

## Simulation of climate change scenarios using the CMIP6 models (Case study: Taleqan Watershed)

Parvin Mohammadi<sup>1</sup>, Arash Malekian<sup>1\*</sup>, Ali Selajegheh<sup>1</sup>, Mojtaba Nouri<sup>2</sup>, Hamed Rafiei<sup>3</sup>

1- Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran

3- Department of Agricultural Economics, Faculty of Economics and Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

\* Corresponding author: [malekian@ut.ac.ir](mailto:malekian@ut.ac.ir)

(Received: 06 February 2024

Revised: 29 March 2024

Accepted: 30 April 2024)

### Extended Abstract

**Introduction:** The industrialization of communities has led to an increase in greenhouse gases over recent decades. This increase has caused the warming of the earth's atmosphere, and it affected other components of the climate system and led to climate change. The evidence confirms that the global average temperature of the Earth is increasing, especially in recent years. Moreover, precipitation intensity has changed over time. It is expected that changes in temperature and precipitation will cause a series of climatic extreme events. Therefore, it is an undeniable fact that the intensification of global climate change has affected the development and survival of mankind. The purpose of this research is to investigate and predict these changes in the future decades in the Taleqan watershed, Iran.

**Materials and methods:** The study area, Taleqan watershed with a mountainous topography, is located in the northwest of Alborz province, Iran. The annual precipitation and temperature of the region are 485.8mm and 11.4°C, respectively. To estimate and generate data for the future period (2021-2040), we used daily data from regional stations, including precipitation data from the base period (1979-2014) and average temperature data from the base period (2003-2014). We also utilized output data from the General Circulation Model (CanESM5) under climate scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5). CanESM5 is a global model developed for simulating future climate change and developing seasonal and decadal forecasts. CanESM5 is usually used for large-scale projections, therefore, SDSM is chosen to downscale climate data. The changes of average precipitation and temperature parameters for three future periods (2021-2040, 2041-2060, and 2081-2100) were evaluated and RMSE, MAD and R were used to evaluate model accuracy.

**Results and Discussion:** The greatest increase in precipitation in Armot station is in March, May and November and the greatest decrease in precipitation in September and October is predicted under the SSP scenarios for the periods 2021-2040, 2041-2060 and 2081-2100. In Sakranchal station, the highest increase in precipitation is in three periods of March, February and May, and the highest decrease is in September and October under the SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The highest increase in precipitation in the Zidasht station is in March, May and November, April and December under the SSP scenarios. Also, the biggest decrease is in September under the SSP scenarios for the three forecast periods. In Gateh Deh station, the highest increase in precipitation during the periods of 2021-2040 and 2081-2100 is related to March, May and November, and for the period of 2041-2060, it is related to the months of March, February and May under the SSP5-8.5. During the periods of 2021-2040 and 2041-2060, the greatest decrease will be in September under the SSP scenarios, also in the period of 2081-2100, the greatest decrease will be in July under the SSP scenarios and in October, under the SSP5-8.5. During three periods, the greatest increase in Jovestan station precipitation is predicted in February, March, May and November. Also, the greatest decrease in the period of 2021-2040 will be in September and August under the SSP5-8.5 and in the periods of 2041-2060 and 2081-2100 in October and July under the SSP1-2.6. Based on the results of the temperature forecast in Zidasht station during three periods, the average and average maximum temperature in January and February under the SSP scenarios have a decreasing trend and other months show an increasing trend.

**Conclusion:** The results show that precipitation has a decreasing trend in some months and some increasing trend. The obtained results indicate that the precipitation and temperature variables in the periods of the 2021-2040, 2041-2060 and 2081-2100 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 will experience an increasing trend compared to the base period. The highest increase in temperature and precipitation is in the period of 2021-2040 under scenarios SSP2-4.5 and SSP1-2.6, respectively. This study demonstrates that Taleqan watershed will be vulnerable to future climate change. An increase in temperature can cause snowmelt and reduce snow storage. The stability time of water reserves in the watershed will be reduced. Precipitation changes in the region can alter the precipitation pattern from snow to rain. This reduces surface and underground water, and can affect crop yield.

**Keywords:** Climate change, Downscaling, Taleqan, SSP scenarios, CMIP6, SDSM

**Citation:** Mohammadi, P., Malekian, A., Nouri, M. & Rafiei, H. (2025). Simulation of climate change scenarios using the CMIP6 models (Case study: Taleqan Watershed). *Integrated Watershed Management*, 4(3), 30-51. doi= 10.22034/iwm.2024.2022313.1132

### Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





## شبیه‌سازی سناریوهای تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان)

پروین محمدی<sup>۱</sup>، آرش ملکیان<sup>۲\*</sup>، علی سلاجقه<sup>۱</sup>، مجتبی نوری<sup>۲</sup>، حامد رفیعی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۲</sup> شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده اقتصاد و کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

\* نویسنده مسئول: [malekian@ut.ac.ir](mailto:malekian@ut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

### چکیده مبسوط

**مقدمه:** صنعتی شدن جوامع منجر به افزایش گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر شده است. این افزایش باعث گرم شدن جو زمین شده و سایر اجزای سیستم اقلیمی را تحت تأثیر قرار داده و منجر به تغییرات اقلیمی شده است. شواهد نشان می‌دهد که میانگین جهانی دمای زمین به‌ویژه در سال‌های اخیر در حال افزایش است. بنابراین تأثیر تشدید تغییرات اقلیم جهانی بر توسعه و بقای بشریت یک واقعیت غیرقابل انکار است. هدف از این پژوهش، بررسی و پیش‌بینی تغییرات در دهه‌های آینده در حوزه آبخیز طالقان است.

**مواد و روش‌ها:** منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز طالقان با توپوگرافی کوهستانی در شمال غرب استان البرز قرار دارد. میزان بارش و درجه حرارت سالانه منطقه به ترتیب ۴۸۵/۸ میلی‌متر و ۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد است. برای برآورد و تولید داده‌ها برای دوره آتی (۲۰۲۱-۲۱۰۰)، از داده‌های روزانه ایستگاه‌های منطقه‌ای، از جمله داده‌های بارش با دوره پایه (۱۹۷۹-۲۰۱۴)، و داده‌های میانگین دما با دوره پایه (۲۰۰۳-۲۰۱۴) استفاده گردید. همچنین داده‌های خروجی مدل گردش عمومی (CanESM5) تحت سناریوهای اقلیمی (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) مورد استفاده قرار گرفت. CanESM5 یک مدل جهانی است که برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و توسعه پیش‌بینی‌های فصلی و دهه‌ای توسعه یافته است. CanESM5 معمولاً برای پیش‌بینی‌ها در مقیاس بزرگ استفاده می‌شود؛ بنابراین، SDSM برای کاهش مقیاس داده‌های اقلیمی انتخاب می‌شود. تغییرات پارامترهای میانگین بارش و دما برای سه دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) با مدل ریزمقیاس‌نمایی تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در منطقه مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی دقت مدل از RMSE، MAD و R استفاده شد.

**نتایج و بحث:** بیشترین افزایش بارش در ایستگاه آرموت در ماه‌های مارس، می و نوامبر و بیشترین کاهش بارش در سپتامبر و اکتبر در سناریوهای SSP برای دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ پیش‌نگری شده است. در ایستگاه سکرانچال بیشترین افزایش بارش در سه دوره در ماه‌های مارس، فوریه و می و بیشترین کاهش در سپتامبر و اکتبر تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است. بیشترین افزایش بارش در ایستگاه زیدشت در ماه‌های مارس، می و نوامبر، آوریل و دسامبر تحت سناریوهای SSP است. همچنین بیشترین کاهش در سپتامبر تحت سناریوهای SSP برای سه دوره پیش‌نگری شده است. در ایستگاه گنده بیشترین افزایش بارش در بازه‌های زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ مربوط به مارس فوریه و می تحت سناریوی SSP5-8.5 است. در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰ بیشترین کاهش در سپتامبر تحت سناریوهای SSP است. همچنین در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ بیشترین کاهش در جولای در سناریوهای SSP و اکتبر در سناریوی SSP5-8.5 خواهد بود. طی سه دوره، بیشترین افزایش بارش ایستگاه جوستان در فوریه، مارس، می و نوامبر پیش‌بینی می‌شود. بیشترین کاهش در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در سپتامبر و آگوست تحت SSP5-8.5 و در دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ در اکتبر و جولای تحت SSP1-2.6 خواهد بود. بیشترین افزایش بارش ایستگاه دیزان در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در می و آوریل (SSP1-2.6) و بیشترین کاهش در جولای (SSP5-8.5) خواهد بود. برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ بیشترین افزایش در می (SSP2-4.5) و ژوئن (SSP1-2.6) و بیشترین کاهش در سپتامبر (SSP5-8.5) است. بیشترین افزایش برای دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ در مارس و آوریل به ترتیب تحت SSP2-4.5 و SSP1-2.6 و بیشترین کاهش در اکتبر تحت SSP5-8.5 است. بر اساس نتایج پیش‌نگری دمای ایستگاه زیدشت طی سه دوره، میانگین و میانگین بیشینه دما در ژانویه و فوریه تحت سناریوهای SSP روند کاهشی و بقیه ماه‌ها روند افزایشی را نشان می‌دهند.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان می‌دهد که بارش در برخی ماه‌ها روند کاهشی و برخی روند افزایشی دارد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که متغیرهای بارش و دما طی دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 روند افزایشی را نسبت به دوره پایه تجربه خواهند کرد، بیشترین افزایش دما و بارش در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و به ترتیب تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP1-2.6 است. این مطالعه نشان می‌دهد که طالقان در آینده در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر خواهد بود. افزایش دما باعث ذوب برف و کاهش ذخیره برفی می‌شود. زمان پایداری ذخایر آب در حوضه کاهش می‌یابد. تغییرات بارش در منطقه می‌تواند الگوی بارش را از برف به باران تغییر دهد؛ که این امر باعث کاهش آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود و می‌تواند بر عملکرد محصول تأثیر بگذارد.

**واژگان کلیدی:** تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، طالقان، سناریوهای SSP، CMIP6، SDSM

**استناد:** محمدی، پ.، ملکیان، آ.، سلاجقه، ع.، نوری، م.، رفیعی، ح. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی سناریوهای تغییرات اقلیمی با

استفاده از مدل‌های (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۴(۳)، ۳۰-۵۱

### حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

## مقدمه

شدید شد که آسیب جدی به امنیت غذایی و آب وارد کرد (Funk *et al.*, 2019). فراوانی و شدت خشک‌سالی‌ها سالانه در شمال چین در سال‌های اخیر افزایش یافته است و میلیون‌ها نفر را تحت تأثیر قرار داده و سالانه ده‌ها میلیارد دلار خسارت اقتصادی به بار می‌آورد (Song *et al.*, 2021). منطقه غرب آسیا نیز به واسطه دگرگونی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و مداخله‌های انسانی، شاهد بحران شدیدی در حوزه منابع آب است (Hanafi, 2023); بنابراین این یک واقعیت غیرقابل انکار است که تشدید تغییرات اقلیمی در سطح جهانی بر توسعه و بقای بشریت تأثیر گذاشته است (Feng & Hu, 2014). بخش‌های مختلف اقتصاد مانند شیلات، صنعت، دامپروری، کشاورزی، بهداشت و سایر بخش‌ها تحت تأثیر تغییرات دما و بارندگی قرار گرفته‌اند؛ بنابراین، ارزیابی بارش و دمای آینده به افزایش ظرفیت برنامه‌ریزی برای تأثیرات اقلیمی کمک خواهد کرد (Wang *et al.*, 2018). راهکار مقابله با خطرات مربوط به کمبود آب، اقدامات سازگاری و ایجاد شرایط توانمندسازی و توسعه تاب‌آوری در برابر آب‌وهوا و همچنین افزایش سطح دانش جوامع و استفاده از هوش مصنوعی در این زمینه است (Sayad, 2023). پیش‌بینی تغییرات پارامترهای بارش و دما پیش‌نیاز ارزیابی تغییرات اقلیمی است. مدل جهانی آب‌وهوا (GCM)<sup>۱</sup> ابزار اصلی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی است. با این حال، وضوح افقی مدل‌های GCM عمدتاً در محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر است که منجر به عملکرد نامطلوب مدل هنگام مشخص کردن ویژگی‌های ناهمگن اقلیمی پیچیده می‌شود؛ بنابراین، نمی‌توان آن‌ها را مستقیماً برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در مقیاس کوچک استفاده کرد (Karamouz *et al.*, 2013). بزرگنمایی فضایی (سلول‌ها در حدود ۲/۵ درجه) به‌عنوان

صنعتی شدن جوامع منجر به افزایش گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر شده است. این افزایش باعث گرم شدن جو زمین و گرم شدن جو زمین نیز به نوبه خود بر وضعیت سایر اجزای سیستم اقلیمی تأثیر گذاشته و باعث ایجاد تغییرات اقلیمی شده است (Goodarzi *et al.*, 2022). تغییر اقلیم عبارت است از تغییر رفتار آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتار بلندمدت بر اساس اطلاعات ثبت شده در آن منطقه در طول یک افق زمانی. بارش، دمای حداقل و حداکثر سه متغیر آب و هوایی هستند که به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرند (Modaresi *et al.*, 2012). نوسانات اقلیم نوسانات سینوسی پارامترهای اقلیمی در سطح جهانی یا منطقه‌ای محسوب شده و نوعی الگوی اقلیمی به شمار می‌روند. این نوسان‌ها در دما، بارندگی یا دیگر پارامترهای اقلیمی دیده می‌شود و طی دوره معینی از زمان روی می‌دهد (Ramezanipour, 2018). شواهد تأیید می‌کنند که میانگین جهانی دمای زمین به‌ویژه در سال‌های اخیر در حال افزایش است (Cheng *et al.*, 2019). فراتر از آن، بارش در طول زمان از نظر شدت تغییر کرده است. انتظار می‌رود تغییرات دما و بارش باعث ایجاد یک سری رویدادهای حدی اقلیمی شود (Kodinariya and Kodinariya, 2021; Duan *et al.*, 2021; Makwana, 2013). موج‌های گرما و خشک‌سالی افزایش یافته است و رخدادهای سیل به‌ویژه در مناطق شهری بیش‌تر شده‌اند (Guptha *et al.*, 2022; Swain, 2022; Patel *et al.*, 2021, 2022; Nandi & Sahoo *et al.*, 2022). تغییرات اقلیمی و به عبارتی بارش ناکافی یا دمای زیاد ممکن است منجر به خشک‌سالی شود که بلا‌یای طبیعی با فراوانی زیاد، مدت طولانی و پوشش وسیع است (Liu *et al.*, 2021). به‌عنوان مثال، آفریقا در سال ۲۰۱۹ دچار خشک‌سالی

<sup>۱</sup>. General Circulation Model

مدل CanESM2<sup>۵</sup> و روش مقیاس‌سازی آماری را در حوضه آذرشهر بررسی کردند. نتایج نشان داد که دوره بازگشت سیلاب‌های شدید در آینده کاهش خواهد یافت. Zarrin و همکاران (۲۰۲۱) پارامتر دما را با مدل‌های MRI-CAMS-CSM1-0<sup>۷</sup>، BCC-CSM2-MR<sup>۶</sup> و ESM2-0<sup>۸</sup> تحت سناریوهای SSP<sup>۹</sup> در ۴۳ ایستگاه همدید ایران بررسی کرده‌اند. نتایج نشان‌دهنده روند افزایشی دما در ایران است. Sarabi و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر بارش در حوضه سد طرق با مدل‌های CMIP6<sup>۱۰</sup> پرداخته‌اند. نتایج مقدار بارش در دوره ۲۰۴۰ - ۲۰۲۱ تحت سناریو SSP5-8.5 افزایشی بوده، در حالی که تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP3-7.0 تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای نداشته‌اند. در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ بارش تحت سناریو SSP1-2.6 افزایشی و تحت دو سناریو SSP3-7.0 و SSP5-8.5 کاهش‌ی است. Niroumand fard و همکاران (۲۰۲۲) برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش ایستگاه بیرجند از مدل‌های MIROC-ES2L<sup>۱۱</sup>، IPSL-CM6A-LR<sup>۱۲</sup> و MRI-ESM2-0<sup>۱۳</sup> استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد تغییرات دما در دوره آتی روند افزایشی و بارش در برخی ماه‌ها افزایشی و در برخی کاهش‌ی بوده، به‌طور کلی میانگین مجموع بارش‌های ماهانه در آینده تحت سناریوی‌های SSP روند افزایشی داشته است. Roshani و Hamidi (۲۰۲۲) در تحقیق خود شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش ایستگاه ساری را با استفاده از مدل‌های CMIP6 و مدل LARS-WG<sup>۱۴</sup> را برای

یکی از نقاط ضعف این مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود (IPCC *et al.*, 2014). برای غلبه بر این مشکل، روش‌های کاهش مقیاس به تدریج پیشنهاد شده‌اند. روش‌های کاهش مقیاس یک فناوری است که به وسیله آن اطلاعات مربوط به تغییرات اقلیمی در مقیاس بزرگ با عوامل جغرافیایی منطقه‌ای ترکیب می‌شود تا اطلاعات اقلیمی فضایی بسیار دقیق به دست آید، در حال حاضر، روش‌های اصلی کاهش مقیاس، دینامیکی و آماری می‌باشند (Rummukainen, 2010)؛ بنابراین، افزایش مداوم انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث افزایش تغییرات اقلیمی می‌شود، الگوهای بارندگی را تغییر می‌دهد، ذوب برف را تسریع می‌کند و در نتیجه بر دسترسی به آب آشامیدنی و آبیاری تأثیر می‌گذارد. گرم شدن کره زمین و تأثیر آن بر بارندگی در نقاط مختلف جهان به‌عنوان مهم‌ترین مظاهر تغییر اقلیم از اهمیت بالایی برخوردار است (Dao *et al.*, 2023). در سال‌های اخیر گروه‌های مختلفی از دانشمندان در سراسر جهان مطالعات زیادی در زمینه مدل‌های گردش عمومی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استفاده کرده‌اند؛ که برخی از آن‌ها به شرح زیر خلاصه می‌شود:

Singh و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل‌های HadCM3<sup>۱</sup>، CGCM3<sup>۲</sup> و SDSM<sup>۳</sup>، اثرات تغییر اقلیم در حوضه رودخانه سوت لچ<sup>۴</sup> را بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها، افزایش کلی در میانگین سالانه دما و بارندگی در دو مدل پیش‌بینی شده است. Goodarzi و همکاران (۲۰۲۰) پیامدهای تغییر اقلیم آبی بر حجم سیلاب را با

<sup>۹</sup>. Shared Socio-economic Pathways

<sup>۱۰</sup>. Coupled Model Intercomparison Project Phase6

<sup>۱۱</sup>. Model Interdisciplinary Research on Climate-Earth System version2 for Long-term simulations

<sup>۱۲</sup>. Institut Pierre-Simon Laplace-Climate model6

Atmospheric -low resolution

<sup>۱۳</sup>. Climate Model data for hydrologic modeling

<sup>۱۴</sup>. Long Ashton Research Station Weather Generator

<sup>۱</sup>. Hadley Centre Coupled Model

<sup>۲</sup>. Coupled Global Climate Model

<sup>۳</sup>. Statistical DownScaling Model

<sup>۴</sup>. Sutlej River

<sup>۵</sup>. Canadian Earth System Model2

<sup>۶</sup>. Beijing Climate Center Climate System Model2

<sup>۷</sup>. Climate Academy of Meteorological Sciences -

Climate Simulation Model-0

<sup>۸</sup>. Meteorological Research Institute-Earth System Model2-0

مدل‌های HADGEM3-GC31-LL و CMCC-ESM2 در سناریوی SSP5-8.5 به ترتیب افزایش و کاهش بارش-رواناب را پیش‌بینی کرده‌اند. Shoja و Shamsipour (۲۰۲۳) اثر تغییر اقلیم را بر میزان بارش حوضه‌های تأمین‌کننده آب تهران در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰ با استفاده از مدل‌های CanESM5، CNRM-CM6-1<sup>۲</sup>، MRI-ESM2-0 و MIROC6<sup>۴</sup> و مدل‌های LS<sup>۵</sup> و DM<sup>۶</sup> بررسی کرده‌اند. نتایج افزایش بارش در بهار تحت سناریوی SSP2-4.5 و کاهش تحت سناریوی SSP5-8.5 را نشان داده است.

گرمایش جهانی منجر به بلایای آب و هوایی مکرر مانند بارش شدید/کم، دمای زیاد، خشک‌سالی شدید، موج گرما و مرگومیر ناشی از آن و همچنین اختلال در تولید کشاورزی/غذا می‌شود که منجر به خسارات ناشی از بلایای گسترده در سراسر منطقه می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج مدل‌های فاز ششم تغییر اقلیم اخیراً منتشر شده و اکنون در دسترس است. در این مرحله از ترکیب انتشار گازهای گلخانه‌ای و مسیرهای اجتماعی-اقتصادی برای سناریوها استفاده شده است (Riahi et al., 2017). باین‌حال، مطالعات کمی نتایج این مدل‌ها را در مورد وضعیت دما و بارش حوزه آبخیز بررسی کرده‌اند. از آنجایی که ارزیابی اثرات محیطی تغییر اقلیم بر منابع آب و اجزای بیولوژیکی جزء لاینفک تحقیقات هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در قرن بیست و یکم است، بررسی اثرات تغییر اقلیم برای اتخاذ سیاست‌های مناسب برای کاهش اثرات تغییر اقلیم حائز اهمیت است. هدف از این پژوهش، بررسی تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی این تغییرات در دهه‌های آینده (۲۰۲۲-۲۱۰۰) با استفاده از مدل ریزمقیاس SDSM در ایستگاه‌های حوضه طالقان

دوره‌های ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ بررسی کرده‌اند که نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش دما و بارش بوده است. Iranshahi و همکاران (۲۰۲۲) اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش را دو ایستگاه الشتر و خرم‌آباد با استفاده از شبکه عصبی و مدل MRI-ESM2 تحت سناریوهای SSP ارزیابی کرده‌اند. با توجه به نتایج، دما و بارش به ترتیب روند افزایشی کاهشی خواهند داشت. ErshadFath و همکاران (۲۰۲۲) اقدام به پیش‌نگری پارامترهای دما و بارش در منطقه همدان با استفاده از مدل‌های CMIP6 و ریزمقیاس نمایی خطی تحت سناریوهای SSP نمودند. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش بارش در پاییز و تابستان و افزایش بارش در فصل بهار است، همچنین دما روند افزایشی داشته و بیش‌ترین افزایش دما مربوط به فصل زمستان است. Kamruzzaman و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای، از ۱۸ مدل آب‌وهوای جهانی (GCM) برای پیش‌بینی بارش، حداکثر دما و حداقل دما تحت سناریوهای SSP در بنگلادش استفاده کردند. نتایج نشان داد که دما و بارش برای دوره آتی روند افزایشی خواهد داشت. Mo و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی روند خشک‌سالی در حوضه کارست رودخانه چنگبی<sup>۱</sup> با مدل‌های GCM و مدل ASD تحت سناریوهای SSP پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده افزایش بارش و دما برای دوره‌های آتی است. Hassani و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیق خود به تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب شهری تهران با استفاده از مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 و مدل‌های LARS-WG و SWMM<sup>۲</sup> پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که بر اساس سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 بارش در برخی ماه‌ها افزایشی و در برخی کاهشی پیش‌بینی شده است. نتایج

<sup>۴</sup>. Model for Interdisciplinary Research on Climate6

<sup>۵</sup>. Linear Scaling

<sup>۶</sup>. Distribution Mapping

<sup>۱</sup>. Changbai River

<sup>۲</sup>. Storm Water Management Model

<sup>۳</sup>. Centre National de Recherches Météorologiques Coupled Model6-1

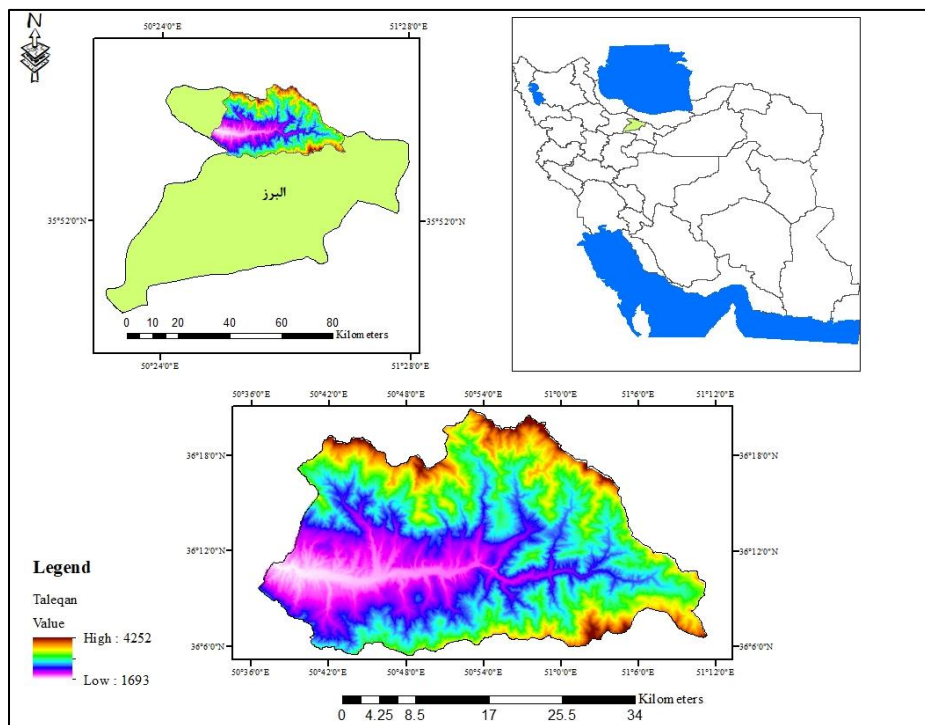
ساوجبلاغ، از شرق به بخشی از حوزه آبخیز کرج و از غرب به حوزه آبخیز شاهرود محدود گردیده است. بر اساس داده‌های هواشناسی میزان بارش و درجه حرارت سالانه منطقه به ترتیب ۴۸۵/۸ میلی‌متر و ۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد و ارتفاع حوضه از سطح دریا ۲۷۳۵ متر است. موقعیت جغرافیایی منطقه در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این تحقیق داده‌های هواشناسی موردنیاز از شش ایستگاه باران‌سنجی در طالقان به دست آمده است. داده‌های مورد استفاده شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر دما است. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز در جدول (۱) مشاهده می‌شوند.

است. از آنجایی که گزارش پنجم IPCC در مطالعات تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته‌است، در این مطالعه سعی شده است این اثرات تحت تأثیر گزارش ششم بررسی شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز طالقان از نظر توپوگرافی کوهستانی بوده و در شمال غرب استان البرز واقع شده است. این آبخیز از زیرحوضه‌های حوزه آبخیز سفیدرود است که از شمال به آبخیز الموت، از جنوب به منطقه



شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of the study area

۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) تحت سناریوهای SSP1-

2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد.

GCMها و داده‌های استفاده شده: به منظور برآورد و

تولید داده‌های آبی (۲۰۲۱-۲۱۰۰) داده‌های روزانه

ایستگاه‌های منطقه شامل داده‌های بارش با دوره پایه

به منظور بررسی تغییرات اقلیم آبی، میانگین پارامترهای

بارش، Tmax، Tmin و Tmean ایستگاه‌های هواشناسی

حوضه طالقان از مدل اقلیمی CanESM5 و مدل

ریز مقیاس‌نمایی آماری برای سه دوره (۲۰۲۱-۲۰۴۰)،

حد زیادی کاهش می‌دهد (Drobinski *et al.*, 2018)؛ بنابراین، کاهش مقیاس آماری برای کاهش مقیاس داده‌های اقلیمی GCM انتخاب شده است. سناریوهای SSP سناریوهای جدید مدل GCM هستند. سناریوهای SSP نه تنها به تغییرات اقلیمی در آینده مربوط می‌شود، بلکه تأثیر عوامل مختلفی از جمله جمعیت، محیط‌زیست، توسعه اقتصادی و مدیریت دولتی را در نظر گرفته و تغییرات آینده را به طور جامع‌تری منعکس می‌کند. (O'Neill *et al.*, 2014).

**1-2.6 SSP**: توافقنامه پاریس که بر محدود کردن گرمایش جهانی به  $2^{\circ}\text{C}$  تا سال ۲۱۰۰ تمرکز دارد (Meinshausen *et al.*, 2011) و مربوط به سناریوی SSP1-2.6 است. SSP1-2.6 تکامل نسبتاً خوش‌بینانه آینده جامعه را به سمت پایداری با گسترش قابل توجه اقتصاد، سرمایه‌گذاری در بهداشت و آموزش و مدیریت قوی فرض می‌کند (O'Neill *et al.*, 2016). این مسیری است که پیش‌بینی می‌کند جهان برای مبارزه با تغییرات اقلیمی همکاری خواهد کرد (Riahi *et al.*, 2017).

**2-4.5 SSP**: یک سناریوی "میانه"، با اقدامات اقلیمی کشورها برای انجام تعهدات موجود خود برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است (Riahi *et al.*, 2017). در SSP2-4.5، انتظار می‌رود که نیروی تابشی کل تا سال ۲۰۷۰ به حدود  $4/5 \text{ W/m}^2$  افزایش و سپس کاهش یابد؛ که این امر منجر به کاهش تولید مواد غذایی در سراسر جهان به دلیل گرمای شدیدتر و سیل‌های فاجعه‌بار ناشی از بارش شدید شود (Riahi *et al.*, 2017). **5-8.5 SSP**: تحت این سناریو، بشریت تمایل دارد کاری در مورد تغییرات اقلیمی انجام ندهد، اما دائماً آن را بدتر می‌کند (Riahi *et al.*, 2017). این سناریو رشد اقتصادی جهانی را با سوخت گاز طبیعی، نفت و سوزاندن

(۱۹۷۹-۲۰۱۴) میانگین دما، حداقل دما و حداکثر دما با دوره پایه (۲۰۱۴-۲۰۳۰) و داده‌های خروجی مدل گردش عمومی تحت سه سناریوی اقلیمی (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) استفاده شد. انتخاب دوره پایه به دلیل محدودیت دوره تاریخی مدل‌های CMIP6 تا سال ۲۰۱۴ و وجود داده‌های اندازه‌گیری شده در این دوره آماری است. در حال حاضر، قابل‌اعتمادترین ابزار برای تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه‌بعدی جفت شده گردش عمومی جوی-اقیانوسی ( $\text{AOGCM}^1$ ) هستند (Pervez & Henebry, 2014).

یکی از مدل‌های چرخه عمومی اتمسفر مورد استفاده در این مطالعه، مدل CanESM5 است. CanESM5 یک مدل جهانی است که برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیم تاریخی، پیش‌نگری‌ها در مقیاس ۱۰۰ ساله اقلیم آینده و تولید پیش‌بینی‌های فصلی و دهه‌ای توسعه یافته است. CanESM5 شامل مدل‌های جوی سه‌بعدی و گردش عمومی اقیانوس و مدل‌های چرخه کربن زمین و اقیانوس است. این مدل دارای دقت نسبتاً زیاد و توان عملیاتی قابل توجه است که تولید مجموعه‌های بزرگ را تسهیل می‌کند. CanESM5 ( $5/6^0\text{k}$ ) نسبت به مدل قبلی خود CanESM2 ( $3/7^0\text{k}$ ) حساسیت اقلیمی بیشتری دارد (Swart *et al.*, 2019).

مدل جهانی اقلیمی معمولاً برای پیش‌بینی‌های اقلیم در مقیاس بزرگ استفاده می‌شود، اما می‌تواند تغییرات اقلیم منطقه‌ای را پس از کاهش مقیاس پیش‌بینی کند. کاهش مقیاس آماری برای تسهیل تعبیه مدل اقلیمی منطقه‌ای در GCM استفاده می‌شود، مدل مذکور رابطه آماری بین عوامل اقلیمی در مقیاس بزرگ و داده‌های اقلیمی مشاهده‌شده در ایستگاه‌های منطقه‌ای ایجاد می‌کند، همچنین میزان خطاهای محاسباتی خروجی GCM را تا

<sup>1</sup>. Atmospheric General Circulation Models

و بارش) با استفاده از GCMs و پیش‌بینی‌کننده‌های NCEP<sup>۱</sup> انتخاب‌شده در مرحله اول، شبه‌سازی شدند. ارزیابی عملکرد مدل: در این مطالعه از معیارهای ارزیابی مختلف برای بررسی عملکرد مدل استفاده شد. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE<sup>۲</sup>)، میانگین قدر مطلق خطا (MAD<sup>۳</sup>) و ضریب تعیین (R) برای ارزیابی دقت مدل استفاده شد (Chai & Draxler, 2014). روابط ۱ و ۲ آن‌ها را نشان می‌دهد. هر چه مقدار MAD کمتر باشد دقت مدل بهتر خواهد بود. RMSE به‌عنوان یک برازش مناسب برای نشان دادن انحراف استاندارد داده‌های مدل‌سازی‌شده و مشاهده‌شده استفاده شد. به‌این ترتیب، زمانی که RMSE کوچک‌تر باشد، عملکرد مدل افزایش می‌یابد. همچنین، R برای ارزیابی خوب بودن برازش داده‌های مدل شده و مشاهده‌شده استفاده شد. وقتی R به یک نزدیک می‌شود، عملکرد مدل افزایش می‌یابد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (۱)$$

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad (۲)$$

زغال‌سنگ پیش‌بینی می‌کند. نتیجه جهانی این است که تا پایان قرن بیست و یکم دما ۳/۳°C الی ۵/۷°C نسبت به سال ۱۹۵۰ گرم خواهد شد (Riahi et al., 2017). در این سناریو، طغیان ساحلی در مقیاس بزرگ و تغییرات اقلیمی بسیار مخرب پیش‌بینی می‌شود.

مدل آماری SDSM: مدل کاهش مقیاس آماری یک رویکرد کاهش مقیاس ترکیبی رگرسیون چندگانه است که توسط Wilby و همکاران (۲۰۰۲) توسعه داده شد و روابط ریاضی توسط Wilby و Dawson (۲۰۱۳) توضیح داده شده است. مدل یک رابطه تجربی بین پیش‌بینی‌کننده‌های GCM و پیش‌بینی‌کننده‌های مقیاس منطقه‌ای برای کاهش مقیاس متغیرهای اقلیمی ایجاد می‌کند. کاهش مقیاس متغیرهای اقلیمی شامل دو گام عمده است. ابتدا، رابطه تجربی بین پیش‌ران‌های بزرگ مقیاس و پیش‌بینی‌کننده‌های ایستگاه منطقه‌ای (بارش و دما) از طریق فرآیندهایی مانند کنترل کیفیت، غربالگری، تبدیل و انتخاب پیش‌بینی‌کننده، واسنجی و مولد آب‌وهوا با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های مشاهده‌شده برقرار شد. دوم، داده‌های اقلیمی آینده (دما

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه مورد مطالعه

Table 1- Characteristics of meteorological stations in the study area

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)
Row	Station name	Latitude	Longitude	Elevation (m)
1	آرموت	504000	361200	1850
2	جوستان	505343	361122	1984
3	دیزان	505900	361600	1950
4	سکرانچال	504400	361700	2200
5	گته ده	510300	361100	2600
6	زیدشت	504146	360929	1931

<sup>3</sup>. Mean absolute deviation

<sup>1</sup>. National Centers for Environmental Prediction

<sup>2</sup>. Root Mean Squared Error

## جدول ۲- مدل‌های CMIP6 به همراه وضوح افقی و کشور مبدأ

Table 2- CMIP6 models along with horizontal resolution and country of origin

کشور توسعه‌دهنده Developer country	وضوح افقی Resolution	مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک	سطوح فشار (hPa) Pressure level	حساسیت اقلیمی Climatic sensitivity	مدل Model
Canada	2.8*2.8	SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5	500, 850, 1000	5.6	CanESM5
Norway	2.5*1.9	SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5	500, 850, 1000	2.5	NorESM2-MM
Germany	0.9*0.9	SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5	500, 850, 1000	3	MPI-ESM1.2-HR

## نتایج

مدل در پیش‌بینی بارش از دقت کمتری برخوردار است، وقوع بارش و مقدار آن یک پدیده تصادفی است، به این دلیل ضرایب به‌دست‌آمده در ارزیابی مدل برای متغیر بارش از دما کمتر است.

ارزیابی عملکرد مدل: با توجه به مقادیر جدول (۳)، ضرایب RMSE، MAD و R نشان داده است که مدل به‌خوبی مقادیر درجه حرارت را پیش‌بینی کرده است اما

## جدول ۳- نتایج معیارهای آماری ارزیابی دقت مدل برای پارامترهای دما و بارش

Table 3- Results of the statistical criteria for evaluating the accuracy of the model for temperature and precipitation parameters

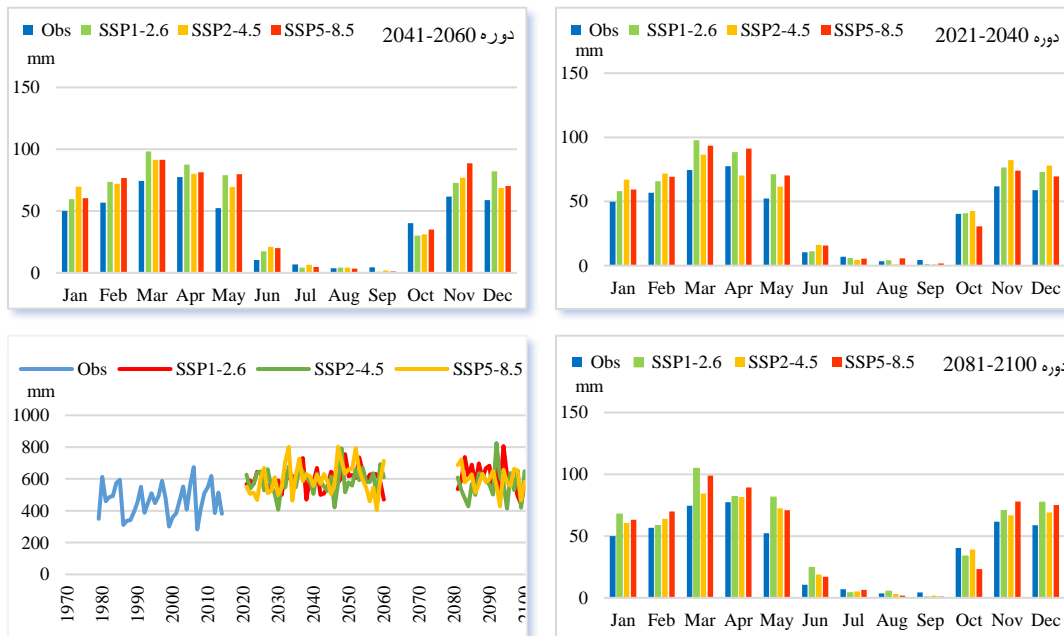
متغیر Variable	بارش Precipitation						دما Temperature			
	ایستگاه	زیدشت	دیزان	جوستان	گتته ده	سکرانچال	آرموت	زیدشت- میانگین	زیدشت- ماکزیمم	زیدشت- مینیمم
MAD		2.103	3.345	2.324	3.124	2.147	2.135	6.085	3.630	3.048
RMSE		5.314	7.338	5.648	7.308	5.215	5.337	7.032	4.610	3.932
R		0.19	0.20	0.17	0.17	0.16	0.18	0.89	0.90	0.91

مشاهده می‌شود که طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ (آینده نزدیک) همه ماه‌ها به‌جز جولای و سپتامبر تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5، آگوست و آوریل تحت سناریوی SSP2-4.5 و اکتبر تحت سناریوهای SSP5-8.5، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ (آینده متوسط) همه ماه‌ها به‌جز جولای، سپتامبر و اکتبر تحت سه سناریوی SSP و آگوست تحت سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه روند افزایشی نشان می‌دهند. همچنین در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ (آینده دور) همه ماه‌ها به‌جز آگوست، سپتامبر و اکتبر تحت سه سناریوی SSP و آگوست تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت

پیش‌نگری تغییرات بارش و دما تحت سناریوهای SSP1 تا سال ۲۱۰۰: پس از ارزیابی دقت مدل اقلیمی CanESM5 برای منطقه مورد مطالعه نتایج این مدل برای سه دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) ریزمقیاس‌نمایی شد. به منظور بررسی تغییرات میانگین پارامترهای بارش، Tmax، Tmin و Tmean آتی نتایج ریزمقیاس‌نمایی تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه ارزیابی شدند. در شکل (۲) نتایج پیش‌نگری میانگین بارش ماهانه تحت سناریوهای اقلیمی در ایستگاه آرموت آورده شده است،

می‌دهد که طی دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ بیشترین میزان افزایش بارش به ترتیب تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP5-8.5 و SSP1-2.6 خواهد بود. همچنین بیشترین افزایش میانگین بارش تا سال ۲۱۰۰ طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوی SSP5-8.5 پیش‌نگری شده است.

به دوره پایه افزایش بارش را نشان می‌دهند. بیشترین افزایش بارش مربوط به ماه‌های مارس، می و نوامبر تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه است، همچنین بیشترین کاهش میانگین بارش در ماه‌های سپتامبر و اکتبر تحت سه سناریوی SSP برای دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ پیش‌نگری شده است. بررسی نتایج نشان



شکل ۲- مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بارش در ایستگاه آرموت

Figure 2- Comparison of monthly average of simulated and observed precipitation values at Armot station

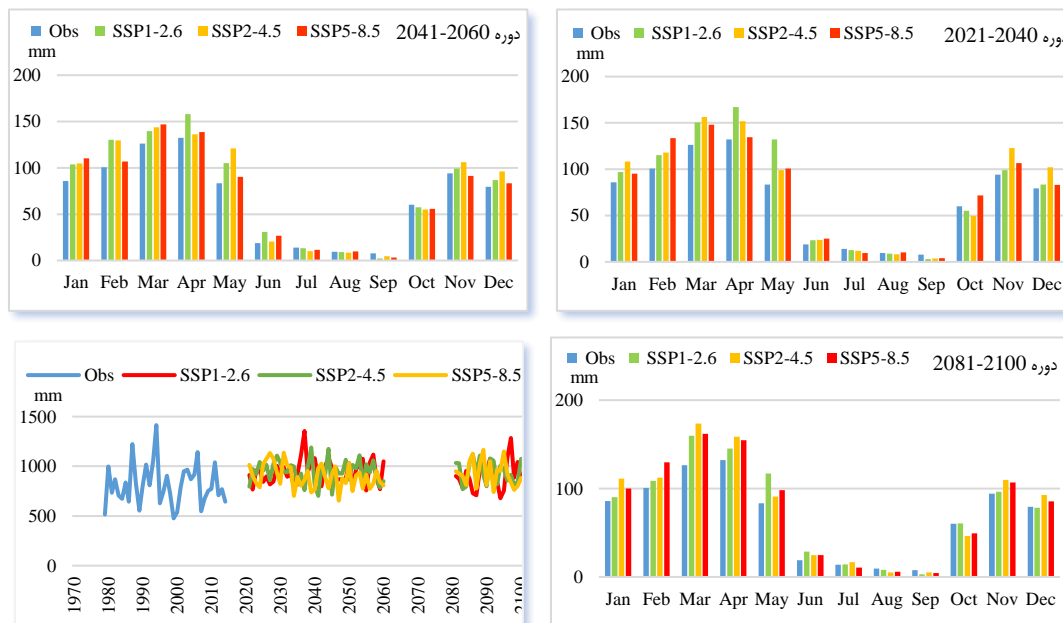
سپتامبر تحت سه سناریوی SSP، اکتبر تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، جولای تحت سناریوی SSP5-8.5 و دسامبر تحت سناریوی SSP1-2.6 نسبت به دوره پایه روند افزایشی نشان می‌دهند. بیشترین افزایش بارش در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ مربوط به ماه‌های می و آوریل (SSP1-2.6) و بیشترین کاهش در ماه جولای (SSP5-8.5) نسبت به دوره پایه خواهد بود. برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ بیشترین افزایش مربوط به ماه‌های می (SSP2-4.5) و ژوئن (SSP1-2.6) و بیشترین کاهش در سپتامبر (SSP5-8.5) است. همچنین بیشترین افزایش برای دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ در ماه‌های مارس و آوریل به ترتیب تحت

مطابق شکل (۳) میانگین بارش ماهانه در ایستگاه دیزان طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در همه ماه‌ها به جز جولای، سپتامبر تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و ماه‌های آگوست و اکتبر تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 نسبت به دوره پایه دارای روند افزایشی بوده، طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ همه ماه به جز جولای، اکتبر و سپتامبر تحت سه سناریوی SSP، آگوست تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و نوامبر تحت سناریوی SSP5-8.5 روند افزایشی برای بارش پیش‌نگری کرده‌اند، همچنین میانگین بارش ماهانه طی دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ در تمام ماه‌ها به جز آگوست و

محمدی و همکاران

افزایش بارش طی دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی SSP2-4.5 را نشان می‌دهد.

سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و بیشترین کاهش در اکتبر تحت سناریوی SSP5-8.5 پیش‌نگری شده است. نتایج به‌دست‌آمده از پیش‌نگری بارش، بیشترین میزان



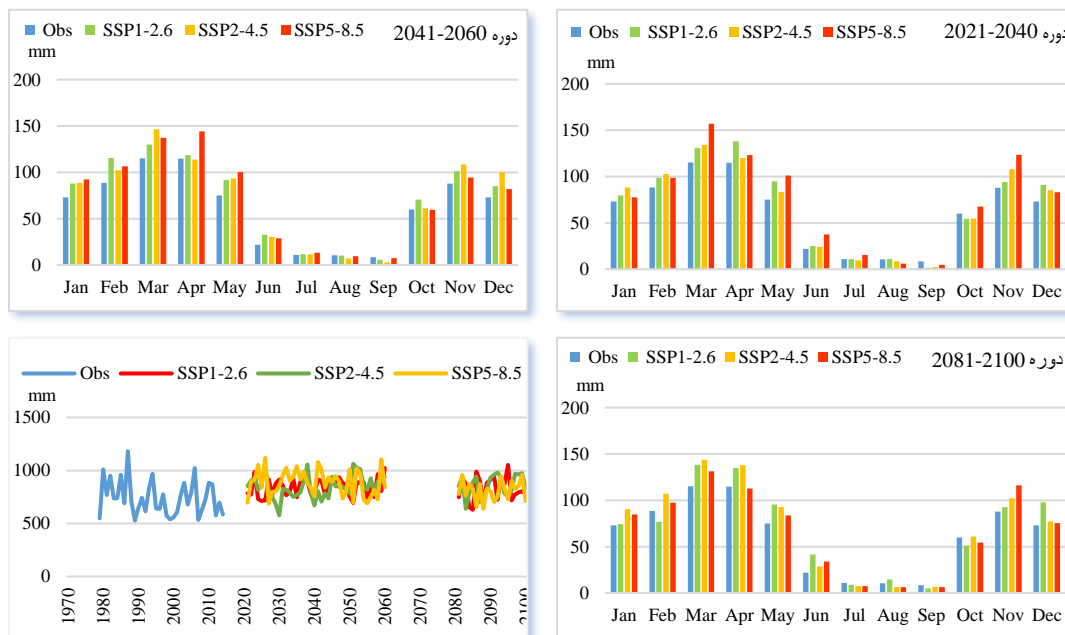
شکل ۳- مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی بارش در ایستگاه دیزان

Figure 3- Comparison of monthly average of simulated and observed precipitation values at Dizan station

دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ مربوط به ماه‌های مارس، می و نوامبر و بیشترین کاهش در ماه سپتامبر تحت سه سناریوی SSP و ماه اکتبر (SSP1-2.6 و SSP2-4.5) نسبت به دوره پایه است؛ و برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ بیشترین افزایش مربوط به ماه‌های مارس فوریه و می تحت سناریوی SSP5-8.5 و بیشترین کاهش در سپتامبر تحت سه سناریوی SSP نسبت به دوره پایه است. همچنین بیشترین افزایش برای دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ در ماه‌های مارس، نوامبر و می تحت سه سناریوی SSP و بیشترین کاهش در ماه جولای تحت سه سناریوی SSP و اکتبر تحت سناریوی SSP5-8.5 خواهد بود. نتایج پیش‌نگری در شکل (۴) ارائه شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از میانگین بارش، بارندگی طی دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی SSP5-

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از پیش‌نگری میانگین بارش ماهانه در ایستگاه گته‌ده نشان می‌دهد که طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ همه ماه‌ها به‌جز سپتامبر تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5، جولای (SSP2-4.5)، آگوست (SSP2-4.5 و SSP5-8.5) و اکتبر (SSP1-2.6 و SSP2-4.5) روند افزایشی خواهد داشت، طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ همه ماه‌ها به‌جز آگوست و سپتامبر تحت سه سناریوی SSP و اکتبر تحت سناریوی SSP5-8.5 روند افزایشی داشته، همچنین طی دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ بارش در ماه‌های جولای و سپتامبر تحت سه سناریوی SSP، ماه آگوست تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، ماه‌های آوریل و اکتبر تحت سناریوی SSP5-8.5 و فوریه تحت سناریوی SSP1-2.6 نسبت به دوره پایه روند کاهشی و سایر ماه‌ها روند افزایشی تجربه خواهند کرد. با توجه به پیش‌نگری بارش بیشترین افزایش بارش طی

8.5 بیشترین افزایش را نسبت به دوره پایه تجربه خواهد کرد.



شکل ۴- مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبه‌سازی شده و مشاهداتی بارش در ایستگاه گنده

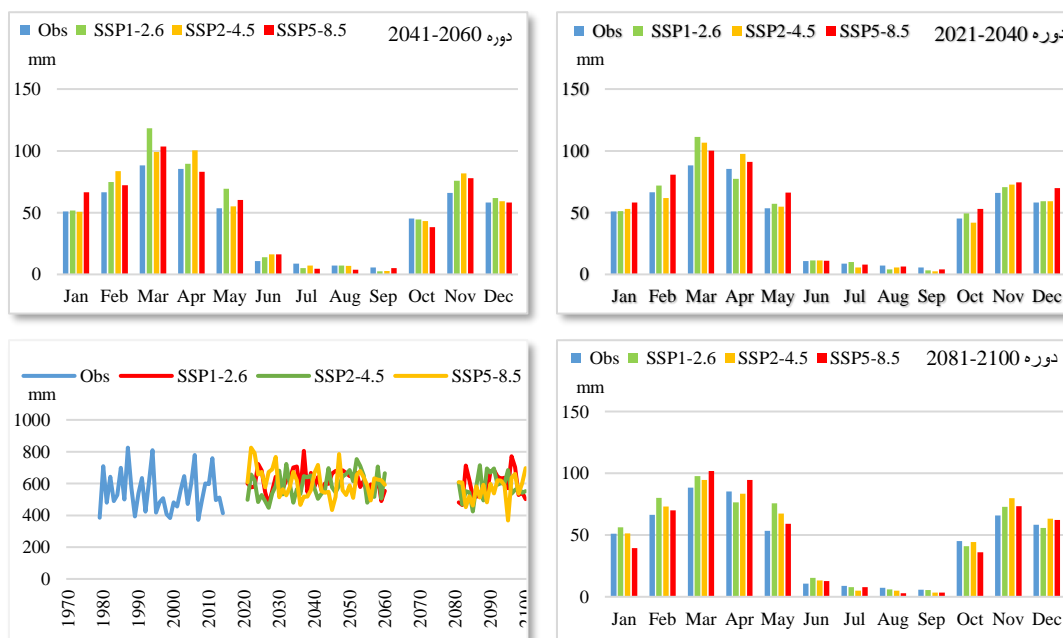
Figure4- Comparison of monthly average of simulated and observed precipitation values at Gateh Deh station

سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 روند کاهشی نشان می‌دهد. میانگین بارش طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ بیشترین افزایش را در ماه‌های مارس (SSP1-2.6)، نوامبر و می (SSP5-8.5) و بیشترین کاهش را در ماه‌های سپتامبر و آگوست تحت سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه تجربه خواهد کرد. برای دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ بیشترین افزایش مربوط به ماه‌های فوریه، مارس، می و نوامبر تحت سه سناریوی SSP و بیشترین کاهش در ماه‌های اکتبر و جولای تحت سناریوی SSP1-2.6 است. بیشترین افزایش میانگین بارش طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریو SSP5-8.5 و در دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی SSP1-2.6 پیش‌نگری شده است. همچنین دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوی SSP5-8.5 بیشترین افزایش میانگین بارش را نشان می‌دهد.

شکل (۵) نتایج پیش‌نگری میانگین بارش ماهانه در ایستگاه جوستان را نشان داده است، نتایج حاکی از آن است که میانگین بارش ماهانه طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در همه ماه‌ها به جز آگوست و سپتامبر تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5، جولای تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، اکتبر و فوریه تحت سناریوی SSP2-4.5 و آوریل تحت سناریوی SSP1-2.6 نسبت به دوره پایه دارای روند افزایشی بوده، میانگین بارش ماهانه در دو دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ در همه ماه‌ها به جز جولای، آگوست، سپتامبر و اکتبر تحت سه سناریوی SSP روند افزایشی روند افزایشی نشان می‌دهند. بر اساس نتایج پیش‌نگری میانگین بارش طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ در ماه‌های ژانویه تحت سناریوهای SSP2-4.5 و آوریل تحت سناریوی SSP5-8.5، روند کاهشی بوده، همچنین طی دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ در ماه‌های ژانویه تحت سناریوی SSP5-8.5 و آوریل تحت

ماه‌های می و آوریل تحت سناریوی SSP1-2.6 نسبت به دوره پایه روند کاهشی و سایر ماه‌ها روند افزایشی بارش را نشان می‌دهند. بیشترین افزایش بارش در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ مربوط به ماه‌های مارس، فوریه و می تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و بیشترین کاهش در ماه‌های سپتامبر و اکتبر تحت سه سناریوی SSP نسبت به دوره پایه است. نتایج پیش‌نگری در شکل (۶) نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که بیشترین افزایش بارش طی دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی SSP2-4.5 است.

در ایستگاه سکرانچال نیز پیش‌نگری میانگین بارش ماهانه طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در همه ماه‌ها به جز آگوست و جولای تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5، اکتبر تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و دسامبر تحت سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه دارای روند افزایشی بوده، طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ همه ماه‌ها به جز جولای، نوامبر و سپتامبر تحت سه سناریوی SSP، آگوست تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و آوریل تحت سناریوی SSP2-4.5 روند افزایشی داشته‌اند، همچنین در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ میانگین بارش ماهانه در ماه‌های اکتبر و سپتامبر تحت سه سناریوی SSP، ماه‌های نوامبر و جولای تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و

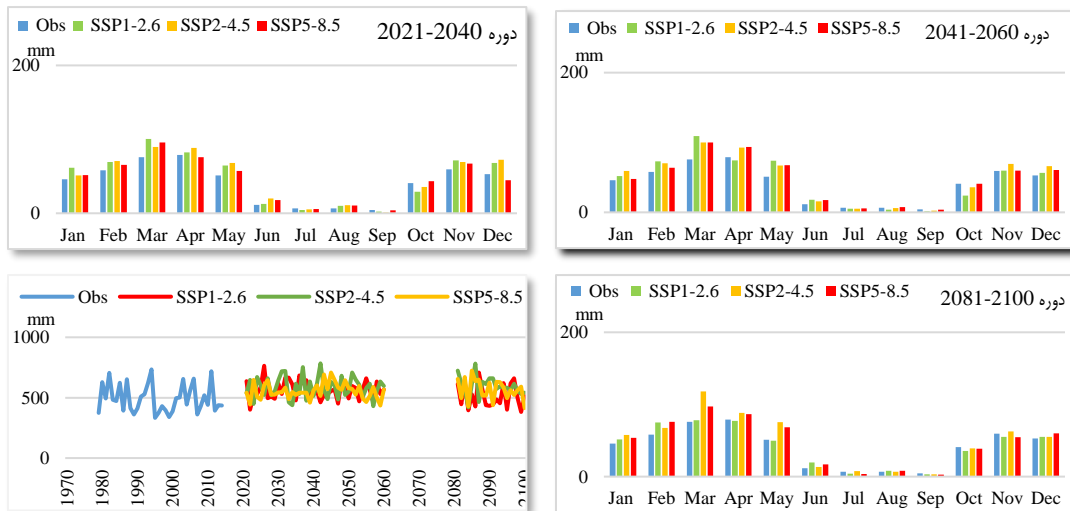


شکل ۵- مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بارش در ایستگاه جوستان

Figure 5- Comparison of monthly average of simulated and observed precipitation values at Jovestsn station

متوسط و آینده دور را تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داده است.

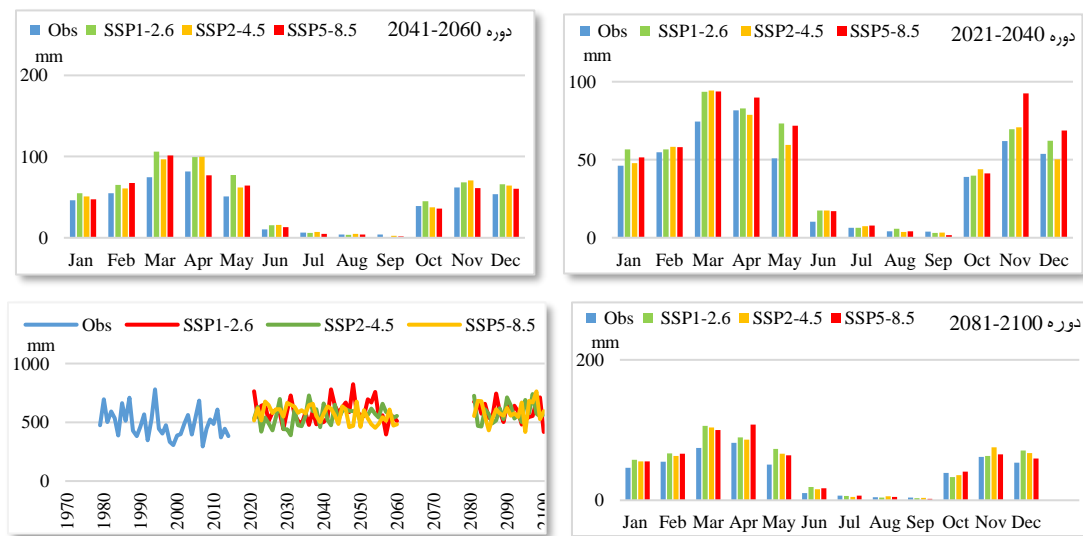
شکل (۸) نتایج پیش‌نگری میانگین بیشینه درجه حرارت ماهانه در ایستگاه زیدشت در سه دوره آینده دور، آینده



شکل ۶- مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی بارش در ایستگاه سکرانچال  
 Figure 6- Comparison of monthly average of simulated and observed precipitation values at Sekranchal station

۲۰۸۱ طی ماه‌های جولای و سپتامبر نسبت به دوره پایه پیش‌نگری شده است. نتایج نشان داد که طی دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ بیشترین افزایش درجه حرارت بیشینه به ترتیب تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 رخ خواهد داد. همچنین دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوی SSP5-8.5 بیشترین افزایش درجه حرارت بیشینه را نشان می‌دهد.

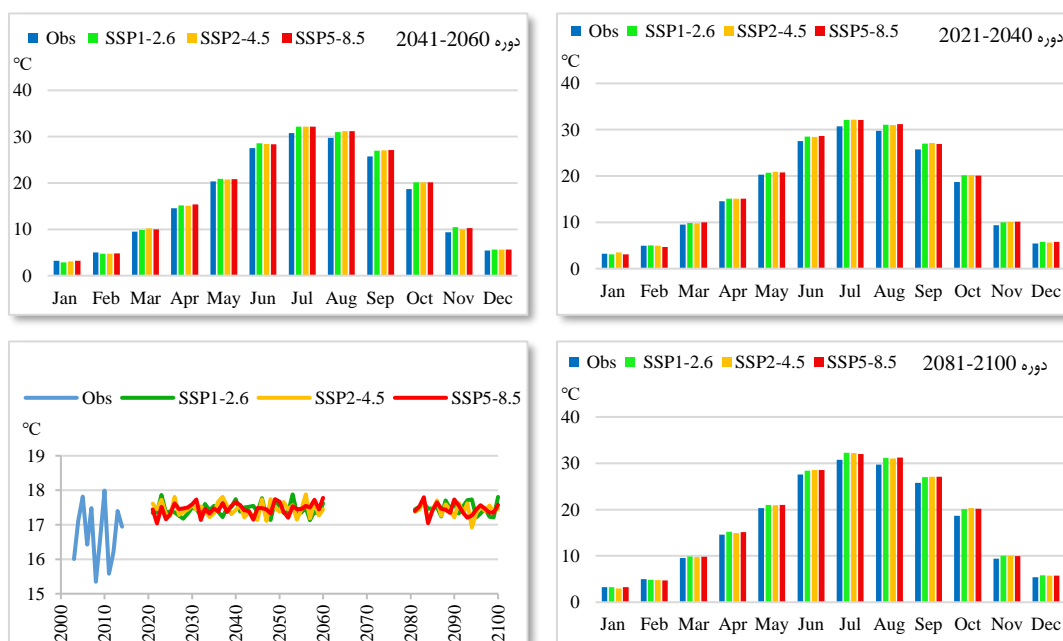
بررسی نتایج نشان داد بیشینه درجه حرارت طی دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ (آینده نزدیک)، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ (آینده متوسط) و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ (آینده دور) در ماه‌های ژانویه و فوریه روند کاهشی داشته و بقیه ماه‌ها روند افزایشی نشان می‌دهند. بیش‌ترین افزایش در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰ به ترتیب در ماه‌های اکتبر و جولای و ماه‌های اکتبر، آگوست و در دوره ۲۱۰۰-



شکل ۷- مقایسه میانگین ماهانه مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی بارش در ایستگاه زیدشت  
 Figure 7- Comparison of monthly average of simulated and observed precipitation values at Zidasht station

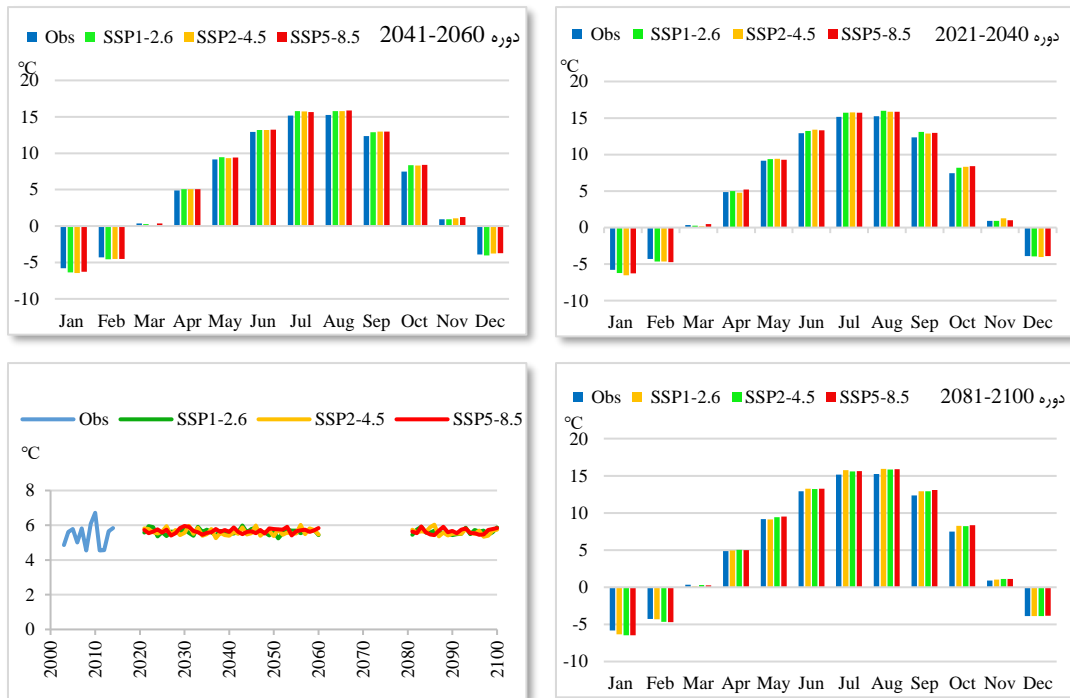
SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و ماه دسامبر تحت سناریوی SSP1-2.6 روند کاهشی را نشان می‌دهند. درجه حرارت در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰ مربوط به ماه‌های اکتبر، سپتامبر و آگوست تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بیشترین افزایش را نسبت به دوره پایه خواهد داشت. مطابق نتایج به دست آمده از درجه حرارت کمینه، دما طی دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی SSP5-8.5 بیشترین افزایش را نسبت به دوره پایه تجربه خواهد کرد.

مطابق نتایج شکل (۹) میانگین کمینه درجه حرارت ماهانه در ایستگاه زیدشت طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ در ماه‌های ژانویه، فوریه دسامبر تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5، مارس تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 و آوریل تحت سناریوی SSP2-4.5 روند کاهشی داشته، دما طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و ماه دسامبر تحت سناریوی SSP1-2.6 روند کاهشی داشته، همچنین در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ میانگین بیشینه درجه حرارت ماهانه طی ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس تحت سناریوهای



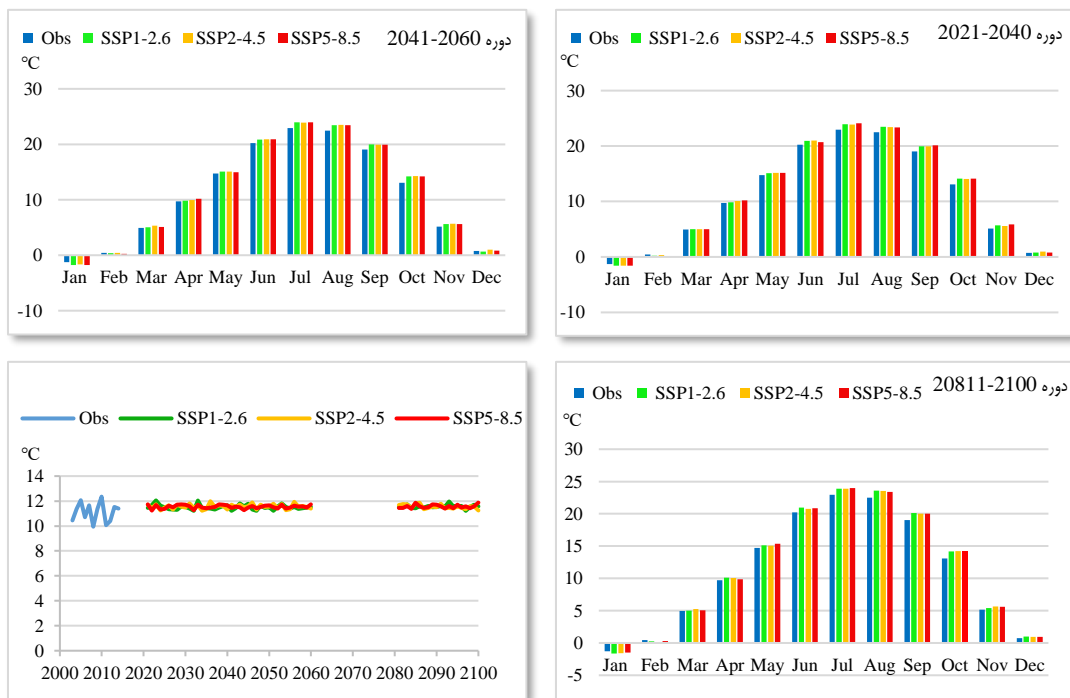
شکل ۸- مقایسه میانگین مقادیر ماکزیمم ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دما در ایستگاه زیدشت

Figure 8- Comparison of average monthly maximum simulated and observed temperature values at Zidasht station



شکل ۹- مقایسه میانگین مقادیر مینیمم ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دما در ایستگاه زیدشت

Figure 9- Comparison of average monthly minimum simulated and observed temperature values at Zidasht station



شکل ۱۰- مقایسه میانگین مقادیر ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دما در ایستگاه زیدشت

Figure 10- Comparison of average monthly simulated and observed temperature values at Zidasht station

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پیش‌نگری میانگین درجه حرارت ماهانه در ایستگاه زیدشت، میانگین درجه حرارت ماهانه طی دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ در ماه‌های ژانویه و فوریه تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 روند کاهشی داشته و بقیه ماه‌ها روند افزایشی دما را نشان می‌دهند. بیش‌ترین افزایش در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ طی ماه‌های اکتبر و جولای، سپتامبر و آگوست تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه است. نتایج پیش‌نگری در شکل (۱۰) ارائه شده است. نتایج بیش‌ترین افزایش میانگین درجه حرارت را طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریو SSP2-4.5 و طی دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی SSP5-8.5 نمایش می‌دهند. همچنین بیش‌ترین افزایش میانگین درجه حرارت طی دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوی SSP5-8.5 پیش‌نگری شده است.

### بحث

تغییرات اقلیمی احتمالاً نگران‌کننده‌ترین نگرانی جهانی قرن بیست و یکم است، به‌ویژه به دلیل افزایش فراوانی وقایع حدی آب و هوایی، مانند موج‌های گرما، خشک‌سالی و سیل. امواج گرما به‌عنوان یک خطر بالقوه برای سلامتی در نظر گرفته می‌شود. این موضوع با مدیریت ناکافی منابع زیست‌محیطی و توانایی محدود برای انطباق در کشورهای در حال توسعه تشدید شده است (IPCC, 2014; Croitoru & Piticar, 2016). تغییرات اقلیمی ممکن است باعث تغییرات عمده در شرایط هیدرولوژیکی مانند افزایش سطح دریا، تغییر الگوی بارش، تغییر در مشخصه جریان رودخانه، تغذیه و در دسترس بودن آب‌های زیرزمینی، تغییر در ترکیب پوشش گیاهی، تغییرات در فرآیند تبخیر - تعرق شود. به‌طور کلی

از آنجایی که آب برای وجود حیات و فرآیند کلی کره زمین حیاتی است و در برابر اثرات تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر است، نیاز به مطالعه بیشتر، آمادگی قوی و چارچوب‌بندی سیاست دارد؛ بنابراین درک تغییرپذیری مکانی و زمانی و پیش‌نگری بارش و دما برای ارزیابی خطرات زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی کاهش و سازگاری بلندمدت حیاتی است. بر این اساس توسعه ابزارهایی برای رسیدگی به تغییرات اقلیم آبی برای موفقیت سیاست اقلیم در زمینه توسعه پایدار بسیار مهم است. در حال حاضر، مطالعه کمی یا هیچ مطالعه شناخته‌شده‌ای در مورد ارزیابی تغییرات اقلیمی با استفاده از داده‌های CMIP6 تحت سناریوهای اقلیمی مسیرهای اقتصادی اجتماعی مشترک در حوضه طالقان وجود ندارد.

محدودیت‌های این پژوهش درباره مدل‌های گردش عمومی جو شامل درک ناقص بشر از سیستم اقلیمی، توانایی ناقص برای تبدیل دانش ما به معادلات دقیق ریاضی، قدرت محدود کامپیوترها، عدم توانایی مدل‌ها در بازتولید پدیده‌های مهم جوی و نمایش نادرست از ارتباطات پیچیده طبیعی است (Legates, 2002). همچنین منابع خطا در پژوهش حاضر، خطای مدل‌های اقلیمی در برآورد دما و بارش در این پژوهش نتیجه عواملی مانند کمبود داده‌های مشاهداتی به‌عنوان داده‌های ورودی مدل، شرطی بودن متغیر بارش و تفکیک‌پذیری زمانی و مکانی بالای مدل‌های اقلیمی است.

در این مطالعه از داده‌های شش ایستگاه حوضه طالقان و مدل CanESM5 برای تولید داده‌های بارش و داده‌های دما تا سال ۲۱۰۰ استفاده شد. نتایج پیش‌نگری میانگین‌های ماهانه بارش، Tmax، Tmin و Tmean تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان می‌دهد که بارش در برخی ماه‌ها روند کاهشی و برخی روند افزایشی دارد، تحقیقات Hassani و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل‌های اقلیمی نیز این موضوع را

افزایش بارش و درجه حرارت می‌تواند باعث بروز بلایای طبیعی غیرمنتظره مانند سیل‌های ناگهانی در بخش‌هایی از منطقه شود؛ بنابراین، انتظار می‌رود چالش‌های مدیریت پایدار رخ دهد. این امر مستلزم اتخاذ سیاست‌های برای حمایت از اقدامات آب و هوایی برای مبارزه با خطرات مرتبط با اقلیم در منطقه است؛ بنابراین، تلاش‌ها برای کاهش و سازگاری با تغییرات اقلیمی باید افزایش یابد که منجر به افزایش تعاملات از جمله ارتباطات بین آب، سلامت انسان، انرژی، تنوع زیستی و کاربری اراضی می‌شود. رویکردهای اصلاحی مانند استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی، استفاده از کشت‌های جایگزین که نیاز به آب کمتری دارند، کاهش حجم پسماند از طریق مصرف بهینه و بازیافت و... می‌تواند به شکل دستیابی به اهداف اجتماعی مانند اهداف مرتبط با امنیت غذایی، سلامت انسان، دسترسی به انرژی، معیشت، کیفیت زیست‌محیطی و توسعه پایدار باشد.

از راهکارهای جلوگیری از تغییرات اقلیمی کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای است که می‌تواند تا حد زیادی پیامدهای تغییر اقلیم را کاهش دهد. کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر به عبارتی تغییر منابع اصلی انرژی به انرژی پاک و تجدیدپذیر بهترین راه برای توقف استفاده از سوخت‌های فسیلی است. این‌ها شامل فناوری‌هایی مانند انرژی خورشیدی، باد، موج، جزر و مد و انرژی زمین گرمایی است. جنگل‌کاری و احیای جنگل‌ها در مبارزه با تغییرات اقلیمی حیاتی است و حفاظت از آن‌ها یکراه حل مهم است. قطع کردن جنگل‌ها، درختانی را که می‌توانند مقادیر زیادی کربن را جذب کنند، از بین می‌برد. اثرات تغییر اقلیم در فاصله زمانی کوتاه از بین نمی‌رود، بنابراین راهکار دیگر سازگاری با این پدیده است. یکی از مهم‌ترین راه‌های سازگاری رشد اقتصادی در تمام جهات است که باید موردتوجه قرار گیرد. مثلاً فقط

تائید می‌کند. بارش در ماه‌های مارس و می (فروردین و اردیبهشت) بیشترین افزایش و در ماه‌های اکتبر و سپتامبر (شهریور و مهر) بیشترین کاهش را نسبت به دوره پایه تجربه خواهد کرد. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد در ماه‌های ژانویه و فوریه (بهمن و اسفند) روند کاهش داشته و در بقیه ماه‌ها روند افزایشی را نشان می‌دهد. بیشترین افزایش دما در ماه‌های اکتبر و سپتامبر مشاهده می‌شود؛ که با نتایج Zarrin و همکاران (۲۰۲۱) که به بررسی دما با مدل‌های BCC-CSM2-MR، CAMS-M1-0 و MRI-ESM2-0 تحت سناریوهای SSP پرداخته‌اند مطابقت دارد.

به‌طورکلی نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که متغیرهای بارش و دما طی دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 روند افزایشی را نسبت به دوره پایه تجربه خواهند کرد، بیشترین افزایش دما و بارش در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و به ترتیب تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP1-2.6 است. یافته‌های پژوهش حاضر در پیش‌نگری تغییرات دما و بارش با نتایج Singh و همکاران (۲۰۱۵)، Kamruzzaman و همکاران (۲۰۲۳) و Roshani و Hamidi (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

### نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه نشان می‌دهد که طالقان در آینده در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر است. افزایش دما باعث ذوب برف و کاهش ذخیره برفی می‌شود. زمان پایداری ذخایر آب در حوضه کاهش خواهد یافت. تغییرات بارش در منطقه باعث تغییر الگوی بارش از برف به باران است؛ که این امر باعث کاهش آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود و می‌تواند بر عملکرد محصول تأثیر بگذارد. همچنین افزایش بارش باعث سیل، طغیان رودخانه‌ها و افزایش آورد رسوب به مخزن سد طالقان می‌شود؛ و کاهش کیفیت آب شیرین در حوضه را در پی خواهد داشت.

اجرا الگوی کشت جامع بهینه توسط سازمان‌های و توسعه زیرساخت‌ها اشاره کرد.

اقتصاد مبتنی بر کشاورزی مدنظر قرار نگیرد. به طور مثال می‌توان به سرمایه‌گذاری در صنعت گردشگری، تدوین و

## References

- Chai, T. and Draxler, R.R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, 7(3), pp.1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Cheng, T.F., Lu, M. and Dai, L., 2019. The zonal oscillation and the driving mechanisms of the extreme western North Pacific subtropical high and its impacts on East Asian summer precipitation. *Journal of Climate*, 32(10), 3025-3050. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0076.1>
- Croitoru, A.E., Piticar, A. and Burada, D.C., 2016. Changes in precipitation extremes in Romania. *Quaternary International*, 415, 325-335. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.028>
- Dao, P.U., Heuzard, A.G., Le, T.X.H., Zhao, J., Yin, R., Shang, C. and Fan, C., 2023. The impacts of climate change on groundwater quality: A review. *Science of The Total Environment*, p.169241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169241>
- Drobinski, P., Silva, N.D., Panthou, G., Bastin, S., Muller, C., Ahrens, B., Borga, M., Conte, D., Fosser, G., Giorgi, F. and Güttler, I., 2018. Scaling precipitation extremes with temperature in the Mediterranean: past climate assessment and projection in anthropogenic scenarios. *Climate dynamics*, 51, pp.1237-1257. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3083-x>
- Duan, R., Huang, G., Li, Y., Zhou, X., Ren, J. and Tian, C., 2021. Stepwise clustering future meteorological drought projection and multi-level factorial analysis under climate change: A case study of the Pearl River Basin, China. *Environmental Research*, 196, 110368. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110368>
- Ershadfath, F., Raeini Sarjaz, M., Shahnazari, A., Eivind Olesen, J., 2022. Application of Linear Scaling Post-Processing Method for Bias Correction of Climate Models Retrieved from CMIP6. *Iran-Water Resources Research*, 18(3), 131-144. <https://doi.org/20.1001.1.17352347.1401.18.3.9.1> (in Persian)
- Feng, J. and Hu, D., 2014. How much does heat content of the western tropical Pacific Ocean modulate the South China Sea summer monsoon onset in the last four decades?. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(7), 4029-4044. <https://doi.org/10.1002/2013JC009683>
- Funk, C., Shukla, S., Thiaw, W.M., Rowland, J., Hoell, A., McNally, A., Husak, G., Novella, N., Budde, M., Peters-Lidard, C., Adoum, A., 2019. Recognizing the famine early warning systems network: over 30 years of drought early warning science advances and partnerships promoting global food security. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(6), 1011-1027. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0233.1>
- Goodarzi, M.R., Abedi, M.J., Pour, M.H., 2022. Climate change and trend analysis of precipitation and temperature: A case study of Gilan, Iran. In *Current Directions in Water Scarcity Research* 7, 561-587. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91910-4.00032-7>
- Goodarzi, M.R., Fatehifar, A., Moradi, A., 2020. Predicting future flood frequency under climate change using Copula function. *Water and Environment Journal*, 34, 710-727. <https://doi.org/10.1111/wej.12572>
- Guptha, G.C., Swain, S., Al-Ansari, N., Taloor, A.K. and Dayal, D., 2021. Evaluation of an urban drainage system and its resilience using remote sensing and GIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100601. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100601>
- Guptha, G.C., Swain, S., Al-Ansari, N., Taloor, A.K. and Dayal, D., 2022. Assessing the role of SuDS in resilience enhancement of urban

- drainage system: A case study of Gurugram City, India. *Urban Climate*, 41, p.101075. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101075>
- Hanafi, 2023. Climate change and water crisis in West Asia. *Amad and Defense Technology Quarterly*, 6(3), pp.153-178. (in Persian)
- Hassani, M.R., Niksokhan, M.H., Ardestani, M., Mousavi Janbehsarayi, S.F., 2023. Evaluating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (case study: district 10 of Tehran municipality). *Water and Soil Management and Modeling* 3(2), 269-285. <https://doi.org/10.22098/MMWS.2022.11849.1176> (in Persian)
- IPCC, C.C., 2014. IPCC Fifth Assessment Synthesis Report-Summary for Policymakers- an Assessment of Inter-Governmental Panel on Climate Change.
- Iranshahi, M., Ebrahimi, B., Yousefi, H., Moridi, A., 2022. Investigating the Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation Using Neural Network and CMIP6 (Case Study: Aleshtar and Khorramabad Stations). *Journal of Water and Irrigation Management*, 12 (4), 821-845. <https://doi.org/10.22059/JWIM.2022.346796.1009> (in Persian)
- Kamruzzaman, M., Wahid, S., Shahid, S., Alam, E., Mainuddin, M., Islam, H.T., Cho, J., Rahman, M.M., Biswas, J.C. and Thorp, K.R., 2023. Predicted changes in future precipitation and air temperature across Bangladesh using CMIP6 GCMs. *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16274>
- Karamouz, M., Nazif, S., Zahmatkesh, Z., 2013. Self-organizing Gaussian-based downscaling of climate data for simulation of urban drainage systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(2), 98-112. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000500](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000500)
- Kodinariya, T.M. and Makwana, P.R., 2013. Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal*, 1(6), 90-95.
- Legates, D.R., 2002. Limitations of climate models as predictors of climate change. *Brief analysis*, 396.
- Liu, C., Yang, C., Yang, Q., Wang, J., 2021. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 11(1), 1280. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3>
- Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L., Lamarque, J.F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C., Riahi, K. and Thomson, A.G.J.M.V., 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109, pp.213-241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Mo, C., Tang, P., Huang, K., Lei, X., Lai, S., Deng, J., Bao, M., Sun, G., Xing, Z., 2023. Evolution of Drought Trends under Climate Change Scenarios in Karst Basin. *Water*, 15(10), 1934. <https://doi.org/10.3390/w15101934>
- Modaresi, F., Araghinejad, S., Ebrahimi, K. and Kholghy, M., 2012. Assessment of climate change effects on the annual water yield of rivers: A case study of Gorganroud river, Iran. *Water and Soil*, 25(6). <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.12152> (in Persian)
- Nandi, S. and Swain, S., 2023. Analysis of heatwave characteristics under climate change over three highly populated cities of South India: a CMIP6-based assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22398-x>
- Niroumand fard, F., Khashei Sivaki, A., Hashemi, R., Ghorbani, Kh., 2022. Investigation of Climate Change Projection on Temperature and Precipitation Parameters Using CMIP6 Models (Case Study: Birjand Station). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 53 (9), 2009-2026. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2022.343936.669284> (in Persian)
- O'Neill, B.C., Krieglner, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T.R., Mathur, R. and Van Vuuren, D.P., 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122, pp.387-400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Krieglner, E., Lamarque, J.F., Lowe,

- J. and Meehl, G.A., 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), pp.3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Patel, P., Thakur, P.K., Aggarwal, S.P., Garg, V., Dhote, P.R., Nikam, B.R., Swain, S. and Al-Ansari, N., 2022. Revisiting 2013 Uttarakhand flash floods through hydrological evaluation of precipitation data sources and morphometric prioritization. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 646-666. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2038696>
- Pervez, M.S. and Henebry, G.M., 2014. Projections of the Ganges–Brahmaputra precipitation—Downscaled from GCM predictors. *Journal of Hydrology*, 517, 120-134. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.016>
- Ramezanipour, M., 2018. Forecasting climate Oscillations for three decades; Case study: Mazandaran province. *Physical Geography Quarterly*, 43(1), pp.115-130. (in Persian)
- Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J.C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenoder, F., Da Silva, L.A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J.C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, pp.153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Roshani, A., Hamidi, M., 2022. Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature and precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Journal of Water and Irrigation Management* 11(4), 781-795. <https://doi.org/10.22034/jwim.2022.330603.920> (in Persian)
- Rummukainen, M., 2010. State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1), 82-96. <https://doi.org/10.1002/wcc.8>
- Sahoo, S., Majumder, A., Swain, S., Gareema, Pateriya, B. and Al-Ansari, N., 2022. Analysis of decadal land use changes and its impacts on urban heat island (UHI) using remote sensing-based approach: a smart city perspective. *Sustainability*, 14(19), 11892. <https://doi.org/10.3390/su141911892>
- Sarabi, M., Dastourani, M., Zarin, A., 2021. Investigating the impact of future climate changes on precipitation (Case study: Mashhad Dam Targ watershed). *The 8th National Conference on Water Resources Management of Iran*. (in Persian)
- Sayad, Vahidah., 2023. Analysis of studies on the effect of climate change in the future of the world and strategies to reduce its harmful effects. *Amad and Defense Technology Quarterly*, 6(3), pp.127-152. (in Persian)
- Shoja, F., Shamsipour, A., 2023. Projection of future Precipitation changes in Tehran's water supply watersheds. *Journal of Natural Environmental Hazards* 12(36), 151-180. <https://doi.org/10.22111/JNEH.2022.42622.1908> (in Persian)
- Singh, D., Gupta, R.D., Jain, S.K., 2015. Assessment of impact of climate change on water resources in a hilly river basin. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 10625-10646. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1985-2>
- Song, Z., Xia, J., She, D., Li, L., Hu, C., Hong, S., 2021. Assessment of meteorological drought change in the 21st century based on CMIP6 multi-model ensemble projections over mainland China. *Journal of Hydrology*, 601, 126643. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126643>
- Swart, N.C., Cole, J.N., Kharin, V.V., Lazare, M., Scinocca, J.F., Gillett, N.P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J.R., Hanna, S. and Jiao, Y., 2019. The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4823-4873. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>

- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, 93(4), 485-498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., Zeng, Z., Lian, Y. and Bai, X., 2018. Climate change enhances the severity and variability of drought in the Pearl River Basin in South China in the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.077>
- Wilby, R.L. and Dawson, C.W., 2013. The statistical downscaling model: insights from one decade of application. *International Journal of Climatology*, 33(7), pp.1707-1719. <https://doi.org/10.1002/joc.3544>
- Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow, E.M., 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), pp.145-157. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3)
- Zarrin, A., Dadashi-Rodbari, A., Salehabadi, N., 2021. Projected temperature anomalies and trends in different climate zones in Iran based on CMIP6. *Iranian Journal of Geophysics*, 15(1), 35-54. <https://doi.org/10.30499/IJG.2020.249997.1292> (in Persian)