شماره ۱۱۹، تابستان ۱۳۹۷

پژوهش های آبخیزداری

(پژوهش و سازندگی)

شبیه‌سازی تراز آب حوزه‌ی آبخیز اهرچای با استفاده از مدل SWAT

مجید رئوف

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی آب

یاسر حسینی *

(نویسنده‌ی مسئول)* دانشیار دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی

غلامرضا عطفی

کارشناس‌ارشد، دانشکده‌ی فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

اباذر اسمعلی‌عوری

دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ دریافت: بهمن ۱۳۹۴ تاریخ پذیرش: مرداد ۱۳۹۷

* Corresponding Email: yaser_hoseini@ymail.com

چکیده

بررسی تراز آب، برای شناخت چرخه‌ی آب‌شناسی بسیار مهم است، و تهیه و تدوین نقشه‌ی تراز آب در حوزه‌های آبخیز، نیاز به حجم زیادی از داده‌های مکانی و پردازش آن‌ها دارد. پس، بهره‌مندی از فن‌آوری‌های نوین و مدل‌ها اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش از مدل SWAT، که مدلی مفهومی و نیمه‌توزیعی است، برای شبیه‌سازی تراز آب حوزه‌ی آبخیز اهرچای، شهرستان اهر، استان آذربایجان‌شرقی استفاده شد. کارآیی این مدل نیز در شبیه‌سازی آب‌شناسی این منطقه ارزیابی شد. براساس داده‌های هواشناسی، در دوره‌ی ۲۰۱۰-۱۹۷۹، اندازه‌ی بارندگی و تبخیر-تعرق به‌ترتیب ۵۵۹/۸ و ۲۹۹/۱ میلی‌متر به‌دست آمد. برای مرحله‌ی واسنجی مدل سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۲ و برای اعتبارسنجی آن سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ منظور شد. تنظیم (کالیبراسیون) و اعتبارسنجی با نرم‌افزار SWAT CUP و الگوریتم PSO انجام شد. ضریب نش ساتکلیف در مرحله‌ی واسنجی برای متغیرهای آب‌دهی جریان ۰/۳۹ و در مرحله‌ی اعتبارسنجی ۶/۷ - به‌دست آمد. نتایج نشان داد که این مدل در شبیه‌سازی آب‌دهی جریان کارآیی زیادی ندارد. نابسندگی اطلاعات موردنیاز و متفاوت‌بودن داده‌های دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی از عوامل تأثیرگذار بر کاهش ضریب‌های کارآیی مدل بود.

واژگان کلیدی: الگوریتم۲ -SUFI، حوزه‌ی آبخیز اهرچای، شبیه‌سازی جریان رودخانه، مدل SWAT

Archive of SID

www.SID.ir

Simulation of the AharChay Water Balance Using the SWAT Model

Majid Raoof
Associate Professor, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran
Yaser Hoseini*
(Corresponding Author)* Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
Gholamreza Atfi
M.Sc. Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili
Abazar Esmaliouri
Associate Professor Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

Abstract
Study of water balance is absolutely important for investigation of the hydrology cycle, and preparation of water balance components in the watersheds requires many spatial data and their analyzing; so new technologies, models and tools such as GIS are needed. In this study, the SWAT model, which is a conceptual and semi-distributed model in the water and sediment balance simulation, was used in Aharchay watershed, Ahar, East Azarbayjan Province. Efficiency of the model in hydrologic simulation for this area is evaluated. Meteorology and hydrometers data of 1979-2010 was selected for this simulation; the average amount of rainfall and evapotranspiration were obtained 559.8 and 299.1 mm respectively. The period of 1982-2002 were used for calibration and 2003-2010 for validation. Calibration and validation processes were performed using SWAT-CUP software and PSO algorithm. Nash-Sutcliffe efficiency coefficients for water simulation were 0.39 for calibration and -6.7 for validation. Results showed that water balance simulation was not performed perfectly. Deficiency of required information and use of different data periods in calibration and validation were some of the effective factors which reduced the efficiency coefficients of the model.

Keywords: Aharchay watershed, Simulation Water Balance, SUFI۲ algorithm, SWAT model

Archive of SID

مقدمه

محدودیت منابع آب و افزایش نیاز به آن که ناشی از افزایش جمعیت، توسعه‌ی شهرها و سیاست‌های جدید مدیریت جوامع بشری است، و نیز استفاده‌ی بی‌رویه و غیراصولی از این منابع، باعث بروز مشکلات و اختلاف‌های روزافزونی در مدیریت منابع آب شده است. برای بهینه‌سازی مصرف آب، آگاهی از تراز آبی حوزه‌های آبخیز ضروری است. از طرفی، اندازه‌گیری اجزای تراز آب در فاصله‌های زمانی موردنیاز به‌خاطر وقت‌گیر و پرهزینه بودن مشکل است. بیشتر در حوزه‌های آبخیز کشور، به‌ویژه حوزه‌های آبخیز کوهستانی و دوررس، به تعداد کافی ایستگاه‌های اندازه‌گیری نیست، و این مشکل هرگونه برنامه‌ریزی مدیریتی را با معضل یا حتی شکست مواجه می‌کند. برای مقابله با این معضل، متخصصان راه‌حل‌های مختلفی عرضه کرده‌اند. عقیده بر این است که مدل سازی پدیده‌های آب‌شناسی در حوزه‌های آبخیز می‌تواند راه‌حل بهینه‌ای برای این مسئله باشد (اباباییی و سهرابی ۲۰۰۹). این موضوع دانشمندان و محققانِ فعال در این زمینه را بر آن داشت که روش‌های مختلفی مثل روش‌های تجربی، مدل‌های ریاضی و مدل‌های کامپیوتری را برای به‌دست‌آوردن اطلاعات لازم به‌کار گیرند. امروزه یکی از روش‌های پرکاربرد برای تسهیل در محاسبات، استفاده

از مدل‌های کامپیوتری است که در بسیاری از موارد ضریب دقت زیادی دارد. محدودیت دسترسی به داده‌های آب‌شناسی کافی، نقش مدل‌های شبیه‌سازی حوزه‌های آبخیز را روزبه‌روز بیشتر و پررنگ‌تر می‌کند. در سال‌های اخیر نیز مدل‌های کامپیوتری و آب‌شناسی حوزه‌ها برای بررسی طیف وسیعی از مشکلات زیست‌محیطی و منابع آبی به‌کار گرفته‌شده است تا از این راه بتوان خسارت‌های سیل را تاحدودی کاهش داد (اسمعلی و عبدالهی ۲۰۱۱).

در مدیریت حوزه‌ها، روند تغییرات کاربری زمین حوزه و لزوم پیش‌بینی تأثیر آن بر حوزه نیز اهمیت بسیاری دارد. آقابیگی و همکاران (۲۰۱۶) در حوزه‌ی آبخیز دینور استان کرمانشاه، افزایش ۱۲برابری بار رسوب را در دوره‌ی ۱۵ساله گزارش کردند که از علل مهم آن ۳۰ ٪ افزایش کاربری کشاورزی در حوزه‌ی یادشده بود. به‌دلیل خطرپذیری زیاد در حوزه‌های بی‌آمار، اهمیت مدل سازی فرایندهای آب‌شناسی در حوزه‌هایی که آمار کافی ندارند، اهمیت بیشتری دارد (علیزاده ۲۰۱۲). برای جلوگیری از خسارت و نیز مدیریت مناسب در حوزه‌های آبخیز، نیاز به مدلی است که بتواند حجم وسیعی از داده‌ها مثل بارش، پستی‌وبلندی مرزهای حوزه‌ی آبخیز، خصوصیات خاک، کاربری زمین، پوشش‌های گیاهی، داده‌های کیفی آب و سطح آب زیرزمینی را در شبیه‌سازی به‌کار برد و نتایج مطلوب را به‌دست دهد (کاویان‌پور و سادات‌میرصانع ۲۰۱۱). مدل SWAT[1]، مدلی جامع و کامل در مقیاس حوزه‌ای است که به‌وسیله‌ی سازمان تحقیقات کشاورزی آمریکا[2] برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی و تراز مواد شیمیایی در حوزه‌هایی با خاک، کاربری زمین و شرایط مدیریتی متفاوت ارائه شده است (نش و همکاران، ۲۰۰۵). کارآیی این مدل در سال‌های گذشته سبب استفاده‌ی وسیع از آن در مناطق مختلف ایران و جهان شده است. هاریلنکو و همکاران (۲۰۱۶) آب موجود در خاک را به‌وسیله‌ی مدل SWAT ارزیابی کردند و دریافتند که این مدل ابزاری مناسب برای تخمین مقدار آب موجود خاک در مناطقی با اطلاعات ضعیف است. حسینی (۲۰۱۴) شبیه‌سازی تراز آبی حوزه‌ی آبخیز قره‌سو در استان کرمانشاه را با استفاده از مدل SWAT بررسی کرد. نتایج مدل نشان داد که از کارآیی مناسبی در پیش بینی سیلاب حوزه برخوردار است. زارع‌گریزی و طالبی (۲۰۱۷)، تراز آبی رودقره‌سو در استان گلستان را با استفاده از مدل SWAT بررسی و از داده‌های مشاهداتی چندین ایستگاه اندازه‌گیری، به‌طور هم‌زمان استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده‌ی قابلیت مناسب مدل در شبیه‌سازی فرایندهای آب‌شناسی حوزه بود. علاوه‌بر بررسی‌هایی که برای بررسی تراز آبی رودها با مدل SWAT انجام شده است، پژوهش‌هایی نیز برای تبیین ویژگی‌های هیدرولیکی حوزه‌ها با این مدل انجام شده است. رئوف و همکاران (۲۰۱۶) ویژگی‌های هیدرولیکی و آب‌وزمین‌شناسی حوزه‌ی بالخلوچای در استان اردبیل را با استفاده از مدل SWAT برآورد کردند. ویژگی‌های آب‌شناسی و آب‌وزمین‌شناسی حوزه، مانند شماره‌ی منحنی، زمان تأخیر در تغذیه‌ی آبخوان و هدایت هیدرولیکی اشباع با مدل برآورد شد، و نشان‌دهنده‌ی شبیه‌سازی مناسب جریان رود با مدل بود. ران و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی توزیع بارندگی در حوزه‌ی هیهه[3] را با استفاده از مقایسه‌ی جریان خروجی از حوزه و میزان بارندگی در سطح حوزه انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل SWAT به‌خوبی توانسته است توزیع بارندگی را در سطح حوزه برآورد کند. سلحشور و همکاران (۲۰۱۲) شبیه‌سازی جریان ماهانه‌ی رود بالخلوچای اردبیل را با استفاده از مدل SWAT انجام دادند. مقادیر شاخص‌های RMSE و R^2 در دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۶۳ به‌دست آمد، که نشان از کارآیی زیاد مدل در شبیه‌سازی جریان داشت.باستانی الهآبادی و همکاران (۲۰۱۲) مدل SWAT را در برآورد رواناب حوزه‌ی آبخیز کردان به‌کار گرفتند؛ نتایج نشان داد که این مدل در برآورد رواناب این حوزه دقت مناسبی دارد. اکبری (۲۰۱۰) شبیه‌سازی جریان ماهانه‌ی حوزه‌ی آبخیز چهل‌چای را با استفاده از مدل SWAT انجام داد، و نتایج وی دقت نسبتاً مناسب مدل را در برآورد رودخانه‌ای نشان داد. با توجه به توانمندی زیاد این مدل در تخمین تراز آبی حوزه‌های آبخیز، هدف از این تحقیق بررسی کارآیی مدل SWAT در شبیه‌سازی و برآورد رواناب حوزه‌ی آبخیز اهرچای است.

مواد و روش‌ها

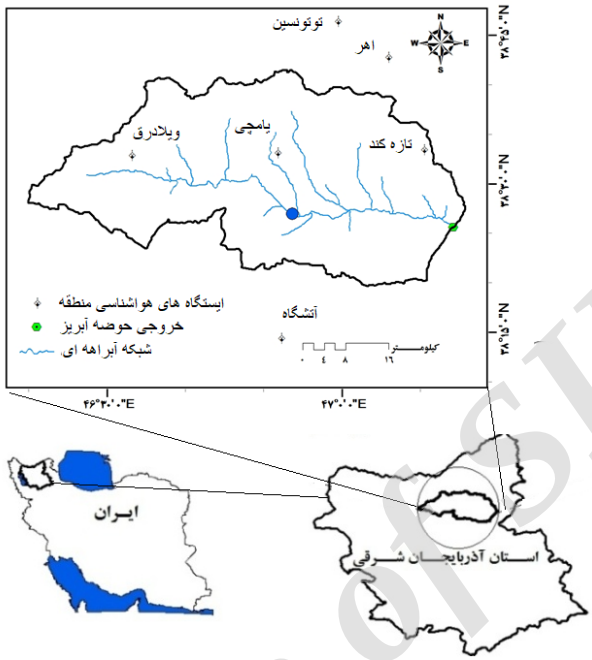
معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی پژوهش، در ناحیه‌ی شمال‌غربی کشور، محدوده‌ی تقسیمات سیاسی استان آذربایجان شرقی است. رود اصلی حوزه اهرچای است که از غرب حوزه وارد و از شرق آن خارج می‌شود. رود اهرچای از سرشاخه‌های درّه‌رود از شاخه‌های رود ارس، و جزو حوزه‌ی آبخیز دریای خزر است. کم‌ترین ارتفاع، ۱۲۳۶ و بیش‌ترین ارتفاع حوزه ۳۱۲۳ متر است. مساحت محدوده‌ی پژوهش حدود ۲۰۰۰ کیلومترمربع در مختصات جغرافیایی ً۴۹ ٬۱۹ ٰ۴۶ تا ً۲۶ ٬۱۶ ٰ۴۷ طول‌شرقی و ً۰۶ ٬۲۷ ٰ۳۸ تا ً۰۶ ٬۲۹ ٰ۳۸ عرض -شمالی است. ایستگاه آب‌سنجی تازه‌کند که از داده‌های آن برای واسنجی استفاده شده در خروجی این حوزه است. رواناب‌های ناشی از بارندگی که

1- Soil and Water Assessment Tool
2 - Agriculture Research Service
3 - Heihe

Archive of SID

عمدتاً از ارتفاعات بالادست و پرشیب این منطقه سرچشمه می‌گیرند، به‌وسیله‌ی آبراهه‌های متعددی زه‌کشی شده اند و ضمن عبور از مناطق کم‌شیب، به‌شدت بر زمین‌های روستایی و تأسیسات و مناطق مسکونی پایین‌دست خود تأثیر می گزارند. موقعیت منطقه‌ی پژوهش و مکان ایستگاه‌های هواشناسی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت حوزه‌ی اهرچای در استان و کل کشور.

داده‌های ورودی مدل

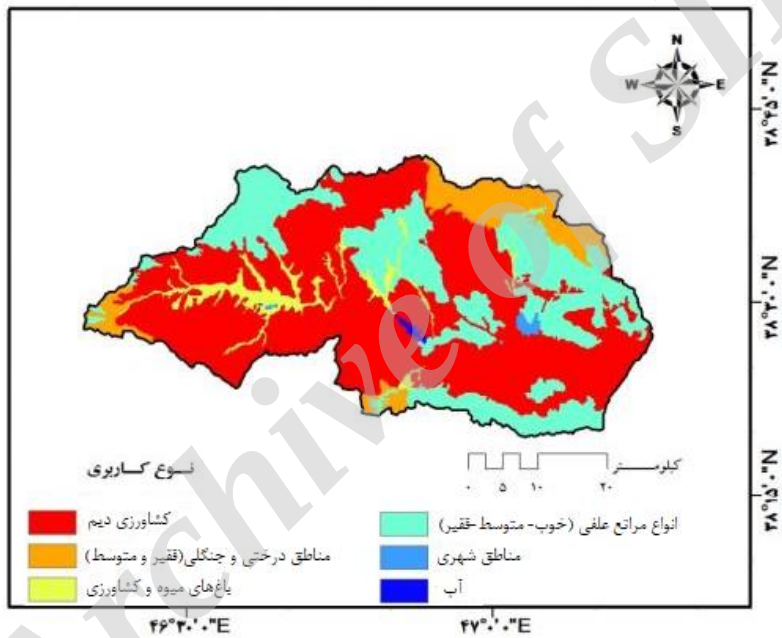
SWAT[4] مدلی در مقیاس آبخیز بزرگ یا زیرحوزه است قابلیت‌های آن به‌طور پیوسته در حال توسعه است. مدل SWAT یک مدل نیمه‌توزیعی و جامع و کامل در مقیاس حوزه‌ای است که برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، عناصر غذایی و تراز مواد شیمیایی در حوزه‌هایی با خاک و کاربری زمین متفاوت، برای دوره‌های زمانی طولانی ارائه شده است. از نظر زمانی فرایندهای مختلف بیان‌شده توان شبیه‌سازی در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه را دارند. از جمله داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی در مدل SWAT می‌توان به نقشه‌های پایه مثل نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاع یا DEM، نقشه‌ی کاربری زمین و نقشه‌ی خاک اشاره کرد که هر سه‌ی این نقشه‌ها با ساختار سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی تهیه شده است و در قالب لایه های رستری به مدل معرفی می‌شود. مدل برای شناسایی خصوصیات ظاهری و تشخیص محل آبراهه‌ها و نیز زیرحوزه‌ها از نقشه ی مدل رقومی ارتفاع استفاده می‌کند. در جدول ۱ مشخصات مربوط به ایستگاه‌های موجود در منطقه نشان داده شده است. نقشه‌ی کاربری منطقه با استفاده از نقشه‌ی کاربری زمین استان آذربایجان شرقی و نیز توضیحاتی آورده شده است. در راهنمای مدل برای جداسازی و نام‌گذاری زمین‌ها پنج نوع کاربری جداسازی و تهیه شد (شکل ۲).

4- Soil and Water Assessment Tool

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری در حوزه‌ی اهرچای.

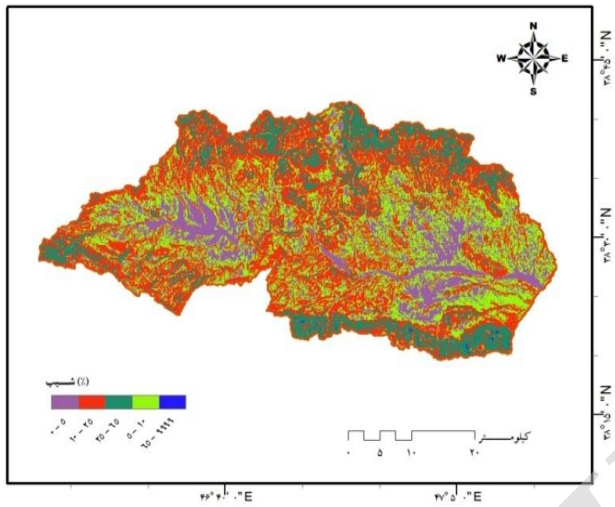
ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
۱	تازه‌کند	هیدرومتری	۴۷°۱۴	۳۸°۲۵	۱۲۳۷
۲	اهر	سینوپتیک	۴۷°۰۷	۳۸°۴۳	۱۳۹۰
۳	یامچی	باران‌سنج	۴۶°۸۷	۳۸°۲۴	۱۵۸۴
۴	آتشگاه	باران‌سنج	۴۶°۵۶	۳۶°۵۶	۱۷۷۲
۵	ویلادرق	باران‌سنج	۴۶°۸۷	۳۸°۵۶	۱۸۵۵
۶	توتونسین	باران‌سنج	۴۷°۱۷	۳۸°۵۶	۱۷۶۹



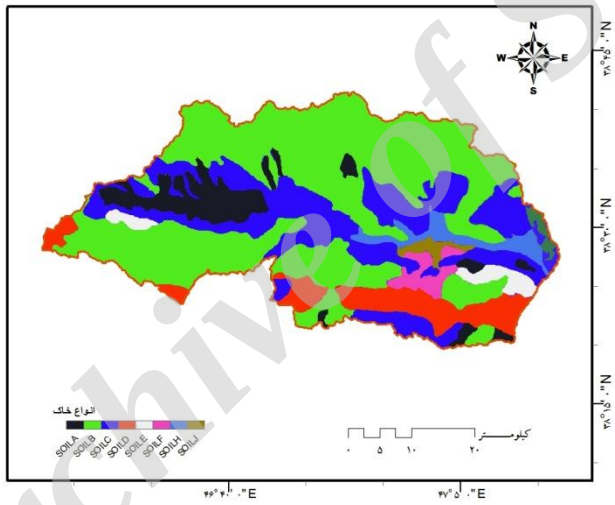
شکل ۲- نقشه‌ی کاربری زمین در حوزه‌ی اهرچای.

برای تعریف نقشه‌ی شیب در مدل و با استفاده از نقشه‌ی DEM، گروه‌بندی شیب‌ها به‌صورت دستی در پنج طبقه و در طبقات ۰ تا ۱۰، ۱۰ تا ۱۵، ۱۵ تا ۲۵، ۲۵ تا ۶۵ و بیشتر از ۶۵ وارد شد. شکل ۳ نقشه‌ی طبقه‌بندی‌شده‌ی شیب را در حوزه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد؛ نقشه‌ی طبقه‌بندی‌شده‌ی خاک در شکل ۴ نشان داده شده است. هم‌پوشانی نقشه‌ها در مدل بررسی و واحدهای پاسخ آب‌شناسی (HRU) آن تهیه شد. با توجه به وسعت زیاد محدوده‌ی پژوهش تعداد واحدهای پاسخ آب‌شناسی با تعداد زیرحوزه‌ها برابر در نظر گرفته شد. حاصل کار در این مرحله تقسیم‌بندی حوزه به ۳۱ واحد پاسخ آب‌شناسی بود که برابر با تعداد زیرحوزه‌ها در نظر گرفته شد. درنهایت کاربری زمین محدوده‌ی مطالعاتی در ۶ نوع، خاک در ۸ نوع و شیب در ۵ گروه طبقه‌بندی شد. نقشه‌ی واحدهای پاسخ آب‌شناسی در شکل ۵ نشان داده شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

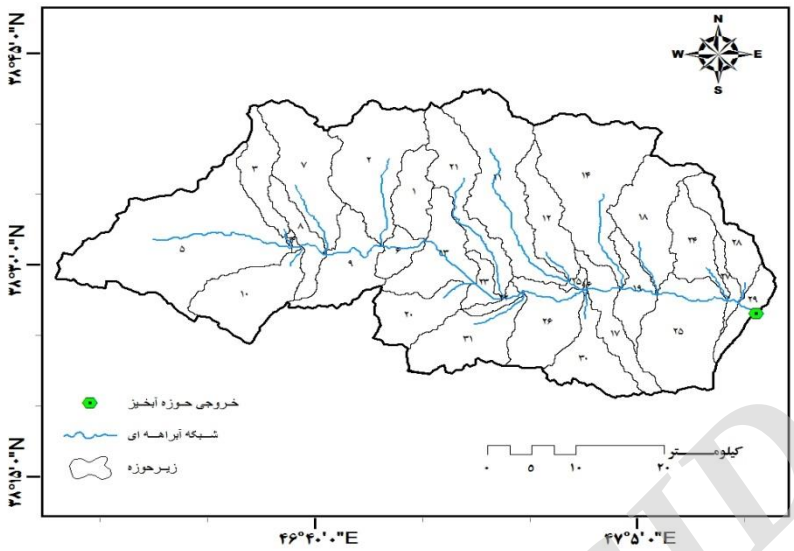


شکل ۳- نقشه‌ی طبقه‌بندی‌شده‌ی شیب حوزه.



شکل ۴- نقشه‌ی طبقه‌بندی‌شده‌ی خاک حوزه.

Archive of SID



شکل ۵- نقشه‌ی زیرحوزه‌ها و آبراهه‌ها.

شاخص‌های آماری واسنجی و اعتبارسنجی مدل

برای واسنجی مدل می‌توان از توانایی‌های خود مدل بهره برد؛ اما نرم‌افزار SWAT-CUP توانمندی‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی برای واسنجی و اعتبارسنجی دارد و نتایج مناسب‌تری می‌دهد. برای ارزیابی توانایی مدل SWATدر شبیه‌سازی تراز آب در این نرم‌افزار، شاخص‌های r-factor، R^2، NS و p-factor در الگوریتم PSO به‌کار گرفته می‌شوند. در برنامه‌ی PSO، دامنه‌ی عدم قطعیت برای هر ویژگی در نظر گرفته می‌شود و برنامه هنگام واسنجی تلاش می‌کند ویژگی‌ها را در این محدوده قرار دهد. r-factor فاصله‌ی بین حد بالا و پایین محدوده‌ی عدم‌قطعیت است که سعی می‌شود این عدد به صفر نزدیک شود تا محدوده کوچک‌تر باشد. P-factor نشان‌دهنده‌ی آن است که چه مقدار از داده‌های مشاهداتی در محدوده‌ی عدم‌قطعیت است و نزدیکی این عدد به ۱، نشان‌دهنده‌ی نتیجه‌ی بهتر مدل است (باستانی‌اله‌آبادی و همکاران ۲۰۱۲).

روابط مربوط به توابع NS (Nash-Sutcliffe) و R^2 برای ارزیابی مدل به صورت زیر است:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)^2}{\sum_i (Q_{mi} - \bar{Q}_m{}^2} \quad (۵)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{mi} - \bar{Q}_m)(Q_{si} - \overline{Q_s})\right]^2}{\sum_i (Q_{mi} - \bar{Q}_m{}^2 \sum_i (Q_{si} - \bar{Q}_s)^2} \quad (۶)$$

$\bar{Q}_m$ میانگین آب‌دهی مشاهداتی به مترمکعب‌برثانیه، Q_{mi} دبی مشاهداتی و Qsi آب‌دهی محاسباتی در طول دوره‌ی شبیه‌سازی است. هرچه مقدار این روابط به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی این است که نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی به یکدیگر نزدیک‌تر و نتایج مطلوب‌تر است.

نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی تراز

با توجه به داده‌های آب‌دهی ماهانه‌ی جریان خروجی از حوزه، دوره‌ی آماری ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۰ برای شبیه‌سازی انتخاب شد؛ سپس با اجرای مدل در مرحله‌ی اول، نتایج شبیه‌سازی تراز آب، با استفاده از SWAT_CHECKER بررسی شد. در جریان شبیه‌سازی آب‌شناسی حوزه‌ی آبخیز اهرچای برای دوره‌ی ۲۹ساله، متوسط مقادیر دو مؤلفه‌ی اصلی تراز آب سطحی، یعنی بارندگی و تبخیر-تعرق، به‌ترتیب ۵۵۹/۸ و ۲۹۹/۱ میلی‌متر به‌دست آمد و متوسط شماره‌ی منحنی برای این منطقه ۷۶/۷ محاسبه شد. مؤلفه‌ی تبخیر-تعرق، بیش‌ترین مقدار و نفوذ به آبخوان عمیق با توجه به فراوانی رواناب سطحی، کمترین مقدار را دارد (جدول ۲).

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۲- بیلان آبی حوزه‌ی اهرچای.

رواناب سطحی (میلی‌متر)	نفوذ به آبخوان کم‌عمق (میلی‌متر)	صعود آب از آبخوان (میلی‌متر)	تبخیر ـ تعرق (میلی‌متر)	بارش‌ها (میلی-متر)	شماره-ی منحنی	جریان برگشتی از آبخوان به سطح (میلی‌متر)	جریان آب زیرزمینی به سطح (میلی‌متر)	نفوذ عمقی (میلی‌متر)
۱۱۷/۲۳	۱۲۵/۱۲	۸/۳۷	۲۹۹/۱	۵۵۹/۸	۷۶/۷	۱۱۰/۷۳	۳/۳۷	۶/۲۶

نتایج واسنجی مدل

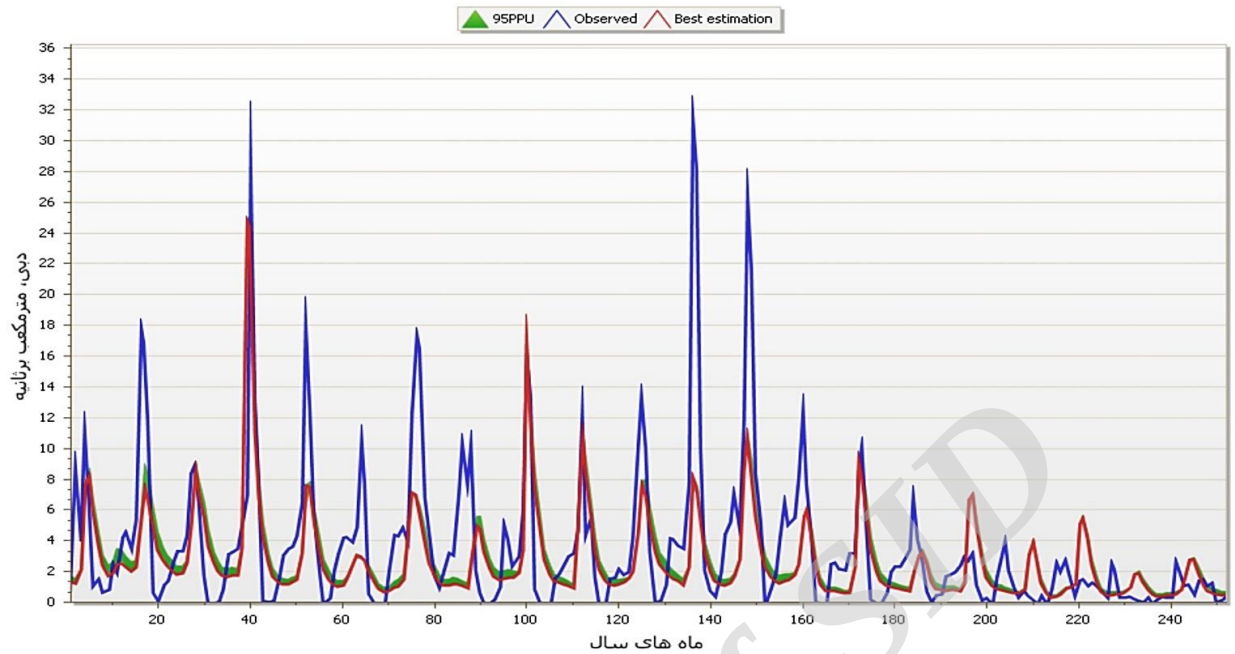
تعداد متغیرهای به‌کاررفته در این مدل بسیار متعدد است؛ پس ویژگی‌های حساس شناسایی شد تا در مرحله‌ی واسنجی مدل به آن توجه شود. متغیرهای استفاده‌شده برای واسنجی مدل در این تحقیق، به‌ترتیبِ حساسیت در جدول ۳ ارائه شده است. واسنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار SWAT_CUP ۲۰۱۲ و استفاده از الگوریتم PSO انجام گرفت که با تکرار زیاد نتایج شبیه‌سازی‌شده، با مشاهداتی درباره‌ی آب‌دهی جریان ماهانه بررسی و ارزیابی شد. برای مرحله‌ی واسنجی مدل، دوره‌ی آماری ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۲ به‌مدت ۲۱ سال انتخاب شد (شکل ۷). شکل ۷ نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی‌شده در این مرحله، تاحدودی به مقادیر مشاهداتی نزدیک است و با ضریب نش ساتکلیف (NS) برابر با ۰/۳۹ شبیه‌سازی خوبی برای آب‌دهی ماهانه‌ی خروجی از حوزه انجام نشده است. البته، مدل آب‌دهی‌های اوج را معمولاً کمتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی کرده است. از سال ۱۹۹۸، سال احداث سد در حوزه‌ی آبخیز است، به بعد، مقادیر آب‌دهی‌های خروجی از حوزه به‌مراتب کاهش یافته است که نشانه‌ی تأثیر احداث سد بر مهار رواناب بارندگی‌ها در حوزه‌ی آبخیز است. در سال‌های بعد از احداث سد، شبیه‌سازی مدل تاحدودی ضعیف‌تر شده است، که علت آن را می‌توان با مهارکردن آب‌دهی جریان در محل احداث سد و تخصیص آب از سد، مرتبط دانست. با توجه به روند تغییرات جریان خروجی حوزه می‌توان نتیجه گرفت که این تغییرات از احداث سد داخل حوزه متأثر است، و مدل SWAT نتوانسته است شبیه‌سازی خوبی از آبگیر داخل حوزه داشته باشد. در کل، باتوجه به کم‌شدن محدوده‌ی عدم‌قطعیت و قرارگرفتن درصد مناسبی از داده‌های شبیه‌سازی در این محدوده، نتایج شبیه‌سازی در مرحله‌ی واسنجی برای آب‌دهی‌های جریان ماهانه‌ی خروجی از حوزه، نسبتاً پذیرفتنی است. جدول ۴، شاخص‌های آماری مربوط به مرحله‌ی واسنجی را نشان می‌دهد.

Archive of SID

جدول ۳-سنجه‌های انتخابی مدل به‌ترتیب حساسیت.

نام ویژگی	شرح ویژگی	محدوده‌ی تغییرات
SMFMN	کمینه‌ی نرخ ذوب برف در طول سال	۰/۰۷ – ۰/۶۹
SURLAG	ضریب تأخیر رواناب سطحی	۹ – ۲۰
TLAPS	نرخ گذشت دما	۳ – ۹
EPCO	عامل جبران جذب گیاهی	-۰/۹ – ۰/۲
CH_N_2	ضریب مانینگ جریان در آبراهه‌ی اصلی	۰/۰۷ – ۰/۷
CH_K_2	هدایت هیدرولیکی مؤثر بر بستر آبراهه‌ی اصلی	۶۰ – ۱۰۰
TLAPS	نرخ گذشت دما	۳ – ۹
CH_K_2	هدایت هیدرولیکی مؤثر بر بستر آبراهه‌ی اصلی	۶۰– ۱۰۰
SOL_AWC	ظرفیت آب قابل‌دسترس خاک	-۰/۵ – ۰/۳
SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	-۲/۲–۰/۰۵
GW_REVAP	ضریب تبخیر آب زیرزمینی	۰/۰۷ – ۰/۹۶
GW_QMN	کمینه‌ی مقدار ذخیره‌ی آب در سفره‌ی کم‌عمق که برای رخداد جریان پایه لازم است	۰ – ۰/۹۸
GW_DELAY	زمان تأخیر آب زیرزمینی	-۰/۱۷ – ۰/۶۱
SFTMP	دمای بارش برف	۷ –۱۲
ESCO	عامل جبران تبخیر از خاک	-۰/۰۵ – ۰/۶۴
OV_N	ضریب زبری مانینگ برای جریان سطحی	-۱ – ۶
CH_COV	عامل فرسایش‌پذیری آبراهه	-۰/۵ – ۰/۵
SMFMX	بیشینه‌ی نرخ ذوب برف در طول سال	۰/۴ – ۱
CN_2	شماره‌ی منحنی SCS در شرایط رطوبتی II	-۱/۳ – ۰/۰۸
SOL_BD	چگالی توده‌ی خاک	-۱/۰۵ – ۰/۳
ALPHA_BF	ثابت تخلیه‌ی آب زیرزمینی	۰ - ۱
USLE_P	ضریب حمایتی USLE	۰ – ۱
USLE_C	کمینه‌ی عامل USLE	۰/۰۱ – ۰/۵

Archive of SID



شکل ۶- مقایسه‌ی آب‌دهی‌های مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی‌شده در مرحله‌ی واسنجی.

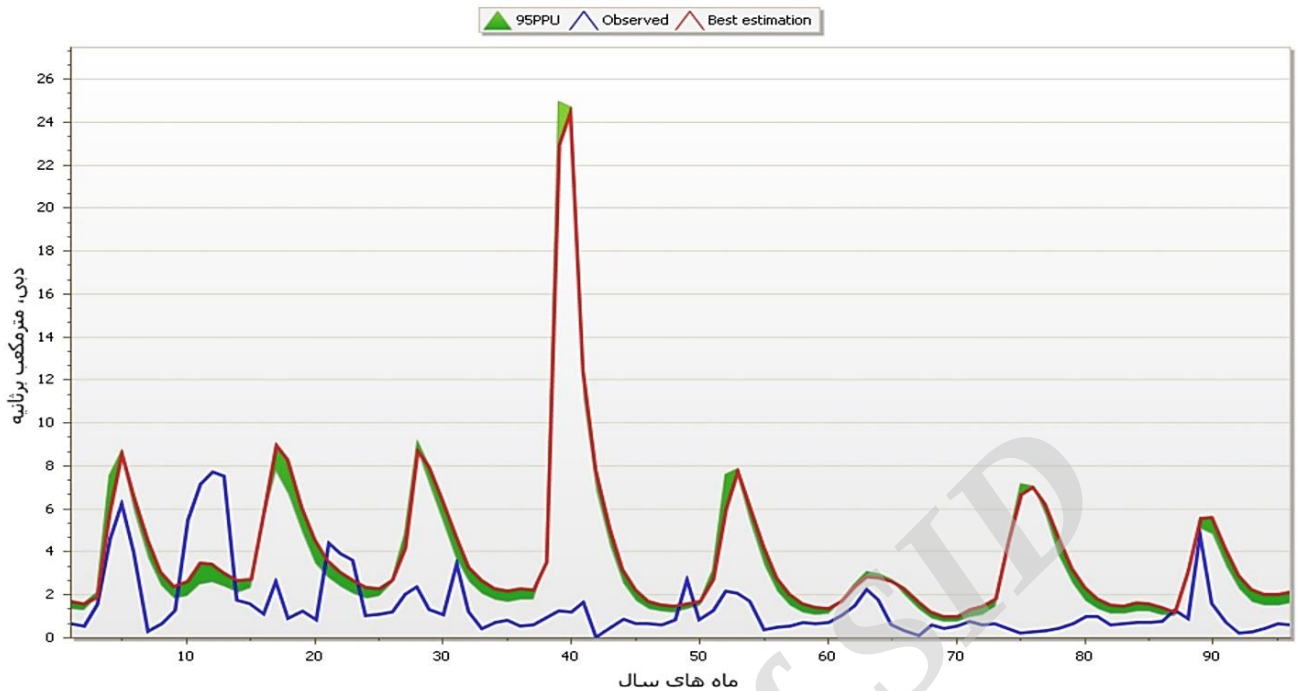
جدول ۴- شاخص‌های آماری مدل در مرحله‌ی واسنجی.

نام متغیر	NS	R^2	r-factor	p-factor
جریان خروجی	۰/۳۹	۰/۴۳	۰/۰۹	۰/۱۶

نتایج اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل عبارت از فرایندی پس از واسنجی مدل است که در آن قابلیت مدل برای پیش‌بینی دوره‌ای غیر از دوره‌ی واسنجی بررسی می‌شود. زمانی می‌توان از یک مدل در پیش‌بینی استفاده کرد که درستی و توانایی پیش‌بینی آن در دوره‌ی اعتبارسنجی، با مقدار خطای پذیرفتنی اثبات شده باشد. اعتبارسنجی مدل به هر منطقه‌ی خاص مربوط است و مدل برای تمامی نقاط اعتبارسنجی نشده است (رسگارد و کودسن ۱۹۹۶). مرحله‌ی اعتبارسنجی بعد از مرحله‌ی واسنجی و با استفاده از ویژگی-های بهینه‌شده انجام می‌گیرد که اعتبار مدل را نشان می‌دهد. در مرحله‌ی اعتبارسنجی از داده‌های مشاهداتی مربوط به دوره‌ی آماری ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ به‌مدت ۸ سال در ادامه‌ی دوره‌ی واسنجی استفاده شد و با استفاده از ویژگی‌های بهینه‌شده در مرحله‌ی واسنجی، فرایند اعتبارسنجی انجام شد. نتایج مربوط به مرحله‌ی اعتبارسنجی در شکل ۸ ارائه شده است. جدول ۵ نیز شاخص‌های آماری مربوط به مرحله‌ی اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

Archive of SID



شکل ۷- مقایسه‌ی آب‌دهی‌های مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی‌شده در مرحله‌ی اعتبارسنجی.

جدول ۵- شاخص‌های آماری اعتبارسنجی.

نام متغیر	NS	R^2	r-factor	p-factor
جریان خروجی	-۶/۷	۰/۰۲	۰/۳۴	۰/۰۴

داده‌های حساس مدل، با استفاده از الگوریتم SUFI-۲ به روش معکوس برآورد شد؛ به‌همین روی، با اجرای مدل، همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، مدل به‌خوبی زمان اوج و فرود آب‌نگار را برآورد کرد. همان‌طور که عباس‌پور و همکاران (۲۰۰۷) بیان کرده‌اند، کیفیت خوب داده‌های ورودی می‌تواند باعث افزایش دقت نتایج خروجی شود؛ بنابراین استفاده از الگوریتم SUFI-۲ می تواند دقت ویژگی‌های ورودی را افزایش دهد. در این پژوهش، ویژگی‌های حساس مدل، نرخ ذوب برف در طول سال، ضریب تأخیر رواناب سطحی، عامل جبران جذب گیاهی و ضریب مانینگ جریان در آبراهه‌ی اصلی بودند و چون نرخ ذوب برف و ضریب تأخیر رواناب سطحی از شاخص‌های مهم و تأثیرگذار بر آب‌نگار خروجی حوزه است، تعیین دقیق این ویژگی‌ها می‌تواند بر دقت نتایج تأثیر مستقیم داشته باشد. باتوجه به آن‌که در نتایج تراز آب در منطقه ۵۱ ٪ جریان کل مربوط به رواناب سطحی است و از طرفی، متوسط ارتفاع حوزه، نشان از برف‌گیر بودن منطقه دارد و چون تعیین دقیق نرخ ذوب برف در منطقه با دشواری‌هایی همراه است، ممکن است یکی از دلایل کم بودن ضریب کارآیی مدل در حوزه‌ی گفته‌شده، بی‌دقتی در شاخص ذوب برف و میزان آن در حوزه باشد.

رئوف و همکاران (۲۰۱۶) با تعیین میزان شماره‌ی منحنی حوزه و ضریب تبخیر از سطح خاک در حوزه‌ی بالخلوچای اردبیل، با حل معکوس و تعیین دقیق ویژگی‌های تأثیرگذار، مقادیر هدایت هیدرولیکی خاک را با ضریب تبیین ۰/۸۱ برآورد کردند، که این نیز نشان می‌دهد یکی از دلایل کاهش ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تبیین مطالعه‌ی حاضر می‌تواند تخمین غیرقابل‌اندازه‌گیری در متغیرهای حساس ورودی باشد. حسینی (۲۰۱۴) با تعیین شماره‌ی منحنی حوزه‌ی قره‌سو به‌عنوان حساس‌ترین عامل در خروجی مدل حوزه، آب‌نگار سیل حوزه‌ی یادشده را با ضریب نش- ساتکلیف ۰/۶ و ضریب تبیین ۰/۶۵ در مرحله‌ی اعتبارسنجی برآورد کرد که دقیق‌تر از نتایج حاصل از این پژوهش است.

بنابراین، به نظر می‌رسد در رخدادهایی که ویژگی‌های حساس مدل توانایی برآورد با روش‌های حل معکوس یا مبتنی‌بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده باشد، و فقط به نتایج مرحله‌ی واسنجی وابسته نباشد، شبیه‌سازی مدل بسیار دقیق‌تر است. در حوزه‌ی اهرچای تقریبا ۲۱ ٪ از تراز آبی به جریان‌های سطحی مربوط است که ارتفاع زیاد

Archive of SID

حوزه و برف‌گیر بودن آن تأثیر بسیاری در آب‌نگار خروجی حوزه داشت. در مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج محققان دیگر در سطح جهان، از جمله الانسی و همکاران (۲۰۰۹) و موریاسی و همکاران (۲۰۰۷) مشخص می‌شود که برخلاف مطالعات صورت‌گرفته، دقت مدل SWAT در این حوزه‌ی کم است. شکل ۸ نشان می‌دهد که در مرحله‌ی اعتبارسنجی نیز مقادیر شبیه‌سازی جریان خروجی حوزه، تفاوت زیادی با مقادیر واقعی دارد و شبیه‌سازی خوبی در این دوره انجام نشده است. مقادیر برآوردشده بزرگ‌تر از مقادیر واقعی است و این موضوع در مورد آب‌دهی‌های بیشینه نیز درست است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر مشاهداتی جریان خروجی در این دوره‌ی هشت‌ساله نسبت به دوره‌ی قبل، حالت یکنواختی داشته و مقادیر آن نیز کاهش یافته است. از آن‌جا که تمام طول دوره‌ی آماری مربوط به مرحله‌ی اعتبارسنجی در سال‌های بهره‌برداری سد حوزه بود، دقت مقادیر مشاهداتی و برآوردی آب‌دهی از مرحله‌ی واسنجی کم‌تر بود. احداث سدها و مخازن داخل حوزه در میزان جریان خروجی از حوزه‌های آبخیز بسیار تأثیرگذار است، و مقادیر آب‌دهی‌های خروجی از حوزه را به‌مراتب کاهش می‌دهد، بنابراین یکی از دلایل کم‌بودن ضریب‌های نش‌ساتکلیف (NS) در مرحله‌ی اعتبار سنجی را می‌توان همین موضوع دانست. این نتیجه با نتایج پژوهش‌های انجام‌گرفته به‌وسیله‌ی شفیعی (۲۰۰۹) و عبدی (۲۰۰۸) همخوانی دارد. متعدد بودن تعداد داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل، از مسائلی است که باید در نظر گرفته شود و با توجه به آن‌که در موضوع‌هایی مثل مسائل مربوط به انواع مدیریت داخل حوزه، اطلاعات کاملی موجود نیست، این عوامل می‌توانند باعث کم بودن ضریب نش ساتکلیف (NS) در مرحله‌ی اعتبارسنجی مدل شوند.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ضعیف مدل در شبیه‌سازی جریان حوزه‌ی آبخیز اهرچای، امکان بررسی مجدد نتایج تراز آب با استفاده از ویژگی‌های بهینه‌شده وجود نداشت. درواقع، با توجه به خطاهای به‌دست‌آمده در دوره‌ی اعتبارسنجی، شبیه‌سازی مدل برای این منطقه اعتبار کافی نداشت. کم‌بودن اطلاعات مورد نیاز، متفاوت بودن دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی از نظر تأثیرگذاری احداث سد و مخزن داخل حوزه، با توجه به این‌که بر مساحت زیادی از حوزه‌ی تأثیر می‌گزارد، و نیز وسیع‌بودن منطقه، از عوامل تأثیرگذار بر نتایج نسبتاً ضعیف شبیه‌سازی با مدل SWAT در این منطقه است.

درمجموع، نتایج تحقیق نشان داد که توانایی شبیه‌سازی تراز آبی مدل در حوزه‌های آبخیز بزرگ با ارتفاع زیاد و رژیم بارش برفی، به‌دلیل این‌که ضریب ذوب برف، ویژگی حساس آن تعریف می‌شود، ضعیف است. به‌نظر می‌رسد ویژگی‌های حساس حوزه‌ها در تعیین تراز آبی با توجه به شرایط ارتفاعی متفاوت و خصوصیات آب‌شناسی مختلف متفاوت باشد. در شرایطی که داده‌های ورودی مانند ضریب ذوب برف، در حوزه‌هایی با متوسط ارتفاعی زیاد، با دقت مناسب در مدل‌سازی به‌کاررود، و واسنجی مدل با دقت و توجه کافی باشد، و پس از تعیین ویژگی‌های حساس مدل، تخمین مناسبی از آن‌ها در منطقه انجام شود، مدل هرچه‌بیشتر معرف شرایط واقعی حوزه خواهد بود، و مدل SWAT دقت مناسبی در شبیه‌سازی جریان حوزه خواهد داشت.

Archive of SID

منابع

Ababaie B, Sohrabi T. 2009. Evaluation capability of SWAT model in Zayandeh Rood River Basin. J. of Water and Soil Conservation. 16(3):712–719.

Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J, Srinivasan R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology. 333 (2–4): 413–430.

Abdi A. 2008. Evaluation SWAT model for determination of flow and sediment of Plasjan Catchment of Zayandehrood River Basin. M.Sc. thesis. Shahrekord University.100 p. (In Persian).

Aghabaigi-Amin S, Ildorumi A, Noori HR, Haghighi-Kermanshahi A. 2016. Influence of the suspended sediment of the river from land use changes in Dinour Province Basin Kermanshah. Ecohyrology. 3(4):611–621. (In Persian).

Akbari H. 2010. Simulation daily flow of Chehelchay River of Golestan Province with SWAT model. MSc. thesis. University of Gorgan. 120 p. (In Persian).

Alansi AW, Amin MSM, Abdul Halim G, Shafri HZM, Aimrun W. 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(1): 7581–7609.

Alizadeh A. 2012. Principles of applied hydrology. Ferdowsi University of Mashhad. 34th edition. 608 p.

Bastani Alahabadi A, Tluri A, Hoseini M. 2012. Use of SWAT 2009 for river simulation. 9th International River Engineering Conferences. Ahvaz. pp. 212–217. (In Persian).

Esmali A. Abdollahi Kh. 2011. Watershed management and soil conservation. University of Mohaghegh Ardabili. 574 p. (In Persian).

Havrylenko SB, Bodoque JM, Srinivasan R, Zucarelli GV, Mercuri P. 2016. Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. Catena. 137(1): 298–309.

Hoseini M. 2014. Water balance simulation in Ghare-Sou Watershed, Kermanshah, using the SWAT model Watershed Engineering and Management. 6(1): 63–73. (In Persian).

Kavianpour MR, Sadat Mir Sane Z. 2011. Hydrological simulation of Kashkan Basin with SWAT model. 4th Iran Water Resources Management Conference. Tehran. pp 165–172. (In Persian).

Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. 50 (3): 885–900.

Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams J.R. 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation, Version 2005.

Rauf M, Azizie Mobser J, Salahshur A. 2017. Estimating hydrological and hydrogeological parameters of watershed using SWAT model (Case study: Balukhlu-Chay Basin). Water and Soil Science. 26(2): 173–185. (In Persian).

Refsgard JC, Knudsen J. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. Water Resources Research. 32 (7):2189–2202.

Ruan H, Songbing Zou O, Yang D, Wang Y, Yin Zh, Zhixiang Lu O, Li F, Xu B. 2017. Runoff simulation by SWAT model using high-resolution gridded precipitation in the Upper Heihe River Basin, northeastern Tibetan Plateau. Water. 9(11): 1–22.

Salahshur A, Rauf M, Esmaly-Uri A. 2012. Simulation monthly flow of B alikhluchay River of Ardabil Province with SWAT model. National

Archive of SID

Conference on Organic and Conventional Agriculture. Ardabil. pp. 261–270. (In Persian).
Shafiie M. 2009. Simulation hydrologic water balance of surface flow with SWAT and GIS(Case study: Nayshabur basin). M.Sc thesis. Mashhad University. 110 p. (In Persian).
Zaregarizi A, Talebi A. 2017. Simulation of water basin water balance using SWAT model (Case study:Ghara Su Basin, Gholestan Province). Journal of Water Management Systems. 9(3):37–50.

Archive of SID