



Evaluation of the Capability of the SWAT Model in Simulating Water Balance Components of the Aras Basin

Mahnaz Saber¹, Bromand Salahi^{2✉}, Roghayeh Maleki Meresht³

1. Postdoctoral Researcher of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: mahnaz.saber@yahoo.com
2. Corresponding Author, Professor of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: salahi@uma.ac.ir
3. Postdoctoral Researcher of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: Roghayeh.maleki1395@gmail.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 23 April 2024

Revised: 14 June 2024

Accepted: 23 June 2024

Published: 22 August 2025

Keywords:

SUFI2 algorithm,

Aras,

Water Balance,

SWAT CUP.

In this research, the water balance components of the Aras basin area were simulated in the SWAT model for a period of 28 years (1987-2014). For this purpose, the efficiency and capability of the SWAT model by SWAT CUP using the SUFI2 algorithm and based on the observed discharge data in the selected hydrometric station of Aras basin (Bdoy) with 70% of the data (1987-2006) and 30% of the rest (2007-2014) was validated. Based on the raster data input to the model, this basin was divided into 68 subbasins with 1264 hydrological response units (HRUs) and calculations were performed on their level. SWAT model calibration was done by using 14 important parameters that were selected from several parameters based on the comparison of sensitivity analysis results. In the sensitivity analysis stage of the model, parameters related to monthly temperature, air temperature, and soil evaporation factor from .bsn, .wgn, and .hru files were identified as the most effective parameters in simulating the flow discharge of the selected hydrometric station of Aras Basin. By running 300 times of calibration, finally, the best round of simulation based on the target criteria was identified and the output data was evaluated. The efficiency and accuracy of the model in the calibration period (1987-2006) based on the evaluation criteria of NS, P-Factor, R-Factor, and R2 were calculated as 0.64, 0.71, 0.27, and 0.79 respectively, which show satisfactory performance of the model. In the water balance simulation, it is Aras Basin. The values of these criteria in the validation period were calculated as 0.7, 0.78, 0.3, and 0.68 respectively. :

Cite this article: Saber, S., Salahi, B., & Maleki Meresht, R. (2025). Evaluation of the Capability of The SWAT Model in Simulating Water Balance Components of the Aras Basin. *Journal of Geography and Planning*, 30 (92), 199-216. <https://doi.org/10.22034/gp.2024.61336.3253>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22034/gp.2024.61336.3253>

Publisher: University of Tabriz.

Introduction

The occurrence of climate change is one of the most important and at the same time the most complex challenges facing human since the late twenties. The most problematic effect of this phenomenon is its effect on water resources. The effects of climate change are primarily noticeable in the temperature and precipitation of the area, and the changes in these variables in turn disrupt the existing order in the hydrological cycle of the region. In the meantime, in arid and semi-arid regions such as the northwestern region of Iran, which is located in the arid belt of the world, in addition to the lack of rainfall as shown by statistics, the high density of population centers has doubled the importance of the vital element of water. In this area, effective development and job-creating measures have been taken and important steps have been taken to put it on the suit path of development, and the main continuation of these measures and planning depends on the vital element of water. In line with the management of water resources and the investigation of the changes in the components of the water balance and the factors affecting it, especially the climate, a powerful tool such as computer modeling is used to simulate the components for a better understanding of the current state of the resources and its management and to forecast them under the conditions of climate change. They are used with the aim of knowing future scenarios and a source for more prudent planning in order to achieve sustainable development. SWAT hydrological model is one such powerful tool.

Data and method

In this research, the water balance components of Aras basin were simulated in the SWAT model for a period of 28 years (1987-2014). For this purpose, the efficiency and capability of SWAT model by SWAT CUP using the SUFI2 algorithm and based on the observed discharge data in the selected hydrometric station of Aras basin (Bdoy) with 70% of the data (1987-2006) and 30% of the rest (2007-2014) was validated. The necessary input data in the SWAT model are placed in three categories: geographical data of the region including topography (DEM map), soil physical characteristics (Soil map), land use and slope of the studied area; Meteorological data of stations and hydrometric data. The DEM map extracted from SRTM satellite images with a resolution of 30 meters for Ares Basin was obtained from the US Geological Survey website, and the soil map prepared by FAO and the land use map were obtained from sawt.tamu.edu website. Also, daily data of minimum and maximum temperature variables, precipitation, wind speed, sunny hours and relative humidity of Ardabil, Parsabad, Jolfa, Khoy and Mako meteorological stations for the long-term period (1985-2021) from the National Meteorological Organization and hydrometric data of Aras basin stations for the period 30 years (1985-2014) was received from the office of basic studies of water resources of the country's regional water company. Due to having the least missing data, Khoy station was determined as the basin base station for reconstructing the missing data of other stations, and after calculating 14 variables for it, it was introduced to it in the WGN_user layer of the model. ARC SWAT interface was used to simulate water balance components and Hargreaves-Samani method was chosen as the method for calculating basin potential Evapotranspiration.

Discussion

Based on the raster data input to the model, this basin was divided into 68 subbasins with 1264 Hydrological Response Units (HRUs) and calculations were performed on their level. SWAT model calibration was done by using 14 important parameters that were selected from several parameters based on the comparison of sensitivity analysis results. In the sensitivity analysis stage of the model, parameters related to monthly temperature and air temperature and soil evaporation factor from.bsn and.wgn and.hru files. They were identified as the most effective parameters in the flow simulation of the selected hydrometric station of Aras Basin. By running 300 times of calibration, finally the best round of simulation based on the goal criteria was identified and the output data was evaluated. The efficiency and accuracy of the model in the calibration period (1987-2006) based on the evaluation criteria of NS, P-Factor, R-Factor and R^2 were calculated as 0.64, 0.71, 0.27 and 0.79 respectively, which shows the satisfactory performance of the model in simulating the water balance of Aras Basin. The values of these criteria in the validation period were calculated as 0.7, 0.78, 0.3 and 0.68 respectively. The comparison of the observed and simulated hydrograph in the calibration stage showed that although the simulated peak discharges do not fully match the measured peak discharges, they have been able to follow the pattern of the observed hydrograph to a large extent, and its upward and downward trend is in accordance with the observed discharge, and in this regard, it has provided an acceptable performance.

Results

According to the results, one of the weak points of the SWAT model is the simulation of snow melting, the effect of which is revealed in the form of a difference between the simulation peak discharges and the observed peak discharges. Also, the simulation of the water balance components of Ares basin with SWAT model showed

that evapotranspiration is the most important component in the water loss of the basin and has taken a large share of the water in the basin. Also, the results of the time series of observed flow discharge in 13 hydrometric stations of the basin indicate a decrease in the trend of this variable in the second half of the studied period, which requires more evaluation and more detailed studies to determine its significance or not. The decrease in discharge in the southern part of the basin, in addition to local causes and the possibility of climate change, can be caused by expansionist policies and excessive dam construction beyond the borders of Iran, especially in Turkey, which has limited the water inflow to the basin

ارزیابی قابلیت مدل SWAT در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه آبریز ارس

مهناز صابر^۱، برومند صلاحی^۲، رقیه ملکی مرشت^۳

۱. پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: mahnaz.saber@uma.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: salahi@uma.ac.ir

۳. پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: roghayeh.maleki1395@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱</p> <p>کلیدواژه‌ها: الگوریتم SUF12، ارس، بیلان آب، SWAT CUP</p>	<p>در این پژوهش مؤلفه‌های بیلان آب حوضه آبریز ارس برای دوره ۲۸ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۴) در مدل SWAT شبیه‌سازی گردید. بدین منظور کارایی و قابلیت مدل SWAT توسط SWAT CUP با استفاده از الگوریتم SUFI2 و بر اساس داده دبی مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری منتخب حوضه ارس (بدوی) با ۷۰ درصد از داده‌ها (۱۹۸۷-۲۰۰۶) واسنجی و با ۳۰ درصد بقیه (۲۰۰۷-۲۰۱۴) اعتبارسنجی شد. بر مبنای داده‌های رستری ورودی به مدل، این حوضه به ۶۸ زیرحوضه با ۱۲۶۴ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم و محاسبات در سطح آن‌ها انجام شد. با استفاده از ۱۴ پارامتر مهم که بر اساس مقایسه نتایج تحلیل حساسیت از بین چندین پارامتر انتخاب شده بودند، کالیبره کردن مدل SWAT انجام شد. در مرحله تحلیل حساسیت مدل، پارامترهای مربوط به دمای ماهانه و دمای هوا و فاکتور تبخیر از خاک از فایل‌های bsn، wgn، و hru به‌عنوان مؤثرترین پارامترها در شبیه‌سازی دبی جریان ایستگاه هیدرومتری منتخب حوضه ارس شناسایی شدند. با اجرای ۳۰۰ باره کالیبراسیون، در نهایت بهترین دور شبیه‌سازی بر اساس معیار هدف شناسایی شده و داده‌های خروجی مورد ارزیابی قرار گرفت. کارایی و دقت مدل در دوره واسنجی (۱۹۸۷-۲۰۰۶) بر اساس معیارهای ارزیابی NS، P-Factor، R-Factor و R2 به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۲۷، ۰/۷۹ و ۰/۷۹ محاسبه گردید که نشان‌دهنده رضایت‌بخش بودن کارایی مدل در شبیه‌سازی بیلان آب حوضه ارس است. مقدار این معیارها در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷، ۰/۷۸، ۰/۳ و ۰/۶۸ محاسبه شد.</p>

استناد: صابر، مهناز؛ صلاحی، برومند؛ و ملکی مرشت، رقیه (۱۴۰۴). ارزیابی قابلیت مدل SWAT در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه آبریز ارس. *جغرافیا*

و برنامه‌ریزی، ۳۰ (۹۲)، ۱۹۹-۲۱۶

<http://doi.org/10.22034/gp.2024.61336.3253>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

گرمایش جهانی و وقوع تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین و درعین‌حال پیچیده‌ترین چالش‌های پیش روی بشر از اواخر دهه بیستم میلادی است. این پدیده که به‌عنوان نوسان کلی و با ابعاد گسترده در اقلیم یک محل تعریف می‌گردد (خسروی و همکاران، ۱۳۸۹)، پیامدها و اثرات متعددی در مناطق مختلف جهان دارد که مسأله‌سازترین آن‌ها تأثیر آن بر حیاتی‌ترین ماده و بخش آب و منابع آبی است (کیم و همکاران^۱، ۲۰۲۱). علت آن علاوه بر محدود بودن این منابع، توزیع نامتوازن آن است و منشأ بسیاری از مناقشات تاریخی و کشمکش‌های آینده در جهان بر سر منابع آبی و دسترسی به آن است. تأثیرات تغییر اقلیم در وهله نخست در دما و بارش محل قابل‌ملاحظه است که تغییرات این متغیرها نیز به‌نوبه خود موجب به هم خوردن نظم موجود در چرخه هیدرولوژیکی منطقه می‌گردد (زارع زاده مهریزی و همکاران، ۱۳۹۷). در این میان در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون منطقه شمال غرب ایران که در کمربند خشکی جهان واقع شده، علاوه بر کمبود بارش‌ها که آمارها نشان می‌دهد، تراکم بالای مراکز جمعیتی در آن اهمیت عنصر حیاتی آب را دوچندان کرده است.

منطقه شمال غرب ایران با وجود بافت کوهستانی، تراکم مراکز سکونتگاهی بالایی به‌ویژه در سواحل جنوبی رود حیاتی ارس دارد. تقاضای روزافزون این جوامع برای تأمین آب مورد نیاز به‌موازات بهبود کیفیت زندگی و افزایش سطح رفاه و بهداشت در کنار نیازمندی به تأمین پایدار آب آن‌ها و پروژه‌های توسعه‌محور (کشاورزی، عمرانی، مجتمع‌ها و شهرک‌های گلخانه‌ای، طرح‌های بوم‌گرا و برنامه‌های بلندمدت جذب گردشگری و ...) در دهه‌های اخیر در این منطقه ضرورت تأمین و تخصیص بهینه آب را در راستای پایدارسازی توسعه و حفظ سیر صعودی آن و جلوگیری از هدررفت اعتبارات تخصیص‌یافته به برنامه‌های منطقه‌ای و نیز تثبیت سکونت دائمی جمعیت سکونتگاه‌ها - به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های تأمین امنیت ملی و کاهش تبعات ناشی از مهاجرت جمعیت به کلان‌شهرها و حومه‌نشینی و بی‌توجهی به منابع طبیعی - ایجاب می‌نماید. در این منطقه اقدامات مؤثر توسعه‌ای و اشتغال‌زا انجام گرفته و گام‌های مهمی برای قرار گرفتن آن در مسیر مناسبی از توسعه برداشته شده که شرط تداوم عمده این اقدامات و برنامه‌ریزی‌ها منوط به عنصر حیاتی آب است. در همین راستا پژوهش‌هایی انجام شده که به صورت موردی به یکی از مؤلفه‌ها و یا در سطح یک زیرحوضه کوچک پرداخته‌اند از جمله خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۷) که تنها رسوب زیرحوضه دره رود از حوضه ارس را بررسی نموده‌اند و جوانشیر و همکاران (۱۴۰۰) از مؤلفه‌های بیلان آب تنها به برآورد تبخیر و تعرق واقعی شهرستان‌های شرقی دریاچه ارومیه پرداخته‌اند.

متعاقب وقوع تغییر اقلیم، فراوانی رخداد پدیده‌های فرین اقلیمی نظیر سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌ها روند افزایشی را نشان می‌دهند (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹؛ ونگ^۲، ۲۰۱۱؛ دبلر^۳، ۲۰۱۲؛ ایوم و سیمونویک^۴، ۲۰۱۲؛ شو و همکاران^۵، ۲۰۱۳). با توجه به تغییرات قابل توجه مؤلفه‌های چرخه آب در دو بعد زمان و مکان، ضرورت آگاهی از این مؤلفه‌ها به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک حائز اهمیت فراوانی است (وولکوک و مک‌کیب^۶، ۱۹۹۹). در راستای مدیریت منابع آب و بررسی تغییرات مؤلفه‌های بیلان آب و عوامل مؤثر بر آن به‌ویژه اقلیم از ابزار توانمندی همچون مدل‌سازی رایانه‌ای استفاده می‌شود که هم به‌منظور شبیه‌سازی مؤلفه‌ها برای درک بهتر وضعیت کنونی منابع و مدیریت آن و هم برای پیش‌نگری آن‌ها تحت شرایط تغییر اقلیم با هدف آگاهی از سناریوهای آینده و منبعی برای برنامه‌ریزی محتاطانه‌تر در جهت نیل به توسعه پایدار به کار می‌روند. مدل هیدرولوژیکی SWAT یکی از این ابزار قدرتمند است که توسط جف آرنولد^۷ (۱۹۹۰) از اداره تحقیقات کشاورزی متعلق به سازمان کشاورزی ایالات متحده آمریکا طراحی و ارائه و توسط آرنولد و همکاران (۱۹۹۸) توسعه داده شده است. در این مدل

¹. Kim et al.

². Wang

³. Dobler

⁴. Eum & Simonovic

⁵. Xu et al.

⁶. Wolcok & McCabe

⁷. Arnold

علاوه بر بررسی اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آب حوضه (آرنولد و همکاران، ۱۹۹۵)، اثرات طیف وسیعی از اقدامات و عملیات‌های مربوط به مدیریت زمین و تغییرات کاربری اراضی بر روی آب، رسوب و مواد شیمیایی معلق در آب در محدوده مکانی با گستره‌ای از حوضه‌های کوچک (در حد مزرعه) تا بزرگ و پیچیده، قابل ارزیابی و شبیه‌سازی است (نیچ و همکاران^۱، ۲۰۰۵). از این مدل در مطالعات زیادی به منظور شبیه‌سازی/مدل‌سازی شرایط هیدرولوژیکی حوضه‌های مختلف و بررسی تأثیر نوع مدیریت زمین و کاربری اراضی بر منابع آب و مؤلفه‌های بیلان آب و حجم رسوب و مواد معلق در آب و مواردی از این قبیل استفاده شده است که به چند نمونه از آن‌ها اشاره می‌شود.

لی و همکاران^۲ (۲۰۰۷) با شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی و فرض کاربری‌های مختلف در غرب آفریقا نشان دادند تغییر کاربری‌های طبیعی به اراضی زراعی و شهری موجب تغییر واکنش هیدرولوژیکی حوضه می‌شود. سنتی و همکاران^۳ (۲۰۱۵) با هدف تعیین بهینه‌ترین روش صرفه‌جویی در مصرف آب طی عملیات آبیاری، سناریوهای مدیریتی مختلفی برای اراضی زراعی حوضه ریو گرنندل تگزاس طراحی نموده و با تغییر در الگوی کشت فعلی آن به بررسی واکنش هیدرولوژیکی حوضه پرداختند. در پژوهش‌های مشابهی بیکیریس و همکاران^۴ (۲۰۰۵) به کاربرد مدل SWAT در حوضه رونه‌آ سودان؛ فیریسن و همکاران^۵ (۲۰۰۷) به کالیبراسیون مدل SWAT و حساسیت سنجی پارامترهای ورودی آن در حوضه رود لیتل و الانسی و همکاران^۶ (۲۰۰۹) به اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه رودخانه حاره‌ای مرطوب برنم علیا؛ زو و همکاران^۷ (۲۰۱۵) با کمک این مدل به بررسی واکنش رواناب حوضه Wei چین در مقابل تغییر اقلیم پرداختند. لو و همکاران^۸ (۲۰۱۵) بیلان آب حوضه واقع در شمال غرب چین را با مدل SWAT شبیه‌سازی نمودند و خروجی‌ها نشان‌دهنده اطمینان‌بخش بودن نتایج پژوهش و امکان به‌کارگیری آن‌ها در مدیریت حوضه است. رحیمی و همکاران (۲۰۱۹) با ارزیابی تغییر دو متغیر مهم دما و بارش در حوضه کارون دریافتند احتمال تغییر الگوها بارش ۲۴ ساعته تحت سناریوی RCP وجود دارد که این تغییر الگوها به افزایش بیشینه بارش ۲۴ ساعته منجر شده و موجب افزایش احتمال وقوع سیلاب به‌ویژه در دبی‌های بزرگ‌تر از ۲۰۰۰ مترمکعب در ثانیه خواهد شد. هاشمی نسب و همکاران (۲۰۲۲) اثر تغییر اقلیم بر آب سطحی حوضه رودخانه کارون را شبیه‌سازی نمودند. یافته‌ها نشان دادند بیشترین کاهش دبی در آوریل تا ژوئن و بین ۳۵ تا ۶۰ درصد خواهد بود.

سعادتی و همکاران (۱۳۸۷) اثر تغییرات کاربری اراضی حوضه کسپلیان بر چرخه هیدرولوژیکی و رواناب آن را با اعمال گزینه‌های مختلف مدیریتی در SWAT بررسی نمودند. نتیجه نشان داد مدل در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی حوضه با کاربری زراعی و مرتع بهتر از کاربری جنگل عمل می‌کند و نتایج آن به واقعیت نزدیک‌تر است. آبابایی و سهرابی (۱۳۸۸) کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب ایستگاه‌های حوضه زاینده‌رود را بررسی کردند و بر اساس معیارهای آماری مختلف بهترین دقت مدل را در ایستگاه پل کله به دست آوردند. دولت‌آبادی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از افزونه Arc SWAT و الگوریتم SUFI2 در SWAT CUP شرایط هیدرولوژیکی حوضه فیروزآباد را طی دوره ۱۹۹۴-۲۰۱۰ شبیه‌سازی کردند. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل با معیار هدف NS نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل در تخمین دبی حوضه بود. بصیری و همکاران (۱۳۹۳) اهمیت و نقش مقیاس خاک در شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوضه تویسرکان را در مدل SWAT ارزیابی نمودند. غلامی و نصیری (۱۳۹۴) دقت مدل SWAT را در شبیه‌سازی جریان ماهانه رود اترک بررسی کردند و برای تحلیل حساسیت پارامترها از روش هر بار یک عامل استفاده نمودند که به شناسایی ۵ پارامتر مؤثرتر انجامید. دقت مدل در دوره واسنجی (۱۹۹۴-۱۹۹۹) و اعتبارسنجی (۲۰۰۰-۲۰۰۸) بر اساس معیارهای NS و R^2 به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۴۶ محاسبه شد و کارایی آن نسبتاً خوب ارزیابی

¹. Neitsch et al.

². Li et al.

³. Santhi et al.

⁴. Bekiaris et al.

⁵. Feyerisen et al.

⁶. Alansi et al.

⁷. Zuo et al.

⁸. Lu et al.

گردید. انصاری و همکاران (۱۳۹۴) توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه رود زرد خوزستان را طی دوره ۲۰۰۹-۱۹۹۵ بررسی نمودند. با توجه به مقادیر ضرایب ارزیابی R-Factor، P-Factor، R2، NS که به ترتیب ۱/۱، ۰/۹۲، ۰/۸۵ و ۰/۸۵ به دست آوردند، توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب این حوضه را خوب ارزیابی کردند. ناصرآبادی و همکاران (۱۳۹۵) با ارزیابی دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب رودخانه قره‌سوی اردبیل بر اساس داده ۳ ایستگاه هیدرومتری یامچی، سامیان و پل الماس در دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۳ نشان دادند قابلیت مدل با توجه به مقادیر ضرایب ارزیابی، قابل قبول است.

زارع زاده مهریزی و همکاران (۱۳۹۶) رواناب حوضه گاماسیاب را با مدل شبیه‌سازی نمودند و توانایی این مدل را در این زمینه قابل قبول ارزیابی کردند. اعلمی و همکاران (۱۳۹۷) نتایج دو روش واسنجی مدل SWAT را در تخمین رواناب حوضه صوفی چای بررسی کردند. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۸) ضمن ارزیابی مدل SWAT با دو الگوریتم GLUE و SUFI2، به شبیه‌سازی بیلان آب حوضه لنبران چای پرداختند. نتایج ۴ شاخص ارزیابی مدل نشان‌دهنده برتری الگوریتم SUFI2 در مقایسه با GLUE بود. گلزاری و همکاران (۱۳۹۹) به شبیه‌سازی رواناب زرينه‌رود در مدل SWAT طی دوره ۲۰۱۳-۱۹۹۲ پرداختند. دقت مدل را با معیارهای ارزیابی R^2 و NS بین ۰/۸۱ تا ۰/۴۷ به دست آوردند و کارایی مدل را مناسب ارزیابی نمودند. همچنین در پژوهش‌های مشابهی عارفی اصل و همکاران (۱۳۹۲) به شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه چهل چای با مدل SWAT؛ نظری و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی کارایی دو مدل هیدرولوژیکی IHACRES و SWAT در شبیه‌سازی رواناب؛ رضازاده و همکاران (۱۳۹۶) توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب، رسوب و ET با تعریف سناریوهای مدیریتی؛ حبیبی و گودرزی (۱۳۹۷) کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حبله‌رود؛ اقدام نموده‌اند و نتایج پژوهش‌های مذکور حاکی از قابلیت مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های مختلف و رضایت‌بخش بودن عملکرد مدل بر اساس معیارهای ارزیابی است. بشیریان و همکاران (۱۳۹۹) مؤلفه‌های بیلان آب حوضه دریاچه ارومیه در دو سال نماینده خشکسالی (۱۳۹۶) و ترسالی (۱۳۷۱) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل WetSpa - M شبیه‌سازی کردند. نتایج نشانگر سهم زیاد تبخیر و تعرق (بیش از ۵۸ درصد) از بارش سال‌های مرطوب بود همچنین رواناب بین ۷ تا ۱/۵ درصد از بارش را به خود اختصاص داده است. رضائی مقدم و همکاران (۱۴۰۰) با مدل‌سازی رواناب و رسوب در حوضه شهر چای میانه با مدل SWAT و الگوریتم SUFI2 نشان دادند کارایی و دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب بهتر از رسوب است و عمده دلیل ضعف مدل در شبیه‌سازی رسوب حوضه را ناشی از کمبود و نقص داده‌های روزانه عنوان نمودند.

بررسی مطالعات انجام شده در خصوص شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در مناطق مختلف ایران و جهان با استفاده از مدل SWAT نشان داد که این مدل پیشرفته کارایی مناسبی در شبیه‌سازی دارد و با برخورداری از ویژگی‌هایی چون قابلیت تنظیم و تغییر گزینه‌ها توسط کاربر امکانات زیادی را جهت بررسی تغییرات خرد تا کلان در محدوده‌های مورد مطالعه فراهم می‌سازد فلذا پژوهش حاضر به منظور شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه ارس با استفاده از مدل SWAT و ارزیابی توانایی و دقت مدل با استفاده از داده دبی جریان حوضه انجام گرفت.

مبانی نظری

مدل SWAT

مدل هیدرولوژیکی SWAT یکی از این ابزار قدرتمند است که قابلیت مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی و نوع مدیریت زمین و نظایر این‌ها را بر روی مؤلفه‌های بیلان آب و رسوب حوضه‌ها دارد. SWAT مدلی فیزیکی است که نیمه توزیعی بوده و پیوستگی زمانی دارد و برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی به کار می‌رود (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۷؛ نیچ و همکاران، ۲۰۱۱؛ روح‌الله نژاد و همکاران، ۲۰۱۲).

داده و روش‌ها

داده‌های ورودی لازم در مدل SWAT در سه دسته جای می‌گیرند: داده‌های جغرافیایی منطقه شامل توپوگرافی (نقشه DEM)، ویژگی‌های فیزیکی خاک (نقشه Soil)، کاربری اراضی و شیب منطقه مورد مطالعه؛ داده‌های هواشناسی ایستگاه‌ها و داده‌های هیدرومتری. نقشه DEM مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده SRTM با توان تفکیک ۳۰ متری برای حوضه ارس از سایت سازمان زمین‌شناسی امریکا^{۱۱} اخذ گردید. قبل از تعریف پروژه SWAT، ابتدا برای نقشه DEM حوضه ارس سیستم مختصات UTM تعریف شد تا برای ورود به مدل آماده شود. همچنین نقشه خاک تهیه شده توسط فائو و نقشه کاربری اراضی از وبسایت sawt.tamu.edu دریافت شد. علاوه بر داده‌های رستری، داده‌های نقطه‌ای نیز به کار برده شدند که شامل داده‌های روزانه متغیرهای حداقل و حداکثر دما، بارش، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی ایستگاه‌های هواشناسی اردبیل، پارس‌آباد، جلفا، خوی و ماکو برای دوره بلندمدت (۱۹۸۵-۲۰۲۱) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شده و در فرمت مناسب مدل SWAT تنظیم گردید. ایستگاه خوی به دلیل داشتن کمترین داده مفقودی، به‌عنوان ایستگاه مبنای حوضه برای بازسازی داده‌های مفقودی سایر ایستگاه‌ها تعیین شده و پس از محاسبه ۱۴ متغیر برای آن در لایه WGN_user مدل به آن معرفی گردید. همچنین داده‌های هیدرومتری ایستگاه‌های حوضه ارس برای دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۴) از دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای کشور اخذ شد. لازم به ذکر است از افزونه ARC SWAT برای انجام شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب استفاده شد و روش هارگریوز-سامانی به‌عنوان روش محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه تعیین گردید.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

در مدل SWAT از بسته جانبی تحت عنوان SWAT CUP برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدل، واسنجی و اعتبارسنجی آن استفاده می‌شود که می‌تواند از الگوریتم‌های GLUE، MCMC، SUFI2 و Parasol برای این کار بهره بگیرد. مرحله واسنجی مدل به‌منظور شناسایی پارامترهای مؤثر و بهینه‌سازی مدل SWAT انجام می‌شود به‌نحوی که خروجی‌های شبیه‌سازی شده در بهینه‌ترین حالت قادر به تبعیت از مقادیر داده‌های ثبت شده حوضه از لحاظ روند و تغییرات آن باشد. هدف از اعتبارسنجی نیز ارزیابی صحت مدل واسنجی شده در دوره زمانی دیگر است به‌گونه‌ای که مقادیر شبیه‌سازی شده متغیر را با مقادیر ثبت شده ایستگاهی بدون انجام تصحیح بر روی پارامترها مقایسه کند. این کار در الگوریتم SUFI2 تعبیه شده در SWAT CUP امکان‌پذیر است که با استفاده از معیارهای ارزیابی انجام می‌شود. در این پژوهش دو سال اول دوره آماری یعنی ۱۹۸۵ و ۱۹۸۶ به‌عنوان واریماکس (آموزش مدل) در نظر گرفته شد. همچنین از داده دبی ایستگاه هیدرومتری نماینده حوضه ارس (ایستگاه بدوی) در دوره زمانی ۲۰۰۶-۱۹۸۷ برای واسنجی مدل و داده دوره زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۷ برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. ضریب نش-ساتکلیف به‌عنوان معیار هدف تعیین و برای شناسایی پارامترهای مؤثر در مرحله تحلیل حساسیت در الگوریتم SUFI2 از روش Global استفاده شد.

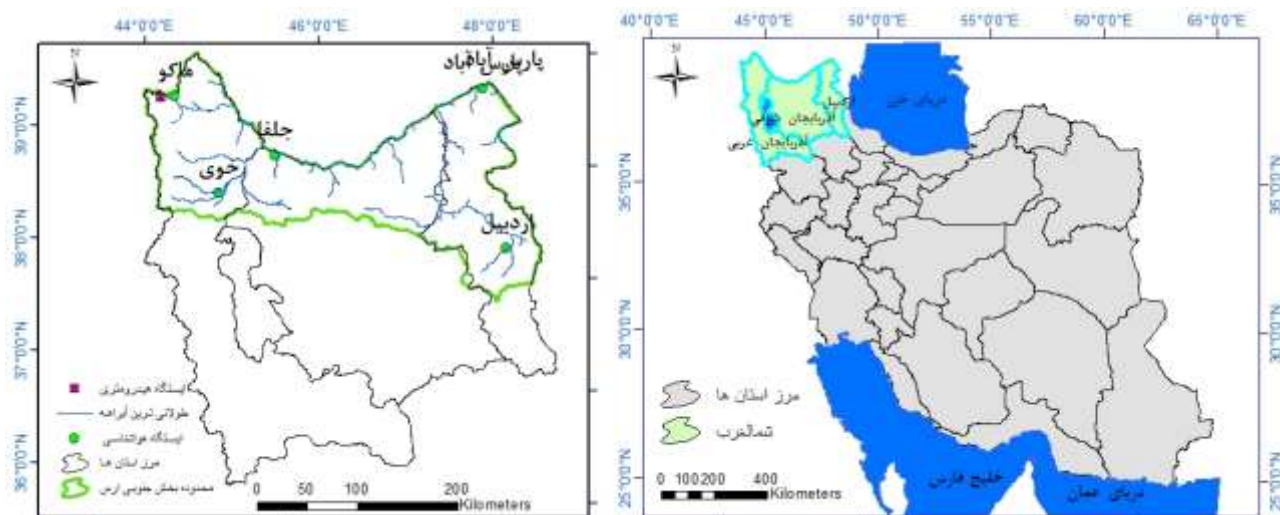
معیارهای ارزیابی کارایی مدل SWAT

از معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی مؤلفه‌ها می‌توان به NS، P-Factor، R-Factor و R2 اشاره کرد. ضریب نش-ساتکلیف بین ۱ تا منفی بی‌نهایت است که مقدار بهینه آن صفر می‌باشد و اگر بزرگ‌تر از ۰/۷۵ به‌دست بیاید کارایی مدل عالی تلقی می‌شود اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ محاسبه شود عملکرد مدل قابل قبول و در مقادیر کمتر از ۰/۳۶ کارایی مدل غیرقابل قبول است (Nash & Sutcliffe, 1970). ضریب تعیین بین صفر و یک قرار دارد. درصد اریبی در صورتی که به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. Moriasi و همکاران (۲۰۰۷) پیشنهاد کرده‌اند در پژوهش‌های هیدرولوژیکی بهتر است مقدار ضریب بزرگ‌تر از ۰/۵ باشد تا بتوان نتایج مدل را قابل قبول تلقی کرد.

¹¹. <https://earthexplorer.usgs.gov>

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شامل حوضه ارس واقع در شمال غرب ایران است. این حوضه نیمه شمالی سه استان اردبیل، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی را در بر می‌گیرد و به لحاظ مشارکت در تأمین و تولید محصولات استراتژیک حائز اهمیت است. رود مرزی ارس شاهرگ اصلی این حوضه را تشکیل می‌دهد. موقعیت مکانی حوضه ارس، ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورداستفاده برای کالیبره کردن مدل SWAT و برخی مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌ها به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۱) ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه ارس در ایران و توزیع فضایی ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری منتخب آن در منطقه

جدول (۱): مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی حوضه ارس

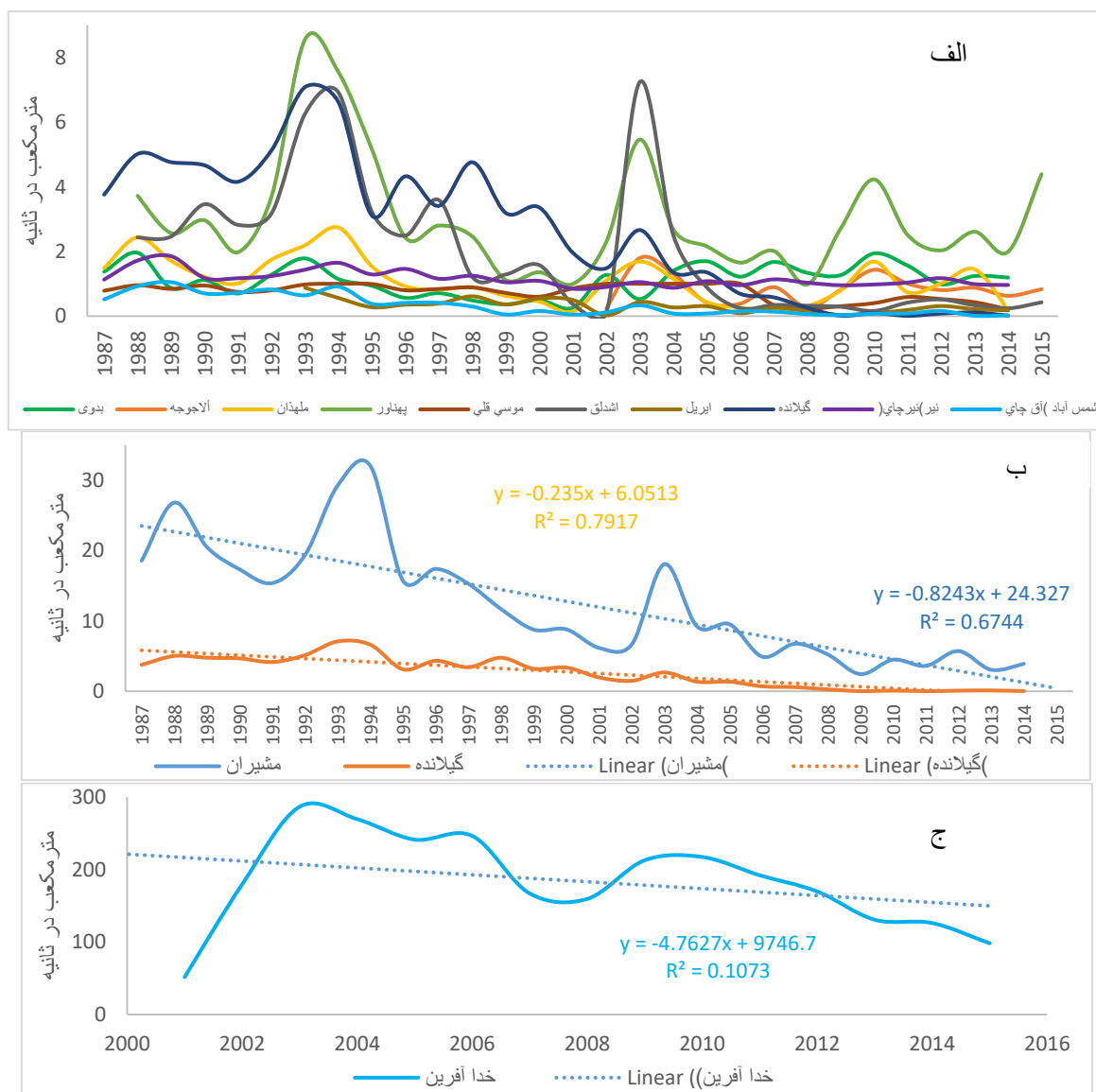
ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	طول دوره آماری
اردبیل	۴۸/۲۸	۳۸/۲۵	۱۳۳۲	۲۰۲۲-۱۹۸۵
پارس‌آباد	۴۷/۹۱	۳۹/۶۵	۳۱/۹	۲۰۲۲-۱۹۸۵
جلفا	۴۵/۶۶	۳۸/۷۵	۷۳۶/۲	۲۰۲۲-۱۹۸۵
خوی	۴۴/۹۶	۳۸/۵۵	۱۱۰۳	۲۰۲۲-۱۹۸۵
ماکو	۴۴/۴۳	۳۹/۳۳	۱۴۱۱/۳	۲۰۲۲-۱۹۸۵

نتایج

بررسی دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه ارس

بررسی دبی لحظه‌های در ۱۳ ایستگاه هیدرومتری حوضه ارس طی دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۵ نشان داد تقریباً در تمامی ایستگاه‌ها دبی جریان در اوایل دوره بیشتر بوده و به‌ویژه تا سال ۱۹۹۴ مقادیر بیشتری داشته است (شکل ۲). متوسط دبی جریان در این ایستگاه‌ها (بدون لحاظ نمودن دبی خداآفرین) از ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۷ $۴/۴۳$ مترمکعب در ثانیه بوده که بین $۶/۱۶$ و ۳ در نوسان بوده است. درحالی‌که از سال ۱۹۹۹ به بعد متوسط جریان دبی در مجموع ۱۲ ایستگاه هیدرومتری منتخب کمتر از $۱/۹$ مترمکعب در ثانیه بوده است که تفاوت بارزی را با متوسط دبی قبل از این سال نشان می‌دهد. تنها استثنا در ۱۳ سال منتهی به آخر دوره، دو سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ هستند که متوسط دبی جریان ۱۲ در آن‌ها $۲/۹۵$ و $۲/۵$ مترمکعب در ثانیه ثبت شده است. کاهش محسوس دبی در ایستگاه‌ها در نیمه دوم دوره موجب شده متوسط دبی کل دوره حدود $۲/۶۵$ مترمکعب باشد. روند خطی ساده دبی دو ایستگاه گیلانده و مشیران به‌عنوان نمونه در شکل (۲-ب) ترسیم شده که شیب کاهشی دبی مشیران بسیار تندتر از شیب دبی

گیلانده است. روند خطی دبی لحظه‌ای ایستگاه خداآفرین که سال ۲۰۰۱ بر روی سدی به همین نام تأسیس گردیده است در شکل (۲-ج) ترسیم شده که شیب کاهشی تندی دارد. روند کاهشی این ایستگاه از این ناشی می‌شود که متوسط دبی لحظه‌ای آن طی ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ حدود ۲۰۵/۹ مترمکعب بوده ولی در ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ به ۱۶۳/۲ مترمکعب تنزل پیدا کرده است و متوسط دبی آن در این دوره ۱۵ ساله به ۱۸۳/۱ مترمکعب کاهش یافته است. در مجموع می‌توان گفت روند کلی دبی جریان در همه ایستگاه‌های حوضه ارس بدون در نظر گرفتن معناداری آن، کاهشی است.

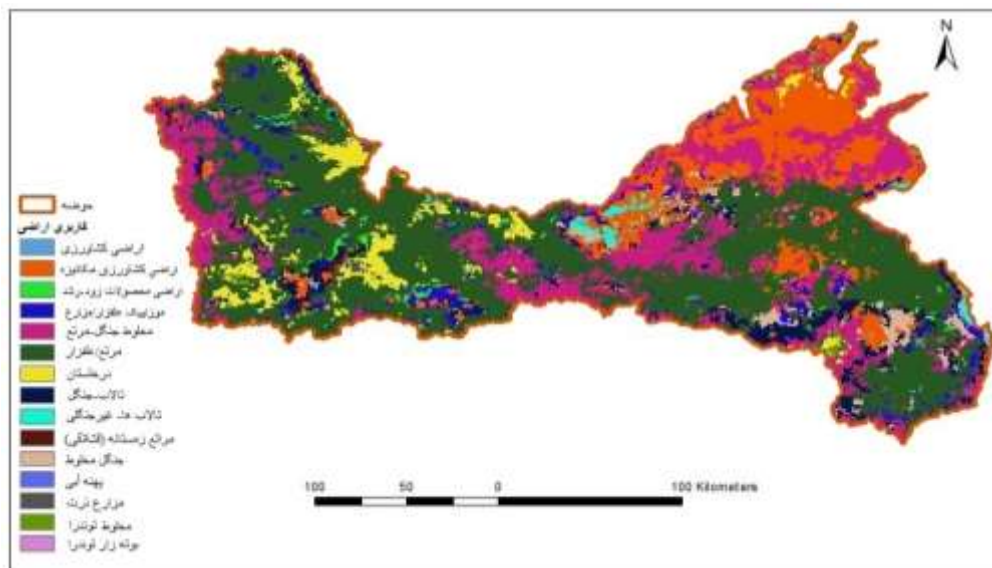


شکل (۲): سری زمانی دبی لحظه‌ای در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه ارس در دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۵

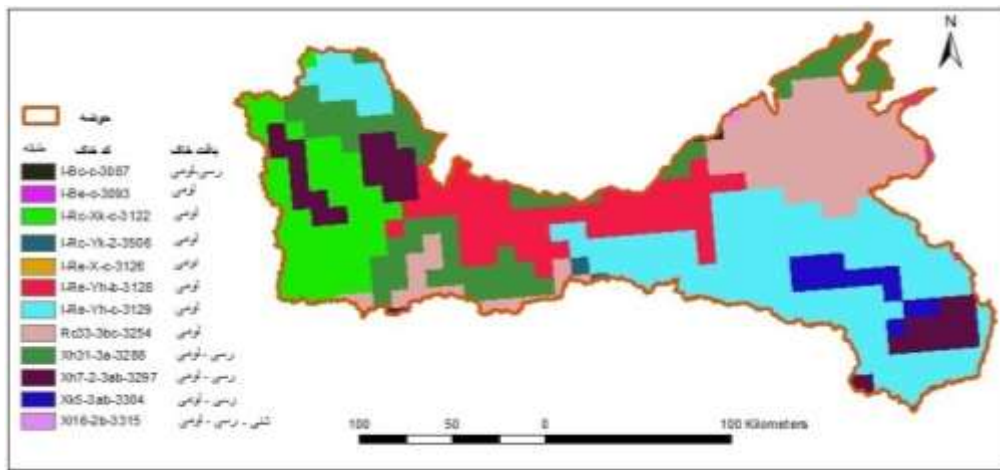
لایه‌های رستری ورودی به مدل SWAT

نقشه شیب حوضه ارس بر اساس نقشه DEM این حوضه با تعریف چهار طبقه تا ۲، ۱۵، ۳۰ درصد و بیشتر تهیه شد (شکل ۵) که نواحی واقع در دشت‌ها و مناطق پست با شیب کمتر از ۲ درصد و رنگ روشن مشخص هستند. نواحی مرتفع شیب بیش از ۳۰ درصد دارند که با رنگ تیره نشان داده شده‌اند. از ترکیب نقشه‌های کاربری اراضی (شکل ۳)، خاک (شکل ۴) و شیب حوضه در مدل SWAT، HRU ۱۲۶۴ به‌عنوان کوچک‌ترین واحد پاسخ هیدرولوژیک برای حوضه ارس تشکیل شد که در ۶۸

زیرحوضه قرار گرفتند (شکل ۶). در جدول (۲) برخی از مشخصات خاک حوضه ارس آورده شده است. همه انواع خاک حوضه که در گروه C یا D قرار گرفتند، دارای دو لایه هستند که ویژگی‌های عمق (SOL_Z1) و هدایت هیدرولیکی اشباع (SOL_K1) و ظرفیت آب قابل دسترس لایه اول خاک (SOL_AWC1) در این جدول قید شده است. ظرفیت آب قابل دسترس لایه اول خاک کمتر از ۰/۲ میلی‌متر در میلی‌متر خاک است که در لایه دوم نیز همین طور است. SOL_K در لایه اول بین ۲/۵ تا ۳۸ میلی‌متر در ساعت است که در لایه دوم کمتر هم می‌شود. عمق خاک در لایه اول ۳ متر و در لایه دوم طبقات خاک ۱۰ متر است. درصد زیادی از حوضه خاک لومی دارد و کمتر از ۱ درصد حوضه دارای خاک شنی است.



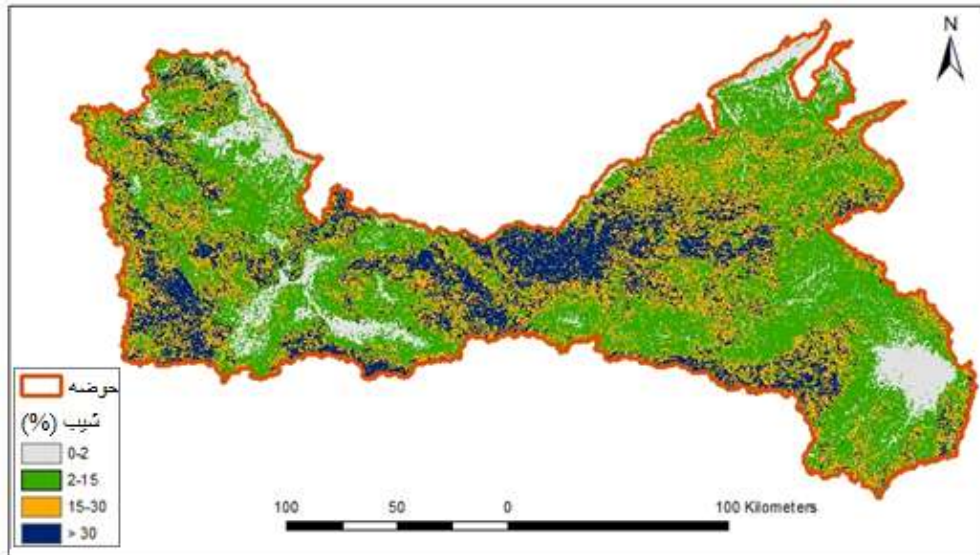
شکل (۳): نقشه کاربری اراضی حوضه ارس



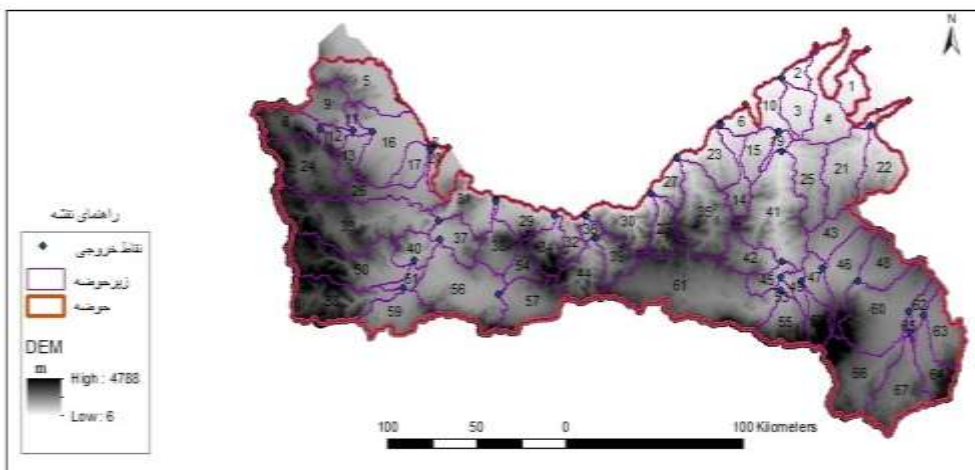
شکل (۴): نقشه خاک حوضه ارس

جدول (۲): مشخصات طبقات خاک حوضه ارس

کد خاک در مدل	گروه خاک	بافت خاک	SOL_Z1 (mm) (عمق از سطح خاک تا پایین لایه (mm))	SOL_AWC1(mm/mm) (ظرفیت آب موجود لایه خاک (H ₂ O/mm خاک))	SOL_K1(mm/hr) (هدایت هیدرولیکی اشباع (mm/hr))	درصد از حوضه
I-Re-Yh-c-3129	C	لومی	۳۰۰	۰/۱۲۲	۱۶/۶۹	۲۸/۲
Xh31-3a-3288	D	رسی - لومی	۳۰۰	۰/۱۷۵	۲/۴۳	۱۹/۲
Rc33-3bc-3254	D	لومی	۳۰۰	۰/۰۹۷	۲/۶۸	۱۵/۹
I-Re-Yh-b-3128	C	لومی	۳۰۰	۰/۱۲۲	۱۶/۶۹	۱۳/۶
I-Rc-Xk-c-3122	D	لومی	۳۰۰	۰/۱۲۲	۴/۴۵	۱۱
Xh7-2-3ab-3297	D	رسی - لومی	۳۰۰	۰/۱۷۵	۲/۴۷	۶/۷
Xk5-3ab-3304	D	رسی - لومی	۳۰۰	۰/۱۷۵	۵/۷۸	۲/۹
I-Be-c-3093	D	لومی	۳۰۰	۰/۰۹۸	۷/۹۹	۰/۹
Xl16-2b-3315	C	شنی - رسی - لومی	۳۰۰	۰/۱۷۵	۱۱/۷۱	۰/۷
I-Bc-c-3087	C	رسی - لومی	۳۰۰	۰/۰۷۱	۳۸/۱	۰/۴
I-Rc-Yk-2-3506	D	لومی	۳۰۰	۰/۰۹۸	۴/۴۹	۰/۲
I-Re-X-c-3126	C	لومی	۳۰۰	۰/۱۲۲	۱۵/۱	۰/۲



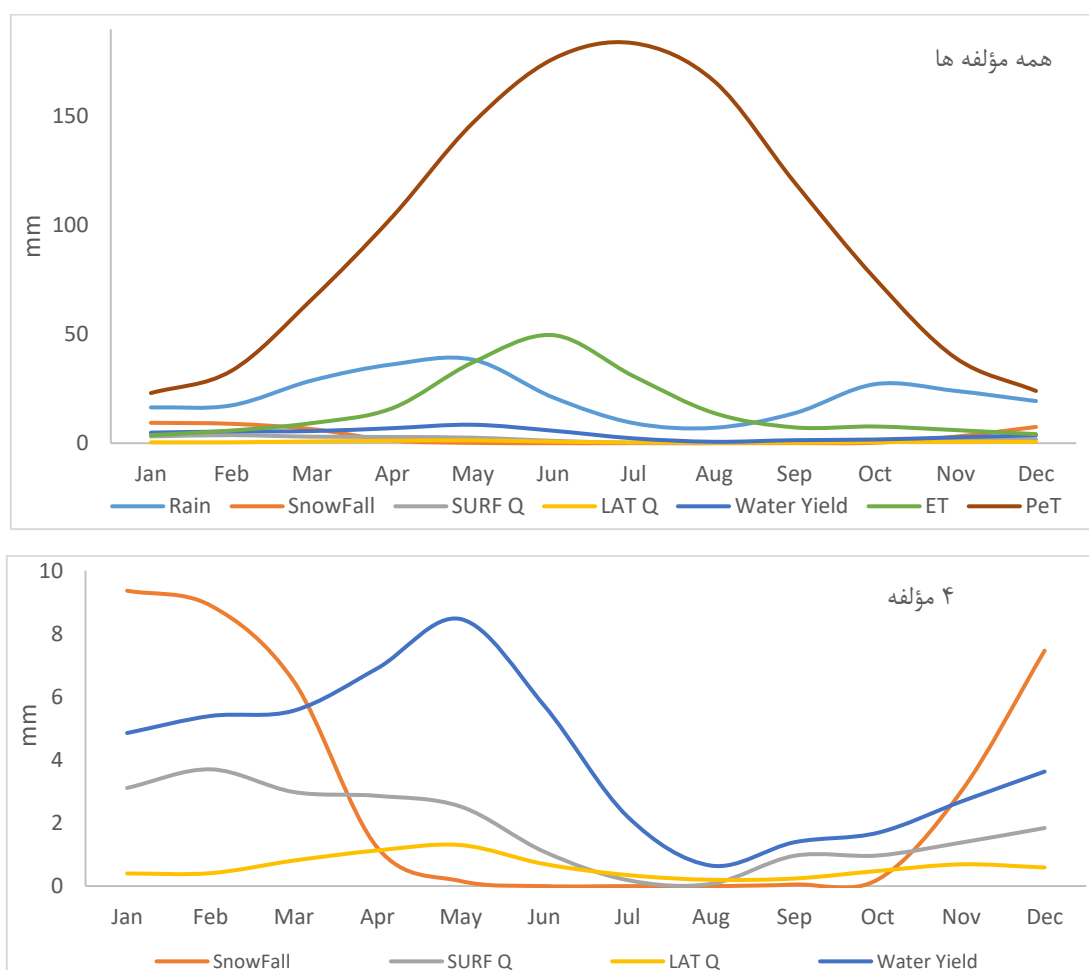
شکل (۵): نقشه طبقات شیب حوضه ارس



شکل (۶): نقاط خروجی و زیرحوضه‌های ارس

شبیه‌سازی اولیه پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه با مدل SWAT

در اجرای اولیه مدل SWAT مؤلفه‌های بیلان آب حوضه آبریز ارس مطابق شکل (۷) محاسبه شد که در آن بیشینه بارش ماهانه حوضه در ماه می قرار دارد که متوسط منطقه‌ای آن $38/4$ میلی‌متر است و کمینه آن به میزان $7/2$ میلی‌متر در اوت مشاهده می‌شود. تبخیر و تعرق حوضه - که درصد قابل توجهی از خروجی آب حوضه را به خود اختصاص داده - در ژوئن به بیشینه خود رسیده و با یک ماه تأخیر زمانی نسبت به بیشینه بارش اتفاق افتاده که با اوج گستردگی و رشد گیاهان منطقه هم‌زمانی دارد. بیشینه ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه در ژوئیه و به میزان $183/5$ میلی‌متر محاسبه شده است و روند کلی آن از ژانویه تا ژوئیه افزایشی و سپس کاهش‌ی است. مدل در اجرای اولیه تا حد زیادی توانسته بارش برف در حوضه را به خوبی شبیه‌سازی کند و بارش برف را از اکتبر با $0/2$ میلی‌متر تا اوایل می در نظر گرفته است که اوج بارش برف در ژانویه ($9/4$ میلی‌متر) بوده و سپس در فوریه ($8/9$ میلی‌متر) و دسامبر ($7/5$ میلی‌متر) باریده است. بیشینه ماهانه رواناب سطحی حوضه در فوریه ($3/7$ میلی‌متر) محاسبه شده اما بیشینه آبدهی حوضه (Water Yield) و جریان جانبی (Lateral Flow) آن از الگوی بارش متابعت نموده و در ماه می مشاهده می‌شوند.



شکل (۷): مؤلفه‌های بیلان آب حوضه ارس در اجرای اولیه مدل

شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه با مدل SWAT در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

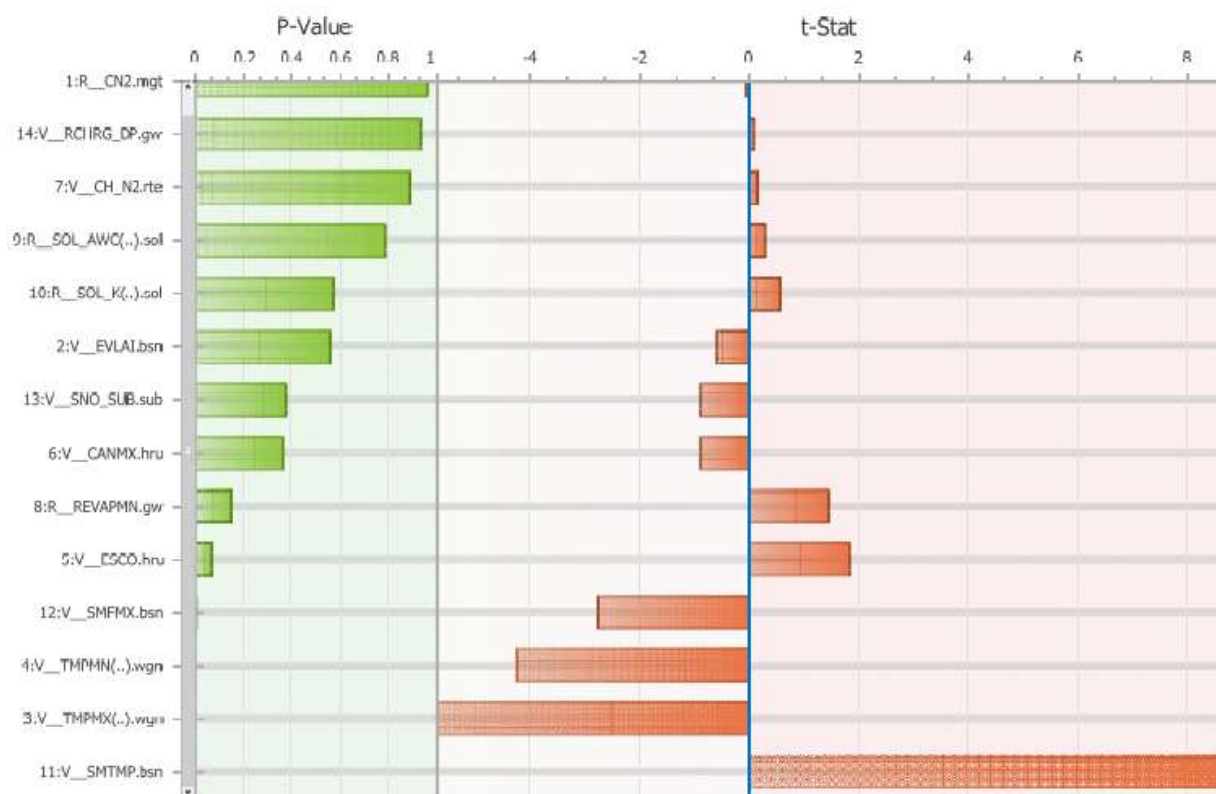
بر اساس تحلیل حساسیت پارامترهای مدل در الگوریتم SUFI2، پارامتر به‌عنوان مؤثرترین پارامترها با روش Global شناسایی و انتخاب شدند که در جدول (۲) نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مدل در دوره واسنجی (۱۹۸۷-۲۰۰۶) آورده شده است. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل در دو مرحله انجام شد. نحوه انتخاب پارامترهای حساس به این صورت بود که در مرحله اول مقایسه نتایج تحلیل حساسیت نسبی پارامترهای مختلف در هر یک از فایل‌های مدیریتی، خاک، HRU، BSN، RTE، WGN، آب زیرزمینی، زیرحوضه و ... (همه دیتافایل‌ها) انجام شد و با اجرای مجزای مدل برای پارامترهای هر یک از فایل‌ها، از هر فایل یک یا دو پارامتر حساس تر و در مجموع ۱۴ پارامتر با حساسیت نسبی انتخاب گردید (جدول ۳). در شکل (۸) نتیجه تحلیل حساسیت برای ۱۴ پارامتر مهم در شبیه‌سازی دبی جریان حوضه ارس آورده شده است. این پارامترها به‌منظور کالیبره کردن مدل SWAT انتخاب شدند و با تنظیم و اجرای ۳۰۰ دور شبیه‌سازی برای این پارامترها در نهایت با شناسایی دور شبیه‌سازی بهینه و مقادیر بهینه پارامترهای منتخب، مدل SWAT کالیبره شد.

جدول (۳): خلاصه نتایج مرحله تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT در الگوریتم SUFI2 در دوره واسنجی (۱۹۸۷-۲۰۰۶)

ترتیب اثرگذاری	نام پارامتر	توصیف پارامتر	حداقل مجاز	حداکثر مجاز
۱	V_SMTMP.bsn	دمای مبنای شروع ذوب برف	-۲۰	۲۰
۲	V_TMPMX(..).wgn	متوسط حداکثر دمای ماهانه	-۳	۵۰
۳	V_TMPMN(..).wgn	متوسط حداقل دمای ماهانه	-۴۰	۴۰
۴	V_SMFMX.bsn	حداکثر میزان ذوب برف در طول سال (در تابستان)	۰	۲۰
۵	V_ESCO.hru	عامل تبخیر آب از خاک	۰	۱
۶	R_REVAPMN.gw	حداقل مقدار ذخیره آب در سفره کم‌عمق که برای شروع تبخیر آب زیرزمینی از طریق موئینگی یا تغذیه سفره عمیق لازم است (میلی‌متر آب)	۱	۵۰۰
۷	V_CANMX.hru	حداکثر نگهداشت آب توسط تاج پوشش یا برگاب (میلی‌متر)	۰	۱۰۰
۸	V_SNO_SUB.su	مؤلفه آب برف	۰	۱۵۰
۹	V_EVLAI.bsn	شاخص سطح برگ که در آن هیچ تبخیری رخ نمی‌دهد	۰	۱۰
۱۰	R_SOL_K(..).sol	هدایت هیدرولیکی خاک اشباع (میلی‌متر در ساعت)	۰	۲۰۰۰
۱۱	R_SOL_AWC(..).sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (میلی‌متر/میلی‌متر)	۰	۱
۱۲	V_CH_N2.rte	ضریب مانینگ کانال اصلی	۰.۰۱	۰.۳
۱۳	V_RCHRG_DP.gw	درصد نفوذ به آبخوان عمیق	۰	۱
۱۴	R_CN2.mgt	شماره منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط	۳۵	۹۸

R: به معنی جمع زدن عدد تصادفی بین دامنه تعیین شده با عدد یک و ضرب آن‌ها در مقدار پارامتر و V: به معنی جایگزینی عدد تصادفی با مقدار

پارامتر است.

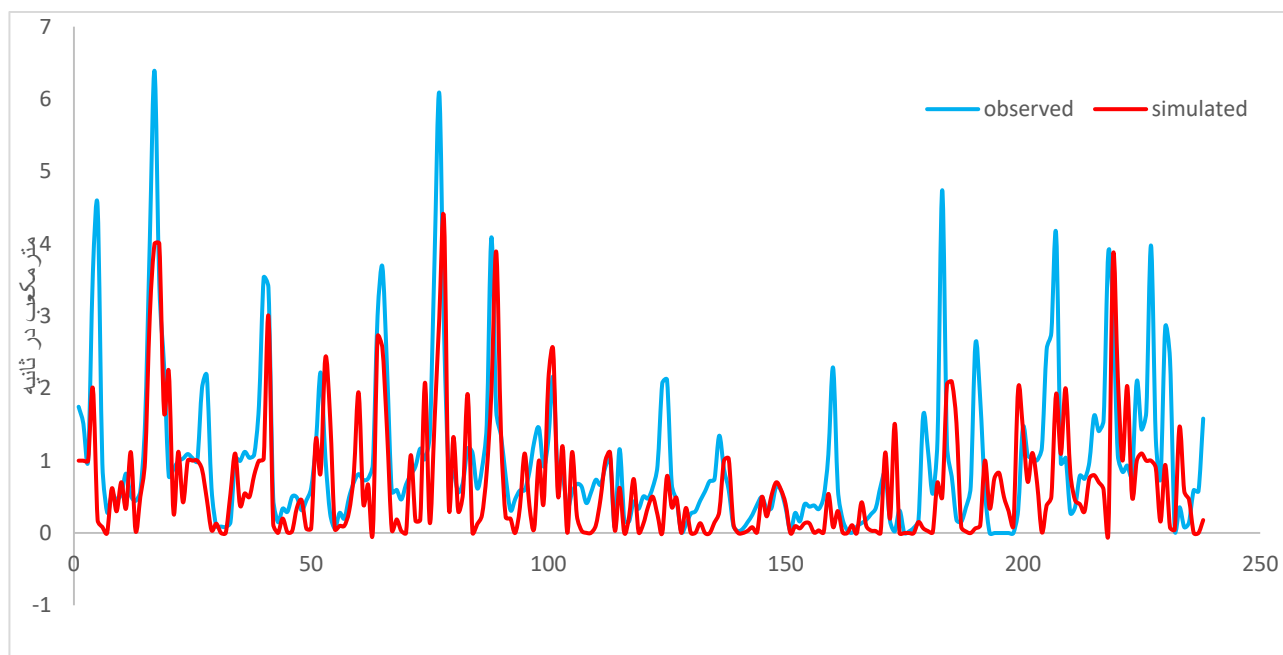


شکل (۸): نتیجه تحلیل حساسیت پارامترهای مدل

مشاهده می‌شود پارامترهای مربوط به دمای ماهانه و دمای هوا و فاکتور تبخیر از خاک و ذخیره آبخوان کم‌عمق از فایل‌های bsn و wgn و hru و gw. به‌عنوان مؤثرترین پارامترها در شبیه‌سازی دبی جریان ایستگاه هیدرومتری منتخب حوضه ارس می‌باشند.

نتایج ارزیابی مدل در مرحله واسنجی نشان داد مقادیر معیارهای ارزیابی NS، P-Factor، R-Factor، R^2 ، PBIAS، KGE و RSR به‌ترتیب ۰/۶۴، ۰/۷۱، ۰/۲۷، ۰/۷۹، ۱۷، ۰/۲۲ و ۱/۲۸ و در مرحله اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۷، ۰/۷۸، ۰/۳، ۰/۶۸، ۲۶/۸، ۰/۰۲ و ۱/۴۱ محاسبه گردید که نشان می‌دهد درصد زیادی از داده‌های ثبت‌شده در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند. نمودارهای هیدروگراف به‌خوبی نشان‌دهنده توانایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی دبی حوضه ارس است.

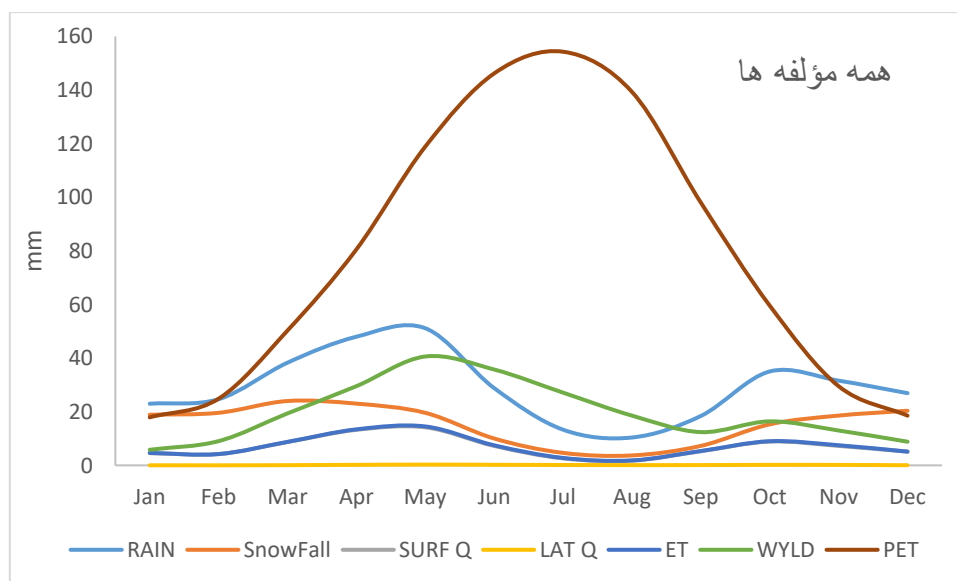
هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی: دو هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده ماهانه توسط مدل SWAT به‌صورت مقایسه‌ای در شکل (۹) ترسیم شده است. مقایسه منحنی دبی جریان مشاهداتی و منحنی دبی شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد در اغلب موارد مقادیر مدل‌سازی‌شده در محدوده باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند. مدل SWAT نوع بارش (برف یا باران) را بر مبنای داده متوسط دمای روزانه تعیین می‌کند (فروتن و همکاران، ۲۰۰۲). نکته جالب توجه در این هیدروگراف‌ها مربوط به دبی‌های اوج است. دبی‌های اوج ثبت‌شده در این ایستگاه در ماه می در ماکزیمم مقدار خود قرار دارد که انطباق زمانی با بیشینه بارش منطقه در اردیبهشت و هم‌زمانی با حداکثر ذوب برف قله و ارتفاعات دارد. از جمله تاریخ وقوع دبی پیک در این ایستگاه می‌توان ۱۹۸۷، آوریل ۱۹۸۸، می ۱۹۸۸، می ۱۹۹۳، آوریل ۱۹۹۴، می ۲۰۰۲ و می ۲۰۰۴ است. دبی‌های اوج شبیه‌سازی‌شده هرچند مطابقت کاملی با دبی‌های پیک اندازه‌گیری‌شده ندارند ولی تا حد زیادی توانسته‌اند از الگوی هیدروگراف مشاهداتی متابعت کنند و روند صعودی و نزولی آن مطابق دبی مشاهداتی است و در این خصوص کارایی قابل قبولی را ارائه داده است.

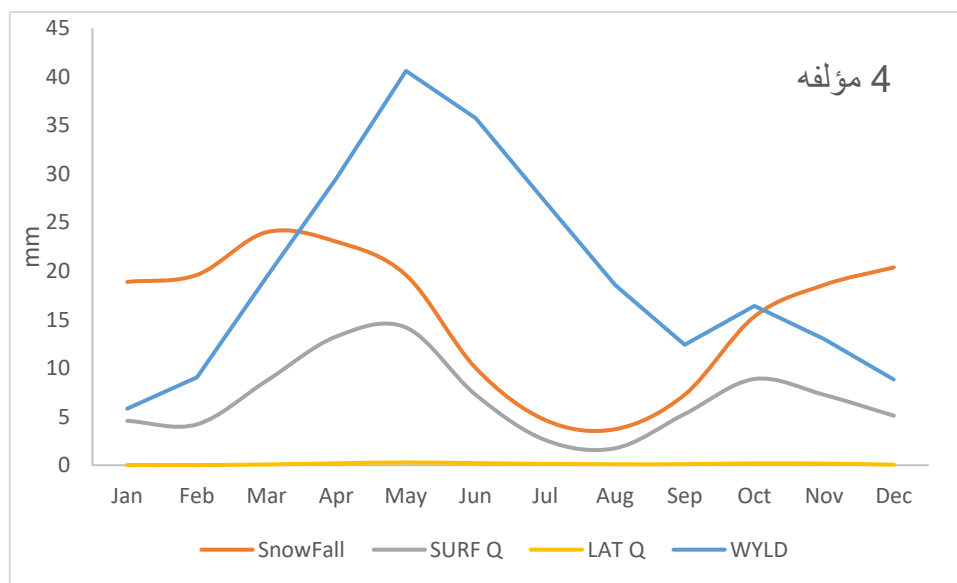


شکل (۹): نمودار مرحله واسنجی دبی ایستگاه در الگوریتم SUFI2

شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه پس از کالیبراسیون مدل SWAT

در اجرای نهایی مدل SWAT مؤلفه‌های بیلان آب حوضه آبریز ارس مطابق شکل (۱۰) محاسبه شد که در آن بیشینه بارش ماهانه حوضه در ماه می قرار دارد که متوسط منطقه‌ای آن ۲۹/۱ میلی‌متر است و کمینه آن به میزان ۱۳/۳ میلی‌متر در جولای مشاهده می‌شود. تبخیر و تعرق حوضه - که همچنان سهم قابل توجهی را به خود اختصاص داده - در ژوئن به بیشینه خود رسیده و با یک ماه تأخیر زمانی نسبت به بیشینه بارش اتفاق افتاده است. بیشینه ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه در ژوئیه و به میزان ۱۵۴/۲ میلی‌متر محاسبه شده است. مدل در اجرای نهایی دقت کمتری در شبیه‌سازی بارش برف حوضه دارد ولی در شبیه‌سازی رواناب سطحی با واقعیت مطابقت زیادی دارد و بیشینه ماهانه رواناب سطحی حوضه را مقارن اوج بارش بهاره حوضه و در ماه می (۱۴/۱۸ میلی‌متر) محاسبه کرده است. همچنین بیشینه آبدهی حوضه (Water Yield) و جریان جانبی (Lateral Flow) آن از الگوی بارش متابعت نموده و در ماه می مشاهده می‌شوند.





شکل (۱۰): مؤلفه‌های بیلان آب حوضه ارس در اجرای نهایی مدل

نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه ارس در دوره (۱۹۸۵-۲۰۱۴) انجام گرفت. این مدل کاربرد گسترده در مناطق مختلف جهان داشته و نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. برای این منظور کارایی و قابلیت مدل SWAT توسط SWAT CUP با استفاده از الگوریتم SUFI2 و بر اساس داده‌های ثبت‌شده دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری منتخب حوضه (ایستگاه بدوی) با ۷۰ درصد از داده (۱۹۸۷-۲۰۰۶) و اسنجی و با ۳۰ درصد بقیه (۲۰۰۷-۲۰۱۴) اعتبارسنجی شد. بر اساس داده‌های رستری ورودی به مدل، حوضه ارس به ۶۸ زیرحوضه و ۱۲۶۴ واحد پاسخ هیدرولوژیک تقسیم شد که محاسبات بیلان آب در سطح آن‌ها انجام شد. همچنین کارایی و دقت مدل در دوره واسنجی (۱۹۸۷-۲۰۰۶) بر اساس معیارهای ارزیابی NS، P-Factor، R-Factor و R^2 به ترتیب ۰/۶۴، ۰/۷۱، ۰/۲۷، ۰/۷۹، محاسبه شد که نشان‌دهنده رضایت‌بخش بودن کارایی مدل در شبیه‌سازی بیلان آب حوضه ارس است. مقدار این معیارها در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۷، ۰/۳، ۰/۶۸، محاسبه شد. از ۱۴ پارامتر مهم که بر اساس مقایسه نتایج تحلیل حساسیت از بین پارامترهای زیادی انتخاب شده بودند، برای کالیبره کردن مدل SWAT انتخاب شدند. در این مرحله پارامترهای مربوط به دمای ماهانه و دمای هوا و فاکتور تبخیر از خاک از فایل‌های bsn، wgn و hru. به‌عنوان مؤثرترین پارامترها در شبیه‌سازی دبی جریان ایستگاه هیدرومتری منتخب حوضه ارس شناسایی شدند. شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه ارس با مدل SWAT نشان داد تبخیر و تعرق مهم‌ترین مؤلفه در اتلاف آب حوضه است و سهم زیادی از آب حوضه را به خود اختصاص داده است که نیازمند اتخاذ تصمیم‌های منطقی برای کاهش اثر این متغیر و کاهش سهم آن در بیلان آب می‌باشد. این یافته همسو با نتایج پژوهش بشیریان و همکاران (۱۳۹۹) است. همچنین مؤلفه‌های مربوط به نفوذ آب و تغذیه سفره‌ها کمتر است که علت آن را می‌توان در ظرفیت پایین آب قابل دسترس خاک و نیز درصد پایین پوشش خاک‌های با نفوذپذیری بالا از جمله خاک شنی در حوضه دانست.

دبی‌های اوج شبیه‌سازی شده هرچند مطابقت کاملی با دبی‌های پیک اندازه‌گیری شده ندارند - که ناشی از ضعف مدل در شبیه‌سازی بهینه ذوب برف است (دولت‌آبادی و زمردیان ۱۳۹۲؛ آشفته و بزرگ حداد ۱۳۹۲؛ ناصرآبادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ زارع زاده مهریزی و همکاران، ۱۳۹۶؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۸؛ ناصرآبادی و همکاران، ۱۳۹۹؛ فروتن و همکاران، ۲۰۰۲؛ چو و شیرمحمدی، ۲۰۰۴) - ولی تا حد زیادی توانسته‌اند از الگوی هیدروگراف مشاهداتی متابعت کنند و روند صعودی و نزولی آن

مطابق دبی مشاهداتی است و در این خصوص مدل کارایی قابل قبولی دارد. همچنان که نتایج پژوهش بکیریس و همکاران (۲۰۰۵)؛ ویلی و هریس (۲۰۰۶)؛ فیریسن و همکاران (۲۰۰۷)؛ الانسی و همکاران (۲۰۰۹)؛ بیگر و همکاران (۲۰۱۵)؛ کالیک و همکاران (۲۰۱۵)؛ عارفی اصل و همکاران (۱۳۹۲) و کاویان و همکاران (۱۳۹۶) مؤید این مطلب است. علت ضعف مدل در برآورد بیشینه جریان رواناب این است که مدل از معادله SCS در تخمین رواناب استفاده می‌کند و قادر نیست به خوبی رواناب ناشی از ذوب برف را شبیه‌سازی کند (دولت‌آبادی و زمردیان، ۱۳۹۲). ولی درعین حال مدل در شبیه‌سازی رواناب سطحی حوضه دقت بیشتری نشان می‌دهد و بیشینه ماهانه رواناب سطحی حوضه را مقارن اوج بارش بهاره حوضه و در ماه می شبیه‌سازی نمود.

همچنین بررسی روند سری زمانی دبی جریان در ۱۳ ایستگاه هیدرومتری حوضه نشان داد روند کلی دبی جریان در همه ایستگاه‌های حوضه ارس از نیمه دوم دوره مورد مطالعه کاهش می‌شود که تعیین معنی‌دار بودن یا نبودن آن نیاز به ارزیابی بیشتری دارد و مطالعات جزئی‌تری را می‌طلبد. کاهش دبی در بخش جنوبی حوضه علاوه بر علل محلی (مانند تغییر کاربری به زراعت آبی، افزایش برداشت در اراضی بالادست، افزایش/احداث سدها و ...) و احتمال تغییر اقلیم می‌تواند ناشی از سیاست‌های توسعه طلبانه و سدسازی‌های بی‌رویه در فراتر از مرزهای ایران به خصوص در کشور ترکیه باشد که ورودی آب به حوضه را محدودتر نموده است. تشخیص و تعیین سهم هر کدام از عوامل مذکور نیازمند پایگاه داده مطمئن و استخراج اطلاعات چندلایه‌ای است. لازم به ذکر است در این پژوهش با توجه به محدودیت دسترسی به ایستگاه‌های صفر مرزی و اغلب ایستگاه‌های کلیدی، به‌ناچار به جای ایستگاه نزدیک به محل خروجی حوضه، از ایستگاه بدوی استفاده گردید.

نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و راهبردی معطوف به بخش‌های آب (تخصیص منابع و ...)، کشاورزی (انتخاب محصول متناسب با تغییر اقلیم و اصلاح الگوی کشت و ...)، توسعه اقتصادی (ترسیم چشم‌انداز سرمایه‌گذاری‌ها و بهینه‌سازی و پایدارسازی آن‌ها از طریق برآورد ریسک سرمایه‌گذاری‌های متأثر از تغییر اقلیم و ...) و مواردی از این قبیل سودمند واقع شود. لذا یافته‌ها برای شرکت‌های آب منطقه‌ای، ادارات کل جهاد کشاورزی، ادارات کل محیط‌زیست، سازمان هواشناسی استان‌های واقع در منطقه شمال غرب کشور مفید و کاربردی خواهد بود. همچنین با بررسی بیلان آب حوضه و ایجاد سناریوهای مناسب با وضعیت منطقه می‌توان آمادگی‌های لازم را جهت مقابله با کم‌آبی و کاهش تبعات ناشی از آن و انجام اقدامات مقتضی توسط دستگاه‌های ذی‌ربط ایجاد نمود.

منابع

- آبایی، بهنام؛ سهرابی، تیمور. (۱۳۹۱). ارزیابی عملکرد مدل SWAT در حوضه آبریز زاینده‌رود، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۶(۳): ۴۱-۵۸.
- اعلمی، محمدتقی؛ عباسی، حبیبه؛ نیک سخن، محمدحسین. (۱۳۹۷). مقایسه دو روش متفاوت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT در برآورد میزان رواناب و بار مواد معلق حوضه صوفی چای. نشریه دانش آب‌وخاک، ۲۸(۳): ۵۳-۶۴.
- انصاری، محمدرضا؛ گرجی، منوچهر؛ صیاد، غلام عباس؛ شرفا، مهدی؛ حمادی، کاظم. (۱۳۹۴). شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز رود زرد با استفاده از مدل Arc Swat، علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸(۴): ۹۷-۱۰۷.
- بشیریان، فاطمه؛ رحیمی، داریوش؛ موحدی، سعید؛ ذاکری نژاد، رضا (۱۳۹۹). شبیه‌سازی رواناب، تبخیر، برگاب و تغذیه آب زیرزمینی دریاچه ارومیه در دوره‌های مرطوب و خشک، پژوهش آب ایران، ۱۴(۳): ۸۵-۹۵.
- بصیری، مرضیه؛ اسفندیار پور بروجنی، عیسی؛ اخوان، سمیرا؛ حمیدپور، محسن؛ کمالی، اردوان. (۱۳۹۲). تأثیر مقیاس نقشه خاک بر مدل در شبیه‌سازی روند جریان رواناب ماهانه در حوضه آبخیز توپسرکان، مدیریت خاک و تولید پایدار، ۴(۳): ۱۳۵-۱۵۳.
- جوانشیر، زینب؛ ولیزاده کامران، خلیل؛ رسولی، علی اکبر؛ رستم‌زاده، هاشم. (۱۴۰۰). بررسی عملکرد مدل سبال کوهستانی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی، مطالعه موردی: شهرستان‌های شرق دریاچه ارومیه، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۵(۷۵): ۹۱-۱۰۰. doi: 10.22034/gp.2021.10843
- حبیبی، علیرضا؛ گودرزی، مسعود. (۱۳۹۷). کاربرد مدل نیمه توزیعی SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه حبله‌رود، علوم مهندسی و آبخیزداری، ۱۲(۴۳): ۴۰-۴۹.
- خسروی، محمود، تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آبی خاورمیانه، چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، زاهدان، ۲۵-۲۷ فروردین ۱۳۸۹.
- خورشیددوست، علی محمد؛ اسفندیاری، فریبا؛ حسینی، سید اسعد، دولتخواه، پروانه. (۱۳۹۷). برآورد میزان رسوب حوضه رود ارس با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: زیرحوضه دره رود، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۲(۶۵): ۱۴۱-۱۶۲.
- دولت‌آبادی، سپیده؛ زمردیان، سید محمدعلی. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه فیروزآباد با استفاده از مدل SWAT، مهندسی آبیاری و آب، ۴(۱۴): ۳۸-۴۸.
- رضازاده، محمد سهیل؛ بختیاری، بهرام؛ عباسپور، کریم؛ احمدی، مهدی؛ احمدی، محمد. (۱۳۹۶). شبیه‌سازی رواناب، رسوب و تبخیر-تعرق با استفاده از سناریوهای مدیریتی برای کاهش بار رسوب با استفاده از مدل SWAT، علوم مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۲(۴۰): ۴۰-۴۱.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ حجازی، میر اسدالله؛ بهبودی، عبدالله. (۱۳۹۸). برآورد میزان رواناب حوضه آبریز لنبران چای در استان آذربایجان شرقی: کاربرد مقایسه‌ای روش‌های واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۳۱: ۵۹-۷۵.
- رضائی مقدم، محمد حسین؛ مختاری، داود؛ رفیعی مهر، مجید. (۱۴۰۰). واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوضه آبریز شهر چای میانه، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۵(۷۶): ۱۲۹-۱۳۹. doi: 10.22034/gp.2020.40775.2656
- زارع زاده مهریزی، شهاب‌الدین؛ خورانی، اسداله؛ بذرافشان، جواد؛ بذرافشان، ام‌البنین. (۱۳۹۶). ارزیابی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز گاماسیاب، مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، ۷۰(۴): ۸۸۱-۸۹۳.
- زارع زاده مهریزی، شهاب‌الدین؛ خورانی، اسداله؛ بذرافشان، جواد؛ بذرافشان، ام‌البنین. (۱۳۹۷). تغییرات رژیم جریان رودخانه گاماسیاب تحت سناریوهای تغییر اقلیم، محیط‌شناسی، ۴۴(۴): ۵۸۷-۶۰۲.
- سادات آشفته پریسا؛ بزرگ حداد، امید. (۱۳۹۲). ارائه رویکرد احتمالاتی ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر منابع آب. مجله مهندسی منابع آب، ۱۹(۶): ۶۶-۵۱.
- سعادت، حسین؛ غلامی، شعبانعلی؛ شریفی، فرود؛ ایوب‌زاده، سید علی. (۱۳۸۷). بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی در رواناب سطحی مدل شبیه‌سازی SWAT (مطالعه موردی: حوضه کسلیان)، منابع طبیعی، ۵۹(۲): ۳۱۳-۳۰۱.

عارفی اصل، اکرم؛ نجفی‌نژاد، علی؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل در حوضه آبخیز چهل چای استان گلستان، مرتع و آبخیزداری، ۶۶(۳): ۴۳۳-۴۴۶.

غلامی، شعبانعلی؛ نصیری، معصومه. (۱۳۹۴). شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه اترک با استفاده از مدل SWAT، مطالعه موردی: حوضه آبخیز مراوه تپه استان گلستان، مهندسی و مدیریت آبخیز، ۷(۲): ۱۲۶-۱۳۵.

کاویان، عطالله؛ نامدار، مریم؛ گلشن، محمد؛ بحری، معصومه. (۱۳۹۶). مدل‌سازی هیدرولوژیکی اثرات تغییر اقلیم بر نوسانات دبی جریان در رودخانه هراز، مخاطرات محیط طبیعی، ۶(۱۲): ۸۹-۱۰۴.

گلزاری، ساحره؛ زارع ایبانه، حمید؛ دلاور، مجید؛ میرقی دینان، نغمه. (۱۳۹۹). بررسی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی کمی و کیفی رواناب و اقدامات آبخیزداری در حوضه زرينه‌رود، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، ۱۱(۲۲): ۱۱۱-۱۲۰.

ناصرآبادی، فواد؛ اسمعیل عوری، اباذر؛ اکبری، حسین؛ رستمیان، رخساره. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو اردبیل)، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، ۷(۱۳): ۵۰-۵۹.

ناصرآبادی، فواد؛ قضاوی، رضا؛ ذاکری‌نیا، مهدی. (۱۳۹۹). مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز رودخانه تلوار تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، پژوهش آب ایران، ۱۴(۲): ۳۷-۴۹.

نظری پویا، هادی؛ کردوانی، پرویز؛ فرجی راد، عبدالرضا. (۱۳۹۴). واسنجی و ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژی IHACRES و SWAT در شبیه‌سازی رواناب، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۲): ۹۹-۱۱۲.

- Abbaspour, K., Faramarzi, M., Ghasemi, S., Yang, H. (2009). **Assessing the impact of climate change on water resources in Iran**, Water Resour. Res., 45(10).
- Alansi, A. W., Amin, M. S. M., Abdul Halim, G., Shafri, H. Z. M., 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: 7581-7609.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R. (1998). **Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development**, JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc., 34: 73-89.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Maidment, D. R. (1995). **Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins**. J. Hydraul. Eng., 121: 171-183.
- Bekiaris, I. G., Panagopoulos, I. N., Mimikou, N. A. (2005). **Application of the SWAT model in the Ronnea catchment of Sweden**. Global NEST Journal, 3(7): 252-257.
- Bieger, K., Hormann, G., Fohrer, N. (2015). **Detailed spatial analysis of SWAT-simulated surface runoff and sediment yield in a mountainous watershed in China**, Hydrological Sciences, 60: 784-800.
- Chu, T. W., Shirmohammadi, A. (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(4): 1057-1073.
- Dobler, C., Bürger, G., Stötter, J. (2012). **Assessment of climate change impacts on flood hazard potential in the Alpine Lech watershed**, J. Hydrol, 460-461: 29-39.
- Eum, H., Simonovic, S. P. (2012). **Assessment on variability of extreme climate events for the Upper Thames River basin in Canada**, Hydrol. Process, 26(4): 485-499.
- Feyereisen, G. W., Strickland, T. C., Bosch, D. D., Sullivan, D. G. (2007). **Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the little river watershed**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50: 843-855.
- Hasheminasab, S., Rahimi, D., Zakerinejad, R., Kropáček, J. (2022). **Assessment of climate change impact on surface water: a case study—Karoun River Basin, Iran**, Arabian Journal of Geosciences, 15:904. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09969-5>
- Kalcic, M., Chaubey, I., Frankenberger, J. (2015). **Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries**, Agricultural and Biological Engineering, 8: 1 - 12.
- Kim, J. H., Sung, J. H., Chung, E. S., Kim, S. U., Son, M., Shiru, M. S. (2021). **Comparison of projection in meteorological and hydrological droughts in the Cheongmicheon Watershed for RCP4. 5 and SSP2-4.5**, Sustainability, 13(4): 2066
- Li, K. Y., Coe, M. T., Ramankutty, N., De Jong, R. (2007). **Modeling the hydrological impact of landchange in West Africa**, J. of Hydro., 337: 258-268.
- Lu, Z., Zou, S., Xiao, H., Zheng, C., Yin, Z., Wang, W. (2015). **Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China**, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 79: 76-85.

- Nash, J. E. Sutcliffe, J. V. (1970). **River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles**, Journal of Hydrology, 10(3): 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. Willams, J. R. (2005). **Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation**. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 494 p. from www.brc.tamus.edu.
- Rahimi, D., Hasheminasab, S., Abdollahi, K., (2019). **Assessment of temperature and rainfall changes in the Karoun River basin**, Theoretical and Applied Climatology, 137(6). DOI: 10.1007/s00704-019-02771-6
- Santhi, C., Muttiah, R. S., Arnold, J. G., Srinivasan, R. (2005). **A GIS-based regional planning tool for irrigation demand assessment and savings using SWAT**, Transactions of the ASAE 48(1):137-147.
- Wang, D., Hejazi, M., Cai, X., Valocchi, A. J. (2011). **Climate change impact on meteorological, agricultural, and hydrological drought in central Illinois**, Water Resour. Res., 47(9).
- Wilby, R., Haris, I. (2006). **A frame work for assessing uncertainties in Climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames**, U. K. water resources research.
- Wolock, D., McCabe, G. (1999). **Estimates of Runoff Using Water-Balance and Atmospheric**, journal of the American water resources association. 35, 6: 1341-1350.
- Zuo, D., Xu, Z., Zhao, J., Abbaspour, K. C., Yang, H. (2015). **Response of runoff to climate change in the Wei River basin, China**. Hydrological Sciences Journal, 60(3):1-15.