

Research Paper



Simulating the Water Balance of Aras Basin based on the CNRM-CM6 Climate Model



Mahnaz Saber¹ | Bromand Salahi^{*2} | Roghayeh Maleki Meresht³

1. Postdoctoral Researcher of Climatology, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran. mahnazsaber@uma.ac.ir
2. Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences. University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. salahi@uma.ac.ir
3. Postdoctoral Researcher of Climatology, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran. roghayeh.maleki1395@gmail.com

Keywords

Climate Change, SUFI2, SWAT CUP, Water Balance, Aras River Basin.

Received: 2024/09/29

Accepted: 2024/1/25

Published: 2025/04/19

ABSTRACT**Introduction**

It is necessary to make accurate predictions of climate change, especially the change in the hydrological behavior of rivers, to make policies and plans for water resources management, and to achieve adaptation and reduce the consequences of climate change. Semi-arid mountainous regions have dense population centers that increasingly need water resources and providing and stabilizing their employment and achieving comprehensive development requires access to sufficient water resources and their optimal allocation. In this research, the simulation of the water balance components of the Aras River basin area and its changes under the conditions of climate change using SWAT modeling have been done.

Methodology

In this research, in addition to the output data of the CNRM-CM6 climate model in the historical period and under the SSP5-8.5 scenario, from the climate data of selected stations including minimum and maximum temperature, precipitation, sunshine hours, relative humidity and wind speed on a daily scale in a period of 37 years (1985-2014), hydrometric data including flowout rate (m^3/s) and geographical data of Aras River basin including DEM map, soil, basin slope and land use have been used. The SWAT model was used to simulate the hydrological conditions of the Aras River basin in the future period. Before starting the calibration of the SWAT model, preliminary settings were first made on the output of the initial implementation. In the next step, the accuracy of the SWAT model was evaluated in the simulation of the discharge of the Aras River basin. Among the 11 evaluator criteria, the Nash-Sutcliffe coefficient (NS) was considered as the target criterion for SWAT model calibration. The calibration of the model was done from 1987 to 2006 and its validation was done from 2007 to 2014 with the SUFI2 algorithm.

*Correspondin Author: Bromand Salahi, E-mail: salahi@uma.ac.ir

How to cite this article: Saber, M., Salahi, B., & Maleki Meresht, R. (2025). Simulating the water balance of Aras basin based on the CNRM-CM6 climate model. *Hydrogeomorphology*, 12(42): 99 – 117.

DOI: [10.22034/hyd.2024.63758.1759](https://doi.org/10.22034/hyd.2024.63758.1759)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Results and Discussion

From the integration of slope, soil, and land use maps of the Aras River basin in the SWAT model, this basin was divided into 68 sub-basins and 1264 hydrological response units and calculations were done on them. By running the model in 350 simulation cycles, the order of 14 sensitive parameters of the model was determined. By running the model in 350 rounds of simulation, the order of 14 sensitive parameters of the model was determined, from the wgn, hru, bsn, and sol files, the parameters related to the monthly average maximum temperature, the maximum water retention by the canopy of plants, the base temperature of the beginning of snow melting, the index Leaf surface (where no evaporation occurs) and hydraulic conductivity of saturated soil were identified as among the most effective parameters in the simulation of stream flow at the selected hydrometric station of Aras basin. The efficiency and accuracy of the model in the calibration period (1987-2006) based on R^2 , NS, P-Factor, R-Factor, and evaluation criteria were obtained as 0.67, 0.71, 0.77, and 0.27 respectively. Evaluation of SWAT model efficiency with different criteria showed that the observed and simulated discharge values are highly consistent. Comparing the simulated hydrograph with the observational hydrograph of the basin indicates the maximum concentration of the model error in the peak discharges (May) when the peak of snow melting occurs and shows that the model performs poorly in simulating snow melting.

Conclusions

Although in the future period the annual rainfall will be 79 mm more than the historical period, but a major part of it will be spent on evapotranspiration in the months of May to July. This can have a negative effect on the quality of plant growth and crop yield, water stress will increase the possibility of dust phenomenon and will lead to a decrease in the water level behind the dams, which will have multifaceted consequences on hydropower production, agricultural products and the economy. Therefore, it is necessary to take appropriate measures to store water or release surface runoff in areas with suitable soil for deep penetration of water and away from pollution.



مقاله پژوهشی



شبیه‌سازی بیلان آب حوضه آبریز ارس بر اساس مدل اقلیمی CNRM-CM6



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

۱- پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. mahnaz.saber@uma.ac.ir

۲- استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. salahi@uma.ac.ir

۳- پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. roghayeh.maleki1395@gmail.com

چکیده

کلیدواژه‌ها

در این پژوهش از مدل SWAT برای شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی حوضه رودخانه ارس در دوره آینده استفاده گردید. واسنجی مدل بر اساس داده سال‌های ۲۰۰۶-۱۹۸۷ و اعتبارسنجی آن در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۷ با الگوریتم SUFI2 انجام و مدل SWAT بر اساس دبی جریان ماهانه ایستگاه هیدرومتری منتخب کالیبره شد. بعد از انتخاب پارامترهای بهینه و با اجرای شبیه‌سازی در ۳۵۰ دور شبیه‌ساز، مقادیر معیارهای ارزیابی در دوره واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی به‌دست آمد. برای ارزیابی تغییرات بیلان آب حوضه تحت شرایط تغییر اقلیم از داده‌های ریزگردانی‌شده مدل اقلیمی CNRM-CM6 در دوره تاریخی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و دوره آینده (۲۰۲۵-۲۱۰۰) تحت سناریوی SSP5-8.5 به‌عنوان داده ورودی به مدل SWAT استفاده شد. یافته‌ها نشان داد ET حوضه سهم زیادی از بارش ۲۷۲ میلی‌متری دوره تاریخی و ۳۵۱ میلی‌متری دوره آینده حوضه را به خود اختصاص داده و میزان نفوذ و جریان جانبی که برای تغذیه منابع زیرزمینی و سطحی ضروری هستند، بسیار اندک است. همچنین هر چند در دوره آینده بارش سالانه به میزان ۷۹ میلی‌متر نسبت به دوره تاریخی بیشتر خواهد بود ولی بخش عمده‌ای از آن صرف تبخیر و تعرق در ماه‌های می تا جولای خواهد شد. مدیریت بهینه منابع آب در این حوضه مستلزم توجه ویژه به برنامه‌ریزی برای کاهش ET، افزایش نفوذ به آبخوان‌ها و بهبود سیستم‌های آبیاری و سایر اقدامات پیشگیرانه برای مقابله با تبعات چالش‌های جدید ناشی از تغییرات اقلیمی است.

بیلان آب، تغییر اقلیم،

SWAT CUP, SUFI2

حوضه رودخانه ارس.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

ارجاع به این مقاله: صابر، مهناز؛ صلاحی، برومند؛ ملکی مرشت، رقیه. (۱۴۰۴). شبیه‌سازی بیلان آب

حوضه آبریز ارس بر اساس مدل اقلیمی CNRM-CM6. هیدروژئومورفولوژی، ۱۲(۴۲): ۹۹-۱۱۷.

شناسه دیجیتال مقاله: DOI: 10.22034/hyd.2024.63758.1759

*نویسنده مسئول: برومند صلاحی
رایانامه: salahi@uma.ac.ir



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

مقدمه

عمده‌ترین اثر تغییر اقلیم که گزارش‌های کارگروه‌های وابسته به IPCC مؤید آن است، در قالب افزایش دما و وقوع گرمایش و تغییرات زمانی-مکانی بارش، نوع بارش، تغییرات کمی بارش و تغییر جریان رودخانه قابل ملاحظه است (شی و ونگ، ۲۰۱۵: ۳۲۳۶). متعاقب وقوع گرمایش هوا و ذوب ناگهانی ذخایر برف و یخ در فصل بهار فراوانی رخداد سیل مکرر شده و چرخه سیل و خشک‌سالی به وجود می‌آید (جونز و من، ۲۰۰۴: ۱). همچنین اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر روی کمیت و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی و تعادل هیدرولوژیک دارد. لذا مطالعه تأثیر این پدیده بر منابع آبی حائز اهمیت است (بوسی^۳ و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۹۲۱؛ پاراجولی^۴، ۲۰۱۶: ۱۱۲). انجام و ارائه پیش‌نگری‌های دقیق‌تر از تغییرات متعاقب تغییر اقلیم به‌خصوص هر گونه تغییر در رفتار هیدرولوژیکی به‌منظور سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی جهت مدیریت منابع آب و رسیدن به سازگاری و کاهش تبعات تغییر اقلیم ضرورت دارد (ونگ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱). مدل‌های GCM کارآمدترین (لین^۵ و همکاران، ۱۹۹۹: ۱۹۴) و پرکاربردترین ابزار کمی‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر روی متغیرهای هواشناسی هستند (IPCC، ۲۰۰۷: ۱). این مدل‌ها نمی‌توانند به‌طور مستقیم برای شبیه‌سازی‌ها به کار روند بلکه لازم است ریزگردانی شوند تا بتوانند در پیش‌نگری تغییرات متغیرها در مقیاس محلی و منطقه‌ای به کار گرفته شوند.

هرچند ممکن است تغییر احتمالی در اقلیم منطقه‌ای به‌خصوص در عرض‌های جغرافیایی بالا به بهبود شرایط پیشین منجر شده و مزایایی نیز از جهت توسعه کشاورزی و بخش اقتصادی و آسایش بیوکلیمایی داشته باشد اما این فرضیه در مورد عرض‌های جغرافیایی پایین دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند ایران و تا حدودی در مورد عرض‌های میانه بسیار کمتر صدق می‌کند. با چشم‌پوشی از ویژگی ذاتی مناطق نیمه‌خشک این‌چنینی، تمرکز مراکز جمعیتی که نیازهای متعدد عمدتاً متکی به آب دارند و نیز تأمین و پایداری اشتغال آنان در کنار دستیابی به توسعه همه‌جانبه و پایدار ضمن حفاظت از تمامی منابع ارزشمند تماماً نیازمند دسترسی به منابع آب کافی و تخصیص بهینه آن است. این مسئله مهم تا حد زیادی با ارزیابی‌ها و توصیه‌های پیش‌گیرانه برای جلوگیری از غافلگیری یک‌باره و ناگهانی ناشی از تغییر منابع آب در آینده و اتخاذ تصمیمات، انجام برنامه‌ریزی متناسب با تغییرات احتمالی با تعیین و تعریف سناریوهای ممکن برای هر نوع و میزان تغییر اقلیم آتی و تحلیل اثرات آن بر منابع فعلی آب جهت جلوگیری از دچار شدن به بحران امکان‌پذیر است. یکی از ابزار توانمند و کاربردی که قابلیت مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی و نوع مدیریت زمین و نظایر این‌ها را در مؤلفه‌های بیلان آب و رسوب حوضه‌ها دارد، مدل هیدرولوژیکی SWAT است. SWAT مدلی فیزیکی است که نیمه توزیعی بوده و پیوستگی زمانی دارد و برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی به کار می‌رود (عباسپور، ۲۰۰۷: ۱۱؛ نیچ^۶ و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۶؛ روح‌الله‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۰). امروزه برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آبی و مؤلفه‌های بیلان آب از مدل‌های ریزگردان و مولد مصنوعی داده‌های اقلیمی به‌طور وسیعی به‌عنوان مکمل مدل‌های هیدرولوژیکی پیشرفته‌ای مثل مدل SWAT استفاده می‌شود (لین^۷ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۹۴).

از اواسط قرن بیستم به بعد به‌تدریج بحث‌های علمی مبنی بر تغییر شرایط اقلیمی و اثرات آن مطرح گردید که در اواخر این قرن با شدت گرفتن برخی تغییرات از جمله افزایش سیر صعودی گرمایش زمین این موضوع به یکی از دغدغه‌های روز بشر تبدیل شد و تحقیقات گسترده‌ای در جهان در خصوص این پدیده انجام گرفت. در پژوهش‌هایی تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آبی سطحی در حوضه رودخانه گم-هوی کره (چانگ و کوموزپی^۸، ۲۰۱۲: ۱۷۵)؛ تغییرات رواناب حوضه رودخانه یارلونگ فلات تبت (لی^۹ و همکاران، ۲۰۱۴: ۵۱۷)؛ جریان ورودی ارس، سدهای ستارخان و قوری چای (حافظ‌پرست و شریف‌آذری، ۲۰۱۶: ۷۸۲)؛ رژیم هیدرولوژی رودخانه اوکلاهامای فلوریدا (چیلکوتی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷: ۵۱۰)؛ منابع آبی حوضه رودخانه تکس شمال اتیوپی (جبرمسکل و کبد^{۱۱}، ۲۰۱۸: ۱۹۵)؛ منابع

۱- Shi & Wang

۲- Jones & Mann

۳- Bussi

۴- Parajuli

۵- Lane

۶- Neitsch

۷- Lin

۸- Chung & Nkomozepi

۹- Li

۱۰- Chilkoti

۱۱- Gebremeskel & Kebedeb

زیرزمینی (کوچند^۱ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱)؛ بر منابع آبی هند و کشورهای جنوب شرقی آسیا (کانوار و سینگ^۲، ۲۰۲۲: ۴۵)، منابع آبی چین (زنگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۳: ۱)؛ تغییرات آبی منابع آب، سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌های حوضه چائوپرایای تایلند (یانگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۳)؛ تغییرپذیری فضایی-زمانی ذخیره آب خشکی و واکنش آن به تغییر اقلیم در چین (ونگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۳: ۲۰۱) و منابع آب زیرزمینی نیوزلند (مورت^۶ و همکاران، ۲۰۲۳: ۱) با استفاده از مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی بررسی شده است.

در پژوهشی تغییرات دبی جریان رودخانه هراز در مدل SWAT بر اساس خروجی مدل‌های اقلیمی تحت سناریوی A2 بررسی شده است. نتیجه مدل‌سازی نشان‌دهنده کاهش ۱۸ درصدی بارش سالانه، افزایش دبی‌های اوج و کاهش دبی ورودی به میزان ۱۴ درصد بود (کاویان و همکاران، ۱۳۹۶: ۸۹). با استفاده از مدل LARS-WG و SWAT تغییرات ETa و آب خاک در حوضه تالار مازندران تحت شرایط تغییر اقلیم ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد میانگین دما و ETa آینده بیشتر از دوره پایه (۲۰۰۳-۲۰۱۰) خواهد بود (غلامی و همکاران، ۱۳۹۷: ۵۱۱). بر اساس داده اقلیمی سه مدل GCM تحت سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه RCP2.6 و RCP8.5 و مدل SWAT اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبی حوضه آبریز سد سلمان فارسی شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان داد در دوره آینده نسبت به دوره پایه بارش‌های حدی افزایش و وقوع بارش‌های با شدت کم، کاهش و میانگین حداقل و حداکثر دما افزایش خواهد یافت (هوشمند و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۴۳). شرایط هیدرولوژیکی حوضه تلوار کردستان با استفاده از مدل SDSM و SWAT تحت شرایط تغییر اقلیم برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ شبیه‌سازی گردیده است. نتایج نشان داد تحت شرایط تغییر اقلیم حداقل و حداکثر دما در اغلب ماه‌ها افزایش و بارش زمستانه و بهار کاهش خواهد یافت همچنین رواناب در ژانویه و فوریه و دسامبر روند افزایشی خواهد داشت (ناصرآبادی و همکاران، ۱۳۹۹: ۳۷). به شبیه‌سازی تغییرات دبی و حجم مخزن سد درودزن در مدل SWAT بر مبنای خروجی مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای RCP پرداخت. نتایج نشان داد دبی ورودی به سد بین ۴۸ تا ۵۰ درصد در مقیاس سالانه کاهش خواهد یافت (نادری، ۱۳۹۹: ۲۵۹).

در پژوهش‌های مشابهی اثرات تغییر اقلیم بر روی متغیرهایی از قبیل منابع آب سیستان و بلوچستان (زهرایی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱)؛ منابع آبی منطقه خاورمیانه (خسروی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱)؛ منابع آب زیرزمینی دشت رامهرمز (شکیبا و چشمی، ۱۳۹۰: ۴۶)؛ میزان تغذیه آب زیرزمینی سفیددشت (انصاری و همکاران، ۱۳۹۵: ۴۱۶)؛ رواناب حوضه آبی چای (ثانی خانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۲۲۵)؛ وضعیت هیدرولوژی حوضه گرگانرود (آذری و همکاران، ۱۳۹۲: ۵۳۷)؛ متغیرهای هیدروکلیماتولوژی حوضه سیمینه‌رود (رضایی زمان و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۲۴۷)؛ رواناب حوضه آبریز تویسرکان (پورمحمدی و همکاران، ۱۳۹۶)؛ منابع آب در دسترس و تولیدات کشاورزی در حوضه آبخیز (پرهیزکاری و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۳)؛ تغییرات پوشش برفی زاگرس و شاهرود (پرند خوزانی، ۱۳۹۷: ۱)؛ دبی رودخانه هروچای (قضاوی و همکاران، ۱۳۹۷: ۵۵)؛ اثرپذیری پدیده‌های فرین حوضه شاندیز (فهیمی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۷)؛ برداشت آب از منابع آب زیرزمینی حوضه مهرگرد سمیرم (مجیری و حلبیان، ۱۳۹۸: ۲۳۸)؛ بیلان آب حوضه تسوج (ساری صراف و جلالی عنصرودی، ۱۳۹۸: ۱۶۵)؛ رواناب حوضه زاینده‌رود (راهواره و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۲۹)؛ رواناب و ET حوضه مهرگرد (نوری و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۲۵)؛ رواناب حوضه طشک-بختگان (فلاح کلاکی و همکاران، ۱۴۰۰: ۳۴۵)؛ تغذیه آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز کرج (معتمد وزیری و همکاران، ۱۴۰۰: ۵۵)؛ دما و بارش آذرشهرچای (گودرزی و فاتحی‌فر، ۱۴۰۱)، منابع آب کهکیلویه و بویر احمد (هاشمی عنا، ۱۴۰۲: ۱۵۷) و رواناب حوضه گمناب چای (رضایی مقدم و همکاران، ۱۴۰۳: ۲۲) را با استفاده از مدل‌های اقلیمی و مدل SWAT بررسی نمودند.

مرور گزیده‌ای از پیشینه‌های مرتبط با تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آبی در مناطق مختلف ایران و جهان نشان داد که این پدیده اثرات متعددی بر منابع آبی داشته و در پی گرمایش جهانی و تغییر اقلیم طی دهه‌های آتی آثار و تبعات آن گسترده‌تر و پیچیده‌تر نیز خواهد شد. مطالعات کمی‌چندانی که در زمینه ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آب حوضه رودخانه ارس در مدل SWAT انجام

۱-Cochand

۲-Kanwar & Sungh

۳-Zhang

۴-Yang

۵-Wang

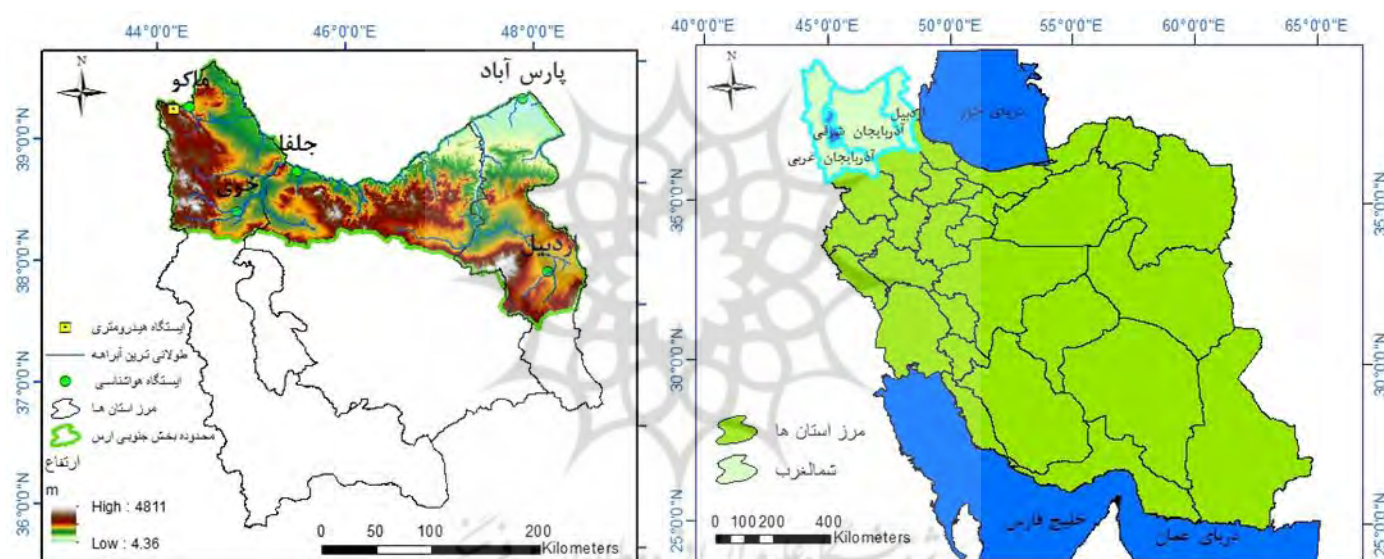
۶-Mourout

شده باشد به آن صورت انجام نگرفته است لذا در این پژوهش به شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه رودخانه ارس و بررسی تغییرات آن تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌سازی در SWAT پرداخته شد و از ریزگردانی خروجی مدل اقلیمی CNRM-CM6 به‌عنوان داده‌های ورودی هواشناسی موردنیاز در این مدل بهره گرفته شد.

محدوده و روش

موقعیت منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، حوضه ارس به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفت که تقریباً نیمه شمالی سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و اردبیل را در بر می‌گیرد. ارس طولانی‌ترین رود حوضه بوده که شاهرگ اصلی حوضه محسوب می‌شود و نقش برجسته و بارزی را در تأمین آب و اقتصاد حوضه رودخانه ارس ایفا می‌کند. این حوضه به لحاظ واقع شدن در مرز کشور از موقعیت خاص ژئوپلیتیک برخوردار بوده و اهمیت دوچندانی دارد. ایستگاه‌های هواشناسی اردبیل، پارس‌آباد، ماکو، خوی و جلفا و ایستگاه هیدرومتری بدوی به‌عنوان ایستگاه‌های منتخب این حوضه برای ارزیابی و شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه مورد بررسی قرار گرفتند. موقعیت جغرافیایی حوضه رودخانه ارس در نقشه ایران و پراکنش فضایی ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری منتخب در این پژوهش در شکل (۱) ارائه گردیده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه ارس در ایران و پراکنش ایستگاه‌های منتخب

Figure (1): Geographical location of the Aras basin and distribution of the selected stations

داده و روش

در این پژوهش علاوه بر داده خروجی مدل اقلیمی CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 از سه دسته داده دیگر استفاده گردید: داده‌های اقلیمی ایستگاه‌ها شامل: دما و بارش در مقیاس روزانه (برای اعتبارسنجی داده‌های مدل اقلیمی)؛ داده هیدرومتری شامل: دبی جریان (بر حسب مترمکعب در ثانیه) و داده‌های جغرافیایی حوضه رودخانه ارس شامل نقشه DEM، خاک، شیب حوضه و کاربری اراضی آن. فایل‌های DEM حوضه رودخانه ارس از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا دریافت شد و پس از آماده‌سازی اولیه به مدل SWAT معرفی گردید. همچنین نقشه‌های کاربری اراضی و خاک فائو از وب‌سایت SWAT اخذ گردید. داده‌های اقلیمی روزانه برای ایستگاه‌های حوضه رودخانه ارس طی دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۲۱ از سازمان هواشناسی کشور و داده هیدرومتری حوضه برای دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۵ از شرکت آب منطقه‌ای دریافت شد. پس از تنظیم داده‌های ورودی مطابق فرمت موردقبول مدل SWAT، از ایستگاه خوی به‌عنوان ایستگاه مبنای حوضه در لایه WGN_user به‌منظور بازسازی داده‌های مفقودی سایر ایستگاه‌ها استفاده گردید.

در این پژوهش به ارزیابی تغییرات مؤلفه‌های بیلان آب حوضه رودخانه ارس در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۱۰۰) با استفاده از داده‌های مدل اقلیمی CNRM-CM6 گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) تحت سناریوی SSP5-8.5 و روش Change Factor پرداخته شد. با توجه به پایین بودن قدرت تفکیک افقی این مدل‌ها، لازمه استفاده از داده آن‌ها برای مقیاس منطقه‌ای، ریزگردانی آن‌هاست. جدیدترین سناریوهای ارائه شده توسط ششمین گزارش ارزیابی تغییر اقلیم (AR6) به اختصار SSP نام دارند. این سناریوها شرایط اجتماعی-اقتصادی آینده جهان و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را توصیف می‌کنند (انیل^۱ و همکاران، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶) که بر اساس پنج رویکرد بنیادین افزایش رقابت‌های منطقه‌ای، افزایش نابرابری، توسعه پایدار، توسعه مبتنی بر سیاست‌های بینابین و گسترش استفاده از سوخت‌های فسیلی در پنج دسته تحت عنوان SSP1 تا SSP5 قرار می‌گیرند (زرین و داداشی، ۱۳۹۹). هشت سناریو شامل: SSP1-1.9، SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP4-3.4، SSP4-6.0، SSP5-3.5 و SSP5-8.5 از این ۵ رویکرد منشعب شده‌اند. از داده‌های ریزمقیاس‌شده مدل CNRM-CM6 (با قدرت تفکیک افقی $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ کیلومتر) تحت سناریوی SSP5-8.5 برای ایستگاه‌های حوضه رودخانه ارس در دوره تاریخی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و دوره آینده (۲۰۲۵-۲۱۰۰) و مدل SWAT به‌منظور محاسبه بیلان آب و تغییرات آن استفاده شد. بدین ترتیب که داده‌های اقلیمی ورودی مدل SWAT از مدل اقلیمی CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP585 در هر دو دوره تاریخی و آینده با استفاده از ابزار ArcToolBox در محیط ArcGIS برای هر یک از ایستگاه‌ها (نزدیک‌ترین نقطه شبکه به مختصات ایستگاه) استخراج گردید. پس از آماده‌سازی اولیه داده بارش و تبدیل واحد آن به میلی‌متر و دما به سانتی‌گراد، داده‌های دوره تاریخی مدل با داده مشاهداتی ایستگاه‌ها مقایسه و دقت آن‌ها ارزیابی شد. سپس داده‌های متغیرهای دوره تاریخی برای ارزیابی بیلان آب حوضه در دوره تاریخی به مدل SWAT معرفی گردید و پس از کالیبره نمودن مدل خروجی مدل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای برآورد وضعیت مؤلفه‌های بیلان آب در دوره آینده، تفاضل یا نسبت داده‌های دوره آینده و دوره تاریخی با روش Change Factor محاسبه شد و مقادیر آن‌ها در فایل‌های زیرحوضه‌های مربوطه در SWAT CUP قرار داده شد و مدل با مقادیر بهینه پارامترهای منتخب مجدداً کالیبره گردید.

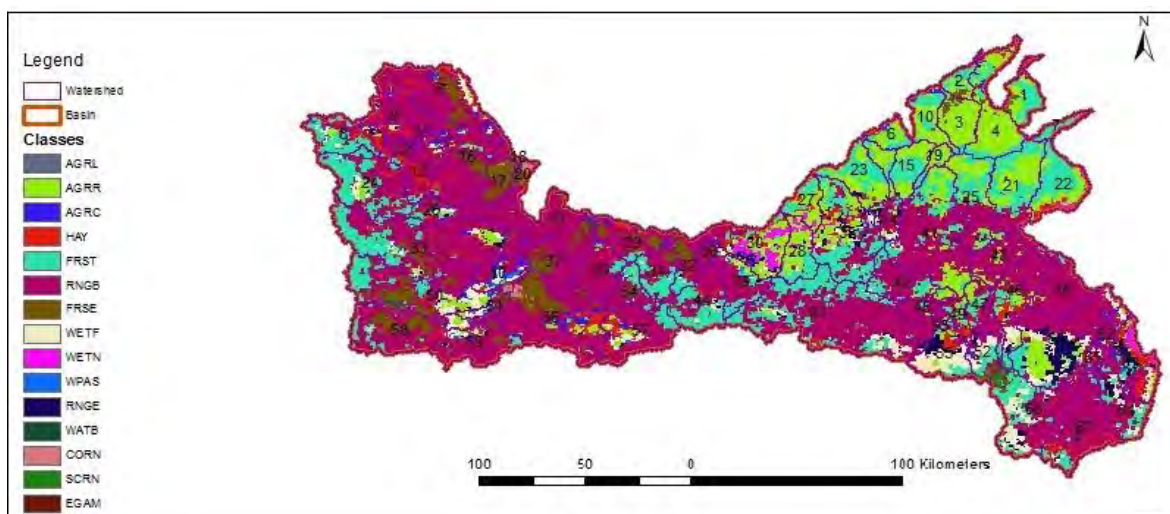
با استفاده از ۱۱ معیار ارزیابی می‌توان کارایی و دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی مؤلفه‌ها را بررسی نمود. از جمله آن‌ها می‌توان به NS، P-Factor، R-Factor و R^2 اشاره کرد. ضریب نش-ساتکلیف بین ۱ تا منفی بی‌نهایت است که مقدار بهینه آن صفر می‌باشد و اگر بزرگ‌تر از ۰/۷۵ به دست بیاید کارایی مدل عالی تلقی می‌شود. در صورتی که بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ محاسبه شود عملکرد مدل قابل قبول و در مقادیر کمتر از ۰/۳۶ کارایی مدل غیرقابل قبول است (نش-ساتکلیف، ۱۹۷۰). ضریب تعیین بین صفر و یک قرار دارد. 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. P-Factor نشانگر حداکثر مقدار داده‌های مشاهداتی در محدوده باند عدم قطعیت است و هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد، بهتر است (درصد بیشتری از مقادیر مشاهداتی در محدوده باند عدم قطعیت قرار گرفته است). R-Factor پهنای باند عدم قطعیت در نمودار PP-Plot را نشان می‌دهد و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است یعنی خطای مدل در شبیه‌سازی مقادیر متناظر با داده مشاهداتی خطای کمتری دارد.

بحث

تعریف کوچک‌ترین واحد پاسخ هیدرولوژیکی حوضه رودخانه ارس

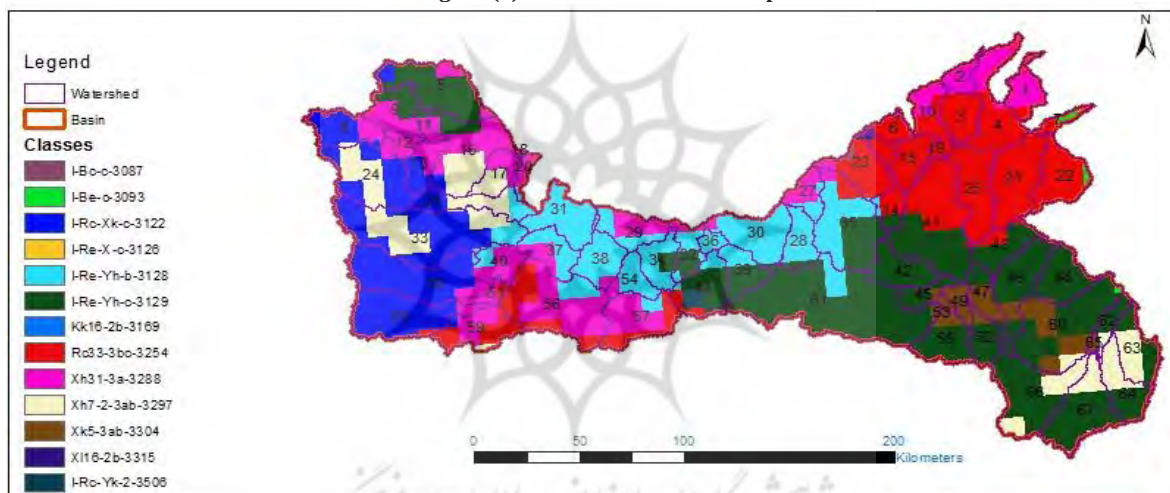
در مدل SWAT محاسبات از کوچک‌ترین واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تا سطح حوضه انجام می‌شود. برای تعریف HRUهای حوضه رودخانه ارس ابتدا نقشه شیب حوضه بر مبنای DEM حوضه در ۴ طبقه (صفر تا ۲ درصد، ۲ تا ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۳۰ درصد و بیشتر از

(۳۰ درصد) ترسیم شد (شکل ۲). سپس از تلفیق نقشه‌های شیب، خاک (شکل ۳) و کاربری اراضی حوضه (شکل ۴) در مدل SWAT حوضه به ۶۸ زیرحوضه (شکل ۵) و ۱۲۶۴ واحد پاسخ هیدرولوژیک تقسیم گردید. محاسبات بعدی در سطح این HRU ها انجام شد.



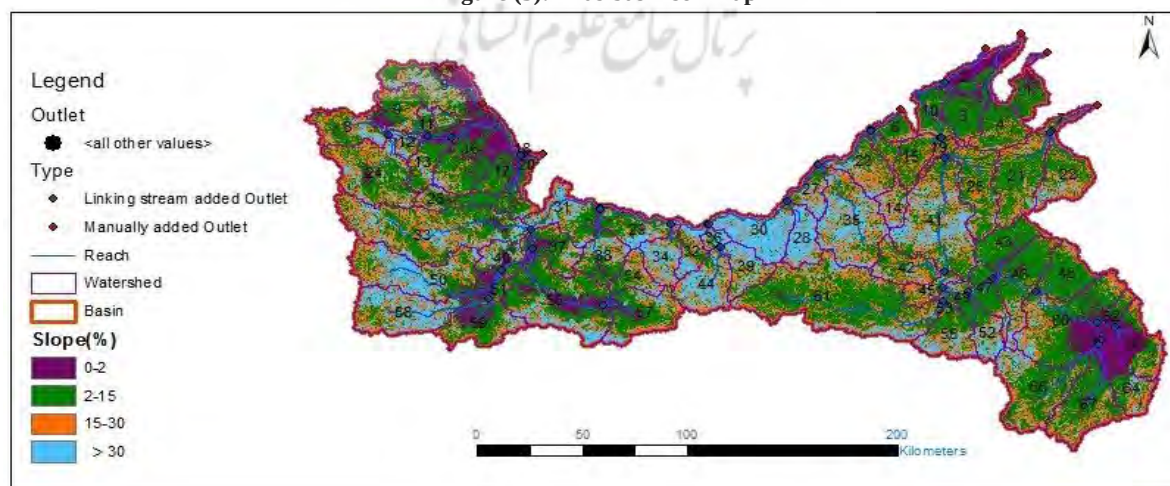
شکل (۲): نقشه کاربری اراضی حوضه ارس

Figure (2): Aras basin landuse map



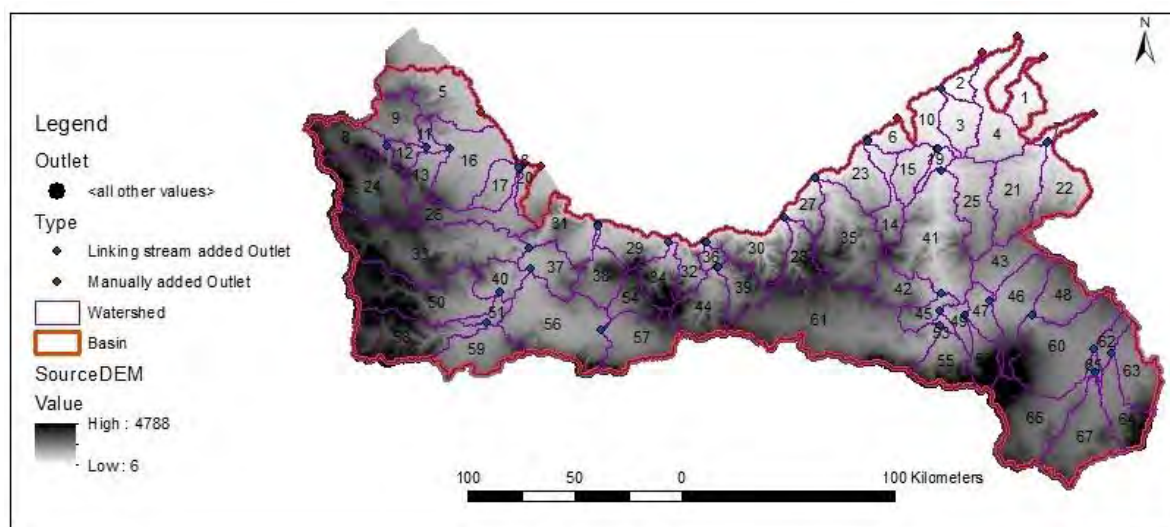
شکل (۳): نقشه خاک حوضه ارس

Figure (3): Aras basin soil map



شکل (۴): نقشه طبقات شیب حوضه ارس

Figure (4): Map of slope classes of Aras basin



شکل (۵): نقاط خروجی و زیرحوضه‌های ارس
Figure (5): Outlet points and Aras subbasins

واسنجی مدل SWAT

پیش از آغاز واسنجی مدل SWAT، ابتدا تنظیمات مقدماتی بر روی خروجی اجرای اولیه انجام شد از جمله پیاده‌سازی تنظیمات Elevation Bands در سطح زیرحوضه‌ها (تعداد پنج Elevation Bands برای لحاظ کردن نقش ارتفاع در دما و بارش در نظر گرفته شد)، تنظیم TLAPS و PLAPS و نیز تعیین مقادیر بهینه پارامترهای برف (Snow Parameters). با توجه به توصیه متخصصان و پژوهشگران لازم است قبل از واسنجی نهایی مدل SWAT در الگوریتم SUFI2، از قابل قبول بودن نتایج شبیه‌سازی مدل و اختلاف اندک داده‌های شبیه‌سازی شده با داده مشاهداتی ایستگاه شاهد اطمینان حاصل کرد. نحوه گزینش پارامترهای بهینه مدل طی دو مرحله انجام گرفت. بدین ترتیب که در مرحله اول با مقایسه نتایج تحلیل حساسیت نسبی پارامترهای مختلف در هر یک از فایل‌های مدیریتی، خاک، HRU، WGN، RTE، BSN، آب زیرزمینی، زیرحوضه و ... تعیین شدند و با اجرای مجزای مدل برای پارامترهای هر یک از فایل‌ها، از هر فایل یک یا دو پارامتر حساس‌تر و در مجموع ۱۴ پارامتر با حساسیت نسبی انتخاب گردید (سه ستون اول از جدول ۱). پس از ارزیابی اولیه، در مرحله واسنجی مدل با اجرای شبیه‌سازی در ۳۵۰ دور شبیه‌سازی، ترتیب اثرگذاری پارامترها (بر اساس ستون P-value و T-test) مشخص شد. پارامترهای مربوط به متوسط ماهانه حداکثر دما، حداکثر نگهداشت آب توسط تاج پوشش گیاهان، دمای مبنای آغاز ذوب برف، شاخص سطح برگ که در آن هیچ تبخیری رخ نمی‌دهد و هدایت هیدرولیکی خاک اشباع، مؤثرترین پارامترها در شبیه‌سازی دبی جریان ایستگاه هیدرومتری منتخب حوضه ارس شناسایی شدند. در این مرحله مقادیر معیارهای ارزیابی شامل ضریب تعیین، ضریب نش-ساتکلیف، P-Factor، R-Factor به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۷۱، ۰/۷۷ و ۰/۲۷ محاسبه شد که در شکل (۶) نتیجه شبیه‌سازی مدل آورده شده است. همچنین باندهای ۹۵ درصد و P-Factor، R-Factor به منظور تحلیل عدم قطعیت به کار گرفته شدند. ضرایب ارزیابی مدل در مرحله اعتبارسنجی بر اساس داده دبی توسط ضریب تعیین، ضریب نش-ساتکلیف، P-Factor، R-Factor نیز به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۷۹ و ۰/۲۵ محاسبه شد که در داخل دامنه قابل قبول (Neitsch, 2002; Abbaspour, 2007; Abbaspour et al. 2015) قرار دارند و نشان می‌دهد توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه در مقیاس ماهانه رضایت‌بخش است. در ادامه با استفاده از مقادیر بهینه پارامترهای انتخابی مدل SWAT کالیبره شد.

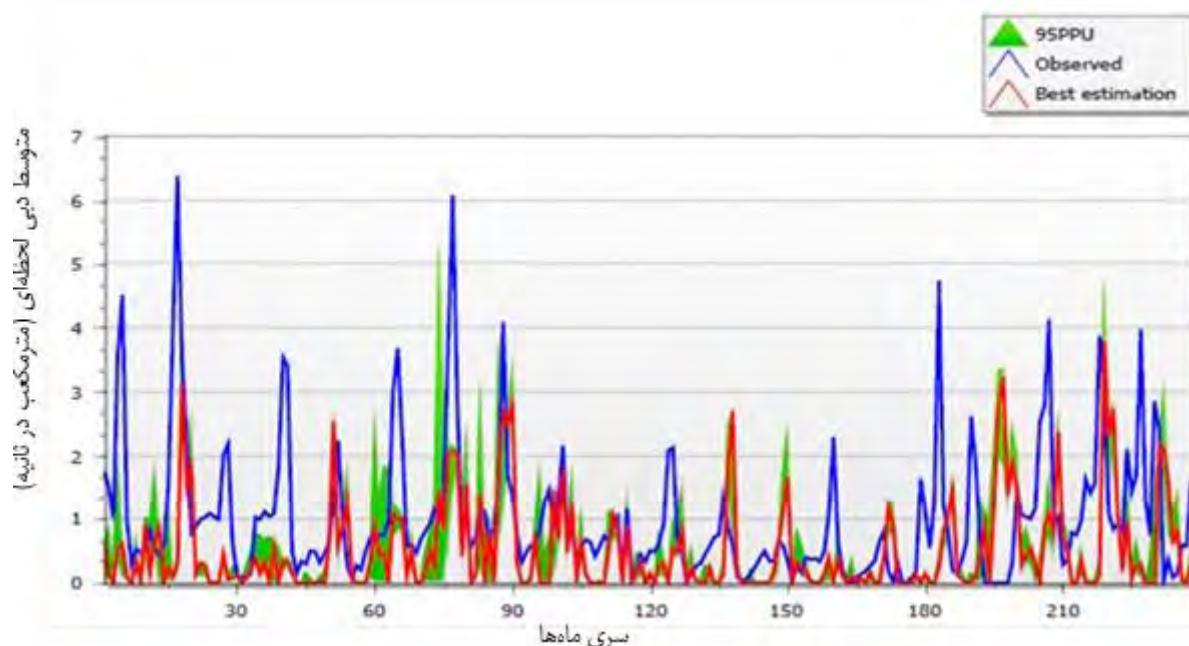
جدول (۱): خلاصه نتایج مرحله تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT در الگوریتم SUFI2 در دوره واسنجی (۱۹۸۷-۲۰۰۶) و دامنه مجاز آن‌ها
 Table (1): Summary of the results of the sensitivity analysis stage of the SWAT model parameters in the SUFI2 algorithm at the calibration period (1987-2006) and their permissible range

P-value	T-stat	دامنه مجاز		توصیف پارامتر	نام پارامتر	ردیف
		حداکثر	حداقل			
۰	-۵/۲۳	۵۰	-۳	متوسط ماهانه حداکثر دما	V__TMPMX(..).wgn	۱
۰	۳/۱۱	۱۰۰	۰	حداکثر نگهداشت آب توسط تاج پوشش یا برگاب (میلی‌متر)	V__CANMX.hru	۲
۰/۰۹	-۱/۶۶	۲۰	-۲۰	دمای مبنای شروع ذوب برف	V__SMTMP.bsn	۳
۰/۱۳	-۱/۵	۱۰	۰	شاخص سطح برگ که در آن هیچ تبخیری رخ نمی‌دهد	V__EVLAI.bsn	۴
۰/۲	۱/۲۶	۲۰۰۰	۰	هدایت هیدرولیکی خاک اشیاع (میلی‌متر در ساعت)	R__SOL_K(..).sol	۵
۰/۴۳	-۰/۷۸	۰/۳	-۰/۰۱	ضریب مانینگ کانال اصلی	V__CH_N2.rte	۶
۰/۵۱	۰/۶۴	۴۰	-۴۰	متوسط حداقل دمای ماهانه	V__TMPMN(..).wgn	۷
۰/۵۴	۰/۶	۱۵۰	۰	آب برف	V__SNO_SUB.sub	۸
۰/۵۵	۰/۵۸	۱	۰	عامل تبخیر آب از خاک	V__ESCO.hru	۹
۰/۶۴	۰/۴۵	۹۸	۳۵	شماره منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط	R__CN2.mgt	۱۰
۰/۶۵	-۰/۴۵	۱	۰	ظرفیت آب قابل‌دسترس خاک	R__SOL_AWC(..).sol	۱۱
۰/۷	-۰/۳۸	۲۰	۰	حداکثر میزان ذوب برف در طول سال (در تابستان)	V__SMFMX.bsn	۱۲
۰/۹۴	-۰/۰۷	۵۰۰	۱	حداقل مقدار ذخیره آب در سفره کم‌عمق که برای شروع تبخیر آب زیرزمینی از طریق موئینگی یا تغذیه سفره عمیق لازم است (میلی‌متر آب)	R__REVAPMN.gw	۱۳
۰/۹۹	۰	۱	۰	درصد نفوذ به آبخوان عمیق	V__RCHRG_DP.gw	۱۴

هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی

مقایسه منحنی‌های دبی جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد شکل (۶) در اغلب موارد مقادیر مدل‌سازی شده در محدوده باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (نوار سبز رنگ) قرار دارند. پهنای باند عدم قطعیت در دبی‌های اوج که مقارن ماه می است، بیشتر است و لذا مدل در شبیه‌سازی ذوب برف ضعیف عمل کرده است. اگرچه دبی‌های اوج شبیه‌سازی شده از نظر کمیت مطابقت کاملی با دبی‌های اوج مشاهداتی ندارند ولی مدل تا حد زیادی توانسته است از نظر زمانی آن‌ها را شبیه‌سازی کند.

پس از کالیبره کردن مدل، مؤلفه‌های بیلان آب حوضه ارس ابتدا در دوره تاریخی و سپس دوره آینده محاسبه شد و تغییرات سالانه و ماهانه آن‌ها در دوره آینده برآورد گردید.

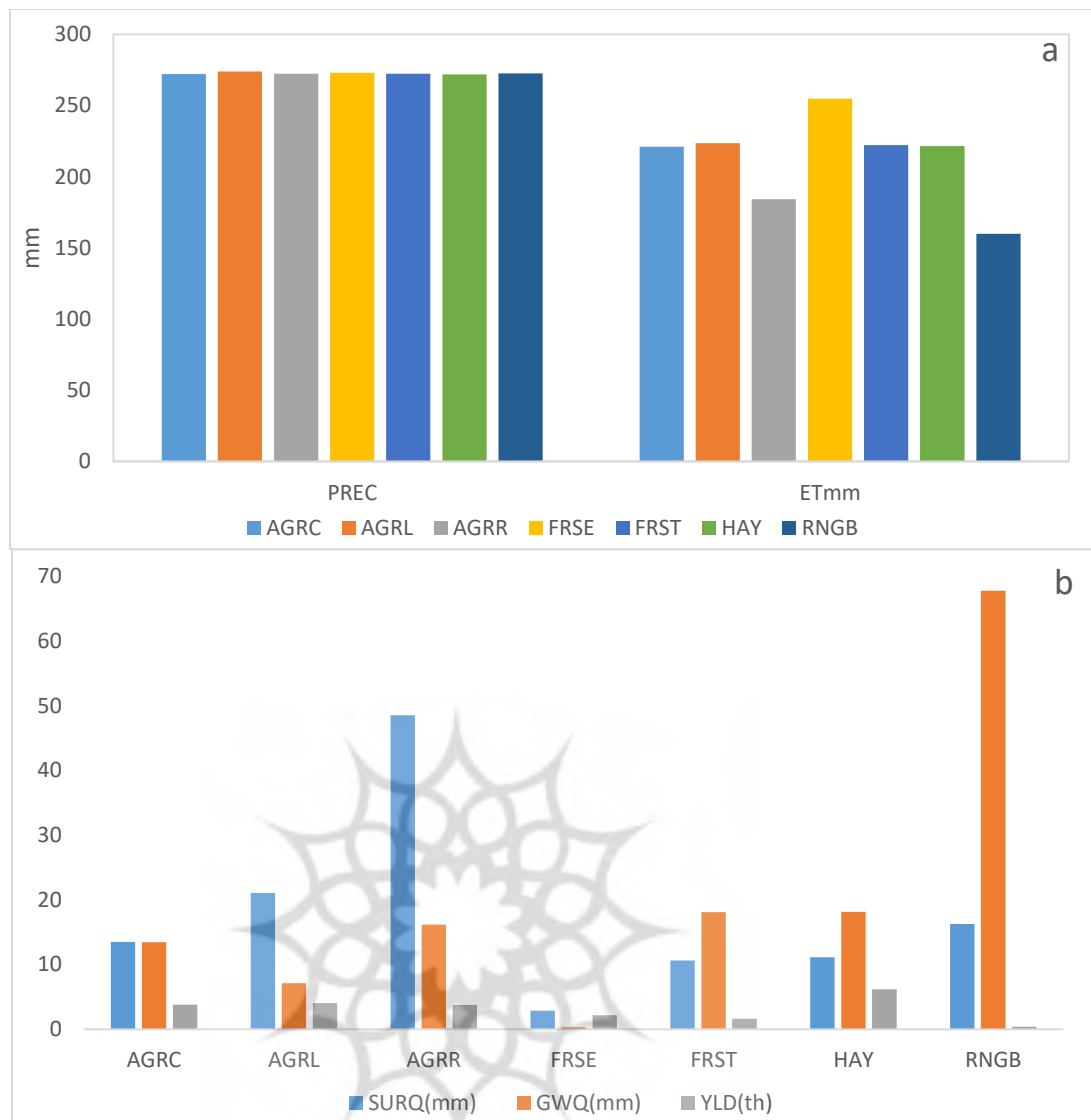


شکل (۶): هیدروگراف شبیه‌سازی شده (منحنی قرمز) و مشاهداتی (منحنی آبی=رواناب ایستگاه منتخب) حوضه ارس در دوره پایه توسط مدل SWAT
Figure (6): Simulated and observed hydrograph (selected station runoff) of Aras basin in the base period by SWAT model

مؤلفه‌های بیلان سالانه آب حوضه رودخانه ارس در دوره تاریخی مدل CNRM-CM6 وضعیت بیلان آب حوضه در مقیاس سالانه در دوره تاریخی مدل CNRM-CM6 بر حسب کاربری‌ها در شکل (۷) آورده شده است. شکل (۷-ا) نمودار بارش و تبخیر و تعرق سالانه در کاربری‌های حوضه ارس را نمایش می‌دهد که در کاربری‌ها میزان بارش بین ۲۷۱ تا ۲۷۴ میلی‌متر متغیر است و مقدار بیشینه به کاربری زراعی تعلق دارد. همچنین بیشینه ET حوضه به میزان سالانه ۲۵۴ میلی‌متر در کاربری جنگل همیشه‌سبز (حوالی قره‌داغ) و کمینه آن در مراتع خوب مشاهده می‌شود. نمودار دوم متوسط سالانه مؤلفه‌های رواناب سطحی (SURQ)، (GWQ) و آبدهی (YLD) حوضه را نشان می‌دهد. بیشترین میزان رواناب سطحی حوضه در مزارع ردیف‌کاری شده و بیشترین میزان آبدهی در کاربری Hay (مراتع و علفزار خشک) و بیشترین GWQ (جریان جانبی و زیرزمینی) در مراتع خوب با تاج پوشش متوسط محاسبه گردید.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱ - مجموع حجم آبی که در گام زمانی مشخص از HRU خارج و به کانال اصلی وارد می‌شود. مجموع: Over land Flow, Percolation, Lateral Flow و Deep Recharge

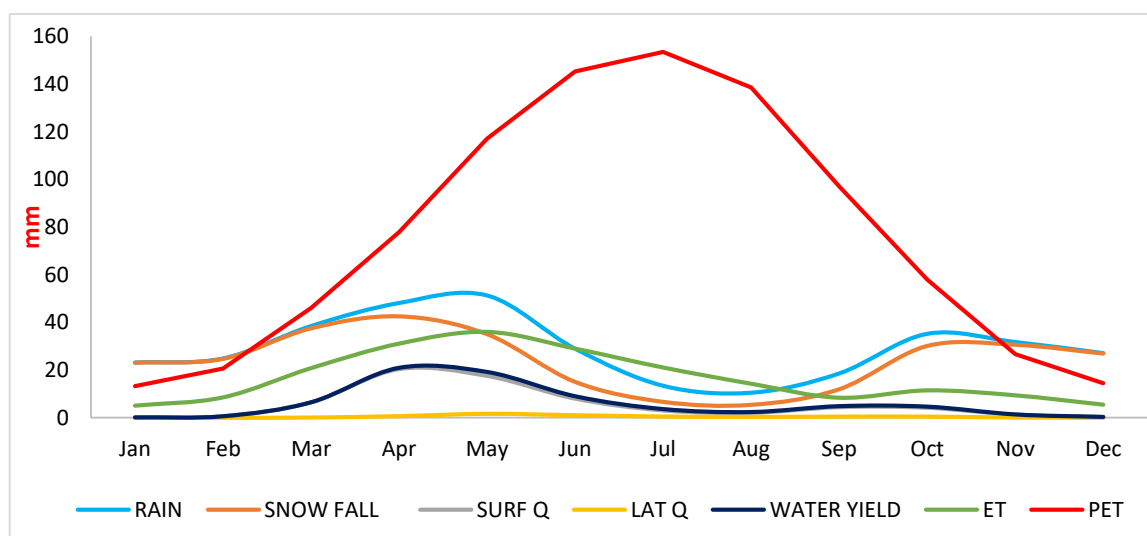


شکل (۷): میانگین سالانه مؤلفه‌های بیلان آب حوضه ارس در دوره تاریخی مدل CNRM-CM6

Figure (7): Annual average of water balance components of Aras basin in the historical period of CNRM-CM6 model

مؤلفه‌های بیلان ماهانه آب حوضه ارس در دوره آینده

نمودار متوسط ماهانه مؤلفه‌های بیلان آب حوضه ارس در دوره آینده (شکل ۸) نشان‌دهنده پیشی گرفتن میزان ET از بارش ماهانه در جولای تا اوت است که می‌تواند تبعات منفی بر روی تولیدات محصولات کشاورزی از قبیل سیب‌زمینی و نیز ذخایر سدها و افت تولید برق‌آبی داشته باشد. در کل در ماه‌های پراهمیت رشد میزان ET بیشتر است همه مؤلفه‌ها به جز ET، همانند دوره مشاهداتی و تاریخی دارای دو اوج هستند که منعکس‌کننده تقارن ورود موج بارش‌های بهار و پاییز است. همچنین بیشینه آبدهی و رواناب سطحی در آوریل قرار دارد که هم‌زمان با آغاز ذوب برف است. کمینه این متغیرها در اوت مشاهده می‌شوند. نمودار تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه حالت زنگوله‌ای دارد و به جز ماه‌های زمستان در سایر ماه‌ها بیشتر از بارش است که ماکزیمم مقدار آن (۱۵۴ میلی‌متر) در جولای قرار دارد.



شکل (۸): نمودار متوسط ماهانه مؤلفه‌های بیلان آب حوضه ارس در دوره آینده

Figure (8): Average monthly graph of water balance components of Aras basin in the future period

نسبت‌های مؤلفه‌های بیلان آب دوره آینده در مقایسه با دوره تاریخی مدل ارزیابی سهم نسبتهای هر یک از مؤلفه‌های بیلان آب حوضه رودخانه ارس از کل آن (جدول ۲) نشان می‌دهد که یک‌سوم بارش حوضه به واسطه فرآیند تبخیر و تعرق از دسترس خارج می‌شود و قابل استفاده نمی‌باشد که درصد قابل توجهی است و نیز نسبت نفوذ به بارش ناچیز است. همچنین حدود یک‌سوم از جریان کل را جریان پایه و دو سوم دیگر را رواناب سطحی تشکیل می‌دهد که ضمن نشان دادن مستعد بودن حوضه در برابر فرسایش، حاکی از پایین بودن جریان پایه و متکی بودن تأمین آب به رواناب سطحی حاصل از بارش و یا ورودی فرامرزی است که تبعات آن عدم ثبات در دسترسی به آب است.

جدول (۲): نسبت‌های مؤلفه‌های بیلان آب دوره آینده (منبع: نگارندگان)

Table (2): proportion of water balance components of the future period

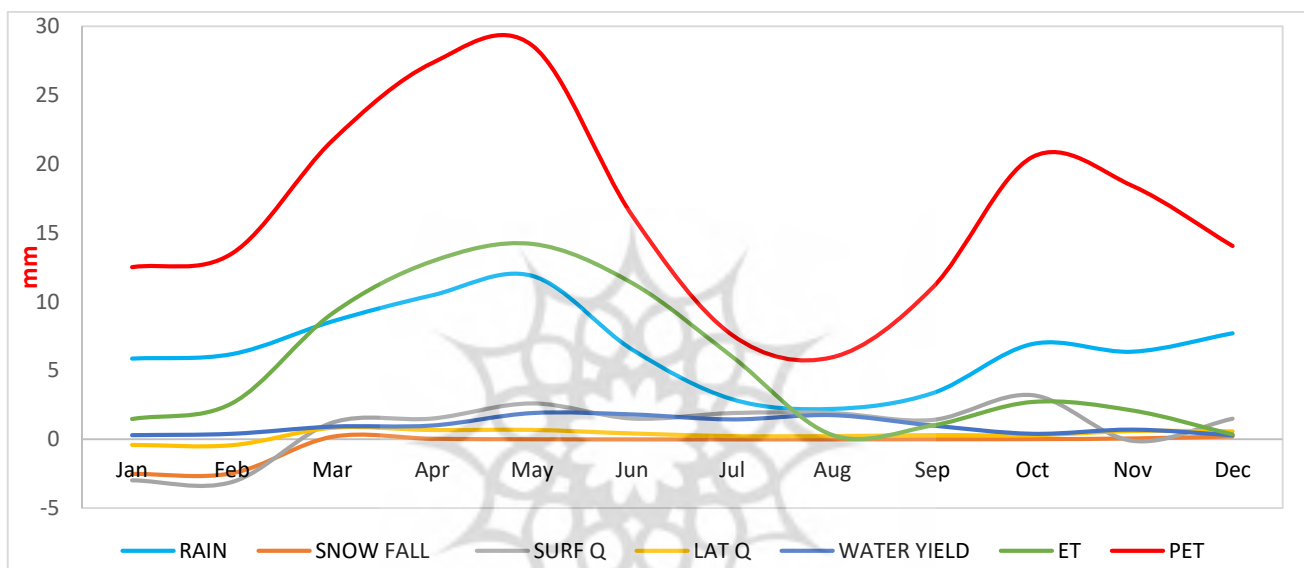
Evapotranspiration Precipitation	Deep Recharge Precipitation	Precolation Precipitation	Steanflow Precipitation	Surface Runoff Total Flow	Base Flow Total Flow	مؤلفه
۰/۷۲	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۲	۰/۶۹	۰/۳۱	نسبت

میزان تغییرات کلی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه در آینده

نتایج محاسبات انجام شده بر روی داده‌های مدل CNRM-CM6 تحت سناریوی SSP5-8.5 برای حوضه ارس نشان داد که مقادیر همه مؤلفه‌های بیلان آب حوضه افزایش خواهد داشت که میزان این تغییرات بدین نحو خواهد بود هر چند بارش سالانه حوضه در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی مدل ۷۹ میلی‌متر افزایش خواهد یافت ولی بخش عمده‌ای از این بارش (۵۷ میلی‌متر) صرف تبخیر و تعرق از سطوح و گیاهان و از دسترس خواهد شد. همچنین به میزان بیش از ۲/۶ برابر بارش احتمالاً تبخیر و تعرق پتانسیل افزایش خواهد یافت. سهم سایر مؤلفه‌ها مشابه مقادیر دوره تاریخی بوده و البته مقدار همه آن‌ها نسبت به دوره تاریخی افزایش یافته است. میزان نفوذ به آبخوان کم‌عمق حدود ۹/۲ میلی‌متر بیشتر از دوره تاریخی خواهد بود که دو سوم آن (۶/۸ میلی‌متر) مجدداً از طریق مؤینگی به منطقه ریشه برمی‌گردد و ۲/۲ میلی‌متر به صورت جریان برگشتی با همراهی جریان جانبی (۲/۵ میلی‌متر) منابع آبی حوضه را تغذیه می‌کند. سهم رواناب سطحی نیز کم بوده و سالانه ۱۰/۴ میلی‌متر به تغذیه منابع آبی سطح حوضه کمک می‌کند. همانند دوره مشاهداتی و تاریخی در دوره آینده نیز سهم نفوذ به آبخوان عمیق بسیار اندک (۰/۴۶ میلی‌متر) است که نگران‌کننده است. چند نکته از این یافته‌ها استنباط می‌شود از جمله اینکه میزان تغذیه آب زیرزمینی خیلی کم است و جریان جانبی بزرگ‌تر از جریان زیرزمینی است.

میزان تغییرات ماهانه مؤلفه‌های بیلان آب حوضه در آینده

مقایسه مقادیر ماهانه بیلان آب حوضه رودخانه ارس در دوره آینده با دوره تاریخی مدل CNRM-CM6 (شکل ۹) نشان داد میزان مؤلفه‌ها در آینده افزایش خواهد یافت که در این میان سهم بارش بیش از سایرین است و بیشینه آن به می (۱۲ میلی‌متر) و سپس آوریل (۱۰/۵ میلی‌متر) تعلق دارد. بارش در تابستان نیز افزایش خواهد یافت. از بین مؤلفه‌ها ET در مرتبه دوم قرار دارد که سه‌چهارم بارش را به خود اختصاص داده است و عملاً سهم سایر مؤلفه‌ها از افزایش بارش آینده بسیار کمتر است و عمده بارش از دسترس خارج خواهد شد. جریان جانبی و بارش برف در ماه‌های سرد نسبت به دوره تاریخی کاهش پیش‌بینی شد که ضمن دلالت داشتن بر کاهش تغذیه منابع سطحی به تغییر فرم بارش از جامد به مایع نیز اشاره دارد. همچنین بیشینه آبدهی، رواناب سطحی و جریان جانبی در می قرار دارد. مشابه الگوی دوره تاریخی، در این دوره نیز دو پیک بهاره و پاییزه در منحنی‌های توزیع زمانی مؤلفه‌های بیلان آب حوضه رودخانه ارس دیده می‌شود که می‌تواند بر تداوم استقرار الگوهای فعلی بارش و اندکی قوی‌تر شدن آن‌ها در آینده دلالت داشته باشد.



شکل (۹): تغییرات ماهانه مؤلفه‌های بیلان آب در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی

Figure (9): Monthly changes of water balance components in the future period compared to the historical period

نتیجه‌گیری

مدل SWAT بر اساس داده‌های ثبت‌شده دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری منتخب حوضه ارس (ایستگاه بدوی) با ۷۰ درصد از داده (۱۹۸۷-۲۰۰۶) واسنجی و با ۳۰ درصد بقیه (۲۰۰۷-۲۰۱۴) اعتبارسنجی شد. با اجرای مدل SWAT CUP در ۳۵۰ دور شبیه‌سازی، ترتیب ۱۴ پارامتر حساس مدل مشخص گردید که پارامترهای مربوط به متوسط ماهانه حداکثر دما، حداکثر نگهداشت آب توسط تاج پوشش گیاهان، دمای مبنای آغاز ذوب برف، شاخص سطح برگ که در آن هیچ تبخیری رخ نمی‌دهد و هدایت هیدرولیکی خاک اشباع از فایل‌های bsn, hru, wgn و sol از جمله مؤثرترین پارامترها در شبیه‌سازی دبی جریان ایستگاه هیدرومتری منتخب حوضه ارس شناسایی شدند. همچنین کارایی و دقت مدل در دوره واسنجی (۱۹۸۷-۲۰۰۶) بر اساس معیارهای ارزیابی R^2 , NS, R-Factor و P-Factor به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۷۱، ۰/۷۷ و ۰/۲۷ محاسبه شد. لذا ارزیابی کارایی مدل SWAT با معیارهای مختلف نشان داد مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مطابقت و همخوانی بالایی دارد که همسو با نتایج پژوهش ویلی و هریس^۱ (۲۰۰۶)؛ الانسی^۲ و همکاران (۲۰۰۹)؛ کالسیک^۳ و همکاران (۲۰۱۵)؛ عارفی اصل و همکاران (۱۳۹۲) و کاویان و همکاران (۱۳۹۶) است. مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده با هیدروگراف مشاهداتی حوضه حاکی از تمرکز بیشینه خطای مدل در دبی‌های اوج (ماه می) است که پیک ذوب برف

^۱ Wilby & Haris

^۳ Kalcic

^۲ Alansi

اتفاق می‌افتد و نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی ذوب برف و رواناب سطحی حاصل از ذوب برف (دولت‌آبادی و زمردیان، ۱۳۹۲) ضعیف عمل می‌کند.

مدل‌سازی وضعیت هیدرولوژیکی حوضه ارس با ریزمقیاس‌نمایی مدل اقلیمی CNRM-CM6 نشان داد ET حوضه سهم زیادی از بارش ۲۷۲ میلی‌متری دوره تاریخی و ۳۵۱ میلی‌متری دوره آینده حوضه را به خود اختصاص داده و میزان نفوذ و جریان جانبی که برای تغذیه منابع زیرزمینی و سطحی ضروری هستند، بسیار اندک است. لذا بخش زیادی از ورودی حوضه از دسترس خارج می‌شود. از طرفی کمینه ET حوضه در کاربری مراتع خوب با تاج پوشش متوسط محاسبه شد که اهمیت این کاربری در کاهش ET را نشان می‌دهد و لازم است در برنامه‌ریزی‌ها به حفظ و تقویت و در واقع افزایش کمی و کیفی این نوع کاربری توجه ویژه‌ای مبذول گردد تا ضمن کاستن از میزان ET به تغذیه منابع زیرزمینی حوضه کمک شود و ذخایر آب زیرزمینی تقویت گردد.

ارزیابی نمودار توزیع ماهانه بیلان آب حوضه در دوره آینده نیز حاکی از پیشی گرفتن میزان ET از میزان بارش در ماه‌های پراهمیت از نظر رشد گیاهان و محصولات است و این امر می‌تواند تأثیر منفی بر کیفیت رشد گیاهان و بازدهی محصولات داشته باشد و هم تنش آبی را افزایش دهد. از طرفی هم بالا بودن میزان ET به کاهش تراز آب پشت سدها منجر خواهد شد که تبعات چندجانبه‌ای بر تولید برق آبی، محصولات کشاورزی و اقتصاد در پی خواهد داشت. لذا با توجه به در نظر گرفتن این یافته که بیشینه آبدهی حوضه در می‌خواهد بود، لازم است پیش از تند شدن شیب افزایش ET، تصمیمات و اقدامات مقتضی جهت ذخیره آب و یا رهاسازی رواناب سطحی در نواحی دارای خاک مناسب نفوذ عمقی آب و دور از آلودگی‌ها به منظور هدایت آب به سفره‌های زیرزمینی اتخاذ گردد. بالا بودن تلفات آبی ضمن کاهش رطوبت خاک و پوشش گیاهی، به افزایش تنش آبی و انفصال بیشتر ذرات خاک منجر شده و احتمال وقوع پدیده گرد و غبار را افزایش خواهد داد. پیشنهاد می‌شود با اجرای طرح‌های ذخیره‌سازی رواناب سطحی در ماه‌های دارای رواناب و زمان اوج ذوب برف، با توجه به کم بودن میزان نفوذ، بخشی از تلفات آبی را جبران نموده و به چرخه مصرف بازگرداند. علاوه بر این در صورت وقوع سناریوی مورد مطالعه اصلاح شبکه‌های آبیاری و کانال‌های انتقال آب به منظور کاهش تبخیر و تعرق ضروری خواهد بود و بالا بودن ET فصل تابستان اهمیت توجه به سیستم آبیاری تحت فشار را در کشت‌های تابستانه مثل پنبه، ذرت، بادام زمینی و محصولات غده‌ای نظیر سیب‌زمینی که وزن‌گیری آن‌ها از اواسط تابستان آغاز می‌شود، دوچندان می‌کند. از طرفی احتمال وقوع بارش در تابستان در دوره آینده بیشتر از دوره تاریخی مدل پیش‌بینی شد که می‌تواند زمینه را برای شیوع و گسترش آفات مربوط به رطوبت مثل انواع زنگ‌ها تسهیل کند و ضمن کاهش ثمردهی باکیفیت غلات، کمیت آن‌ها را نیز کاهش دهد. همچنین یافته‌ها نشان داد اگرچه در دوره آینده بارش سالانه به میزان ۷۹ میلی‌متر نسبت به دوره تاریخی بیشتر خواهد بود ولی بخش عمده‌ای از آن صرف تبخیر و تعرق خواهد شد فلذا سهم نفوذ و آبخوان عمیق از این افزایش، ناچیز و نگران‌کننده خواهد بود. این نکات نشان می‌دهند صرفاً کاهش بودن بارش آینده مسئله نگران‌کننده نبوده و تغییر اقلیم با اثر کاهشی محسوب نمی‌شود بلکه مهم‌تر از کاهشی یا افزایشی بودن بارش و میزان آن در دوره آینده، نحوه توزیع بارش در طول سال و تناسب آن با نیازهای بخش‌های مختلف و نیز نیاز آبی گیاهان و محصولات استراتژیک و مؤثر بودن بارش تعیین‌کننده می‌باشند.

این مطالعه نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب در حوضه ارس نیازمند توجه ویژه به کاهش تبخیر و تعرق، افزایش نفوذ آب به سفره‌های زیرزمینی و بهبود سیستم‌های آبیاری است. همچنین، تغییرات اقلیمی و نحوه توزیع بارش در آینده چالش‌های جدیدی ایجاد خواهد کرد که نیازمند برنامه‌ریزی و اقدامات پیشگیرانه است.

References

Abbaspour, K. C. (2007). User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat. Sci. and Technol. Dübendorf, Switzerland.

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Klove, B. (2015). A continentalscale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- 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. <https://doi.org/10.5194/hessd-6-7581-2009>
- Ansari, S., Massah Bavani, A., & Roozbahani, A., (2016). Effects of Climate Change on Groundwater Recharge (Case Study: Sefid Dasht Plain). *Water and Soil*, 30(2), 416-431. (In Persion). <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.39574>
- Arefi Asl, A., Najafinejad, A., Kiani, F., & Salmanmahiny, A., (2013). Simulating discharge and sediment production using SWAT in Chehelchai Watershed of Golestan Province. *Journal of Range and Watershed Managment*, 66(3), 433-446. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2013.36518>
- Azari, M., Moradi, H. R., Saghaian, B., & Faramarzi, M., (2013). Assessment of hydrological effects of climate change in Gorganroud river basin. *Water and Soil*, 27(3), 537-547. (In Persion). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26051>
- Bussi, G., Francés, F., Horel, E., López-Tarazón, J. A., & Batalla, R. J. (2014). Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment, *J. Soils Sediments*, 14(12), 1921–1937. <http://dx.doi.org/10.1007/s11368-014-0956-7>
- Chilkoti, V., Bolisetti, T., & Balachandar, R., (2017). Climate change impact assessment on hydropower generation using multi-model climate ensemble. *Renewable Energy*, 109, 510–517. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.041>
- Chung, S. O., & Nkomozepi, T., (2012). Uncertainty of paddy irrigation requirement estimated from climate change projections in the Geumho river basin, Korea. *Paddy and Water Environment; Dordrecht*, 10(3), 175-185. DOI:10.1007/s10333-011-0305-z.
- Cochand, F., Brunner, P., Hunkeler, D., Rössler, O., & Holzkämper, D., (2021). Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater resources. *Science of the Total Environment*, 798: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148759>
- Dolatabadi, S., & Zamardian, M. A., (2012). Hydrological simulation of Firoozabad basin by SWAT. *Irrigation and Water Engineering*, 4(2), 38-48. (In Persion).
- Fahiminezhad, E., Baaghide, M. O., Babaeian, I., & Entezari, A., (2019). Simulation of the effect of global warming on the mean and extreme events of some hydrochemical variables in Shandiz catchment basin Case study: The Case of the general circulation model CanESM2. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6(3), 27-48. (In Persion).
- Fallah Kalaki, M., Shokri Kuchak, V., & Ramezani Etedali, H., (2021). Simulating the effects of climate change on runoff using the CMIP5 and CMIP6 climate models by SWAT hydrological model (case study: Tashk-Bakhtegan basin). *Iran-Water Resources Research*, 17(3), 345-359. (In Persion).
- Gebremeskel, G., & Kebedeb, A., (2018). Estimating the effect of climate change on water resources: Integrated use of climate and hydrological models in the Werii watershed of the Tekeze river basin, Northern Ethiopia. *Agriculture and Natural Resources*, 52(2), 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.06.010>
- Ghazavi, R., Nadimi, M., Omidvar, E., & Imani, R., (2018). The study of the effects of the future climate change on discharge variation of the Herochay river using SWAT and LARS-WG. *Hydrogeomorphology*, 5(15), 54-79. (In Persion).

- Gholami, A., Habibnejad Roshan, M., Shahedi, K., Vafakhah, M., & Solaymani, K., (2018). Future impacts of climate change on actual evapotranspiration and soil water in the Talar watershed in Mazandran province. *Physical Geography Research*, 50(3), 511-529. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.202185.1006831>
- Gudarzi, M., & Fatehifar, A., (2022). Evaluation of the effect of climate change on meteorological variables and maximum rainfall under new scenarios of RCP release in Azarshahr Chai watershed, *Human and Environment Quarterly*, 16, 111-127. (In Persian).
- Hafezparast, M., & Sharifazari, S., (2016). Impact of climate change on the Inflow of the Aras, Ghorichai and Sattarkhan Dams. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, 2 (8), 782-797.
- Hashemi Ana, S. K., (2023). Evaluating the impact of climate change on the planning of optimal allocation of water resources in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(35), 157-172. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/jneh.2022.41593.1876>
- Houshmand Kouchi, D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaei Nejad, S. H., & khalili, D., (2019). Simulation of climate change impacts using fifth assessment report models under RCP scenarios on water resources in the upper Basin of Salman Farsi Dam. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(2), 243-258. (In Persian)
- IPCC. (2007). Summary for policymakers in climate change, the physical science basis, Contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, *Cambridge*, 1-18.
- Jones, P. D., Mann, M. E. 2004. Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics*, 42(2):RG2002 <http://dx.doi.org/10.1029/2003RG000143>
- 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(3), 69 - 80. <http://dx.doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.951>
- Kanwar, P., & Singh, K. P., (2022). chapter 4: Impact of climate change. *Current Directions in Water Scarcity Research*, 5, 45-57. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85378-1.00004-0>
- Kavian, A., Namdar, M., Golshan, M., & Bahri, M., (2017). Hydrological modeling of climate changes impact on flow discharge in Haraz river basin. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 6(12), 89-104. (In Persian). doi:10.22111/jneh.2017.3119
- Khosravi, M., Climate change and its effect on water resources in the Middle East, the fourth international congress of geographers of the Islamic world, *Zahedan*, 13-15 April 2019. (In Persian).
- Lane, M. E., Kirshen, P. H., & Vogel, R. M., (1999). Indicators of impact of global climate change on U.S water resources. ASCE, *journal of Water Resources Planning and Management.*, 125(4), 194-204. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1999\)125:4\(194\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(194))
- Li, F., Xu, Z., Liu, W., & Zhang, Y., (2014). The impact of climate change on runoff in the Yarlung Tsangpo River basin in the Tibetan Plateau, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28, 517-526. <http://dx.doi.org/10.1007/s00477-013-0769-z>
- Lin, B., Chen, X., Yao, H., Chen, Y., Liu, M., Gao, L., & James, A., (2015). Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model, *Ecological Indicators*, 58, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.031>
- Mojiri, H., & Halabian, A., (2019). Evaluation of the Effects of Temporal variables of Temperature, Precipitation and Water Harvesting on Groundwater Resources in Mehrgerd basin of Semirom. *Jwmr*, 10(20), 238-249. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.10.20.238>

- Motamed Waziri, B., Kiadliri, H., Ishaghi, A., & Eskandari, A., (2021). Evaluation of the effects of climate change on groundwater recharge in the Karaj watershed, *Journal of Renewable Resources Research*, 1(35), 55-72. (In Persion).
- Mourot, F. M., Westerhoff, R. S., White, P. A., & Gameron, S. G., (2023). Climate change and New Zealand's groundwater resources: A methodology to support adaptation. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 40, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101053>
- Naderi, M. (2020). The impact of climate change on dorudzan dam inflow and reservoir volume, northern Fars province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29(115), 259-268. (In Persion). <https://doi.org/10.22071/gsj.2019.146503.1527>
- Naserabadi, F., Qadawi, R., & Zakarinia, M., (2019). Hydrological modeling of the Talwar river watershed under the influence of climate change, *Iran Water Research*, 14(2), 37-49. (In Persion).
- Neitsch, S., Arnold, L., Kiniry, G., & Williams, J., (2002). *Soil and water assessment tool, user's manual*, Version 2000.
- Neitsch, S.L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R., (2005). *Soil and water assessment tool theoretical documentation*: Version 2005.
- Nouri, Z., Talebi, A., & Ebrahimi, B., (2020). Analysis of effect of the climate parameters change on runoff and evapotranspiration of Mehrgerd watershed. *Water and Soil*, 34(1), 225-239. (In Persion). <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i1.82329>
- Parajuli, P. B., Jayakody, P., Sassenrath, G. F., & Ouyang, Y., (2016). Assessing the impacts of climate change and tillage practices on stream flow, crop and sediment yields from the Mississippi River Basin. *Agricultural Water Management*, 168, 112-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.005>
- Parandeh Khozani, A., (2017). Investigating the trend of spatial and temporal changes in the snow cover of the Zagros mountainous region and its relationship with atmospheric circulation patterns and climate changes, doctoral dissertation in the field of water and meteorology, *climate change trend*, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University. (In Persion).
- Parhizkari, A., Mahmoodi, A., & Shokat Fadaee, M., (2017). Economic analysis of the effects of climate change on available water resources and agricultural products in the watersheds of Shahrood. *Agricultural Economics Research*, 9(33), 23-50. (In Persion).
- Pourmohammadi, S., Dastorani, M., & Massah Bovani, A., (2017). Effects of climate change on river runoff and provide solutions to adapt to its effects (Case Study: Basin Tuyserkan, Hamedan). *Jwmseir*, 11 (37), 1-12. (In Persion).
- Rahwareh, M., Motamed Waziri, B., Moghadamnia, A., & Maridi, A., (2019). Forecasting changes in the runoff of Zarinerood watershed under climate change conditions through hydrological simulation, *Renewable Resources Research*, 2, 129-143. (In Persion).
- Rezaei Moghaddam, M. H., Mokhtari, D., & skandarialni, M. (2024). Comparative evaluation of a semi-distributed hydrological model with an integrated model to simulate the runoff of Gomanab Chai basin. *Hydrogeomorphology*, 11(40), 39-22. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.59474.1715>
- Rezayi Zaman, M., Morid, S., & Delawar, M., (2013). Evaluation of the effects of climate change on the hydroclimatological variables of Siminerud Basin, *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 27(6), 1247-1259. (In Persion).
- Rouholahnejad, E., Abbaspour, K. C., Vejdani, M., Srinivasan, R., Schulin, R., & Lehmann, A., (2012). Parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environ. Modell. Software* 31, 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.12.001>

Sanikhani, H., Theologian, Y., Poriusov, S., Zamanjad Goidel, S., & Solati, B., (2013). Study of the effects of climate change on watershed runoff (case study: Ajichai watershed in East Azerbaijan Province). *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 27(6), 1225-1234. (In Persion).

Sari sarraf, B., & Jalali Ansaroodi, T. (2019). The Investigation of the Impact of Climate Change on Water Balance Caused by Precipitation in Tasuj Aquifer for the Period of 2017-2030. *Hydrogeomorphology*, 6(19), 163-185. (In Persian).

Shakiba, A., & Cheshmi, A. (2011). The impact of climate change on groundwater resources using neural network NARX in Ramhormoz. *Researches in Earth Sciences*, 2(4), 46-57. (In Persion).

Shi, H. Y., Wang, G. Q., (2015). Impacts of climate change and hydraulic structures on runoff and sediment discharge in the middle Yellow River, *Hydrological Processes*, 29(14), 3236–3247. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/481713>

Wang, J., Hu, L., Li, D., & Ren, M., (2020). Potential impacts of projected climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Wabash River Basin. *Advances in Meteorology*, 2020: 9698423. <https://doi.org/10.1155/2020/9698423>

Wang, W., Sun, Z., Wu, Q., Fang, J., & Jia, W., (2023). Spatio-temporal variability of terrestrial water storage in the Yangtze River Basin: Response to climate changes. *Geodesy and Geodynamics*, 14, 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.11.006>

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*. 42, W02419, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004065>

Yang, S., Zhao, B., Yang, D., Wang, T., Yang Y., Ma, T., & Santisirisomboon, J., (2023). Future changes in water resources, floods and droughts under the joint impact of climate and land-use changes in the Chao Phraya basin, Thailand. *Journal of Hydrology*. 620, Part A. 129454, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129454>

Zahrai, B., Naseri, M., & Rozbahani, A., Modeling the effects of climate change on the water resources of Sistan and Baluchistan province, *4th regional climate change conference*, Tehran, December 29 to January 1, 2019. (In Persion).

Zhang, X., Tian, Y., Dong, N., Wu, H., & Li, S., (2023). The projected futures of water resources vulnerability under climate and socioeconomic change in the Yangtze River Basin, China. *Ecological Indicators*, 147(12):109933, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109933>