

**Web site:**

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

**Email:**

[iauwsrcj@srbiau.ac.ir](mailto:iauwsrcj@srbiau.ac.ir)  
[iauwsrcj@gmail.com](mailto:iauwsrcj@gmail.com)

**Vol. 14**  
**No. 3 (55)**

**Received:**  
2023-12-08

**Accepted:**  
2024-11-02

**Pages: 77-93**

## Simulation of Runoff at the Watershed Scale Under Climate Change Scenarios Based on SWAT Model

Mohammad Gharib Tavosi<sup>1</sup>, Mohsen Najarchi<sup>2\*</sup>, Mohammad Reza Jalali<sup>3</sup>,  
Hosein Mazaheri<sup>4</sup> and Saeid Shabanlou<sup>5</sup>

- 1) Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.
  - 2) Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.
  - 3) Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
  - 3) Department of Chemical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.
  - 4) Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.
- \*Corresponding author email: [m-najarchi@iau-arak.ac.ir](mailto:m-najarchi@iau-arak.ac.ir)

**Abstract:**

**Background and Aim:** Evaluation of the climate change phenomenon and its probable consequences on basin hydrological processes will effectively help managers and planners of water resources in upcoming periods. The impact of climate change is evaluated through the simulation of hydrological processes via the runoff-precipitation physical model. Hydrological models provide a framework for evaluating the relationship between meteorology and water resources. The objective of this study is to simulate the runoff production in climate change condition based on climate scenarios and the SWAT model.

**Method:** Climate change and its consequences are one of the basic problems in water resources management, and it is necessary to estimate its effects in the future period. The area studied in this research is the Po-e-Shah catchment area with an area of 721 square kilometers, which is one of the sub-basins of the Alvand basin in Kermanshah province. This basin has many floods every year, which sometimes causes damages and flooding of agricultural lands. The Dirah River located in this basin is the source of water supply for part of the agricultural lands nearby and downstream of the river. Therefore, investigating the effect of climate change on the yield of this river is very important. In this research, AOGCM general circulation models are used to estimate monthly temperature and precipitation in the future period. The RMSE, MAE and NS indices are used to validate and evaluate the accuracy of estimation of general circulation models and data fitting. In this research, the runoff at the Pol-e-Shah hydrometry station is investigated first. Using SWAT CUP software, based on hydrometric station statistics and using SUFI2 optimization algorithm, parameters affecting flow rate are recalibrated for the period 1994 to 2011 and validated for the period 2012-2015. Then, in order to investigate the statistical indices of precipitation and temperature under the influence of climate change, using the LARS-WG6 software and using HADGEM2 and MIROC5 climate models under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios, the micro-scaling and extraction of precipitation data and temperatures are performed for the statistical period from 2020 to 2080. Finally, to simulate the impact of climate change on runoff, the SWAT software is implemented under each of the climate scenarios in different statistical periods. Then, the results of monthly runoff simulation under climate scenarios are compared with recorded observational data.

**Results:** The results of the SWAT model efficiency evaluation indicate the proper performance of this model in the validation and verification period, so that the values of correlation coefficient and Nash-Sutcliffe coefficient are obtained for the calibration stage 0.75 and 0.79 respectively and for the validation stage 0.71 and 0.61 respectively. The results of the SWAT model implementation show that in all climate scenarios, the pattern of monthly runoff production is consistent with the pattern of precipitation changes in different months in these scenarios. Therefore, in all future scenarios, the distribution of monthly runoff in different months is messed up compared to the base scenario so that in some months there is a decrease in runoff and in some months an increase in runoff. This shows the need to use dams and flow control structures to store water in high water months such as winter and spring and use it in low water months. The results indicate that the changes in the volume of annual production runoff under the RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios for the periods of 2045-2018 and 2072-2046 compared to the period of 2018-1991 vary between 60 and 87 million cubic meters on average. The amount of annual runoff volume changes in the period 2045-2018 is insignificant in most scenarios. In the period of 2072-2046, the volume of annual runoff is decreased between 3 and 10 percent in most scenarios.

**Conclusion:** The results showed that the decrease in precipitation and increase in temperature and thereby increase in evaporation cause changes in the current climate cycle, which leads to a decrease in runoff. Therefore, it is necessary to adapt and reduce the negative consequences of climate change on the water resources of the region to avoid from adverse effects of climate change on the water resources of the region by using the correct management of water resources and considering the needs of agriculture, drinking, industry and the environment in the coming years to lead to the best conservation of these resources. The results showed that in most of the climate scenarios, the precipitation displacement has happened. Therefore, it is necessary to change the cultivation pattern or change the date of cultivation of different crops according to the changes in precipitation and temperature changes in different months.

**Keywords:** Pol-e-Shah Basin, Discharge Simulation, Climate Change, LARS-WG6



## شبیه‌سازی رواناب در مقیاس حوضه آبریز تحت سناریوهای تغییر اقلیم بر اساس مدل SWAT

محمد غریب تاوسی<sup>۱</sup>، محسن نجارچی<sup>۲\*</sup>، محمد رضا جلالی<sup>۳</sup>، حسین مظاهری<sup>۴</sup> و سعید شعبانلو<sup>۵</sup>

۱) دانشجوی دکتری عمران، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.  
 ۲) گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.  
 ۳) گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.  
 ۴) گروه مهندسی شیمی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.  
 ۵) گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.  
 \* ایمیل نویسنده مسئول: m-najarchi@iau-arak.ac.ir

### چکیده:

**زمینه و هدف:** ارزیابی پدیده تغییر اقلیم و پیامدهای احتمالی آن بر فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه کمک فراوانی به مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب در دوره‌های آتی خواهد کرد. اثر تغییر اقلیم به‌وسیله شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی با مدل فیزیکی بارش رواناب مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌های هیدرولوژی چارچوبی را برای بررسی رابطه بین هواشناسی و منابع آب فراهم می‌کنند. هدف از این پژوهش شبیه‌سازی تولید رواناب در شرایط تغییر اقلیم بر اساس سناریوهای اقلیمی و مدل SWAT می‌باشد.

**روش پژوهش:** تغییر اقلیم و پیامدهای ناشی از آن یکی از مشکلات اساسی در مدیریت منابع آب است و برآورد آثار و تبعات آن در دوره آتی ضروری است. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، حوضه آبریز پل شاه با مساحت ۷۲۱ کیلومتر مربع است که یکی از زیرحوضه‌های حوضه الوند در استان کرمانشاه محسوب می‌گردد. این حوضه سالانه دارای سیلاب‌های متعددی بوده که گاهی باعث خسارات و آب‌گرفتگی زمین‌های کشاورزی می‌گردد. رودخانه دیره واقع در این حوضه منبع تامین آب بخشی از اراضی کشاورزی مجاور و پایین‌دست رودخانه است. لذا بررسی اثر تغییر اقلیم بر آورد این رودخانه از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش برای برآورد ماهیانه دما و بارش در دوره آتی از مدل‌های گردش عمومی AOGCM استفاده شد. جهت اعتبارسنجی و ارزیابی دقت برآورد مدل‌های گردش عمومی و برازش داده‌ها از شاخص‌های MAE، RMSE و NS بهره گرفته شد. در این پژوهش ابتدا به بررسی رواناب در ایستگاه هیدرومتری پل شاه پرداخته شد. با استفاده از نرم افزار SWAT CUP بر اساس آمار ایستگاه هیدرومتری و بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی SUFI2 پارامترهای موثر بر دبی جریان برای دوره ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۱ و واسنجی و برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۱۲ صحت‌سنجی شدند. سپس در جهت بررسی شاخص‌های آماری بارش و دما تحت تاثیر تغییر اقلیم با بهره‌گیری از نرم افزار LARS-WG6 و استفاده از مدل‌های اقلیمی HADGEM2 و MIROC5 تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 ریزمقیاس نمایی و استخراج داده‌های بارش و دما برای طول آماری ۲۰۲۰ تا ۲۰۸۰ انجام شد. در نهایت برای شبیه‌سازی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب، نرم افزار SWAT تحت هریک از سناریوهای اقلیمی در دوره‌های آماری مختلف اجرا گردید. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب ماهیانه تحت سناریوهای اقلیمی با داده‌های مشاهداتی ثبت شده مقایسه گردید.

**یافته‌ها:** نتایج ارزیابی کارایی مدل SWAT حاکی از عملکرد مناسب این مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی بود. طوری که مقادیر ضریب همبستگی و ضریب ناش-ساتکلیف برای مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۷۹ و برای مرحله صحت‌سنجی ۰/۷۱ و ۰/۶۱ بدست آمد. نتایج اجرای مدل SWAT نشان داد در تمامی سناریوهای اقلیمی، الگوی تولید رواناب ماهیانه با الگوی تغییرات بارندگی در ماه‌های مختلف در این سناریوها مطابقت دارد. لذا در تمامی سناریوهای آتی، توزیع رواناب ماهیانه در ماه‌های مختلف نسبت به سناریوی پایه بهم ریخته است. طوری که در برخی از ماه‌ها کاهش رواناب و در برخی ماه‌ها افزایش رواناب مشاهده شد. این امر لزوم استفاده از سد و سازه‌های کنترل جریان برای ذخیره آب در ماه‌های پرآب مانند زمستان و بهار و استفاده از آن در ماه‌های کم آب را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که تغییرات حجم رواناب تولیدی سالیانه تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره‌های ۲۰۱۸-۲۰۴۵ و ۲۰۴۶-۲۰۷۲ نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۸ به‌طور میانگین بین ۶۰ تا ۸۷ میلیون متر مکعب متغیر است. میزان تغییرات حجم رواناب سالیانه در دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ در بیشتر سناریوها ناچیز است. در دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ حجم رواناب سالیانه در اکثر سناریوها بین ۳ تا ۱۰ درصد کاهش یافته است.

**نتایج:** نتایج نشان داد کاهش بارش و افزایش دما و به موجب آن افزایش تبخیر، باعث تغییراتی در چرخه آب و هوایی موجود می‌گردد که کاهش رواناب را به دنبال دارد. لذا لازم است برای سازگاری و کاهش تبعات منفی ناشی از تغییر اقلیم بر منابع آب منطقه، با بکارگیری مدیریت صحیح منابع آب و در نظر گرفتن نیاز کشاورزی، مصارف شرب، صنعت و زیست‌محیطی در سال‌های آتی، از آثار سوء تغییر اقلیم بر منابع آب منطقه کاست، تا به حفظ هر چه بهتر این منابع منجر گردد. نتایج نشان داد در اکثر سناریوهای اقلیمی جابجایی بارندگی اتفاق افتاده است. لذا باید متناسب با تغییرات میزان بارش و تغییرات دما در ماه‌های مختلف نسبت به تغییر الگوی کشت یا تغییر تاریخ کشت محصولات مختلف اقدام نمود.

**کلیدواژه‌ها:** حوضه پل شاه، شبیه‌سازی دبی، تغییر اقلیم، LARS-WG6

## مقدمه

رشد جمعیت و افزایش سریع فعالیت‌های انسانی از جمله رشد شهرنشینی، رشد صنایع و دیگر فعالیت‌های زراعی و اقتصادی به‌خصوص در کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه، منجر به کاهش منابع آب شده است. این امر موجب ایجاد خسارت قابل توجهی به محیط فیزیکی، از جمله تخریب و تخلیه منابع طبیعی و استفاده ناپایدار از منابع آب می‌گردد. همچنین تاثیر تغییر اقلیم بر چرخه آب و هوایی و افزایش دما، موجب تسریع در کاهش منابع آب موجود شده است (Acharyya, 2014). به‌ویژه تاثیر منفی این پدیده بر منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک که عمدتاً از کشورهای در حال توسعه هستند، قابل توجه است (Kumar and Singh, 2015). استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تنها قادر است وضعیت کنونی رواناب یا سیلاب را در یک حوضه آبریز به تصویر بکشد و نمی‌تواند تغییرات آبی رواناب در حوضه بر اثر تغییرات اقلیمی را شبیه‌سازی کند (Gord et al., 2024). در بسیاری از تحقیقات، بهترین ابزار برای بررسی و تولید سناریوهای اقلیمی و تاثیر گازهای گلخانه‌ای بر جو زمین در مقیاس منطقه‌ای برای دوره‌های آبی، به کارگیری مدل گردش عمومی جو-اقیانوسی<sup>۱</sup> (AOGCM) است که برآوردهای این مدل‌ها همواره با عدم قطعیت همراه است (Wilby and Harris, 2006; Soltani et al., 2021). در مطالعات تغییر اقلیم، عدم قطعیت‌های مختلفی بر نتایج نهایی تاثیر می‌گذارند و با نادیده گرفتن آنها از اعتبار نتایج کاسته می‌شود (IPCC, 2014). برای کاهش عدم قطعیت مدل‌ها در مطالعات تغییر اقلیم نباید به یک مدل گردش عمومی اکتفا کرد و باید سعی کرد که از نتایج چند مدل و سناریو کمک گرفته شود تا گستره وسیعی برای تحلیل ایجاد شود تا عدم قطعیت را در تولید داده‌های اقلیمی آینده به حداقل برساند (New and Hulme, 2000; Ansari et al., 2014; Amiri et al., 2023; Fallahi et al., 2023; Azizi et al., 2024; Alizadeh et al., 2021a,b).

داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی و روش‌های تحلیل برآورد آن‌ها در ارزیابی منابع آب کنونی و آینده ارزش زیادی دارد. چرا که بر طرح‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی کشور که مرتبط با آب هستند تأثیر می‌گذارد (Vilaysane et al., 2015). تغییر اقلیم و پیامدهای ناشی از آن یکی از مشکلات اساسی در مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی است و تخمین دقیق آن در دوره آبی ضروری است. مطالعات زیادی در مورد این موضوع در سال‌های اخیر صورت پذیرفته است.

Gulacha et al., 2017 از مدل<sup>۲</sup> SDSM برای ریزمقیاس‌سازی آماری و تبدیل مدل‌های گردش عمومی جو به مقیاس محلی، در حوضه رودخانه وامی<sup>۳</sup> کشور تانزانیا

استفاده نمودند. در نهایت تحقیقات آنها نشان داد که در حوضه این رودخانه در شرایط تغییر اقلیم، پتانسیل وقوع سیل و خشکسالی، بسیار بالاست.

مدل‌های توزیعی قادرند تغییرات مکانی پارامترهای هیدرولوژیکی را در مقیاس حوضه آبریز شبیه‌سازی کنند. اما اجرای آن‌ها با صرف زمان بیش‌تری همراه است (Sokolowski and Banks, 2011). در سال‌های اخیر، مدل‌هایی ارائه گردیده‌اند که ماهیت نیمه توزیعی داشته و در شبیه‌سازی حوضه‌های وسیع، عملکرد موفقی ارائه کرده‌اند. از جمله این مدل‌ها که اخیراً در نقاط مختلف دنیا به صورت گسترده‌ای به‌منظور بررسی عوامل هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز چه از نظر کمی و چه از نظر کیفی مورد استفاده قرار گرفته است، مدل هیدرولوژیکی SWAT می‌باشد که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا<sup>۴</sup> تهیه شده است (Shahoei et al., 2018).

مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیکی پیوسته است که فرآیندهایی مانند تولید رواناب و بار رسوب را در هر یک از واحدهای هیدرولوژیکی شبیه‌سازی می‌کند (Ebrahimi et al., 2018; Fatehi and Shahoei, 2020; Rasoolzadeh darzi et al., 2022).

مدل SWAT در تحقیقات مختلفی برای شبیه‌سازی رواناب و کنترل فرسایش در مقیاس حوضه آبریز در اقلیم‌های مختلف بکار گرفته شده است که دقت بالایی در برآورد رواناب داشته است (Rafiei Emam et al., 2017; Tasdighi et al., 2018; Melaku et al., 2018). عملکرد مدل SWAT در حوضه‌های شهری نیز مناسب بوده و مورد توجه محققان قرار گرفته است (Busico et al., 2020).

جیمنو سائز و همکاران (Jimeno-Sáez et al., 2018). ژیهووا و همکاران (Zhihua et al., 2020). به علت عدم وجود آمار دقیق و کافی از آبدی‌های شاخه‌های فرعی رودخانه‌های اصلی بخصوص در سال‌های آبی و تحت تاثیر تغییر اقلیم، کلیه عملیات اجرایی در بستر رودخانه‌ها بر پایه برآورد و تخمین است (Amirabadizadeh et al., 2017). با استفاده از داده‌های جهانی موجود در قرن گذشته مشخص شده است که اگر دمای کره زمین به میزان ۱ درجه افزایش یابد رواناب در مقیاس جهانی ۴ درصد افزایش می‌یابد (Jiang et al., 2011). لذا برآورد رواناب در سال‌های آبی تحت تاثیر تغییر اقلیم

برای تعیین پارامترهای حساس با تاثیرگذاری بیشتر بر تولید رواناب در حوضه آبریز پل شاه از اهداف دیگر این تحقیق است.

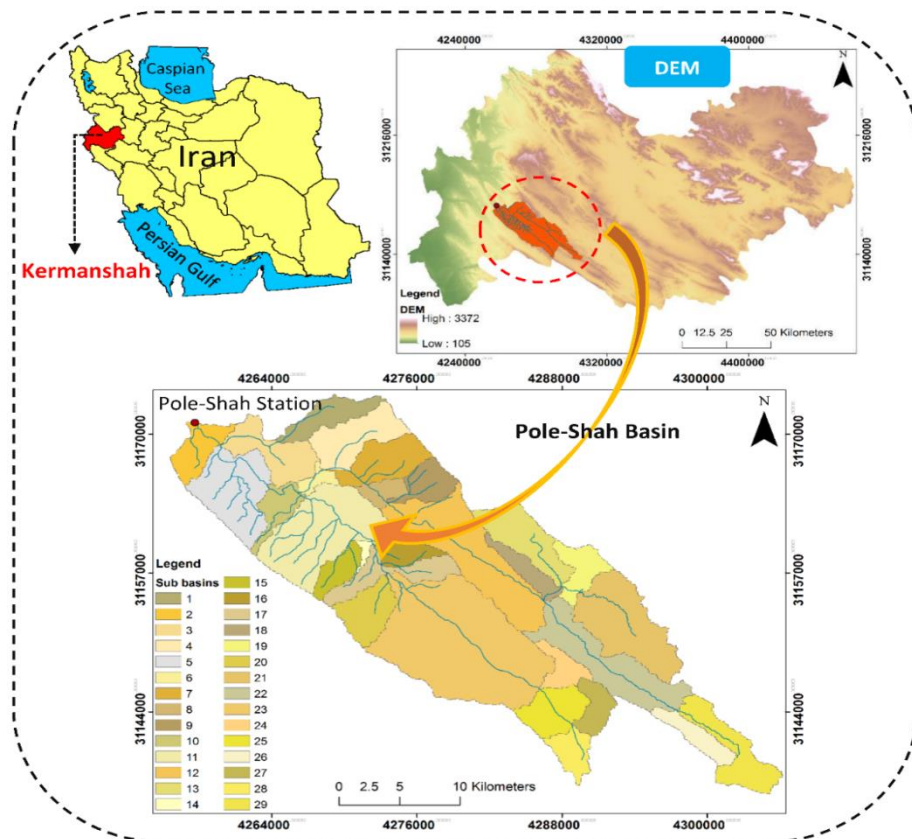
### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز پل شاه با مساحت ۷۲۱ کیلومتر مربع یکی از زیرحوضه‌های حوضه الوند در استان کرمانشاه است. این حوضه سالانه دارای سیلاب‌های متعددی بوده که گاهی باعث خسارات و آب‌گرفتگی زمین‌های کشاورزی می‌گردد. رودخانه دیره واقع در این حوضه منبع تامین آب بخشی از اراضی کشاورزی مجاور و پایین‌دست رودخانه است. لذا بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی این رودخانه از اهمیت زیادی برخوردار است. متوسط حداقل و حداکثر دما در منطقه به ترتیب برابر با ۱۲/۳ و ۲۸/۱۴ درجه سانتیگراد و میانگین بلندمدت دما برابر با ۲۰/۳ درجه سانتیگراد است. مقدار بارش سالانه منطقه بر اساس آمار بلندمدت برابر ۵۴۰ میلی‌متر است. بر اساس روش آمبرژه، اقلیم منطقه معتدل می‌باشد. کاربری اراضی منطقه بیشتر شامل اراضی مرتعی و جنگلی با پوشش متوسط و اراضی کشاورزی است. شکل (۱) موقعیت حوضه آبریز و رودخانه‌های حوضه پل شاه را نشان می‌دهد.

اهمیت ویژه‌ای دارد. فارسی و مهجوری (۲۰۱۹) به ارزیابی سهم تغییرات آب‌وهوایی و فعالیت‌های انسانی در تغییر رواناب تحت عدم قطعیت پارامترهای مدل شبیه‌سازی رواناب بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم پرداختند (Farsi and Mahjouri, 2019). جوادی نژاد و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی سناریوها و تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی بر رواناب ذوب برف و رواناب حاصل از آن پرداختند. تحقیقات آن‌ها در حوضه زاینده‌رود نشان داد حداکثر رواناب ذوب برف در زمستان ایجاد شده و سهم ذوب برف در رواناب پاییز و بهار به ترتیب ۳۵ و ۵۳ درصد است (Javadinejad et al., 2020).

بررسی منابع نشان داد تحقیقات زیادی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دبی رودخانه‌ها پرداخته‌اند که نتایج آن‌ها حاکی از اثر انکار ناپذیر تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی دارد. بر اساس این تحقیقات، انتخاب مدل اقلیمی و نوع سناریوی انتشار تأثیر بسزایی بر نتایج کار دارد. با توجه به این که حوضه آبریز پل شاه بدلیل خصوصیات فیزیوگرافی و پوشش گیاهی کم از حوضه‌های سیل‌خیز استان کرمانشاه محسوب می‌گردد، برای بررسی اثرات تغییر اقلیم مناسب است. هدف از این تحقیق بررسی میزان کارایی مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب بر اساس پارامترهای اقلیمی برآورد شده برای دوره‌های آبی در این حوضه می‌باشد. استفاده از برنامه SUFI2



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز و زیرحوضه‌ها

ماه‌های اقلیم آینده منهای میانگین دمای ماه مشابه در اقلیم حاضر گردد. به این روش ۱۲ تا عامل تغییر یا دلتا برای گرید یا ایستگاه مورد نظر بدست می‌آید.

$$T_f = T_h + C_f \quad (2)$$

باتوجه به اینکه برونداد مدل‌های گردش عمومی جو قابلیت تولید مقادیر بارش، دمای میانگین، دمای حداقل و حداکثر را بصورت داده‌های تاریخی<sup>۹</sup> از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۸ میلادی و داده‌های برآورد آینده در قالب سناریوهای انتشار RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۷۲ میلادی را دارند، در این تحقیق برای محاسبه عامل تغییر یا دلتا از دوره پایه ۳۰ سال منتهی به سال ۲۰۱۸ استفاده گردید و داده‌های آینده بارش، دمای میانگین، ماکزیمم و مینیمم جهت برآورد و تحلیل وضعیت آینده محدوده مطالعاتی در دو بازه تولید شد. سپس با استفاده از مدل SWAT، شبه‌سازی رواناب سطحی بر اساس داده‌های تغییر اقلیم مربوط به بازه ۲۰۱۸ تا ۲۰۴۵ و ۲۰۴۶ تا ۲۰۷۲ انجام شد.

#### شاخص‌های عملکرد و ارزیابی مدل‌ها

برای اعتبارسنجی و ارزیابی دقت برآورد مدل‌های گردش عمومی و برازش داده‌ها از آزمون‌های نکویی برازش شامل مجذور میانگین مربعات خطا<sup>(۱)</sup> (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)<sup>(۱)</sup> و ضریب نش-ساتکلیف (NS)<sup>(۲)</sup> استفاده شد. با استفاده از این شاخص‌ها می‌توان میزان دقت برآورد مدل‌ها را ارزیابی کرد (Sadat Ashofte and Bozorg Hadad, 2014; Hosseinikhah et al., 2014)، که در روابط (۳) تا (۵) ارایه شده‌اند.

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - C_i|}{n} \quad (4)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

که در روابط فوق O مقدار مشاهده‌ای و  $\bar{O}$  مقدار میانگین داده‌های مشاهده‌ای و C مقدار محاسبه شده توسط مدل‌ها و N تعداد داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد. بهترین برآوردها زمانی رخ می‌دهد که کمیت‌های RMSE و MAE کمترین بوده و ضریب Nash-Sutcliffe نزدیک به ۱ باشد (Kamal and Massahbavani, 2012).

#### مدل‌های گردش عمومی و سناریوهای انتشار برای بررسی اثرات تغییر اقلیم

برای بررسی کارایی مدل‌های تغییر اقلیم از داده‌های ماهیانه بارندگی و دمای کمینه و بیشینه ایستگاه‌های هواشناسی منطقه از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. برای استخراج داده‌های ماهیانه بارندگی و دما در شرایط تغییر اقلیم از مدل‌های سری CMIP5 گزارش پنجم<sup>۵</sup> (AR5) هئیت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۶</sup> (IPCC) استفاده شد. سری مدل‌های CMIP5 شامل ۳۹ مدل از گزارش پنجم است که از طریق پایگاه داده‌ها به آدرس <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/> اینترنشنالی قابلیت انتخاب و دانلود را دارند. این مدل‌ها قابلیت تولید مقادیر بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و دمای میانگین را بصورت داده‌های تاریخی از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۵ میلادی و داده‌های برآورد آینده در قالب سناریوهای انتشار RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 از سال ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ میلادی را دارند (IPCC, 2014). همچنین قدرت تفکیک

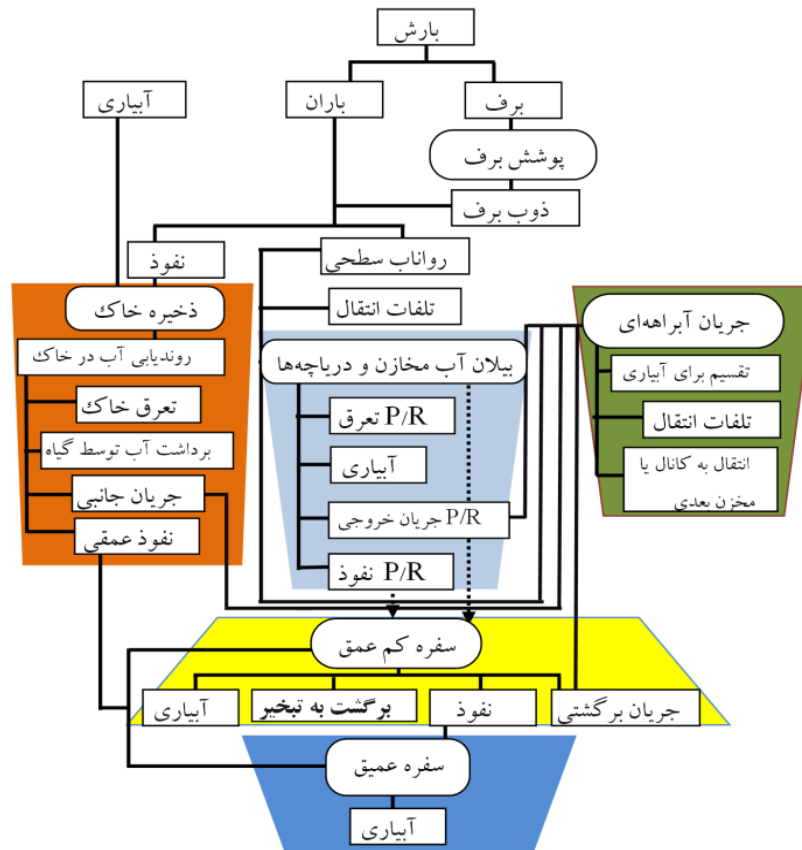
مکانی سری CMIP5 نسبت به سری CMIP4 از گزارش چهارم و سری CMIP3 از گزارش سوم از حدود ۲/۵ در ۲/۵ درجه به حدود ۰/۵ در ۰/۵ درجه ارتقاء یافته‌است که پیشرفت بسیار بزرگی محسوب می‌گردد (IPCC, 2014). در این تحقیق شش مدل IPSL-GFDL-CM3, CCSM4, BCC-CSM1-1, MIROC-ESM, CM5A-LR و HadGEM2-ES کوه دارای اطلاعات کامل سه سناریوی Rcp 2.6, Rcp 4.5, Rcp 8.5 بودند برای استخراج داده‌های تغییر اقلیم انتخاب شدند.

#### ریزمقیاس نمایی به روش دلتا<sup>۷</sup> یا عامل تغییر<sup>۸</sup>

برای ریزمقیاس نمایی آماری از روش دلتا یا عامل تغییر استفاده شد (Teutschbein and Seibert, 2012; Wootten et al., 2021). برای محاسبه مقدار عامل تغییر یا دلتای مربوط به بارش هر یک از ۱۲ ماه سال، باید میانگین بارش هر یک از ماه‌های اقلیم آینده ( $P_f$ ) را به میانگین بارش تاریخی در ماه مشابه در اقلیم حاضر ( $P_h$ ) تقسیم نمود، به این صورت ۱۲ تا عامل تغییر یا دلتا برای گریدی که ایستگاه در آن واقع است بدست می‌آید. در این صورت برای بدست آمدن بارندگی در هر یک از سناریوهای اقلیمی از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$P_f = C_f \times P_h \quad (1)$$

در مورد داده‌های دما، روش ریزمقیاس نمایی به روش عامل تغییر یا دلتا مشابه با بارش می‌باشد. با این تفاوت که برای برآورد دما تحت سناریوهای اقلیمی از رابطه (۲) استفاده می‌گردد. برای محاسبه مقدار عامل تغییر یا دلتای مربوط به دمای هر یک از ۱۲ ماه سال، باید میانگین دمای هر یک از



شکل ۲. ساختار کلی چرخه هیدرولوژیک آبریز در مدل SWAT (Wang et al., 2019)

فرایندهای خاصی است که ممکن است در همه آبریزها غالب نباشند. داده‌های ورودی مدل SWAT به‌طور کلی شامل داده‌های آب‌وهوا، توپوگرافی آبریز (نقشه DEM با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰)، مشخصات خاک بر اساس نقشه خاکشناسی استان با مقیاس ۱:۱۵۰۰۰۰، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت اراضی و کاربری اراضی با مقیاس ۱:۱۵۰۰۰۰ است. سایر اطلاعات مربوط به داده‌های جامع هواشناسی، عوامل مؤثر بر جریان سطحی و کانال، آب زیرزمینی، برداشت آب، مدیریت اراضی، کیفیت آب و برخی زمینه‌های دیگر با توجه به هدف تحقیق باید در مدل وارد شوند.

#### آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت سنجی مدل

در این تحقیق برای انجام آنالیز حساسیت روش "یک پارامتر در هر بار (OAT)" مورد استفاده قرار گرفت که متعارف‌ترین روش برای این کار می‌باشد (Naqash et al., 2023). در روش OAT در هر بار اجرای مدل یک پارامتر تغییر کرده و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند. در این تحقیق در دو مرحله آنالیز حساسیت انجام شد. مرحله اول قبل از واسنجی مدل و زمانی بود که نیاز به شناخت خصوصیات پارامترها و نحوه تأثیر آن‌ها بر تولید آب بود. و مرحله دوم بعد از واسنجی مدل

#### شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیک آبریز در مدل SWAT

شبیه‌سازی بخش زمینی چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT بر پایه بیان آبی (رابطه ۶) صورت می‌گیرد (Wang et al., 2019). شکل ۲ ساختار مدل مفهومی چرخه هیدرولوژیک و مسیره‌های در نظر گرفته شده برای حرکت آب در مدل SWAT را نشان می‌دهد (Wang et al., 2019).

$$SWt = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (6)$$

در رابطه فوق SWt: مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW0: مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، Rday: مقدار بارندگی در روز tام (میلی‌متر)، Qsurf: مقدار رواناب سطحی در روز tام (میلی‌متر)، E\_a: مقدار تبخیر و تعرق در روز tام (میلی‌متر)، Wseep: مقدار آبی که در روز tام از پروفیل خاک به ناحیه غیر اشباع وارد می‌شود و Qgw: مقدار جریان برگشتی (میلی‌متر) در روز tام است. شبیه‌سازی رواناب سطحی در این پژوهش با روش اصلاح شده SCS (در صورت داشتن داده‌های بارش روزانه) یا روش گرین-آمپت (در صورت در اختیار داشتن داده‌های بارش ساعتی) انجام شد. مدل SWAT برای انجام شبیه‌سازی نیازمند اطلاعات متنوع و متعددی می‌باشد. با این وجود، بسیاری از اطلاعات ورودی مدل برای شبیه‌سازی

### نتایج

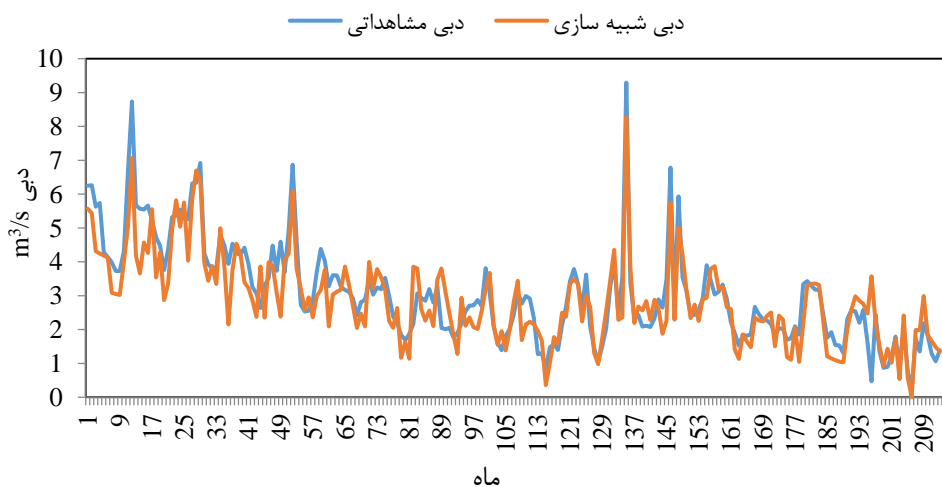
#### نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی

##### جریان ماهانه

##### واسنجی مدل SWAT

واسنجی مدل SWAT به دو صورت دستی و یا با استفاده از برنامه SUFI2 که در قالب نرم افزار SWAT\_CUP به مدل SWAT لینک شده است امکان‌پذیر است. در ابتدا واسنجی به صورت دستی انجام شد. ابتدا سعی شد مدل برای شبیه‌سازی در پایه زمانی سالانه واسنجی شود تا پس از دستیابی به نتیجه قابل قبول اقدام به واسنجی مدل برای پایه زمانی ماهانه شود. مهم‌ترین خطاهای نتایج اولیه عبارت از عدم هماهنگی نقاط اوج و شیب هیدروگراف‌ها و کم بودن حجم آب پایه بود. با استفاده از نتایج آنالیز حساسیت مدل، پارامترهای موثر در این بخش‌ها شناسایی شده و در بهینه کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله بعد واسنجی مدل بصورت ماهانه و با استفاده از برنامه SUFI2 انجام گردید. در ابتدا ۱۵ پارامتر در تولید رواناب حوضه آبریز موثر شناخته شد که این پارامترها به همراه محدوده مجاز تغییرات آن‌ها به مدل وارد گردید. از آمار ۱۷ ساله اندازه‌گیری شده (۱۹۹۴ تا ۲۰۱۱)، بارندگی، دما و دبی روزانه برای واسنجی مدل استفاده شد. در این مرحله بایستی به دفعات مختلف اقدام به اجرای مدل نموده و هر بار با توجه به شاخص‌ها و معیارهای آماری، نتایج را مورد ارزیابی قرار داد. در صورت رضایت بخش نبودن نتایج شبیه‌سازی، بایستی پارامترهای موجود در مدل بهینه شده و مجدداً مدل را اجرا نمود تا جریان شبیه‌سازی شده از لحاظ آماری دارای دقت مناسب باشد. در تحقیق حاضر نیز بعد از اجرای مدل در دفعات متعدد، هر بار پارامترهای حساس تغییر داده شد و نهایتاً برای

و برای شناخت مقدار حساسیت هر یک از پارامترها بر دقت شبیه‌سازی انجام شد. در هر اجرای مدل مقدار ورودی یک پارامتر تغییر کرده و سایر پارامترها ثابت نگه داشته می‌شد. پارامتری که در دامنه تغییرات خود بیشترین تأثیر را بر تابع نتایج این بخش حساسیت پارامترها بررسی شدند. در این تحقیق واسنجی مدل به صورت خودکار و با استفاده از برنامه SUFI2 و براساس آمار سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۱ انجام شد. با استفاده از آنالیز حساسیت مدل، پارامترهای مؤثر در این بخش شناسایی شده و در بهینه کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. با اجرای الگوریتم SUFI2 مقادیر بهینه پارامترهای حساس مدل تعیین می‌شود. در این تحقیق برای واسنجی مدل، این الگوریتم ۴۰۰ بار اجرا شد و در نهایت در صورت قابل قبول بودن نتایج بهینه‌سازی، از مقادیر بهینه پارامترها در مرحله اعتبارسنجی استفاده شد. هر بار در صورت غیر قابل قبول بودن نتایج، برنامه مجدداً اجرا شد تا نتایج مطلوب حاصل گردد. برای تایید قابلیت و دقت مدل برای شبیه‌سازی جریان بر اساس داده‌های جدید صحت‌سنجی مدل برای دوره آماری دیگری غیر از دوره واسنجی انجام شد. این مرحله با استفاده از مقادیر پارامترهای اصلاح شده در مرحله واسنجی و بر اساس آمار سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵ انجام گرفت. فرآیند ارزیابی و واسنجی مدل نه‌تنها در جریان توسعه مدل بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق شاخص‌های نکویی برآزش برای ارزیابی تطابق خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی محاسبه گردید. شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ضریب تبیین ( $R^2$ )، نش-ساتکلیف (NSE)، می‌باشند. واسنجی تا زمانی ادامه یافت که این ضرایب تا حد امکان افزایش یابند.



شکل ۳. نمودار مقایسه دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی مرحله واسنجی دوره آماری 2011-1994

پارامترهای حساس در بهترین حالت واسنجی به ترتیب حساسیت مدل به آن و بر اساس بیشترین تاثیرگذاری بر رواناب آورده شده است. ده پارامتر اول ارائه شده در این جدول بیشترین حساسیت را دارا بودند. در تحقیقات Ebrahimi et al., 2018 نیزه به ۸ پارامتر که بیشترین حساسیت را داشتند اشاره شده که پارامترهای مربوط به خاک، پوشش گیاهی، شماره منحنی نفوذ و تغذیه با این تحقیق مشترک بودند. در جدول شماره ۲، V نشان دهنده روش Replace و R نشان دهنده روش Multiple می‌باشد. در روش Multiple، مقدار پارامتر در یک ارزش داده شده ضرب می‌گردد تا مقدار بهینه محاسبه شود. اما در روش Replace، پارامتر مورد نظر با ارزش داده شده جایگزین می‌گردد (Wang et al., 2019).

بهینه شدن پارامترها، مدل ۴۰۰۰ بار اجرا و برای منطقه مطالعاتی واسنجی شد. نتایج ارزیابی به صورت جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۳ هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی ماهیانه در دوره واسنجی (۲۰۰۵-۱۹۹۶)، نشان داده شده است.

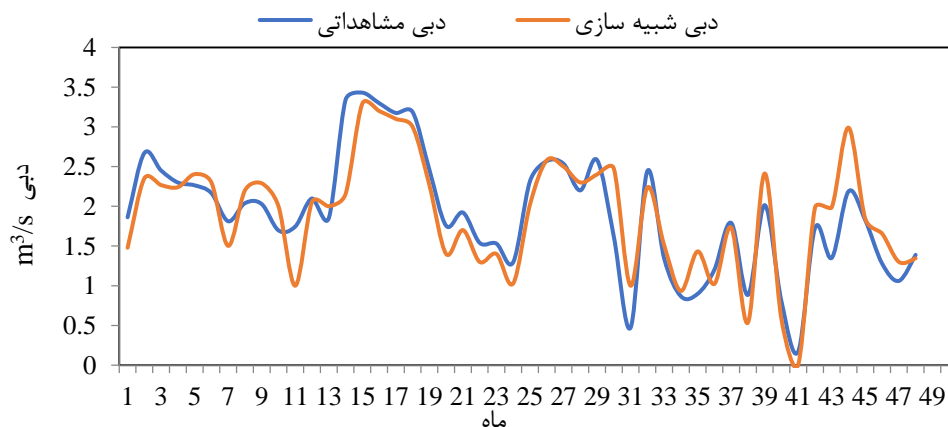
جدول ۱. ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی

مقدار	مشخصه	معیار ارزیابی
۰/۷۹ (رضایتبخش)	NS	ضریب ناش-ساتکلیف
۰/۷۵	R <sup>2</sup>	ضریب تبیین

تعیین مقادیر بهینه پارامترهای حساس بعد از واسنجی همانطور که قبلاً اشاره شد، در این تحقیق به منظور واسنجی مدل از برنامه SUFI2 استفاده شد. در جدول ۲ مقادیر

جدول ۲. مقادیر بهینه پارامترهای حساس بعد از واسنجی برای منطقه مطالعاتی

ردیف	نام پارامتر	مقدار بهینه	مقدار حداقل	مقدار حداکثر
1	R_CN2.mgt	-0.270000	-0.300000	0.300000
2	V_ALPHA_BF.gw	0.050000	0.000000	1.000000
3	V_GW_DELAY.gw	19.000000	5.000000	45.000000
4	R_SOL_AWC(..).sol	-0.210000	-0.300000	0.300000
5	V_GW_REVAP.gw	0.130725	0.002072	0.200000
6	V_ESCO.hru	0.175000	0.000000	0.500000
7	V_CH_N2.rte	0.177366	0.016920	0.205680
8	V_CH_K2.rte	132.003326	55.778320	157.411667
9	R_SOL_K(..).sol	-0.150000	-0.300000	0.300000
10	R_SOL_BD(..).sol	-0.210000	-0.300000	0.300000
11	V_GWQMN.gw	4348.505371	0.000000	5798.007324
12	V_REVAPMN.gw	553.771912	0.000000	651.496338
13	V_RCHRG_DP.gw	0.150000	0.000000	0.200000
14	V_SLSUBBSN.hru	52.845009	0.000000	70.460014
15	V_OV_N.hru	0.500000	0.000000	2.000000



شکل ۴. مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره اعتبار سنجی با پایه زمانی ماهانه



اعتبارسنجی مدل SWAT

بعد از مرحله واسنجی مدل، ارزیابی مدل نیز نتایج قابل قبولی را در پی داشت. در این مرحله با توجه به پارامترهای واسنجی شده برای منطقه مطالعاتی، با استفاده از باقی‌مانده آمار (۲۰۱۲-۲۰۱۵) اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه شده و این نتایج به‌عنوان نتایج نهایی اعتبارسنجی مدل در جدول ۳ ارائه شده است. محاسبه ضریب تبیین بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۲-۲۰۱۵) در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق این شاخص، عدد ۰/۷۱ برای آن حاصل شد. در شکل ۴ هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۲-۲۰۱۵)، نشان داده شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که مدل زمان وقوع مقادیر دبی اوج و دبی‌های پایه را به خوبی شبیه‌سازی نموده است که متوسط دبی ماهانه شبیه‌سازی شده در طول دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نیز موید این مطلب است.

برآورد داده اقلیمی آینده (بارش و دما)

در این پژوهش برای برآورد بارش و دما ایستگاه‌های منتخب حوضه برای برآورد رواناب حاصل از آن از نرم افزار LARS-WG6 و مدل‌های اقلیمی گردش عمومی جو GCM5 که شامل مدل‌های HADGEM2 و MIROC5 بود استفاده شد. انتخاب مدل‌های GCM تاثیر بسزایی در ریزمقیاس‌نمایی و برآورد داده‌های بارندگی و دما دارد. با در نظر گرفتن سری زمانی پایه (۱۹۹۴ تا ۲۰۱۵) در ایستگاه‌های مشاهداتی و مقایسه آن با سری زمانی مشترک داده‌های مدل‌های HADGEM2، MIROC5، EC-EARTH، Can Esm2 و IPSL\_CM5A\_MR مدلی که در آن بیشترین انطباق بین مقادیر دما و بارندگی برآورد شده و داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی وجود داشت، به‌عنوان بهترین مدل اقلیمی انتخاب شد.

جدول ۳. ارزیابی نهایی کارایی مدل بعد از اعتبارسنجی

مقدار	مشخصه	معیار ارزیابی
۰/۶۱ (ضایعتبخش)	NS	ضریب ناش-ساتکلیف
۰/۷۱	R <sup>2</sup>	ضریب تبیین
۰/۶۷	Bt <sup>2</sup>	ضریب تعیین وزنی

معیار ارزیابی برای انتخاب بهترین مدل تغییر اقلیم

برای مشخص شدن رابطه بین داده‌های حاصل از مدل‌های HADGEM2، MIROC5، EC-EARTH، Can Esm2 و IPSL\_CM5A\_MR و داده‌های مشاهداتی برای هر یک از متغیرهای اقلیمی (بارش و دما) از معیارهای جذرمیانگین مربع خطا

جدول ۴. نتایج ارزیابی مدل گردش عمومی جو CMIP5 نسبت به آمار ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه براساس مولفه دما

ایستگاه	معیار ارزیابی	HADGEM2	MIROC5	EC-EARTH	Can Esm2	IPSL_CM5A_MR
کرمانشاه	RMSE	۱/۸۲	۱/۹	۲/۳۸	۳/۵	۳/۲
	R <sup>2</sup>	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۸۹
	NRMSE	٪۰/۶	٪۰/۷۱۵	٪۰/۹۱۵	٪۰/۱۱۵	٪۰/۱۱
	رتبه	۱	۲	۳	۵	۴

جدول ۵. نتایج ارزیابی مدل گردش عمومی جو CMIP5 نسبت به آمار ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه و ایستگاه‌های باران سنجی گیلانغرب، سرپل ذهاب و اسلام آباد غرب براساس مولفه بارش

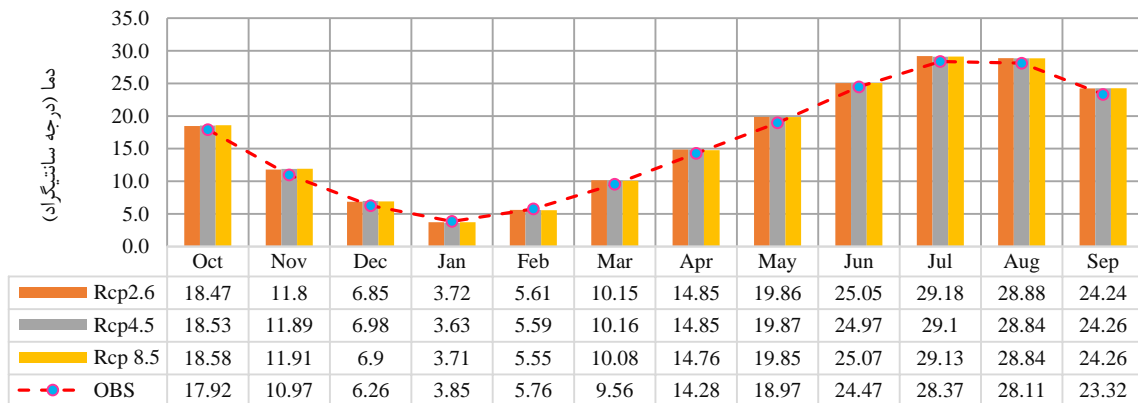
ایستگاه	معیار ارزیابی	HADGEM2	MIROC5	EC-EARTH	Can Esm2	IPSL_CM5A_MR
کرمانشاه	RMSE	۲/۴۲	۲/۴۴	۲/۷۹	۲/۹۲	۲/۹۱
	R <sup>2</sup>	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۸۶
	NRMSE	٪۰/۷	٪۰/۷۱	٪۰/۷۱۶	٪۰/۷۱۹	٪۰/۷۱۸
	رتبه	۱	۲	۳	۵	۴
گیلانغرب	RMSE	۳/۴	۳/۰	۳/۵	۴/۲	۴/۰۲
	R <sup>2</sup>	۰/۹۱	۰/۹۶	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸۹
	NRMSE	٪۰/۷۱۵	٪۰/۶	٪۰/۹۱۵	٪۰/۱۱۵	٪۰/۱۱
	رتبه	۲	۱	۳	۴	۵
سرپل ذهاب	RMSE	۲/۴۶	۲/۴۴	۲/۶۹	۲/۶۲	۲/۸۱
	R <sup>2</sup>	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۶
	NRMSE	٪۰/۷	٪۰/۷۱	٪۰/۷۱۶	٪۰/۷۱۴	٪۰/۷۱۸
	رتبه	۲	۱	۴	۳	۵
اسلام آباد غرب	RMSE	۲/۶۹	۳/۶۱	۴/۶	۵/۴	۶/۵
	R <sup>2</sup>	۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۷۹	۰/۷۳
	NRMSE	٪۰/۶	٪۰/۷۲	٪۰/۸۱۵	٪۰/۹۱	٪۰/۱۱۵
	رتبه	۱	۲	۴	۳	۵

ESM و HadGEM2-ES که دارای اطلاعات کامل سه سناریوی Rcp 2.6, Rcp 4.5, Rcp 8.5 بودند، پرداخته شد. شکل های (۵) و (۶) برآورد میانگین بلند مدت دما و شکل های (۷) و (۸) اختلاف دمای بلندمدت تحت سناریوهای مختلف را به ترتیب در دوره های آتی نشان می دهند. بر اساس این شکل ها تغییرات میانگین بلندمدت دما در سناریوهای Rcp 2.6, Rcp 4.5, Rcp 8.5 طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ به ترتیب +۰/۵۶۸، +۰/۵۶۹، +۰/۵۶۷ درجه سانتی گراد و طی دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ به ترتیب +۱/۴۶، +۲/۱۲، +۱/۹۲ درجه سانتی گراد است.

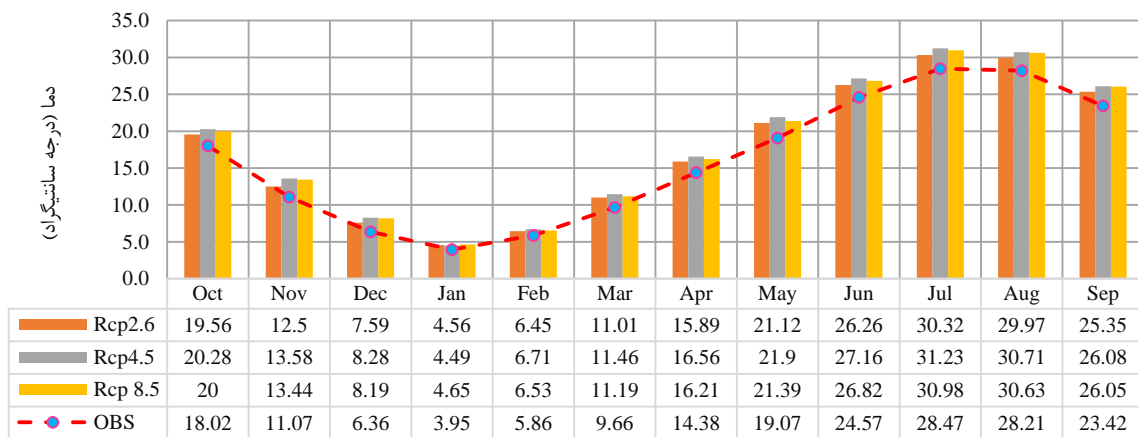
(RMSE) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) استفاده شد. سپس با بهره گیری از نرم افزار LARS-WG6 و داده های اقلیمی مشاهداتی در دوره پایه و روش عامل تغییر، داده اقلیمی آینده برای هر یک از سناریوها تولید گردید. نتایج ارزیابی ۵ مدل GCM برای هر ایستگاه برای پارامترهای بارش و دما در جداول (۴) و (۵) آورده شده است.

### برآورد پارامترهای دما و بارش در دوره ی آتی

همان گونه که گفته شد در ابتدا با استفاده از روش دلتا به تولید داده های ریز مقیاس شده مدل های BCC-CSM1-1, MIROC-, IPSL-CM5A-LR, GFDL-CM3, CCSM4



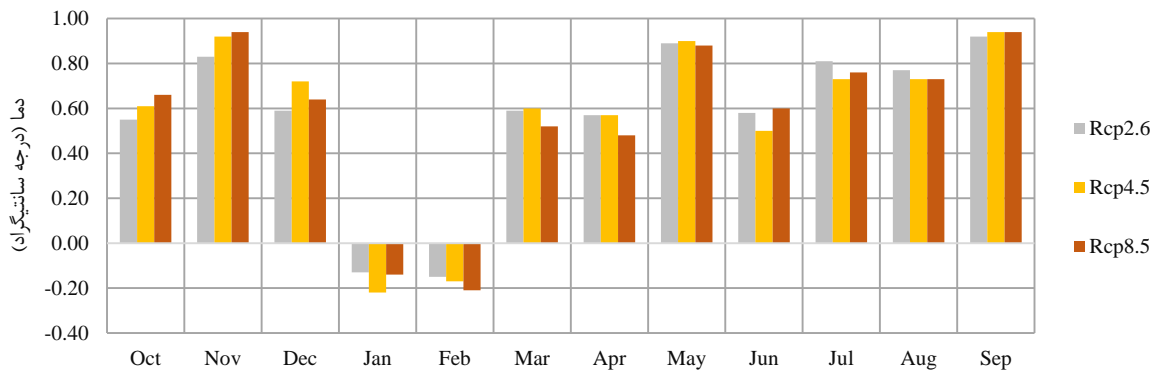
شکل ۵. برآورد میانگین بلندمدت دما برای سناریوهای Rcp 2.6, Rcp 4.5, Rcp 8.5 در دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸



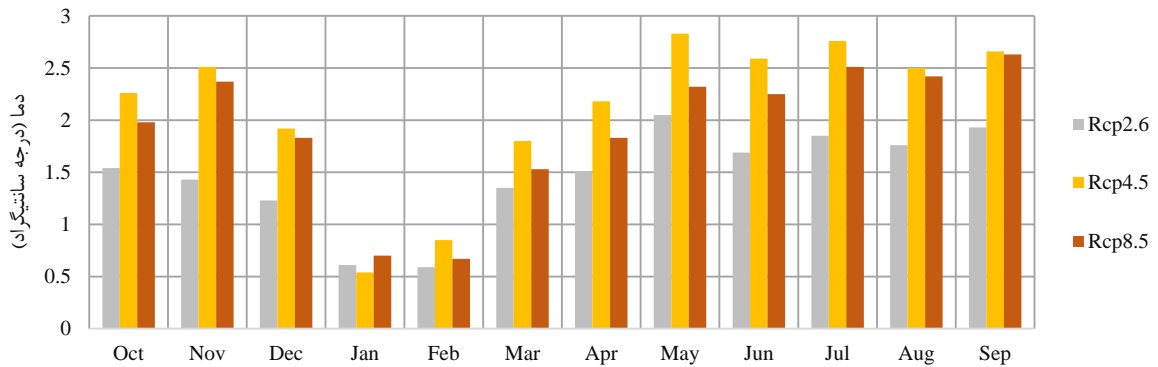
شکل ۶. برآورد میانگین بلندمدت دما برای سناریوهای Rcp 2.6, Rcp 4.5, Rcp 8.5 در دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸

شکل های (۹) و (۱۰) برآورد میانگین بلندمدت بارش و شکل های (۱۱) و (۱۲) درصد تغییرات بارش تحت سناریوهای مختلف را به ترتیب در دوره های آتی نشان می دهند. بر اساس این شکل ها تغییرات میانگین بلندمدت بارش در سناریوهای Rcp 2.6, Rcp 4.5, Rcp 8.5 طی دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ به میزان ۰/۱۴، -۴/۷۶، -۶/۲۳ درصد و طی دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ به ترتیب به میزان ۲۰/۲، -۲۶/۳، -۱۳/۳ درصد می باشد.

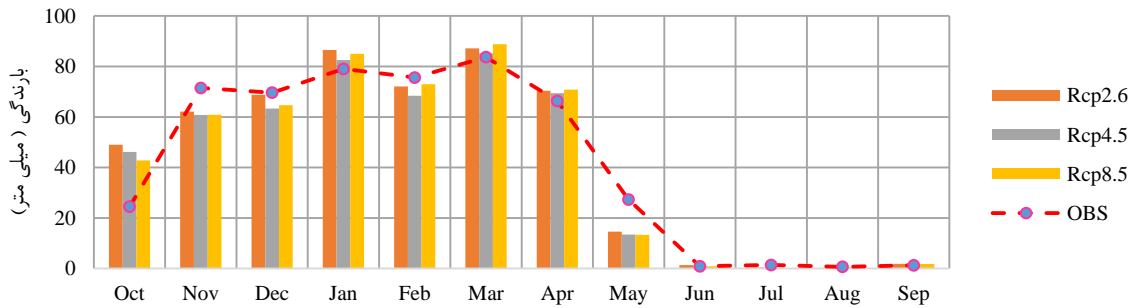
شکل های (۷) و (۸) نشان می دهد در دوره ی ۲۰۱۸-۲۰۴۵ بیشترین افزایش دما در ماه های می و سپتامبر و در دوره ی ۲۰۴۶-۲۰۷۲ در ماه جولای اتفاق افتاده است. همچنین بیشترین مقدار کاهش دما در دوره ی ۲۰۱۸-۲۰۴۵ و کمترین مقدار افزایش دما در دوره ی ۲۰۴۶-۲۰۷۲ در ماه های ژانویه و فوریه بدست آمده است.



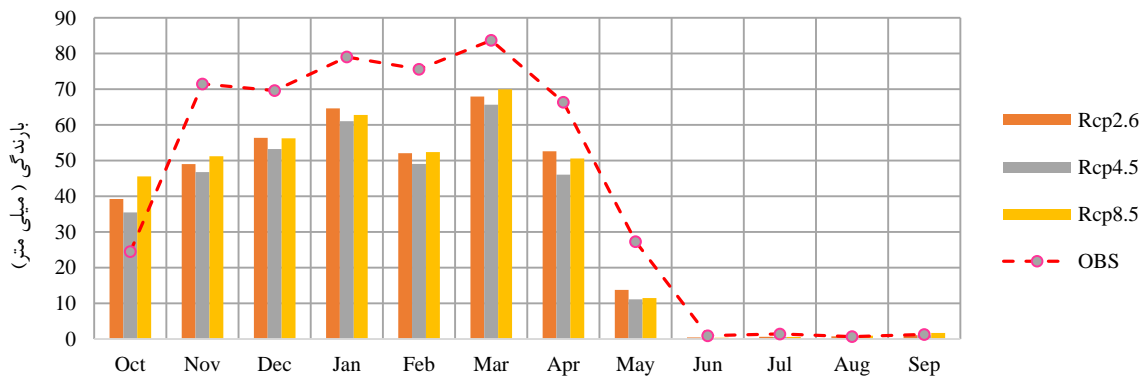
شکل ۷. اختلاف دمای بلندمدت در ماه‌های مختلف برای سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 در دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸



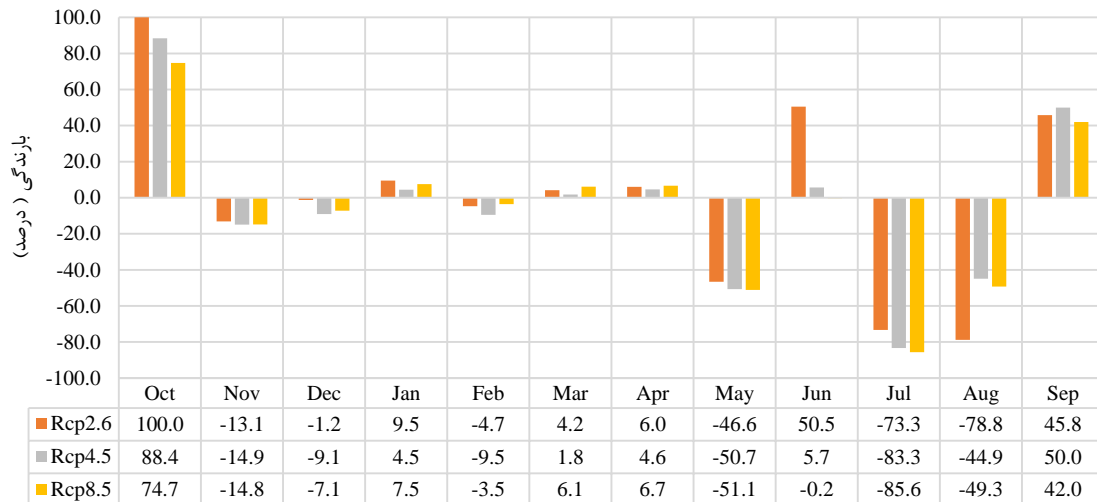
شکل ۸. اختلاف دمای بلندمدت در ماه‌های مختلف برای سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 در دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸



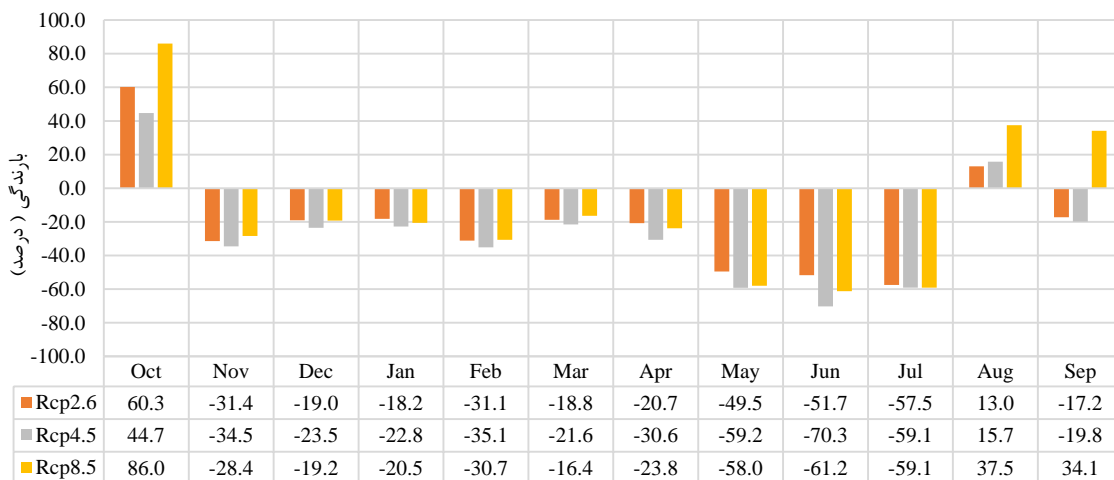
شکل ۹. برآورد میانگین بلندمدت بارش برای سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 در دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸



شکل ۱۰. برآورد میانگین بلندمدت بارش برای سناریوهای Rcp 2.6، Rcp 4.5، Rcp 8.5 در دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۲ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸



شکل ۱۱. درصد تغییرات بارش در ماه‌های مختلف، سناریوهای Rep 2.6، Rep 4.5، Rep 8.5 در دوره ۲۰۴۵-۲۰۱۸ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸



شکل ۱۲. درصد تغییرات بارش در ماه‌های مختلف، سناریوهای Rep 2.6، Rep 4.5، Rep 8.5 در دوره ۲۰۷۲-۲۰۴۶ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۸

سال‌های آتی به مدل SWAT وارد شد. نتایج حاصل از اجرای هر کدام از این مدل‌ها تحت سه سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 در تولید رواناب در حوضه آبریز پل شاه مورد تحلیل قرار گرفت.

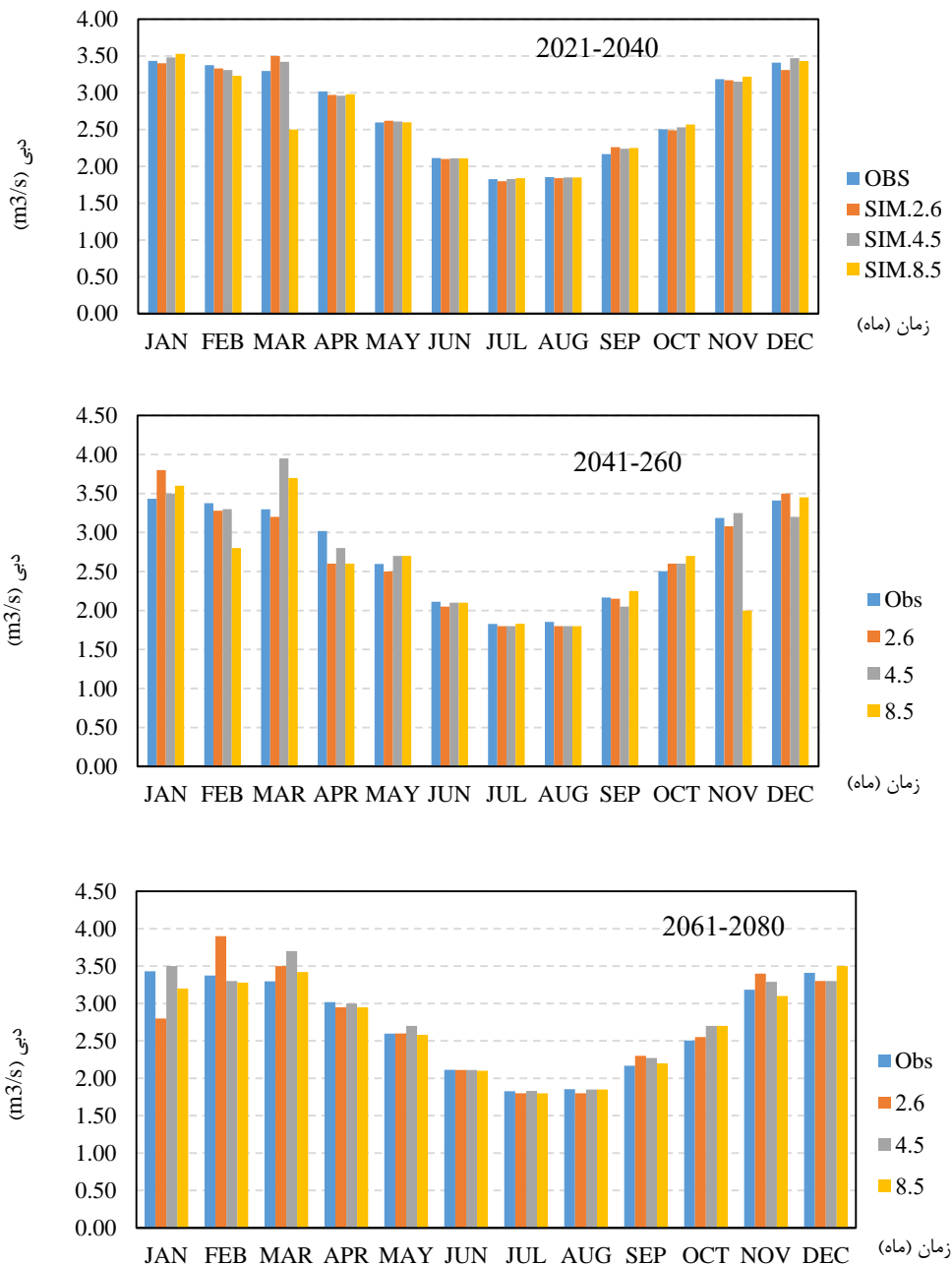
#### تولید رواناب تحت تاثیر مدل HADGEM2 با بهره‌گیری از سناریوهای مختلف اقلیمی

در این تحقیق از ۴ ایستگاه هواشناسی در اطراف حوضه مطالعاتی استفاده شد که هرکدام در یک ارتفاع متفاوت بوده و دارای میزان بارندگی و دمای متفاوتی هستند. نتایج نشان داد در هریک از سناریوهای اقلیمی میزان بارندگی و دما در ایستگاه‌های مختلف در برخی از ماه‌ها کاهش یا افزایش داشته است. بر این اساس مقادیر بارش و دمای برآورد شده در هر سناریو وارد مدل SWAT شده و رواناب ناشی از آن در طول دوره آماری متناظر با دوره های آماری سناریوهای تغییر اقلیم شبیه‌سازی شد.

همان‌گونه که در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود در هر دو دوره، بیشترین درصد افزایش بارش در ماه‌های اکتبر و سپتامبر برای سناریوهای Rep 2.6، Rep 4.5، Rep 8.5 و بیشترین درصد کاهش بارش در دوره ۲۰۴۵-۲۰۱۸ و ۲۰۷۲-۲۰۴۶ در ماه‌های ژوئن تا آگوست بدست آمده است. بیشترین سهم بارش را فصل زمستان در میان فصول دیگر دارد و سهم تابستان در بارش‌ها بسیار ناچیز است به همین دلیل تغییرات درصد بارش در این فصل تاثیر چندانی در تغییر بارش سالانه ندارد.

#### برآورد مقدار رواناب برای آینده با استفاده از مدل‌های تغییر اقلیم و SWAT

در این پژوهش از دو مدل تغییر اقلیم HadGEM2 و Miroc5 برای برآورد تغییرات مقادیر بارندگی، دمای حداقل و حداکثر برای سال‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۴۱ تا ۲۰۶۰ و ۲۰۶۱ تا ۲۰۸۰ استفاده شد. مقادیر برآورد شده بارندگی و دما در هر یک از سناریوهای انتشار برای تخمین مقدار رواناب تولیدی در



شکل ۱۳. نتایج شبیه‌سازی مقدار رواناب مدل HADGEM2 در دوره‌های آبی بر حسب متر مکعب بر ثانیه

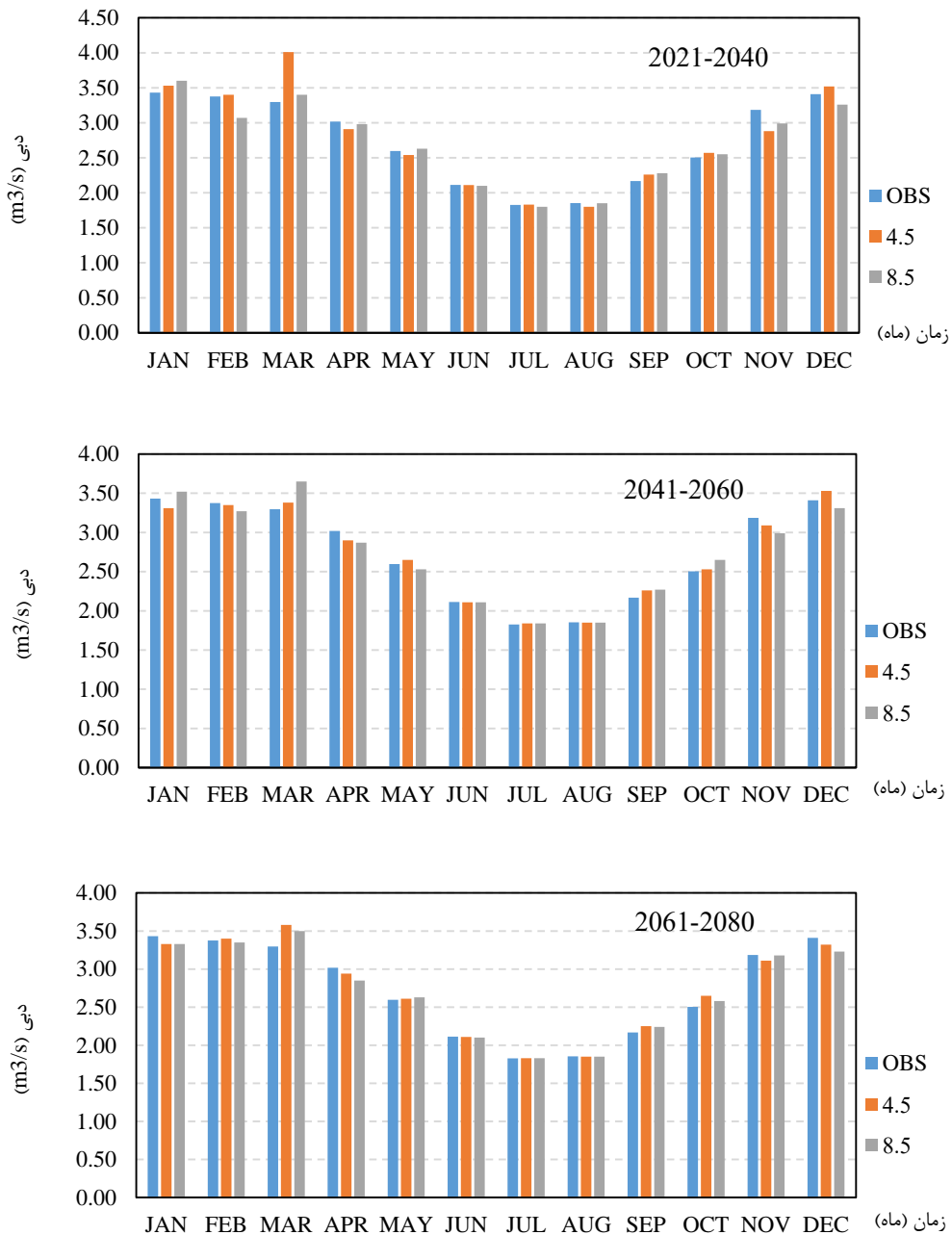
مقدار رواناب نسبت به دوره پایه بیشتر برآورد شده است. اما در سناریو RCP4.5 در ماه‌های ژانویه و مارس رواناب بیشتری برآورد شده است. در سناریوی RCP8.5 در ماه‌های نوامبر و فوریه مقدار رواناب تولیدی از همه سناریوها کمتر است. به‌طور کلی در سناریوی خوش‌بینانه RCP2.6 نسبت به سایر سناریوها مقدار رواناب بیشتری تولید شده است. در بازه ۲۰۶۰ تا ۲۰۸۰ نیز در سناریوی RCP2.6 مقدار رواناب در ماه‌های فوریه، نوامبر و سپتامبر از همه بیشتر برآورد شده است و به‌طور کلی عملکرد بهتری از نظر تولید رواناب نسبت به سایر سناریوها دارد.

طبق شکل ۱۳ در مدل HADGEM2 تحت سناریوی RCP2.6 میزان رواناب در ماه‌های ژانویه، فوریه، آوریل، اکتبر، نوامبر و دسامبر کاهش یافته است. اما مقدار اختلاف نسبت به دوره مشاهداتی بسیار ناچیز است. در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در ماه ژانویه میزان اختلاف با دوره پایه قابل توجه است. ولی در ماه‌های می و ژوئن اختلاف ناچیزی است. در حالت کلی در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ در نیمه دوم سال مقدار رواناب بیشتر برآورد شده است. مقادیر شبیه‌سازی رواناب در سناریوی خوش‌بینانه RCP2.6 نزدیک به مقدار پایه است. در بازه زمانی ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۰ در سناریوی RCP2.6 در ماه‌های ژانویه، اکتبر و دسامبر

RCP8.5 در ماه‌های ژانویه و جولای بیشترین میزان رواناب تولیدی را دارد. کمترین مقدار رواناب در این بازه مربوط به ماه ژانویه و در سناریوی RCP4.5 است. به‌طور کلی سناریوی RCP8.5 بیشترین مقدار رواناب را در کل بازه برآورد می‌کند. در بازه زمانی ۲۰۶۰ تا ۲۰۸۰ در ماه‌های مارس، سپتامبر و اکتبر بیشترین برآورد رواناب مربوط به سناریوی RCP4.5 است. کمترین میزان رواناب در این بازه مربوط به سناریوی RCP8.5 و در ماه‌های دسامبر، اکتبر و آوریل است.

تولید رواناب تحت تاثیر مدل MIROC5 با بهره‌گیری از سناریوهای مختلف اقلیمی

در مدل MIROC5 در بازه ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ در سناریوی RCP4.5 در ماه‌های مارس و دسامبر بیشترین مقدار رواناب برآورد شده است. سناریوی RCP8.5 در ماه‌های ژانویه، سپتامبر و می بیشترین مقدار رواناب را برآورد می‌کند. به‌طور کلی در این بازه زمانی بیشترین مقدار رواناب تولیدی مربوط به سناریوی RCP4.5 است. در بازه ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۰ سناریوی



شکل ۱۴. نتایج رواناب مدل MIROC5 در دوره های آتی

## نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم و پیامدهای ناشی از آن یکی از مشکلات اساسی در مدیریت منابع آب است و برآورد آثار و تبعات آن در دوره آتی ضروری است. در این پژوهش برای برآورد دما و بارش در دوره آتی از مدل‌های گردش عمومی AOGCM استفاده شد. برای اعتبارسنجی و ارزیابی دقت برآورد مدل‌های گردش عمومی و برازش داده‌ها از شاخص‌های RMSE، MAE و NS بهره گرفته شد. نتایج نشان داد در تمامی سناریوهای اقلیمی، الگوی تولید رواناب ماهیانه با الگوی تغییرات بارندگی در ماه‌های مختلف در این سناریوها مطابقت دارد. نتایج نشان داد بر اساس تغییرات دما و بارش در سناریوهای مختلف، مقدار کاهش یا افزایش رواناب در ماه‌های مختلف متفاوت بوده و از نظم خاصی پیروی نمی‌کند. لذا برای اینکه بتوان در طول سال با حداکثر مطلوبیت از رواناب تولیدی در حوضه استفاده کرد، باید در مکان‌های مناسب در حوضه اقدام به احداث سازه‌های تنظیم و کنترل جریان و یا سدهای مخزنی نمود. با استفاده از این سازه‌ها علاوه بر مدیریت و کنترل سیلاب می‌توان بخشی از رواناب تولیدی در ماه‌های پرآب (اواخر پاییز تا اوایل بهار) را ذخیره نموده و در ماه‌های خشک (اواخر بهار تا اوایل پاییز) مصرف نمود.

به‌طور کلی نتایج حاکی از آن است که تغییرات حجم رواناب تولیدی سالیانه تحت سناریوهای اقلیمی Rcp2.6، Rcp 4.5 و Rcp 8.5 برای دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ نسبت به دوره پایه ۲۰۱۸-۱۹۹۱ به‌طور میانگین بین ۶۰ تا ۸۷ میلیون متر مکعب متغیر است. میزان تغییرات حجم رواناب سالیانه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ در بیشتر سناریوها ناچیز است. در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ حجم رواناب سالیانه در اکثر سناریوها بین ۳ تا ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج این تحقیق، کاهش بارش و افزایش دما و به موجب آن افزایش تبخیر، باعث تغییراتی در چرخه آب و هوایی موجود شده که کاهش رواناب را به دنبال داشته است. لذا لازم است برای سازگاری و کاهش تبعات منفی ناشی از تغییر اقلیم بر منابع آب منطقه، با بکارگیری مدیریت صحیح منابع آب و در نظر گرفتن نیاز

کشاورزی، مصارف شرب، صنعت و زیست‌محیطی در سال‌های آتی، از آثار سوء تغییر اقلیم بر منابع آب منطقه کاست، تا به حفظ هر چه بهتر این منابع منجر گردد. نکته قابل توجه دیگر این است که در اکثر سناریوهای اقلیمی جابجایی بارندگی اتفاق افتاده است. لذا باید متناسب با تغییرات میزان بارش در ماه‌های مختلف نسبت به تغییر الگوی کشت یا تغییر تاریخ کشت محصولات مختلف اقدام نمود. این امر مستلزم بازنگری در محاسبات نیازآبی در سند ملی کمیته ملی آبیاری و زهکش است. این سند تنها بر اساس داده‌های تاریخی گذشته اقدام به محاسبه نیازآبی ماهیانه می‌نماید و توجهی به تغییرات اقلیمی آینده ندارد. برای افزایش دقت محاسبات سند ملی می‌توان حداقل هر ۵ سال یکبار محاسبات آن بر اساس داده‌های اقلیمی جدید دما و بارش بروزرسانی کرد و یا برای کشت‌های استراتژیک که حساس به کم آبی هستند اثرات سناریوهای اقلیمی آینده بر تولید محصول را شبیه‌سازی نمود تا از ایجاد خسارات جبران‌ناپذیر جلوگیری گردد یا اثرات مخرب آن را به حداقل رسانده شود. بر این اساس باید با توجه به تغییرات دمایی در سال‌های آتی نسبت به تغییر تاریخ کاشت محصولات تجدید نظر نمود تا عملکرد محصولات دچار کاستی نشود. لازم به ذکر است این تحقیق دارای محدودیت‌هایی است که در انجام تحقیقات مشابه باید به آن توجه داشت. پراکنش نامناسب، طول دوره آماری ناکافی و نقص داده‌های هواشناسی در اکثر مناطق برای ارزیابی درست مدل‌های تغییر اقلیم از محدودیت‌های این تحقیق است. از دیگر محدودیت‌های این تحقیق عدم قطعیت مدل‌های مختلف تغییر اقلیم در برآورد داده‌های آبی بارندگی و دما است. اکثر این مدل‌ها بر اساس داده‌های محدود توسعه یافته‌اند در حالی که پدیده تغییر اقلیم یک پدیده بزرگ‌مقیاس از نظر زمانی و مکانی است. استفاده از آمار ۳۰ یا ۴۰ ساله برای برآورد تغییرات اقلیمی در ۱۰۰ سال آینده همواره با خطا همراه خواهد بود. از منابع خطای دیگر تخمین پارامترهای موثر در محاسبه رواناب در مدل SWAT است که همواره با به‌کار بردن داده‌های جدید هواشناسی ممکن است مقدار خطای آن افزایش یابد و نیاز به ارزیابی مجدد داشته باشد.

## Reference:

- Amirabadizadeh, M., Ghazali, A. H., Huang, Y. F. and Wayayok, A. (2017). Assessment of impacts of future climate change on water resources of the Hulu Langat basin using the swat model. *Water Harvesting Research*, 2 (2), 13-29.
- Amiri, S., Rajabi, A., Shabanlou, S. et al. Prediction of groundwater level variations using deep learning methods and GMS numerical model. *Earth Sci Inform* 16, 3227–3241 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01052-1>
- Acharyya, A. (2014). Groundwater, Climate Change and Sustainable Well Being of the Poor: Policy options for South Asia, China and Africa. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 157, 226–235.
- Alizadeh, A., Rajabi, A., Shabanlou, S. et al. Modeling long-term rainfall-runoff time series through wavelet-weighted regularization extreme learning machine. *Earth Sci Inform* 14, 1047–1063 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00603-8>
- Alizadeh, A., Rajabi, A., Shabanlou, S., Yaghoubi, B., and Yosefvand, F. (2021) Simulation of rainfall and runoff time series using robust machine learning. *Irrig and Drain.*, 70: 84–102. <https://doi.org/10.1002/ird.2518>.

- Ansari, H., Khadivi, M., Salehnia, N., and Babaeian, I. (2014). Evaluation of Uncertainty LARS Model under Scenarios A1B, A2 and B1 in Precipitation and Temperature Forecast (Case Study: Mashhad Synoptic Stations). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(4), 664-672. (In Persian)
- Azizi, E., Yosefvand, F., Yaghoubi, B. et al. Prediction of groundwater level using GMDH artificial neural network based on climate change scenarios. *Appl Water Sci* 14, 77 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02126-1>
- Busico, G., Colombani, N., Fronzi, D., Pellegrini, M., Tazioli, A. and Mastrocicco, M. (2020). Evaluating SWAT model performance, considering different soils data input, to quantify actual and future runoff susceptibility in a highly urbanized basin, *Journal of Environmental Management*, 266, 110625. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110625>
- Ebrahimi, P., Salimi Kochi, J. and Mohseni Saravi, M. (2018). Calibration and validation of SWAT Model in runoff simulation, case study: Neka Watershed. *Watershed Engineering and Management*. 10 (3), 266-279. (In Persian)
- Fallahi, M.M., Shabanlou, S., Rajabi, A. et al. Effects of climate change on groundwater level variations affected by uncertainty (case study: Razan aquifer). *Appl Water Sci* 13, 143 (2023). <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01949-Farsi>, N. and Mahjouri, N. (2019), Evaluating the contribution of the climate change and human activities to runoff change under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 574, 872-891. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.028>
- Fatehi, Z., and Shahoei, S. V. (2020). Application of SWAT Model for Simulating Monthly Runoff, Lake Urmia Watershed in Kurdistan Province, Iran. *Environment and Water Engineering*. 6 (3), 294-304. (In Persian)
- Gord, S., Hafezparast Mavaddat, M. and Ghobadian, R. (2024). Flood impact assessment on agricultural and municipal areas using Sentinel-1 and 2 satellite images (case study: Kermanshah province). *Natural Hazards* 120, 8437–8457. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06514-3>
- Gulacha, M.M., and Mulungu, D.M.M. (2017). Generation of climate change scenarios for precipitation and temperature at local scales using SDSM in Wami-Ruvu River Basin Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100, 62-72.
- Hosseinikhah, M., Zeinivand, H., Haghizadeh, A., and Tahmasebipour, N. (2014). Validation of Global Climate Models (GCMs) Temperature and Rainfall Simulation in Kermanshah, Ravansar and West Islamabad Stations. *Iranian journal of Ecohydrology*, 1(3), 195-206. (In Persian)
- IPCC, (2014). Summary for policymakers. In: *Climate Change. 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part a: Global and Sectoral Aspect. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* cambridge University Press, cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-132.
- Javadinejad, S., Dara, R., Jafary, F. (2020). Climate Change Scenarios and Effects on Snow-Melt Runoff. *Civil Engineering Journal*, 6(9), 1715-1730. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091577>
- Jiang, R., Li, Y., Wang, Q., Kuramochi, K., Hayakawa, A., Woli, K. P. and Hatano, R. (2011). Modeling the water balance processes for understanding the components of river discharge in a non-conservative watershed. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 54 (6), 2171-2180. <https://doi.org/10.13031/2013.40656>
- Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J. and Pulido-Velazquez, D. (2018). A comparison of SWAT and ANN models for daily runoff simulation in different climatic zones of peninsular Spain. *Water*, 10, 192.
- Kamal, A. and Massahbavani, A. (2012). The uncertainty assessment of AOGCM & hydrological models for estimating gharesu basin temperature, precipitation, and runoff under climate change impact. *Iranian Water Research Journal*, 5(9), 39-49. (In Persian)
- Kumar, C. P. and Singh, S. (2015). Climate change effects on groundwater resources. *Octa Journal of Environmental Research*, 3(4), 264-271.
- Melaku, N. D., Renschler, C. S., Holzmann, H., Strohmeier, S., Bayu, W., Zucca, C., Ziadat, F. and Klik, A. (2018). Prediction of soil and water conservation structure impacts on runoff and erosion processes using SWAT model in the northern Ethiopian highlands. *Journal of Soils and Sediments*, 18, 1743–1755. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1901-3>
- Naqash, T. B., Ahanger, M. A. and Maity, R. (2023). Impacts of hydrometeorological factors on discharge simulation in the North West Himalayas: a SUFI-2 algorithm-driven investigation using the SWAT model. *Environmental Monitoring and Assessment*. 195, 1366. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11916-0>
- New, M. and Hulme, M. (2000). Representing uncertainty in climate change scenarios: a Monte-Carlo approach. *Integrated Assessment*, 1, 203–213.
- Rafiei Emam, A., Kappas, M., Linh, N. H. K. and Renchin, T. (2017). Hydrological Modeling and Runoff Mitigation in an Ungauged Basin of Central Vietnam Using SWAT Model. *Hydrology*, 4 (1), 16. <https://doi.org/10.3390/hydrology4010016>
- Rasoolzadeh darzi, N., Ahmadi, H., Moeini, A. and Motamedvaziri, B. (2022). The Use of the SWAT Model in the Simulation and Analysis of Hydrological Uncertainty Analysis. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 11 (2), 77-95. (In Persian)



- Sadat Ashofte, P. and Bozorg Hadad, O. (2014). A New Probabilistic Approach for Evaluation of the Effects of Climate Change on Water Resources. *Water Resources Engineering*, 6(19), 51-66. (In Persian)
- Shahoei, S. V., Porhemmat, J., Sedghi, H., Hosseini, M. and Saremi, A. (2018). Monthly runoff simulation through SWAT hydrological model and evaluation of model in calibration and validation periods, case study: Ravansar Sanjabi Basin in Kermanshah Province, Iran. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 464-477. (In Persian)
- Sokolowski, J. and Banks, C. (2011). Principles of modeling and simulation: a multidisciplinary approach. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- Soltani, K.; Ebtehaj, I.; Amiri, A.; Azari, A.; Gharabaghi, B.; Bonakdari, H. (2021). Mapping the spatial and temporal variability of flood susceptibility using remotely sensed normalized difference vegetation index and the forecasted changes in the future. *Science of The Total Environment*. 770, 145288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145288>
- Tasdighi, A., Arabi, M., Harmel, H. (2018). A probabilistic appraisal of rainfall-runoff modeling approaches within SWAT in mixed land use watersheds, *Journal of Hydrology*, 564, 476-489. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.035>
- Teutschbein, C. and Seibert, J. 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*. 456-458, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Vilaysane, B., Takara, K., Luo, P., Akkharath, I. and Duan, W. (2015). Hydrological stream flow modelling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone river basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 380-390. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.047>
- Wang, Y., Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., Yan, D. and Yang, S. (2019). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: A Systemic Review. *Journal of Coastal Research*. 93(sp1): 22. <https://doi.org/10.2112/SI93-004.1>
- Wilby, R. and Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames. UK, *Water Resources Research*, 42(2), 1-10.
- Wooten, A. W., Dixon, K. W., Adams-Smith, D. J. and McPherson, R. A. (2021). Statistically downscaled precipitation sensitivity to gridded observation data and downscaling technique. *International Journal of Climatology*. 41 (2), 980-1001. <https://doi.org/10.1002/joc.6716>
- Zhuhua, LV., Junjie, Z., Rodriguez, D. (2020). Predicting of Runoff Using an Optimized SWAT-ANN: A Case Study, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 29, 100688. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100688>

## یادداشت‌ها

<sup>1</sup> Atmosphere- Ocean General Circulation Model<sup>2</sup> Statistical DownScaling Model<sup>3</sup> Wami-Ruvu<sup>4</sup> US Agricultural Research Service<sup>5</sup> Assessment Report-5<sup>6</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change<sup>7</sup> Delta<sup>8</sup> Change Factor<sup>9</sup> Historical<sup>10</sup> Root-Mean-Square Error<sup>11</sup> Mean Absolute Error<sup>12</sup> Nash-Sutcliffe