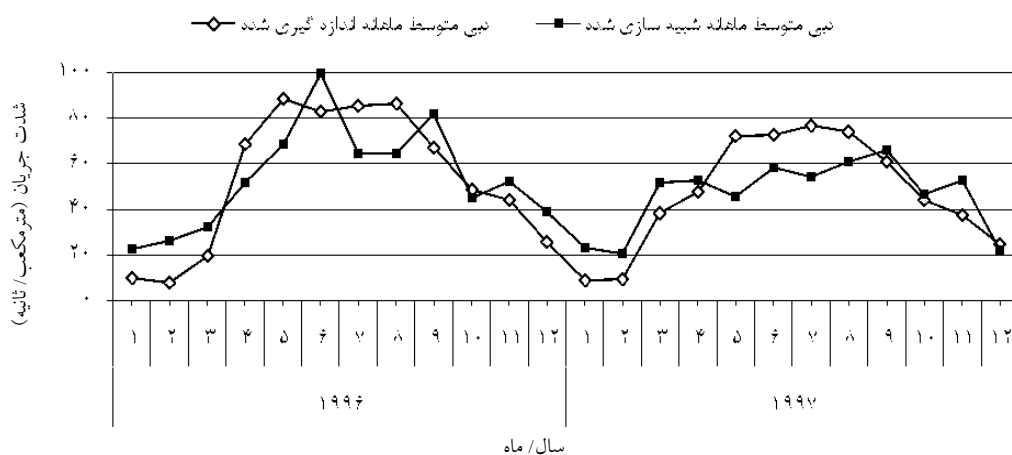
شکل ۶- نتایج واسنجی مدل در ایستگاه ورزنه.

برای اعتبارسنجی مدل از مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج مدل در سال‌های ۱۹۹۶-۱۹۹۷ استفاده شد. نتایج این اعتبارسنجی در شکل‌های ۷ تا ۱۰ ارائه شده است. کیفیت برازش مدل در دوره اعتبارسنجی تا اندازه‌ای نسبت به دوره واسنجی کاهش یافته است. آنچه در بخش گذشته در مورد عملکرد نه چندان قابل قبول مدل در فصل بهار یاد شد، در دوره اعتبارسنجی نیز مصداق دارد. شاخص‌های ارزیابی مدل در مرحله اعتبارسنجی در جدول ۴ ارائه شده‌اند. در دوره اعتبارسنجی در ایستگاه ورزنه، به دلیل کاهش دبی جریان، شبیه‌سازی مدل از کیفیت قابل توجهی برخوردار نمی‌باشد.

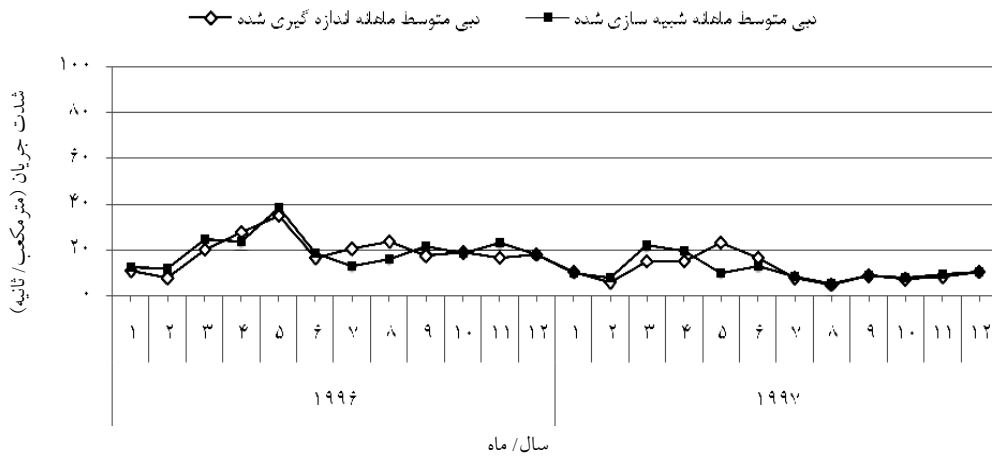
به‌طور خلاصه می‌توان چنین نتیجه گرفت که اگر خشکی یا کم‌آبی یک حوضه یا قسمتی از آن حوضه، خصوصیت دائمی آن محسوب نشود و در شرایطی که در واسنجی مدل از مقادیر دبی جریان اندازه‌گیری شده در دوره کم‌آب استفاده نشده باشد، مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق دبی جریان در دوره کم‌آبی نمی‌باشد.



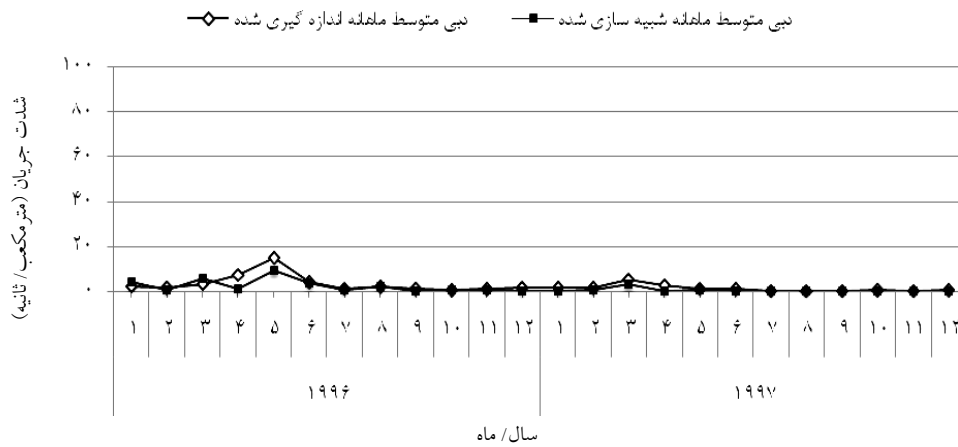
شکل ۷- نتایج اعتبارسنجی مدل در ایستگاه قلعه شاهرخ



شکل ۸- نتایج اعتبارسنجی مدل در ایستگاه سد زاینده رود.



شکل ۹- نتایج اعتبارسنجی مدل در ایستگاه پل کله.



شکل ۱۰- نتایج اعتبارسنجی مدل در ایستگاه ورزنه.

جدول ۴- خلاصه نتایج مدل در مرحله اعتبارسنجی.

ایستگاه	طول دوره آماری	COE درصد	NS درصد	R2 درصد
قلعه شاهرخ	۲۴ ماه	۶۲	۶۰/۱	۶۵/۸
سد زاینده رود	۲۴ ماه	۷۰/۴	۶۹/۱	۷۰/۸
پل کله	۲۴ ماه	۶۲	۶۰/۲	۶۴/۷
ورزنه	۲۴ ماه	۶۰/۴	۵۸/۷	۶۷/۹

نتیجه گیری

مدل SWAT با استفاده از دبی جریان متوسط ماهانه در ۴ ایستگاه قلعه شاهرخ، سد زاینده رود، پل کله و ورزنه واسنجی و اعتبارسنجی گردید که نتایج آن با توجه به موارد یاد شده، به نسبت رضایت بخش بود. بهترین نتایج در ایستگاه پل کله و ضعیف ترین نتایج در ایستگاه قلعه شاهرخ به دست آمد. هدف اولیه از این مطالعه، بررسی عملکرد مدل SWAT در حوضه زاینده رود بود. نتایج واسنجی نشان می دهد که مدل SWAT می تواند تا حدودی ابزار مناسبی در رابطه با شبیه سازی شدت جریان رودخانه باشد. استفاده از این مدل یا مدل های کامپیوتری دیگر به دلیل کاهش هزینه عملیات صحرایی (به منظور اندازه گیری پارامترهای مرتبط با کیفیت آب) و به ویژه به دلیل کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسائل، می تواند جزو راهکارهای ممکن به منظور ارتقای سطح مدیریت منابع آب و حفظ محیط زیست قلمداد گردد. علاوه بر این، با استفاده از این ابزار این امکان برای پژوهشگران و مدیران اجرایی به وجود می آید تا سناریوهای مختلف مدیریتی را (که امکان اجرای آن ها در زمان کوتاه و بدون صرف هزینه سنگین وجود ندارد) مورد ارزیابی قرار داده و با تحلیل نتایج، بهترین تصمیم را اتخاذ نمود.

سپاسگزاری

این پژوهش در راستای ماموریت های قطب علمی "ارزیابی و به سازی شبکه های آبیاری و زهکشی" تعریف شده و با حمایت های دبیرخانه قطب ها به انجام رسیده است. بدین وسیله از دبیرخانه دائمی قطب های علمی کشور و دانشگاه تهران تشکر و سپاسگزاری می نمائیم.

منابع

1. Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. 2006. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol.* 333:2-4. 413-430.
2. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, part I: model development. *J. Amer. Water Resour. Assoc.* 34:1. 73-89.
3. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Ramanarayanan, T.S., and Diluzio, M. 1999. Water resources of the Texas gulf basin. *Water Sci. Tech.* 39:3. 121-133.
4. Borah, D.K., and Bera, M. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases. *Trans. ASAE* 46:6. 1553-1566.
5. Borah, D.K., and Bera, M. 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of applications. *Trans. ASAE* 47:3. 789-803.

6. Chu, T., Shirmohammadi, A., Montas, H., and Sohrabi, T. 2002. Modeling watershed nonpoint source pollution on piedmont physiographic region using SWAT. ASAE Meeting paper No: 022040.
7. Chu, T.W., and Shirmohammadi, A. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. Trans. ASAE 47:4. 1057-1073.
8. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., and Arnol, J.G. 2007. SWAT: Historical development, applications, and future research directions. ASABE. 50:4. 1211-1250.
9. Gosain, A.K., Rao, S., Srinivasan, R., and Gopal Reddy, N. 2005. Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. Hydrol. Process. 19:3. 673-682.
10. Rostamian, R. 2007. Estimation of runoff and sedimentation in Behesht Abad basin in Northern Karun watershed using SWAT 2000 Model. Master Dissertation. Industrial University of Esfahan. Agriculture faculty. Water engineering department. (In Persian)
11. Salemi, H.R., Mamanpoush, A., Miranzadeh, M., Akbari, M., Torabi, M., Toomanian, N., Murray-Rust, H., Droogers, P., Sally, H., and Gieske, A. 2000. Water Management for Sustainable Irrigated Agriculture in the Zayandeh Rud Basin, Esfahan Province, Iran. Sustainable Irrigation and Water Management in the Zayandeh Rud Basin, Iran. International Water Management Institute (IWMI). Research Report No.1. www.iwmi.cgiar.org (In Persian)
12. Salemi, H.R., and Murray-Rust, H. 2002. Water Supply and Demand Forecasting for the Zayandeh Rud. Sustainable Irrigation and Water Management in the Zayandeh Rud Basin, Iran. International Water Management Institute (IWMI). Research Report No.13. www.iwmi.cgiar.org (In Persian)
13. Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., and Hauck, L.M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. J. American Water Resour. Assoc. 37:5. 1169-1188.
14. Spruill, C.A., Workman, S.R., and Taraba, J.L. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. Trans. ASAE 43:6. 1431-1439.
15. Sun, H., and Cornish, P.S. 2005. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT. Hydrol. Process. 19:3. 795-807.
16. Van Liew, M.W., Garbrecht, J.D., and Arnold, J.G. 2003. Simulation of the impacts of flood retarding structures on streamflow for a watershed in southwestern Oklahoma under dry, average, and wet climatic conditions. J. Soil Water Conserv. 58:6. 340-348.
17. Wang, X., and Melesse, A.M. 2005. Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern minnesota watershed. Transactions of the ASAE. Vol. 48:4. 1-18.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 16(3), 2009
www.gau.ac.ir/journals

Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud watershed

B. Ababei¹ and *T. Sohrabi²

¹M.Sc. Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran,

²Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran

Abstract

Life in Esfahan province is dependent on Zayandeh Rud. Therefore, sustaining the quality and quantity of Zayandeh Rud water is of much importance. The first step for adopting correct management decisions is to have continuous awareness of water quality and quantity, temporal changes, and spatial variations and, eventually, specification of main source of pollution. One of the models being used worldwide in such studies is SWAT. The first step in using this kind of models is to prove their ability to simulate hydrologic cycle in a the watershed. The main goal of this study was to assess SWAT performance in Zayandeh Rud watershed in order to simulate river flow rate values. Model Calibration and validation were done using average daily flow in four stations named Ghal'e Shahrokh, Zayandeh Rud Dam, Pole Kole and Varzaneh. Observed and simulated values were compared by statistics including R^2 , NS and COE values to evaluate the model predictions against the observed values. The results of these values for flows at four stations for calibration process ranged between 60.2 to 80.1, 59.4 to 79.0 and 72.6 to 82.0, respectively. According to previous studies and the quality of the data used in this study, these values seem acceptable. The values for validation period were 60.4 to 72.0, 60.1 to 69.1 and 64.7 to 70.8, respectively. Among these four stations, measured and simulated flows at Pole Kole and Ghal'e Shahrokh matched well and weak, respectively. In general, the results showed that SWAT could be a proper tool for simulating the flow rate values of the river.

Keywords: SWAT model, Calibration, Validation, Zayandeh Rud River, Esfahan

* Corresponding Author; Email: myousef@ut.ac.ir