مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۷۰، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶
ص ۸۹۳-۸۸۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۴
تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸

ارزیابی کارآیی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز گاماسیاب

❖ **شهاب‌الدین زارع زاده مهریزی؛** دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

❖ **اسداله خورانی*؛** دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان

❖ **جواد بذرافشان؛** دانشیار، گروه کشاورزی و آبیاری، دانشگاه تهران، تهران

❖ **ام‌البنین بذرافشان؛** استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان

چکیده

رودخانه گاماسیاب یکی از پنج شاخه اصلی رودخانه کرخه است و نقش اساسی در حفظ حیات و زیست بوم منطقه دارد. برای اتخاذ شیوه‌های صحیح و پایدار مدیریت منابع آب رودخانه گاما سیاب، کسب آگاهی مستمر از وضعیت کمی و کیفی آب و نیز تغییرات آن ضروری است. امروزه استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی به منظور شبیه سازی فرآیندهای کمی و کیفی مرتبط با چرخه آب متداول است. برای استفاده از این مدل‌ها، اثبات توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی چرخه آبی حوضه لازم است. یکی از مدل‌هایی که در این راستا در سطح بین المللی مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرد مدل SWAT می‌باشد. این پژوهش به ارزیابی عملکرد مدل SWAT در شبیه سازی دبی جریان رودخانه گاما سیاب پرداخت. اجرای این مدل نیاز به نقشه‌رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه خاک، نقشه کاربری اراضی و طبقه‌بندی شیب دارد. در ابتدا دبی جریان با گام زمانی روزانه در ایستگاه هیدرومتری پلچهر با استفاده از داده‌های بارش دو ایستگاه سینوپتیک و سه ایستگاه هواشناسی و دمای حداقل و حداکثر روزانه‌ی دو ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه و همدان برای دوره ۱۹۹۵-۱۹۷۷ میلادی واسنجی و سپس برای دوره ۱۹۹۶-۲۰۰۵ میلادی اعتبارسنجی شد. ضرایب آماری شامل ضریب نش- ساتکلیف، R^2، P-factor و R-factor برای دوره واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۷۱، ۰/۷۳، ۰/۷۹ ، ۱/۳۶ و برای دوره اعتبار سنجی به ترتیب برابر با ۰/۵۷، ۰/۶۱، ۰/۷۱ و ۱/۳۴ بدست آمد. این نتایج حاکی از توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه گاما سیاب دارد و پژوهشگران می‌توانند از این مدل برای اعمال سناریوهای مدیریتی در زمان کوتاه و هزینه کم جهت تصمیم‌گیری بهتر استفاده نمایند.

واژگان کلیدی: مدل هیدرولوژیکی، پلچهر، واسنجی، اعتبارسنجی

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۹۸۹۱۲۴۸۰۳۲۴۲+
Email: khoorani@hormozgan.ac.ir

۱. مقدمه

از مهم ترین روش‌های استفاده پایدار از منابع آب و خاک مدیریت صحیح حوضه‌های آبخیز است در کشور ما بیشتر حوضه‌های آبخیز 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 [۳۳] با وجود راه‌کارهای مختلف نظیر فرمول‌های تجربی و مدل‌های ریاضی و کامپیوتری برای فائق آمدن بر این مشکل تاکنون هیچ کدام نتوانسته‌اند راه حل مطلوبی ارائه دهند. امروزه عقیده بر این است که شبیه‌سازی بوسیله مدل‌های هیدرولوژیک در حوضه‌های آبخیز می‌تواند راه حل مناسبی برای آن باشد

دسته‌ای از مدل‌های هیدرولوژیک مدل‌های توزیعی هستند که به دو دسته کلی تجربی و فیزیکی تقسیم‌بندی می‌شوند مدل‌های تجربی در واقع مدل‌های جعبه سیاه هستند و کوشش شده است که این مدل‌ها ارتباط لازم را بین متغییرهای ورودی و خروجی برقرار سازند [۹]. در مدل‌های توزیعی فیزیکی، حوضه آبخیز به واحدهای مجزا تقسیم می‌گردد و مقادیر مختلف پارامترهای فیزیکی به هر واحد اختصاص داده می‌شود [۱۵]. از آنجا که در حوضه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی واکنش حوزه میسر نیست انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی مورد نیاز یک پیش‌بینی با دقت مناسب ارائه کند ضروری می‌باشد. در سال‌های اخیر مدل‌های فیزیکی توزیعی به دلیل انطباق‌شان با مشخصه‌ها و یا خصوصیات نظری حوضه، اهمیت بیشتری یافته‌اند [۱۶] مدل SWAT[۱] یک مدل فیزیکی، نیمه توزیعی و پیوسته زمانی است که برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه ارائه شده است [۲]، [۲۱]، [۲۴]. مدل SWAT قابلیت آنالیز داده ها در بازه های زمانی سالانه، ماهانه، روزانه و ساعتی را دارد از مزایای دیگر مدل SWAT این است که حوضه‌هایی که فاقد داده‌های برداشت شده می‌باشند نیز قابل شبیه سازی هستند و همچنین این مدل برای شبیه سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده و با راه‌کارهای مختلف مدیریتی بدون صرف زمان و هزینه زیاد قابل اجراست. با توجه به توانایی‌های مدل SWAT مطالعات بسیاری بوسیله آن در زمینه‌های گوناگون انجام شده است از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رژیم جریان و پیش‌بینی رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم، تعادل مواد شیمیایی، شبیه سازی انتقال رسوب و اعمال سناریوهای مدیریتی نظیر مطالعه تاثیرات تغیر کاربری اراضی بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه استفاده می‌شود با توجه به پایه فیزیکی مدل SWAT باید داده‌های ورودی و بازه تغییرات آن‌ها با واقعیت همخوانی و دقت بالایی داشته باشد [۸]. پژوهشگران با مطالعه خود در قسمت غرب قاره آفریقا دریافتند هرچه داده‌های ورودی دارای دقت بالاتری باشد علاوه بر نتایج بهتر در شبیه‌سازی نهایی تعداد شبیه‌سازی در مرحله واسنجی‌توسط SUFI2 کاهش پیدا می‌کند و در زمان کمتری مدل به نتیجه می‌رسد [۲۶]. در حوضه زاینده‌رود ارزیابی عملکرد مدل SWAT مورد بررسی قرار گرفت نتایج حاکی از توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب است و از نقاط ضعف آن عدم توانایی شبیه‌سازی ذوب برف می‌باشد [۱]. از ضعف‌های مدل SWAT عدم شبیه سازی مناسب دبی‌های اوج می‌باشد [۲۷,۱۲] از مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی نواحی کوهستانی همراه با ذوب برف استفاده شد که نتایج کارآیی این مدل را در شبیه‌سازی دبی نشان می‌دهد [۷] همچنین توانایی مدل SWAT در شبیه سازی دبی رودخانه واشیتا[۳] مورد ارزیابی قرار گرفت نتایج نشان می‌دهد که مدل SWAT با دقت قابل قبولی قادر به شبیه‌سازی دبی است [۲۸]. برای پیش‌بینی انتقال رسوب و نیترات از مدل SWAT استفاده

[۱] Soil and Water Assessment Tools
[۲] Sequential uncertainty fitting ver. 2
[۳] Washita

شد نتایج نشان می‌دهد مدل SWAT رسوب سالانه را بهتر از ماهانه پیش‌بینی می‌کند همچنین برآورد رسوب در ماه‌های پربارش با خطای بیشتری همراه است [۱۳]. با استفاده از مدل SWAT شدت جریان و جابجایی رسوب در حوضه گلف[۱] ایالت تگزاس آمریکا مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان داد متوسط شدت جریان ماهانه پیش‌بینی شده توسط مدل در این تحقیق ۵ درصد بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده بود [۱۰]. عملکرد مدل SWAT از نقطه نظر شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف در حوضه وایلد رایس[۲] مورد ارزیابی قرار گرفت و نبود شبیه سازی دقیق دبی‌های اوج رودخانه را به عملکرد نه چندان مناسب مدل در شبیه سازی ذوب برف به ویژه در حوضه‌ها و سال‌های با برف انباشت[۳] کمتر نسبت داده‌اند [۲۹]. در حوضه بهشت آباد کارون شمالی با استفاده از مدل SWAT اقدام به برآورد مقادیر دبی و بار رسوب شد و دریافتند که مدل SWAT در برآورد دبی رودخانه عملکرد مناسبی داشته، اما در شبیه سازی دبی‌های اوج رودخانه موفقیتی نداشته است .همچنین توانایی مدل در برآورد بار رسوب را در حد متوسط ارزیابی نمود [۲۵]. اثرات طولانی مدت تغییر اقلیم بر متوسط جریان ماهانه در بخشی از حوضه می‌سی‌سی‌پی[۴] در آمریکا با استفاده از ۵ ایستگاه هیدرومتری و مدل SWAT مورد بررسی قرار گرفت نتایج کار حاکی از تغییرات ۶۷ تا ۹۷ درصدی جریان در ۵ ایستگاه منتخب بوده است [۲۳]. نتایج پژوهش، بر روی سیلاب‌های متوسط و بزرگ در حوضه رودخانه هانگ فوجان[۵] با اقلیم نیمه‌خشک و حوضه رودخانه جیانگ جی[۶] با اقلیم مرطوب تحت شرایط تغییر اقلیم حاکی از افزایش دبی میانگین در فصول مختلف و همچنین افزایش دبی اوج بخصوص در فصل بهار است [۳۱]. اثرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب رودخانه دیندر[۷] و اکوسیستم پارک دیندر با استفاده از مدل SWAT در سودان مورد بررسی قرار گرفت با مقایسه رواناب آتی با دوره خشک ۱۹۸۸ -۱۹۷۷ میلادی، نتایج نشان از اثرات مثبت تغییر اقلیم بر اکوسیستم پارک ملی دیندر دارد [۱۱].

با توجه به قابلیت های مختلف مدل SWAT در مقیاس حوضه و بزرگ‌تر از آن و کاربردهای مدیریتی این مدل، در این پژوهش به ارزیابی عملکرد مدل SWAT در شبیه سازی دبی رودخانه گاماسیاب پرداخته شد. از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم بسیاری از پارامترها در مقیاس حوضه‌ای مشکل و یا حتی امکان پذیر نیست مدل برای حوضه مورد نظر واسنجی شد و سپس عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

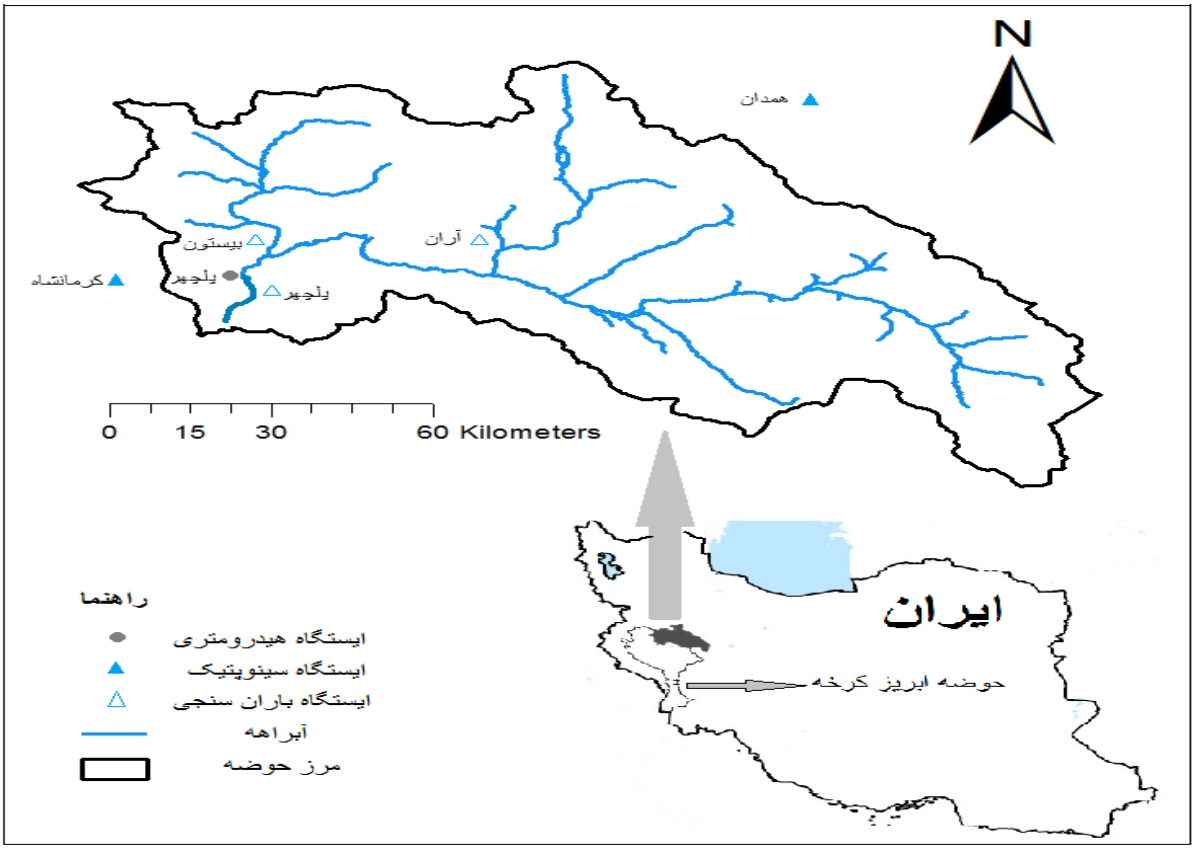
۲. مواد و روش‌ها

۱,۲. منطقه مورد مطالعه

رودخانه گاماسیاب در بخش شمال شرقی حوزه آبریز کرخه جریان دارد از سراب سنگ سوراخ و چشمه‌سارهای اطراف نهاوند سرچشمه می‌گیرد در مسیر این رودخانه رشته‌های فرعی مختلفی به آن ملحق می شود در جنوب بیستون، شاخه فرعی دینورآب به آن پیوسته و به نام گاماسیاب ادامه مسیر می‌دهد و در نزدیکی فرامان به رودخانه قره‌سو متصل شده و پس از آن به نام سیمره وارد خاک لرستان می‌شود و سپس در استان خوزستان به نام کرخه جریان یافته و وارد هورالعظیم می‌شود. رودخانه گاماسیاب یکی از سرشاخه‌های مهم کرخه است و حوضه آبریز آن با مساحتی در حدود ۱۱۶۹۰ کیلومترمربع بین طول جغرافیایی ۴۷ درجه و۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۸ دقیقه تا

[۱] Gulf
[۲] Wild Rice
[۳] Snow Pack
[۴] Mississippi
[۵] Huangfuchuan
[۶] Xiangxi
[۷] Dinder

۳۴ درجه و ۸۵ دقیقه شمالی واقع شده است. ارتفاع از سطح دریا در این حوضه بین ۱۲۴۲ تا ۳۵۸۰ متر می‌باشد [۱۷]. شکل ۱ حوضه آبریز گاماسیاب را نشان می‌دهد.



شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز گاماسیاب در جنوب غربی کشور، آبراهه‌ها و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی منطقه.

۲،۲. معرفی مدل SWAT

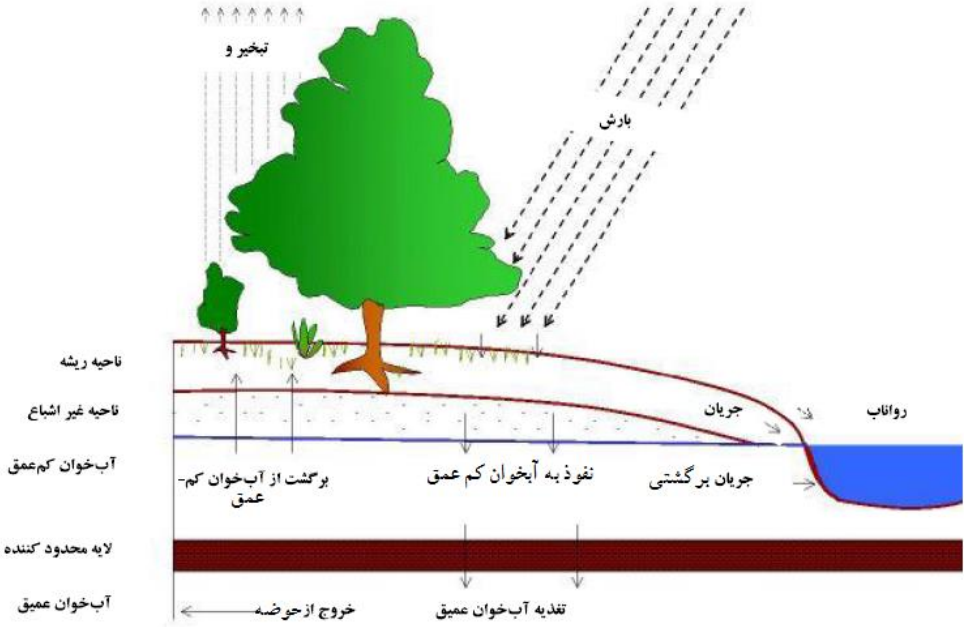
این مدل توسط سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا برای ارزیابی تاثیر اقلیم و فعالیت‌های مدیریت اراضی بر روی جریان آب، انتقال رسوب، مواد مغذی و تعادل مواد شیمیایی در حوضه های آبخیز بزرگ و پیچیده با کاربری‌های اراضی، خاک و شرایط مدیریتی مختلف برای دوره‌های زمانی روزانه توسعه یافته است. این مدل دارای اساس فیزیکی و نیمه توزیعی بوده و در حوزه‌های که فاقد آماربرداری منظم هستند قابل استفاده می‌باشد [۲]. SWAT2012 دارای یک رابط گرافیکی با عنوان ArcSwat می‌باشد که به عنوان یک افزونه[۱] در محیط ArcMap از سری نرم افزارهای GIS کار می‌کند. در واقع اطلاعات ورودی به مدل و مراحل مدل‌سازی همه در محیط گرافیکی ArcMap صورت می‌پذیرد. ابتدا برای معرفی حوضه، نقشه توپوگرافی به شکل[۲] DEM به مدل معرفی می‌گردد، سپس مدل با آنالیز این نقشه مسیر جریان در حوضه را مشخص خواهد کرد و تعداد زیر حوضه‌ها و مرز حوضه مشخص خواهد شد بعد از معرفی نقشه رقومی خاک، کاربری اراضی و کلاسه‌بندی شیب حوضه، مدل زیر حوضه‌ها را به تعدادی واحد پاسخ

[۱] Extension

[۲] Digital Elevation Model

هیدرولوژیکی (HRU) جزءبندی می‌کند و جزئیات مکانی را شبیه سازی می‌نماید. واحد پا سخ هیدرولوژیکی (HRU) واحد ا صلی شبیه سازی ا ست که به عنوان یک منطقه کلی متشکل از پو شش ارا ضی، ویژگی‌های همگن خاک و شیب می‌باشد [۲۱]. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، واحدهای واکنش هیدرولوژیک، تالاب یا ارا ضی مرطوب، آب زیرزمینی، فر سایش، ر شد گیاهان، چرخه عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان می‌باشد. مدل SWAT برای هر واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU) مقدار آب موجود در خاک، رواناب سطحی، چرخه عناصر غذایی، رسوب، رشد گیاهان را محاسبه می‌کند.

شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی در حوزه شامل دو مرحله است: نخستین مرحله فاز زمین[1] چرخه هیدرولوژی ا ست که کنترل کننده مقدار آب، ر سوب، عناصر غذایی و بار آفت‌کش‌ها در آبراهه اصلی در هر زیرحوزه است. مرحله دوم، آب یا فاز روندیابی چرخه هیدرولوژی است که شامل حرکت آب، ر سوب و غیره در طول شبکه کانال حوزه تا خروجی آن می‌با شد [۲۱] خصوصیات فیزیکی نظیر شیب، کاربری و داده‌های اقلیمی برای هر زیرحوزه مشخص شده و برای اقلیم هر بخش مدل از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه به مرکز هر کدام از زیرحوزه ا ستفاده می‌کند [۲] در شکل شماره ۲ مدل مفهومی چرخه هیدرولوژی SWAT نشان داده شده است.



شکل ۲ نمونه شماتیک چرخه هیدرولوژی در مدل SWAT [۲۲]

بیلان آب هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی با چهار منبع ذخیره برف، پروفیل خاک (صفر تا ۲ متر)، آبخوان کم عمق (معمولا ۲ تا ۲۰ متر) و آبخوان عمیق (بیش از ۲۰ متر) نمایش داده می‌شود. بین زیرحوزه‌ها واکنش رواناب و بار رسوب و مواد مغذی لحاظ می‌شود اما در HRUها این اندرکنش‌ها لحاظ نمی شود و در هر HRU محا سبات جداگانه انجام شده و مجموع آن در خروجی زیرحوزه انجام می شود. سناریوهای مدیریتی نیز در سطح HRU تعریف می‌شود [۲۲].

همانطور که گفته شد برای پی بردن به ویژگی‌های

[1] Hydrologic Response Unit

[1] Land Phase

توپوگرافی حوضه از نقشه DEM استفاده می‌گردد مواردی مانند مساحت، شیب و طول شیب زیرحوضه‌ها و تعداد زیر حوضه‌ها همچنین مسیر، طول و شیب آبراهه‌ها از آن به دست می‌آید. در این تحقیق از نقشه DEM با دقت سلولی ۵۰ متر در ۵۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شد همچنین از لایه‌های اطلاعاتی نقشه کاربری اراضی با دقت مکانی ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ تهیه شده توسط USGS و نقشه خاک با دقت مکانی ۱۰۰۰۰ متر در ۱۰۰۰۰ متر تهیه شده توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO) استفاده گردید.

بهینه‌سازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI2 دربرنامه SWAT-CUP انجام شد. در برنامه SUFI2 یک دامنه عدم قطعیت برای هر پارامتر در نظر گرفته می‌شود که در هنگام واسنجی سعی می شود پارامترها در این محدوده قرار گیرند که به آن دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU)[1] می‌گویند [۲۴,۳] برای کمی کردن میزان دقت واسنجی یا عدم قطعیت دو شاخص R و P مورد استفاده قرار می‌گیرد R-factor برابر است باضخامت باند 95PPUتقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده که هر چه به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده شبیه‌سازی مناسب‌تر می‌باشد مقادیر کوچک‌تر از ۱/۵ بسته به شرایط قابل قبول است [۴,۲]. P-factor نشان‌دهنده این است که چه مقدار از داده‌های مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت (95PPU) قرار گرفته‌اند و نزدیک بودن این عدد به یک نشان‌دهنده نتیجه بهتری می‌باشد. مقادیر بزرگتر از ۷۰٪ یا ۷۵٪ قابل قبول می‌باشد [۵,۲]. مقادیر بالای P-factor همراه با مقادیر بالای R-factor بدست می‌آید بنابراین باید یک تعادل بین این مقادیر بوجود آید که هر دو در محدوده قابل قبول قرار گیرند و هر دو فاکتور با هم در نظر گرفته می‌شود[۵].

ارزیابی مدل برای شبیه سازی دبی با معیارهای مختلفی قابل سنجش می‌باشد. در این تحقیق از ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NS)، ضریب تبیین (R^2) و PBIAS استفاده شد. ضریب NS ، ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد مقدار این ضریب بین یک تا منفی بینهایت متغییر می‌باشد. بهترین مقدار آن یک است .[۱٤] مقادیر NS >۰/۷۵ یعنی نتایج شبیه‌سازی خوب، بین ۰/۰-۷۵/۳۶ بمعنی رضایت‌بخش بودن نتایج است [۱۸]. ضریب تبیین R^2 نسبت پراکندگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است، چنانچه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند مقدارR^2 برابر با یک می‌باشد بنابراین مقادیرR^2 نزدیک به یک حاکی از عملکرد خوب مدل است [۱۵].

PBIAS درصد تفاوت بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی می‌باشد که در واقع تخمینی از میزان انحراف معیار مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده‌ای را نشان می‌دهد مقادیر PBIAS نزدیک به صفر نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل است [۱۸]. مقادیر PBIAS مابین ۲۵٪+ تا ۲۵٪- رضایت‌بخش در نظر گرفته می‌شود [۲۰,۱۹].

در این مطالعه داده‌های اندازه‌گیری شده دبی روزانه در طول سال‌های ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۵ میلادی در ایستگاه هیدرومتری پل‌چهر مورد استفاده قرار گرفت اطلاعات بارش از سه ایستگاه باران سنجی آران، پل‌چهر، بیستون و دو ایستگاه سینوپتیک همدان و کرمانشاه مربوط به سال‌های ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۵میلادی تهیه شد برای همین دوره زمانی اطلاعات دما نیز از دو ایستگاه سینوپتیک همدان و کرمانشاه بدست آمد. موقعیت کلیه ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی مورد استفاده در شکل ۱ آمده است. همچنین دوره زمانی ۱۹۷۷-۱۹۹۵ و ۲۰۰۵-۱۹۹۶ میلادی بر اساس گام زمانی روزانه به ترتیب برای

[1] 95% Prediction Uncertainty

واسنجی و اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. برای متعادل شدن مدل با شرایط محیطی دو سال اول نیز برای گرم کردن[1] مدل اختصاص یافت.

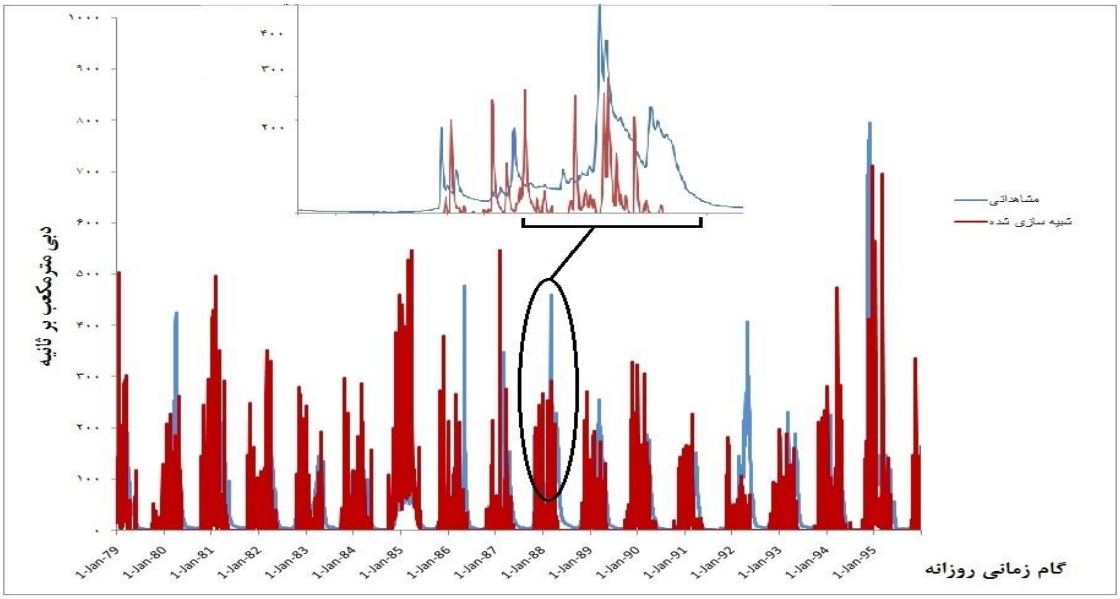
۳. نتایج

مدل SWAT بر اساس مقادیر دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری پل‌چهر برای کل حوضه واسنجی شد برای انجام آنالیز حساسیت و ارزیابی مدل نیز از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. طول دوره آماری داده‌ها از سال ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۵ میلادی بود ۲ سال اول را برای گرم کردن مدل، از سال ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۵ میلادی برای وا سنجی و از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ میلادی برای اعتبارسنجی استفاده شد. بعد از اجرای مدل SWAT نتایج اولیه رضایت‌بخش نبود ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NS)، ضریب تبیین (R^2) وPBIAS به ترتیب با ۰/۸۵ - ، ۰/۰۴ و ۵۸٪- بدست آمد. شکل ۳ نتایج اولیه شبیه‌سازی مدل SWAT را نشان می‌دهد.

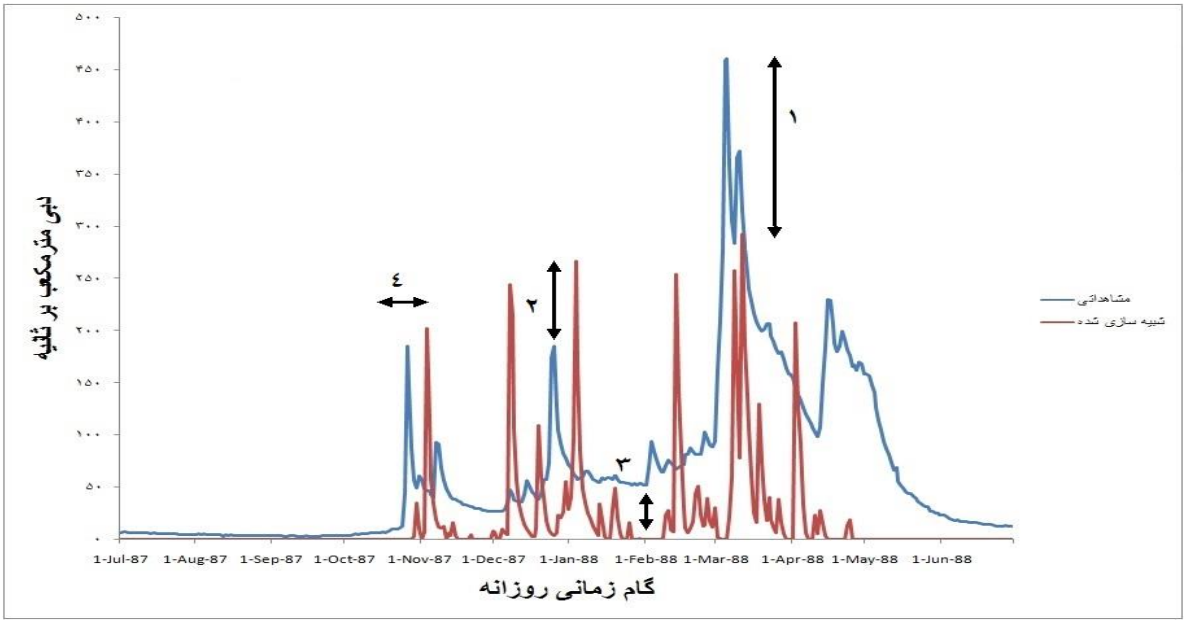
مدل SWAT برای شبیه سازی مناسب بارش- رواناب نیاز به اطلاعات دقیق از جمله نقشه خاک، کاربری اراضی، نقشه توپوگرافی و داده‌های بارش و دما دارد معمولا در کشور ما برای همه حوضه‌ها این اطلاعات با دقت کافی موجود نمی‌باشد در نتیجه شبیه سازی اولیه این مدل در این حوضه‌ها مناسب نیست [۳۳]. با توجه به شکل ۴ مشکلاتی در شبیه سازی اولیه این مدل دیده می شود که شامل ۱- برآورد کم دبی اوج ۲- در بعضی موارد برآورد بیش از حد دبی اوج ۳- برآورد کم دبی پایه و ۴- شیفت زمانی در برآورد دبی است.

بنا به توصیه محققان قبل از واسنجی نهایی مدل SWAT توسط الگوریتم SUFI2 باید نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT تا حدودی قابل قبول باشد و اختلاف زیادی با داده‌های مشاهداتی نداشته باشد [۵] برای فائق آمدن بر این مشکلات باید پارامترهای موثر در بروز آن شناسایی و با تغییرات آنها به بهبود شبیه‌سازی پرداخت. با توجه به تحقیقات قبلی در زمینه واسنجی مدل SWAT، پارامترهای توصیه شده جهت واسنجی انتخاب شد [۸, ۵]. بعد از واسنجی اولیه مدل SWAT نتایج ضرایب کارایی نش-ساتکلیف، ضریب تبیین به ترتیب ۰/۴۳، ۰/۷۵ و PBIAS ۳۲/۱- در صد بد ست آمد. برای وا سنجی نهایی از الگوریتم SUFI2 استفاده شد. در الگوریتم SUFI2 با انجام سه تکرار[1] که هر کدام شامل ۶۰۰ شبیه‌سازی بود پارامترهایی که بیشترین تاثیر در نتایج شبیه سازی داشتند انتخاب و مقادیر بهینه آن‌ها بدست آمد. جدول شماره ۱ مقادیر بهینه بدست آمده برای پارامترها را در مرحله واسنجی توسط برنامه SUFI2 نشان می‌دهد.

[1] Warm up



شکل ۳. نتایج اولیه شبیه‌سازی بارش-رواناب توسط مدل SWAT در ایستگاه پلچهر



شکل ۴. مشکلاتی که در شبیه‌سازی اولیه بارش-رواناب توسط مدل SWAT مشاهده می‌گردد

جدول ۱. مقادیر بهینه بدست آمده برای پارامترهای موثر در مرحله واسنجی

پارامتر	تعریف پارامتر	مقدار بهینه
V*- CH_K2	هدایت هیدرولیکی موثر در کانال اصلی(میلیمتر بر ساعت)	۶/۲۵

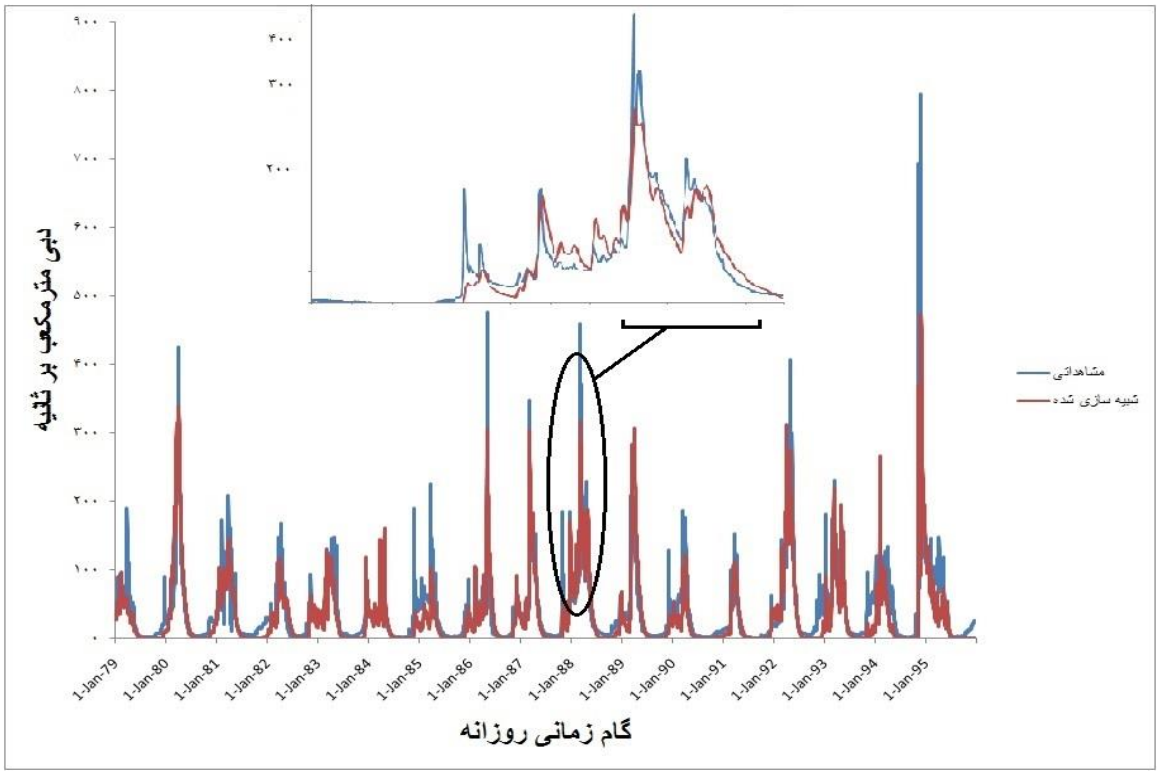
[1]Iteration

V-CH_N2	ضریب مانینگ کانال اصلی	۰/۱۳
V-GW_REVAP	ضریب تعیین نفوذ به سفره آب زیرزمینی عمیق یا صعود موئینگی از سفره آب کم عمق	۰/۰۴۵
R-CN2	شماره منحنی در روش *scs*	-۰/۱۴
R-SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس لایه خاک (میلیمتر آب در متر خاک)	۰/۱۱
V-GW_DELAY	زمان رسیدن آب از آخرین لایه خاک به سفره آب زیرزمینی(روز)	۳۶/۵
V-ESCO	فاکتور تبخیر آب ازخاک	۰/۹۴
V - ALPHA_BF	ضریب آلفا آب زیرزمینی(روز)	۰/۷۵
V -REVAPMN	حداقل ذخیره آب زیرزمینی برای رخ دادن "REVAP" (میلیمتر)	۶۷۳
V - SMTMP	دمای توده برف هنگامی که ذوب برف آغاز می‌گردد(درجه سانتی‌گراد)	۳/۶

* پیشوند V در پارامترها به معنای جایگزینی پارامتر با مقدار جدید و پیشوند R به معنای حاصل جمع مقدار تغییر با یک و ضرب در مقدار پارامتر اولیه می‌باشد.

بعد از اعمال پارامترهای بهینه شده ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NS)، ضریب تبیین (R^2) به ترتیب برابر با ۰/۷۳، ۰/۷۱ و PBIAS ۳/۷ در صد به د ست آمد شکل ۵ نتایج نهایی واسنجی مدل SWAT را در ایستگاه هیدرومتری پلچهر نشان می‌دهد.

برای انجام آنالیز عدم‌قطعیت از باندهای ۹۵ درصد و فاکتور P و R ا ستفاده شد. مقادیر P-factor و R-factor برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۹ و ۱/۳۶ محاسبه گرد ید که در محدوده قا بل قبول قرار می‌گیرد [۵]. از سال ۱۹۹۶ میلادی تا پایان سال ۲۰۰۵ میلادی برای اعتبارسنجی[1] مدل SWAT استفاده شد برای دوره اعتبار سنجی ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NS)، ضریب تبیین (R^2) به ترتیب برابر با ۰/۵۷، ۰/۶۱ و PBIAS ۱۴/۷ در صد به د ست آمد. مقادیر P-factor و R-factor برای دوره اعتبار سنجی به ترتیب ۰/۷۱ و ۱/۳۴ محا سبه گردید. خلا صه نتایج ضرایب کارایی در دوره وا سنجی در جدول ۲ آمده است این نتایج دلالت بر توانایی مدل SWAT در شبیه سازی دبی حو ضه دارد و کارایی مدل بر اساس شاخص کیفی ارائه شده در تحقیقات پیشین خوب ارزیابی می شود[۲, ۱۹]. نتایج شبیه سازی مدل SWAT در دوره اعتبار سنجی در شکل ۶ ارائه شده است.

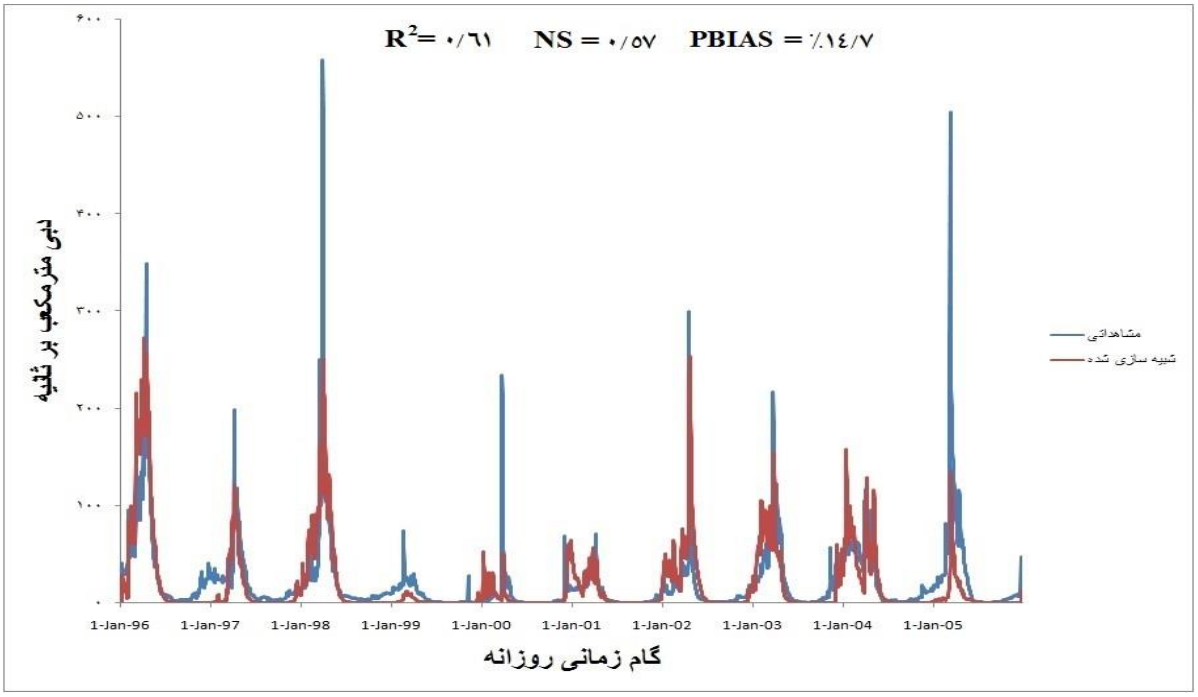


شکل ۵ نتایج نهایی واسنجی مدل SWAT را در ایستگاه هیدرومتری پلچهر

جدول ۲ نتایج ضرایب کارایی مدل SWAT در مرحله واسنجی

معیار	مقادیر قابل قبول	نتایج اولیه مدل	نتایج اولیه واسنجی	نتایج نهایی واسنجی با الگوریتم sufi2
R^2	۰/۵ <	۰/۰۴	۰/۷۵	۰/۷۳
NS	۰/۵ <	-۰/۸۵	۰/۴۳	۰/۷۱
PBIAS	-۲۵٪ < PBIAS < ۲۵٪	-۵۸٪	۳۲٪	۳٪/۷

[1]Validation



شکل ۶. نتایج دوره اعتبارسنجی واسنجی مدل SWAT را در ایستگاه هیدرومتری پلچهر

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج واسنجی مدل نشان از همبستگی مناسب داده‌های شبیه سازی شده با مقادیر مشاهده‌ای رودخانه گاماسیاب در ایستگاه هیدرومتری پلچهر دارد با مراجعه به شکل ۵ مشخص می‌شود روند شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهده‌ای همخوانی دارد و انطباق خوبی در بیشتر نقاط دارد ولی مدل در برآورد دبی اوج بخصوص در فصل بهار با مشکل مواجه می‌شود و تخمین کمتر از مقدار واقعی ارائه می‌کند پژوهشگران دیگر نیز به این ضعف مدل اشاره کرده‌اند [۲۵, ۱۲, ۲۷]. مهمترین علت آن، ضعف مدل در شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف عنوان می‌شود [۲۹, ۳۲]. در حوضه‌های کوهستانی این ضعف اهمیت بیشتری دارد با توجه به کوهستانی بودن حوضه گاماسیاب عدم تطابق در برآورد دبی اوج را می‌توان به ضعف مدل در شبیه‌سازی مناسب فرآیند ذوب برف نسبت داد. بیشتر دبی‌های اوج که مدل قادر به شبیه سازی مناسب آن نبوده است در فصل بهار اتفاق افتاده است. مدل SWAT، بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به صورت باران و برف تقسیم‌بندی می‌کند [۳۰] با توجه به برآورد کمتر از مقدار مشاهداتی دبی اوج در فصل بهار می‌توان نتیجه گرفت مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی مناسب ذوب برف در فصل بهار نیست [۳۰]. از دیگر دلایل بروز چنین مشکلی مربوط به عدم دقت کافی داده‌های ورودی نظیر نقشه رقومی خاک، کاربری اراضی، نقشه رقومی ارتفاعی و همچنین کمبود ایستگاه‌های هواشناسی و معرف نبودن آنها برای کل حوضه دانست. در این رابطه دیگر محققان نیز بر دقت داده‌های ورودی، واقعی بودن داده‌ها و بازه تغییرات آن‌ها برای بهبود شبیه سازی توسط مدل SWAT تاکید دارند [۸, ۲۶]. کیفیت برازش مدل در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی کاهش یافته است (شکل ۶) دلایل ذکر شده در مورد ضعف مدل SWAT در دوره اعتبارسنجی با

شدت بیشتری مشاهده می‌شود علت را می‌توان در شرایط دوره واسنجی و اعتبارسنجی یافت میانگین دبی کل دوره مشاهداتی حدود ۳۴ مترمکعب بر ثانیه است در حالیکه میانگین دبی مشاهداتی در دوره واسنجی و اعتبار سنجی به ترتیب برابر با ۳۹/۹ و ۲۱/۴ مترمکعب بر ثانیه بوده است که نشان می‌دهد مدل SWAT در شرایط پر آبی مورد واسنجی قرار گرفته است و در شرایط کم آبی اعتبارسنجی شده است در نتیجه تحت این شرایط از دقت شبیه‌سازی مدل کاسته می‌شود در این زمینه نتایج مشابهی در حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود به دست آمده است [۱].

نتایج نشان از توانایی قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه گاماسیاب دارد ضعف عمده آن عدم توانایی کافی در شبیه سازی فرآیند ذوب برف است که متعاقب آن دبی‌های اوج که در فصل بهار اتفاق می‌افتد و ذوب برف هم در آن دخیل است به خوبی شبیه سازی نمی‌کند. در مجموع مدل SWAT ابزاری مناسب برای محققان و پژوهشگران است تا سناریوهای مختلف مدیریتی را در زمان کوتاه و هزینه کم مورد بررسی قرار دهند و تصمیم مناسبی در جهت مدیریت بهتر اتخاذ نمایند. پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آینده با استفاده از مدل SWAT اثرات تغییر کاربری اراضی همراه با سناریوهای تغییر اقلیم بر جریان حوضه گاماسیاب بررسی گردد.

References

[1] Ababei, B., and Sohrabi, T. (2009). Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud watershed. Juarnal of Water and Soil Conservation. 16(3) (In Persian)

[2] Abbaspour, K. C. (2007). User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. Of Aquat. Sci. and Technol. Du¨bendorf, Switzerland

[3] Abbaspour, K. C. (2011). Swat-Cup2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs Manual Version 2, Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modeling (SIAM), Eawag. Swiss Federal Institute of Aquatic Science andTechnology, Duebendorf, Switzerland.

[4] Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., and Van Genuchten, M. Th. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. Vadose Zone, 3, 1340-1352.

[5] Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., and Klove, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal of Hydrology. 524, 733–752

[6] 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, 413–430.

[7] Arnold, J.G., Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., and Hotchkiss, R.H. (2002). Development of Snowfall-Snowmelt Routine for Mountainous Terrain for the soil water assessment tool (SWAT). Journal of Hydrology 262, 209-223

[8] Arnold, J. G., Moriasi,D. N., Gassman,, P. W., Abbaspour, K. C., White, M., Srinivasan, J., Santhi, R. C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M., Kannan, W. N., and Jha, M. K. (2012). SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION. American Society of Agricultural and Biological Engineers . 55(4): 1491-1508

[9] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). Large Area Hydrological Modeling Assessment. Journal of the American Water Resources Association 34 (1).

[10] Arnold, J.G., Srinivasan, R., Ramanarayanan, T.S., and Diluzio, M. (1999). Waterresources of the Texas gulf basin. Water Sci. Tech. 39(3). 121-133.

[11] Basheer, A., Lu, K., Haishen, O., Abubaker, A., Abubaker, B., and Abdeldime, A. (2016). Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on the stream flow in the Dinder River and ecosystem habitats in Dinder National Park, Sudan. Hydrol. Earth Syst. Sci. 20, 1331–1353

[12] 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.

[13] Chu, T., Shirmohammadi A., Montas, H., and Sadeghi, A. (2004). Evaluation of the SWAT model's sediment and nutrient component in the Piedmont Physiographic Region of Maryland. Transactions of the ASAE, 47, 1523-1538.

[14] Donizete dos R., Pereiraa, Mauro A., Martinezb, Fernando F., Pruskib, D., and da Silvaba I. (2016) .Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. Journal of Hydrology: Regional Studies 7, 14–37

[15] Guzha, A.C., and Hardy, T.B. (2010). Application ofthe Distributed Hydrological Model,TOPNET, to the big darby Creekwatershed, Ohio, USA. Water Resource Management, 24, 979-1003.

[16] Hosseini, M., Ghafoori, S.M., Sovm, M.A., Ghazali, A., and Mohammadsharif, A. (2010). Calibration and Validation of SWAT Model in Taleghan Watershed. 6thnational conference on watershed science and engineering and 4th national conference on erosion and sediment, Tarbiat Modarres University.

[17] Jeirani, F., Morid, S., and Moridi, A. (2011). Impact of DEM cell size on calibration and predictions of runoff and sediment, using SWAT-CU P. Juarnal of Water and Soil Conservation. 18(4).(In Persian)

[18] Kepner, W.G., Hernandez, M., Semmens, D.J., and Goodrich, D.C. (2008). The Use of Scenario Analysis to Assess Future Landscape Change on Watershed Condition in the Pacific Northwest (USA). Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security, 237-261.

[19] Moriasi, D., Arnold, J.G., Van Liew, M., W. Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASAE, 50(3), 885-900

[20] Motovilov, Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K., and Rodhe, A. (1999). Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. Agric. For.Meteorol. 98-99, 257–277.

[21] Neitsch, S.L., Arnold J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2005) .Soil and water assessment tool theoretical documentation:Version 2005.

[22] Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, College Station, Texas.

[23] Parajuli, P.B. (2010). Assessing sensitivity of hydrologic responses to climate change from forested watershed in Mississippi, Hydrological process 24, 3785-3797

[24] Rouholahnejad, E., Abbaspour, K.C., Vejdani, M., Srinivasan, R., Schulin, R., and Lehmann, A. (2012). Parallelization framework for calibration of hydrological models.Environ. Modell. Software 31, 28–36.

[25] Rostamin, R., Mousavi, S. F., Heidarpoor, M., Aphiuni, M., and Abbaspour, K. (2009). Application of SWAT2000 Model in Estimating Runoff and Sediment in Beheshtabad Basin in North Caron. Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 12 (46) (In Persian)

[26] Schuol, J., Abbaspour, K. C., Srinivasan, R., and Yang, H. (2008). Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. Journal of Hydrology 352, 30– 49

[27] 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.

[28] Van Liew, M.W., and Garbrecht, J. (2003). Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT. Journal of the American Water Resources Association 39, 413-426.

[29] Wang, X., and Melesse, A.M. (2005). Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed. Transactions ofthe ASAE. 48(4), 1-18.

[30] Watson, B. M., Ghafouri, M., and Selvalingam, S. (2003). Application of SWAT to model the water balance of the Woady Yaloak river catchment. 2nd International SWAT Conference Proceeding. Bari Italy. July, 1-4

[31] Xu, H., and Luo,Y. (2015). Climate change and its impacts on river discharge in two climate regions in China. Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 4609–4618

[32] Yang, Q., Meng, F., Zhao, Z., Chow, T. L., Benoy, G., Rees, H. W., and Bourque, C. P. (2009). Assessing the impact of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model. Agriculture, Ecosystems and Environment, 132, 23-31

[33] Zahabian, B., Goodarzi, M. R., and Massah Bavani, A. (2010). Application of SWAT model for estimating runoff in future periods affected by climate change. Climatologically Researches. 1(3-4), 45 - 60. (In Persian)