

Analysis of Climate Change and Future Trends of Precipitation and Temperature in the Karde Dam Basin

M. Akbari¹, H. Malekinezhad^{2*}, M. Hajibigloo³

1. Ph. D Student in Watershed Sciences and Engineering, Rangeland and Watershed Group, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.
 2. Associate Professor, Rangeland and Watershed Group, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.
 3. Ph. D in Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Rangeland and Watershed, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
- * Corresponding Author: hmalekinezhad@yazd.ac.ir

Received date: 18/12/2024

Accepted date: 02/02/2025

 [10.22034/JDMAL.2025.2048201.1493](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2025.2048201.1493)

Abstract

Precipitation and temperature are critical indicators for assessing the effects of climate change. Climate change, through alterations in precipitation and temperature patterns, significantly impacts the water cycle and hydrological characteristics of watersheds. In this study, the effects of climate change on temperature and precipitation in the Kardeh Dam Basin were investigated using the CMIP6 series model under three scenarios: optimistic SSP126, intermediate SSP245, and pessimistic SSP585. The study covers the future period from 2021 to 2035, compared to the base period from 1992 to 2014, with downscaling performed using the SDSM model. The results from the SDSM model indicate that, in the future, the greatest increase in precipitation will occur in March during the winter season across all scenarios, while the lowest precipitation will be observed in June, July, August, and September during the spring and summer seasons. Regarding temperature, the highest increase in minimum temperature at the Kardeh Dam and Marshak stations will occur in January during the winter season, while the highest increase in maximum temperature will be observed in July during the summer season. Additionally, the results of the Mann-Kendall test showed that, in the studied scenarios, the values for precipitation, as well as minimum and maximum temperatures, either showed no trend or exhibited fluctuations. The only exceptions were the precipitation values at the Ghosh Bala station in the SSP126 scenario, which exhibited a significant negative trend, and the maximum temperature values at the Kardeh Dam station in the SSP585 scenario, which showed a significant positive trend. Overall, in all scenarios, temperatures are expected to rise in the future period compared to the base period, while precipitation will either increase or decrease depending on the specific month, season, and the mountainous nature of the Kardeh Dam Basin.

Keywords: Climate variability; CMIP6; Emission scenario; Mann-Kendall test

How to cite this article

Akbari, M., malekinezhad, H. and hajibigloo, M. (2025). Investigating Climate Change and Future Precipitation and Temperature Trend in the Kardeh Dam Basin. *Desert Management*, 12(4), 87-106. DOI: [10.22034/JDMAL.2025.2048201.1493](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2025.2048201.1493)



Extended Abstract

Introduction

Precipitation and temperature are the most important physical variables in climate (20, 24) that determine the climatic conditions of a region. Climate change, by altering precipitation and temperature patterns, has significant effects on the water cycle and hydrological characteristics of watersheds, potentially posing a major threat to global water resources. It can also impact water supply, increasing the risks of droughts and floods (18, 19, 20). General Circulation Models (GCMs) are mathematical models that simulate the Earth's climate system. They show that increasing greenhouse gas concentrations will have substantial consequences for climate at both global and regional scales (21). The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), a major initiative within global climate change studies conducted by the IPCC, aims to provide valuable information to policymakers and researchers. Initiated in 2014, CMIP6 was designed to address gaps left by CMIP5 and tackle emerging challenges in climate modeling (4). Unlike previous models, CMIP6 integrates Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) to account for social, economic, and technological factors that can influence emissions, thereby offering a more accurate understanding of future climate scenarios. A climate scenario is a simplified representation of future climate based on known climate relationships, designed to explore the potential consequences of human-induced climate change (25). Since the outputs from general circulation models are on a global scale, they cannot directly be applied to local or regional studies. To address this, statistical downscaling techniques are used to translate the large-scale data from CMIP6 models into region-specific temperature and precipitation projections, employing models like SDSM. Given that studies on future changes in precipitation and temperature patterns in the Kardeh Dam Basin using the latest climate models from the IPCC have not been conducted, this research can offer valuable insights. By predicting future trends in temperature and precipitation, it will assist in water resources management and support farmers in optimizing cultivation patterns. Informed decisions based on these predictions can help mitigate the risks of climate-related losses, allowing for sustainable agricultural practices that align with regional climate conditions.

Material and Methods

The Kardeh Dam basin, with an area of approximately 550 square kilometers, is located in northeastern Iran, spanning the longitude range of 59°10' to 59°40' East and the latitude range of 36°35' to 36°59' North (Fig. 1). The basin hosts four rain gauge stations: Al, Balqur, Gosh Bala, and Jong, as well as two evaporation measurement stations: Kardeh Dam and Marshak. For this study, precipitation and temperature data from these stations over a common statistical period from 1992 to 2020 were utilized to analyze climate change and future trends (Table 1). The study used the CMIP6 Global Climate Model to statistically downscale precipitation and temperature data using the Statistical Downscaling Model (SDSM). Initially, the observed data from the base period were entered as dependent variables, while NCEP data were used as independent variables in the SDSM model. After data quality control during the screening stage, the 26 NCEP predictor variables (Table 2) were assessed for their correlation with meteorological parameters. The variables with the highest correlations were selected and included in the regression equation for the SDSM model. Following predictor selection, calibration and validation of the observed data and NCEP predictor data were carried out. After evaluating model accuracy for the base period (1992–2014), climate parameters of temperature and precipitation were projected for the future period of 2021–2035 under three scenarios: optimistic SSP126, intermediate SSP245, and pessimistic SSP585, based on the CMIP6 model outputs. The Mann-Kendall test was employed to detect fluctuations and trends in the time series data of precipitation, rainy days, and maximum and minimum temperatures.

Results

After preparing the data, among the 26 predictor variables, the "prcp" (precipitation) and "temp" (temperature) variables showed a higher correlation with the climatic variables of temperature and precipitation (Table 3). After selecting the best predictors, the observed and simulated data for the base period were compared, and the results are presented in Fig. 2 and 3. The model performance evaluation results are summarized in Table 4. The results from implementing the SDSM model indicate that, in the future years, the highest increase in precipitation across the studied scenarios is expected in March, during the winter season, while the lowest precipitation will occur in the months of June, July, August, and September, during the spring and summer seasons. Additionally, the highest increase in minimum temperature at Kardeh Dam and Marshak stations will occur in January during the winter season, while the greatest increase in maximum temperature is expected in July during the summer season (Fig. 4 and 5, and Table 5). The Mann-Kendall test results also revealed that, in the studied scenarios, the values of precipitation, minimum and maximum temperatures are either trendless or exhibit fluctuations. However, with

the exception of the precipitation data from the Ghosh Bala station in the SSP126 scenario, which shows a significant negative trend, and the maximum temperature data from the Kardeh Dam station in the SSP585 scenario, which demonstrates a significant positive trend (Table 6).

Discussion and Conclusion

In the current study, the trends and magnitude of changes in temperature and precipitation data for the Kardeh Dam basin during the future period (2021–2035) were compared to the base period (1992–2014). According to the results of the SDSM model, future projections indicate that the highest precipitation will occur during the winter season, while the lowest precipitation will be observed in the spring and summer seasons. The highest temperatures are also expected in the summer season. Given that the Kardeh Basin is located in a cold, mountainous region with surrounding foothills, winter precipitation often occurs as snow and cold weather in the highlands. As a result, the basin is expected to experience cold winters and hot summers. The temperature increase is particularly notable in rocky areas. Based on the Mann-Kendall test results, the precipitation data from the Gosh Bala station under the optimistic SSP126 scenario exhibited a significant negative trend at the 5% significance level. Additionally, the maximum temperature data from the Kardeh Dam station under the pessimistic SSP585 scenario demonstrated a significant positive trend at the 1% level. One of the primary factors contributing to the temperature increase is the rise in greenhouse gas emissions driven by population growth and industrial development. This increase in temperature, caused by the elevated concentration of greenhouse gases, supports the notion of global warming resulting from human activities. Furthermore, since the Kardeh Dam evaporation station is situated near the dam site, the water level in the reservoir behind the dam may also influence the local temperature. This could potentially lead to higher temperatures in the summer and lower temperatures in the winter.

Keywords: Climate variability; CMIP6; Emission scenario; Mann-Kendall test

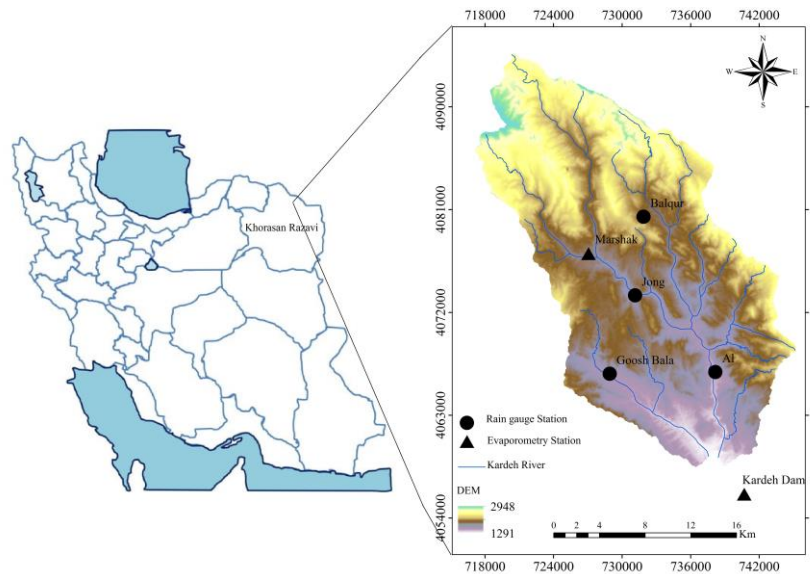


Fig 1. Location of the Kardeh Dam basin and meteorological stations in Razavi Khorasan Province, Iran

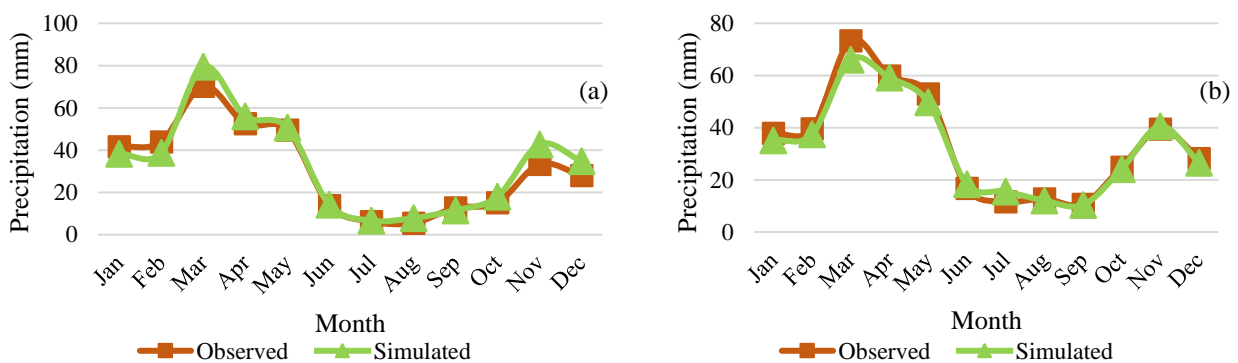


Fig 2. Comparison of total observed and simulated precipitation data for the base period at rain gauge stations. (a) Al station, (b) Balqur station, (c) Goosh Bala station, (d) Jong station

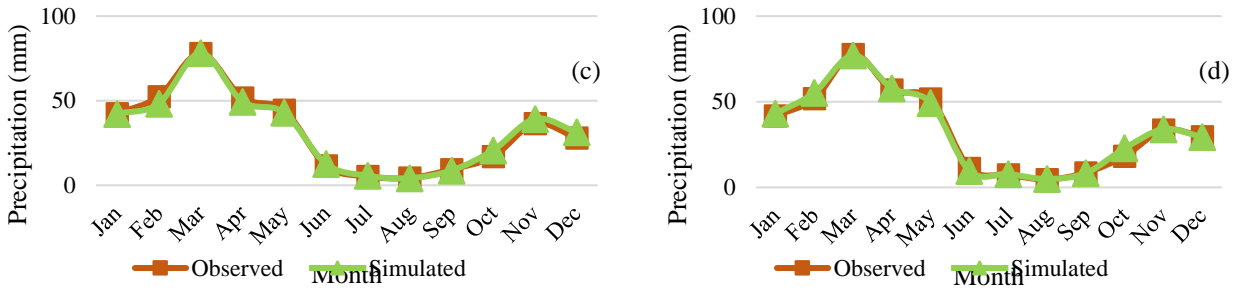


Fig 2. Continued.

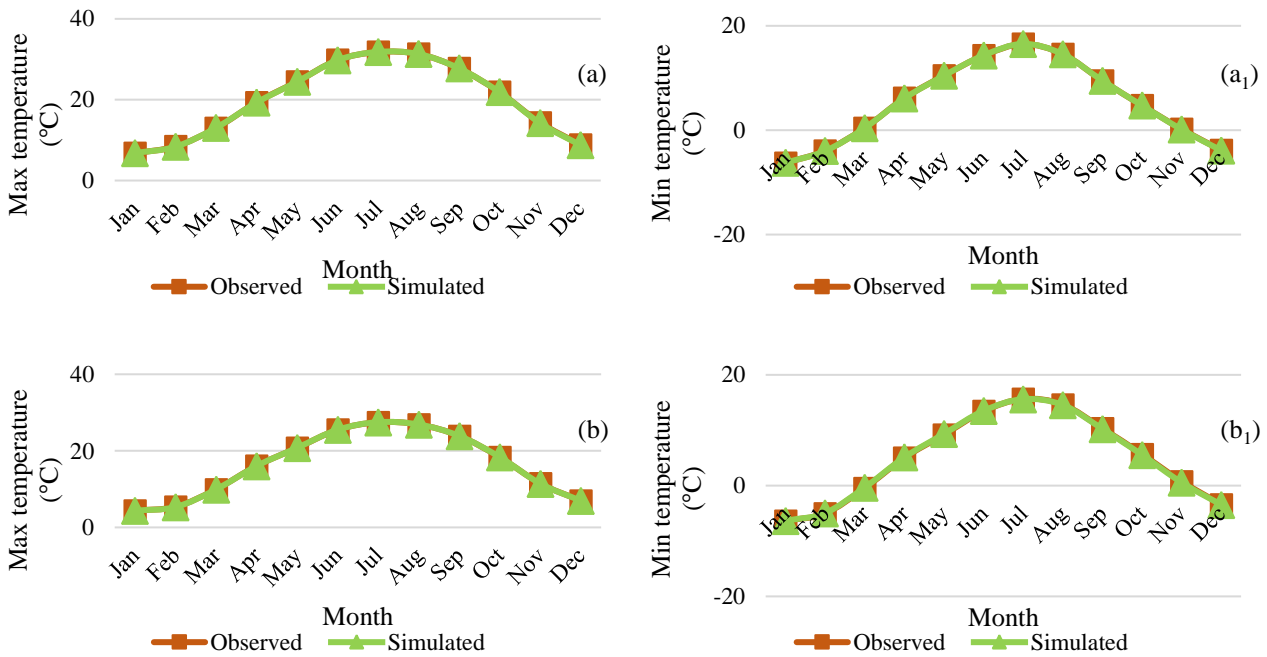


Fig 3. Comparison of average minimum and maximum observed and simulated temperatures for the base period at evaporimetry stations. (a, a₁) Kardeh Dam station, (b, b₁) Marshak station

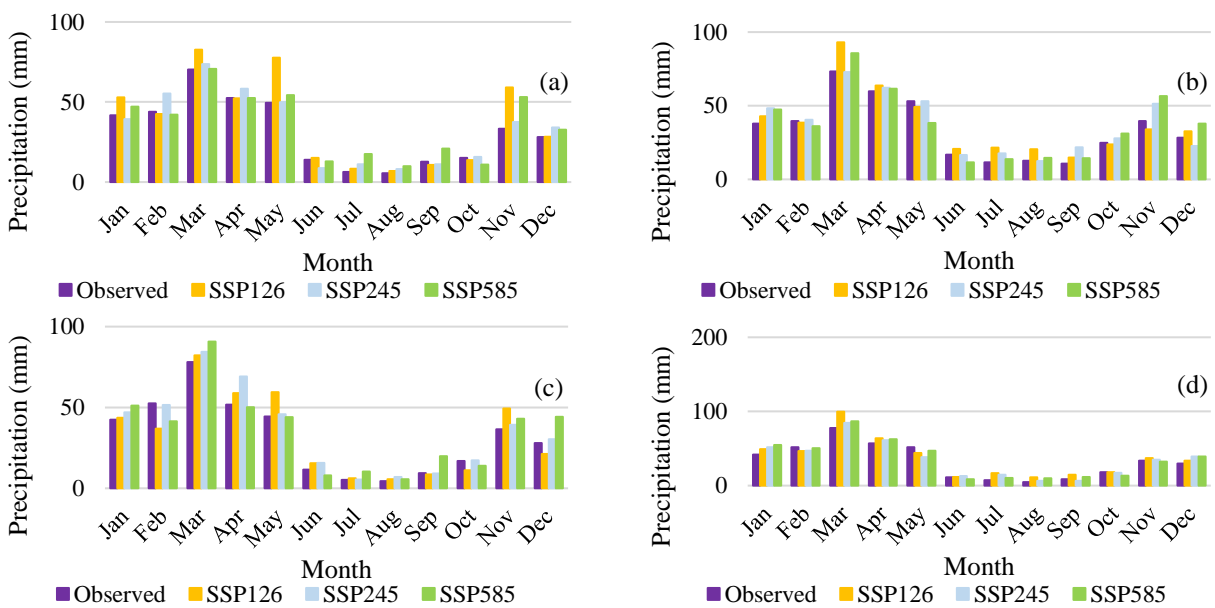


Fig 4. Precipitation changes at rain gauge stations during the future period compared to the base period under different scenarios. (a) Al station, (b) Balqur station, (c) Goosh Bala station, (d) Jong station.

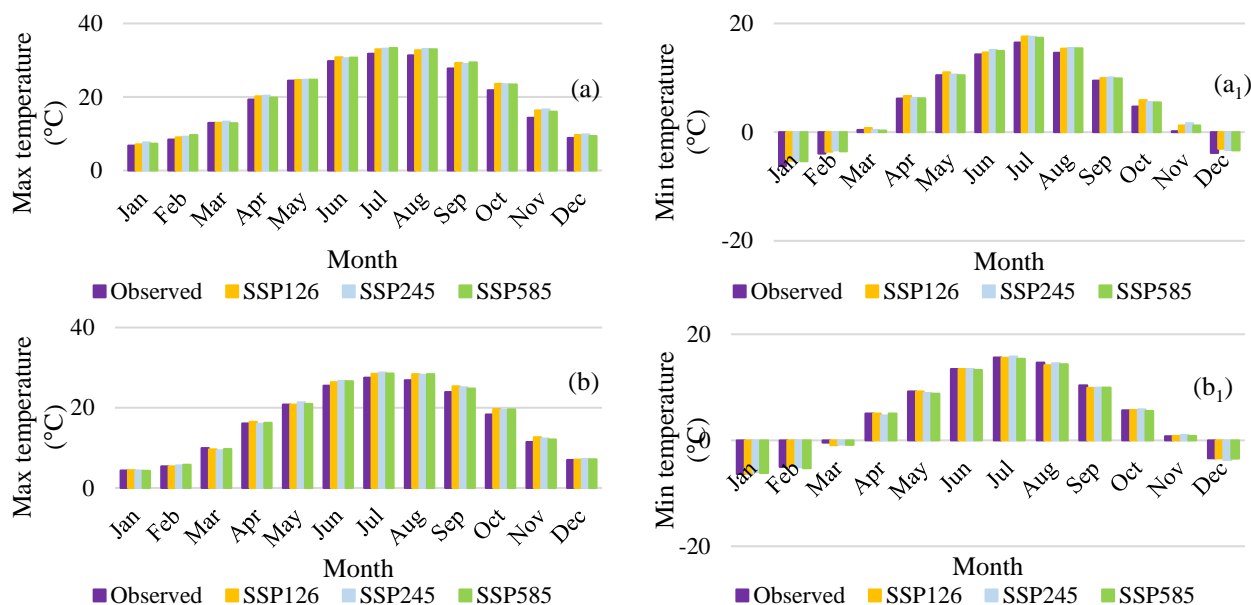


Fig 5. Changes in minimum and maximum temperatures at evaporimeter stations during the future period compared to the base period under different scenarios. (a, a₁) Kardeh Dam station, (b, b₁) Marshak station

Table 1. Characteristics of the studied stations in the Kardeh dam basin

Station name	Longitude (m)	Latitude (m)	Altitude (m)	Station type
Al	738162	4066787	1452	Rain gauge
Balqur	731876	4080380	1920	
Gosh Bala	728919	4066633	1561	
Jong	731133	4073498	1673	
Kardeh Dam	740695	4056093	1265	
Marshak	727059	4077157	1818	Evaporometry

Table 2. List of NCEP variables

Row	Variable	Row	Variable
1	Mean sea level pressure (mslp)	14	500 hPa Divergence of true wind (p5zh)
2	1000 hPa Wind speed (p1-f)	15	850 hPa Wind Speed (p8-f)
3	1000 hPa Zonal wind component (p1-u)	16	850 hPa Zonal wind component (p8-u)
4	1000 hPa Meridional wind component (p1-v)	17	850 hPa Meridional wind component (p8-v)
5	1000 hPa Relative vorticity of true wind (p1-z)	18	850 hPa Relative vorticity of true wind (p8-z)
6	1000 hPa Wind direction (p1th)	19	850 hPa Geopotential (p850)
7	1000 hPa Divergence of true wind (p1zh)	20	850 hPa Wind direction (p8th)
8	500 hPa Wind speed (p5-f)	21	850 hPa Divergence of true wind (p8zh)
9	500 hPa Zonal wind component (p5-u)	22	Total precipitation (prcp)
10	500 hPa Meridional wind component (p5-v)	23	500 hPa Specific humidity (s500)
11	500 hPa Relative vorticity of true wind (p5-z)	24	850 hPa Specific humidity (s8500)
12	500 hPa Geopotential (p500)	25	1000 hPa Specific humidity (shum)
13	500 hPa Wind direction (p5th)	26	Air temperature at 2m (temp)

Table 3. Predictor variables in the SDSM model

Correlation Coefficient	Predictor Variable	Predicted Variable	Station
Al	Precipitation	prcp	0.22
Balqur		prcp	0.16
Gosh Bala		prcp	0.22
Jong		prcp	0.19
Kardeh Dam	Minimum Temperature	temp	0.95
	Maximum Temperature	temp	0.94
Marshak	Minimum Temperature	temp	0.95
	Maximum Temperature	temp	0.95

Table 4. SDSM model evaluation criteria

Station	Parameter	R	RMSE	MSE
Al		23.87	4.89	0.98
Balqur	Precipitation	8.16	2.86	0.99
Gosh Bala		4.90	2.21	1.00
Jong		3.72	1.93	1.00
Kardeh Dam	Minimum Temperature	0.001	0.036	1.00
	Maximum Temperature	0.004	0.064	1.00
	Minimum Temperature	0.010	0.102	1.00
Marshak	Maximum Temperature	0.001	0.025	1.00

Table 5. Comparison of changes in average precipitation, maximum, and minimum temperatures between the base period and the future period

Station	Parameter	1992-2014	2021-2035		
			SSP126	SSP245	SSP585
Al		31.07	37.55	33.56	35.36
Balqur	Precipitation (mm)	31.76	33.21	35.16	35.17
Gosh Bala		34.01	37.93	37.28	37.40
Jong		32.79	37.25	34.61	35.61
Kardeh Dam	Minimum Temperature (°C)	5.23	5.93	5.91	5.77
	Maximum Temperature (°C)	19.81	20.79	20.81	20.91
Marshak	Minimum Temperature (°C)	4.95	4.86	4.87	4.77
	Maximum Temperature (°C)	16.42	17.06	17.05	17.01

Table 6. Z-statistic values from the Mann-Kendall test for trend analysis of annual climate data in the base and future periods.

Station	Parameter	1992-2014	2021-2035		
			SSP126	SSP245	SSP585
Al		-2.11*	0	0.2	-0.59
Balqur	Precipitation	-2.96**	-0.79	0.59	-1.39
Gosh Bala		-1.95	-1.98*	0.59-	0.1
Jong		-0.58	0.4	-0.99	-0.69
Kardeh Dam	Minimum Temperature	-2.48*	-0.1	-0.4	0.89
	Maximum Temperature	1.74	0.69	1.37	2.87**
Marshak	Minimum Temperature	2.48*	-0.59	0.4	0.4
	Maximum Temperature	3.06**	0.2	0	0

*and** significance level of 5% and 1% respectively.



بررسی تغییر اقلیم و روند بارش و دمای آینده در حوزه آبخیز سد کارده

مریم اکبری^۱، حسین ملکی نژاد^{۲*}، محبوبه حاجی بیگلو^۳

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۲. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۳. دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
- * نویسنده مسئول: hmalekinezhad@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

 [10.22034/JDMAL.2025.2048201.1493](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2025.2048201.1493)

چکیده

بارش و دما متغیرهای مهم برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم هستند. تغییر اقلیم با تغییر در الگوهای بارندگی و دما، تأثیر بارزی بر چرخه آب و ویژگی‌های هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز دارد. در پژوهش حاضر تغییرات اقلیمی دما و بارش حوضه سد کارده با استفاده از مدل سری CMIP6 تحت سه سناریوی خوش‌بینانه SSP126، حد واسط SSP245 و بدبینانه SSP585، برای دوره آینده (۱۴۰۰-۱۴۱۴) نسبت به دوره پایه (۱۳۹۳-۱۳۷۰) با مدل ریزمقیاس نمائی SDSM مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای بررسی روند داده‌ها از آزمون من‌کنندال استفاده شد. بررسی نتایج اجرای مدل SDSM حاکی از آن است که در سال‌های آینده بیشترین میزان افزایش بارش در سناریوهای مورد بررسی، مربوط به ماه اسفند در فصل زمستان و کمترین میزان بارش مربوط به ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور در فصل‌های بهار و تابستان خواهد بود. همچنین بیشترین افزایش دمای حداقل ایستگاه سد کارده و مارشک برای دی‌ماه در فصل زمستان و بیشترین افزایش دمای بیشینه برای تیرماه در فصل تابستان رقم خواهد خورد. نتایج آزمون من‌کنندال نیز نشان داد که در سناریوهای مورد بررسی مقدار بارندگی، دمای حداقل و دمای بیشینه بدون روند یا دارای نوساناتی هستند. به جز بارش ایستگاه گوش‌بالا در سناریوی SSP126 که دارای روند منفی معنی‌دار و متغیر بیشینه دمای ایستگاه سد کارده در سناریوی SSP585 که دارای روند مثبت معنی‌دار می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت در تمامی سناریوها افزایش دما در دوره آینده در مقایسه با دوره پایه رخ خواهد داد، در حالی که میزان بارش بسته به ماه‌ها و فصول مختلف و باتوجه به کوهستانی بودن حوضه سد کارده افزایش یا کاهش نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: آزمون من‌کنندال؛ پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم؛ تغییرپذیری اقلیم؛ سناریوی انتشار

استناد به این مقاله

اکبری، مریم، ملکی نژاد، حسین و حاجی بیگلو، محبوبه. (۱۴۰۳). بررسی تغییر اقلیم و روند بارش و دمای آینده حوضه سد کارده. مدیریت بیابان، ۱۲(۴)، ۸۷-۱۰۶. DOI: [10.22034/JDMAL.2025.2048201.1493](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2025.2048201.1493)



■ مقدمه

بارش و دما مهمترین متغیرهای فیزیکی در اقلیم هستند (۲۰، ۲۴) که شرایط اقلیمی یک منطقه را تعیین می‌کنند. تغییر اقلیم با تغییر در الگوهای بارندگی و دما، اثرات بارزی بر چرخه آب و ویژگی هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز دارد و به‌عنوان تهدیدی بزرگ بر منابع آبی است. همچنین می‌تواند بر عرضه آب، همراه با خطر افزایش وقوع خشکسالی و سیل تأثیرگذار باشد (۱۸، ۱۹، ۲۰). داده‌های مدل گردش عمومی جو^۱ (GCM) مدل‌های ریاضی هستند که سعی در شبیه‌سازی سامانه اقلیمی زمین دارند و نشان می‌دهد که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای پیامدهای قابل توجهی برای اقلیم در مقیاس جهانی و منطقه‌ای خواهد داشت (۲۱). پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم^۲ (CMIP6) نیز بخشی از بررسی‌های جهانی تغییر اقلیم است که توسط IPCC برای ارائه اطلاعات به سیاست‌گذاران و پژوهشگران انجام شده است. این پروژه در سال ۲۰۱۴ برای پر کردن شکاف‌های علمی باقیمانده در CMIP5 و رسیدگی به چالش‌های جدید در حال ظهور در مدل‌سازی اقلیم آغاز شد (۴). CMIP6 از مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک^۳ (SSP) استفاده می‌کند تا جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و فناوری را که می‌توانند بر انتشار تأثیر بگذارند، در نظر بگیرد و منجر به درک دقیق‌تری از سناریوهای احتمالی اقلیمی آینده شود. سناریوی اقلیمی تصویر ساده‌شده‌ای از آب و هوای آینده بر اساس روابط اقلیمی است که برای بررسی پیامدهای بالقوه تغییرات ایجادشده ناشی از عوامل انسانی بر آب و هوا ساخته شده است (۲۵). از آنجا که خروجی مدل‌های گردش عمومی جو بزرگ مقیاس می‌باشند، لذا این خروجی‌ها قابل استفاده در مقیاس محلی یا منطقه‌ای نیستند. بنابراین برای ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های بارندگی و دما از داده‌های مدل جهانی اقلیمی CMIP6 با استفاده از مدل‌های مختلف از جمله SDSM^۴ استفاده می‌شود. مدل SDSM ابزار پشتیبانی تصمیم است که ارزیابی تأثیرهای منطقه‌ای گرمایش جهانی را از طریق فراهم ساختن فرایند کاهش مقیاس مکانی داده‌های ارائه شده توسط مدل‌های اقلیمی جهانی بزرگ مقیاس،

تسهیل می‌کند (۵). این مدل توسط ویلبی^۵ سال ۲۰۰۲ به‌عنوان ابزاری برای ریزمقیاس کردن به‌روش آماری توسعه یافته است (۲۶). پس از تحلیل سری‌های زمانی متغیرهای اقلیمی، تجزیه و تحلیل روند بلندمدت پارامترهای اقلیمی یک چالش اساسی در پژوهش‌های پایش تغییرات اقلیمی است و دیدگاه بهتری برای برنامه‌ریزی‌های آینده فراهم می‌کند. همچنین به حرکت کلی یک سری عددی در دوره زمانی طولانی یا تغییر طولانی‌مدت متغیر وابسته، روند گفته می‌شود (۹). یافتن نوسان‌ها و وجود روند در داده‌های سری زمانی بارندگی، روز بارانی و دمای بیشینه و کمینه با استفاده از آزمون‌های ناپارامتریک از جمله آزمون من‌کندال^۶ انجام می‌گیرد (۳). این آزمون ابتدا در سال ۱۹۴۵ توسط مان مطرح و سپس در سال ۱۹۷۵ توسط کندال توسعه یافت (۲۳). مطالعاتی درخصوص اهمیت پدیده تغییر اقلیم و بررسی روند سری زمانی توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است که می‌توان به بررسی‌های گوناگونی اشاره کرد: نتایج پیش‌بینی تغییر متغیرهای اقلیمی ناشی از تغییر اقلیم با سناریوهای B1، A2 و A1B در حوزه آبخیز بلغور سد کرده نشان داد، در هر سه سناریو در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ بارش کاهش و دمای کمینه و بیشینه افزایش خواهد یافت (۱۵). در بررسی تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ براساس مدل CMIP6 در ایستگاه ساری بررسی شد. نتایج سناریوهای SSP245 و SSP585 حاکی از افزایش میانگین تغییرات دما از ۱/۱۶°C تا ۴/۰۹°C و افزایش ۳۴٪ تا ۳۶٪ بارش سالانه می‌باشد (۲۱). پیش‌بینی دما و بارش در ۳۰ ایستگاه اصلی ایران تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مدل CMIP6 نشان می‌دهد که افزایش دما در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۱ بین ۱°C تا ۴/۷°C در تمامی سناریوها در مقایسه با دوره تاریخی ۱۹۹۲-۲۰۲۰ رخ خواهد داد، در حالی که میزان بارش بسته به فصل افزایش یا کاهش نشان می‌دهد (۶). بررسی نتایج پیش‌بینی تغییر اقلیم و تأثیرات آن بر دما، بارش و جریان در حوزه آبریز Vea (غنا)، افزایش دما را به‌طور متوسط بین ۲/۱۰°C تا ۳/۵°C تحت سناریوی SSP245 و

⁴ Statistical DownScaling Model

⁵ Wilby

⁶ Mann-Kendall test

¹ General Circulation Models (GCM)

² The Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

³ Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

سفره‌های آبی منجر به کاهش نگران‌کننده در سطح سفره‌ها شده است. بنابراین، بررسی سری‌های زمانی و تغییرات در الگوی دما و بارش حاصل از سوابق گذشته و تلاش برای پیش‌بینی سری‌های زمانی آینده، در استفاده بهینه از منابع آبی کمک می‌کند. همچنین تحلیل روند زمانی بارش، برای مدیریت پایدار و توسعه آینده منابع آبی یک منطقه خاص بسیار مناسب است. از این‌رو، با توجه به اینکه بررسی تغییرات الگوهای بارش و دما در دوره‌های آتی با جدیدترین مدل‌های اقلیمی ارائه‌شده توسط IPCC، در حوضه سد کارده انجام نگرفته است، این بررسی می‌تواند با پیش‌بینی روند متغیر اقلیمی دما و بارش در دوره آینده نتایج مفیدی ارائه دهد؛ تا کارشناسان بتوانند آگاهانه برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آبی و تعیین الگوی کشت منطبق بر شرایط اقلیمی در منطقه تصمیم بگیرند.

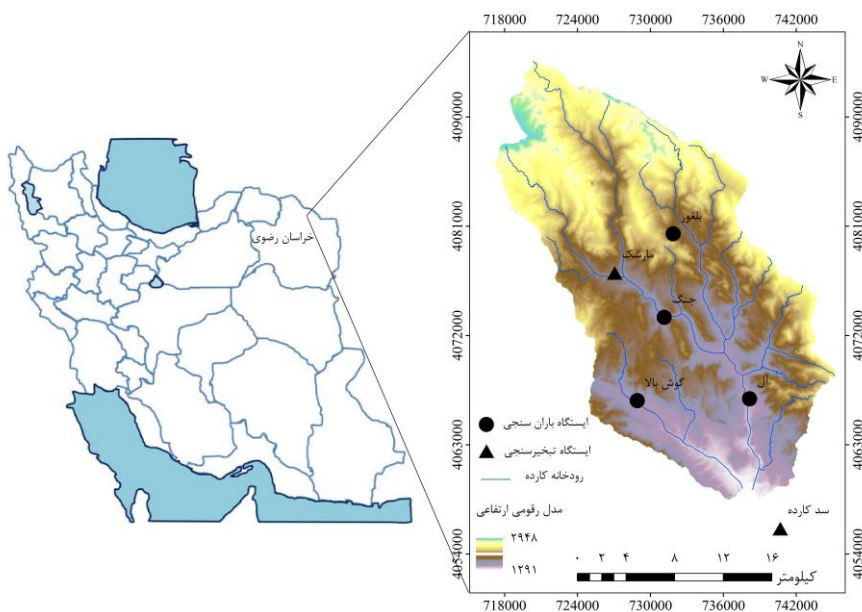
■ مواد و روش

منطقه مورد بررسی

حوضه سد کارده با مساحتی حدود ۵۵۰ km² کیلومتر مربع در شمال شرق ایران و در ۴۲ km شمال شهر مشهد واقع است. این حوضه در دامنه‌های جنوبی رشته کوه‌های هزار مسجد در محدوده مختصات ۵۹°۱۰' تا ۵۹°۴۰' طول شرقی و ۳۶°۳۵' تا ۳۶°۵۹' عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱).

بین ۲/۷°C تا ۴/۱۵°C تحت سناریوی SSP585 نشان می‌دهد. همچنین کاهش میانگین بارندگی سالانه در SSP245، بین ۱۲/۳۴٪ تا ۱۳/۱٪ و در SSP585 بین ۱۲/۶٪ تا ۱۳/۶٪ پیش‌بینی می‌شود (۱). در بررسی اقلیم تانزانیا تحت مدل CMIP6 پیش‌بینی می‌شود که دماهای کمینه و بیشینه از سال ۲۰۴۰ تا ۲۰۷۱ تحت سناریوهای SSP245 و SSP585 در مناطق مختلف بین ۰/۱۴°C تا ۰/۲۱°C در هر دهه افزایش یابد. همچنین میانگین بارش در برخی از مناطق افزایش و در مناطق دیگر کاهش بارندگی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، در هر دو سناریو افزایش دما و بارندگی برای اکثر مناطق تانزانیا پیش‌بینی می‌شود (۱۲). یافته‌های مطالعه دیگری در میانه و غرب عراق، روند افزایشی دما و بارندگی را تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585 در دوره ۲۰۲۳-۲۰۵۰ در مقایسه با دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۳ پیش‌بینی می‌کند (۱۱).

رودخانه کارده از مهم‌ترین رودخانه‌های دائمی استان خراسان رضوی است. سد بتنی کارده که بر روی رودخانه کارده ساخته شده است، بخش عمده‌ای از آب شرب و کشاورزی شهر مشهد را تأمین می‌کند. مقدار ناچیز بارندگی در مناطق نیمه‌خشک همراه با پراکنش نامناسب آن باعث ایجاد خشکسالی‌ها و کمبود آب می‌گردد. لذا با خشکسالی‌های اخیر متأسفانه سطح آب پشت سد بسیار پایین آمده و آب بسیاری کمی در پشت سد باقی مانده است. از طرفی افزایش برداشت غیرمجاز آب زیرزمینی از



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های حوضه سد کارده در استان خراسان رضوی، ایران

مقیاس می‌باشند، لذا این خروجی‌ها قابل استفاده در مقیاس محلی یا منطقه‌ای نیستند. بنابراین ارائه رابطه‌ای کمی بین متغیرهای مشاهداتی کوچک مقیاس (محلی/منطقه‌ای) و متغیرهای بزرگ مقیاس (مدل گردش عمومی جو) لازم است (۲۷). برای ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های بارندگی و دما از داده‌های مدل جهانی اقلیم CMIP6 با بهره‌گیری از نرم‌افزار SDSM انجام شد. این رابطه به شکل معادله ۱ می‌باشد:

$$Y = f(X) \quad (1)$$

در این معادله Y متغیر پیش‌بینی‌کننده، X متغیر پیش‌بینی‌شونده، و f تابع انتقال است که به صورت تجربی از داده‌های مشاهداتی به دست می‌آید.

مدل SDSM با استفاده از روش آماری-تجربی بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده NCEP^۱ (شامل ۲۶ متغیر بزرگ مقیاس) و متغیرهای پیش‌بینی‌شونده شامل داده‌های مشاهداتی ارتباط برقرار می‌کند. براساس مدل‌سازی دوره پایه ۱۹۷۹-۲۰۱۴ و ارزیابی نتایج در پایان تغییر متغیرهای مشاهداتی در آینده (۲۰۱۵-۲۱۰۰) شبیه‌سازی می‌شوند. در پژوهش حاضر برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل CMIP6 براساس داده‌های هواشناسی روزانه، در ابتدا داده‌های مذکور در دوره آماری پایه به‌عنوان متغیر وابسته و داده‌های NCEP به‌عنوان متغیر مستقل وارد مدل SDSM شدند. پس از کنترل کیفی داده‌ها در مرحله غربالگری از بین ۲۶ متغیر پیش‌بینی‌کننده NCEP که در جدول ۲ ارائه شده است، متغیرها با بیشترین مقدار همبستگی با متغیرهای هواشناسی انتخاب و وارد معادله رگرسیونی مدل SDSM شدند. بعد از انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها، داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های موردنظر و داده‌های پیش‌بینی‌کننده NCEP کالیبره و واسنجی شدند.

حوضه کارده حوضه‌ای کوهستانی و دارای دامنه‌هایی با شیب نسبتاً تند بوده است و رودخانه کارده یکی از سرشاخه‌های کشف‌رود در حوضه قره‌قوم است. بلندترین نقطه آن در ارتفاعات هزار مسجد با ارتفاع ۲۹۴۸m و پست‌ترین نقطه حوضه در محل سد کارده با ارتفاع ۱۲۹۱m و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۲۱۲۰m است. این منطقه از نظر اقلیمی دارای آب و هوای نیمه‌خشک و سرد و دارای متوسط بارندگی سالانه ۳۶۷mm و متوسط دمای سالانه ۶/۵°C می‌باشد. حوضه کارده دارای ۱۳ روستا با جمعیت حدود ۹۰۱۰ نفر بوده که مهمترین فعالیت اقتصادی آنان دامداری، باغداری و زراعت است که وضعیت دامداری آنان غالباً به صورت کوچ‌نشین‌اند.

روش پژوهش

در پژوهش حاضر برای بررسی تغییر اقلیمی دما و بارش حوضه سد کارده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی استفاده شد. حوضه سد کارده دارای چهار ایستگاه باران‌سنجی شامل آل، بلغور، گوش بالا و جنگ و دو ایستگاه تبخیرسنجی شامل سد کارده و مارشک می‌باشد (جدول ۱). داده‌های هواشناسی موردنیاز از جمله میانگین، کمینه و بیشینه دما و بارش ایستگاه‌های مورد بررسی (۱۳۵۰-۹۹) از اداره کل هواشناسی خراسان رضوی دریافت شد. پس از بررسی داده‌ها، آمارهای ناقص بازسازی شد و در پایان پس از همپوشانی داده‌ها، دوره آماری مشترک ۲۹ ساله از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ برای تعیین روند و اجرای مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM انتخاب شد.

مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM

به‌علت اینکه خروجی مدل‌های گردش عمومی جو بزرگ

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه سد کارده

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (m)	عرض جغرافیایی (m)	ارتفاع (m)	نوع ایستگاه
آل	۷۳۸۱۶۲	۴۰۶۶۷۸۷	۱۴۵۲	باران‌سنجی
بلغور	۷۳۱۸۷۶	۴۰۸۰۳۸۰	۱۹۲۰	
گوش بالا	۷۲۸۹۱۹	۴۰۶۶۶۳۳	۱۵۶۱	
جنگ	۷۳۱۱۳۳	۴۰۷۳۴۹۸	۱۶۷۳	تبخیرسنجی
سد کارده	۷۴۰۶۹۵	۴۰۵۶۰۹۳	۱۲۶۵	
مارشک	۷۲۷۰۵۹	۴۰۷۷۱۵۷	۱۸۱۸	

^۱ National Centers for Environmental Prediction

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}}{n} \quad (3)$$

ضریب همبستگی (R): بیان کننده میزان همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و نتایج برآورد شده مدل می باشد که براساس رابطه ۴ محاسبه می شود (۱۵). ضریب همبستگی نشان دهنده ارتباط خطی بین دو متغیر می باشد و ابزاری ریاضی است که در پایه ریزی تحلیل های اقلیمی بسیار کاربردی است (۲۲).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})(Pi - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (Pi - \bar{P})^2}} \quad (4)$$

که در روابط فوق، O و P به ترتیب مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده، \bar{O} و \bar{P} میانگین مقادیر مشاهده شده و میانگین مقادیر شبیه سازی شده و n تعداد داده هاست.

تحلیل شیب روند دما و بارش با استفاده از آزمون ناپارامتریک من کندال

در پژوهش حاضر برای بررسی روند داده های بارش و دما از آزمون ناپارامتریک من کندال استفاده شد. در این آزمون عدم وجود روند در داده های سری زمانی با فرض H_0 و وجود روند در داده های سری زمانی با فرض H_1 نشان داده می شود.

پس از اینکه دقت مدل برای دوره پایه ۱۳۹۳-۱۳۷۰ ارزیابی شد، متغیرهای اقلیمی دما و بارش برای دوره آینده ۱۴۰۰-۱۴۱۴ با سناریوهای خوش بینانه SSP126، حدواسط SSP245 و بدبینانه SSP585 براساس خروجی مدل MPI-ESM1-2 تولید شدند.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

در پژوهش حاضر، برای ارزیابی عملکرد دقت مدل و انتخاب بهترین روش پیش بینی دما و بارش، از معیارهای میانگین مربعات خطا (MSE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R) استفاده شد. میانگین مربعات خطا (MSE): هرچه مقدار MSE کمتر باشد، مدل با دقت بیشتری می تواند مقادیر را پیش بینی کند که برای محاسبه آن از رابطه ۲ استفاده می شود:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2 \quad (2)$$

مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE): نشان دهنده میزان خطای مدل می باشد که هرچه میزان RMSE کمتر و نزدیک به صفر باشد، بیانگر کارایی بیشتر مدل در برآورد پارامترهای بارش و دما می باشد و از طریق رابطه ۳ محاسبه می گردد:

جدول ۲. لیست متغیرهای NCEP

ردیف	متغیر	ردیف	متغیر
۱	میانگین فشار سطح دریا (mslp)	۱۴	واگرایی در ارتفاع ۵۰۰hPa (p5zh)
۲	سرعت جریان هوا ژئوستروفیک در نزدیکی سطح (p1-f)	۱۵	سرعت جریان هوا ژئوستروفیک در ارتفاع ۸۵۰hPa (p8-f)
۳	مؤلفه سرعت مداری نزدیک سطح (p1-u)	۱۶	مؤلفه سرعت مداری در ارتفاع ۸۵۰hPa (p8-u)
۴	مؤلفه سرعت نصف النهاری نزدیک سطح (p1-v)	۱۷	مؤلفه سرعت نصف النهاری در ارتفاع ۸۵۰hPa (p8-v)
۵	تاوایی نزدیک سطح (p1-z)	۱۸	تاوایی در ارتفاع ۸۵۰hPa (p8-z)
۶	جهت باد نزدیک به سطح (p1th)	۱۹	ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۸۵۰hPa (p850)
۷	واگرایی نزدیک سطح (p1zh)	۲۰	جهت باد در ارتفاع ۸۵۰hPa (p8th)
۸	سرعت جریان هوا ژئوستروفیک در ارتفاع ۵۰۰hPa (p5-f)	۲۱	واگرایی در ارتفاع ۸۵۰hPa (p8zh)
۹	مؤلفه سرعت مداری در ارتفاع ۵۰۰hPa (p5-u)	۲۲	بارش کل (prcp)
۱۰	مؤلفه سرعت نصف النهاری در ارتفاع ۵۰۰hPa (p5-v)	۲۳	رطوبت نسبی در ارتفاع ۵۰۰hPa (s500)
۱۱	تاوایی در ارتفاع ۵۰۰hPa (p5-z)	۲۴	رطوبت نسبی در ارتفاع ۸۵۰hPa (s850)
۱۲	ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰hPa (p500)	۲۵	رطوبت نسبی نزدیک سطح (shum)
۱۳	جهت باد در ارتفاع ۵۰۰hPa (p5th)	۲۶	میانگین دما در ارتفاع ۲m (temp)

۳ ارائه شده است. همانطور که مشخص است داده‌های دما نسبت به داده‌های بارندگی همبستگی بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارند.

پس از انتخاب بهترین پیش‌بینی‌کننده، اقدام به تولید داده‌هایی از داده‌های مشاهداتی شد که نتایج مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل SDSM برای دوره پایه ۱۳۹۳-۱۳۷۰ با بارش و دما مشاهداتی، در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. سپس برای اطمینان از صحت و دقت مدل SDSM، مقادیر دما و بارش شبیه‌سازی شده با استفاده از متغیرهای NCEP و داده‌های مشاهداتی، با شاخص‌های آماری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. با نگاه کلی به نمودارهای ۲ و ۳ می‌توان برآورد کرد دقت شبیه‌سازی دما بسیار بیشتر از بارش است. نتایج حاصل از جدول ۴ نیز حاکی از آن است که دقت مدل SDSM در ایستگاه‌ها و متغیرهای مختلف متفاوت است. مدل مذکور در شبیه‌سازی دما نسبت به بارش از دقت مناسب‌تری برخوردار است. همچنین در بین ایستگاه‌های باران‌سنجی، ایستگاه جُنگ در مقایسه با دیگر ایستگاه‌ها نتایج بهتری ارائه داده است که ناشی از مناسب‌تر بودن و بهتر بودن کیفیت داده‌ها است. پس از تحلیل آماری داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده به تولید داده‌های هواشناسی آینده با استفاده از سناریوهای اقلیمی پرداخته شد. به منظور بررسی تغییرات مقادیر دمای کمینه، دمای بیشینه و میزان بارش در دوره آینده، نتایج مدل ریزمقیاس‌نمایی تحت سناریوهای خوش‌بینانه SSP126، حد واسطه SSP245 و بدبینانه SSP585 در ایستگاه‌های مورد بررسی، ارزیابی شد (شکل‌های ۴ و ۵).

آزمون من‌کنندال با تعریف آماره S به صورت رابطه ۵ بیان می‌شود:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{j-i+1}^n \text{sign}(X_i + X_j) \quad (5)$$

که در آن X_i و X_j مقادیر مرتب‌شده نمونه و n تعداد نمونه را نشان می‌دهد. S آماره آزمون و sign تابع علامت است. مقدار sign برای $X > 0$ برابر یک، برای $X = 0$ برابر صفر و برای $X < 0$ برابر منفی یک خواهد بود و مقدار نمره استاندارد شده Z و واریانس آماره S از روابط زیر حاصل می‌شود:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q \text{tp}(\text{tp}-1)(2\text{tp}+5)] \quad (7)$$

که در آن tp شماره گر برای مقدار p و q تعداد گره‌هاست. مقادیر مثبت Z نشان‌دهنده روند صعودی و مقادیر منفی Z نشان‌دهنده روند نزولی پارامترهای اقلیمی خواهد بود (۲، ۱۳).

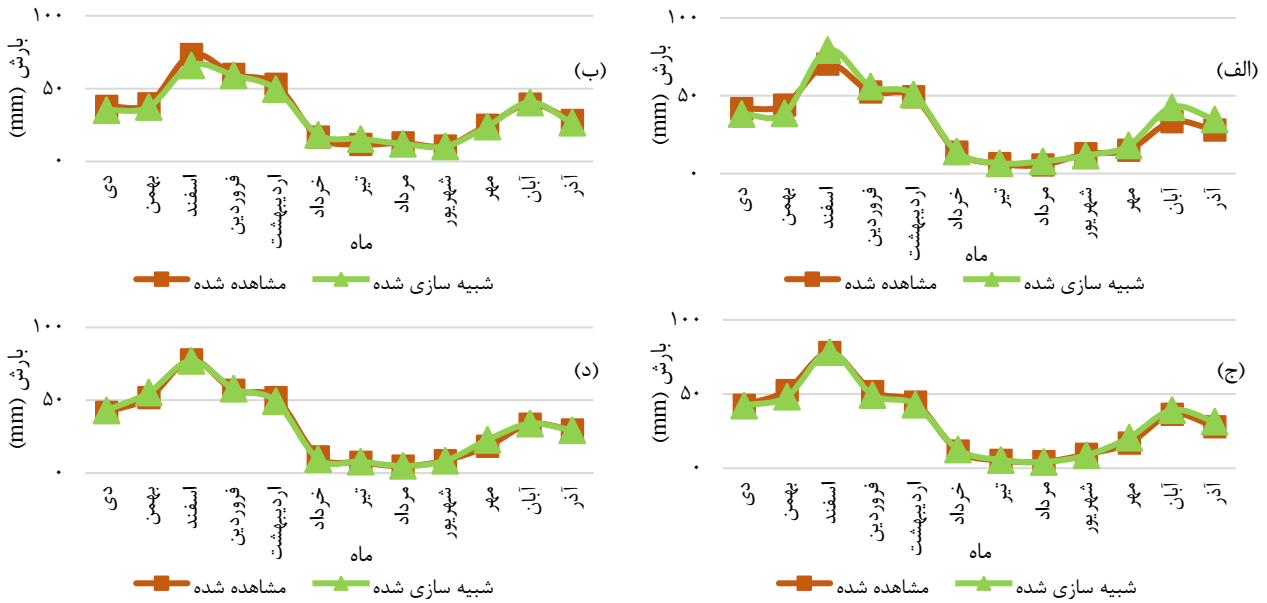
نتایج

تحلیل سناریوهای اقلیمی مدل SDSM

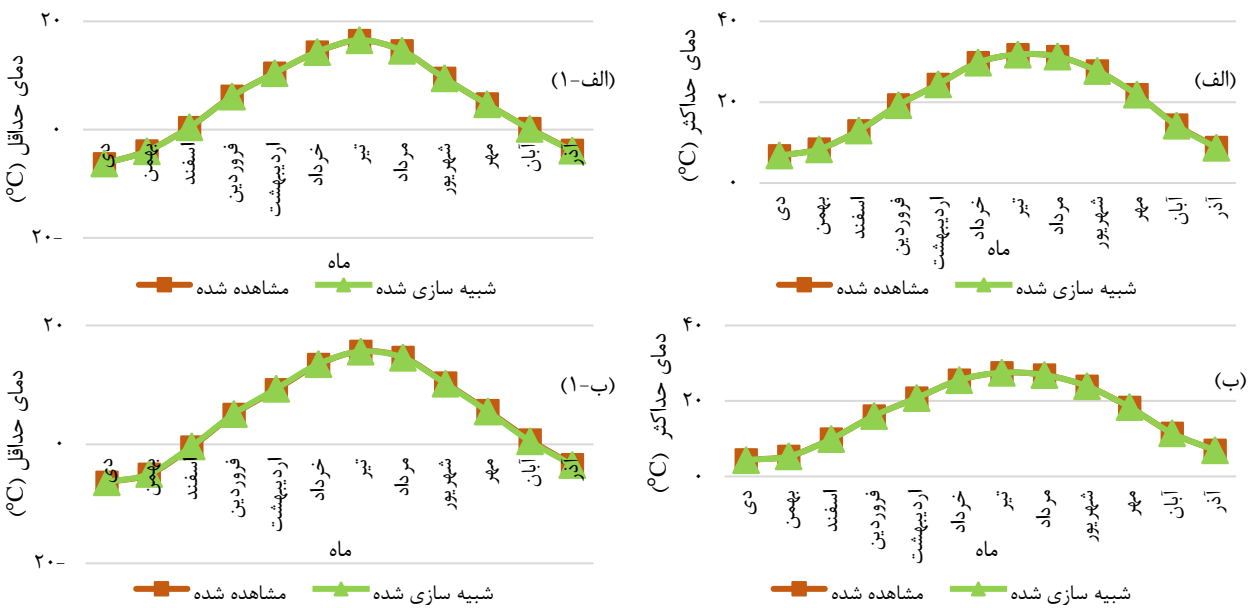
پس از رفع نواقص آماری، کنترل کیفیت و آماده‌سازی داده‌های مشاهداتی، از بین ۲۶ متغیر پیش‌بینی‌کننده، متغیر prcp (بارش کل) و متغیر temp (میانگین دما در ارتفاع ۲m) همبستگی بیشتری با متغیرهای اقلیمی مشاهداتی همچون بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه داشتند. نتایج محاسبه شده در ایستگاه‌های منتخب در جدول

جدول ۳. متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در مدل SDSM

P-Value	همبستگی جزئی	متغیر پیش‌بینی‌کننده	متغیر پیش‌بینی شونده	ایستگاه
۰/۰۰	۰/۲۲	prcp		آل
۰/۰۰	۰/۱۶	prcp		بلغور
۰/۰۰	۰/۲۲	prcp	بارش	گوش بالا
۰/۰۰	۰/۱۹	prcp		جنگ
۰/۰۰	۰/۹۵	temp		سد کارده
۰/۰۰	۰/۹۵	temp	دمای کمینه	مارشک
۰/۰۰	۰/۹۴	temp		سد کارده
۰/۰۰	۰/۹۵	temp	دمای بیشینه	مارشک



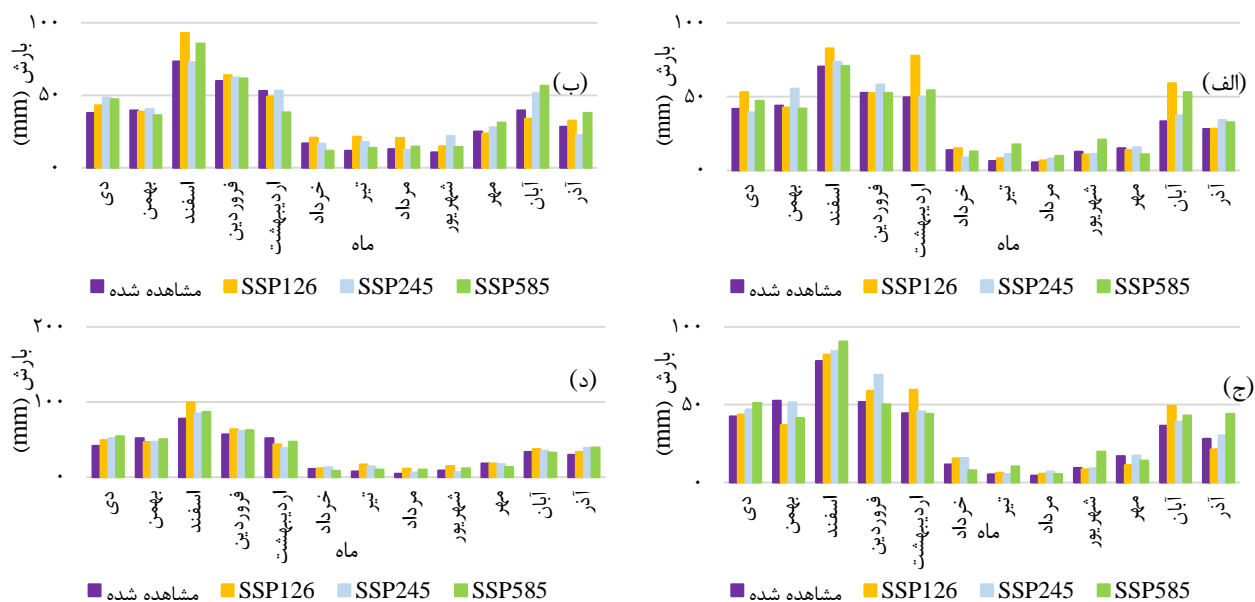
شکل ۲. مقایسه مجموع داده‌های بارش مشاهده شده و شبیه‌سازی شده دوره پایه در ایستگاه‌های باران‌سنجی (الف) ایستگاه آل (ب) ایستگاه بلغور، (ج) ایستگاه گوش بالا، (د) ایستگاه جنگ



شکل ۳. مقایسه میانگین دمای کمینه و بیشینه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده دوره پایه در ایستگاه‌های تبخیرسنجی (الف، الف-ب) ایستگاه سد کارده (ب، ب-۱) ایستگاه مارشک

جدول ۴. معیارهای ارزیابی مدل SDSM

ایستگاه	متغیر	R	RMSE	MSE
آل		۲۳/۸۷	۴/۸۹	۰/۹۸
بلغور		۸/۱۶	۲/۸۶	۰/۹۹
گوش بالا	بارش	۴/۹۰	۲/۲۱	۱/۰۰
جنگ		۳/۷۲	۱/۹۳	۱/۰۰
سد کارده	دمای کمینه	۰/۰۰۱	۰/۰۳۶	۱/۰۰
	دمای بیشینه	۰/۰۰۴	۰/۰۶۴	۱/۰۰
	دمای کمینه	۰/۰۱۰	۰/۱۰۲	۱/۰۰
مارشک	دمای بیشینه	۰/۰۰۱	۰/۰۲۵	۱/۰۰



شکل ۴. تغییر بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی در دوره آینده نسبت به دوره پایه با سناریوهای مختلف (الف) ایستگاه آل (ب) ایستگاه بلغور، (ج) ایستگاه گوش بالا، (د) ایستگاه جُنگ

در ایستگاه گوش بالا بیشترین و کمترین میزان بارش ماهانه در دوره پایه به ترتیب مربوط به اسفندماه 78mm و مردادماه $4/37\text{mm}$ می‌باشد. بیشترین میزان بارش برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به اسفندماه به ترتیب برابر $82/17\text{mm}$ ، $84/33\text{mm}$ و $90/65\text{mm}$ و کمترین میزان بارش برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 به ترتیب برای ماه‌های مرداد، تیر و مرداد برابر $5/57\text{mm}$ ، $5/45\text{mm}$ و $5/53\text{mm}$ می‌باشد. با این توضیحات نسبت به دوره پایه بیشترین و کمترین میزان بارش به سناریوی SSP585 و SSP245 اختصاص داده شده است (شکل ۴-ج).

در ایستگاه جُنگ نیز بیشترین و کمترین میزان بارش ماهانه در دوره پایه به ترتیب مربوط به اسفندماه $77/72\text{mm}$ و مردادماه $4/72\text{mm}$ است. بیشترین میزان بارش برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به اسفندماه به ترتیب برابر $99/60\text{mm}$ ، $84/63\text{mm}$ و $86/90\text{mm}$ و کمترین میزان بارش برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 به ترتیب برای ماه‌های مرداد، مرداد و خرداد برابر $11/34\text{mm}$ ، $6/45\text{mm}$ و $8/52\text{mm}$ می‌باشد. با این توضیحات نسبت به دوره پایه بیشترین و کمترین میزان بارش به سناریوی SSP126 و SSP245 اختصاص داده شده است (شکل ۴-د).

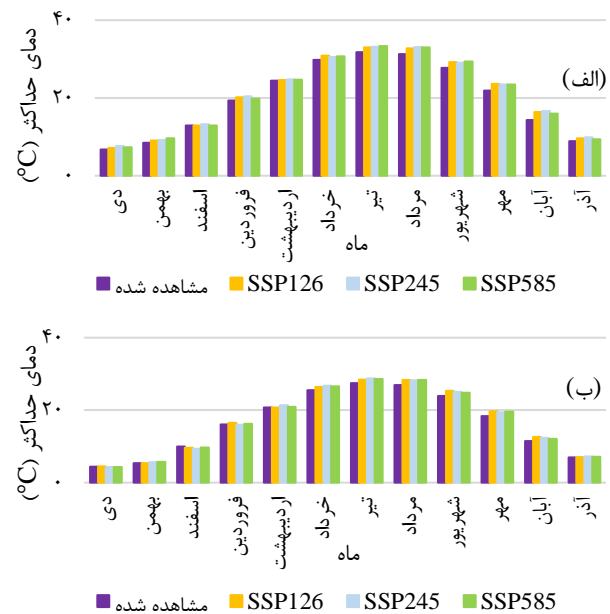
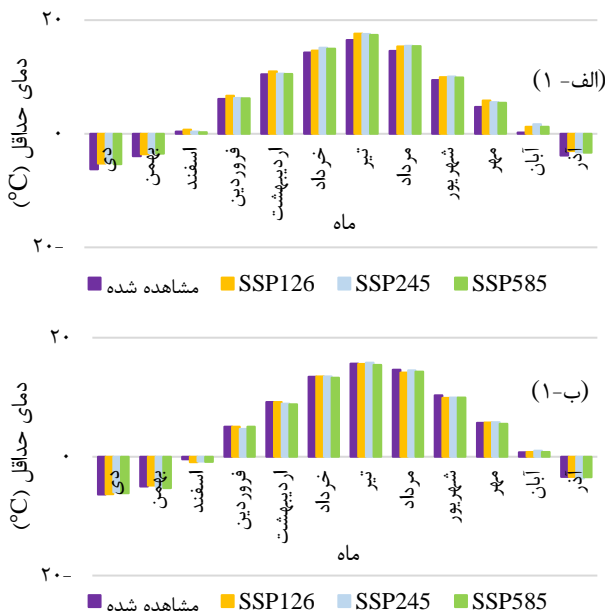
باتوجه به نتایج این بخش، در ایستگاه آل بیشترین و کمترین میزان بارش ماهانه در دوره پایه ($1370-1393$) به ترتیب مربوط به اسفندماه $70/30\text{mm}$ و مردادماه $5/54\text{mm}$ می‌باشد. همچنین بیشترین میزان بارش برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به اسفندماه به ترتیب برابر $82/73\text{mm}$ ، $73/60\text{mm}$ و $70/71\text{mm}$ و کمترین میزان بارش برای سناریوهای SSP245، SSP126 و SSP585 مربوط به ترتیب برابر $6/91\text{mm}$ ، $9/85\text{mm}$ و $8/02\text{mm}$ می‌باشد. بنابراین نسبت به دوره پایه، بیشترین و کمترین میزان بارش به سناریوی SSP126 اختصاص داده شده است (شکل ۴-الف).

در ایستگاه بلغور بیشترین و کمترین میزان بارش ماهانه در دوره پایه به ترتیب مربوط به اسفندماه $73/38\text{mm}$ و شهریورماه $10/68\text{mm}$ است. بیشترین مقدار بارش برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به اسفندماه به ترتیب برابر $93/07\text{mm}$ ، $72/90\text{mm}$ و $85/70\text{mm}$ و کمترین میزان بارش برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 به ترتیب مربوط به ماه‌های شهریور، مرداد و خرداد برابر $14/86\text{mm}$ ، $12/46\text{mm}$ و $11/66\text{mm}$ می‌باشد. بنابراین نسبت به دوره پایه بیشترین و کمترین مقدار بارش به سناریوهای SSP126 و SSP585 اختصاص داده شده است (شکل ۴-ب).

SSP126 و SSP585 اختصاص داده شده است (شکل ۵- الف).

در ایستگاه مارشک نیز بیشترین و کمترین میزان دمای کمینه ماهانه در دوره پایه به ترتیب مربوط به دی ماه $۶/۳۶^{\circ}\text{C}$ و تیرماه $۱۵/۶۴^{\circ}\text{C}$ می باشد. بیشترین میزان دمای کمینه ماهانه برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به دی ماه به ترتیب برابر $۶/۳۱^{\circ}\text{C}$ ، $۵/۹۸^{\circ}\text{C}$ و $۶/۱۶^{\circ}\text{C}$ و کمترین میزان دمای کمینه ماهانه برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به تیرماه به ترتیب برابر $۱۵/۵۷^{\circ}\text{C}$ ، $۱۵/۷۹^{\circ}\text{C}$ و $۱۵/۴۰^{\circ}\text{C}$ می باشد. بنابراین نسبت به دوره پایه بیشترین و کمترین دمای کمینه ماهانه به ترتیب به سناریوی SSP126 و SSP245 اختصاص داده شده است. همچنین بیشترین و کمترین میزان دمای بیشینه ماهانه ایستگاه مارشک نیز در دوره پایه به ترتیب مربوط به تیرماه برابر $۲۷/۴۶^{\circ}\text{C}$ و کمترین دمای بیشینه مربوط به دی ماه برابر $۴/۴۰^{\circ}\text{C}$ می باشد. بیشترین میزان دمای بیشینه ماهانه برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به تیرماه به ترتیب برابر $۲۸/۴۵^{\circ}\text{C}$ ، $۲۸/۸۱^{\circ}\text{C}$ و $۲۸/۵۷^{\circ}\text{C}$ و کمترین میزان دمای بیشینه ماهانه برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به دی ماه به ترتیب برابر $۴/۴۶^{\circ}\text{C}$ ، $۴/۳۲^{\circ}\text{C}$ و $۴/۲۸^{\circ}\text{C}$ می باشد.

باتوجه به نتایج این بخش، در ایستگاه سد کارده بیشترین و کمترین مقدار دمای کمینه ماهانه در دوره پایه به ترتیب مربوط به دی ماه $۶/۲۷^{\circ}\text{C}$ و تیرماه $۱۶/۵۰^{\circ}\text{C}$ می باشد. همچنین بیشترین مقدار دمای کمینه ماهانه برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به دی ماه به ترتیب برابر $۵/۲۶^{\circ}\text{C}$ ، $۵/۱۵^{\circ}\text{C}$ و $۵/۳۷^{\circ}\text{C}$ و کمترین میزان دمای کمینه ماهانه برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به تیرماه به ترتیب برابر $۱۷/۶۱^{\circ}\text{C}$ ، $۱۷/۵۷^{\circ}\text{C}$ و $۱۷/۳۸^{\circ}\text{C}$ است. بنابراین نسبت به دوره پایه بیشترین و کمترین میزان دمای کمینه ماهانه به سناریوهای SSP126 و SSP585 اختصاص داده شده است. همچنین بیشترین و کمترین میزان دمای بیشینه ماهانه ایستگاه سد کارده در دوره پایه به ترتیب مربوط به تیرماه برابر $۳۱/۷۹^{\circ}\text{C}$ و دی ماه برابر $۶/۷۵^{\circ}\text{C}$ می باشد بیشترین میزان دمای بیشینه ماهانه برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به تیرماه به ترتیب برابر $۳۳/۰۳^{\circ}\text{C}$ ، $۳۳/۱۵^{\circ}\text{C}$ و $۳۳/۳۰^{\circ}\text{C}$ و کمترین میزان دمای بیشینه ماهانه برای سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به دی ماه به ترتیب برابر $۷/۱۳^{\circ}\text{C}$ ، $۷/۶۳^{\circ}\text{C}$ و $۷/۳۲^{\circ}\text{C}$ می باشد. با این توضیحات نسبت به دوره پایه بیشترین و کمترین میزان دمای بیشینه ماهانه به سناریوی



شکل ۵. تغییرات دمای کمینه و بیشینه ایستگاه‌های تبخیرسنجی در دوره آ آینده نسبت به دوره پایه با سناریوهای مختلف (الف) ایستگاه سد کارده (ب، ب-۱) ایستگاه مارشک

نتایج آزمون من کندال

برای شناسایی روند در داده‌های بارندگی و دمای حوزه سد کارده از آزمون من کندال استفاده شد. جدول ۶ نتایج مربوط به روند داده‌های اقلیمی سالانه در دوره پایه و آینده را با استفاده از این آزمون تحت سناریوهای مختلف اقلیمی نشان می‌دهد. بررسی نتایج آزمون من کندال در دوره پایه حاکی از آن است که در ایستگاه‌های باران‌سنجی مقدار بارندگی دارای روند کاهشی است که ایستگاه آل و بلغور به ترتیب در سطح ۵٪ و ۱٪ معنی‌دار است. همچنین دمای کمینه ایستگاه سد کارده روند کاهشی معنی‌داری داشت و دمای بیشینه آن دارای روند افزایشی است. دمای کمینه و بیشینه ایستگاه مارشک نیز روند افزایشی معنی‌داری نشان می‌دهد. نتایج دوره آینده نیز نشان‌دهنده این موضوع است که در تمام ایستگاه‌ها در سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 متغیرهای بارندگی، دمای کمینه و دمای بیشینه بدون روند و یا دارای نوسانات کاهشی و افزایشی هستند.

درواقع نسبت به دوره پایه بیشترین و کمترین میزان دمای بیشینه ماهانه به سناریوی SSP245 و SSP585 اختصاص داده شده است. در جدول ۵ نیز مقادیر مربوط به تغییرات متغیرهای دما و بارش در دوره پایه و آینده تحت سناریوهای مورد بررسی ارائه شده است (شکل ۵- ب). با دقت در شکل‌های ۴ و ۵ و مقایسه تغییر میانگین متغیرهای بارش و دما، این نتیجه حاصل شد که در سناریوهای مورد مطالعه نسبت به دوره پایه ۱۳۷۰-۱۳۹۳ به‌طور میانگین مقدار بارندگی در تمام ایستگاه‌های باران‌سنجی افزایش یافته است. دمای بیشینه و کمینه ایستگاه سد کارده و دمای بیشینه ایستگاه مارشک نیز افزایش، اما دمای کمینه ایستگاه مارشک نسبت به دوره پایه کاهش نشان داده است. بیشترین افزایش بارش نسبت به دوره پایه مربوط به سناریوی SSP126 در ایستگاه آل و سپس در ایستگاه جنگ به دست آمد و بیشترین افزایش دما مربوط به سناریوی SSP585 ایستگاه سد کارده است.

جدول ۵. مقایسه تغییر میانگین بارش، دمای بیشینه و کمینه در دوره پایه و آینده

ایستگاه	متغیر	۱۴۰۰-۱۴۱۴		
		SSP585	SSP245	SSP126
آل		۳۵/۳۶	۳۳/۵۶	۳۷/۵۵
بلغور	بارش (mm)	۳۵/۱۷	۳۵/۱۶	۳۳/۲۱
گوش بالا		۳۷/۴۰	۳۷/۲۸	۳۷/۹۳
جنگ		۳۵/۶۱	۳۴/۶۱	۳۷/۲۵
سد کارده	دمای کمینه (°C)	۵/۷۷	۵/۹۱	۵/۹۳
	دمای بیشینه (°C)	۲۰/۹۱	۲۰/۸۱	۲۰/۷۹
مارشک	دمای کمینه (°C)	۴/۷۷	۴/۸۷	۴/۸۶
	دمای بیشینه (°C)	۱۷/۰۱	۱۷/۰۵	۱۷/۰۶

جدول ۶. مقادیر آماره Z آزمون من کندال در تحلیل داده‌های اقلیمی سالانه در دوره پایه و آینده

ایستگاه	متغیر	۱۴۰۰-۱۴۱۴		
		SSP585	SSP245	SSP126
آل		-۰/۵۹	۰/۲	۰
بلغور	بارش	-۱/۳۹	۰/۵۹	-۰/۷۹
گوش بالا		۰/۱	-۰/۵۹	-۱/۹۸*
جنگ		-۰/۶۹	-۰/۹۹	۰/۴
سد کارده	دمای کمینه	۰/۸۹	-۰/۴	-۰/۱
	دمای بیشینه	۲/۸۷**	۱/۳۷	۰/۶۹
مارشک	دمای کمینه	۰/۴	۰/۴	-۰/۵۹
	دمای بیشینه	۰	۰	۰/۲

*, ** به ترتیب سطح معنی‌داری ۵٪ و ۱٪

براساس خروجی مدل SDSM مشخص شد که در سال‌های آینده در چهار ایستگاه باران‌سنجی مورد مطالعه، بیشترین مقدار افزایش بارش در سناریوهای مورد بررسی، مربوط به اسفندماه در فصل زمستان و کمترین میزان بارش مربوط به ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور در فصل‌های بهار و تابستان خواهد بود. بیشترین افزایش دمای کمینه ایستگاه سد کارده و مارشک برای دی‌ماه در فصل زمستان و بیشترین افزایش دمای بیشینه برای تیرماه در فصل تابستان رقم خواهد خورد. روند طولانی‌مدت دما و بارش در گذشته، افزایش بارش در زمستان و کاهش بارش در تابستان، با پیش‌بینی‌های آینده همخوانی دارد. به‌علت اینکه حوضه کارده جزو مناطق سردسیر و کوهستانی است، همچنین به‌دلیل کوهپایه‌های اطراف آن، بارش‌های زمستانه غالباً به‌صورت بارش‌های برف و همراه با هوای سرد در ارتفاعات است. به‌همین دلیل حوضه مورد بررسی دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم خواهد بود. در سناریوی خوش‌بینانه SSP126 و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، برای ایستگاه جنگ بیشترین مقدار بارش ۹۹/۶۰ mm با سناریوی حدواسط SSP245 ایستگاه گوش بالا کمترین میزان بارش ۵/۴۵ mm پیش‌بینی شد. در سناریوی خوش‌بینانه SSP126 ایستگاه مارشک بیشترین دمای کمینه $6/31^{\circ}\text{C}$ و در سناریوی بدبینانه SSP585 ایستگاه سد کارده بیشترین دمای بیشینه $33/30^{\circ}\text{C}$ مشاهده شد. از آنجایی که ایستگاه باران‌سنجی جنگ و ایستگاه تبخیرسنجی مارشک در ارتفاعات و نقاط مرتفع‌تر نسبت به ایستگاه‌های گوش بالا و سد کارده احداث شده‌اند پیش‌بینی هوای سرد و بارانی دور از انتظار نیست. براساس نتایج آزمون من‌کندال، در سناریوهای مورد بررسی متغیرهای بارندگی، دمای کمینه و دمای بیشینه نسبت به دوره پایه بدون روند یا دارای نوساناتی در آینده پیش‌بینی شدند. لیکن متغیر بارش ایستگاه گوش بالا با سناریوی SSP126 دارای روند منفی معنی‌دار در سطح ۵٪ و متغیر دمای بیشینه سد کارده در سناریوی SSP585 که دارای روند مثبت معنی‌دار در سطح ۱٪ است. پژوهش‌هایی که در راستای پژوهش حاضر در دشت کرمان، ۳۰ ایستگاه اصلی ایران، ایستگاه ساری، در میانه و غرب

به استثنای متغیر بارش ایستگاه گوش بالا در SSP126 که دارای روند منفی معنی‌دار در سطح ۵٪ و متغیر بیشینه دمای سد کارده در SSP585 که دارای روند مثبت معنی‌دار در سطح ۱٪ می‌باشد. بیشترین روند افزایشی بارش مربوط به ایستگاه بلغور در SSP245 و سپس ایستگاه جنگ در SSP126 و بیشترین روند کاهشی بارش مربوط به ایستگاه گوش بالا در SSP126 می‌باشد که دارای روند کاهشی معنی‌داری است. همچنین بیشترین روند کاهش دمای کمینه برای ایستگاه مارشک در SSP126 و بیشترین روند افزایشی دمای بیشینه برای ایستگاه سد کارده در SSP585 لحاظ شده است که دارای روند مثبت است.

■ بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پیش‌بینی داده‌های اقلیمی دما و بارش حوضه سد کارده با استفاده از نرم‌افزار SDSM براساس سه سناریوی خوش‌بینانه SSP126، حد واسط SSP245 و بدبینانه SSP585، برای دوره آینده (۱۴۱۴-۱۴۰۰) انجام شد. سپس به بررسی روند هر یک از سناریوهای مورد مطالعه و مقایسه با روند دوره پایه (۱۳۹۳-۱۳۷۰) پرداخته شد. در بخش تحلیل متغیرهای شبیه‌سازی شده با استفاده از متغیرهای NCEP و داده‌های مشاهداتی، مدل SDSM در شبیه‌سازی دما نسبت به شبیه‌سازی بارش از دقت مناسب‌تری برخوردار است. عواملی نظیر تغییرپذیری زیاد و پیچیده بودن فرایند بارش، اختلاف شرایط اقلیمی ایستگاه، کیفیت داده‌ها، جابجایی ایستگاه‌ها، اثرات شهری شدن و سایر عامل‌های محلی که توسط مدل‌های بزرگ‌مقیاس در نظر گرفته نمی‌شوند، در خطای مدل‌سازی دخیل هستند (۸). در بین ایستگاه‌های باران‌سنجی، ایستگاه جنگ در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها نتایج بهتری ارائه داده است که علت آن بهتر بودن کیفیت داده‌ها و عدم وجود نقص در داده‌های آماری می‌باشد. در مطالعاتی که در رابطه با تغییر اقلیم صورت گرفته، همبستگی بیشتر دما نسبت به بارش با داده‌های مشاهداتی نتیجه این مقاله را به‌علت شرایط اقلیمی ایستگاه‌ها و کیفیت داده‌ها تأیید می‌کند (۷، ۱۰، ۱۴، ۱۶، ۱۷).

را تحت تأثیر قرار دهد و موجب افزایش دما در تابستان و کاهش دما در زمستان شود. همچنین گسترش اراضی کشاورزی با نیاز آبی زیاد و استفاده از روش‌های آبیاری غیر اصولی و ذخیره آب پشت سد در بالادست بدون در نظر گرفتن نیازهای پایین دست از جمله فعالیت‌های انسانی است که منجر به افزایش دما می‌شود. از آنجا که تقریباً ۹۰۰۰ ha از اراضی حوضه کارده را اراضی دیم تشکیل می‌دهد، تغییر اقلیم باعث می‌شود تولید اراضی دیم کاهش یابد و حتی با کاهش بارندگی، افزایش دما و تغییر الگوی زمانی و مکانی بارش، امکان انجام کشت دیم میسر نباشد. لذا با عنایت به اینکه بخش صنعت، کشاورزی و اقتصاد برای انجام فعالیت‌های خود به پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی متکی هستند، برای ارتقای توسعه پایدار در این منطقه پیش‌نگری دما و بارش می‌تواند نقش بسیار مهمی در برنامه‌های توسعه آینده به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک داشته باشد. بنابراین ضروری است که تغییراتی در الگوی فعلی کشاورزی و توسعه روش‌های کم‌آبیاری مورد توجه قرار بگیرد.

■ سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های دانشگاه یزد و کلیه کسانی که ما را در انجام این پژوهش یاری کردند، کمال تقدیر و تشکر را بجا آورند.

عراق و در حوزه آبریز Vea در غنا انجام شد، مشابه پژوهش حاضر بیشترین افزایش دما را با سناریوی SSP585 و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای پیش‌بینی کرده‌اند (۱، ۶، ۷، ۱۱ و ۲۱). لازم به ذکر است که روند افزایشی بارش در ایستگاه بلغور در سناریوی SSP245 و ایستگاه جنگ در سناریوی SSP126 را می‌توان به ارتفاع بالاتر این ایستگاه‌ها نسبت به ایستگاه‌های آل و گوش بالا نسبت داد. به طور کلی می‌توان گفت افزایش دما در دوره آینده نسبت به دوره پایه در تمامی سناریوها رخ خواهد داد. در حالی که مقدار بارش بسته به فصل افزایش یا کاهش نشان می‌دهد. با توجه به اینکه حوضه سد کارده حوضه‌ای کوهستانی می‌باشد، افزایش دما در مناطق سنگی و صخره‌ای با شدت بیشتری مشاهده می‌شود. چندین مطالعه در تانزانیا، ایستگاه‌های سینوپتیک ژئوفیزیک، شمیرانات و مهرآباد تهران و ۳۰ ایستگاه اصلی ایران انجام شده است که مطابق با پژوهش حاضر روند افزایشی و کاهش بارش در ماه‌ها و فصول مختلف و روند افزایشی دما را تأیید می‌کنند (۶، ۱۲، ۲۸). در پژوهش حاضر بیشترین کاهش بارندگی در ایستگاه گوش بالا و بیشترین افزایش درجه حرارت در ایستگاه سد کارده رقم خواهد خورد. این افزایش دما ناشی از افزایش سطح گازهای گلخانه‌ای، گرم شدن زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی را تأیید می‌کند. با توجه به اینکه ایستگاه تبخیرسنجی سد کارده در نزدیکی محل سد واقع شده است، سطح آب دریاچه پشت سد نیز می‌تواند دمای محلی

■ References

1. Arfasa, G. F., Owusu-Sekyere, E., & Doke, D. A. (2024). Climate Change Projections and Impacts on Future Temperature, Precipitation, and Stream flow in the Veia Catchment, Ghana. *Environmental Challenges*, 14, 100813. DOI: 10.1016/j.envc.2023.100813
2. Bagherpour, M., Seyedian, M., Fathabadi, A., & Mohamadi, A. (2017). Study of Mann-Kendall test performance in detecting the series of autocorrelation. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11(36), 11-21. DOI: 20.1001.1.20089554.1396.11.36.2.4 [In Persian]
3. Duttarganvi, S., Sunkad, G., Rao, S., Channabasavanna, A. S., Desai, B. K., Umesh, M. R., & Ajayakumar, M. Y. (2021). Weather analysis through Mann-Kendall test and other applications. *Journal of Farm Sciences*, 34(Spl 5), 487-491. DOI: 10.61475/jfm.v34iSpl%205.282
4. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016

5. Gagnon, S., Singh, B., Rousselle, J., & Roy, L. (2005). An application of the statistical downscaling model (SDSM) to simulate climatic data for streamflow modelling in Québec. *Canadian Water Resources Journal*, 30(4), 297-314. DOI: 10.4296/cwrj3004297
6. Ghazi, B., Salehi, H., Cheshami, M., Zeydalinejad, N., & Linh, N. T. T. (2024). Projection of climate change impact on main climate variables and assessment of the future of Köppen–Geiger climate classification in Iran. *Acta Geophysica*, 73, 2017-2027. DOI: 10.1007/s11600-024-01457-6
7. Goodarzi, M. R., Heydaripour, M., Jamali, V., Sabaghzadeh, M., & Niazkar, M. (2023). Investigating Uncertainty of Future Predictions of Temperature and Precipitation in The Kerman Plain under Climate Change Impacts. *Hydrology*, 11(1), 2. DOI: 10.3390/hydrology11010002 [In Persian]
8. Haji Mohammadi, M., GhermezCheshmeh, B. & Azizian, A. (2019). Evaluate the performance of SDSM model in different station and predict climate variables for future. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 13(44), 28-37. DOI: 20.1001.1.20089554.1398.13.44.4.6 [In Persian]
9. Hawkins, C. A., & Weber, J. E. (1980). *Statistical analysis: Applications to business and economics*. Publisher: Harper & Row.
10. Lotfi gharanchai, Sh., Shakiba A., dashtbozorghi A., Rabbani, F., & Akbari Azirani, T. (2021). Modeling and Predicting Climatic Elements of Temperature and Precipitation (Case Study: Ahar Synoptic Station). *Physical Geography Quarterly*, 53(14), 57-74. [In Persian]
11. Mukheef, R. A., Hassan, W. H., & Alquzweeni, S. (2024). Projections of temperature and precipitation trends using CMhyd under CMIP6 scenarios: A case study of Iraq's Middle and West. *Atmospheric Research*, 306, 107470. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107470
12. Magang, D. S., Ojara, M. A., Yunsheng, L., & King'uzza, P. H. (2024). Future climate projection across Tanzania under CMIP6 with high-resolution regional climate model. *Scientific Reports*, 14(1), 12741. DOI: 10.1038/s41598-024-63495-w
13. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica. Journal of The Econometric Societ*, 13(3), 245-259. DOI: 10.2307/1907187
14. 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 [In Persian]
15. Mohammadian, A., Talebi, A., Goodrzi, M. & Abdolahi, A. (2019). Technical Note: Prediction of climatic parameters caused by climate change, case study: Balqur Watershed in Kardeh Dam, Khorasan-Razavi Province. *Watershed Engineering and Management*. 11(2), 551-561. DOI: 10.22092/ijwms.-2019.107546.1187 [In Persian]
16. Niroumandfard, F., Khashei, 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. DOI: 10.22059/ijswr.-2022.343936.669284 [In Persian]
17. Nury, A. H., & Alam, M. J. B. (2013). Performance Study of Global Circulation Model HADCM3 Using SDSM for Temperature and Rainfall in North-Eastern Bangladesh. *Journal of Scientific Research*, 6(1), 87-96. DOI: 10.3329/jsr.v6i1.16511

18. Pal, A. B., Khare, D., Mishra, P. K., & Singh, L. (2017). Trend analysis of rainfall, temperature and runoff data: a case study of Rangoon watershed in Nepal. *International Journal of Students' Research in Technology & Management*, 5, 21-38. DOI: 10.18510/ijstrtm.2017.535
19. Panda, A., & Sahu, N. (2019). Trend analysis of seasonal rainfall and temperature pattern in Kalahandi, Bolangir and Koraput districts of Odisha, India. *Atmospheric Science Letters*, 20(10), e932. DOI: 10.1002/asl.932
20. Praveen, B., Talukdar, S., Shahfahad, Mahato, S., Mondal, J., Sharma, P., ... & Rahman, A. (2020). Analyzing trend and forecasting of rainfall changes in India using non-parametrical and machine learning approaches. *Scientific Reports*, 10(1), 10342. DOI: 10.1038/s41598-020-67228-7
21. Roshani, A., & Hamidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), 781-795. DOI: 10.22059/jwim.2022.330603.920 [In Persian]
22. Sedaghatkerdar, A. and Fattahi, E. 2008. Warning of drought indices in Iran, *Journal of Geography and Development, University of Sistan and Baluchestan*; 6(11), 76-59. DOI: 10.22111/gdij.2008.1616 [In Persian]
23. Serrano, A., Mateos, V. L., & Garcia, J. A. (1999). Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921–1995. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2), 85-90. DOI: 10.1016/S1464-1909(98)00016-1
24. Singh, O., Arya, P., & Chaudhary, B. S. (2013). On rising temperature trends at Dehradun in Doon valley of Uttarakhand, India. *Journal of Earth System Science*, 122, 613-622. DOI: 10.1007/s12040-013-0304-0
25. Stocker, B. D., Roth, R., Joos, F., Spahni, R., Steinacher, M., Zaehle, S., ... & Prentice, I. C. (2013). Multiple greenhouse-gas feedbacks from the land biosphere under future climate change scenarios. *Nature Climate Change*, 3(7), 666-672. DOI: 10.1038/nclimate1864
26. Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145-157. DOI: 10.1016/S1364-8152(01)00060-3
27. Wilby, R.L., & C.W. Dawson. 2008. *Using SDSM version 4.2- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts*. user manual, 94 pp.
28. Yousefi, M. Reza., Asadian, F., & Khalidi, Sh. (2024). Forecasting and examining the future of climate change in Tehran. *Journal of Future Cities Vision*, 5(1), 179-197. [In Persian]