



## Adaptation to Climate Change in Maroon Basin

Mostafa Mirmehdi<sup>1</sup>, Mojtaba Shourian<sup>2✉</sup>, Ahmad Sherafat<sup>3</sup>

1. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: [mirmehdi@gmail.com](mailto:mirmehdi@gmail.com)
2. Corresponding Author, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: [m\\_shourian@sbu.ac.ir](mailto:m_shourian@sbu.ac.ir)
3. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: [a.sharafati@srbiau.ac.ir](mailto:a.sharafati@srbiau.ac.ir)

---

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Aug. 6, 2022

**Revised:** Dec. 5, 2022

**Accepted:** Dec. 7, 2022

**Published online:** Jan. 22, 2022

**Keywords:**

Adaptation,  
Climate change,  
Water resources planning,  
LARS-WG,  
SWAT,  
MODSIM.

---

### ABSTRACT

Climate change is one of the critical environmental issues that has significantly influenced the water resources availability in recent years. The purpose of this research is to investigate the climate change adaptation strategies in Maroon Basin, Iran, to balance the pre-defined water demands and the future supplies by changing the area and pattern of cultivation in the basin. To investigate the impacts of climate change on precipitation, temperature, and inflow to Maroon Dam, simulations of five General Circulation Models (GCMs) namely MIROC-ESM, MPI-ESM-MR, HadGEM2-ES, EC-EARTH, and GFDL-ESM2M were studied at three future periods of 2021-2040, 2041-2060, and 2061-2080. First, Maroon Dam inflow was simulated using the SWAT hydrological model. Then the model was calibrated and validated against monthly flow at the Idanak and Tang-e-Takab hydro-stations. The Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) index at Idanak and Tang-e-Takab stations were estimated 0.69 and 0.67 for the calibration and 0.65 and 0.59 for the validation step. The downscaling of precipitation and temperature data under the four RCP scenarios was done using the LARS-WG model. The calibrated SWAT model was forced using the downscaled data to simulate the inflow to the dam during the three future periods. The results showed that the temperature increase projected in the catchment would significantly reduce the runoff formation in the catchment, despite the projected increase in the precipitation. The present and future Maroon Dam inflow were used as essential inputs to the MODSIM model. Water allocation to each requirement in all the periods was done by collecting other necessary information and calculating the reliability performance index. Compared with the current status, on average, allocation to the defined demands will reduce by 2 to 6.25 percent. In this research, an attempt has been made to maintain the cultivated area and reliability index in the current status by altering the cultivation pattern. Therefore, 9% decrease in alfalfa plantation area, 15% decrease in autumn grain maize, 17% decrease in wheat, 5% decrease in potato and 9% increase in barley and sesame, 15% increase in autumn silage maize, 17% increase in tomato, and 5% increase in bean in class B3 (as the most effective climate change conditions), would fulfill the premise of the study to maintain the overall cultivation area and reliability index under the climate change impacts.

---

Cite this article Mirmehdi, M., Shourian, M., Sherafat, A. (2023). Adaptation to Climate Change in Maroon Basin, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (11), 2533-2549. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346850.669336>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346850.669336>



## سازگاری با شرایط تغییر اقلیم در حوضه آبریز مارون

مصطفی میرمهدی<sup>۱</sup>، مجتبی شوریان<sup>۲</sup>✉، احمد شرافتی<sup>۳</sup><sup>۱</sup>. دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، ایمیل: [mirmehdi@gmail.com](mailto:mirmehdi@gmail.com)<sup>۲</sup>. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، ایمیل: [m\\_shourian@sbu.ac.ir](mailto:m_shourian@sbu.ac.ir)<sup>۳</sup>. دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، ایمیل: [a.sharafati@srbiu.ac.ir](mailto:a.sharafati@srbiu.ac.ir)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱

## واژه‌های کلیدی:

سازگاری،  
تغییر اقلیم،  
برنامه‌ریزی منابع آب،  
LARS-WG،  
SWAT،  
MODSIM.

در سال‌های اخیر تغییر اقلیم ناشی از افزایش دما، از جمله مسائل مهم زیست محیطی بوده است که اثرات قابل توجهی بر منابع آب شیرین گذاشته است. هدف از این تحقیق بررسی سازگاری منابع و مصارف آب موجود با تغییر در سطح و الگوی کشت و تحلیل نیازهای پایین دست سد مخزنی مارون تحت اثر تغییر اقلیم می‌باشد. به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش، دما و جریان ورودی به سد مارون در سه دوره‌ی (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و (۲۰۶۱-۲۰۸۰) از پنج مدل گردش عمومی جو MIROC-ESM، MPI-ESM-MR، HadGEM2-ES، EC-EARTH و GFDL-ESM2M، تحت تاثیر چهار سناریو انتشار گاز گلخانه‌ای RCP2.6، RCP4.5، RCP6، RCP8.5 استفاده شد. در مرحله نخست اثرات تغییر اقلیم بر میزان جریان ورودی به سد مارون با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی SWAT از داده‌های جریان ماهانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه ایدنک و ایستگاه تنگ تکاب استفاده شد. شاخص نش-ساتکلیف ایستگاه ایدنک در مرحله واسنجی ۰/۶۹ و اعتبارسنجی ۰/۶۵ و در ایستگاه تنگ تکاب بهمان در مرحله واسنجی ۰/۶۷ و اعتبارسنجی ۰/۵۹ به دست آمد. برای شبیه‌سازی جریان در دوره‌های آینده، بارش و دمای هوا تحت چهار سناریو ذکر شده با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس گردید و با ورود داده‌های بارش و دمای ریزمقیاس شده به مدل SWAT، جریان ورودی به سد شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که اگر چه میزان بارش در منطقه افزایش داشته اما افزایش دما در این حوضه اثر بیشتری در کاهش میزان جریان داشته است. جریان ورودی سد مارون در دوره حاضر و آینده به عنوان یکی از ورودی‌های مهم مدل MODSIM استفاده شدند. با جمع‌آوری سایر اطلاعات مورد نیاز، تخصیص آب به هر نیاز در هر دوره انجام شده و شاخص عملکردی اطمینان‌پذیری محاسبه شد. بر اساس نتایج حاصله، تغییر اقلیم بر تخصیص آب به نیازهای موجود اثرگذار بوده به گونه‌ای که میانگین تخصیص صورت‌گرفته به نیازها را حداقل ۲٪ و حداکثر ۶۲۵٪ نسبت به وضع موجود کاهش خواهد داد در این مقاله تلاش شده است با تغییر در الگوی کشت، سطح زیر کشت و شاخص اعتمادپذیری در وضع موجود را حفظ کرد. در این شرایط در دسته B3 به عنوان سخت‌ترین اثرگذاری شرایط تغییر اقلیم، می‌توان با کاهش ۹٪ سطح کشت یونجه، ۱۵٪ سطح کشت ذرت دانه‌ای پاییزه، ۱۷٪ سطح کشت گندم، ۵٪ سطح کشت سیب زمینی، و افزایش ۹٪ سطح کشت جو و کنجد، ۱۵٪ سطح کشت ذرت علوفه‌ای پاییزه، ۱۷٪ سطح کشت گوجه فرنگی و ۵٪ سطح کشت باقلا، شرایط فعلی را از نظر سطح زیر کشت و شاخص اعتمادپذیری حفظ کرد.

استاد: میرمهدی؛ مصطفی، شوریان؛ مجتبی، شرافتی؛ احمد، (۱۴۰۱). سازگاری با شرایط تغییر اقلیم در حوضه آبریز مارون، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۱)،

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346850.669336>. ۲۵۳۳-۲۵۴۹

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346850.669336>

## مقدمه

آب بعنوان یک منبع حیاتی، نیازمند مدیریت کارآمد در جهت توزیع مناسب منابع آب بوده و مصرف بهینه‌ی آن با دیدگاه توسعه پایدار یکی از مهم‌ترین چالش‌های بشری محسوب می‌شود (Mohammad Jani *et al.*, 2014). تغییرات اقلیمی علی‌الخصوص تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی، در نتیجه‌ی افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و مداخله‌های غیر اصولی در جنگل‌ها و محیط‌زیست، علاوه بر اثرات منفی در عملکرد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی حوضه‌های آبریز، می‌تواند بر ساختار اکوسیستم‌های طبیعی نیز آثار بسیار مخربی برجای بگذارد (Massah Bavani *et al.*, 2006). طبق مطالعات نهاد بین‌المللی تغییر اقلیم، تأثیر تغییرات اقلیمی و خسارت‌های ناشی از آن، اصلی‌ترین محرک مخرب در رابطه با مدیریت منابع آب در دسترس است. با در نظر گرفتن اینکه کوچک‌ترین تغییری در متغیرهای هیدرولوژیکی می‌تواند منجر به تغییرات محسوسی در عملکرد شبکه‌های جریان آب شود، راهکارهای متنوعی در جهت کاهش اثرات نامطلوب و خسارت‌های ناشی از آن ارائه شده است (IPCC, 2007). در مطالعه (Khalilian K *et al.*, 2018) اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه دشت ورامین با استفاده از مدل SWAT پرداختند. آنان آثار ناشی از تغییر اقلیم بر دما، بارش و رواناب را به کمک مدل LARS-WG در دوره‌های آبی پیش‌بینی نمودند و از مدل SWAT تحت سناریوهای اقلیمی A1B، A2، B1 کمک گرفتند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد، رواناب در فصل پاییز و زمستان کاهش و در بهار افزایش می‌یابد که این جابجایی فصلی رواناب ناشی از تأثیرات تغییر اقلیم به صورت افزایش دما، تغییر در الگوهای بارشی و... است. برنامه‌ریزی‌های مدیریتی در جهت بهره‌برداری و عملکرد مخازن ذخیره، نقش مهمی در مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبریز ایفا می‌کند (Chhuon *et al.*, 2016). افزایش بی‌رویه تقاضای آب و برداشت بیش از حد پایدار منابع آب، منجر به کاهش سطح عرضه مطمئن به ویژه برای اهداف کشاورزی در ایران شده است (Fadaeizadeh K & Shourian M, 2019). در سال‌های اخیر به دنبال نتایج تغییر اقلیم، میزان آورد جریان حوضه آبریز مارون به مخزن سد مارون روندی کاهشی داشته و عملاً تأمین نیازهای آبی در پایین‌دست را با مشکلاتی مواجه ساخته است (Zalaki-Badil *et al.*, 2017).

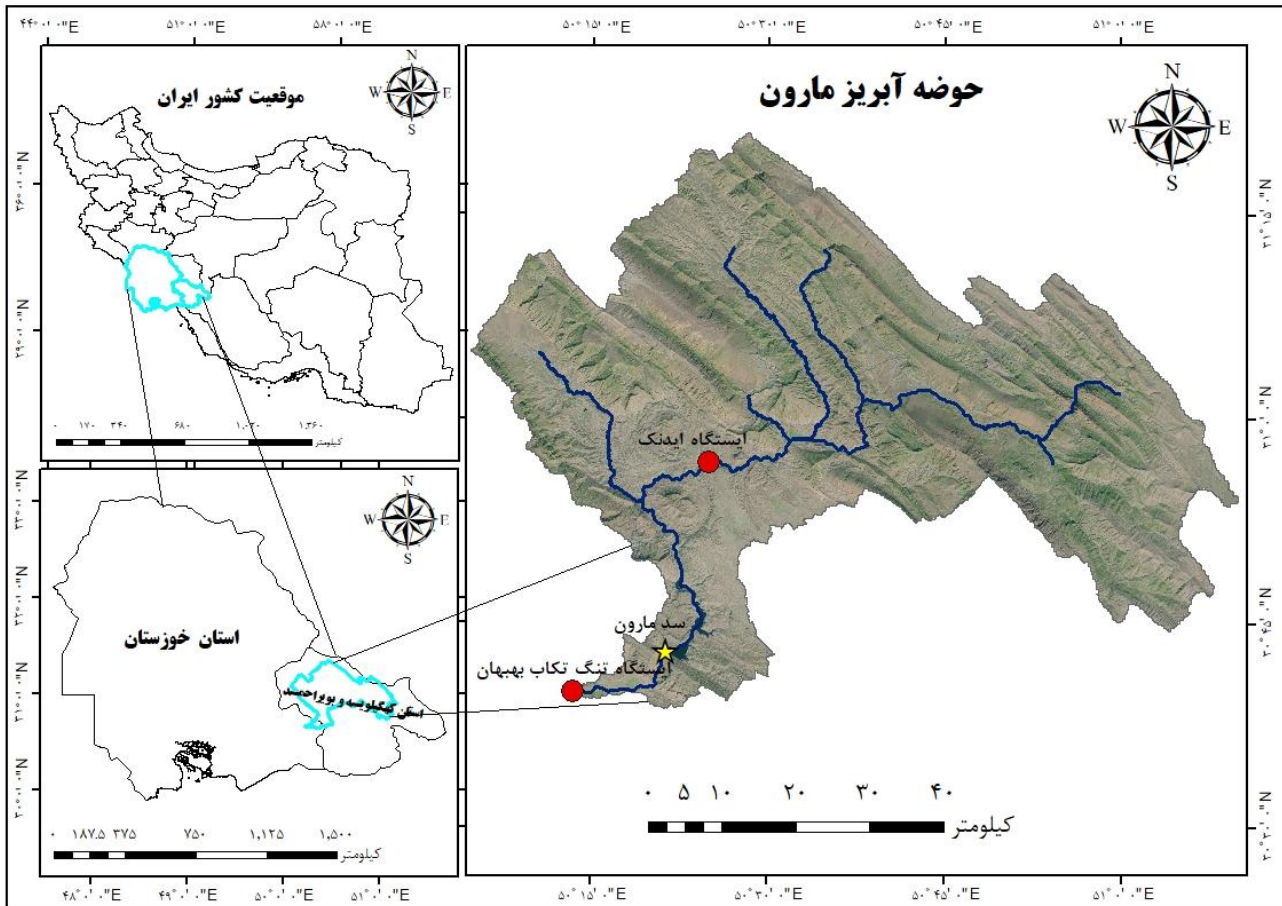
در مطالعه (Sabzadeh I *et al.*, 2014) با استفاده از قابلیت سفارشی سازی مدل MODSIM یعنی کد نویسی به زبان ویژوال بیسیک در درون مدل، واسنجی برای سه ترکیب مختلف تابع هدف انجام شد. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین و منطقی‌ترین نتایج در حالت سوم واسنجی، یعنی واسنجی با تابع هدف شامل RMSE جریان سطحی خروجی حوضه و RMSE تراز آبخوان حوضه حاصل شده است. با توجه به اینکه کشاورزی فاریاب نقش مهمی در تولیدات کشاورزی در ایران داشته و بیش از ۷۵٪ از مصرف منابع آب تجدید پذیر کشور را به خود اختصاص داده است، اثرات تغییرات اقلیم بر کشاورزی ایران در مقایسه با سایر کشورهای پرآب شدیدتر خواهد بود (Heydari N, 2017). نتایج مطالعات (Jamshidpey A, & Shourian M, 2021) نشان می‌دهد سود خالص محصولات کشاورزی از ۱/۵٪ تا ۱۷/۵٪ در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم کاهش داشته و نتایج مدل سازی کاهش سطح زیر کشت را به دنبال دارد. در مطالعه (Daneshgar H *et al.*, 2021) به عنوان مثال، مشخص شد اعمال سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه تغییر اقلیم به ترتیب موجب کاهش ۲۵/۵ و ۳۹ درصدی سطح زیر کشت دشت بوشکان در استان بوشهر خواهد شد. یافته‌های مطالعه (Soleymani M *et al.*, 2021) نشان می‌دهد دلیل وجود درک درست از رخدادهای تغییرات اقلیمی در جوامع محلی هدف، اجرای پروژه‌هایی مانند نوسازی شبکه آبیاری و توسعه آبیاری تحت فشار، کشت واریته‌های مقاوم به خشکی و متنوع سازی محصولات زراعی و باغی نقش موثری در موفقیت راهبرد سازگاری با تغییرات اقلیمی خواهد داشت. در تحقیقی دیگر که (Yibecal A.T *et al.*, 2019) در منطقه Semien Shewa در کشور اتیوپی انجام داده اند مشخص شد کشاورزان در پاسخ به تغییرات اقلیمی، با تغییر در الگوی کشت و حرکت به سمت کشت‌های با صرفه اقتصادی بالا (مصرف آب پایین تر و تولید در واحد ارزش بالاتر)، مانند کشت ماش، محصولات تولیدی خود را با شرایط جدید سازگار می‌نمایند لذا تغییر در الگوی کشت به عنوان یک استراتژی سازگاری با تغییر اقلیم به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک رایج تر است.

با توجه به مقدمه بالا و نقش تغییر اقلیم در چرخه هیدرولوژی و تغییرات در روند میزان بارش و دما و تأثیر آن بر میزان جریان، هدف از این تحقیق بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان جریان ورودی به مخزن سد مارون واقع بر روی رودخانه مارون در استان خوزستان با محوریت سازگاری بخش کشاورزی پایین دست با شرایط کم آبی ناشی از تغییرات اقلیمی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

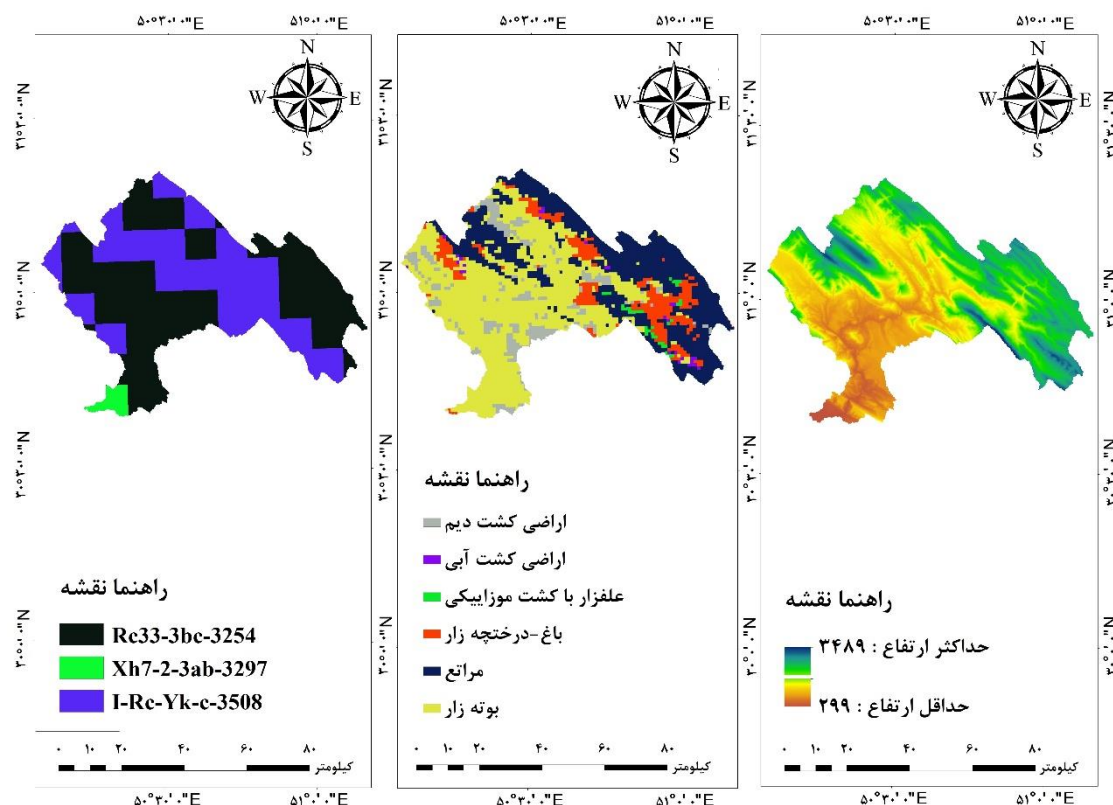
حوضه آبریز مارون در قسمت جنوب غربی ایران، با مساحت ۳۸۰۸ کیلومترمربع در استان خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد در محدوده دامنه‌های زاگرس و در موقعیت جغرافیایی  $36^{\circ}11'11.09''$  و  $49^{\circ}03'54.08''$  طول شرقی و  $30^{\circ}46'2.2''$  و  $31^{\circ}04'77.28''$  عرض شمالی واقع شده است. این رودخانه پس از اتصال شاخه‌های شب لیز، لوداب و سقاوه تشکیل می‌گردد و پس از طی مسافت ۱۲۰ کیلومتر به دریاچه سد مارون می‌رسد پس از آن با عبور از منطقه تنگ تکاب وارد دشت بهبهان شده و توسط سد انحرافی شهدا، شبکه آبیاری بهبهان و از طریق سد انحرافی جایزان، دشت جایزان و فجر را مشروب می‌کند (Naghshine et al., 2013). شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت منطقه ی مورد مطالعه در ایران

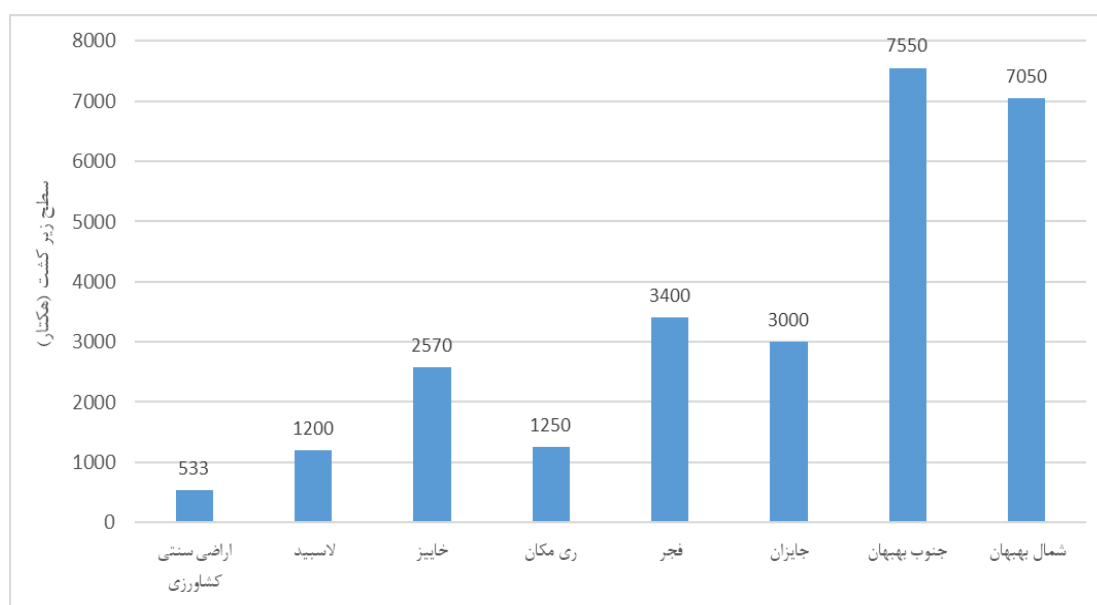
#### داده‌های مورد استفاده

داده‌های بکار رفته در این مطالعه متغیرهای اقلیمی در مقیاس روزانه و ماهانه شامل: بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، سرعت باد، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی و دبی جریان بوده که از شرکت مدیریت منابع آب ایران اخذ شد. موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل ۱ نمایش داده شده است. اطلاعات نقشه رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر دانلود گردید (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). از نقشه خاک FAO با دقت ۱۰ کیلومتری و نقشه کاربری اراضی GLCC برای سال ۱۹۹۲ با ۶ کلاس کاربری استفاده شد. همچنین اطلاعات کشاورزی از جمله نوع محصولات کشاورزی، تاریخ کاشت و برداشت محصولات، کوددهی، تعداد دور آبیاری، حجم و منبع آبیاری نیز از وزارت جهاد کشاورزی دریافت شد.



شکل ۲. (a) نقشه خاک، (b) نقشه کاربری اراضی و (c) نقشه رقومی ارتفاعی حوضه آبریز مارون

در این پژوهش، مقادیر جریان ورودی به مخزن سد مارون به عنوان جریان ورودی به مدل MODSIM در نظر گرفته شدند. آبراهه های فرعی ورودی به رودخانه مارون (آبراهه های منصور بیگی، کره سیاه و سرآسیاب) نیز در مدلسازی در نظر گرفته شدند. از جمله مهم ترین اطلاعات ورودی به مدل MODSIM می توان به اطلاعات فیزیکی مخزن سد (منحنی حجم-سطح-ارتفاع)، مقادیر تبخیر از سطح مخزن، مقادیر حجم مشاهداتی مخزن، سری زمانی نیازها از جمله نیاز کشاورزی، محیط زیستی، شرب و صنعت اشاره کرد در شکل ۳ مساحت اراضی شبکه آبیاری پایین دست مخزن سد ارائه شده است.



شکل ۳. سطوح اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری از سد مخزنی مارون

### مدل‌های تغییر اقلیم

در این تحقیق، برای پیش بینی دو پارامتر دما و بارش از مدل‌های گردش عمومی جو گزارش IPCC که تحت عنوان گزارش پنجم CMIP5 استخراج شده، استفاده شده است. برای دریافت خروجی این مدل‌ها نیاز به انتخاب سناریوهای انتشار می‌باشد که گزارش پنجم تحت ۴ سناریوی انتشار ارائه شده است و در این بین، سناریوی RCP 2.6 سناریو خوشبینانه و RCP 8.5 سناریوی بدبینانه می‌باشند. در این پژوهش به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش، دما و جریان ورودی به سد مارون در سه دوره‌ی (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و (۲۰۶۱-۲۰۸۰) از پنج مدل گردش عمومی جو EC- HadGEM2-ES، MPI-ESM-MR، MIROC-ESM، GFDL-ESM2M و EARTH، تحت تاثیر چهار سناریو انتشار گاز گلخانه‌ای RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 استفاده شد. با ترکیب ۵ مدل GCM، ۵ سری زمانی برای هر ماه با روش وزن‌دهی k-نزدیک‌ترین همسایه (KNN) وزن‌گذاری شده و در نهایت به یک سری زمانی تبدیل می‌شوند. روش وزن‌دهی k-نزدیک‌ترین همسایگان (KNN) بر اساس تفاوت بین میانگین متغیرهای آب و هوایی پیش‌بینی‌شده در طول دوره پایه و میانگین داده‌های مشاهده‌شده عمل می‌کند، وزن هر مدل در تغییرات بارش و دمای دوره‌آینده نسبت به دوره پایه ضرب می‌شود. به این ترتیب تغییرات دما و بارش در دوره آینده بدست می‌آید.

$$W_{m,i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \frac{1}{CV_{m,i}}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این معادله  $CV_{m,i}$  اختلاف بین میانگین متغیرهای اقلیمی (دما و بارندگی) شبیه‌سازی شده در شرایط پایه با مدل  $i$  و میانگین مربوطه برای ماه  $m$  از میانگین داده‌های مشاهده شده؛  $W_{m,i}$  وزن هر مدل  $i$  مربوط به میانگین بلندمدت ماه  $m$  است؛  $I$  تعداد کل مدل‌های GCM است. با توجه به بزرگ مقیاس بودن نتایج بدست آمده از خروجی‌های مدل‌های GCM از ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود. ریزمقیاس‌سازی به معنای ایجاد ارتباط بین پیش‌بینی‌کننده‌های جوی بزرگ مقیاس و متغیرهای پیش‌بینی شونده (عموما دما و بارش) در مقیاس ناحیه ای است. در این تحقیق، از مدل LARS-WG بعنوان یکی از مشهورترین weather generatorها برای این منظور استفاده شد. مدل LARS-WG یک ریزمقیاس آماری است که بر پایه‌ی توابع توزیع نیمه‌تجربی ایجاد شده که قادر به پیش‌بینی دوره‌های مرطوب و خشک آینده هستند و صحت این تولید داده را با ارائه آزمون‌های KS،  $t$  و  $F$  اعلام می‌کند (Semenov و همکاران، ۱۹۹۸). در این مدل تغییرات دمای حداقل، دمای حداکثر و میزان بارندگی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 به مدل LARS-WG معرفی و با در نظر گرفتن داده‌های مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۸۲ تا ۲۰۰۵)، برای دوره‌های آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و (۲۰۶۱-۲۰۸۰) داده‌های روزانه تولید شد.

جدول ۰۱ ویژگی‌های مدل‌های GCM

نام مدل	دقت تفکیک	توسعه دهنده
EC-EARTH	$1/125^\circ \times 1/125^\circ$	EC-Earth consortium
HadGEM2-ES	$1/25^\circ \times 1/25^\circ$	MOHC (UK)
MIROC-ESM	$2/8^\circ \times 2/8^\circ$	MIROC (Japan)
GFDL-ESM2M	$2/0.2^\circ \times 2/5^\circ$	NOAA GFDL (USA)
MPI-ESM-MR	$1/875^\circ \times 1/875^\circ$	MPIfM (Germany)

### مدل هیدرولوژیکی SWAT

مدل SWAT مخفف جمله "ابزار ارزیابی آب و خاک" است که جزو مدل‌های پیوسته، نیمه توزیعی و دارای مبنای فیزیکی می‌باشد. این مدل می‌تواند با استفاده از چرخه هیدرولوژی حوضه و فرموله کردن تمام فرآیندهای فیزیکی آن، جریان را برای هر واحد پاسخ هیدرولوژی به صورت جداگانه معین و سپس مقدار آن را برای کل حوضه موردنظر محاسبه نماید (Abbaspour et al., 2007; Arnold et al., 2012). شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی در مدل SWAT، بر پایه بیلان آبی (رابطه ۱) صورت می‌گیرد:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن:  $SW_t$ : حجم نهایی آب در خاک (میلی‌متر)،  $SW_o$ : حجم اولیه آب موجود در خاک (میلی‌متر)،  $R_{day}$ : حجم بارندگی در

روز  $i$  ام (میلی‌متر)،  $Q_{surf}$ : حجم رواناب سطحی روزانه  $i$  ام (میلی‌متر)،  $E_a$ : میزان تبخیر و تعرق در روز  $i$  ام (میلی‌متر)،  $W_{see}$ : حجم آبی که از پروفیل خاک به ناحیه غیراشباع در روز  $i$  ام وارد می‌شود (میلی‌متر) و  $Q_{gw}$ : میزان جریان برگشتی در روز  $i$  ام (میلی‌متر) می‌باشند. برای پیکره بندی اولیه مدل از اکستنشن Arc SWAT 2012 در محیط Arc GIS 10.3 استفاده شد. با وارد کردن نقشه لایه‌های رقمی ارتفاع با دقت ۳۰ متر، شبکه آبراهه ترسیم و حوضه با مساحت ۳۸۰۸ کیلومتر مربع به ۱۵ زیرحوضه تقسیم‌بندی گردید. از برهم نهی نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و ایجاد ۳ کلاس شیب (۰-۲۱، ۲۱-۴۱، ۴۱ > درصد) HRUها ایجاد شدند. همچنین کاربری کشاورزی و باغ به محصولات غالب منطقه شامل گندم، جو، یونجه و برنج به عنوان محصولات زراعی و سیب و گردو به عنوان محصولات باغی مشخص شدند. سپس اطلاعات مربوط به بارش و درجه حرارت روزانه به مدل وارد شده و روش هارگریوز-سامانی برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل انتخاب شد همچنین جهت کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدلسازی از آمار ماهانه دبی ایستگاه‌های ایدنک و تنگ تکاب به‌بهان استفاده شد. برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل سوات از نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل SWAT از نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. این نرم‌افزار قادر است با روش‌های SUFI2، GLUE، PSO، PARASOL و MCMC عملیات کالیبراسیون و اعتبارسنجی را انجام دهد. در این تحقیق برای تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترها، واسنجی و اعتبارسنجی از روش SUFI2 استفاده شد. برای انجام واسنجی از داده‌های دبی ماهانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه ایدنک برای سال (۱۳۶۰-۱۳۷۸) و ایستگاه تنگ تکاب برای سال (۱۳۶۰-۱۳۷۸) و برای اعتبارسنجی ایستگاه ایدنک سال (۱۳۷۹-۱۳۹۷) و ایستگاه تنگ تکاب سال (۱۳۸۷-۱۳۷۹) استفاده شد. ارزیابی عملکرد و دقت شبیه‌سازی مدل SWAT با استفاده از نمایه‌های آماری ضریب تعیین  $R^2$ ، ضریب نش‌ساتکلیف NSE، r-factor و p-factor انجام شد. هرچه ضریب تعیین و نش‌ساتکلیف بالاتر و نزدیک به ۱ باشد نشان‌دهنده همخوانی بیشتر مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر مشاهده‌ای است (Nash & Sutcliffe, 1970).

#### مدل تخصیص منابع آب MODSIM

MODSIM یک نرم افزار جامع تصمیم‌یار برای شبیه‌سازی و مدیریت حوضه‌های آبریز می‌باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ در دانشگاه ایالتی کلرادو منتشر شد و با این پیشینه طولانی در میان بسته‌های نرم افزاری مدیریت حوضه آبریز، تنها نرم افزاری است که به طور پیوسته مورد استفاده قرار گرفته و بروزسانی شده است در این تحقیق، از این مدل به منظور تعیین میزان آب تخصیص‌یافته به نیازهای مختلف در وضعیت موجود (۱۳۸۱-۱۳۹۷) و تحت سناریوهای تغییر اقلیم (8.5 و 6.0 و 4.5 و 2.6 RCP) استفاده شده است. این مدل مبتنی بر 'DSS'، از الگوریتم بهینه‌سازی تک‌مرحله‌ای استفاده می‌کند (Vaghefi et al., 2017; Shourian et al., 2008). این مدل با برآورد معادله تعادل جرم در سراسر شبکه، آب بهینه را با استفاده از یک راه‌حل متوالی از مسئله بهینه‌سازی خطی برای هر مرحله زمانی اختصاص می‌دهد. مسئله بهینه‌سازی، هزینه‌های تخصیص را با توجه به برآورد معادله تعادل جرم به حداقل می‌رساند. روابط ریاضی مسئله بهینه‌سازی مدل MODSIM برای هر گام زمانی  $t = \{1, \dots, T\}$  به صورت زیر است:

$$\text{minimize } \sum_{\ell \in A} w_{\ell t} q_{\ell} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\text{subject to:} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{\ell \in I_i} q_{\ell} = b_{it} \quad \text{for all nodes } i \in N$$

$$l_{\ell t} \leq q_{\ell} \leq u_{\ell t} \quad \text{for all links } \ell \in A \quad \text{رابطه (۵)}$$

در روابط فوق،  $A$  مجموعه‌ی تمامی خطوط اتصال<sup>۲</sup> موجود در شبکه منابع آب،  $N$  مجموعه‌ی تمامی گره‌های<sup>۳</sup> موجود در شبکه،  $O_i$  مجموعه‌ی تمامی خطوط اتصال خروجی<sup>۴</sup> از گرهی  $i$ ،  $I_i$  مجموعه‌ی تمامی خطوط اتصال ورودی<sup>۵</sup> از گرهی  $i$ ،  $b_{it}$  مقدار عرضه (مثبت) یا تقاضا (منفی) در گرهی  $i$ ،  $q_{\ell}$  مقدار جریان ورودی به خط اتصال  $\ell$ ،  $w_{\ell t}$  هزینه، فاکتور وزنی یا اولویت حبابه در واحد جریان ورودی برای

<sup>۱</sup> Decision Support System

<sup>۲</sup> Links

<sup>۳</sup> Nodes

<sup>۴</sup> Outflow links

<sup>۵</sup> Inflow links



خط اتصال  $l$  که می‌تواند متناسب با هر گام زمانی  $t$  تغییر کند،  $l_{\ell t}$  و  $u_{\ell t}$  نیز مقادیر حداقل و حداکثر جریان مشخص شده برای خط اتصال  $l$  می‌باشند.

### شاخص اعتمادپذیری

به منظور ارزیابی میزان آب تخصیص یافته تحت حالات مختلف، از شاخص عملکردی اطمینان‌پذیری استفاده شد. اطمینان‌پذیری بیانگر این است که با چه احتمالی آب اختصاص یافته به مصرف‌کننده موردنظر، نیاز آن را تامین خواهد کرد. در این پژوهش به منظور محاسبه اطمینان‌پذیری از رابطه ۵ استفاده شده است:

$$\alpha_{T_i} = \frac{n}{N} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن  $\alpha_{T_i}$  اطمینان‌پذیری زمانی نیاز  $i$ ،  $n$  تعداد ماه‌هایی است که نیاز  $i$  تأمین شده است و  $N$  تعداد کل ماه‌ها می‌باشد.

### تغییر اقلیم بر اساس خروجی GCMs

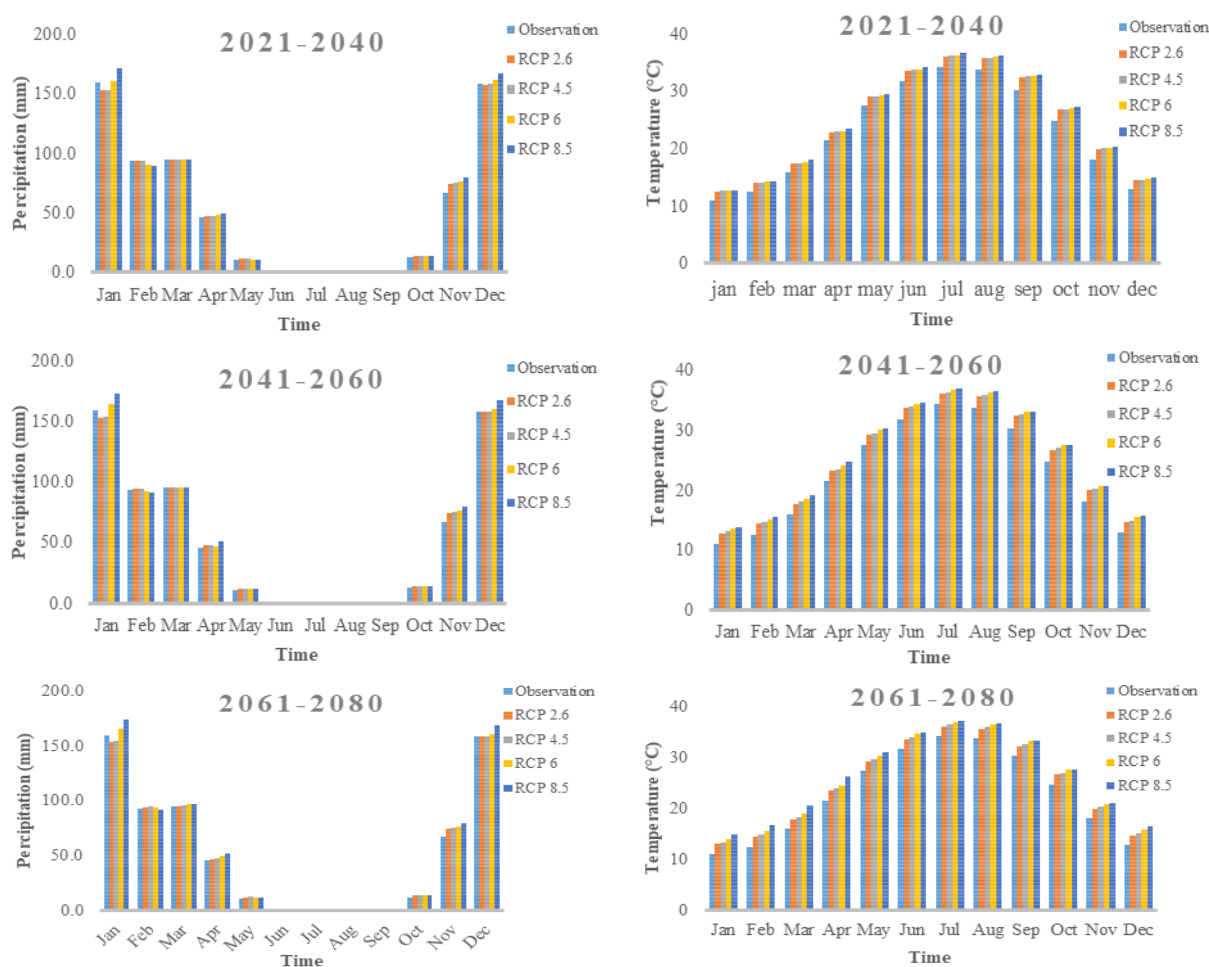
میانگین ماهانه بارش در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، دوره آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و دوره آینده دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰) تحت سناریو RCP8.5 در همه ی ماه‌ها بجز ماه فوریه (بهمن) نسبت به شرایط پایه افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین افزایش در ماه‌های ژانویه، نوامبر، و دسامبر (دی، آبان و آذر) به ترتیب به میزان ۷/۵، ۱۸/۴ و ۵/۴ درصد در دوره آینده نزدیک، ۸/۲، ۱۸/۸ و ۵/۸ درصد در دوره آینده میانی و ۹، ۱۹/۱۹ و ۶/۳۲ درصد در دوره آینده دور نسبت به شرایط پایه افزایش یافته است. همچنین میانگین بارش ماهانه تحت سناریو RCP4.5 نسبت به شرایط پایه در همه ماه‌ها به جز ماه ژانویه (دی) افزایش می‌یابد. به طوریکه بیشترین افزایش در ماه‌های اکتبر و نوامبر (مهر و آبان) به ترتیب به میزان ۱۵ و ۱۱/۵ درصد در دوره آینده نزدیک، ۱۵/۵۴ و ۱۱/۶۶ درصد در دوره آینده میانی و ۱۶ و ۱۲ درصد در دوره آینده دور نسبت به شرایط پایه افزایش یافته است. در سناریو خوشبینانه RCP2.6 میانگین بارش ماهانه نسبت به شرایط پایه در همه ماه‌ها بخصوص در ماه‌های اکتبر و نوامبر (مهر و آبان) افزایش یافته اما در ماه‌های ژانویه و دسامبر (دی و آذر) به ترتیب به میزان ۴، ۵/۰ و ۴/۰ درصد در دوره آینده نزدیک، در ماه‌های ژانویه و دسامبر (دی و آذر) به ترتیب به میزان ۴ و ۲۲/۰ درصد در دوره آینده میانی و ۴ و ۱/۰ درصد در دوره آینده دور نسبت به شرایط پایه کاهش یافته است. در سناریو RCP6 در همه ی ماه‌ها بجز ماه فوریه (بهمن) نسبت به شرایط پایه افزایش می‌یابد اما نسبت به RCP4.5 این میزان میانگین ماهانه بارش کمتر می‌باشد بطور کلی در فرآیند تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه، میانگین بارش و دما افزایش داشته ولی افزایش دما در این حوضه چشمگیرتر بوده است. میانگین دمای سالانه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 در همه ماه‌های دوره‌های آینده نسبت به شرایط پایه افزایش یافته است. افزایش دما در سناریوی بدبینانه RCP8.5 نسبت به ۳ سناریوی دیگر بیشتر می‌باشد که با نتایج (Azari et al., 2016) همخوانی دارد. بیشترین افزایش میانگین دما تحت سناریو RCP8.5 در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر (دی، بهمن، اسفند و آذر) به ترتیب به میزان ۱۴/۸۵، ۱۵/۵۷، ۱۳ و ۱۶/۸۸ درصد در دوره آینده نزدیک، ۲۵/۱۴، ۲۴/۸۲، ۲۰/۶۶ و ۲۲/۵۵ درصد در دوره آینده میانی و ۳۴، ۳۴/۳۸ و ۲۸/۲۱ درصد در دوره آینده دور نسبت به شرایط پایه افزایش یافته است. همچنین بیشترین افزایش میانگین دما در سناریوی RCP4.5 در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر (دی، بهمن، اسفند و آذر) به ترتیب به میزان ۹/۷۴ و ۱۳/۳۹ درصد در دوره آینده نزدیک، ۱۹، ۱۷/۴۷، ۱۳ و ۱۵/۷۲ درصد در دوره آینده میانی و ۲۲، ۲۰/۲۰، ۱۵ و ۱۷/۴۳ درصد در دوره آینده دور نسبت به شرایط پایه افزایش یافته است. تغییرات بلندمدت ماهانه میانگین دما نشان می‌دهد که بیشترین مقدار افزایش دما در ماه‌های فصل زمستان رخ خواهد داد. این در حالی است که حوضه آبریز سد مارون داری بیشترین حجم بارش در ماه‌های فصل زمستان می‌باشد.

### کالیبراسیون، صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT

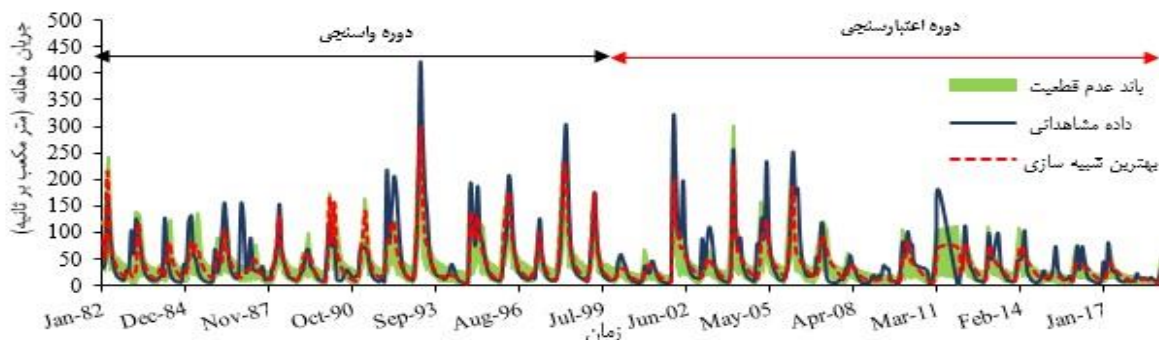
براساس نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل SWAT، ۲۰ پارامتر به عنوان حساس‌ترین پارامترها شناسایی شدند که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. پارامتر شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی (CN2) بیش‌ترین تأثیر را بر دبی خروجی از حوضه داشته است که این پارامتر به میزان زیادی تحت تأثیر کاربری اراضی و نوع خاک منطقه است. بنابراین، تأثیر عمده‌ای بر مؤلفه‌های بیلان آب دارد که مطالعاتی همچون (Yang et al., 2008) نیز آن را به عنوان حساسترین پارامترها دانستند. پس از پارامتر CN2، با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه کوهستانی می‌باشد پارامترهای SMTMP و SMFMN، در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند که در مرحله واسنجی با تغییر این پارامترها مقادیر بهینه بدست آمد که با یافته‌های (Tuo et al., 2018 ; Rahman et al., 2012) همخوانی دارد. بعد از مرحله تحلیل



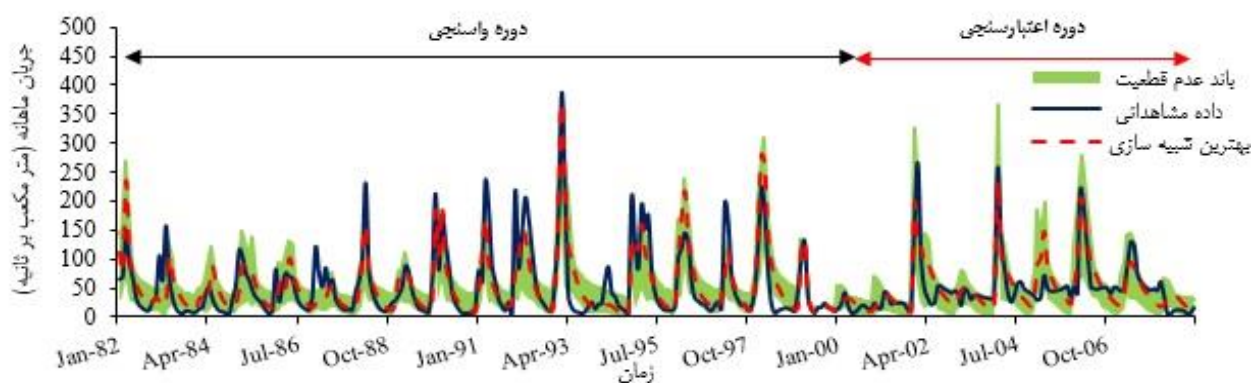
حساسیت، به کمک نرم افزار SWAT CUP و همچنین آمار ماهیانه دبی در ایستگاه‌های ایدنک و تنگ تکاب، واسنجی و اعتبارسنجی مدل صورت گرفت و در نهایت ارزیابی مدل با استفاده از دو شاخص ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب نش-سانتکلیف (N-S) انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی رواناب توانایی قابل قبولی داشته و روند تغییرات جریان در مرحله واسنجی به خوبی شبیه‌سازی شده است. این نتایج با مطالعات انجام شده توسط (Moriasi *et al.*, 2003) (Boithias *et al.*, 2017) همخوانی دارد. همچنین نتایج نشان داد که مدل تهیه شده قادر به شبیه‌سازی دقیق جریان‌های حداکثر نیست. از علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی جریان حداکثر در بعضی از ماه‌ها می‌توان به تعداد و توزیع ایستگاه‌های باران سنجی و تبخیرسنجی، دوره‌های آماری این ایستگاه‌ها، دقت آمار برداری به عنوان موثرترین پارامترها در شبیه سازی مدل هیدرولوژیکی اشاره کرد. در مجموع مدل SWAT قابلیت خوبی را در شبیه سازی منطقه مورد مطالعه داشته که با نتایج (Zalaki-Badil *et al.*, 2017) همخوانی دارد.



شکل ۴. تغییرات میانگین بارش و دمای ماهانه ایستگاه ایدنک در دوره های آینده تحت سناریوهای اقلیمی RCP8.5 و RCP6, RCP4.5, RCP2.6



شکل ۵. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه ایدنک با استفاده از الگوریتم SUFI-2



شکل ۶. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه تنگ تکاب بهبهان با استفاده از الگوریتم SUFI-2

جدول ۲. نتایج تحلیل حساسیت مدل

توضیحات	دامنه پارامتر			پارامتر	ردیف
	پهینه	پیشینه	کمینه		
شماره منحنی	-۰/۵۰۳	-۰/۲۸۴	-۰/۸۶۴	r_CN2.mgt	۱
دمای پایه ذوب برف	-۱/۲۷۶	۳/۴۴۵	-۱/۸۵۴	v_SMTMP.bsn	۲
فاکتور ذوب برف ۲۱ دسامبر (آذر)	۴/۱۴۶	۵/۳۰۳	۳/۸۲۲	v_SMFMN.bsn	۳
عمق آستانه آب در آبخوان کم عمق برای نفوذ به آبخوان عمیق	۲۱۵/۵۰۹	۲۹۴/۴۲۸	۱۹۶/۸۷۷	v_REVAPMN.gw	۴
ریب نفوذ آبخوان	-۰/۸۵۸	-۰/۹۰۰	-۰/۶۹۹	v_RCHRG_DP.gw	۵
متوسط طول شیب	۲۰/۸۴۵	۴۰/۸۵۴	۱۳/۱۰۱	v_SLSUBBSN.hru	۶
زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان	۲۸/۶۹۰	۴۲/۱۶۷	۵/۶۴۶	v_GW_DELAY.gw	۷
هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	۶۶/۴۳۰	۱۰۵/۵۲۲	۲۹/۶۱۶	v_CH_K2.rte	۸
فاکتور جبران تبخیر از خاک	-۰/۴۰۹	-۰/۶۸۳	-۰/۲۲۸	v_ESCO.hru	۹
متوسط تندی شیب	-۰/۴۹۹	-۰/۷۱۴	-۰/۳۲۴	r_HRU_SLP.hru	۱۰
فاکتور جریان پایه	-۰/۶۴۲	-۰/۸۷۸	-۰/۶۳۵	v_ALPHA_BF.gw	۱۱
چگالی ظاهری خاک	-۰/۵۰۵	-۰/۸۸۴	-۰/۴۴۲	r_SOL_BD().sol	۱۲
متوسط آب قابل استفاده	-۰/۱۸۵	-۰/۰۸۳	-۰/۴۴۶	r_SOL_AWC().sol	۱۳
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	-۰/۴۴۲	-۰/۶۰۱	-۰/۰۵۰	r_SOL_K().sol	۱۴
دمای بارش برف	۴/۱۲۲	۶/۰۰۹	۳/۲۷۹	v_SFTMP.bsn	۱۵
ضریب جریان پایه برای ذخیره ساحلی	-۰/۰۴۴	-۰/۱۸۲	۰	v_ALPHA_BNK.rte	۱۶
زمان پیمودن جریان جانبی	۱۸/۰۶۶	۳۷/۵۶۰	۰	v_LAT_TTIME.hru	۱۷
گرادیان بارندگی	۱۳۲/۵۶۷	۱۴۲/۲۵۸	۹۰/۹۸۳	v_PLAPS.sub	۱۸
گرادیان دما	-۴/۵۶۱	-۰/۸۴۰	-۵/۹۳۱	v_TLAPS.sub	۱۹
متوسط کل بارش ماهانه در طول دوره پیش‌بینی	-۰/۳۴۰	-۰/۴۹۱	-۰/۱۱۱	r_PCMM().wgn	۲۰

جدول ۳. مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان در مدل اجرا شده

شاخص‌ها	ایستگاه ایدنک		ایستگاه تنگ تکاب بهبهان	
	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی
NS	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۵۹
R2	۰/۷	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۶۱
r-factor	۰/۷۹	۰/۷۲	۰/۹۹	۰/۷۹
p-factor	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۹۴	۰/۸۹

**اثر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به مخزن سد مارون**

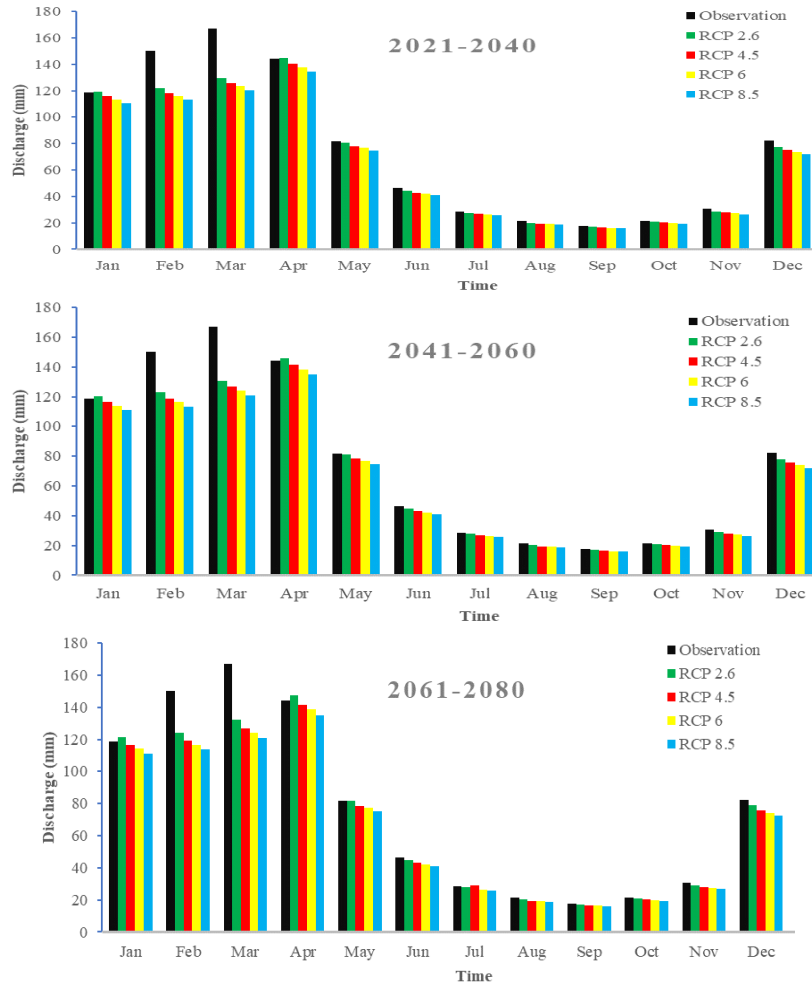
پس از ارزیابی مدل هیدرولوژیکی SWAT و ارزیابی دقت نتایج به دست آمده، به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر میزان جریان ورودی به مخزن سد مارون، مدل برای سناریوهای موجود اجرا شد. با ورود داده‌های بارش و دمای ریزمقیاس شده به مدل، جریان ورودی برای سه دوره آینده تحت تاثیر سناریوهای ذکر شده پیش بینی گردید. نتایج نشان داد جریان میانگین در ماه‌های گرم، جولای تا اوت (تیر تا شهریور) دارای تغییرات ناچیزی در هر ۴ سناریو نسبت به شرایط پایه داشته است. بیشترین میزان کاهش میانگین دبی در دوره آینده نزدیک در ماه‌های فوریه و مارس (بهمن و اسفند) در سناریوی RCP6.5 و RCP6 با میزان کاهش به ترتیب ۲۴/۸۱ و ۲۷/۸۵، ۲۲/۹۱ و ۲۶ درصد و همچنین در سناریوی RCP4.5 و RCP2.6 با میزان کاهش به ترتیب ۲۱/۳۸ و ۲۴/۵۶، ۱۹ و ۲۲/۳۶ درصد می‌باشد. همچنین در دو دوره آینده میانی و آینده دور بیشترین میزان کاهش میانگین دبی در سناریوی RCP8.5 و RCP6 در ماه‌های فوریه و مارس (بهمن و اسفند) مشاهده می‌شود. در ماه‌های سپتامبر تا ماه دسامبر (شهریور تا آذر) نیز میزان دبی میانگین در هر سه دوره آینده تحت هر چهار سناریوی انتشار نسبت به شرایط پایه کاهش یافته است. تغییرات بلندمدت ماهانه دما نشان می‌دهد که بیشترین مقدار افزایش دما در ماه‌های فصل زمستان رخ خواهد داد. این در حالی است که حوضه آبریز سد مارون دارای بیشترین مقدار بارش‌ها در ماه‌های فصل زمستان می‌باشد که با نتایج (Maghsood *et al.*, 2019) همخوانی دارد. تحت چنین شرایطی افزایش دمای فصل زمستان منجر به کاهش ذخیره برف در ارتفاعات این حوضه خواهد شد و انتظار می‌رود مشکلات کمبود آب در آینده نسبت به شرایط پایه بیشتر باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد اگر چه میزان بارش در منطقه تحت سناریوهای انتشار اغلب افزایش داشته است اما با توجه به افزایش دما میزان رواناب و میزان آب ورودی به سد مارون کاهش یافته و بیشترین میزان کاهش جریان ورودی به سد مارون مربوط به سناریوی انتشار RCP8.5 و RCP6 است.

**شبیه‌سازی منابع و مصارف آب**

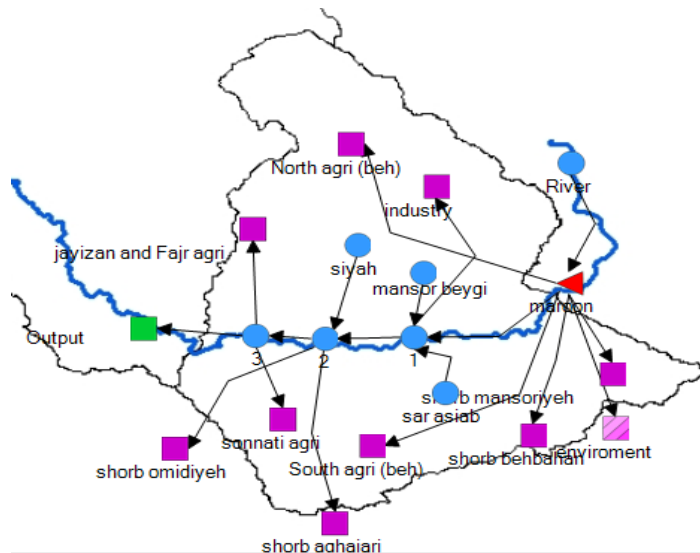
در این پژوهش، به منظور تعیین میزان آب تخصیص یافته به نیازهای مختلف در وضعیت موجود (۱۳۸۱-۱۳۹۷)، میزان آب ورودی به مخزن سد مارون از مقادیر ثبت شده ایستگاه ایدنک با استفاده از روش حجمی (نسبت مساحت و بارش) محاسبه گردید. شبکه شبیه‌سازی شده در مدل MODSIM از یک سد در حال بهره‌برداری (سد مارون)، جریان ورودی میان حوضه‌ای (رودخانه‌های منصور بیگی، کره سیاه و سر آسیاب)، گره‌های نیاز کشاورزی، شرب، محیط‌زیستی و صنعت تشکیل می‌شود. با استفاده از سری بلندمدت آبدی ماهانه مشاهداتی رودخانه مارون در محل ایستگاه‌های آبسنجی و مقایسه مقادیر مدل‌سازی شده آنها می‌توان نسبت به کالیبراسیون و صحت‌سنجی عمومی مدل شبیه‌سازی منابع و مصارف اقدام نمود. پارامترهای مؤثر در MODSIM جهت کالیبراسیون مدل، ضرایب آب برگشتی از گره‌های نیاز و قواعد رهاسازی و اولویت‌های ذخیره آب در مخازن سیستم هستند. با تغییر این پارامترها، مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سری زمانی آبدی رودخانه در محل چند ایستگاه شاخص حوضه با یکدیگر انطباق داده شده است. در شکل ۸ نمای کلی شبکه شبیه‌سازی شده در مدل MODSIM برای وضع موجود ارائه شده است.

**نتایج شبیه‌سازی تحت سناریوهای اقلیمی**

به منظور تعیین میزان آب تخصیص یافته به نیازهای مختلف در دوره آتی، تحت سناریوهای تغییر اقلیم (RCP2.6 حالت خوشبینانه)، (RCP6 و RCP4.5 حالت میانه) و (RCP8.5 حالت بحرانی)، میزان آب ورودی به سد مارون برای سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تخمین زده شد. از آنجایی که نیاز شرب منطقه طبق پروژه‌های تأمین آب مناطق جنوب شرق استان خوزستان، در آینده توسط سد کوثر انجام می‌شود و هیچگونه تأمینی از رودخانه مارون انجام نخواهد شد، از سری زمانی نیاز شرب وضع موجود برای آینده نیز استفاده شد. همچنین فرض شد که نیاز بخش صنعت در محدوده مورد مطالعه از ۰/۵ میلیون مترمکعب در وضعیت موجود به ۸/۵ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۲۵ خواهد رسید که این تغییر در تمامی سناریوهای مطرح شده لحاظ گردیده است. در بخش کشاورزی نیز سه شبکه آبیاری لاسپید، خائیز و ری مکان با سطح زیر کشت ۱۲۰۰، ۲۵۷۰ و ۱۲۵۰ هکتار برای دوره‌های آتی به مدل تخصیص منابع آب MODSIM اضافه گردید. سناریوهای تغییر اقلیم معرفی شده به مدل MODSIM در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۷. تغییرات میانگین جریان ماهانه شبیه سازی شده ورودی به سد مارون تحت سناریوهای اقلیمی و شرایط پایه

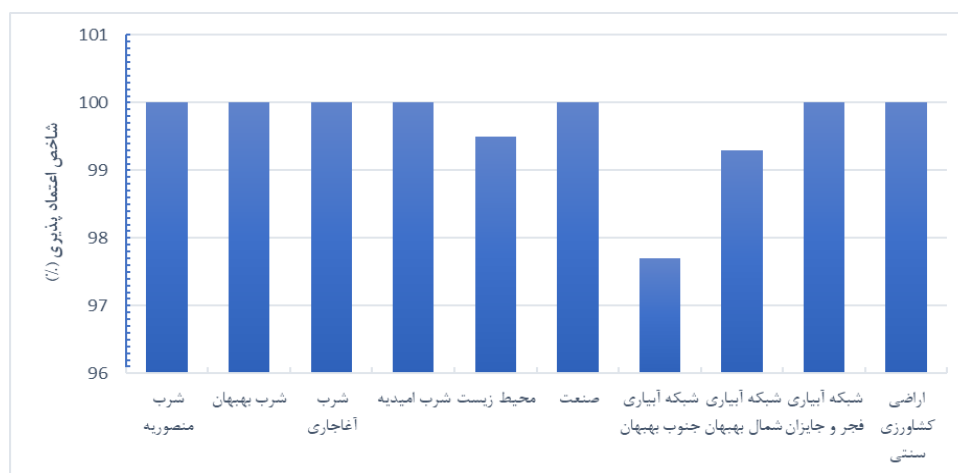


شکل ۸. نمای کلی سیستم شبیه سازی شده در مدل MODSIM  
جدول ۴. سناریوهای تغییر اقلیم معرفی شده به مدل MODSIM

دوره زمانی			سطح واداشت تابشی
2061-2080	2041-2060	2021-2040	
A3	A2	A1	RCP2.6
B3	B2	B1	RCP4.5
C3	C2	C1	RCP6.0
D3	D2	D1	RCP85

### نتایج شبیه‌سازی وضع موجود

منابع و مصارف محدوده مطالعاتی سد مارون در وضعیت موجود طی دوره آماری (۱۳۹۷-۱۳۸۱) توسط مدل MODSIM شبیه‌سازی گردید. براساس نتایج شبیه‌سازی که در شکل ۹ ارائه شده است تمامی نیاز شرب بهبهان، منصوریه، امیدیه و آغاچاری در طی دوره شبیه‌سازی به طور کامل تامین گردیده است که شاخص اعتماد پذیری سیستم نیز موید این موضوع می‌باشد. مقدار شاخص اعتماد پذیری برای نیاز زیست محیطی برابر با ۹۹٫۵ می‌باشد که نشان می‌دهد که در اکثریت ماه‌ها این نیاز به طور کامل تامین شده است. میزان نیاز بخش صنعت در محدوده مورد مطالعه در شرایط موجود برابر ۰٫۵ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد که مطابق نتایج ارائه شده از شاخص اعتماد پذیری در شکل ۹ به صورت کامل تامین می‌گردد. همچنین مقادیر شاخص اعتماد پذیری برای شبکه آبیاری و زهکشی بهبهان در ناحیه شمال و جنوب که توسط کانال‌های اصلی شبکه بهبهان از سد انحرافی شهدا تامین می‌گردد به ترتیب برابر با ۹۷٫۱ و ۹۸٫۳ درصد می‌باشد که نشان دهنده این است که نیاز شبکه آبیاری بهبهان جز در برخی از سال‌ها به طور کامل تامین می‌گردد بر اساس نتایج شبیه‌سازی توسط مدل MODSIM نیاز شبکه آبیاری فجر و جایزان و اراضی کشاورزی سنتی حاشیه رودخانه مارون نیز در طول دوره شبیه‌سازی به طور کامل تامین می‌گردد.



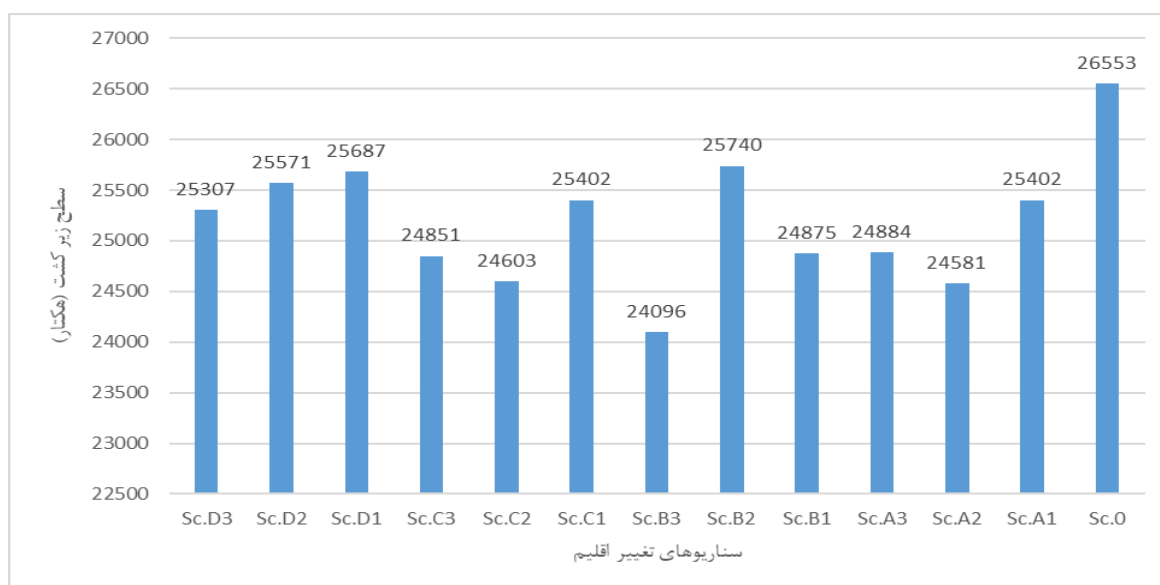
شکل ۹. شاخص اعتماد پذیری در وضع موجود

با استفاده از شاخص عملکردی اطمینان‌پذیری، میزان آب تخصیص داده‌شده به هر یک از نیازها تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصله ملاحظه می‌شود که جز در بخش صنعت و اراضی کشاورزی سنتی، در بقیه موارد طی دوره‌های آبی با کمبود منابع آب برای تامین حداکثری نیازها مواجه هستیم. با ملاحظه تامین نیاز شرب در دوره آبی از سد کوثر، در اجرای سناریوهای تغییر اقلیم، تغییرات نیاز شرب محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته نشد. با توجه به میانگین اطمینان‌پذیری نیازهای مختلف تحت سناریوهای تغییر اقلیمی، مشخص گردید که بیشترین میزان تامین (۹۷٫۶٪) در بازه زمانی ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریو تغییر اقلیمی (RCP4.5 (B2) اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، میانگین اطمینان‌پذیری نیازهای مختلف نشان می‌دهد که کمترین میزان تامین (۹۳٫۴٪) در بازه زمانی ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریو تغییر اقلیمی (RCP4.5 (B3) اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه هر دو حالت تحت سناریو تغییر اقلیم RCP4.5 اتفاق می‌افتد، می‌توان استنباط کرد که در بازه زمانی ۲۰۶۱-۲۰۸۰، وقایع حدی بیشتری نسبت به بازه زمانی ۲۰۴۱-۲۰۶۰ اتفاق می‌افتد که منجر به کمتر شدن ورودی به مخزن سد و عدم تامین حداکثری نیازها می‌شود این نتایج با مطالعات انجام شده توسط (Fadaeizadeh K, & Shourian M, 2019 ; Panahia et al., 2021) همخوانی دارد بطور میانگین، کمترین میزان تامین (۹۲٫۸٪) مربوط به کشاورزی ناحیه جنوب بهبهان می‌باشد.

### سازگاری با شرایط تغییر اقلیم

تغییر اقلیم و کاهش آورد رودخانه‌ها از موضوعات جدی در برنامه ریزی منابع آب حوضه‌های آبریز می‌باشد یکی از موضوعات مهم مطرح در این بخش، حفظ شرایط پایین دست مطابق با شرایط تغییرات اقلیمی آبی است به گونه ای که در تامین نیازهای پایین دست در شرایط آبی تغییر اقلیم، شاخص اعتمادپذیری فعلی حفظ گردد با توجه به اینکه نیازهای شرب، صنعت و زیست محیطی همواره از بالاترین اولویت‌ها برخوردار بوده در این پژوهش نیاز طرح‌های توسعه در این بخش‌ها در شرایط اقلیمی آبی به صورت کامل لحاظ گردیده و به منظور تطبیق

با شرایط اقلیمی آبی صرفاً شرایط بخش کشاورزی به عنوان اولویت پایین تر دستخوش تغییرات لازم شده است در این خصوص یکی از گزینه‌ها، کاهش سطح کشت اراضی پایاب مخزن سد بوده که با توجه به کاهش آورد رودخانه در شرایط تغییر اقلیم آبی، سطح کشت اراضی با الگوی کشت فعلی کاهش یابد در این حالت در دسته B3 به عنوان بیشترین و دسته B2 به عنوان کمترین اثرگذاری شرایط تغییر اقلیم به ترتیب می‌توان با کاهش ۲۴۵۷ و ۸۱۳ هکتار از سطح اراضی کشاورزی پایین دست مخزن، شرایط اعتماد پذیری فعلی را حفظ کرد که با نتایج (Daneshgar H et al., 2021 ; Jamshidpey A, & Shourian M, 2021) همخوانی دارد (شکل ۱۰). گزینه دوم سازگاری با شرایط تغییر اقلیم، تغییر در الگوی کشت و جایگزین کردن کشت‌های کم مصرف با کشت‌های پرمصرف در اراضی آب‌خور پایین دست مخزن سد می‌باشد نکته مهم اینکه براساس برنامه ریزی و موجودیت منابع آب در شرایط اولیه طرح، شبکه‌های آبیاری و زهکشی پایاب سد ساخته شده است و این انتظار که در آینده و در شرایط تغییر اقلیم بخشی از سطوح شبکه آبیاری پایین دست مخزن سد، قابلیت تامین آب را نداشته باشد می‌تواند نارضایتی بهره برداران از شبکه و تبعات اجتماعی را به دنبال داشته باشد لذا تغییر الگوی کشت طرح و تامین آب تمامی سطوح کشاورزی پایاب سد در شرایط آبی گزینه بهتری می‌باشد در شرایط اولیه طرح، گیاه یونجه با ۱۶ درصد، سیب زمینی با ۱۶ درصد، ذرت دانه ای پاییزه با ۲۱ درصد و گندم با ۲۸ درصد سطح زیر کشت به عنوان گیاهان پرمصرف، بیشترین نیاز آبی از مخزن سد مارون را دارند در راستای حفظ شرایط موجود در دسته B3 به عنوان سخت ترین اثرگذاری شرایط تغییر اقلیم، می‌توان با کاهش ۹ درصدی سطح کشت یونجه و افزایش ۹ درصدی سطح کشت جو و کنجد، کاهش ۱۵ درصدی سطح کشت ذرت دانه ای پاییزه و افزایش ۱۵ درصدی سطح کشت ذرت علوفه ای پاییزه، کاهش ۱۷ درصدی سطح کشت گندم و افزایش ۱۷ درصدی سطح کشت گوجه فرنگی و کاهش ۵ درصدی سطح کشت سیب زمینی و افزایش ۵ درصدی سطح کشت باقلا، شرایط فعلی را از نظر سطح زیر کشت و شاخص اعتمادپذیری حفظ کرد در همین شرایط برای دسته B2 به عنوان کمترین اثرگذاری شرایط تغییر اقلیم، می‌توان با کاهش ۳ درصدی سطح کشت یونجه و افزایش ۳ درصدی سطح کشت جو و کنجد، کاهش ۵ درصدی سطح کشت ذرت دانه ای پاییزه و افزایش ۵ درصدی سطح کشت ذرت علوفه ای پاییزه، کاهش ۵٫۶ درصدی سطح کشت گندم و افزایش ۵٫۶ درصدی سطح کشت گوجه فرنگی و کاهش ۱٫۷ درصدی سطح کشت سیب زمینی و افزایش ۱٫۷ درصدی سطح کشت باقلا، شرایط فعلی را از نظر سطح زیر کشت و شاخص اعتمادپذیری حفظ کرد در حالت دیگر می‌توان صرفاً با کاهش ۱۱ درصدی سطح کشت یونجه و افزایش ۱۱ درصدی سطح کشت جو و کنجد شرایط تغییر اقلیم در دسته B2 را حفظ کرد که با نتایج (Soleymani, M et al., 2021 ; Yibecal A et al., 2019) همخوانی دارد. در چنین شرایطی با ملاحظه نیاز و تقاضای جامعه می‌توان برنامه الگوی کشت را برای دوره‌های مختلف تدوین کرد لازم به توضیح است در تغییر الگوی کشت به منظور سازگاری با شرایط تغییر اقلیم، صرفاً الگوی کشت گیاهان زراعی تغییر داده شده و الگوی کشت گیاهان باغی بدون تغییر باقیمانده است. الگوی کشت پیشنهادی برای حفظ سطح کشت و شاخص اعتمادپذیری فعلی اراضی پایاب مخزن سد در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۱۰. مقادیر سطح زیر کشت تحت سناریوهای تغییر اقلیم و حفظ شاخص اعتمادپذیری وضع موجود

جدول ۵. الگوی کشت پیشنهادی برای تثبیت سطح کشت و شاخص اعتمادپذیری فعلی

محصول	درصد کشت	سناریوهای تغییر اقلیم											
		D3	D2	D1	C3	C2	C1	B3	B2	B1	A3	A2	A1
گندم	۲۸	۱۹/۴	۲۱/۲	۲۲	۱۶/۲	۱۴/۵	۲۰	۱۱	۲۲/۴	۱۶/۴	۱۶/۵	۱۴/۴	۲۰
جو	۱۴	۱۸/۶	۱۷/۶	۱۷/۲	۲۰/۲	۲۱/۱	۱۸/۲	۲۳	۱۷	۲۰/۱	۲۰/۱	۲۱/۲	۱۸/۲
کاهو	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
کلم	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹
گوجه فرنگی	۵	۱۳/۶	۱۱/۸	۱۱	۱۶/۸	۱۸/۵	۱۳	۲۲	۱۰/۶	۱۶/۶	۱۶/۵	۱۸/۶	۱۳
سیب زمینی	۱۶	۱۳/۵	۱۴	۱۴/۲	۱۲/۵	۱۲	۱۳/۷	۱۱	۱۴/۳	۱۲/۶	۱۲/۶	۱۲	۱۳/۷
باقلا	۵	۷/۵	۷	۶/۸	۸/۵	۹	۷/۳	۱۰	۶/۷	۸/۴	۸/۴	۹	۷/۳
یونجه	۱۶	۱۱/۴	۱۲/۴	۱۲/۸	۹/۸	۸/۹	۱۱/۸	۷	۱۳	۹/۹	۹/۹	۸/۸	۱۱/۸
ذرت علوفه ای پاییزه	۱۴	۲۱/۶	۲۰	۱۹/۳	۲۴/۴	۲۵/۹	۲۱	۲۹	۱۹	۲۴/۲	۲۴/۲	۲۶	۲۱
ذرت دانه ای پاییزه	۲۱	۱۳/۴	۱۵	۱۵/۷	۱۰/۶	۹/۱	۱۴	۶	۱۶	۱۰/۸	۱۰/۸	۹	۱۴
ذرت علوفه ای بهاره	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
کنجد	۵	۹/۶	۸/۶	۸/۲	۱۱/۲	۱۲/۱	۹/۲	۱۴	۸	۱۱/۱	۱۱/۱	۱۲/۲	۹/۲

## نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی سازگاری منابع و مصارف آب موجود با تغییر در سطح و الگوی کشت و تحلیل نیازهای پایین دست سد مخزنی مارون تحت اثر تغییر اقلیم، با ترکیب مدل‌های SWAT و MODSIM و استفاده از آمار مدل‌های اقلیمی می‌باشد. در راستای بررسی اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش حوضه از پنج مدل گردش عمومی جو تحت چهار سناریو اقلیمی RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 در سه دوره‌ی (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و (۲۰۶۱-۲۰۸۰) استفاده شد. برای شبیه‌سازی جریان در دوره‌های آینده، بارش و دمای هوا تحت چهار سناریوی ذکر شده با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس گردید. تغییرات بلندمدت میانگین ماهانه دما نشان می‌دهد که بیشترین مقدار افزایش دما در ماه‌های فصل زمستان رخ خواهد داد این در حالی است که حوضه آبریز سد مارون دارای بیشترین حجم بارش در ماه‌های فصل زمستان می‌باشد. با ورود داده‌های بارش و دمای ریزمقیاس شده به مدل SWAT، جریان ورودی به سد برای سه دوره‌ی آینده شبیه‌سازی شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT از داده‌های جریان ماهانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری ایدنک و تنگ تکاب استفاده شد. شاخص نش-سانتکلیف ایستگاه ایدنک در مرحله واسنجی ۰/۶۹ و اعتبارسنجی ۰/۶۵، در ایستگاه تنگ تکاب بهبهان در مرحله واسنجی ۰/۶۷ و اعتبارسنجی ۰/۵۹ به دست آمد. نتایج پیش بینی جریان ورودی به سد توسط مدل SWAT تحت چهار سناریو نشان داد که گرچه میزان بارش در منطقه افزایش داشته اما افزایش دما در این حوضه اثر و کارایی بیشتری را در کاهش میزان جریان داشته است. بیشترین میزان کاهش میانگین جریان ورودی به سد مارون مربوط به سناریوی انتشار RCP6 و RCP8.5 در ماه‌های فوریه و مارس (بهمین و اسفند) با میزان کاهش به ترتیب ۲۴/۸۱ و ۲۷/۸۵، ۲۲/۹۱ و ۲۶ درصد در دوره آینده نزدیک، ۲۴/۶ و ۲۷/۶، ۲۲/۶ و ۲۵/۷۳ درصد در دوره آینده میانی، ۲۴/۴۳ و ۲۷/۵، ۲۲/۳۷ و ۲۵/۵ درصد در دوره آینده دور می‌باشد. در ادامه، جریان ورودی به مخزن سد مارون در شرایط پایه و آینده به عنوان یکی از ورودی‌های مهم مدل MODSIM استفاده شدند. با توجه به میانگین اطمینان‌پذیری نیازهای مختلف تحت سناریوهای تغییر اقلیمی، مشخص گردید که بیشترین میزان تامین (۹۷٫۶٪) در بازه زمانی ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریو تغییر اقلیمی RCP4.5 (B2) اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، میانگین اطمینان‌پذیری نیازهای مختلف نشان می‌دهد که کمترین میزان تامین (۹۳٫۴٪) در بازه زمانی ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت سناریو تغییر اقلیمی RCP4.5 (B3) اتفاق می‌افتد. نتایج بررسی سازگاری منابع و مصارف آب نشان می‌دهد در شدیدترین دوره‌های تنش آبی، این ظرفیت وجود دارد که با تغییر در الگوی کشت و جایگزین نمودن کشت‌های کم مصرف با سطوح کشت‌های پر مصرف، میزان شاخص‌های اعتمادپذیری و سطوح زیر کشت پایدار فعلی تامین گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT.



- Journal of Hydrology*, 333(2-4), 413-430.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Griensven, A., Liew, M. W., Kannan, N. and Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Journal of Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Boithias, L., Sauvage, S., Lenica, A., Roux, H., Abbaspour, K.C., Larnier, K., Dartus, D. and Sánchez-Pérez, J.M. (2017). Simulating flash floods at hourly time-step using the SWAT model. *Journal of Water*, 9(12), 929.
- Chhuon, K., Herrera, E. and Nadaoka, K. (2016). Application of integrated hydrologic and river basin management modeling for the optimal development of a multi-purpose reservoir project. *Journal of Water Resources Management*, 30(9), 3143-3157.
- Daneshgar, H., Bagheri, M. and Mardani Najafabadi, M. (2021). Evaluation of consequences of Climate change and Adaptation Strategies in Bushkan Plain of Bushehr Province. *Journal of agricultural Economics and Development*, 35(1), 63-78. (In Farsi)
- Fadaeizadeh, K. and Shourian, M. (2019). Determination of the Optimal River Basin-Wide Agricultural Water Demand Quantities Meeting Satisfactory Reliability Levels. *Journal of Water Resources Management*, 33, 2665-2676.
- Heydari, N. (2017). Climate Change and Its Adaptation Measures for agriculture, *Journal of Water management in agriculture*, 4(2), 13-26. (In Farsi)
- IPCC, AR4. (2007). General guidelines on the use of cenario data for climate impact and adaptation, AOGCM models for assessing climate change impact on regional scale. *Journal of Earth Physic and Space*, 36(4), 99-110.
- Jamshidpey, A. and Shourian, M. (2021). Crop pattern planning and irrigation water allocation compatible with climate change using a coupled network flow programming-heuristic optimization model, *Journal of Hydrological Sciences*, 66(1), 90-103.
- khalilian, S., shahvari, N., Mosavi, N. and Mortazavi, S.A. (2018). Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Varamin Plain Basin Using SWAT Model, *Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2), 354-366. (In Farsi)
- Massah Bavani, A. R. and Morid, S. (2006). Impact of Climate Change on the Water Resources of Zayandeh Rud Basin, *Journal of Science And Technology of Agriculture And Natural Resources*, 9(4), 17-27. (In Farsi)
- Maghsood, F. F., Moradi, H., Bavani, A. R. M., Panahi, M., Berndtsson, R., and Hashemi, H. (2019). Climate change impact on flood frequency and source area in northern Iran under CMIP5 scenarios. *Journal of Water*, 11(2), 1-22.
- Moriasi, D. N. Arnold, J. G. Van Liew, M. W. Bingner, R. L. Harmel, R. D. and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Journal of Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Mohammad Jani, E. and Yazdani, N. (2014). Analysis of the water crisis in the country and its management requirements, *Journal of Ravand*, 21(65-66), 117-144. (In Farsi)
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models - Part I - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10(1970), 282-290.
- Naghshine, M.H., Raof, F.F. and Khoshraftar, A. (2013). The study of flood hydraulics before the building of Maroon Dam by HEC-RAS, Maskingam and Muskingum-Cunge method. *Journal of Advances in Environmental Biology*, 7(5), 890-893.
- Panahia, M. Misaghib, F. and Ahmadi, F. (2021). Study of climate change impact on water resources allocation in Maragheh Plain using WEAP Model. *Journal of Water Harvesting Research*, 4(2), 153-166.
- Rahman, K. Maringanti, C. Beniston, M. Widmer, F. Abbaspour, K. and Lehmann, A. (2013). Streamflow modeling in a highly managed mountainous glacier watershed using SWAT: the Upper Rhone River watershed case in Switzerland. *Journal of Water resources management*, 27(2), 323-339.
- Sabzzadeh, I., Alimohammadi, S. and Shourian, M. (2014). Estimation of Demand's Return flow Fractions in Shian River Basin Using Auto-Calibration of MODSIM Model, *Journal of Water Research*, 8(1), 19-27. (In Farsi)
- Shourian, M., Mousavi, S. J., and Tahershamsi, A. (2008). Basin-wide water resources planning by integrating PSO algorithm and MODSIM. *Journal of Water resources management*, 22, 1347-1366.
- Soleymani, M., Rahimi, D. and Yazdanpanah, H. (2021). Climate change Adaptation Strategy in agriculture (Rostam County). *Journal of Natural Environmental Hazard*, 10(29), 19-32. (In Farsi)
- Tuo, Y., Marcolini, G., Disse, M. and Chiogna, G. (2018). A multi-objective approach to improve SWAT



- model calibration in alpine catchments. *Journal of hydrology*, 559, 347-360.
- Vaghefi, S.A., Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Srinivasan, R. and Arnold, J.G. (2017). Modeling crop water productivity using a coupled SWAT–MODSIM model. *Journal of Water*, 9(3), 157.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J. and Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of hydrology*, 358(1-2), 1-23.
- Yibecal, A., Jonas, J. and Anthony, P. (2019). Crop Switching as an Adaptation Strategy to Climate change: the case of Semien Shewa Zone of Ethiopia. *Journal of Climate change Strategies and management*, 11(3) 358-371.
- Zalaki-Badil, N., Eslamian, S., Sayyad, G.A., Hosseini, S.E., Asadilour, M., Ostad-Ali-Askari, K., Singh, V.P. and Dehghan, S. (2017). Using SWAT Model to determine runoff, sediment yield in maroon-dam catchment. *Journal of Research Studies in Agricultural Sciences*, 3(12), 31-41.