

**EXTENDED ABSTRACT**

**Forecasting the risk of drought in Zabol synoptic station based on the output of CMIP6 climate models**

M. Forouzan Mehr<sup>1</sup>, M. Dastourani<sup>2\*</sup>, M. Yaghoobzadeh<sup>3</sup> and S. Hosseinabadi<sup>4</sup>

- 1- *PhD Student, Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.*
- 2\* - *Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. (mdastourani@birjand.ac.ir).*
- 3- *Associate Professor & Research Group of Drought and Climate Change, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.*
- 4- *PhD Student, Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.*

**ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 7 March 2022

Revised: 6 December 2022

Accepted: 10 December 2022

*Keywords:*

Drought, Sixth Climate Change Report, SPI Index, Climate Change.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Forouzan Mehr, M., Dastourani, M., Yaghoobzadeh, M., Hoseinabadi, S. (2023). 'Forecasting the risk of drought in Zabol synoptic station based on the output of CMIP6 climate models', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(3), pp. 69-84. doi: 10.22055/jise.2022.40231.2020.

**Introduction**

Drought is one of the most complex natural hazards that affect natural and human systems (Wilhite et al., 2005, Wilhite et al., 2007). Greenhouse gas emission has contributed to climate change in the last century (Van Pelt and Swart, 2011). Climate change has a significant impact on the hydrological cycle and consequently on water resources, and the frequency and severity of droughts and floods. The most reliable tool available for future climate simulation is the output of coupled atmosphere-ocean patterns of atmospheric general circulation (Shakarami and Massahbavani, 2007). The reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change show that if the current trend of greenhouse gas production due to the consumption of fossil fuels continues, the concentration of these gases can reach more than 600 ppm before the end of the 21st century (IPCC, 2007). The downscale model, which is a downscale statistical method, uses semi-empirical distributions for simulation and downscale and can generate future climate parameters at the station level. A major application of these data is to monitor and evaluate future droughts (Hosseinabadi et al, 2020). In the occurrence of drought, there are many factors such as changing the course of rivers and draining reservoirs, climate change and warming of the earth. Nowadays, the increasing occurrence of drought has caused the attention of many meteorologists and climatologists around the world. Drought indicators are used to diagnose and classify drought conditions. These indicators include the possibility of evaluating the standardized precipitation evaporation and transpiration index SPEI, the Palmer drought intensity index PDSI, the standard runoff index SRI and the identification drought index RDI. SPI and SPEI are the most common drought indicators.

**Methodology**

In the current research, due to the importance of the correct management of water resources and climatic conditions and recent droughts in Zabol city, the future drought situation of this region has been investigated. The basic period of the data analyzed in the current research is 21 years (1985-2005). Also, the data related to GCM models are for micro-scaling the data related to the two periods 2025-2045 and 2065-2085. For micro-scaling in this research, 4 GCM models

related to the data of the 6th IPCC report including (BCC-ESM2-MR), (CanESM5), (MIROC6) and (MRI-ESM2-0) have been used. In this research, the SPI index has been consulted to investigate the drought in the two studied periods in Zabol city. Standardized Precipitation Index (SPI) can be calculated for any location based on long-term recorded precipitation data. Long-term recorded rainfall data are fitted to a probability distribution and then transformed into a normal distribution so that the average SPI at the desired location and period is zero (Edwards, 1997, Mishra and Singh, 2010). Calculating the SPI drought index in any of the time scales is a major advantage of this index. During the recording period, rainfall data as well as the nature of the probability distribution play an important role in calculating the SPI drought index, regarded as a limitation of this index (Mishra and Singh, 2010). To calculate the SPI index, it is first necessary to prepare a data set of monthly rainfall for a period of  $m$  months, which is ideally a continuous period of at least 30 years. Then a set of averaging periods are selected to prepare a set of time scales of 3, 6, 12, 24 and 48 months. These time scales are arbitrary and can show the impact of the lack of rainfall on usable water resources.

### Results and Discussion

The SPI index indicates a drought when it has negative sequences, and when these negative values exceed 1, the drought intensifies. With the positive value of this index, the drought period will end. Therefore, the duration of the drought is determined by the time of its beginning and end, and its severity is determined for each of its months. The results in the present study show that in both study periods in both SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios and in all the studied models, the 6-month SPI index shows the largest negative value, and the changes in the drought index in periods 12 and 48 months are close. Comparing the studied models and scenarios in Zabol city, it was found that the BCC-ESM2-MR model showed 6-month SPI index and the CanESM5 model showed a 12- and 48-month index more than other models. The drought index obtained in the studied periods and all models indicate moderate drought in Zabol city. To compare the studied scenarios in the present study, the average value of SPI index was calculated for four models and its values were plotted at different time scales over the next 20 years for the next two periods. Drought in the studied periods is demonstrated longer than the 6-month time scale. Also, in the studied time scales, the two scenarios are almost the same, but in some cases, the SSP5-8.5 scenario shows more severe drought, which indicates moderate drought in the region.

In the present study, none of the studied time scales indicate wetness. At the 6-month scale of the SSP2-4.5 scenario, in the first period, the number of drought years has increased only in the MRI-ESM2-0 model, but the two models CanESM5 and MIROC6 show an increase in the number of years with severe drought. In the second period of this scenario and the first period of the SSP5-8.5 scenario, the situation is the same, but in the second scenario, SSP5-8.5, the number of years with normal status has decreased and the number of years with severe drought has increased. In the 12-month time scale, the SPI drought index has also decreased the years with normal status as well as very severe condition, except in the CanESM5 model, the first period of the SSP5-8.5 scenario, compared to the base period. Also, the periods with moderate and severe drought status have lengthened. On a 48-month time scale, the number of normal years has generally decreased and the number of drought years increased compared to the base period. Also, according to the results, in both future periods examined in this research, on average, there are 2 periods of longer drought periods in all three time scales of 6, 12, and 48 months. In the coming period of 2025-2044, the highest increase in the number of drought periods appears in the 48-month time scale of the CAN model with 5 periods and then in the 12-month time scale of the MIR model with the number of 4 periods. In the upcoming period of 2065-2084, the largest increase in the number of drought periods is 4 periods in the BCC model in the time scale of 12 and 48. Also, the greatest increase in the drought period in both future periods is related to the SSP4/5 scenario. In general, in all models and time scales examined, the number of drought periods has increased compared to the base period.

## Conclusions

In the present study, to investigate drought in Zabol city, 4 GCM models related to the data of the sixth IPCC report including (BCC-ESM2-MR), (CanESM5), (MIROC6) and (MRI-ESM2-0), under two scenarios: SSP2- 4.5 and SSP5 -8.5 were used in the period 2044-2025 and 2084-2065. The BCCSD Downscale method has also been adopted to predict meteorological data in the target periods. According to the results of the present study in both SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios and all studied models, the 20-year average of 6 months of the SPI index shows the most negative value, as well as changes in the 20-year average of the drought index. It is very close in 12- and 48-month periods. In addition, the comparison of models and scenarios in this study shows that in the BCC-ESM2-MR model, the 20-year average of the 6-month SPI index and in the CanESM5 model, the 12- and 48-month index is larger than other models. Also, the SPI index in 12- and 48-month time scales shows the severity of drought in the studied periods more than 6-month time scale, and in the studied time scales, both scenarios are almost the same. However, in some cases, the SSP5-8.5 scenario shows the severity of drought. More has been shown. According to the results of this study, in general, the years with normal status have decreased and the number of years with drought status has increased compared to the base period. The results also show that in the most pessimistic case, the number of dry years in Zabol city will be 14 and the CanESM5 model can be used to predict the drought index. Also, according to the results, in both future periods examined in this research, on average, there are 2 periods of increased drought periods in all three time scales of 6, 12, and 48 months. In the coming period of 2025-2044, the highest increase in the number of drought periods is in the 48-month time scale of the CAN model with 5 periods and then in the 12-month time scale of the MIR model with the number of 4 periods. In the upcoming period of 2065-2084, the largest increase in the number of drought periods is 4 periods in the BCC model in the time scale of 12 and 48. Also, the greatest increase in the drought period in both future periods is related to the SSP4/5 scenario. In general, in all models and time scales examined, the number of drought periods has increased compared to the base period.

## References

- 1- Edwards, D.C. and McKee, T.B., 1997. *Characteristics of 20 th century drought in the United States at multiple time scales* (Vol. 97, p. 155). Fort Collins: Colorado State University.
- 2- IPCC. 2007. *The Physical Science Basis*. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge UK.
- 3- Mishra, A. K., and Singh, V. P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-20), pp. 202-216.
- 4- Shakarami, N, and Massahbavani, A. 2007. Uncertainty analysis of coupled ocean-atmosphere general circulation patterns on climate change scenarios of temperature and rainfall in Zainderood basin, *technical workshop on the effects of climate change on water resources management*. (In Persian).
- 5- Van Pelt, S. C, and Swart, R. J. 2011. Climate change risk management in transnational river a. basins: the Rhine. *Water resources management*, 25(14), pp. 3837-3861.
- 6- Wilhite, D. A., and Buchanan-Smith, M. 2005. Drought as hazard: understanding the natural and social context. *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*, 3, pp. 29.
- 7- Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., and Hayes, M. J. 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management*, 21(5), pp. 763-774.



## پیش آگاهی مخاطره خشکسالی در ایستگاه سینوپتیک زابل براساس برونداد مدل های اقلیمی CMIP6

مهديه فروزان مهر<sup>۱</sup>، مهدی دستورانی<sup>۲\*</sup>، مصطفی یعقوبزاده<sup>۳</sup> و سعیده حسین آبادی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، mdastourani@birjand.ac.ir

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند.

۴- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند.

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹

### چکیده

باتوجه به اهمیت خشکسالی و اقدام برای به حداقل رساندن خسارات ناشی از این بلیه طبیعی، در پژوهش حاضر به بررسی شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI) در منطقه جنوب شرقی ایران در شهرستان زابل با استفاده از چهار مدل GCM، MRI-ESM2-0 و MIROC6، CanESM5، BCC-ESM2-MR در CMIP6 پرداخته شده است. در این پژوهش، از دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای تخمین SPI در دو دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۴ و ۲۰۸۴-۲۰۶۵ و برای پیش بینی داده های هواشناسی از روش ریزمقیاس نمایی BCSD استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در هر دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و در تمامی مدل های مورد بررسی، میانگین ۲۰ ساله شاخص SPI، شش ماهه نشان دهنده بیشترین مقدار منفی است. علاوه بر این مقایسه مدل ها و سناریوها در این پژوهش نشان می دهد که در مدل BCC-ESM2-MR، میانگین ۲۰ ساله شاخص شش ماهه SPI و در مدل CanESM5، شاخص ۱۲ و ۴۸ ماهه نسبت به سایر مدل ها بیشتر است. همچنین شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماهه شدت خشکسالی را در دوره های مورد مطالعه بیشتر از مقیاس زمانی شش ماهه نشان می دهد و در مقیاس های زمانی مورد مطالعه تقریباً هر دو سناریو بر هم منطبق هستند. طبق نتایج حاصل از این پژوهش، به طور کلی دوره های دارای وضعیت نرمال کاهش یافته و به تعداد دوره های دارای وضعیت خشک نسبت به دوره پایه افزوده شده است. همچنین نتایج نشان می دهد در بدینانه ترین حالت، تعداد دوره های خشک در ایستگاه سینوپتیک زابل ۱۴ دروه خواهد بود و می توان برای پیش بینی شاخص خشکسالی از مدل CanESM5 استفاده نمود.

کلید واژه ها: خشکسالی، گزارش ششم تغییر اقلیم، شاخص SPI، تغییر اقلیم.

### مقدمه

به دلیل ویژگی فوق العاده ای که دارد، تأثیر قابل توجهی در سطوح اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی دارد (Hernández-Vásquez et al., 2022).

با افزایش تولید گازهای گلخانه ای، یکی از بزرگ ترین چالش های موجود در قرن اخیر، پدیده تغییر اقلیم است (Van Pelt and Swart, 2011). تغییر اقلیم تأثیر به سزایی در چرخه های هیدرولوژیکی و در نتیجه بر منابع آب، فراوانی و شدت خشکسالی و سیل دارد. معتبرترین ابزار موجود برای شبیه سازی اقلیمی آینده، استفاده از خروجی الگوهای جفت شده جو - اقیانوس گردش عمومی جو است (Shakarami and Massahbavani, 2007). گزارش های هیئت بین الدول تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)) نشان می دهد که در صورت ادامه روند کنونی تولید گاز گلخانه ای به دلیل مصرف سوخت های فسیلی، غلظت این گازها تا قبل از پایان قرن ۲۱ می تواند به بیش از ۶۰۰ppm برسد (IPCC,

خشکسالی یکی از پیچیده ترین مخاطرات طبیعی است که بر سیستم های طبیعی و انسانی تأثیر می گذارد (Wilhite et al., 2007, Wilhite et al., 2005). به طور معمول خشکسالی به عنوان یک پدیده هواشناسی در نظر گرفته می شود که به کندی توسعه می یابد و ماه ها یا حتی سال ها طول می کشد تا به حداکثر شدت برسد (Svoboda et al., 2002, Wilhite et al., 2000). پدیده خشکسالی یکی از پرهزینه ترین بلایای طبیعی جهان است که به طور متوسط سالانه بین شش تا هشت میلیارد دلار خسارت جهانی به بار می آورد و بیش از هر نوع بلای طبیعی دیگری بر مردم تأثیر می گذارد (Keyantash and Dracup, 2002). خشکسالی در کنوانسیون سازمان ملل متحد (UNCCD, 1994)، برای مبارزه با بیابان زایی به عنوان پدیده ای طبیعی تعریف شده است که به طور طبیعی زمانی ایجاد می شود که میزان بارش به میزان قابل توجهی کمتر از حد معمول ثبت شده باشد و

دوره‌های خشک کاهش و تداوم طولانی‌ترین دوره خشک افزایش یابند. Yaghoubzadeh et al. (2017)، در پژوهشی به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص‌های Evapotranspiration Dificit Index (ETDI) و Standardized Precipitation Index (SPI) پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد شاخص ETDI به‌علت وابسته بودن خشکسالی کشاورزی به کمبود تبخیر و تعرق نتایج بهتری دارد و همچنین در شاخص SPI در این پژوهش برای تعیین خشکسالی کشاورزی پیشنهاد نمی‌شود. Hosseinabadi et al. (2020)، در پژوهشی با استفاده از داده‌های گزارش پنجم IPCC به ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی در دو شهرستان زابل و شیراز پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد مقادیر شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماهه نسبت به سه ماهه شدت خشکسالی را بیشتر نشان می‌دهند و همچنین مدل MIROC-ESM نسبت به مدل‌های دیگر و سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوهای دیگر برای دو شهرستان مورد مطالعه خشکسالی را با شدت بیشتری نشان داده است در پژوهشی دیگر Hernández et al. (2022)، به بررسی زمانی- مکانی خشکسالی در مقیاس‌های سه، شش، ۱۲ و ۲۴ ماهه با شاخص‌های SPI و SPEI در ۱۹ ایستگاه هواشناسی واقع در بخش‌های میانی و مرتفع حوضه رودخانه SONORA در مکزیک، طی دوره ۲۰۱۳-۱۹۷۴ پرداختند. نتایج کلی این پژوهش نشان می‌دهد شدت خشکسالی در پایان سری زمانی مورد بررسی افزایش یافته و دوره‌های مهمی در سال‌های ۱۹۹۷، ۱۹۹۹، ۲۰۰۰، ۲۰۱۳-۲۰۱۱ شناسایی شده است. همچنین شاخص SPEI دوره‌های خشکسالی و روند شدت افزایشی را بهتر از SPI نشان داده است. در پژوهشی دیگر Abbasniya et al. (2021)، به تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و GRI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی و آب‌های زیرزمینی در دشت مهران استان ایلام پرداختند. طبق نتایج به‌دست آمده از شاخص SPI در این پژوهش، در دوره آماری ۹۷-۷۵، چهار دوره خشکسالی شدید اتفاق افتاده است که شدیدترین آن در سال آبی ۹۰-۹۱ با شاخص SPI، ۱/۷۳- بوده است. همچنین شاخص GRI نیز نشان داد، در منطقه یک دوره خشکسالی ۱۱ ساله از سال آبی ۸۷-۸۸ تا ۹۸-۹۷ رخ داده که شدیدترین آن در سال ۹۰-۹۱ با شاخص ۱/۱۱- بوده است.

Saharwardi et al. (2021)، در پژوهش خود به ارزیابی تغییرپذیری مکانی- زمانی گذشته، حال و آینده در منطقه Bundelkhand در مرکز هند پرداخته‌اند. در این پژوهش از دو شاخص خشکسالی SPI و SPEI به منظور پایش کوتاه مدت و بلندمدت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. نتایج نشان داد که فراوانی خشکسالی از ابتدای قرن ۲۱ به‌ویژه در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است، این منطقه به علت بارندگی کمتر و دمای بیشتر در برابر خشکسالی آسیب‌پذیرتر می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد ۴۰ درصد از

2007). حال آنکه اگر انتشار این گازها کاهش نیابد، تحت سناریوهای افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای ارائه شده در CMIP5، دمای سطح کره زمین تا اواخر قرن ۲۱ بیش از ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ میلادی افزایش می‌یابد که این افزایش دما در سال‌ها و دهه‌های مختلف، یکسان نیست (IPCC, 2014). مدل ریزمقیاس‌نمایی که یک روش آماری ریزمقیاس‌نمایی بوده و از توزیع‌های نیمه تجربی برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌کند و می‌تواند پارامترهای آبی اقلیمی را در سطح ایستگاه تولید نماید. یکی از مهمترین و سودمندترین کاربردهای این داده‌ها استفاده از آن‌ها برای پایش و ارزیابی خشکسالی‌های آبی است (Hosseinabadi et al., 2020). در وقوع خشکسالی عوامل متعددی از جمله تغییر مسیر رودخانه‌ها و تخلیه مخازن، تغییر اقلیم و گرم شدن زمین و بسیاری عوامل دیگر تأثیرگذار می‌باشد. امروزه وقوع روزافزون خشکسالی سبب شده تا توجه بسیاری از هواشناسان و اقلیم‌شناسان در سراسر جهان به بررسی این پدیده جلب شود. برای تشخیص، طبقه‌بندی شرایط خشکسالی از شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شود. این شاخص‌ها امکان ارزیابی کمی شدت، مدت و وسعت مکانی شرایط آب و هوایی غیرعادی را فراهم می‌کند (Olagbaiye et al., 2021). شاخص تبخیر و تعرق- بارش استاندارد شده (SPEI)، شاخص شدت خشکسالی پالم PDSI، شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) و شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) از جمله این شاخص‌ها می‌باشند. شاخص SPI و SPEI از رایج‌ترین شاخص‌های خشکسالی می‌باشند (Tsakiris and Vangelis, 2005). در ادامه تعدادی از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بررسی شاخص‌های خشکسالی در ایران و خارج از کشور آورده شده است.

Rostamian et al. (2013)، به پیش‌بینی شاخص استاندارد بارش (SPI) برای شدت خشکسالی آینده در حوزه آبخیز بهشت‌آباد واقع در حوضه کارون در سه دوره آینده (۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹) پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که شدت خشکسالی صرفاً به مقادیر شاخص خشکسالی بستگی ندارد و به مدت زمان نیز بستگی دارد و افزایش مدت و شدت خشکسالی‌ها در دوره سوم آینده بیشتر از دوره دوم و اولیه آینده است. Zareabyaneh et al. (2016)، با استفاده از پنج مدل گردش عمومی جو و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG به پایش خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI در ایستگاه سینوپتیک همدان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد براساس سناریوی A2، دمای متوسط و بارش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ نسبت به دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۱ به ترتیب ۰/۸۲ درجه سانتی‌گراد و ۲/۵ درصد افزایش می‌یابند، همچنین پایش وضعیت رطوبتی بر مبنای شاخص SPEI نشان دهنده تغییرات زیاد شرایط رطوبتی در دهه اول پیش‌بینی، نسبت به دهه‌های دوم و سوم می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج پیش‌بینی شد که در مقیاس‌های بلندمدت تعداد

قرار گرفته‌اند، نتایج حاصل از SPAEI و ScPDSI با شاخص‌های خشکسالی تک متغیره بهتر از SPEI مطابقت دارند. خشکسالی‌های تخمین زده شده نشان می‌دهد در مناطق مرطوب جنوب چین تا پایان قرن ۲۱ خشکسالی‌ها گسترده‌تر می‌شود، ولی در مناطق خشک شمال غربی چین و مغولستان داخلی خشکسالی‌ها دارای روند کاهشی معنی دار هستند. Wang et al (2021); Chiang et al (2021a); Song et al (2021); Meresa et al (2021b); Ayugi et al (2021). نیز در پژوهش‌های خود برای بررسی شاخص‌های خشکسالی در دوره آتی از داده‌ها گزارش ششم تغییر اقلیم CMIP6 بهره گرفته‌اند.

هرچند مطالعات فراوانی در زمینه تغییر اقلیم و وضعیت پارامترهای مختلف اقلیمی در سال‌های آینده در سطح کشور به انجام رسیده است، اما باتوجه به آسیب‌پذیری کشور ایران که یک کشور در حال توسعه است و در منطقه خشک و نیمه خشک جهان قرار دارد، مطالعه خشکسالی و درک شدت و مدت آن در آینده می‌تواند به تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری بهتر به منظور کاهش خسارات ناشی از این پدیده کمک شایانی نماید. حال آنکه در اکثر تحقیقات صورت گرفته پیشین در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو ارائه شده در گزارش پنجم استفاده شده است و باتوجه به اینکه در سال ۲۰۱۹، IPCC اقدام به انتشار گزارش جدید تحت عنوان CMIP6 نموده است و همچنین باتوجه به اهمیت موضوع خشکسالی و اقدام برای به حداقل رساندن خسارات ناشی از این بلای طبیعی، در پژوهش حاضر به پیش‌بینی مقدار شاخص خشکسالی SPI در منطقه جنوب شرقی ایران در شهرستان زابل با استفاده از چهار مدل GCM ارائه شده در CMIP6 که جدیدترین گزارش انتشار یافته می‌باشد، پرداخته شده است و از دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به علت کاربرد بیشتر و نزدیک بودن به شرایط واقعی برای تخمین SPI در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۴ و ۲۰۲۵-۲۰۸۴ استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت موضوع مدیریت صحیح منابع آب و شرایط اقلیمی و خشکسالی‌های اخیر در شهرستان زابل، به بررسی وضعیت خشکسالی در آینده این منطقه پرداخته شده است. شهرستان زابل یکی از شهرستان‌های استان سیستان و بلوچستان واقع در جنوب شرق ایران است. این شهرستان در ضلع شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان قرار گرفته است. شهرستان زابل دارای اقلیم بیابانی گرم و خشک و میانگین بارش سالانه ۵۹/۶ میلی‌متر می‌باشد، همچنین دمای آن در سال از ۹/۵- تا ۴۹ درجه سانتی‌گراد متغیر است. در جدول (۱) مشخصات اقلیمی این ایستگاه بیان و در شکل (۱) موقعیت آن نشان داده شده است. دوره پایه داده‌های مورد بررسی که شامل داده‌های دمای میانگین،

خشکسالی‌های منطقه مورد مطالعه مرتبط با رویدادهای الینو بوده که در دهه‌های اخیر قوی‌تر بوده‌اند، با استفاده از شاخص‌های SPI، EDDI و SPEI به بررسی واکنش خشکسالی ناگهانی به بارندگی و تقاضای تبخیر جوی (AED) در دوره ۲۰۱۸-۱۹۶۱ در اسپانیا پرداختند. نتایج نشان داد که تفاوت‌های زیادی در الگوهای زمانی و مکانی خشکسالی‌های ناگهانی بین شاخص‌ها وجود دارد. به‌طور کلی، به جز جنوب اسپانیا در تابستان، درجه بالایی از سازگاری بین الگوهای خشکسالی ناگهانی شناسایی شده توسط SPEI و SPI وجود دارد. همچنین EDDI تفاوت‌های مکانی و زمانی قابل توجهی را از SPI در زمستان و تابستان نشان می‌دهد در حالی که انسجام زیادی با SPEI در تابستان دارد. علاوه بر این بارش عامل اصلی خشکسالی‌های ناگهانی در اسپانیا می‌باشد. Olagbaiye et al (2021)، در پژوهش خود به پیش‌بینی خشکسالی در شمال نیجریه با استفاده از چهار شاخص SPEI-T، SPEI-H و SPEI-P به‌عنوان شاخص‌های اولیه خشکسالی هواشناسی و کشاورزی پرداختند. نتایج حاصل از ضریب همبستگی در این پژوهش نشان داد که با افزایش مقیاس زمانی، همبستگی بین شاخص‌ها افزایش می‌یابد و SPEI-H و SPI بیشترین همبستگی را دارند. تعداد خشکسالی ثبت شده توسط شاخص‌ها نیز با افزایش مقیاس زمانی افزایش می‌یابد و شاخص SPEI-P بیشترین تعداد رویداد خشکسالی را شناسایی کرده است. علاوه بر این تمام شاخص‌های مورد مطالعه در دوره‌های ۱۹۸۲، ۱۹۸۹، ۲۰۰۲-۱۹۹۲ و ۲۰۱۱-۲۰۰۸ پدیده خشکسالی را شناسایی کرده‌اند. تعداد زیادی پژوهش دیگر نیز وجود دارد که در آن‌ها شاخص‌های خشکسالی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که پژوهش‌هایی نظیر Javan (2020); Fung et al (2020); Liu et al (2021); Issaharou-Matchi et al (2021); Hadeli and Nikbakht (2021)، از جمله آن می‌باشند.

تعدادی دیگر از پژوهش‌ها وجود دارد که در آن‌ها شاخص‌های خشکسالی برای دوره آتی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است که در آن برای پیش‌بینی داده‌های دوره آتی از داده‌های گزارش ششم تغییر اقلیم CMIP6 بهره گرفته شده است. در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود. Mishra and Adhar (2020)، در پژوهشی با استفاده از ۱۶ مدل CMIP6-GCM علت بالقوه خشکسالی در جنوب آسیا را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد پیش‌بینی‌های مبتنی بر مجموعه چند مدل به این معناست که CMIP6-GCM در آسیای جنوبی قابل اعتماد نیستند. Zhang et al (2021)، تغییرات خشکسالی را با استفاده از CMIP6-GCM در چین برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی کرده و نتایج را با شاخص‌های خشکسالی قبل از ارائه CMIP6-GCM مقایسه کرده‌اند. با توجه به شاخص‌های به‌دست آمده در گذشته، خشکسالی‌های آینده در چین بدتر می‌شود. علاوه بر این در میان شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی که تحت سناریوهای SSP مورد بررسی



حداقل و حداکثر و بارش است، در پژوهش حاضر ۲۱ سال (۱۹۸۵-۲۰۰۵) می‌باشد که از سازمان هواشناسی کل کشور دریافت شده است. همچنین داده‌های مربوط به مدل‌های GCM به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مربوط به دو دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۵ و ۲۰۶۵-۲۰۸۵ می‌باشد. برای ریزمقیاس‌نمایی در پژوهش حاضر از چهار مدل GCM مربوط به داده‌های گزارش ششم IPCC شامل (MIROC6)، (CanESM5)، (BCC-ESM2-MR) و (MRI-ESM2-0) استفاده شده که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. این داده‌ها از مسیر

هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) با هدف اصلی شناخت جنبه‌های تغییر اقلیم و بخصوص چگونگی اثر فعالیت‌های انسانی بر آن، پس از بررسی عنوان کرد که عوامل طبیعی و غیرطبیعی باعث برهم خوردن شرایط حاکی بر اجزای مختلف اقلیم کره زمین می‌شود. این هیات از زمان شروع به کار خود مجموعه‌ای از گزارش‌های ارزیابی و تخصصی و مقالات فنی را منتشر نموده که به‌عنوان معتبرترین منابع اطلاعاتی در مورد تغییرات اقلیمی شناخته می‌شوند و تاکنون گزارش‌های ارزیابی اول تا ششم را تهیه و منتشر کرده است.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه سینوپتیک زابل

Table 1- Geographical and climatic characteristics of Zabol synoptic station

Station	Longitude	Latitude	h(m)	Tmean (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	PR (mm)
Zabol	31°2'	61°39'	482	38	49	-9.5	59.6

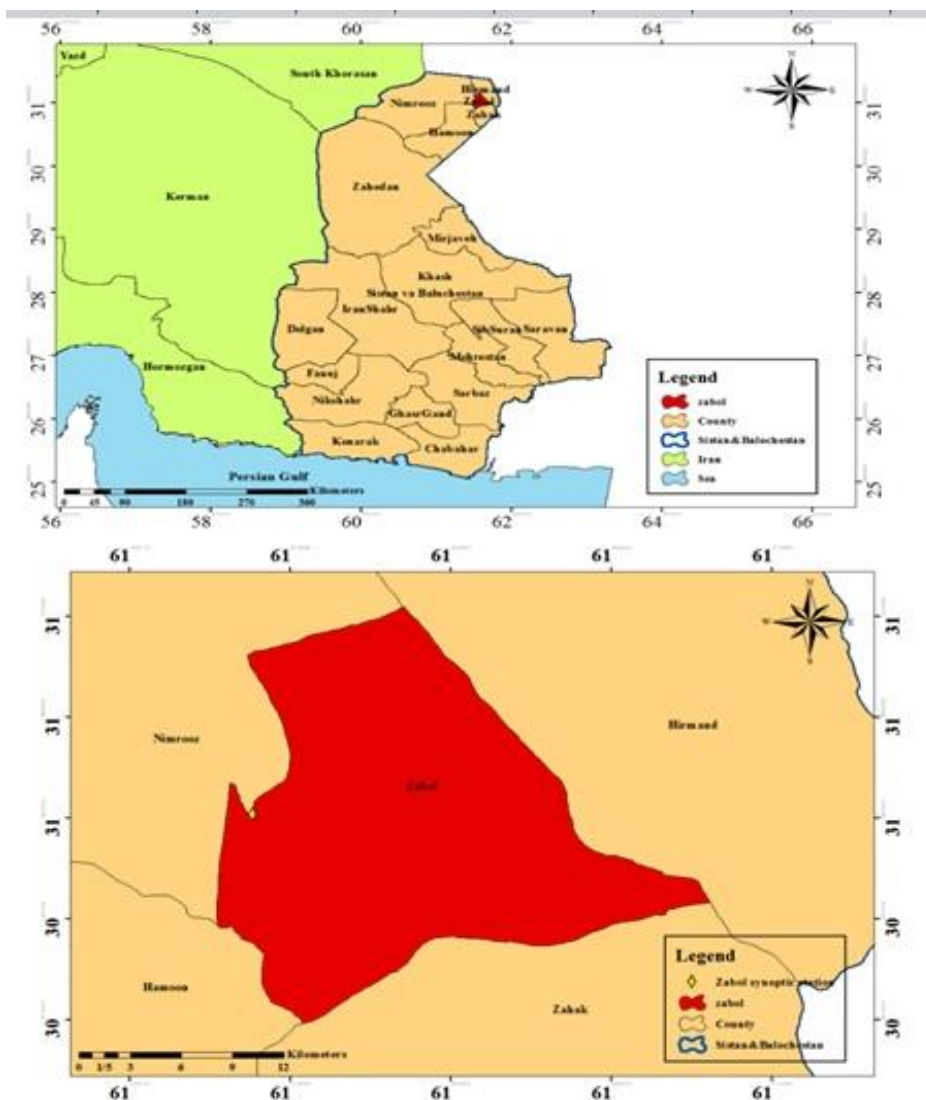


Fig. 1- Geographical location of the Zabol synoptic station

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه سینوپتیک زابل

جدول ۲- مشخصات مدل‌های بزرگ مقیاس (GCM)

Table 2- Specifications of large-scale Models (GCM)

Row	Model Name	Developing Country	Research Center	Resolution scale (degree)
1	BCC-ESM2-MR	China	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	1.12°×1.12°
2	CanESM5	Canada	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis-Canada	2.81°×2.78°
3	MIROC6	Japan	National Institute for Environmental Studies, The university of Tokyo	1.4°×1.4°
4	MRI-ESM2-0	Japan	Meteorological Research Institute	1.12°×1.12°

## روش ریزمقیاس‌نمایی BCSD

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، بزرگ مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی آن نسبت به منطقه مطالعاتی است. دو نوع روش برای به‌دست آوردن متغیرها در مقیاس محلی (ریزمقیاس‌نمایی) از روی مقیاس جهانی وجود دارد: یکی روش دینامیکی که شامل حل صریح معادلات دینامیکی سیستم است و دیگری روش آماری که از رابطه‌های استخراج شده از داده‌های مشاهده شده استفاده می‌کند. روش‌های دینامیکی به دلیل پرهزینه بودن و دشواری و همچنین عدم امکان تولید داده برای انواع سناریوهای مختلف، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hewitson and Crane, 1996). در مقابل روش‌های آماری با محاسبات ساده آماری، صرف زمان و هزینه کم امکان بررسی انواع سناریوهای اقلیمی و تحلیل عدم قطعیت آن‌ها را دارند.

روش ریزمقیاس‌نمایی مورد استفاده در پژوهش حاضر، روش BCSD است. این روش اولین بار توسط Wood et al (2002)، به‌منظور تخمین مولفه‌های هیدرولوژی درازمدت به‌کار گرفته شد و امروزه در مطالعه‌های اقلیم‌شناسی با مقیاس ماهانه به‌وفور استفاده می‌شود، از جمله این موارد می‌توان به پژوهش‌های Choobeh و Goodarzi (2018)؛ Tabatabaei et al (2019)؛ Rahimi Bondarabadi et al (2019)؛ Hosseinabadi et al (2020)؛ Ataei et al (2022) اشاره کرد.

فرآیند ریزمقیاس‌نمایی با این روش در سه گام به شرح زیر انجام می‌شود:

۱- اصلاح انحراف آماری خروجی مدل‌های گردش عمومی در مقیاس ماهانه: در این گام دو ضریب اصلاحی برای دما و بارش دوره مربوط به خروجی مدل‌های اقلیمی تولید می‌شود.

۲- بعد از محاسبه ضرایب اصلاحی برای نقاط شبکه مدل‌های اقلیمی، با استفاده از ابزار درون‌یابی این ضرایب برای دقت‌های بالاتر  $1 \times 1$ ،  $0.5 \times 0.5$ ،  $0.25 \times 0.25$  و  $0.125 \times 0.125$  برآورد می‌گردد.

۳- ضرایب اصلاحی به‌دست آمده برای دقت‌های بالاتر با توجه به رابطه ذیل در مقادیر مشاهداتی اعمال می‌شود تا خروجی مدل‌های گردش عمومی برای دقت مورد نظر برآورد گردد. در نهایت با قبول فرضیه یکسان بودن میزان انحراف در دوره پایه و آتی خروجی مدل‌های گردش عمومی تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی برای سال‌های آتی تعیین می‌گردد (Jafarzadeh et al., 2021).

## مدل‌های گردش کلی (GCM) و سناریوها

به‌منظور بررسی شاخص خشکسالی، از داده‌های دما و بارش روزانه مدل‌های گردش عمومی جو ارائه شده در گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) تحت سناریوهای SSP در این پژوهش استفاده شده است.

هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) به‌صورت متناوب هر چند سال یکبار اقدام به انتشار گزارش‌هایی از وضعیت اقلیم، اثرات، سازگاری با اقلیم و کاهش آسیب‌پذیری‌ها در مقیاس جهانی و منطقه‌ای می‌کند. گزارش ششم این هیأت که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است در سال ۲۰۲۱ ارائه شده است. هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش ششم خود از سناریوهای جدید SSP تحت عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. این سناریوها شامل پنج سیر کلیدی با نام‌های SSP1، SSP2، SSP3، SSP4 و SSP5 می‌باشند. در پژوهش حاضر از دو سناریو SSP5-8.5 و SSP2-4.5 استفاده شده است که میزان واداشت تابشی این دو سناریو تا سال ۲۱۰۰ میلادی به ترتیب  $4/5$  و  $8/5$  وات بر متر مربع عنوان شده است.

پیش‌بینی‌های CMIP6 بر اساس سناریوهای اجتماعی - اقتصادی مشترک (Shared Socio-economic Pathway (SSP)) می‌باشد. سناریوهای SSP پیچیده‌ترین سناریوهایی هستند که تا به امروز ایجاد شده‌اند و دامنه‌ای از کاهش بسیار بلند پروازانه تا رشد مداوم انتشار گازهای گلخانه‌ای را در برمی‌گیرد. این سناریوها شامل SSP1-1/9، SSP1-2/6 که نشان دهنده حالت خوشبینانه انتشار است و SSP2-4/5 حالت متوسط انتشار، SSP3-7/0 و

$$\begin{cases} GCM_t = F_t + OBS_t \\ GCM_p = F_p * OBS_p \end{cases} \quad (1)$$



این مقیاس‌های زمانی دلخواه بوده و می‌تواند تأثیر کمبود بارش بر منابع آب قابل استفاده را نشان دهد. این مجموعه داده در حال حرکت است است به این معنا که مقدار داده در هر ماه بر اساس مقدار داده ماه قبل تعیین می‌شود. هر یک از این مجموعه داده‌ها به تابع گاما برازش داده می‌شوند تا رابطه احتمال با بارش را تعریف کنند. هنگامی که رابطه احتمال با بارندگی از روی سوابق تاریخی مشخص شد، احتمال هر نقطه بارش مشاهده شده، محاسبه و به همراه تخمینی از نرمال معکوس برای محاسبه انحراف بارش برای چگالی احتمال توزیع شده نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار واحد استفاده می‌شود. اینگونه مقدار SPI محاسبه شده برای یک بارش به دست می‌آید. با استفاده از SPI به‌عنوان شاخص، یک تعریف کاربردی و کمی از خشکسالی را می‌توان برای هر مقیاس زمانی ایجاد کرد. یک رویداد خشکسالی برای مقیاس زمانی مشخص در اینجا به عنوان دوره‌ای تعریف می‌شود که در آن SPI به‌طور مداوم منفی است و SPI به مقدار ۱- یا کمتر می‌رسد. خشکسالی زمانی آغاز می‌شود که SPI ابتدا به زیر صفر رسیده و با مقدار مثبت به دنبال مقدار ۱- یا کمتر به پایان می‌رسد. شدت خشکسالی با توجه به مقادیر SPI در جدول (۳) نشان داده شده است (Mckee et al, 1993).

در پژوهش حاضر پس از تهیه داده‌های مشاهده‌ای و همچنین GCM و منطقه‌ای کردن داده‌های بزرگ‌مقیاس، اقدام به ریزمقیاس‌نمایی این داده‌ها با استفاده از روش BCSD شده و در نهایت پس از آماده‌سازی داده‌ها اقدام به محاسبه شاخص SPI برای چهار مدل GCM و تحت دو سناریو SSP2-4/5 و SSP5-8/5 در ایستگاه سینوپتیک زابل شده و شرایط خشکسالی و تغییرات آن در دو دوره آتی ۲۰۴۴-۲۰۲۵ و ۲۰۸۴-۲۰۶۵ نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۵ مورد بررسی قرار گرفته است

SSP4-6/0 حالت بدبینانه انتشار و SSP5-8/5 حالت بسیار بدبینانه انتشار می‌باشد. <https://climate.scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overviewnotes2019> در شکل (۲) سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم در قالب نمودار ارائه شده است. در پژوهش حاضر دو سناریو SSP2-4/5 و SSP5-8/5 به علت کاربرد بیشتر و نزدیکی به شرایط انتشار واقعی مورد استفاده قرار گرفته است.

### شاخص SPI

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای هر مکانی بر اساس داده‌های بارش ثبت شده در طولانی مدت قابل محاسبه است. داده‌های بارش ثبت شده در بلندمدت به یک توزیع احتمالاتی برازش داده شده و سپس به یک توزیع نرمال تبدیل می‌شوند، طوریکه میانگین SPI در مکان و دوره زمانی مورد نظر صفر است (Edwards, 1997, Mishra and Singh, 2010). شاخص خشکسالی SPI در هر یک از مقیاس‌های زمانی را می‌توان از مزیت‌های این شاخص عنوان کرد. در طول دوره ثبت، داده‌های بارش و همچنین ماهیت توزیع احتمالاتی، نقش مهمی در محاسبه شاخص خشکسالی SPI دارد که از جمله محدودیت‌های این شاخص به شمار می‌رود (Mishra and Singh., 2010).

برای محاسبه شاخص SPI، ابتدا نیاز به تهیه یک مجموعه داده از بارش ماهانه برای یک دوره m ماهه می‌باشد که حالت ایده‌آل آن یک دوره پیوسته حداقل ۳۰ ساله است. سپس مجموعه‌ای از دوره‌های میانگین برای تهیه مجموعه‌ای از مقیاس‌های زمانی سه، شش، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه انتخاب می‌شوند.

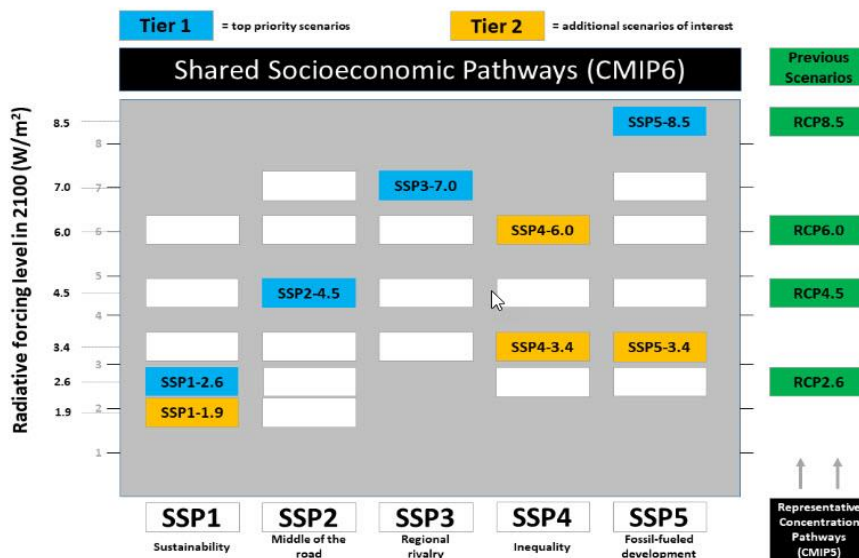


Fig 2- CMIP6 reporting scenarios (climate-scenarios.canada.ca, 2019).

شکل ۲- سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم

جدول ۳- طبقه بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص SPI

Table 3- Drought severity classification based on SPI index

Drought Category	Value
Extremely Wet	$\geq 2$
Very Wet	1.5-1.99
Moderately Wet	1-1.49
Near Normal	-0.99-0.99
Moderately Dry	-1 - 1.49
Severely Dry	-1.5 -1.99
Extremely Dry	$\leq -2$

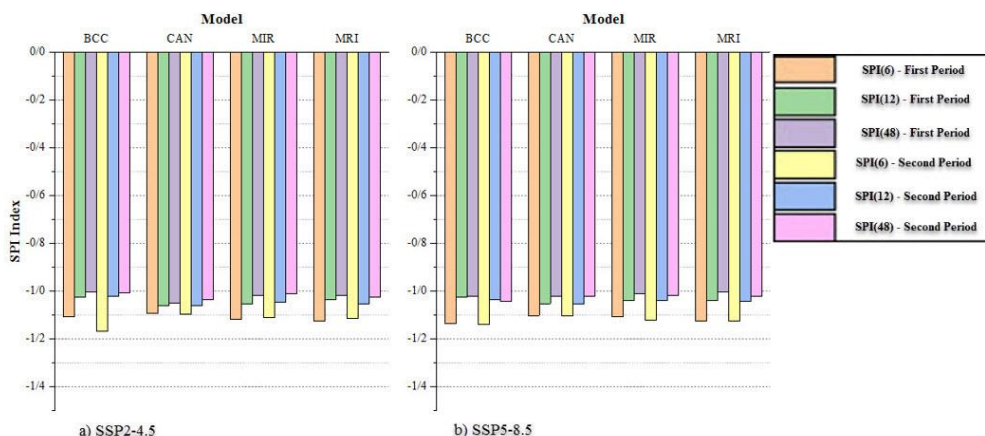


Fig. 3- 20-year average of SPI index for the next two periods 2025 to 2044 and 2065 to 2084 in Zabul synoptic station

شکل ۳- میانگین ۲۰ ساله شاخص SPI برای دو دوره آبی ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۴ و ۲۰۶۵ تا ۲۰۸۴ در ایستگاه سینوپتیک زابل

در دو شهرستان زابل و شیراز انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که شاخص SPI در دوره‌های بلند مدت ۱۲ و ۴۸ ماهه نسبت به دوره کوتاه سه ماهه شدت خشکسالی را بیشتر نشان می‌دهد. همچنین در سناریو RCP8/5 نیز نشان دهنده شدت خشکسالی بیشتر نسبت به سناریوهای دیگر می‌باشد ( Hosseinabadi et al., 2020).

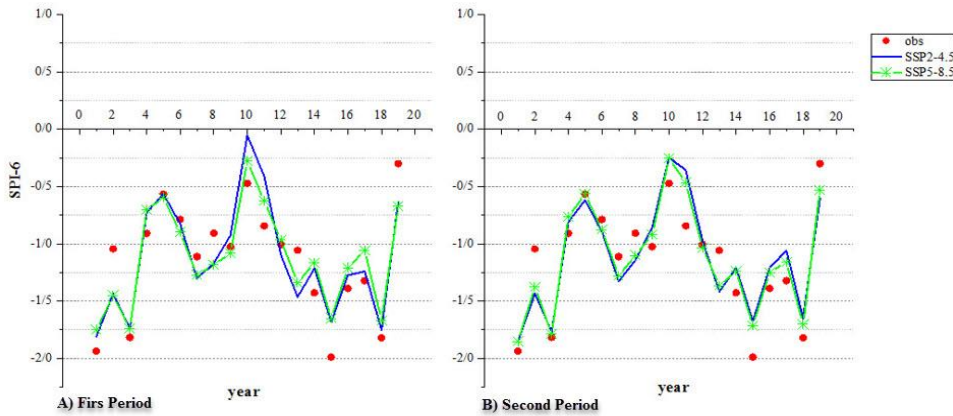
به منظور مقایسه سناریوهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر، مقدار میانگین شاخص SPI برای چهار مدل محاسبه گردید و مقادیر آن در مقیاس زمانی مختلف و طی ۲۰ سال برای دو دوره آبی طبق شکل (۴) تا (۶) رسم گردید که نتایج نشان می‌دهد شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماهه شدت خشکسالی را در دوره‌های مورد مطالعه بیشتر از مقیاس زمانی شش ماهه نشان می‌دهد، همچنین در مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه تقریباً هر دو سناریو بر هم منطبق هستند، اما در برخی موارد سناریو SSP5-8.5 شدت خشکسالی را بیشتر نشان داده است که بیانگر خشکسالی متوسط در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. باتوجه به اینکه سناریو SSP5-8.5 دما را نسبت به بقیه سناریوها بیشتر نشان می‌دهد بنابراین انتظار می‌رود شاخص خشکسالی را نیز بیشتر نشان دهد. بنابراین بهتر است در منطقه مورد مطالعه برای محاسبه شاخص SPI و پیش‌بینی خشکسالی در حالت بدبینانه از این سناریو استفاده شود. (MesbahZadeh et al (2019) ، که

### نتایج و بحث

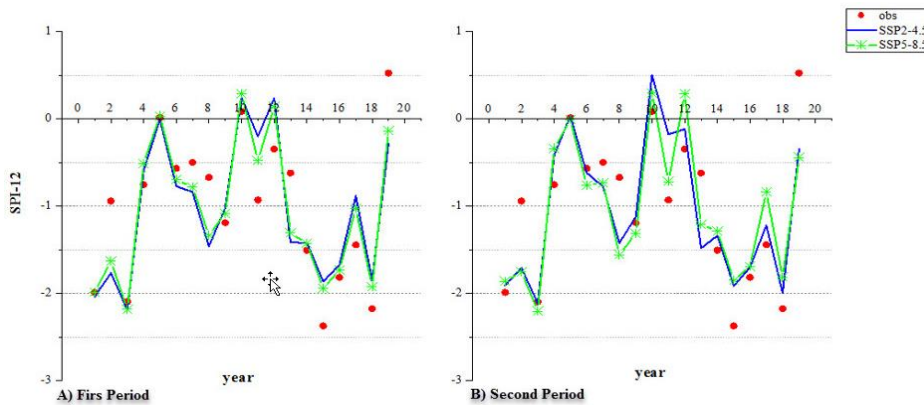
تداوم خشکسالی با توجه به زمان شروع و پایان آن تعیین می‌شود و شدت آن برای هر یک از ماه‌های آن تعیین می‌گردد. با توجه به شکل (۳) می‌توان گفت در هر دو دوره مورد مطالعه در هر دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و در تمامی مدل‌های مورد بررسی، شاخص SPI در مقیاس شش ماهه نشان دهنده بیشترین مقدار منفی است، همچنین تغییرات شاخص خشکسالی در دوره ۱۲ و ۴۸ ماهه بسیار به هم نزدیک است. در مقایسه مدل‌ها و سناریوهای مورد بررسی در ایستگاه سینوپتیک زابل، با توجه به شکل (۳)، مدل BCC-ESM2-MR، شاخص ۶ ماهه SPI و مدل CanESM5، شاخص ۱۲ و ۴۸ ماهه را نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر نشان داده‌اند. همچنین با توجه به این شکل، شاخص خشکسالی به دست آمده در دوره‌های مورد مطالعه و در تمامی مدل‌ها نشان‌دهنده خشکسالی متوسط در ایستگاه سینوپتیک زابل می‌باشد. باتوجه به اینکه تفاوت چندانی بین میانگین ۲۰ ساله شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماهه ملاحظه نگردید، بنابراین برای پیش‌بینی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه می‌توان از شاخص SPI با مقیاس زمانی ۱۲ ماهه استفاده نمود. (Hosseinabadi et al (2020) ، نیز در پژوهش خود که به منظور ارزیابی خشکسالی هواشناسی به کمک داده‌های CMIP5

شاخص SPEI تحت سناریوهای RCP4/5 و RCP2/6 مشخصه‌های خشکسالی در آینده نسبت به دوره تاریخی کاهش می‌یابد و بر اساس سناریو RCP8/5 شدت و مدت خشکسالی روند افزایشی خواهد داشت (Mesbah Zadeh et al, 2019).

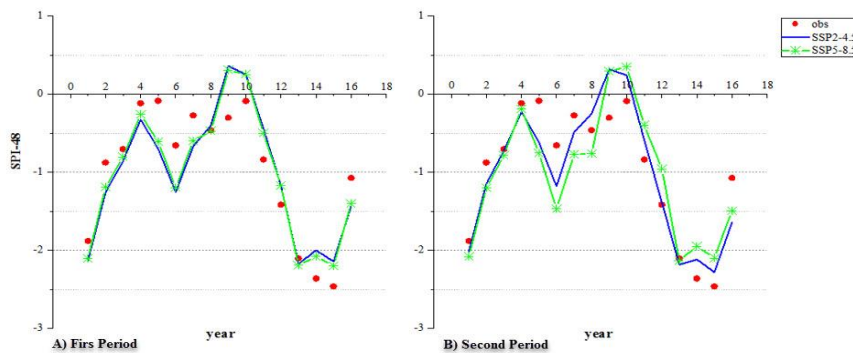
در پژوهش خود به بررسی وضعیت خشکسالی هواشناسی با استفاده از مدل CMIP5 پرداخته‌اند، به این نتیجه رسیدند که طبق شاخص SPI در منطقه مطالعاتی یزد در آینده تحت سناریوهای RCP8/5 و RCP4/5، RCP2/6 خشکسالی‌های شدیدتری را نسبت به دوره تاریخی مشاهده می‌کند، در حالی که بر اساس



**Fig4- Time series of six-month SPI index in the base and future periods (2025-2044,2065-2084)**  
 شکل ۴- سری زمانی شاخص SPI شش ماهه در دوره پایه و آتی (۲۰۲۵-۲۰۴۴ و ۲۰۶۵-۲۰۸۴)



**Fig5-Twelve-month SPI index time series in the base and future periods**  
 شکل ۵- سری زمانی شاخص SPI دوازده ماهه در دوره پایه و آتی



**Fig6- Time series of forty-eight months SPI index in the base and future period**  
 شکل ۶- سری زمانی شاخص SPI چهل و هشت ماهه در

## دوره پایه و آتی

چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی را بر اساس CMIP5 در شهر ایلام مورد بررسی قرار داده‌اند و طبق نتایج به‌دست آمده از این پژوهش دو شاخص SPI و RDI نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی آینده برای دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۱۰۰ افزایش دما و کاهش بارندگی محتمل است، به طوری که دما ۳/۷۹۸ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش ۶/۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین منطقه مطالعاتی در آینده خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تری را نسبت به دوره تاریخی تحت هر سه سناریو RCP2/6، RCP4/5 و RCP8/5 تجربه می‌کند و با افزایش مقیاس زمانی SPI شدت و مدت خشکسالی افزایش می‌یابد (Ramezani Etedali et al, 2022).

همچنین با توجه به جداول (۴) و (۵)، در هر دو دوره آتی مورد بررسی در این پژوهش به‌طور متوسط در هر سه مقیاس زمانی شش، ۱۲ و ۴۸ ماهه تعداد دو دوره افزایش دوره خشکسالی وجود دارد. در دوره آتی ۲۰۲۵-۲۰۴۴ بیشترین میزان افزایش تعداد دوره خشکسالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه مدل CAN با تعداد پنج دوره و پس از آن در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه مدل MIR با تعداد چهار دوره افزایش در دوره خشکسالی می‌باشد. در دوره آتی ۲۰۸۴-۲۰۶۵ بیشترین افزایش تعداد دوره خشکسالی به میزان چهار دوره در مدل BCC در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ می‌باشد. همچنین بیشترین افزایش دوره خشکسالی در هر دو دوره آتی مربوط به سناریو SSP4/5 است. به‌طور کلی در تمامی مدل‌ها و مقیاس‌های زمانی مورد بررسی، تعداد دوره‌های خشکسالی نسبت به دوره پایه افزایش داشته یافته است.

در پژوهش حاضر تعداد دوره‌های خشک در دوره پایه و آتی برای چهار مدل و دو سناریو در مقیاس‌های زمانی ۶، ۱۲ و ۴۸ ماهه در جدول (۴) و (۵) نشان داده شده است. در این جداول مشاهده می‌شود که هیچکدام از مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه نشان‌دهنده ترسالی نمی‌باشند. در مقیاس شش ماهه سناریو SSP2-4.5، در دوره اول تعداد دوره‌های دارای خشکسالی تنها در مدل MRI-ESM2-0 افزایش یافته است، با این وجود دو مدل CanESM5 و MIROC6 نشان‌دهنده افزایش تعداد دوره‌های دارای خشکسالی شدید می‌باشند. در دوره دوم این سناریو و دوره اول سناریو SSP5-8.5 نیز وضعیت به‌همین صورت می‌باشد، اما در سناریو SSP5-8.5 از تعداد دوره‌های دارای وضعیت نرمال کاسته شده و تعداد دوره‌های دارای وضعیت خشکسالی شدید افزایش یافته است. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه شاخص خشکسالی SPI نیز دوره‌های دارای وضعیت نرمال و همچنین وضعیت بسیار شدید به جز در مدل CanESM5 دوره اول سناریوی SSP5-8.5، نسبت به دوره پایه کاهش پیدا کرده است و دوره‌های دارای وضعیت خشکسالی متوسط و شدید افزایش یافته‌اند. در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه، با توجه به جداول (۴) و (۵) به‌طور کلی دوره‌های دارای وضعیت نرمال کاهش یافته و به تعداد دوره‌های دارای وضعیت خشکسالی نسبت به دوره پایه افزوده شده است. همچنین نتایج دو جدول نشان می‌دهد در بدبینانه‌ترین حالت، تعداد دوره‌های خشک در ایستگاه سینوپتیک زابل ۱۴ دوره، که مربوط به مدل MIROC6 و سناریو SSP5-8.5 در دوره دوم می‌باشد، خواهد بود. Ramezani Etedali et al (2022)، نیز

جدول ۴- تعداد دوره‌های خشک در دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۴ برای مدل‌ها و سناریوهای در مقیاس زمانی مختلف

Table 4- Number of dry years in the period 2025 to 2044 for models and scenarios in different time scales

Model	Time Scale	Near Normal		Moderately Dry		Severely Dry		Extremely Dry		Total Dry Periods	
		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
BCC	6	8	9	7	6	4	4	-	-	11	10
	12	10	8	3	5	3	5	3	1	9	11
	48	8	9	4	2	-	3	4	2	8	7
CAN	6	8	7	5	7	6	4	-	1	11	12
	12	9	9	2	1	7	5	1	4	10	10
	48	5	9	5	1	2	3	4	3	11	7
MIR	6	7	6	7	8	5	5	-	-	12	13
	12	7	8	5	5	5	4	2	2	12	11
	48	8	9	1	2	4	1	3	4	8	7
MRI	6	6	6	9	9	4	4	-	-	13	13
	12	8	8	5	4	4	4	2	3	11	11
	48	8	9	3	2	2	1	3	4	8	7
obs	6		7		5		3		3		11
	12		11		2		3		3		8
	48		10		2		1		3		6

جدول ۵- تعداد دوره‌های خشک در دوره ۲۰۶۵ تا ۲۰۸۴ برای مدل‌ها و سناریوهای در مقیاس زمانی مختلف

Model	Time Scale	Near Normal		Moderately Dry		Severely Dry		Extremely Dry		Total Dry Periods	
		SSP2	SSP5	SSP2	SSP5	SSP2	SSP5	SSP2	SSP5	SSP2	SSP5
		-4.5	-8.5	-4.5	-8.5	-4.5	-8.5	-4.5	-8.5	-4.5	-8.5
BCC	6	7	6	8	10	5	3	-	-	12	13
	12	8	7	5	6	5	5	1	1	11	12
	48	8	6	4	5	-	3	4	2	8	10
CAN	6	7	7	6	7	6	5	-	-	12	12
	12	8	9	2	2	8	6	1	2	11	10
	48	7	8	3	2	3	3	3	3	9	8
MIR	6	7	5	6	9	6	5	-	-	12	14
	12	8	10	5	2	4	5	2	2	11	9
	48	9	7	1	4	3	2	3	3	7	9
MRI	6	6	7	9	8	4	4	-	-	13	12
	12	8	8	5	4	3	5	3	2	11	11
	48	8	9	2	2	3	1	3	4	8	7
obs	6	7		5		3		3		11	
	12	11		2		3		3		8	
	48	10		2		1		3		6	

مورد مطالعه تقریباً هر دو سناریو بر هم منطبق هستند اما در برخی موارد سناریو SSP5-8.5 شدت خشکسالی را بیشتر نشان داده است. طبق نتایج حاصل از این پژوهش، به‌طور کلی دوره‌های دارای وضعیت نرمال کاهش یافته و به تعداد دوره‌های دارای وضعیت خشکسالی نسبت به دوره پایه افزوده شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد در بدبینانه‌ترین حالت، تعداد دوره‌های خشک در شهرستان زابل ۱۴ سال خواهد بود و میتوان برای پیش‌بینی شاخص خشکسالی از مدل CanESM5 استفاده نمود. همچنین با توجه به نتایج، در هر دو دوره آتی مورد بررسی در این پژوهش به طور متوسط در هر سه مقیاس زمانی شش، ۱۲ و ۴۸ ماهه تعداد دو دوره افزایش دوره خشکسالی وجود دارد. در دوره آتی ۲۰۴۴-۲۰۲۵ بیشترین میزان افزایش تعداد دوره خشکسالی در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه مدل CAN با تعداد پنج دوره و پس از آن در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه مدل MIR با تعداد چهار دوره افزایش در دوره خشکسالی می‌باشد. در دوره آتی ۲۰۸۴-۲۰۶۵ بیشترین افزایش تعداد دوره خشکسالی به میزان ۴ دوره در مدل BCC در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ می‌باشد. همچنین بیشترین افزایش دوره خشکسالی در هر دو دوره آتی مربوط به سناریو SSP4/5 است. به‌طور کلی در تمامی مدل‌ها و مقیاس‌های زمانی مورد بررسی، تعداد دوره‌های خشکسالی نسبت به دوره پایه افزایش داشته یافته است.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر باتوجه به اهمیت موضوع مدیریت صحیح منابع آب و شرایط اقلیمی و خشکسالی‌های اخیر در شهرستان زابل، به بررسی وضعیت خشکسالی در آینده این منطقه پرداخته شده است. بنابراین به منظور ریزمقیاس‌نمایی در پژوهش حاضر از چهار مدل GCM مربوط به داده‌های گزارش ششم IPCC شامل (BCC-ESM2-MR)، (CanESM5)، (MIROC6) و (MRI-ESM2-0)، تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۴ و ۲۰۲۵-۲۰۸۴ بهره گرفته شده است. همچنین برای پیش‌بینی داده‌های هواشناسی در دوره‌های مورد نظر از روش ریزمقیاس‌نمایی BCSO استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر در هر دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و در تمامی مدل‌های مورد بررسی، میانگین ۲۰ ساله شاخص SPI، شش ماهه نشان دهنده بیشترین مقدار منفی است، همچنین تغییرات میانگین ۲۰ ساله‌ی شاخص خشکسالی در دوره ۱۲ و ۴۸ ماهه بسیار به هم نزدیک است. علاوه بر این مقایسه مدل‌ها و سناریوها در این پژوهش نشان می‌دهد که در مدل BCC-ESM2-MR، میانگین ۲۰ ساله‌ی شاخص شش ماهه SPI و در مدل CanESM5، شاخص ۱۲ و ۴۸ ماهه نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر است. همچنین شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماهه شدت خشکسالی را در دوره‌های مورد مطالعه بیشتر از مقیاس زمانی شش ماهه نشان می‌دهد و در مقیاس‌های زمانی

### References

- 1- Aadhar, S, and Mishra V. 2020. On the projected decline in droughts over South Asia in CMIP6 multimodel ensemble. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 125(20), pp.1-29. Doi: 10.1029/2020JD033587.

- 2- Abbasinia, A., Morshedi, J., Zohorayan, M. and Ghorbaniyan, J., 2021. Analysis and Comparison of SPI and GRI Indices in Assessing Meteorological Drought and Groundwater, Case Study: Mehran Plain, Ilam Province. *Physical Geography Quarterly*, 14(Physical Geography Quarterly), pp.95-114. doi: 20.1001.1.20085656.1400.14.51.6.3. (In Persian)
- 3- Ataei, H., Kouhi, M., Modirian, R. and Bazrafshan, B., 2021. Projected Changes in Temperature and Precipitation over Kashafrood Basin Based on Statistical and Dynamical Downscaling Methods. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(30), pp.183-202. Doi: 10.22111/JNEH.2021.37827.1777. (In Persian)
- 4- Ayugi, B., Shilenje, Z. W., Babausmail, H., Sian, K. T. L. K., Mumo, R., Dike, V. N, and Ongoma, V. 2021. Projected Changes in Meteorological Drought Over East Africa Inferred from Bias-Adjusted CMIP6 Models, *Natural Hazards*, 113(1), pp.1151-1176.
- 5- Chiang, F., Mazdiyasi, O., and AghaKouchak, A. 2021. Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity. *Nature Communications*, 12(1), pp. 1-10.
- 6- Edwards, D.C. and McKee, T.B., 1997. *Characteristics of 20 th century drought in the United States at multiple time scales* (Vol. 97, p. 155). Fort Collins: Colorado State University.
- 7- Ramezani Etedali, H., Hodabakhshi, F. and Kanani, E., 2022. Outlook for the effects of climate change on drought according to the fifth IPCC report (case study: Ilam). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 12(1), pp.87-107. Doi: 10.30495/WSRCJ.2022.20455. (In Persian)
- 8- Fung, K. F., Huang, Y. F., and Koo, C. H. 2020. Assessing drought conditions through temporal pattern, spatial characteristic and operational accuracy indicated by SPI and SPEI: case analysis for Peninsular Malaysia. *Natural Hazards*, 10(32), pp.2071-2101.
- 9- Goodarzi, M, and Choobeh, S. 2019. Assessment of Downscaling Methods in Predicting Climatic Parameters under Climate Change Status: A case study in Ardabil Synoptic Station. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 13(45), pp. 63-70. Dor: 20.1001.1.20089554.1398.13.45.2.6 (In Persian).
- 10- Hernández Vásquez, C.C., Ibáñez Castillo, L.A., Gómez Díaz, J.D. and Arteaga Ramírez, R., 2022. Analysis of meteorological droughts in the Sonora river basin, Mexico. *Atmósfera*, 35(3), pp.467-482. Doi: 10.20937/atm.52954
- 11- Hewitson, B. C., and Crane, R. G. 1996. Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research*, 7(2), pp.85-95. doi: 10.3354/cr007085.
- 12- Hosseinabadi, S., Yaghoobzadeh, M., Amirabadizadeh, M, and Forouzanmehr, M. 2020. Assessment of meteorological drought in future periods using the data of the Fifth Climate Change Report (Case study: Zabol and Shiraz counties). *Geographical Studies of Arid Areas*. 10 (40), pp. 87-75. (In Persian)
- 13- Issaharou-Matchi, I., Rabiou, H., M Moussa, B., Soumana, I., Saley, K., Mahamane, A., and Saadou, M. 2021. Assessment of Drought Characteristics under Changing Climatic Conditions using SPI and SPEI Indices in Semi-Arid Environment of Southeastern Niger. *International Journal of Environment and Climate Change*. 11(10), pp. 146-157.
- 14- IPCC. 2007. The Physical Science Basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge UK
- 15- IPCC. 2014. The Physical Science Basis. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press Cambridge.

- 16-Javan, Kh. 2021. Investigation of hydrological drought trend in the catchment area of Lake Urmia. *Hydrogeomorphology*, 7(25), pp. 138-119. (In Persian)
- 17-Jafarzadeh, A., Pourreza-Bilondi, M., Akbarpour, A., Khashei-Siuki, A., and Samadi, S. 2021. Application of multi-model ensemble averaging techniques for groundwater simulation: synthetic and real-world case studies. *Journal of Hydroinformatics*, 23(6), pp. 1271-1289.
- 18-Keyantash, J., and Dracup, J. A. 2002. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), pp. 1167-1180. doi: 10.1175/1520-0477-83.8.1167.
- 19-Liu, C., Yang, C., Yang, Q., and 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), pp. 1-14. doi: 10.1038/s41598-020-80527-3.
- 20-McKee, T. B., Doesken, N. J, and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), pp. 179-183.
- 21-Meresa, H., Murphy, C. and Fealy, R., 2021, April. Climate change impact on the hydrometeorological drought propagation. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU21-8285).
- 22-MesbahZadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni Saravi, M., Khosravvi, H, and Mortezaie Farizhedi, Gh.2019. Study of Current and Future Meteorological Drought Conditions Using the CMIP5 Model under RCP Scenarios. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 13(46), pp.11-22. Dor: 20.1001.1.20089554.1398.13.46.4.0 (In Persian)
- 23-Mishra, A. K., and Singh, V. P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-20), pp. 202-216.
- 24- Nikbakht, J. and Hadeli, F., 2021. Comparison of SPI, RDI and SPEI indices for drought smonitoring under climate change conditions (Case study: Kermanshah station). *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(1), pp.14-25. Doi: 10.22125/AGMJ.2021.249498.1103.
- 25-Noguera, I., Domínguez-Castro, F. and Vicente-Serrano, S.M., 2021. Flash drought response to precipitation and atmospheric evaporative demand in Spain. *Atmosphere*, 12(2), p.165.
- 26-Olagbaiye, A. E., Olasore, A., Ajayi, T. A., and Alabi, P. O. 2021. Drought Monitoring in Northern Nigeria Using Four (4) Indices. *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 8(1), pp. 13-31. Doi: 10.31033/ijrasb.8.1.3.
- 27- Rahimi Bondarabadi, S., 2019. Evaluation of a dynamical downscaling climate model for assessment of climate change in Karkheh Basin. *Watershed Engineering and Management*, 11(3), pp.633-649. Doi: 10.22092/ijwmse.2019.118786. (In Persian).
- 28- Rostamian, R., Eslamian, S. and Farzaneh, M. R., 2013, Application of standardised precipitation index for predicting meteorological drought intensity in Beheshtabad watershed, central Iran. *Int. Journal of Hydrology Science and Technology*, 3(1), pp. 63-77. Doi: 10.1504/IJHST.2013.055233.
- 29-Saharwardi, M.S., Mahadeo, A.S. and Kumar, P., 2021. Understanding drought dynamics and variability over Bundelkhand region. *Journal of Earth System Science*, 130(3), p.122.
- 30- Shakarami, N, and Massahbavani, A. 2007. Uncertainty analysis of coupled ocean-atmosphere general circulation patterns on climate change scenarios of temperature and rainfall in Zainderood basin, *technical workshop on the effects of climate change on water resources management*. (In Persian).
- 31-Song, Y. H., Shahid, S., and Chung, E. S. 2021a. Differences in multi-model ensembles of CMIP5 and CMIP6 projections for future droughts in South Korea. *International Journal of Climatology*.



- 32-Song, Z., Xia, J., She, D., Li, L., Hu, C., and Hong, S. 2021b. Assessment of meteorological drought change in the 21st century based on CMIP6 multi-model ensemble projections over mainland China. *Journal of Hydrology*, 601, pp. 126643. doi: j.jhydrol.2021.126643.
- 33-Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., et al. 2002. The drought monitor. *Bull Am Meteorol Soc.* 83, pp.1181–1190. [CrossRef]
- 34-Tabatabaei, S. M., Nazeri Tahroudi, M, and Dastourani, M. 2018. Performance comparison of GP, ANN, BCSD and SVM models for temperature simulation. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 1(1), pp. 51-64. (In Persian)
- 35-Tsakiris, G., and Vangelis, H. J. E. W. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), pp.3-11.
- 36-<https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>. 2019.
- 37-Van Pelt, S. C, and Swart, R. J. 2011. Climate change risk management in transnational river a. basins: the Rhine. *Water resources management*, 25(14), pp. 3837-3861.
- 38-Wang, T., Tu, X., Singh, V. P., Chen, X., and Lin, K. 2021. Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6. *Journal of Hydrology*, 596, pp. 126091. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126091.
- 39-Wilhite, D. 2000. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In *Drought: A Global Assessment*; Routledge: London, UK.
- 40-Wilhite, D. A., and Buchanan-Smith, M. 2005. Drought as hazard: understanding the natural and social context. *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*, 3, pp. 29.
- 41-Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., and Hayes, M. J. 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management*, 21(5), pp. 763-774.
- 42-Wood, A.W., Maurer, E.P., Kumar, A. and Lettenmaier, D.P., 2002. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20), pp.ACL-6.doi:10.1029/2001JD000659.
- 43-WWW.UNCCD.INT
- 44-Yaghoubzadeh, M., Ahmadi, M., Seyed Kaboli, H., Zamani,Gh, and Amirabadizadeh, M. 2017. Evaluation of the effect of climate change on agricultural drought using ETDI and SPI indicators. *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 24(4), pp. 43-61. Doi: 10.22069/JWFST.2017.12202.2671. (In Persian)
- 45-Zareabyaneh, H., Ghabaeisoogh, M, and Mosaedi, A. 2016. Drought monitoring based on standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI) under the influence of climate change. *Journal of Water and Soil*, 29(2), pp. 392-374. Doi: 10.22067/JSW.V0I0.36472. (In Persian)
- 46-Zhang, G., Gan, T. Y., and Su, X. 2021. Twenty-First Century Drought Analysis across China using CMIP6 Under Climate Change. *Climate Dynamics*,59(1), p. 1665-1685. Doi: 10.21203/rs.3.rs-206879/v1.