

Original Research Article

Investigating the effects of climate change on the stream flow from the Kor River basin

Fatemeh Boomeh¹, Mohammad Hossein Mokhtari^{2*}, Ali Talebi³, Masoud Goodarza⁴

¹PhD student, Arid Land and Desert Management †Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Iran

²Associate professor, Arid Land and Desert Management, Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Iran

³Professor, Watershed management, Natural Resources & Desert Studies, Yazd University, Iran

⁴Associate professor, Department of Drought and Climate Change, SCWMRI, AREEO, Tehran, Iran



10.22034/GRD.2025.21652.1619

Received:

October 05, 2024

Accepted:

July 12, 2025

Keywords:

Cham-Riz station, Climate change, Kor river, SWAT

Abstract

A large area of Iran has a hot and dry climate. Therefore, it is important to understand how conditions in these regions will evolve in the future, particularly under climate change. In this study, the SWAT and LARS-WG V7 models were used to investigate the impacts of climate change scenarios on the outflow of the Kor River. For this purpose, the outflow from the Kor River basin was calculated using the SWAT model for the base period from 1988 to 2018. Then, with the help of the LARS-WG V7 exponential downscaling model, the future precipitation and temperature of the HadGEM3-GC31-LL climate change model were estimated under SSP2-4.5 and SSP5-8.5, as two emission scenarios, for the years 2031 to 2090, and the effect of climate change on the outflow of the Kor River basin was evaluated. The results showed that, from 2031 to 2090, the largest increases in precipitation, temperature, and discharge at the Chamriz and Dorudzan stations primarily occurred in the autumn and winter seasons. The increase in precipitation during these seasons is consistent with the significant growth in discharge, indicating a rise in seasonal precipitation patterns in the future. The increasing trend of minimum and maximum monthly temperatures is evident in all months, with the most intensity observed in autumn and winter. These results indicate significant climate changes, particularly during the cold half of the year, highlighting the importance of water resource management in these seasons. Changes in meteorological parameters will lead to significant alterations in the hydrological regime, particularly basin runoff. Increased precipitation and temperature are likely to result in flooding in the region in the future. Therefore, adopting strategies to infiltrate rainwater into groundwater resources and reduce the risks associated with increased surface flows and flooding is essential.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



* **Corresponding Author:** Mohammad Hossein Mokhtari
Address: Natural Resources & Desert Studies, Yazd University

Email: mh.mokhtari@yazd.ac.ir

Extended Abstract

1. Introduction

Climate change refers to long-term changes in temperature and weather patterns (Mamon et al., 2024). Factors such as human activities, especially industrial activities, lead to an increase in greenhouse gases (carbon dioxide, methane, nitrogen dioxide) in the atmosphere, which are the main drivers of global climate change (Kando et al., 2014; Mamon et al., 2024). Climate change due to increased greenhouse gas concentrations will have various consequences for water resources, changing rainfall patterns, and the amount and timing of runoffs (Dar et al., 2009; Nguyen et al., 2020). As a result, many regions will experience more severe droughts, while some regions will experience more intense rainfall and subsequent flooding in the future (Khaing et al., 2014). According to the latest assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), climate change will intensify globally in the coming decades, with global temperature increases expected to reach or exceed 1.5°C (IPCC, 2021). Studies have shown that a 1°C increase in temperature could affect water availability and pose challenges for water resource management, as water demand is expected to increase under global warming (Skelris et al., 2016; Lutz et al., 2019). Consequently, it is essential to understand the changes in watershed flows under future climate projections.

2. Research Methodology

In this study, to model the hydrological conditions of the Kor River basin, a Digital Elevation Model (DEM) with a 30-meter resolution and the watershed stream network map were first imported into the ArcSWAT software. Subsequently, Hydrological Response Units (HRUs) were defined using land use, soil type, and slope classification maps. The daily climate data from seven meteorological stations were used to run the model. The model was calibrated for the period from 2000 to 2018 and validated for the period from 1991 to 2000. After evaluating the model's performance, the final calibrated parameter values were applied in the last calibration stage within the SWAT model. In the next step, to assess the impacts of climate change on precipitation and temperature, three future time periods were considered, including the near future (2031–2050), the mid-century (2051–2070), and the far future (2071–2090). The climate projection data from three global climate models, namely GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, and ACCESS-CM2, were obtained from the Copernicus database under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios for the meteorological stations in the study area. To downscale the outputs of these models to the local scale, the LARS-WG model (version 7) was used. Finally, the downscaled precipitation and the temperature data generated by LARS-WG were inserted in the SWAT model to evaluate the impact of climate change on the flow of the Kor River.

3. Results and discussion

The results of the study showed that the SWAT model has performed relatively well in estimating surface runoff in the Kor River Basin. The model successfully simulated the streamflow fluctuations at the Chamriz and Dehkadeh Sefid stations during the validation period, performing even better than that during the calibration period. The peak discharge values were also accurately simulated, particularly at the Chamriz station. Furthermore, the evaluation of the selected climate models in estimating precipitation, and minimum and maximum monthly temperatures indicated that the HadGEM3-GC31-LL model was in better agreement with the data observed at the meteorological stations. This model proved to be the most reliable for future climate projections. According to the findings, the studied basin is expected to experience an increase in both temperature and precipitation in the future. The greatest increases in monthly minimum and maximum temperatures under both SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios are projected to occur during the autumn and winter seasons from 2031 to 2090.

However, future changes in monthly precipitation under both scenarios show no consistent trend. Some months are projected to experience increased precipitation, while others may face reductions. At the Chamriz station, the highest monthly increases in precipitation under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios from 2031 to 2090 were observed in autumn (22.19 mm and 6.64 mm, respectively) and winter (12.14 mm and 35.97 mm, respectively). Similarly, at the Dorudzan Dam station, the highest monthly increases occurred in autumn (28.33 mm and 3 mm, respectively) and in winter (4.62 mm and 34.76 mm, respectively). The monthly discharge changes at the Dehkadeh Sefid and Chamriz hydrometric stations under both SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios also indicate that the greatest increases in streamflow, compared to the baseline period, will occur in future periods across all months. This is primarily attributed to the shift in the precipitation type from snow to rain, as well as rising temperatures. The largest increases in discharge at both stations are expected during autumn and winter, coinciding with the periods when the greatest increases occur in precipitation compared to the historical period.

4. Conclusion

The results showed that during the period from 2031 to 2090, the greatest increases in precipitation, temperature, and discharge at the Chamriz and Dorudzan stations occurred primarily in autumn and winter. The increase in precipitation during these seasons corresponds with a significant rise in discharge, indicating a strengthening of seasonal rainfall patterns in the future. Additionally, the upward trend in both minimum and maximum monthly temperatures is evident throughout the year, with the most pronounced increases occurring in autumn and winter. These findings highlight substantial climate changes, particularly concentrated in the colder half of the year, emphasizing the critical need for effective water resources management during these seasons.

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر جریان خروجی از حوضه آبریز رودخانه کر با استفاده از مدل SWAT

فاطمه بومه^۱، محمدحسین مختاری^{۲*}، علی طالبی^۳، مسعود گودرزی^۴

^۱ دانشجوی دکتری مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳ استاد گروه مرتع و آبخیزداری، منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۴ دانشیار گروه خشکسالی و تغییر اقلیم، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

doi 10.22034/GRD.2025.21652.1619

چکیده

پهنه گسترده‌ای از کشور ایران دارای اقلیم گرم و خشک است؛ بنابراین دانستن این موضوع که در آینده و تحت شرایط تغییر اقلیم وضعیت این نواحی چگونه رقم خواهد خورد، حائز اهمیت است. در این پژوهش به‌منظور پیش‌بینی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر جریان خروجی از حوضه آبریز رودخانه کر از مدل SWAT و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG V7 استفاده شده است. برای این منظور ابتدا با کمک مدل SWAT جریان خروجی از حوضه آبریز رودخانه کر برای دوره پایه از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ محاسبه گردید و سپس با کمک مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG V7، بارش و دمای آینده مدل تغییر اقلیم HadGEM3-GC31-LL تحت دو سناریو انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای سال های ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ برآورد گردید و اثر تغییرات اقلیم بر روی جریان خروجی حوضه آبریز رودخانه کر مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق با نتایج حاصل‌شده، بیشترین افزایش ماهانه بارش ایستگاه چمریز تحت هر دو سناریو انتشار از سال ۲۰۳۱ تا سال ۲۰۹۰ در فصل پاییز به ترتیب به میزان ۲۲/۱۹ و ۶/۶۴ میلی‌متر و زمستان به ترتیب به ترتیب به میزان ۱۲/۱۴ و ۳۵/۹۷ میلی‌متر رخ داده است. بیشترین افزایش ماهانه بارش ایستگاه سد درودزن تحت هر دو سناریو از سال ۲۰۳۱ تا سال ۲۰۹۰ در فصل پاییز به ترتیب به میزان ۲۸/۳۳ و ۳ میلی‌متر و در فصل زمستان به ترتیب به میزان ۴/۶۲ و ۳۴/۷۶ میلی‌متر رخ داده است. میانگین دمای حداقل و میانگین دمای حداکثر ماهانه تحت دو سناریو در همه ماه‌های در دوره آینده افزایش خواهد یافت که بیشترین افزایش دما در فصل پاییز و زمستان خواهد بود. بیشترین افزایش دبی نسبت به دوره پایه در تمامی دوره‌های آینده در فصل پاییز و زمستان اتفاق می‌افتد که با توجه به اینکه در ایستگاه‌های اقلیمی هم بیشترین افزایش بارش نسبت به دوره پایه در این فصول است، این مسئله کاملاً توجیه‌پذیر است. در نتیجه اتخاذ راهکارهایی در جهت نفوذ باران به منابع آب زیرزمینی و کاهش خطرات ناشی از افزایش جریانات سطحی و وقوع سیلاب اجتناب‌ناپذیر است.

تاریخ دریافت:

۱۴ مهر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۲۱ تیر ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:

ایستگاه هیدرومتری چمریز،

تغییر اقلیم،

رودخانه کر،

مدل نیمه توزیعی SWAT

۱ مقدمه

تغییر اقلیم به تغییرات طولانی‌مدت دما و الگوهای آب‌وهوایی اشاره دارد (مامون و همکاران، ۲۰۲۴). عواملی از قبیل فعالیت‌های انسانی به‌خصوص فعالیت‌های صنعتی که منجر به افزایش گازهای گلخانه‌ای (دی‌اکسید کربن،

Email: mh.mokhtari@yazd.ac.ir

* نویسنده مسئول: محمدحسین مختاری

آدرس: دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد.

متان، دی‌اکسید نیتروژن) در اتمسفر می‌شود که محرک اصلی تغییرات آب‌وهوایی جهانی است (کاندو^۱ و همکاران، ۲۰۱۴؛ مامون و همکاران ۲۰۲۴). وقوع پدیده تغییر اقلیم در اثر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای پیامدهای مختلفی بر منابع آب، تغییر الگوهای بارندگی، مقدار و زمان وقوع رواناب خواهد داشت (دار^۲ و همکاران، ۲۰۰۹؛ نگوین^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). از این رو، بسیاری از مناطق خشکسالی شدیدتری را تجربه خواهند کرد، درحالی‌که برخی از مناطق در آینده با بارش شدیدتر و متعاقباً سیل روبه‌رو خواهند شد (خاینگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). بر اساس آخرین گزارش ارزیابی هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی (IPCC^۵)، تغییرات آب و هوایی در دهه‌های آینده در سطح جهان تشدید خواهد شد و انتظار می‌رود افزایش دمای جهانی به ۱/۵ درجه سانتی‌گراد برسد یا از آن فراتر رود (IPCC، ۲۰۲۱). مطالعات نشان داده‌اند که اگر درجه حرارت ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد می‌تواند بر دسترسی به منابع آب تأثیر بگذارد و مسائلی را برای مدیریت منابع آب ایجاد کند زیرا انتظار می‌رود تقاضا برای آب در شرایط گرمایش جهانی افزایش یابد (اسکلیریس^۶ و همکاران، ۲۰۱۶؛ لوتز^۷ و همکاران، ۲۰۱۹). در نتیجه، درک تغییرات جریان حوضه‌های آبریز تحت پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده ضروری است. در کشورهای درحال توسعه از جمله ایران، تغییر اقلیم دارای پیامدهای مخربی مانند بحران آب، ناامنی غذایی، فقر و کاهش سلامت انسانی خواهد بود؛ به عبارت دیگر اتکای بیش‌ازحد اقتصاد این کشورها به منابع طبیعی و کشاورزی موجب می‌گردد که ساکنان آنها به گونه فزاینده‌ای تحت تأثیر پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم قرار گیرند (تانگ و سوسکولن^۸، ۲۰۰۷)؛ بنابراین تغییر اقلیم و خشکسالی‌های ناشی از آن، بزرگ‌ترین چالش حال حاضر و آینده کشاورزی ایران محسوب می‌شوند (کریمی، ۱۳۹۵).

۲ مبانی نظری

در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و رواناب در مقیاس حوضه آبریز انجام شده است (شول^۹ و همکاران، ۲۰۰۸). کولین گارسیا^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۴)، با استفاده از مدل SWAT به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر بیلان هیدرولوژیکی حوضه‌ای در مکزیک پرداختند. طبق مدل تغییر اقلیم MPI-ESM1-2-LR، بارش بین ۸۳/۷۱ میلی‌متر تا ۲۲۵/۸۳ میلی‌متر کاهش خواهد یافت، درحالی‌که دما بین ۲/۵۷ درجه سانتی‌گراد تا ۴/۷۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. جریان رودخانه تحت سناریوهای آب و هوایی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۴۷/۴۰ و ۶۱/۰۱ درصد کاهش می‌یابد. جیانگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۰)، به شبیه‌سازی تغییرات بارش در آینده تحت چهار سناریو (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5) پرداختند. نتایج نشان داد که در پایان قرن بیست و یکم، افزایش شدید میانگین بارندگی سالانه تحت تمام سناریوها مشاهده گردید. مامون و همکاران (۲۰۲۴) به مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبریز رودخانه مگنا در بنگلادش با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج نشان داد که حداکثر جریان سالانه به تدریج با گذشت زمان افزایش خواهد

¹ Kundu

² Dhar

³ Nguyen

⁴ Khaing

⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁶ Skliris

⁷ Lutz

⁸ Tong and Soskolne

⁹ Schuol

¹⁰ Colín-García

¹¹ Jiang

یافت. جریان‌های فصل خشک با افزایش ۳۱ تا ۵۰ درصد در مقایسه با دوره‌های مرطوب است که می‌تواند تا پایان قرن بیست و یکم به میزان ۴۷ تا ۶۶ درصد افزایش یابد.

پرویزی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی تغییر اقلیم بر برخی پارامترهای هیدرولوژیکی حوزه آبخیز جامیشان با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج نشان داد که تغییر در پارامترهای هواشناسی منجر به تغییر قابل‌توجهی در رژیم هیدرولوژیکی مانند رواناب حوضه خواهد شد. افزایش میزان بارش و دما احتمالاً در آینده سبب ایجاد سیل در منطقه می‌شود. فلاح کلاکی و همکاران (۱۴۰۰)، در پژوهشی به شبیه‌سازی رواناب با اعمال شرایط تغییر اقلیم در دوره نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) پرداختند. شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیک SWAT در شرایط تغییر اقلیم در هر ۴ ایستگاه تحت سناریوهای SSP کاهش رواناب و در ۳ ایستگاه تحت سناریوهای RCP افزایش رواناب را نشان داد. عباس‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی شرایط اقلیمی آینده حوضه رودخانه میناب را با در نظر گرفتن سه سناریوی CMIP6 (SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5) از مدل CanESM5 طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ و ۲۰۵۱ تا ۲۰۸۰ پرداختند. پیش‌بینی شد که میزان بارش و حداقل و حداکثر دمای منطقه در آینده نسبت به دوره پایه به ترتیب تا ۸۸، ۲۱ و ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. شیخ‌رودی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی و تحلیل اثرهای تغییرات اقلیمی بر مقدار رواناب و رسوب در حوضه آبخیز فریزی با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج نشان داد که میزان رواناب در دوره‌ی آینده کاهش و میزان رسوب افزایش خواهد یافت.

حوضه آبریز رودخانه کر که در شمال استان فارس واقع شده است به‌عنوان یکی از مناطق مهم کشاورزی این استان است. با توجه به اقلیم نیمه‌خشک این منطقه (نادری، ۱۳۹۷) و کاهش مراتع و پوشش جنگلی در گذر زمان (زارعی و همکاران، ۱۴۰۲)، رواناب حاصل از بارش می‌تواند خسارات زیادی را به دنبال داشته باشد، ازاین‌رو بررسی اثرات تغییر اقلیم بر جریان هیدرولوژیکی این حوضه بسیار ضروری است.

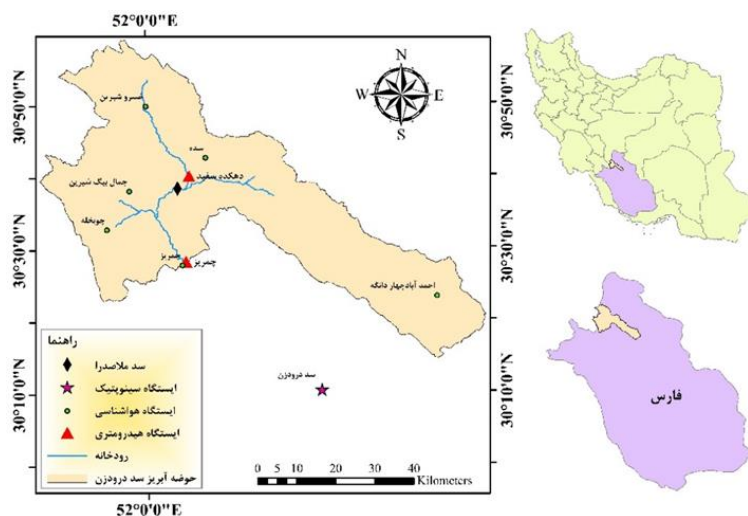
۳ روش تحقیق

هدف از این پژوهش پیش‌بینی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر جریان سطحی حوضه آبریز رودخانه کر برای یک دوره ۶۰ ساله (۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰) با استفاده از مدل SWAT^۱ است. در این پژوهش به‌منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر جریان خروجی از حوضه آبریز رودخانه کر از مدل SWAT و مدل اقلیمی LARS- WG V7 استفاده شده است.

۳.۱ منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کر با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، به وسعت ۴۳۴۲ کیلومترمربع در شمال استان فارس واقع گردیده است و در محدوده جغرافیای ۵۱ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۴ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه تا ۳۰ درجه و ۵۹ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. این حوضه سه دشت کامفیروز، خسرو شیرین و آسپاس را که حدود ۱۴ درصد از کل مساحت حوضه بختگان را فراگرفته است شامل می‌شود. طول رودخانه کر که اصلی‌ترین رودخانه حوضه آبریز است حدود ۱۵۰/۲ کیلومتر است و پس از عبور از دشت‌ها در نهایت به دریاچه سد درودزن می‌ریزد (شکوهی‌فر و همکاران، ۱۴۰۱). شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی را در ایران و استان فارس نشان می‌دهد.

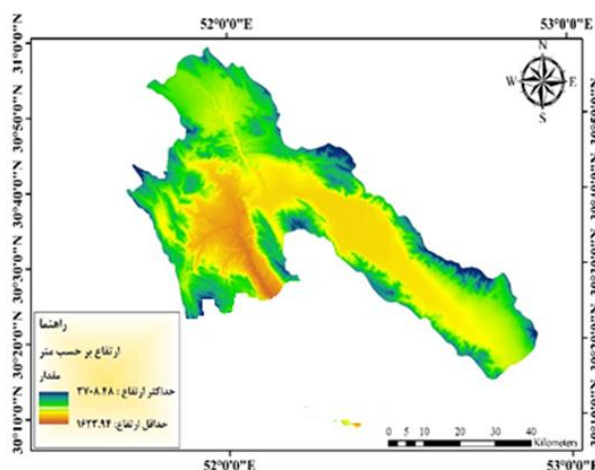
¹ Soil & Water Assessment Tool



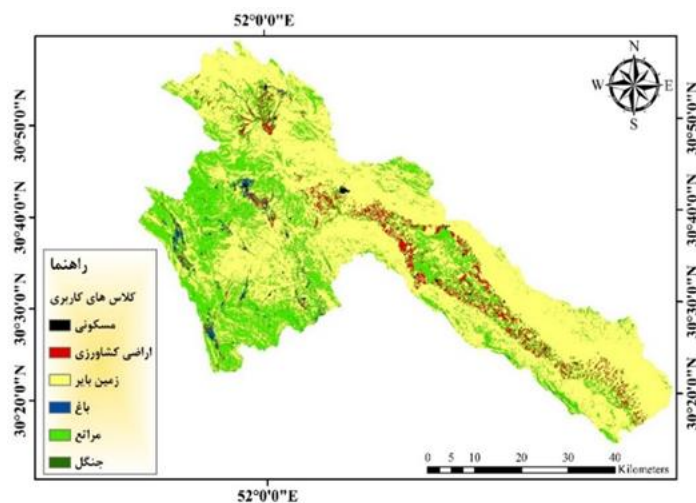
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان فارس

SWAT ۳,۲ مدل

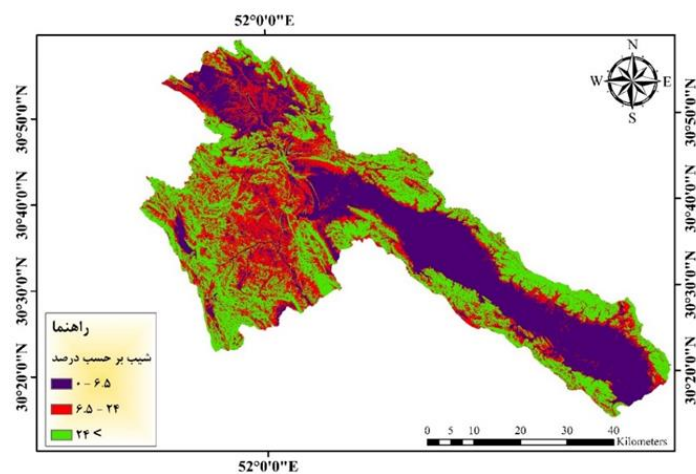
در این پژوهش از مدل SWAT نسخه ۲۰۱۲ موجود در محیط نرم افزار Arc GIS برای شبیه سازی جریان سطحی حوضه آبریز رودخانه کر استفاده شد. به منظور انجام محاسبات هیدرولوژی در مدل نیمه توزیعی SWAT طیف وسیعی از نقشه ها، اطلاعات و داده ها از قبیل نقشه DEM (شکل ۲)، نقشه کاربری اراضی (شکل ۳)، نقشه درصد شیب (شکل ۴)، نقشه بافت خاک (شکل ۵ و جدول ۱)، موقعیت مکانی ایستگاه های هیدرومتری، موقعیت مکانی سد (شکل ۱) مورد نیاز است. در این تحقیق از مدل رقومی ارتفاعی Copernicus با دقت مکانی ۳۰ متر که از سایت <https://opentopography.org/> اخذ گردید، استفاده شد. همچنین برای نقشه کاربری اراضی، از نقشه کاربری اراضی مطالعه شکوهی فر و همکاران (۱۳۹۹) استفاده شد. در این پژوهش حوضه مورد نظر به ۱۳ زیر حوضه تقسیم شده است (شکل ۶). همچنین داده های روزانه اقلیمی (دما، بارش) برای ۷ ایستگاه اقلیمی جهت شبیه سازی فرایندهای مورد نظر برای دوره ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ وارد مدل گردید. برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل و رواناب سطحی به ترتیب از روش هارگریوز-سامانی و روش شماره منحنی اصلاح شده سازمان حفاظت خاک آمریکا استفاده شد. نقشه شماره منحنی استخراج شده زیر حوضه ها، از شماره منحنی محاسبه شده برای هر HRU به دست آمد که در شکل ۷ نشان داده شده است.



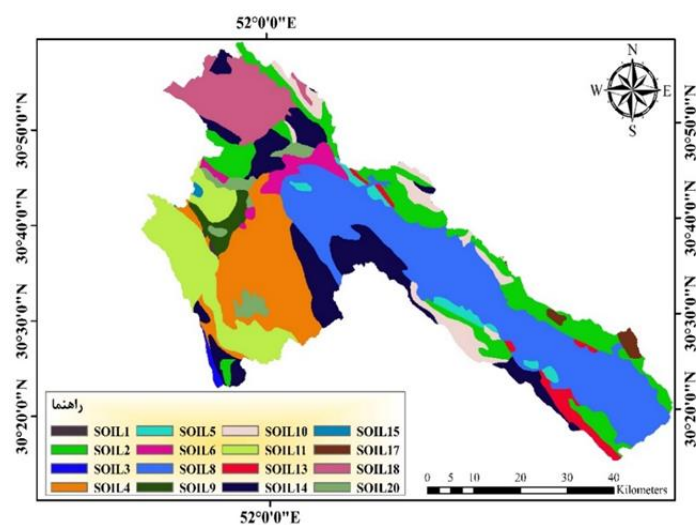
شکل ۲. مدل رقومی ارتفاعی DEM حوضه آبریز رودخانه کر



شکل ۳. نقشه کاربری اراضی حوزه آبریز رودخانه کر (شکوهی فر و همکاران، ۱۴۰۱)



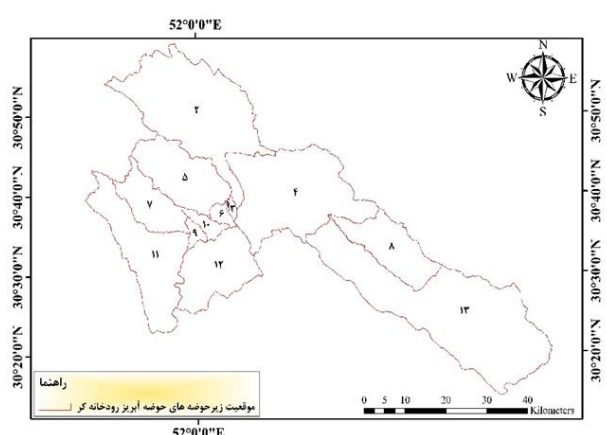
شکل ۴. نقشه شیب حوزه آبریز رودخانه کر



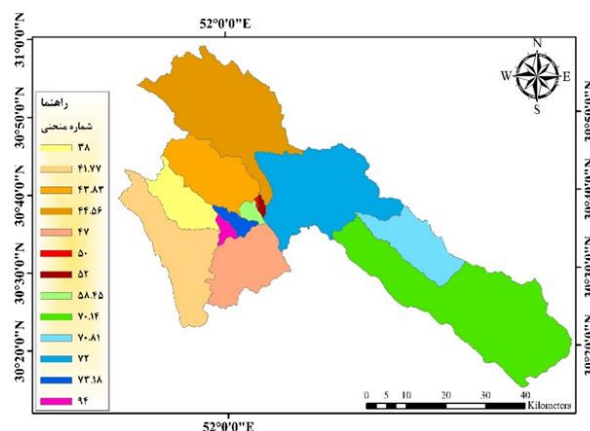
شکل ۵. نقشه بافت خاک حوزه آبریز رودخانه کر

جدول ۱. مشخصات نقشه بافت خاک

گروه هیدرولوژی	نوع بافت خاک	نوع خاک در مدل SWAT
D	LOAM	SOIL1
C	LOAM	SOIL2
B	LOAM	SOIL3
D	LOAM	SOIL4
B	CLAY-LOAM	SOIL5
B	LOAM	SOIL6
D	LOAM	SOIL7
B	CLAY-LOAM	SOIL8
D	LOAM	SOIL9
B	LOAM	SOIL10
B	LOAM	SOIL11
D	CLAY-LOAM	SOIL12
B	CLAY-LOAM	SOIL13
B	LOAM	SOIL14
C	LOAM	SOIL15
B	LOAM	SOIL16
C	LOAM	SOIL17
B	CLAY-LOAM	SOIL18
B	LOAM	SOIL19
B	LOAM	SOIL20



شکل ۶. نقشه موقعیت زیر حوضه‌های حوضه آبریز رودخانه کر



شکل ۷. نقشه شماره منحنی محاسبه‌شده برای هر زیرحوضه در حوضه آبریز رودخانه کر

۳/۳ آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

برای سنجیدن عملکرد مدل SWAT در شرایط پایه از داده‌های دو ایستگاه هیدرومتری چمریز و دهکده سفید برای واسنجی (سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸) و اعتبارسنجی (سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰) استفاده شد. ایستگاه چمریز نزدیک‌ترین ایستگاه هیدرومتری به خروجی حوضه است که به‌عنوان خروجی نهایی در نظر گرفته شد. همچنین به دلیل نبود ایستگاه هیدرومتری فعال برای کنترل خروجی جریان بعد از سد ملاصدرا ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید برای کنترل جریان ورودی به سد که قبل از ورودی سد ملاصدرا قرار دارد مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور واسنجی و تحلیل عدم قطعیت خروجی‌های مدل SWAT از روش SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده و تحلیل حساسیت از روش تحلیل موضعی انجام شد و نتایج حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی دبی جریان از شاخص‌های نش-ساتکلیف، R^2 ، P-Factor و R-Factor استفاده و پس از ارزیابی عملکرد مدل، مقادیر نهایی پارامترها در آخرین مرحله واسنجی به مدل SWAT اعمال شد. سپس مدل SWAT برای بررسی اثر سناریوهای آینده تغییر اقلیم بر جریان سطحی حوضه آبریز رودخانه کر مورد استفاده قرار گرفت.

۳/۴ تولید سناریوهای اقلیمی آینده با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو^۱ GCM

در این پژوهش از مدل‌های موجود در گزارش ششم CMIP6 برای پیش‌بینی دو پارامتر دما و بارش استفاده شده است. در این پژوهش به‌منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش و دما برای سه دوره‌ی آینده نزدیک (۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰) و آینده دور (۲۰۷۱ تا ۲۰۹۰) از ۳ مدل HadGEM3-GC31-LL، GFDL-ESM4 و ACCESS-CM2 تحت تأثیر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای ایستگاه‌های اقلیمی حوضه موردنظر از پایگاه داده کوپرنیک دریافت شد. فایل‌های موجود در این منبع، برای مقیاس جهانی به فرمت NETCDF موجود است که برای دریافت سری زمانی داده‌ها در این پژوهش از نرم‌افزار QGIS 3.12.2 و افزونه Temporal/Spectral Profile Tool استفاده شد. سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب سناریو میانه و سناریو بدبینانه می‌باشند. برای ریزمقیاس نمایی خروجی این سناریوها به مقیاس محلی از مدل LARS-WG ورژن ۷ استفاده شد. سپس پارامتر بارش، دمای حداقل و حداکثر تحت این سناریوها برای ۳ دوره آینده ذکرشده، پیش‌بینی شدند. همچنین از شاخص ضریب تعیین (R^2) و ضریب همبستگی (CC^2) جهت ارزیابی و تشخیص کارایی مدل‌های GCM بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های سال‌های گذشته حاصل از مدل‌ها در دوره پایه (۱۹۸۸-۲۰۱۴) استفاده شد.

۴ یافته‌ها و بحث

۴/۱ نتایج تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در این پژوهش، دوره آماری ۳۱ ساله (۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸) در جهت انجام شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. سال‌های ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۰ به‌عنوان Warm up و یا به‌اصطلاح گرم کردن مدل، سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ برای واسنجی مدل و سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ برای اعتبار سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به ساختار پیچیده مدل SWAT، تعداد پارامترهای واسنجی مدل ترجیحاً باید محدود باشد. از این‌رو برای کاهش زمان محاسبات، در ابتدا فرآیند آنالیز حساسیت به روش موضعی بر روی پارامترهای مؤثر در مدل انجام شد (جدول ۲). نتایج واسنجی و اعتبار سنجی ایستگاه‌های هیدرومتری دهکده سفید و چمریز در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به مقادیر معیارهای آماری در پژوهش حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که مدل SWAT عملکرد نسبتاً خوبی را در برآورد جریان

¹ General circulation model

² correlation coefficient

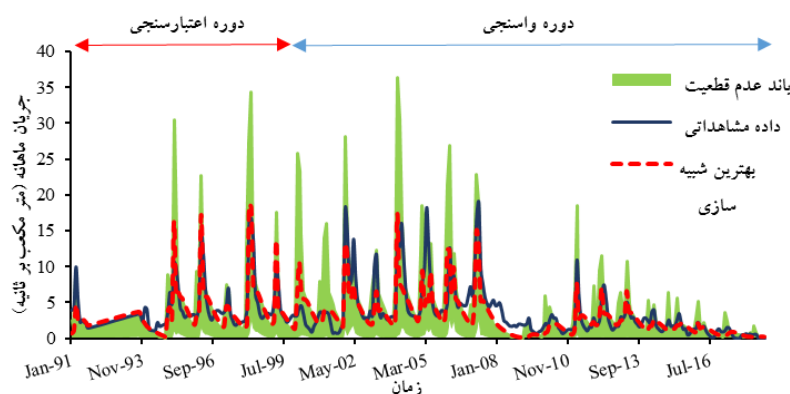
سطحی حوضه آبریز رودخانه کر داشته است. نتایج نشان می‌دهد که مدل به‌خوبی توانسته است نوسانات جریان آب ایستگاه چمریز و دهکده سفید در طول دوره اعتبارسنجی را در مقایسه با دوره واسنجی شبیه‌سازی کند. شکل‌های ۸ و ۹ نمودار سری زمانی دبی مشاهداتی (سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۸) و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل به همراه باند ۹۵ درصد اطمینان را نشان می‌دهد. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که مدل زمان وقوع مقادیر دبی اوج و دبی‌های پایه را به‌خوبی مدل‌سازی نموده است. همچنین مقادیر دبی اوج نیز به‌ویژه در ایستگاه چمریز به‌خوبی شبیه‌سازی شده‌اند.

جدول ۲. نتایج آنالیز حساسیت و مقادیر کالیبره شده پارامترهای مدل SWAT

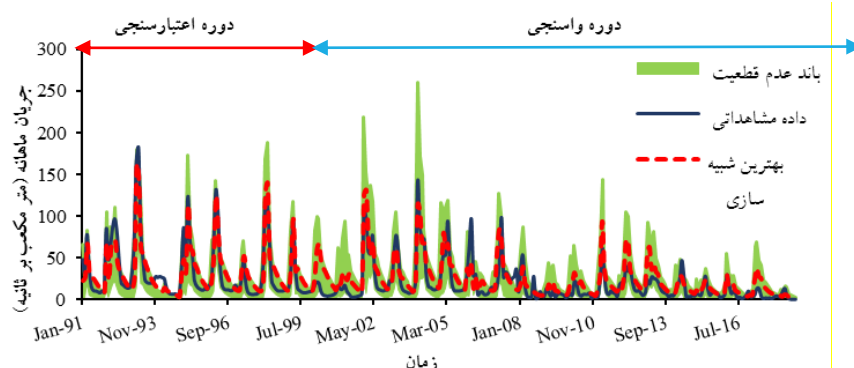
ردیف	پارامتر	کمینه	بیشینه	توضیحات
۱	v_SMFMN.bsn	-۲/۰۳	۵	فاکتور ذوب برف ۲۱ دسامبر
۲	v_REVAPMN.gw	۰	۱۱۵/۵۴	عمق آستانه آب در آبخوان کم‌عمق برای نفوذ به آبخوان عمیق
۳	v_RCHRG_DP.gw	۰/۴۹	۱	ضریب نفوذ آبخوان
۴	v_SLSUBBSN.hru	۵۷/۹۲	۱۵۳/۸۸	متوسط طول شیب
۵	v_GW_DELAY.gw	۰	۴۴/۴۶	زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان
۶	v_CH_K2.rte	۴۵/۸۴	۱۳۷/۶۶	هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی
۷	v_ESCO.hru	۰/۳۵	۱	فاکتور جبران تبخیر از خاک
۸	r_HRU_SLP.hru	-۰/۲۷	۰/۳۱	متوسط تندی شیب
۹	v_ALPHA_BF.gw	۰	۰/۶۶	فاکتور جریان پایه
۱۰	r_SOL_BD().sol	-۰/۵۴	۰/۰۹	چگالی ظاهری خاک
۱۱	r_SOL_AWC().sol	-۰/۱۷	۰/۴۹	متوسط آب قابل‌استفاده
۱۲	r_SOL_K().sol	-۰/۳۸	۰/۴۵	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک
۱۳	v_SFTMP.bsn	-۱/۵۱	۵/۴۸	دمای بارش برف
۱۴	v_ALPHA_BNK.rte	۰/۴۱	۱	ضریب جریان پایه برای ذخیره ساحلی
۱۵	v_LAT_TTIME.hru	۰	۱۱۶/۲۹	زمان پیمودن جریان جانبی
۱۶	v_PLAPS.sub	-۱۷/۲۷	۶۰/۹۴	گرادیان بارندگی
۱۷	v_TLAPS.sub	-۷/۱۵	۲/۹۵	گرادیان دما
۱۸	r_PCPMM().wgn	۰	۰/۹۹	متوسط کل بارش ماهانه در طول دوره پیش‌بینی
۱۹	r_CN2.mgt	-۰/۷۲	۰/۰۳	شماره منحنی
۲۰	v_SMTMP.bsn	-۹/۰۸	۰/۳۱	دمای پایه ذوب برف

جدول ۳. نتایج شاخص‌های آماری مدل SWAT

نام ایستگاه	واسنجی				اعتبار سنجی			
	ضریب تعیین	نش ساتکلیف	r-factor	p-factor	ضریب تعیین	نش ساتکلیف	r-factor	p-factor
دهکده سفید	۰/۶۹	۰/۶۵	۱/۱۵	۰/۵۶	۰/۶۵	۰/۵۴	۱/۶۰	۰/۴۸
چمریز	۰/۷۳	۰/۶۵	۱/۵۰	۰/۹۵	۰/۷۹	۰/۷۸	۱/۰۳	۰/۷۸



شکل ۸. دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده به همراه باند ۹۵ درصد اطمینان (دهکده سفید)



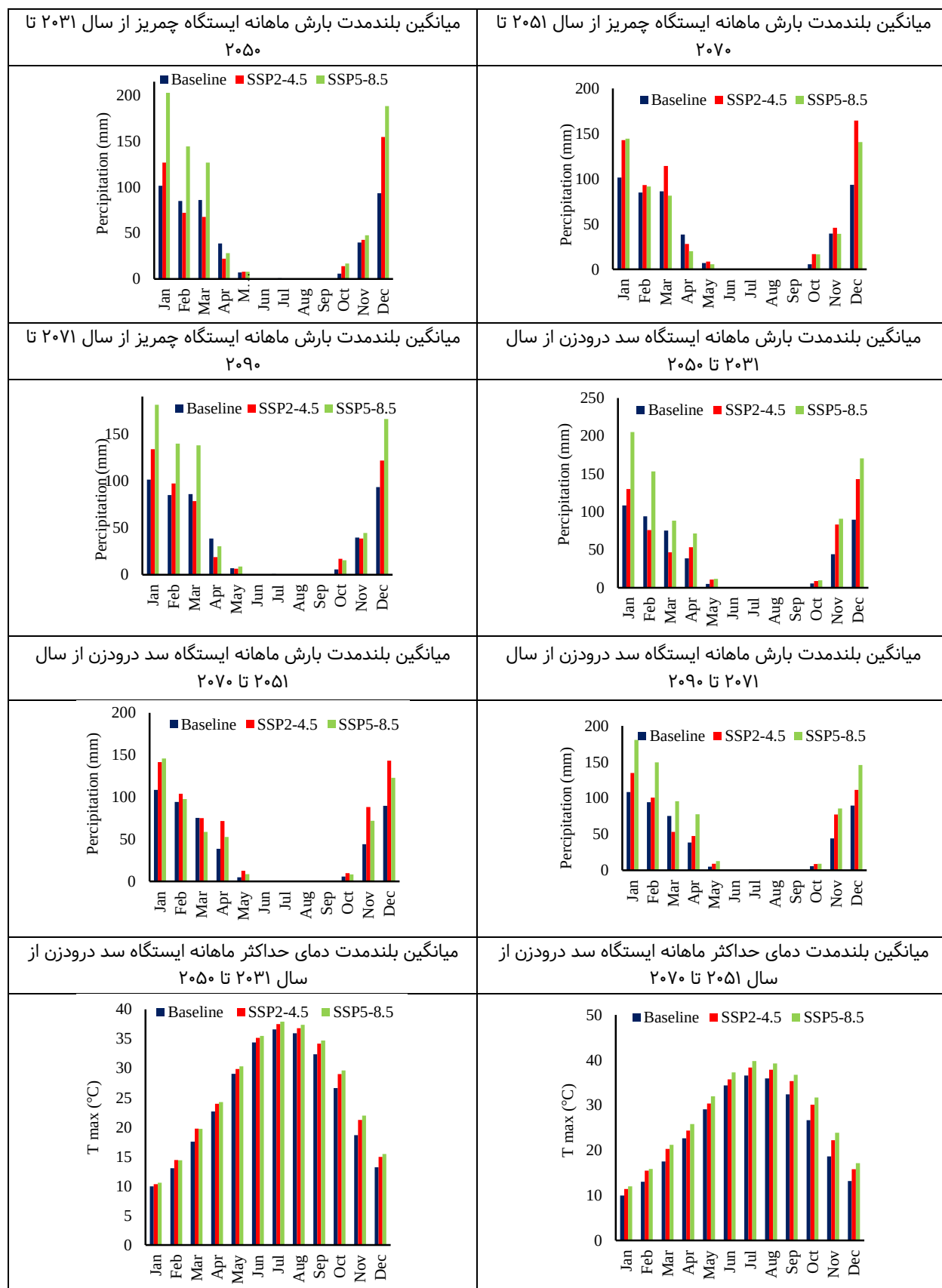
شکل ۹. دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده به همراه باند ۹۵ درصد اطمینان (ایستگاه چمریز)

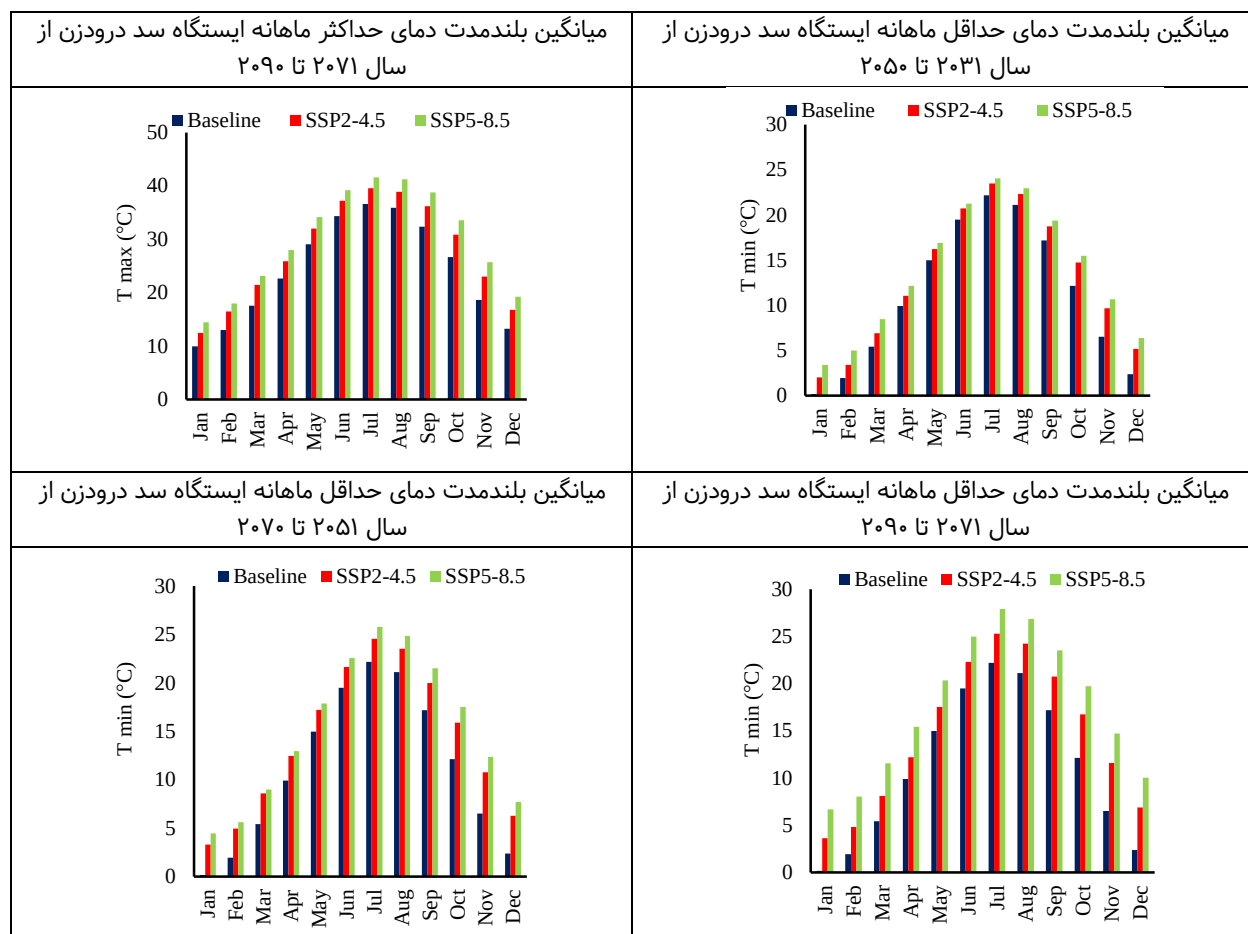
۴٫۲ بررسی وضعیت حوضه در شرایط تغییر اقلیم

نتایج ارزیابی دقت مدل های اقلیمی انتخابی در تخمین بارش، دمای حداقل و حداکثر ماهانه در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۴، داده های بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر مدل HadGEM3-GC31-LL به میزان بسیار خوبی با داده های مشاهداتی ایستگاه های اقلیمی در تطابق است؛ بنابراین متغیرهای بارش و دما، با استفاده از مدل HadGEM3-GC31-LL برای دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۹۰ تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد پیش بینی قرار گرفتند (شکل ۱۰). به علت مشابه بودن نتایج در ایستگاه های مورد مطالعه و تعدد نمودارهای خروجی، تنها نمودار و نتایج دو ایستگاه در متن مقاله اشاره شده است.

جدول ۴. نتایج عملکرد معیارهای ارزیابی برای انتخاب بهترین مدل GCM

نام ایستگاه			احمدآباد چهاردانگه	چمریز	چوبخوله	جمال بیگ	خسروشیرین	سده	سد درودزن		
مدل اقلیمی			بارش	بارش	بارش	بارش	بارش	بارش	بارش	حداکثر	حداقل
HadGEM3- GC31-LL	CC	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۱	۱/۰۰	۱/۰۰
	R ²	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۳	۱/۰۰	۰/۹۹
GFDL-ESM4	CC	۰/۵۳	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۹۹	۰/۹۹
	R ²	۰/۲۹	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸
ACCESS-CM2	CC	۰/۷۷	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۱	۱/۰۰	۱/۰۰
	R ²	۰/۶۰	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۶۶	۱/۰۰	۰/۹۹

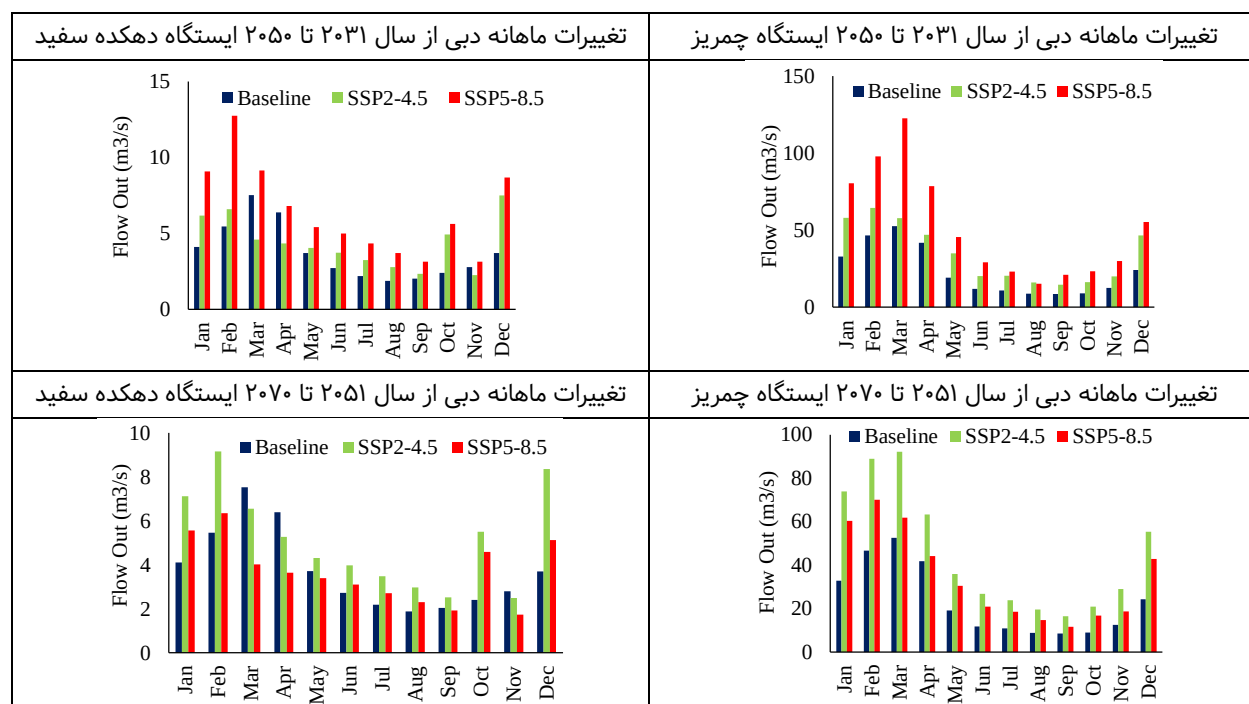




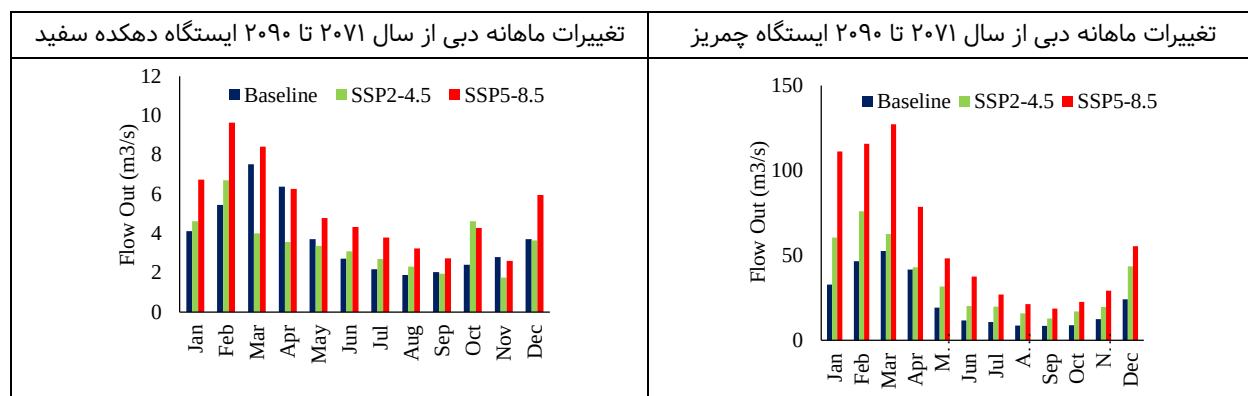
شکل ۱۰. میانگین بلندمدت بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل در ایستگاه‌های تبخیر سنجی و سینوپتیک برای دوره آینده ۲۰۳۰ تا ۲۰۹۰ تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5

بیشترین افزایش بارش نسبت به دوره پایه تحت سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ایستگاه چمریز در فصل پاییز و زمستان در تمام دوره‌های آینده است بطوریکه میانگین بارش تحت سناریوی SSP2-4.5 در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ به میزان ۲۵/۳۹ میلی‌متر در ماه ژانویه و ۶۱/۲۳ میلی‌متر در ماه دسامبر، در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ به میزان ۴۱/۳۳ میلی‌متر در ماه ژانویه و ۷۱ میلی‌متر در ماه دسامبر و در دوره ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۰ به میزان ۳۲/۵۲ میلی‌متر در ماه ژانویه و ۲۸/۳۰ میلی‌متر در ماه دسامبر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. میانگین بارش تحت سناریو SSP5-8.5 در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ به میزان ۱۰۱ میلی‌متر در ماه ژانویه و ۹۵/۱۱ میلی‌متر در ماه دسامبر، در دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰ به میزان ۴۳ میلی‌متر در ماه ژانویه و ۴۷/۲۲ میلی‌متر در ماه دسامبر و در دوره ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۰ به میزان ۷۹/۷۶ میلی‌متر در ماه ژانویه و ۷۲/۷۷ میلی‌متر در ماه دسامبر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. در این ایستگاه تبخیر سنجی، بیشترین کاهش بارش نسبت به دوره پایه تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ماه آوریل است بطوریکه میانگین میزان بارش در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ در ماه آوریل تحت سناریوی SSP2-4.5، ۱۲/۷۴ میلی‌متر و تحت سناریو SSP5-8.5، ۱۲/۳۹ میلی‌متر نسبت به دوره پایه کاهش یافته است. بیشترین افزایش بارش نسبت به دوره پایه تحت سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ایستگاه سد درودزن در ماه‌های ژانویه، نوامبر و دسامبر است بطوریکه میانگین میزان بارش در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۱ در ماه ژانویه تحت سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۲۶/۹۴ و ۶۸/۶۵ میلی‌متر، در ماه نوامبر تحت سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ۳۸/۸ میلی‌متر و در ماه دسامبر تحت سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۴۲/۹۱ و ۵۶/۷۹ میلی‌متر نسبت به

دوره پایه افزایش یافته است. در این ایستگاه سینوپتیک، بیشترین کاهش بارش نسبت به دوره پایه تحت سناریوی SSP2-4.5 در ماه مارچ است بطوریکه میانگین میزان بارش در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ در ماه مارچ تحت سناریوی SSP2-4.5، ۱۷ میلی‌متر کاهش یافته است. تحت سناریو SSP5-8.5 کاهش بارش به میزان ناچیزی در ماه جون و آگوست نسبت به دوره پایه است و در سایر ماه‌ها روند افزایشی داشته است. همچنین میانگین دمای حداقل و میانگین دمای حداکثر ماهانه تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در همه ماه‌های بخصوص در فصل پاییز و زمستان در دوره آینده خواهد یافت. میانگین دمای حداکثر ماهانه تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در کل دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ در ماه مارچ به ترتیب ۲/۹۸ و ۳/۸۲ درجه سانتی‌گراد و در ماه نوامبر به ترتیب ۳/۵ و ۵/۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. همچنین میانگین دمای حداقل ماهانه تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در کل دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ در ماه ژانویه به ترتیب ۲/۸۲ و ۴/۶۹ درجه سانتی‌گراد و در ماه نوامبر به ترتیب ۴/۱۷ و ۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. تغییرات بارش در آینده تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 روند ثابتی نداشته و در بعضی از ماه‌های سال حوضه با افزایش بارش و در مابقی ماه‌ها با کاهش بارش روبه‌رو است. بیشترین افزایش ماهانه بارش ایستگاه چمریز تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از سال ۲۰۳۱ تا سال ۲۰۹۰ در فصل پاییز به ترتیب به میزان ۲۲/۱۹ و ۶/۶۴ میلی‌متر و زمستان به ترتیب به میزان ۱۲/۱۴ و ۳۵/۹۷ میلی‌متر رخ داده است و بیشترین افزایش ماهانه بارش ایستگاه سد درودزن تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از سال ۲۰۳۱ تا سال ۲۰۹۰ در فصل پاییز به ترتیب به میزان ۲۸/۳۳ و ۳ میلی‌متر و در فصل زمستان به ترتیب به میزان ۴/۶۲ و ۳۴/۷۶ میلی‌متر رخ داده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، حوضه مورد مطالعه در آینده با افزایش دما و بارش روبه‌رو خواهد بود. در بسیاری از نقاط دنیا افزایش بارش در دوره‌های آینده تحت سناریوهای SSP پیش‌بینی شده است (جیانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ المازروی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ عباس‌زاده و همکاران، ۲۰۲۳) که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.



^۱ Almazroui



شکل ۱۱. تغییرات ماهانه دبی از سال ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ تحت دو سناریوی SSP نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱ تا ۲۰۱۸)

طبق شکل ۱۱، تغییرات ماهانه دبی در ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید و چمریز تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان می‌دهد که بیشترین افزایش دبی نسبت به دوره پایه در تمامی دوره‌های آینده در فصول پاییز و زمستان اتفاق می‌افتد که با توجه به اینکه در ایستگاه‌های اقلیمی هم‌جوار ایستگاه‌های هیدرومتری بیشترین افزایش بارش نسبت به دوره پایه در این فصول است، این مسئله کاملاً توجیه‌پذیر است، این نتایج با نتایج مطالعات عباس‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) و حاجی‌قاسمی و همکاران (۱۴۰۰) همخوانی دارد. دبی در ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 طی سال‌های ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ در ماه ژانویه به ترتیب ۱/۷۳ و ۶/۱۸ مترمکعب بر ثانیه و در ماه دسامبر به ترتیب ۲/۴۷ و ۵/۵۶ مترمکعب بر ثانیه افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش دبی در ایستگاه هیدرومتری چمریز در ژانویه و دسامبر در دوره ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ اتفاق می‌افتد بطوریکه در این دوره میانگین میزان دبی در ایستگاه هیدرومتری چمریز تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 طی سال‌های ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ در ماه ژانویه به ترتیب ۲۷/۸۲ و ۵۳/۶۳ مترمکعب بر ثانیه و در ماه دسامبر به ترتیب ۳۶/۲۹ و ۴۵/۱۸ مترمکعب بر ثانیه افزایش خواهد یافت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، حوضه مورد مطالعه در آینده با افزایش دما و بارش روبه‌رو خواهد بود. در بسیاری از نقاط دنیا افزایش بارش در دوره‌های آینده تحت سناریوهای SSP پیش‌بینی شده است (مامون و همکاران، ۲۰۲۴؛ تکلای^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ المازرویی و همکاران، ۲۰۲۰؛ عباس‌زاده و همکاران، ۲۰۲۳ و حیدر و همکاران، ۲۰۲۳) که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

۵ بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر جریان خروجی از حوضه آبریز رودخانه کر در جنوب ایران پرداخته شده است. در رسیدن به این هدف از مدل SWAT برای شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی محدوده مورد مطالعه و مدل LARS-WG V7 برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش و دما آینده استفاده شده است. مطابق با نتایج حاصل‌شده، مدل SWAT به‌خوبی توانسته است نوسانات جریان حوضه آبریز رودخانه کر (ایستگاه چمریز و دهکده سفید) در طول دوره واسنجی و اعتبارسنجی را شبیه‌سازی کند. همچنین مدل، زمان وقوع مقادیر دبی اوج و دبی‌های پایه را به‌خوبی مدل‌سازی کرده است. نتایج پیش‌بینی مدل HadGEM3-GC31-LL برای متغیرهای بارش و دما در دوره آینده ۲۰۳۱ تا ۲۰۹۰ با استفاده از نرم‌افزار LARS-WG V7 ریزمقیاس‌نمایی شد. در دوره آینده متوسط ماهانه دما حداقل و حداکثر تحت هر دو سناریو در تمام ماه‌ها نسبت به دوره پایه روند افزایشی خواهد داشت که بیشترین افزایش ماهانه دما حداقل و حداکثر تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از سال ۲۰۳۱

^۱ Teklay

تا سال ۲۰۹۰ در فصل پاییز و زمستان رخ داده است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از میانگین ماهانه بارش، تغییرات بارش در آینده تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 روند ثابتی نداشته و در بعضی از ماه‌های سال حوضه با افزایش بارش و در مابقی ماه‌ها با کاهش بارش روبه‌رو است. بیشترین افزایش ماهانه بارش ایستگاه چمریز تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از سال ۲۰۳۱ تا سال ۲۰۹۰ در فصل پاییز به ترتیب به میزان ۲۲/۱۹ و ۶/۶۴ میلی‌متر و زمستان به ترتیب به ترتیب به میزان ۱۲/۱۴ و ۳۵/۹۷ میلی‌متر رخ داده است و بیشترین افزایش ماهانه بارش ایستگاه سد درودزن تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از سال ۲۰۳۱ تا سال ۲۰۹۰ در فصل پاییز به ترتیب به میزان ۲۸/۳۳ و ۳ میلی‌متر و در فصل زمستان به ترتیب به میزان ۴/۶۲ و ۳۴/۷۶ میلی‌متر رخ داده است. همچنین، تغییرات ماهانه دبی در ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید و چمریز تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان می‌دهد که بیشترین افزایش دبی نسبت به دوره پایه در تمامی ماه‌ها در دوره‌های آینده اتفاق می‌افتد. بیشترین افزایش دبی در ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید و چمریز تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در فصل پاییز و زمستان اتفاق می‌افتد که با توجه به اینکه در ایستگاه‌های اقلیمی هم بیشترین افزایش بارش نسبت به دوره پایه در فصل پاییز و زمستان است، این مسئله کاملاً توجیه‌پذیر است. با توجه به یافته‌های این پژوهش نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش میزان بارندگی‌ها در حوضه آبریز رودخانه کر، اتخاذ راهکارهایی در جهت نفوذ آب باران و افزایش منابع آب زیرزمینی و کاهش خطرات ناشی از افزایش جریان‌ات سطحی و وقوع سیلاب اجتناب‌ناپذیر است. راهکارهایی همانند ایجاد سیل‌بند، حفظ مراتع و پوشش گیاهی با رویکرد افزایش پوشش طبیعی منطقه و کاشت درختان سریع‌الرشد برای این منطقه بسیار مناسب است.

References

- Abbaszadeh, M., Bazrafshan, O., Mahdavi, R., Sardooi, E. R., & Jamshidi, S. (2023). Modeling future hydrological characteristics based on land use/land cover and climate changes using the SWAT model. *Water Resources Management*, 37(10), 4177-4194. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03545-6>
- Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Nazrul Islam, M., Ismail, M., Klutse, N. A. B., & Siddiqui, M. H. (2020). Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4, 455-475. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00161-x>
- Colín-García, G., Palacios-Vélez, E., López-Pérez, A., Bolaños-González, M. A., Flores-Magdaleno, H., Ascencio-Hernández, R., & Canales-Islas, E. I. (2024). Evaluation of the Impact of Climate Change on the Water Balance of the Mixteco River Basin with the SWAT Model. *Hydrology*, 11(4), 45. <https://doi.org/10.3390/hydrology11040045>
- Dhar, S., & Mazumdar, A. (2009). Hydrological modelling of the Kangsabati River under changed climate scenario: case study in India. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(16), 2394-2406. <https://doi.org/10.1002/hyp.7351>
- Fallah Kalaki, M., Shokri Kuchak, V., & Ramezani Etedali, H. (2021) Simulating the Effects of Climate Change on Runoff Using the CMIP5 and CMIP6 Climate Models by SWAT Hydrological

- Model (Case Study: Tashk-Bakhtegan Basin). Iran-Water Resources Research, 17 (3), 345- 359. [In Persian]
- Haider, S., Masood, M. U., Rashid, M., Alshehri, F., Pande, C. B., Katipoğlu, O. M., & Costache, R. (2023). Simulation of the potential impacts of projected climate and land use change on runoff under CMIP6 scenarios. Water, 15(19), 3421. <https://doi.org/10.3390/w15193421>
 - Haji Ghasemi, sh., Zakeri Niri, M., & Najafi Jilani, A. (2021) .Investigating of Climate Change Effects on the Surface Runoff with SWAT Model (Case study: Mazlaghan River). Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 15(1), 121-137. [In Persian]
 - Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., & Zhang, L. (2020). Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections. Environmental Research Letters, 15(5), 054009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7d03>
 - Karami, E. (2016). Climate Change, Drought and Poverty in Iran: A Perspective of Future. Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 1(1), 63-80. [In Persian]
 - Khaing, M. (2014). Multi-model analysis of the climate change impact and adaptation of hydropower generation in the Myitnge river basin. Asian Institute of Technology, School of Engineering and Technology, Thailand (May, 2014).
 - Kundu, A., Dwivedi, S., & Chandra, V. (2014). Precipitation trend analysis over eastern region of India using CMIP5 based climatic models. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40, 1437-1442. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-8-1437-2014>
 - Legg, S. (2021). IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis. Interaction, 49(4), 44-45.
 - Lutz, A. F., ter Maat, H. W., Wijngaard, R. R., Biemans, H., Syed, A., Shrestha, A. B., ... & Immerzeel, W. W. (2019). South Asian river basins in a 1.5 C warmer world. Regional Environmental Change, 19, 833-847. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1433-4>
 - Mamoon, W. B., Jahan, N., Abdullah, F., & Rahman, A. (2024). Modeling the Impact of Climate Change on Streamflow in the Meghna River Basin: An Analysis Using SWAT and CMIP6 Scenarios. Water, 16(8), 1117. <https://doi.org/10.3390/w16081117>
 - Mansouri, B., Ahmadzadeh. H., Massah Bavani, A., Morig, S., Delavar, M., & Lotfi, S. (2015). Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Zarrinehrud Basin Using SWAT Model. Journal of Water and Soil. 28 (6), 1191-1203. [In Persian]
 - Naderi, M. (2018). The effect of climate change on the inflow and reservoir volume of Doroodzan dam, north of Fars province. Scientific Quarterly of Earth Sciences, 29(115), 259-268. [In Persian]
 - Nguyen, H., Mehrotra, R., & Sharma, A. (2020). Assessment of climate change impacts on reservoir storage reliability, resilience, and vulnerability using a multivariate frequency bias

correction approach. Water resources research, 56(2), e2019WR026022. <https://doi.org/10.1029/2019WR026022>

- Parvizi, S., Talebi, A., Malekinezhad, H., & Sadeghi, M. (2020). Investigation of the Effect of Climate Change on Some of Hydrological Parameters in Jamishan Watershed using SWAT Model. Environment and Water Engineering, 6(4), 430-443. Doi: [10.22034/jewe.2020.238651.1383](https://doi.org/10.22034/jewe.2020.238651.1383). [In Persian]
- Schuol, J., Abbaspour, K. C., Yang, H., Srinivasan, R., & Zehnder, A. J. (2008). Modeling blue and green water availability in Africa. Water resources research, 44(7). <https://doi.org/10.1029/2007WR006609>
- Shokouhifar, Y., Zarei, H., Akhondali, A. M., & Khoramian, A. (2022). Assessment of effects of changes in land use on the water balance components using SWAT (Case study: Doroudzan dam basin). Irrigation Sciences and Engineering, 45(2), 139-150.
- Sheikhrودي, E., Golkarian, A., Zarrin, A., & Rashki, A. (2023). Investigating and analyzing the effects of climate change on the amount of runoff and sediment using the SWAT model (Case study: Ferizi watershed). Water and Soil Management and Modelling, (), -. Doi: [10.22098/mmws.2023.13722.1361](https://doi.org/10.22098/mmws.2023.13722.1361). [In Persian]
- Skliris, N., Zika, J. D., Nurser, G., Josey, S. A., & Marsh, R. (2016). Global water cycle amplifying at less than the Clausius-Clapeyron rate. Scientific reports, 6(1), 38752. <https://doi.org/10.1038/srep38752>
- Teklay, A., Dile, Y. T., Asfaw, D. H., Bayabil, H. K., & Sisay, K. (2021). Impacts of climate and land use change on hydrological response in Gumara Watershed, Ethiopia. Ecohydrology & Hydrobiology, 21(2), 315-332. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.12.001>
- Tong, S., Soskolne, C.L. (2007). Global environmental change and population health: Progress and challenges. Ecohealth 4, 352-362. <https://doi.org/10.1007/s10393-007-0125-1>
- Zarei, H., Shenani Hoveyzeh, S. M., & Jorabian Shushtri, S. (2023). Temporal-spatial prediction of land use changes using the LCM model in the Doroodzan Dam watershed. Environment and Water Engineering, 10(3), 363-378. [In Persian]