

Research Paper



Projection and Evaluation of the Trend of Temperature, Precipitation and Drought in Urmia Lake Catchment



Firooz Abdolalizadeh^{*1}, Ali Mohammad Khorshiddoust², Saeed Jahanbakhsh Asl³



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:10.22034/HYD.2023.56103.1687

Reference to this article: Abdolalizadeh, Firooz; Khorshiddoust, Ali Mohammad; Jahanbakhsh Asl, Saeed. (2023). Projection and Evaluation of the Trend of Temperature, Precipitation and Drought in Urmia Lake Catchment. *Hydrogeomorphology*, 10(36): 38 –57 .

Keywords

Climate Change, CMIP6 models, Quantile Mapping, SPEI, Urmia Lake catchment

Receive Date: 2023/04/09

Accept Date: 2023/07/17

Available: 2023/10/30

ABSTRACT

Future climate change and its effects are one of the most imperative concerns of mankind, especially in recent years. In order to deal with and adapt to climate change, it is necessary to know the future climate situation. Therefore, in the current research, to investigate the future climate of the Urmia Lake catchment, the maximum and minimum temperature, rainfall and drought in the basin were projected for the period of 2015-2099 using NorESM2-MM climate model under the emission scenarios of SSP1-2.6 and SSP5-8.5. The downscaling output of the model was done using the quantile mapping method and their accuracy was evaluated in the simulation of the base period (1990-2014) using the monthly diagram and RMSE and NRMSE indicators. After evaluating the accuracy of the model, the studied parameters were produced at the station level for the future period. The evaluation of the results showed that: the minimum and maximum average temperature of the basin under the pessimistic scenario (SSP5-8.5) until the end of the century and under the optimistic scenario (SSP1-2.6) until 2075 have an ascending trend and then a descending trend. Average maximum and minimum temperature of the basin in the near future (1.0 to 1.8) and (1.1 to 1.8) °C and in the far future (1.5 to 4.8) and (1.3 to 4.3) °C will increase. The annual rainfall in the future period does not have a significant trend, but the average rainfall of the basin in the optimistic scenario will increase by 16.5% in the near future and 8.9% in the far future and in the pessimistic scenario will increase by 1.8% in the near future and 7.2% in the far future. According to the SPEI index, in the future period, under the optimistic scenario, moderate drought will have an ascending trend, severe drought will have a descending trend, and under the pessimistic scenario, the drought will have a descending trend.

*** Corresponding Author: Firooz Abdolalizadeh**

E-mail: f.abdolalizadeh@tabrizu.ac.ir

1. PhD Student of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran; Meteorological Organization, East Azerbaijan Bureau of Meteorology

2. Professor, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3. Professor, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Extended Abstract

1- Introduction

Population growth and the increase in global consumption have amplified the global demand for fossil fuels. Studies have shown that carbon dioxide is one of the main factors of climate change (IPCC, 2013). Based on the carbon dioxide emission scenarios published by the IPCC, the concentration of carbon dioxide can increase from the current level of 300 ppm to 800 ppm by the end of the 21st century (Van Vuuren et al., 2011). An increase in the concentration of carbon dioxide causes a change in the global temperature, the pattern of precipitation and solar radiation, and as a result, it causes a change in the productivity of agricultural products (Lobel et al., 2011). Also, climate change affects the hydrological cycle and changes the spatial and temporal distribution of water resources, which is closely related to the availability of irrigation water and crop growth (Piao et al., 2010).

Since the end of the 19th century, almost all parts of the world have been subjected to a global warming process that shows periodic and multi-decadal changes (Hansen et al., 2010). There is a global consensus that climate change will cause changes in the intensity, amount and duration of extreme events leading to unprecedented weather events (Field et al., 2012). Also, changes in the water cycle are observed due to climate changes. Evidence shows that climate change is related to the redistribution of water resources and the increase in the frequency and intensity of floods and droughts (Li et al., 2013). Therefore, it is very important to pay attention to climate changes at the basin scale, especially in arid and semi-arid areas that have limited water resources. Continued emission of greenhouse gases causes more warming and long-term changes in all components of the climate system and increases the possibility of severe, widespread and irreversible impacts on people and ecosystems. The future climate depends on the warming caused by past and future pollution and natural climate changes. One of the climatic extreme events is drought. In recent years, several studies have found that droughts are increasing in different regions of the world, so it can be expected that drought events will increase in terms of frequency and intensity in the coming periods with the increase in temperature and change in the rainfall regime. (Zhai et al., 2020).

The IPCC recently published the sixth phase of the CMIP models, which are the latest general circulation models. The mentioned models have been developed based on SSP release scenarios. SSP scenarios are designed based on socio-economic factors such as population growth, economy, urbanization and other factors (Eyring et al., 2016). The outputs of atmospheric general circulation models in terms of temporal and spatial resolution are about tens of kilometers on a daily and monthly scale, which are large scale compared to climatic and hydrological processes. In addition, GCM simulations in both spatial and temporal scales have uncertainty in the parameterization of processes, so the output of these models cannot be directly used in climate change studies. Therefore, exponential micro-scale and skew correction of GCM simulations is necessary to obtain information at the appropriate scale (Wood et al., 2004).

The future climate change can have different effects in different regions and therefore the study of climate change should be done regionally and using the latest climate models. The studies carried out in Urmia Lake basin were mainly done with previous models, so in this research, the latest climate models provided by IPCC were used to predict the future climate.

2- Methodology

2-1- Study area

The catchment area of Lake Urmia with an area of about 52,000 km² is located in the northwest of Iran and includes parts of East Azerbaijan, West Azerbaijan and Kurdistan provinces. This basin is surrounded by the northern slopes of Zagros, the southern slopes of Sabalan Mountain and Sahand Mountain. Populous and important cities such as Tabriz and Urmia are located in this basin. Lake Urmia located in this basin is considered as the largest internal lake of Iran and one of the most valuable water ecosystems of Iran.

2-2- Data

In this research, two types of data were used. The first category is the observational data of synoptic stations (Tabriz, Sarab, Maragheh, Urmia, Takab, Mahabad and Saqqez). These data include the daily values of minimum temperature, maximum temperature and precipitation for the period of 1990-2014, which were received from the National Meteorological Organization. The second category of GCM model data is from the CMIP6 model series. These data include daily values of minimum temperature, maximum temperature and precipitation for SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios during the base period (1990-2014) and future (2015-2099) which are from the World Climate Research Program database (<https://esgf-node.llnl.gov>) have been extracted.

3- Method

In the current research, the temperature, precipitation and drought of the catchment area of Lake Urmia have been projected for the future period (2015-2099) and the trends of the mentioned parameters as well as their changes compared to the base period (1990-2014) have been investigated. The projecting of the studied parameters has been done using the new series of general circulation models called CMIP6 models under the SSP126 and SSP585 release scenarios as optimistic and pessimistic scenarios. Downscaling of the output of the GCM model was done by using the quantile mapping method and evaluating the accuracy of the models using monthly average diagrams and RMSE and NRMSE indices.

After evaluating the accuracy of the GCM model, the parameters of minimum temperature, maximum temperature and precipitation for the future period were produced using the output of the GCM model and the Downscaling method of quantile mapping. Then, using the mentioned parameters, potential evaporation and transpiration (PET) and drought (SPEI) indices were calculated for the future period. In the following, the changes and trends of temperature parameters, precipitation and drought in the future period were investigated using the innovative trend analysis (ITA) method.

4- Results and Discussion

- The trend of the maximum temperature of the basin during the period of 2015-2099 will be ascending under the SSP5-8.5 scenario and will be ascending under the SSP1-2.6 scenario until 2075 and then descending. The average annual maximum temperature of the basin will increase in the near (2031-2055) and long (2071-2095) under both scenarios, in the near future between 1.0 (optimistic scenario) and 1.8 T°C (pessimistic scenario) and in the future, it will increase between 1.5 (optimistic scenario) and 4.8 T°C (pessimistic scenario) compared to the base period.
- The trend of the minimum temperature of the basin is the same as the maximum temperature. The average annual minimum temperature of the basin in the near future is between 1.1 (optimistic scenario) and 1.8 T°C (pessimistic scenario) and in the far future between 1.3 (optimistic scenario) and 4.3 T°C (pessimistic scenario) increases compared to the base period.
- The annual rainfall in the future period does not have a significant trend, but the average rainfall of the basin in the optimistic scenario will increase by 16.5% in the near future and 8.9% in the far future and in the pessimistic scenario will increase by 1.8% in the near future and 7.2% in the far future.
- The trend of evaporation and transpiration of the basin potential under SSP5-8.5 is upward until the end of the century and under SSP1-2.6 is ascending until 2075 and then descending. The average annual evaporation and transpiration of the basin under SSP1-2.6 will increase by 10% in the near future and 12.7% in the distant future, and under SSP5-8.5 it will increase by 14% in the near future and 42.9% in the distant future.
- According to the SPEI index, during the period of 2015-2099, under the SSP1-2.6 scenario, until the middle of the century, mainly dry periods will occur, then until the year 2090, drought periods will occur, and then until the end of the century, dry periods will occur. Under the SSP5-8.5 scenario, drought periods will occur until the middle of the century and then drought periods until the end of the century. In general, according to the ITA index, the drought trend of the basin under the pessimistic scenario will be ascending until the end of the century, and under the optimistic scenario, the severe drought trend will be descending and the moderate drought trend will be ascending.

5- Conclusions

The results of the current research regarding the increase in temperature in the future are in line with previous studies, including the studies conducted in the study area (Gouderzi et al. (2014), Salahi et al. (2016) and Gouderzi et al. In contrast to the study of Gouderzi et al. (2014) and Salahi et al. (2015) and in line with the study of Ghalehovi et al. (2016), there will not be a significant decrease in the future. Evaporation and transpiration will increase as in the study of Gouderzi et al. (2017), and drought will increase unlike the study of Ghalehovi et al. (2018). Therefore, based on the results of the present research, the most important climatic changes in the catchment area of Lake Urmia in the future period are related to the increase in temperature and its effects (including increased evapotranspiration and drought).

References

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016
- Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M., IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 582.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48(4). <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Li, F.P., Zhang, G.X., Dong, L.Q. (2013). Studies for impacts of climate change on hydrology and water resources. *Sci. Geogr. Sin.* 33 (4), 457–464.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., ... & Fang, J. (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311), 43-51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>
- Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V., & Lettenmaier, D. P. (2004). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic change*, 62(1-3), 189-216. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e>
- Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... & Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *Atmospheric Research*, 246, 105111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105111>

مقاله پژوهشی



پیش‌نگری و ارزیابی روند دما، بارش و خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

فیروز عبدالعلی‌زاده^{۱*}، علی محمد خورشیددوست^۲، سعید جهانبخش اصل^۳

این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کرییتیو کامنز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: عبدالعلی فیروز؛ خورشیددوست، علی محمد؛ جهانبخش اصل؛ سعید (۱۴۰۲). پیش‌نگری و ارزیابی روند دما، بارش و خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. هیدروژنومورفولوژی، ۱۰ (۳۶): ۵۸ - ۳۹.

DOI:10.22034/HYD.2023.56103.1687



چکیده

کلیدواژه‌ها

تغییر اقلیم آینده و اثرات ناشی از آن یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر بخصوص در سال‌های اخیر می‌باشد. برای مقابله و سازگاری با تغییر اقلیم آگاهی از وضعیت اقلیم آینده ضروری می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر برای بررسی اقلیم آینده حوضه آبریز دریاچه ارومیه دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش و خشکسالی حوضه برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۹۹ با استفاده از مدل اقلیمی NorESM2-MM تحت سناریوهای انتشار SSP1-2.6 و SSP5-8.5 مورد پیش‌بینی قرار گرفتند. ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل با استفاده از روش نگاشت چندک انجام گرفت. پس از ارزیابی دقت مدل اقلیمی در شبیه‌سازی دوره پایه پارامترهای مورد مطالعه در سطح ایستگاهی برای دوره آینده تولید گردیدند. ارزیابی نتایج حاصل نشان دادند که: دمای متوسط حداقل و حداکثر حوضه تحت سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) تا پایان قرن روند صعودی و تحت سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6) تا سال ۲۰۷۵ روند صعودی و بعد از آن روند نزولی دارند. متوسط دمای حداکثر و حداقل حوضه در آینده نزدیک به ترتیب (۱/۰ تا ۱/۸) و (۱/۱ تا ۱/۸) درجه سلسیوس و در آینده دور (۱/۵ تا ۴/۸) و (۱/۳ تا ۴/۳) درجه سلسیوس افزایش خواهند یافت. بارش سالانه در دوره آینده روند معنی‌داری ندارد، اما متوسط بارش حوضه در سناریوی خوش‌بینانه در آینده نزدیک ۱۶/۵ درصد و در آینده دور ۸/۹ درصد افزایش و تحت سناریوی بدبینانه در آینده نزدیک ۱/۸ درصد و در آینده دور ۷/۲ درصد افزایش خواهد داشت. براساس شاخص SPEI در دوره آینده تحت سناریوی خوش‌بینانه خشکسالی متوسط روند صعودی و خشکسالی شدید روند نزولی و تحت سناریوی بدبینانه خشکسالی روند صعودی خواهد داشت.

تغییر اقلیم، مدل‌های CMIP6، نگاشت چندک، تحلیل روند نوآورانه، شاخص خشکسالی SPEI، حوضه آبریز دریاچه ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸

* نویسنده مسئول: فیروز عبدالعلی‌زاده

رایانامه: f.abdolzadeh@tabrizu.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز، کارشناس هواشناسی سینوپتیک، سازمان هواشناسی کشور، اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی

۲- استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استاد گروه آب و هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۱- مقدمه

رشد جمعیت و افزایش سطح مصرف جهانی باعث افزایش تقاضای جهانی برای سوخت‌های فسیلی شده است. مطالعات نشان داده‌اند که دی‌اکسیدکربن یکی از عوامل اصلی تغییرات آب و هوایی است (IPCC¹, 2013). براساس سناریوهای انتشار دی‌اکسیدکربن که توسط IPCC منتشر شده‌اند، غلظت دی‌اکسید کربن می‌تواند از سطح فعلی 300ppm به 800ppm تا پایان قرن ۲۱ افزایش یابد (وان وورن و همکاران^۲، ۲۰۱۱). افزایش غلظت دی‌اکسید کربن باعث تغییر دمای جهانی، الگوی بارش و تابش خورشیدی و در نتیجه باعث تغییر در بهره‌وری محصولات کشاورزی می‌شود (لوبل و همکاران^۳، ۲۰۱۱). همچنین تغییرات آب و هوایی بر چرخه هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد و توزیع مکانی و زمانی منابع آب را تغییر می‌دهد که ارتباط نزدیکی با در دسترس بودن آب آبیاری و رشد محصول دارد (پیاو و همکاران^۴، ۲۰۱۰).

از اواخر قرن نوزده، تقریباً تمام نقاط جهان تحت یک روند گرمایش جهانی قرار گرفته‌اند که تغییرات دوره‌ای و چند دهه‌ای را نشان می‌دهد (هانسن و همکاران^۵، ۲۰۱۰). در مورد اینکه تغییرات اقلیمی باعث تغییرات در شدت، میزان و مدت رخداد‌های حدی منجر به رویدادهای بی‌سابقه آب و هوایی خواهد شد، توافق جهانی وجود دارد (فیلد و همکاران^۶، ۲۰۱۲). همچنین، تغییرات در چرخه آب به دلیل تغییرات آب و هوایی مشاهده می‌شود. شواهد نشان می‌دهند که تغییرات آب و هوایی با توزیع دوباره منابع آب و افزایش فراوانی و شدت سیل و خشکسالی مرتبط است (لی و همکاران^۷، ۲۰۱۳). بنابراین توجه به تغییرات اقلیمی در مقیاس حوضه‌ای بویژه در مناطق خشک و نیمه خشک که دچار محدودیت منابع آبی هستند از اهمیت زیادی برخوردار است.

ادامه انتشار گازهای گلخانه‌ای موجب گرم شدن بیشتر و تغییرات طولانی مدت در تمام اجزای سیستم آب و هوایی می‌شود و احتمال تأثیرات شدید، فراگیر و غیرقابل برگشت برای مردم و اکوسیستم‌ها را افزایش می‌دهد. آب و هوای آینده به گرم شدن ناشی از انتشار آلودگی‌های گذشته و آینده و تغییرات طبیعی اقلیم بستگی دارد. یکی از رخداد‌های حدی اقلیمی خشکسالی می‌باشد. طی سال‌های اخیر، مطالعات متعددی دریافته‌اند که خشکسالی در مناطق مختلف جهان رو به افزایش است، بنابراین می‌توان انتظار داشت که رخداد‌های خشکسالی از نظر فراوانی و شدت طی دوره‌های آینده با افزایش دما و تغییر رژیم بارش بیشتر خواهد شد (ژائی و همکاران^۸، ۲۰۲۰).

IPCC اخیراً فاز ششم مدل‌های CMIP که جدیدترین مدل‌های گردش عمومی هستند را منتشر کرده است. مدل‌های مذکور بر اساس سناریوهای انتشار SSP توسعه داده شده‌اند. سناریوهای SSP بر اساس عوامل اقتصادی-اجتماعی مانند رشد جمعیت، اقتصاد، شهرنشینی و عوامل دیگر طراحی شده‌اند (ایرینگ و همکاران^۹، ۲۰۱۶). خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو از نظر تفکیک‌پذیری زمانی و مکانی، در حدود ده‌ها کیلومتر در مقیاس روزانه و ماهانه هستند که در مقایسه با فرآیندهای اقلیمی و هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس هستند. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های GCM در هر دو مقیاس مکانی و زمانی دارای عدم قطعیت در پارامترسازی فرآیندها هستند، بنابراین نمی‌توان به طور مستقیم از خروجی این مدل‌ها در مطالعات تغییر اقلیم استفاده کرد. لذا ریزمقیاس‌نمایی و تصحیح اریبی شبیه‌سازی‌های GCM برای به دست آوردن اطلاعات در مقیاس مناسب ضروری است (وود و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۴).

از زمان انتشار مدل‌های CMIP6 مطالعات متعددی در مناطق مختلف جهان برای بررسی تغییر اقلیم دوره‌های آینده و اثرات ناشی از آن انجام گرفته است. لی و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۰)، بارش آینده رودخانه یانگ تسه در چین را با استفاده از ۱۸ مدل CMIP6 مورد ارزیابی

¹ . Intergovernmental Panel on Climate Change

² . Van Vuuren et al.

³ . Lobell et al.

⁴ . Piao et al.

⁵ . Hansen et al.

⁶ . Field et al.

⁷ . Li et al.

⁸ . Zhai et al.

⁹ . Eyring et al.

¹⁰ . Wood et al.

¹¹ . Li et al.

قرار دادند. براساس نتایج تحقیق، میزان بارش در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۵ تحت سناریوی SSP1-2.6 به میزان ۱۴/۷۶ میلیمتر و تحت سناریوی SSP5-8.5 به میزان ۲۲/۴۷ میلیمتر افزایش خواهد داشت. برین و همکاران^۱ (۲۰۲۱)، میانگین دمای سطح در شرق آفریقا را با استفاده از مدل‌های CMIP6 مورد بررسی و پیش‌بینی قرار دادند. برای پیش‌بینی دما، پنج مدل CMIP6 (مدل‌ها براساس رتبه آن‌ها در شبیه‌سازی میانگین دمای دوره تاریخی انتخاب شدند) تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج مجموعه مدل‌های منتخب نشان دهنده تغییرات زیاد دما در دوره ۲۰۸۰-۲۱۰۰ به میزان ۲/۴ درجه در SSP2-4.5 و ۴/۴ درجه سلسیوس در SSP5-8.5 بودند. سونگ و همکاران^۲ (۲۰۲۱)، تغییر اقلیم قرن ۲۱ را با استفاده از مدل NIMS-KMA از سری مدل‌های CMIP6 پیش‌بینی کردند. شبیه‌سازی‌ها برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۵) بیانگر دقت بالای عملکرد مدل‌ها در میانگین و تغییرپذیری اقلیم هستند که قابلیت اطمینان مدل‌های اقلیمی را نشان می‌دهد. نتایج پیش‌بینی آینده نشان دادند که دمای جهانی به میزان ۱/۹۲ تا ۵/۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد، میانگین بارش جهانی ۵ تا ۱۰ درصد افزایش و وسعت یخ دریا در قطب‌های شمال و جنوب کاهش خواهد یافت. سو-یوان و همکاران^۳ (۲۰۲۰)، شرایط خشکسالی در شمال غرب چین را با استفاده از مدل‌های CMIP6 برای دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۵ پیش‌بینی و بررسی کردند. براساس نتایج، برای دوره آینده شدت خشکسالی تحت SSP1-2.6 هیچ روندی را نشان نداد اما تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 افزایش سریع در شدت خشکسالی رخ خواهد داد. فراوانی خشکسالی در SSP5-8.5 نسبت به دو سناریوی دیگر کمتر و طول خشکسالی‌ها از دو سناریوی دیگر بیشتر خواهد بود. سامانتارای و همکاران^۴ (۲۰۲۲)، تغییرات ویژگی‌های خشکسالی آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۹) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۰۹۹) در هند را با استفاده از مدل‌های CMIP6 بررسی کردند. نتایج نشان دادند که روند کاهشی معنی‌داری در تعداد رخداد‌های خشکسالی وجود دارد اما شدت و مدت خشکسالی در آینده افزایش خواهد یافت.

طی سال‌های اخیر مطالعاتی در رابطه با پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه انجام گرفته است ازجمله: گودرزی و همکاران (۱۳۹۴)، تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی دریاچه ارومیه را بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که در دوره‌های آتی متوسط دمای حوضه بین ۰/۵۵ تا ۳/۱۵ درجه سلسیوس افزایش، میزان بارش حدود ۱۲ درصد کاهش و رواناب سطحی حوضه کاهش خواهد یافت. صلاحی و همکاران (۱۳۹۶)، پارامترهای اقلیمی حوضه دریاچه ارومیه را برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ با استفاده از مدل HadCM3 پیش‌بینی کردند. نتایج نشان دادند که بارش در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) کاهش و در ایستگاه سقز افزایش خواهد یافت، دمای حداقل و حداکثر در تمامی ایستگاه‌ها افزایش خواهد یافت. گودرزی و همکاران (۱۳۹۷)، تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق حوضه دریاچه ارومیه را برای دوره آینده با استفاده از مدل HadCM3 مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان دادند که دمای حداقل حوضه بین ۰/۲ تا ۳/۴ درجه سلسیوس و دمای حداکثر حوضه بین ۰/۹ تا ۲/۹ درجه سلسیوس افزایش و به تبع آن تبخیر و تعرق حوضه بین ۴/۲ تا ۱۵ درصد افزایش خواهند یافت. قلعه نوی و همکاران (۱۳۹۸)، تغییرات خشکسالی و تبخیر و تعرق حوضه دریاچه ارومیه را با استفاده از مدل‌های CMIP5 برای دوره ۲۰۱۵-۲۱۰۰ پیش‌بینی و تحلیل کردند. نتایج تحقیق نشان داد متوسط بارندگی حوضه تحت RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۶۳ و ۳ درصد در دوره آینده افزایش خواهد یافت و از شدت خشکسالی کاسته خواهد شد.

با توجه به پیشینه ذکر شده می‌توان گفت تغییر اقلیم آینده در مناطق مختلف می‌تواند اثرات متفاوتی داشته باشد و لذا مطالعه تغییر اقلیم باید به صورت منطقه‌ای و با استفاده از جدیدترین مدل‌های اقلیمی انجام گیرد. مطالعات انجام گرفته در حوضه دریاچه ارومیه عمدتاً با مدل‌های قبلی انجام گرفته‌اند، بنابراین در تحقیق حاضر برای پیش‌بینی اقلیم آینده از جدیدترین مدل‌های اقلیمی ارائه شده توسط IPCC استفاده شده است.

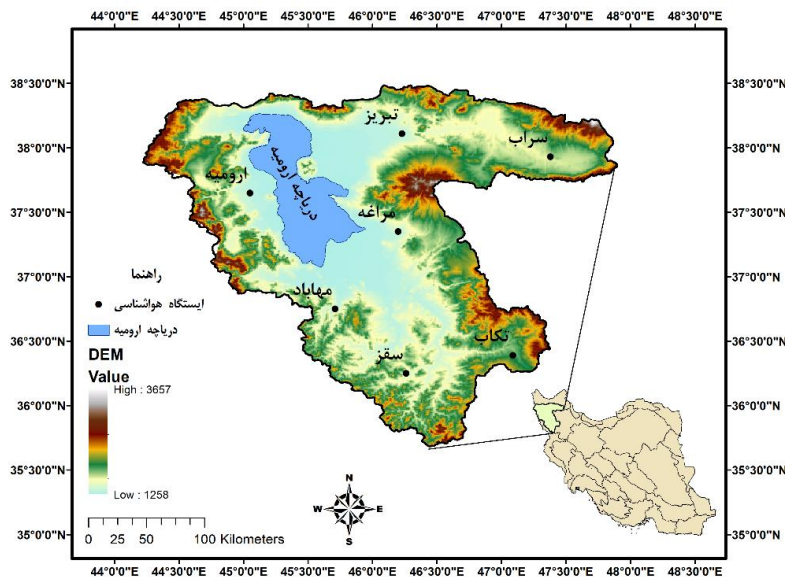
¹ . Brian et al.
² . Sung et al.

³ . Su-Yuan et al.
⁴ . Samantaray et al.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مساحت حدود ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع در شمال غرب ایران واقع شده است و شامل بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان می‌باشد (شکل ۱). این حوضه توسط دامنه‌های شمالی زاگرس، دامنه‌های جنوبی کوه سبلان و کوه سهند احاطه شده است. شهرهای پرجمعیت و مهمی همچون تبریز و ارومیه در این حوضه قرار دارند. دریاچه ارومیه واقع در این حوضه به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و یکی از بارزش‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران به شمار می‌رود.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه
Fig (1): Geographical location of Urmia lake catchment area and studied synoptic stations

۲-۲ روش تحقیق

در تحقیق حاضر دما، بارش و خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای دوره آینده (۲۰۹۹-۲۰۱۵) پیش‌بینی شده و روند پارامترهای مذکور و همچنین تغییرات آن‌ها نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) مورد بررسی قرار گرفته است. پیش‌بینی پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از سری جدید مدل‌های گردش عمومی با عنوان مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای انتشار SSP585 و SSP126 به عنوان سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه انجام گرفته است. مدل مورد استفاده در این تحقیق، مدل NorESM2-MM می‌باشد که توسط کنسرسیوم مدل‌سازی آب و هوای NorESM در کشور نروژ ارائه شده است. مدل مذکور دارای وضوح مکانی ۱۰۰ کیلومتر می‌باشد و خروجی‌های آن تحت سناریوهای SSP در سال ۲۰۱۷ منتشر شده‌اند. ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل GCM با استفاده از روش نگاشت چندک‌ها^۱ و ارزیابی دقت مدل با استفاده از نمودارهای میانگین ماهانه و شاخص‌های RMSE^۲ و NRMSE^۳ انجام گرفت. پس از ارزیابی دقت مدل GCM، پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش برای دوره آینده با استفاده از خروجی مدل و روش ریزمقیاس‌نمایی نگاشت چندک‌ها تولید شدند، سپس با استفاده از پارامترهای مذکور، شاخص‌های تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) و خشکسالی (SPEI) برای دوره آینده محاسبه گردیدند. در ادامه تغییرات و روند پارامترهای دمای، بارش و خشکسالی در دوره آینده با استفاده از روش تحلیل روند نوآورانه (ITA^۴) مورد بررسی قرار گرفت.

^۱ . Quantile Mapping

^۲ . Root Mean Square Error

^۳ . Normalized Root Mean Square Error

^۴ . Innovative Trend Analysis

۳-۲- داده‌ها

در تحقیق حاضر دو دسته داده مورد استفاده قرار گرفت. دسته اول داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های سینوپتیک (تبریز، سراب، مراغه، ارومیه، تکاب، مهاباد و سقز) هستند. این داده‌ها شامل مقادیر روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش برای بازه زمانی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ هستند که از سازمان هواشناسی کشور دریافت شده‌اند. دسته دوم داده‌های مدل GCM با عنوان NorESM2-MM از سری مدل‌های CMIP6 می‌باشد. این داده‌ها شامل مقادیر روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش برای سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 طی بازه زمانی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) و دوره آینده (۲۰۹۹-۲۰۱۵) می‌باشند که از پایگاه برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (<https://esgf-node.llnl.gov>) استخراج شده‌اند.

۴-۲- ریزمقیاس‌نمایی به روش نگاشت چندک

یکی از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده از تبدیل‌های آماری^۱ است. این روش تلاش می‌کند تابعی (h) بیابد که متغیر مدل‌سازی شده (x_m) را طوری تبدیل کند که توزیع جدید آن با توزیع متغیر مشاهداتی (x_o) یکی باشد. این تبدیل در حالت کلی به فرم زیر می‌باشد (پیانی و همکاران^۲، ۲۰۱۰):

$$x_o = h(x_m) \quad (1)$$

اگر توزیع متغیر مورد نظر مشخص باشد، تبدیل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x_o = F_o^{-1}(F_m(x_m)) \quad (2)$$

در رابطه فوق F_m تابع توزیع تجمعی x_m و F_o^{-1} معکوس تابع توزیع تجمعی x_o هستند. یک روش رایج حل رابطه (۲) استفاده از تابع توزیع تجمعی تجربی مقادیر مشاهداتی و مدل‌سازی شده به جای فرض توزیع‌های پارامتریک است (بوئه و همکاران^۳، ۲۰۰۷؛ تمبل و همکاران^۴، ۲۰۱۲)، این روش به روش چندک‌های تجربی (Empirical quantiles) نیز معروف است. به پیروی از روش بوئه و همکاران (۲۰۰۷)، تابع توزیع تجمعی تجربی با استفاده از جداول صدک‌های تجربی تقریب زده شده و مقادیر بین صدک‌ها با استفاده از درونیایی خطی تقریب زده شده‌اند.

۵-۲- تحلیل روند نوآورانه (ITA)

این روش توسط شن^۵ (۲۰۱۲) توسعه داده شد. در این روش سری زمانی به دو قسمت مساوی تقسیم شده و هر قسمت به صورت صعودی مرتب می‌شود. سپس نمودار پراکندگی دو قسمت در مقابل هم ترسیم می‌شود (شکل ۲). اگر نقاط ترسیم شده در نزدیکی خط ۱:۱ (۴۵ درجه) توزیع شده باشند بیانگر عدم وجود روند می‌باشد. اگر نقاط بالای خط ۱:۱ توزیع شده باشند بیانگر روند صعودی و اگر زیر خط ۱:۱ توزیع شده باشند بیانگر روند نزولی خواهند بود (شن، ۲۰۱۴: ۶۳۷). همچنین روند مقادیر کم، متوسط و زیاد را می‌توان با استفاده از نمودار پراکنش ترسیم شده در تحلیل روند نوآورانه بررسی کرد (ازتوپال و شن^۶، ۲۰۱۷: ۷۳۰).

^۱ . Statistical Transformations

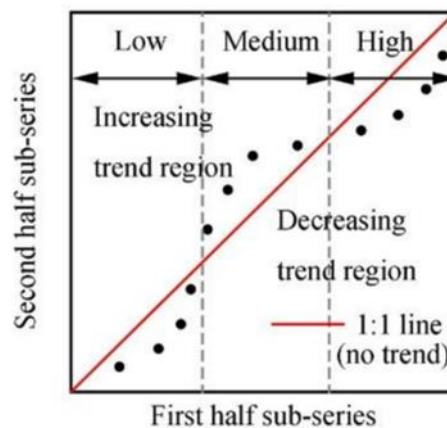
^۲ . Piani et al.

^۳ . Boé et al.

^۴ . Themeßl et al.

^۵ . Şen

^۶ . Öztöpal and Şen



شکل (۲): روش تحلیل روند نوآورانه (ITA)

Fig (2): Innovative Trend Analysis method

۲-۶- شاخص خشکسالی SPEI

شاخص SPEI توسط ویسنته سرانو و همکاران^۱ (۲۰۱۰) ارائه شد. این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب استفاده می‌کند:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (3)$$

در رابطه فوق P بارش، PET تبخیر و تعرق پتانسیل و D بیلان آب می‌باشند. برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل در تحقیق حاضر از روش تورنت-ویت^۲ استفاده گردید. سرانو و همکاران با بررسی توابع چگالی مختلف، تابع چگالی لوگ-لوجستیک سه پارامتری را دارای بهترین برازش بر مقادیر D_i تشخیص دادند که رابطه آن به فرم زیر می‌باشد:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} [1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta}]^{-2} \quad (4)$$

در رابطه فوق α ، β و به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر D_i در بازه مقادیر $-\infty < D < \infty$ هستند. فرم کلی تابع احتمال تجمعی لوگ لوجستیک سه پارامتری برای D به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$F(x) = \left[1 + \frac{\alpha}{x - \gamma} \right]^{-1} \quad (5)$$

در نهایت مقادیر استاندارد شده $F(x)$ به عنوان شاخص SPEI در نظر گرفته می‌شود. بدین منظور از تابع کلاسیک آبراموویچ و استیگان^۳ (۱۹۶۵) استفاده می‌شود:

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (6)$$

در رابطه فوق $w = \sqrt{-2 \ln(p)}$ برای $p \leq 0.5$ و p احتمال تجاوز از مقدار D تعیین شده می‌باشد ($p = 1 - F(x)$). اگر مقدار p بزرگتر از ۰.۵ باشد با $1 - p$ جایگزین و علامت مقادیر SPEI عوض می‌شود. مقدار ضرائب ثابت عبارتند از: $c_1 = 0.802853$ ، $c_0 = 2.515517$ ، $d_1 = 1.432788$ ، $d_2 = 0.189269$ و $d_3 = 0.001308$. SPEI یک متغیر استاندارد شده می‌باشد بنابراین می‌توان آن را در زمان و مکان‌های مختلف مقایسه نمود. طبقات مختلف خشکسالی براساس شاخص SPEI در جدول ۲ ارائه شده است.

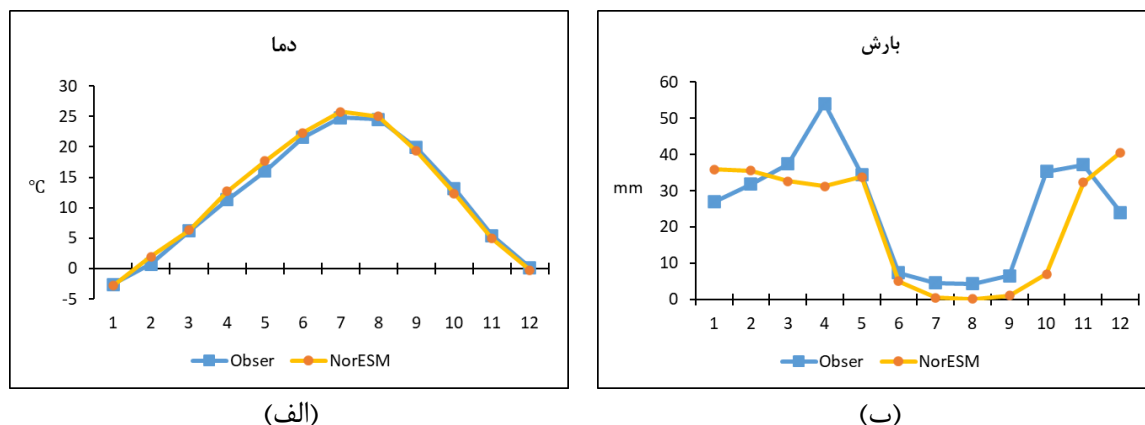
^۱ . Vicente-Serrano et al.^۲ . Torrent White^۳ . Abramowitz and Stegun

جدول (۲): طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص SPEI
Table (2): classification of drought based on SPEI index

وضعیت خشکسالی	طبقات شاخص SPEI
ترسالی بسیار شدید	$2 \leq \text{SPEI}$
ترسالی شدید	$1.5 \leq \text{SPEI} < 2$
ترسالی متوسط	$1 \leq \text{SPEI} < 1.5$
نرمال	$-1 < \text{SPEI} < 1$
خشکسالی متوسط	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1$
خشکسالی شدید	$-2 < \text{SPEI} \leq -1.5$
خشکسالی بسیار شدید	$\text{SPEI} \leq -2$

۳- نتایج

ابتدا دقت مدل NorESM2-MM برای شبیه‌سازی دما و بارش حوضه در دوره پایه با استفاده از نمودارهای میانگین ماهانه و شاخص‌های RMSE و NRMSE مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور در دوره کالیبراسیون (۱۹۹۰-۲۰۰۴) با استفاده از روش نگاشت چندک‌ها ارتباط آماری بین داده‌های مدل GCM و داده‌های مشاهداتی مشخص گردید، سپس بر اساس مدل آماری داده‌های مدل GCM برای دوره صحت‌سنجی (۲۰۰۵-۲۰۱۴) ریزمقیاس شدند و با داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفتند. براساس نمودارهای میانگین مقادیر ماهانه (شکل ۳) دقت شبیه‌سازی دما در تمامی ماه‌ها مناسب و قابل قبول می‌باشد در مورد بارش دقت شبیه‌سازی نسبت به دما کمتر است اما تا حدودی رفتار نمودار شبیه‌سازی شده مشابه رفتار نمودار مشاهداتی می‌باشد. برای ارزیابی دقیق‌تر دقت شبیه‌سازی دما و بارش از شاخص‌های RMSE و NRMSE استفاده شد (جدول ۳). براساس شاخص‌های مذکور میزان خطای شبیه‌سازی دما ۰/۸۸ درجه سانتیگراد معادل ۳/۲ درصد می‌باشد که بیانگر دقت بالای شبیه‌سازی می‌باشد و میزان خطای شبیه‌سازی بارش ۱۲/۲۷ میلیمتر معادل ۲۴/۶ درصد می‌باشد که این میزان خطا در حد دقت متوسط و قابل قبول می‌باشد.



شکل (۳): میانگین مقادیر ماهانه (الف) دما و (ب) بارش شبیه‌سازی شده و مشاهداتی

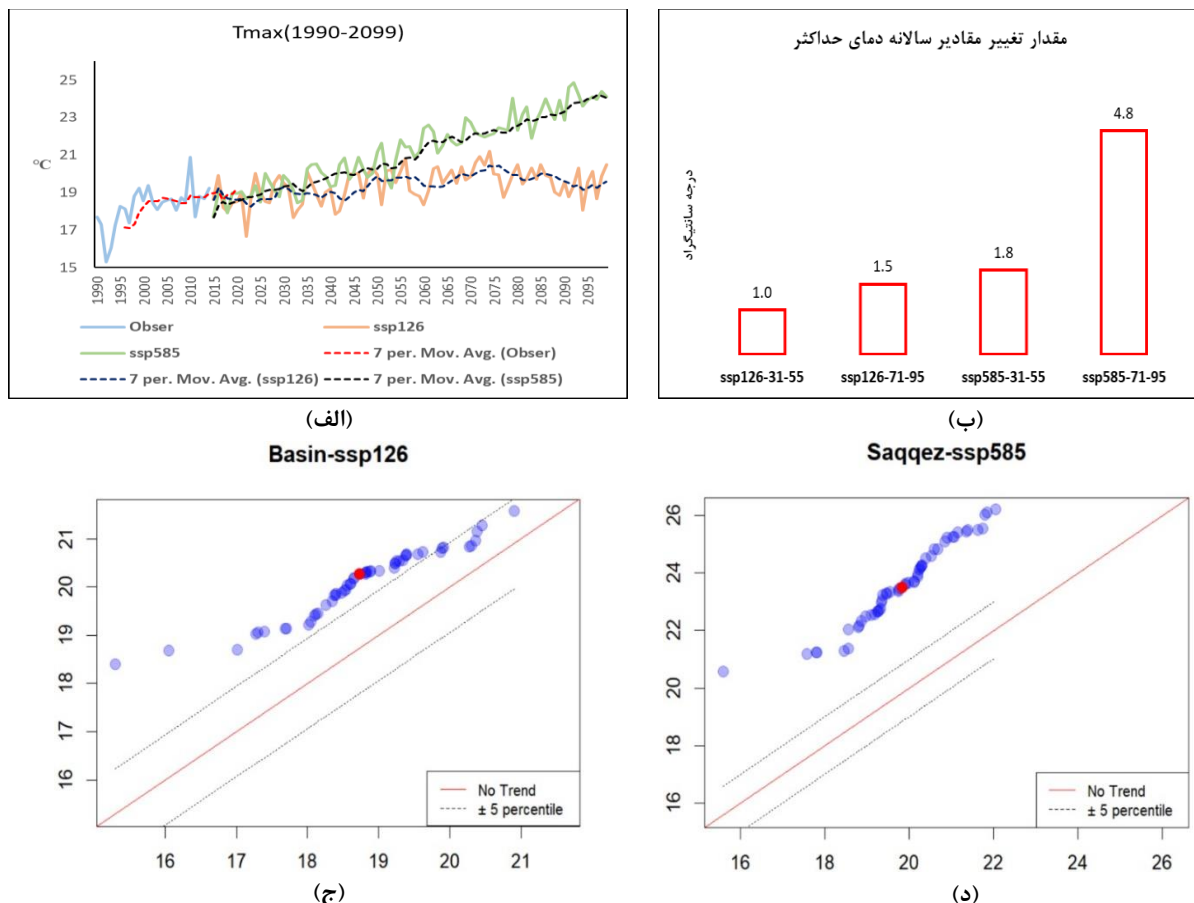
Figure (3): average monthly values of simulated and observed (a) temperature and (b) precipitation

جدول (۳): مقادیر شاخص‌های RMSE و NRMSE برای مقادیر شبیه‌سازی شده دما و بارش در مقایسه با مقادیر مشاهداتی

Table (3): values of RMSE and NRMSE indicators for simulated values of temperature and precipitation compared to observed values

شاخص	دما	بارش
RMSE	۰/۸۸	۱۲/۲۷
NRMSE	۳/۲۱	۲۴/۶۴

با استفاده از خروجی‌های مدل NorESM2-MM تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه برای دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۹۹) با استفاده از روش نگاشت چنک‌ها تولید گردیدند، سپس پارامترهای مذکور برای کل حوضه از طریق میانگین‌گیری مقادیر ایستگاه‌های سینوپتیک حاصل شد تا تغییرات و روند آنها در دوره آینده مورد مطالعه قرار گیرد. در شکل ۴-الف سری زمانی دمای حداکثر سالانه حوضه از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۹۹ برای بررسی رفتار سری ترسیم شده است. از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ داده‌های مشاهداتی و از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۹۹ داده‌های ریزمقیاس شده مدل NorESM2-MM می‌باشند. با توجه به میانگین متحرک سری داده‌ها، دمای حداکثر در دوره پایه روند صعودی دارد و در دوره آینده نیز به روند صعودی خود ادامه می‌دهد. در سناریوی SSP5-8.5 روند صعودی دمای حداکثر تا پایان قرن با شیب زیادی ادامه دارد، در سناریوی SSP1-2.6 روند افزایش دما شیب کمتری دارد و حتی در اواخر قرن (از سال ۲۰۷۵ به بعد) نزولی نیز می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر تغییرات دمای حداکثر در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه، اختلاف میانگین دمای حداکثر دوره‌های آینده نزدیک و دور با دوره پایه در شکل ۴-ب ارائه شده است. با توجه به نمودار، میانگین دمای حداکثر در هر دو دوره و تحت هر دو سناریو افزایش می‌یابد. افزایش در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP1-2.6 و در آینده دور نسبت به آینده نزدیک بیشتر است. برای ارزیابی دقیق‌تر روند نتایج آزمون ITA برای هر دو سناریو در شکل ۴-ج و د ارائه شده است. براساس نمودار آزمون ITA در هر دو سناریو نقاط بالای خط ۱:۱ قرار دارند، بنابراین روند دمای حداکثر بصورت معنی‌داری مثبت می‌باشد و با توجه به فاصله نقاط از خط ۱:۱ شیب روند در سناریوی SSP5-8.5 بیشتر است.

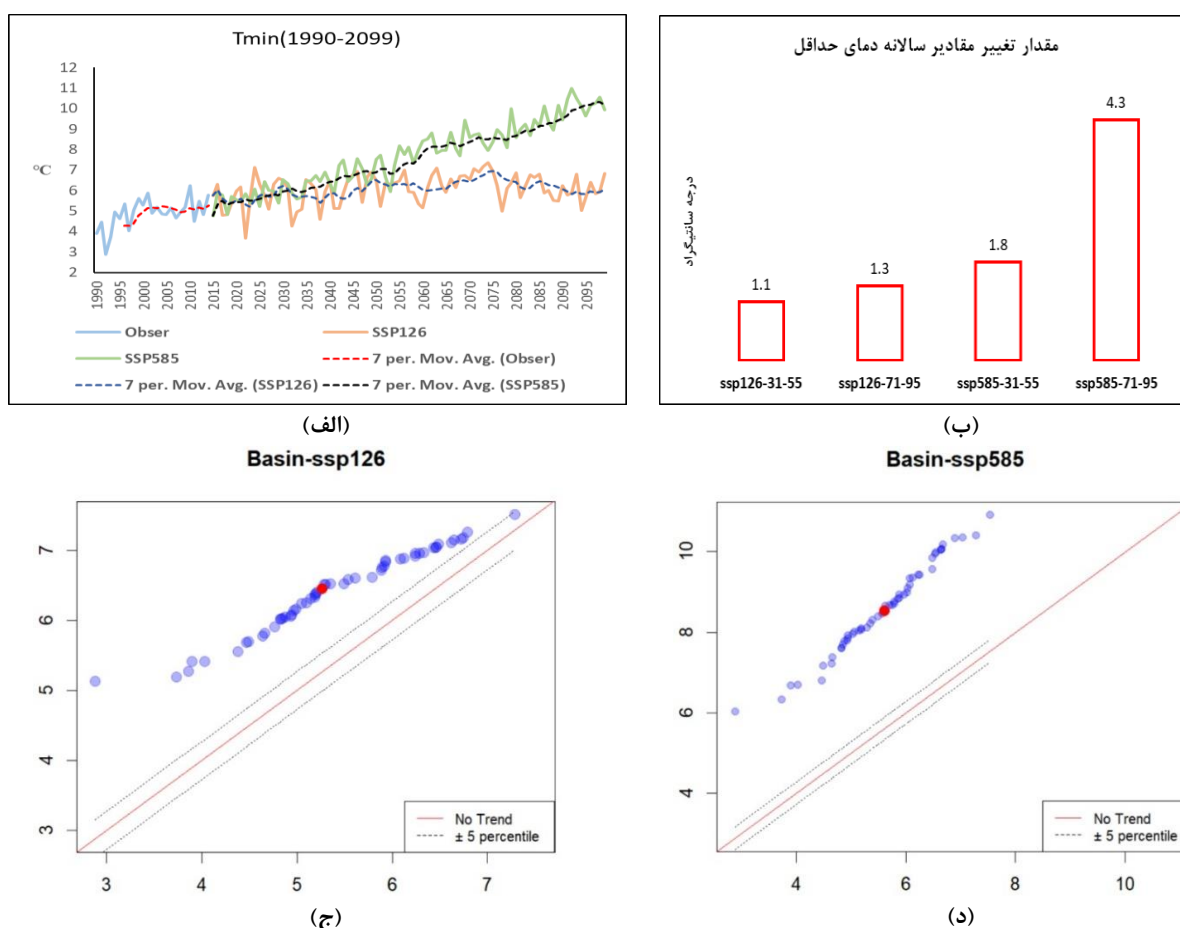


شکل ۴- (الف) نمودار متوسط دمای حداکثر حوضه برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۹۹، (ب) میزان تغییر دمای متوسط حداکثر حوضه در دوره‌های آینده نزدیک و دور نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5، (ج) و (د) نمودارهای ITA برای دمای متوسط حداکثر حوضه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5

Fig (4): (a) the average maximum temperature of the basin for the period of 1990-2099, (b) the amount of change in the average maximum temperature of the basin in the near and far future periods compared to the base period under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, (c) and (d) ita diagrams for maximum basin average temperature under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios

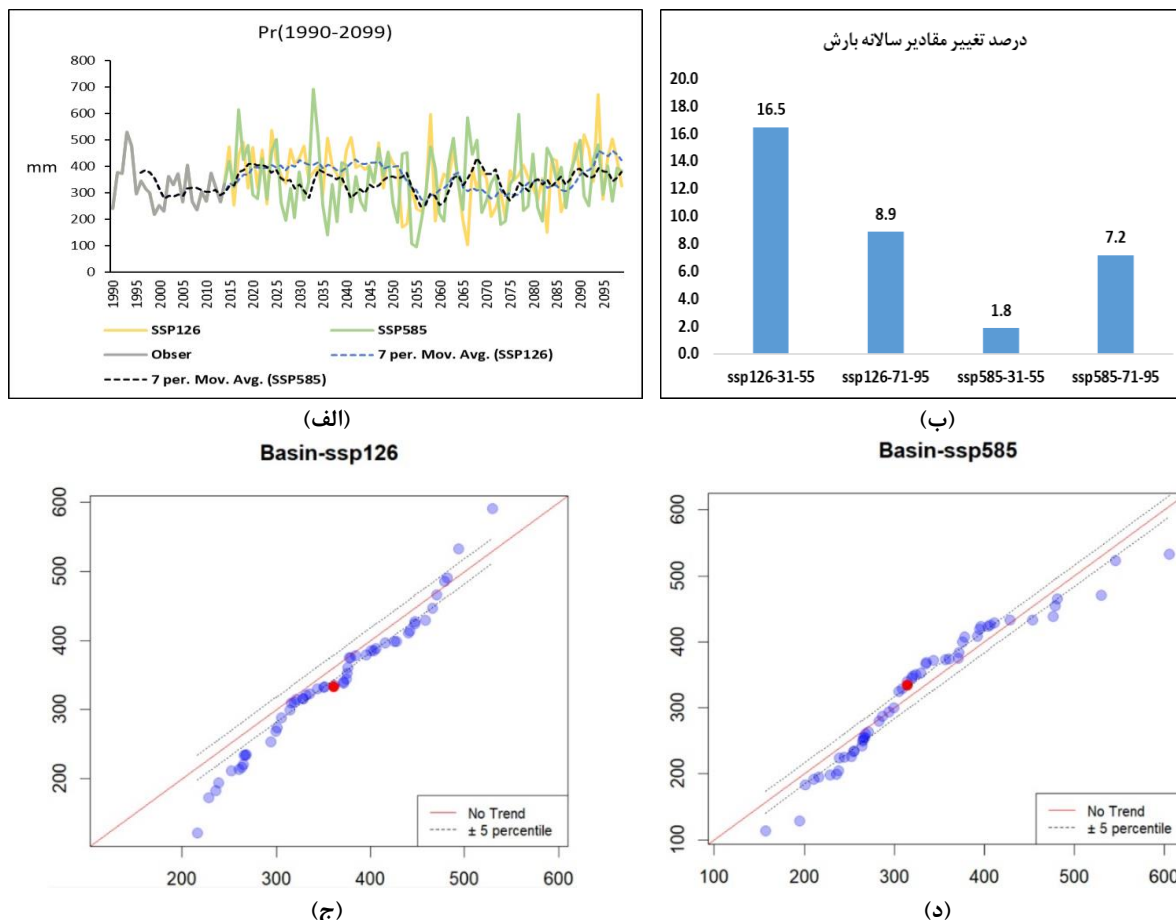
نمودارهای مربوط به دمای حداقل مشابه دمای حداکثر می‌باشند (شکل ۵). روند دمای حداقل سالانه حوضه تا پایان قرن در سناریوی SSP5-8.5 افزایشی می‌باشد و در سناریوی SSP1-2.6 تا سال ۲۰۷۵ افزایشی و بعد از آن کاهش‌ی است (شکل ۵-الف). با توجه به شکل ۵-ب میانگین دمای حداقل در آینده نزدیک و دور تحت هر دو سناریو نسبت به دوره پایه افزایش خواهد. آزمون ITA نیز مثبت بودن روند دمای حداقل در دوره آینده را تحت هر دو سناریو مورد تأیید قرار می‌دهد (شکل ۵-پ و ت).

نمودار سری زمانی بارش سالانه حوضه تا پایان قرن ۲۱ تحت هر دو سناریو روند خاصی را نشان نمی‌دهد (شکل ۶-الف). میانگین بارش سالانه آینده نزدیک و دور در سناریوی SSP1-2.6 نسبت به دوره پایه به ترتیب ۱۶/۵ و ۸/۹ درصد بیشتر خواهد بود و در سناریوی SSP5-8.5 ۱/۸ و ۷/۲ درصد افزایش خواهد داشت (شکل ۶-ب). با توجه به نمودارهای ITA در هر دو سناریو، نقاط تماماً در بالا یا پایین خط ۱:۱ قرار ندارند بنابراین بارش در آینده روند افزایشی یا کاهش‌ی معنی‌داری نخواهد داشت (شکل ۶-ج و د).



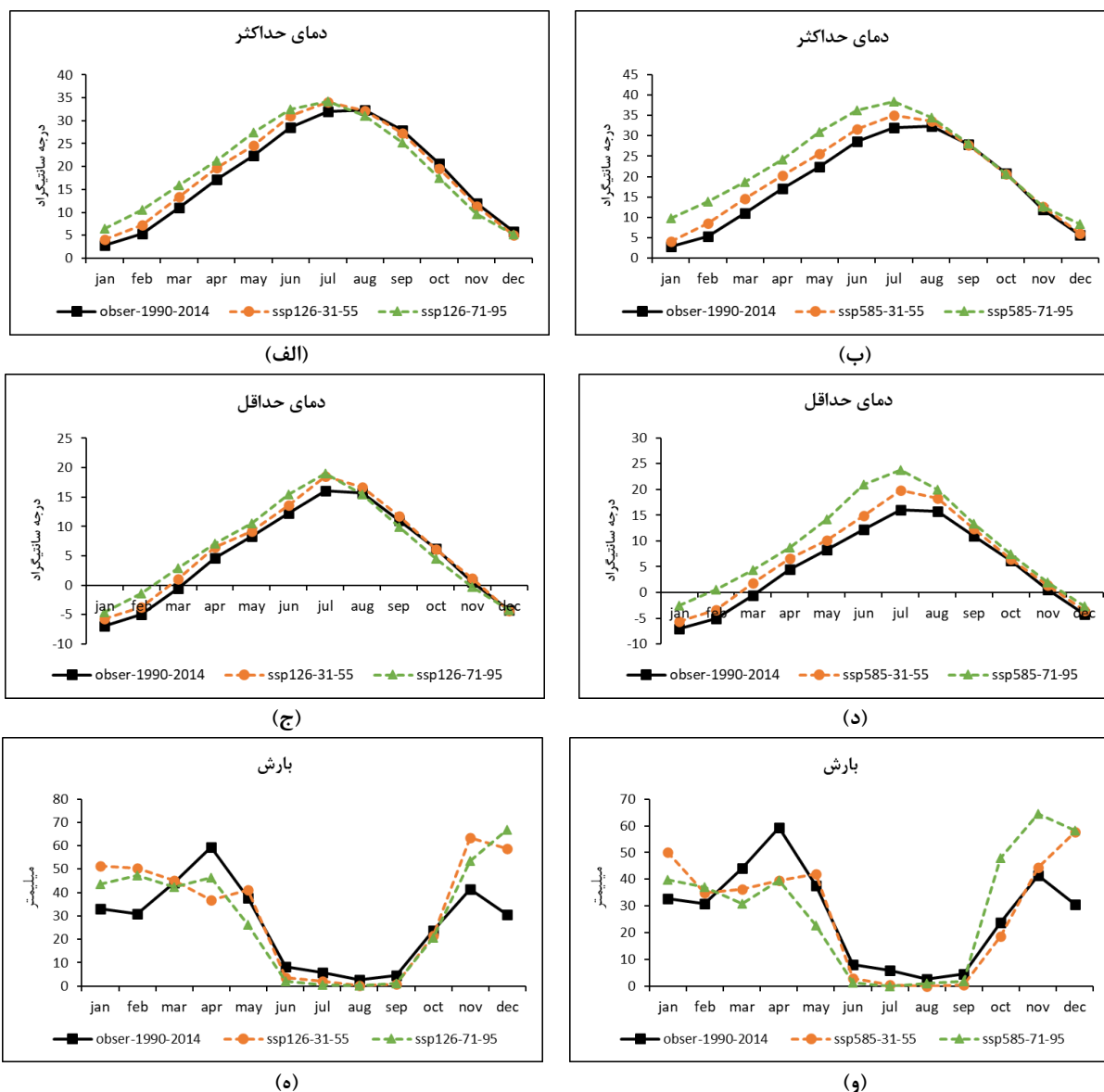
شکل (۵): (الف) نمودار متوسط دمای حداقل حوضه برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۹۹، (ب) میزان تغییر دمای متوسط حداقل حوضه در دوره‌های آینده نزدیک و دور نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5، (ج) و (د) نمودارهای ITA برای دمای متوسط حداقل حوضه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5

Fig (5): (a) the average minimum temperature of the basin for the period of 1990-2099, (b) the amount of change in the average minimum temperature of the basin in the near and far future periods compared to the base period under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, (c) and (d) ita plots for minimum basin average temperature under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios



شکل (۶): (الف) نمودار متوسط بارش سالانه حوضه برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۹۹، (ب) درصد تغییر متوسط بارش سالانه حوضه در دوره‌های آینده نزدیک و دور نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5، (ج) و (د) نمودارهای ITA برای متوسط بارش سالانه حوضه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5. Fig (6): (a) the average annual precipitation of the basin for the period 1990-2099, (b) the percentage change of the average annual precipitation of the basin in the near and far future periods compared to the base period under the scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5, (c) and (d) ita diagrams for basin average annual precipitation under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios

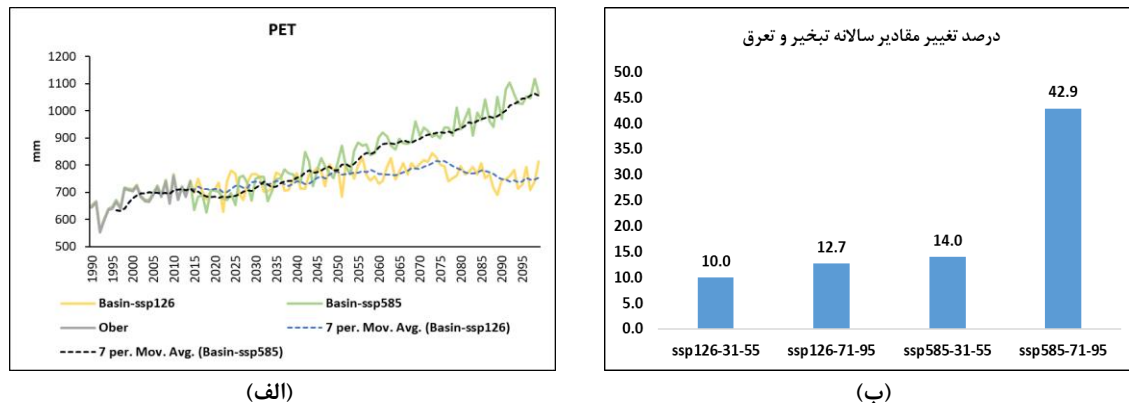
در بحث تغییر اقلیم، علاوه بر تغییرات روند سری زمانی مقادیر سالانه پارامترها، تغییرات توزیع ماهانه و فصلی نیز حائز اهمیت است. لذا میانگین ماهانه کل دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش حوضه برای دوره‌های پایه، آینده نزدیک و آینده دور محاسبه و جهت مقایسه به صورت نمودار در شکل ۷ ترسیم شده‌اند. طبق این نمودارها دمای حداقل و حداکثر تحت هر دو سناریو در هفت ماه نخست سال افزایش بیشتری نسبت به ماه‌های دیگر خواهند داشت. تغییرات بارش در ماه‌های مختلف متفاوت است اما این تغییرات در هر دو سناریو تا حدودی مشابه می‌باشند. بارش حوضه به طور کلی در ماه‌های ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر افزایش و در ماه‌های آوریل، ژوئن، ژولای و آگوست کاهش خواهد داشت.



شکل (۷): دمای حداکثر متوسط ماهانه حوضه تحت SSP1-2.6 (الف) و SSP5-8.5 (ب) برای دو دوره آینده نزدیک و آینده دور، دمای حداقل متوسط ماهانه حوضه تحت SSP1-2.6 (ج) و SSP5-8.5 (د) برای دو دوره آینده نزدیک و آینده دور، بارش متوسط ماهانه حوضه تحت SSP1-2.6 (ه) و SSP5-8.5 (و) برای دو دوره آینده نزدیک و آینده دور

Fig (7): average monthly maximum temperature of the basin under SSP1-2.6 (a) and SSP5-8.5 (b) for two periods of the near future and far future, the average monthly minimum temperature of the basin under SSP1-2.6 (c) and SSP5-8.5 (d) for the two periods of the near future and the far future, the average monthly rainfall of the basin under SSP1-2.6 (e) and SSP5-8.5 (f) for the two periods of the near future and the far future

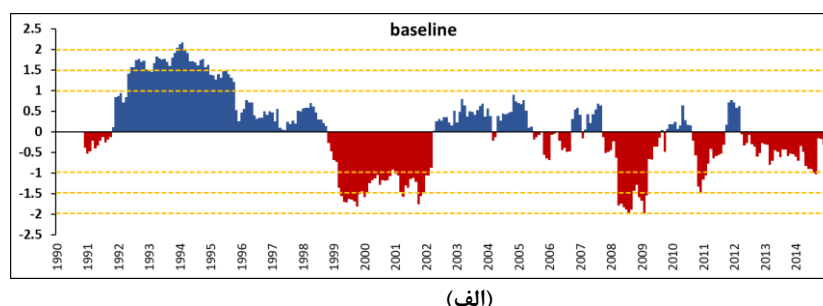
برای محاسبه شاخص خشکسالی، ابتدا میزان تبخیر و تعرق پتانسیل به روش تورنت ویت برای دوره‌های پایه و آینده تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 محاسبه گردید. سری زمانی تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه حوضه (میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل ایستگاه‌های سینوپتیک) از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۹۹ نشان می‌دهد روند آن تا پایان قرن ۲۱ در هر دو سناریو مشابه روند تغییرات دما می‌باشد (شکل ۸-الف). با توجه به این نکته که بارش تغییرات قابل توجهی در آینده نخواهد داشت، روند تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل تابع تغییرات دما خواهد بود. میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه در دوره‌های آینده نزدیک و دور تحت سناریوی SSP1-2.6 ۱۰ و ۱۲/۷ درصد و تحت سناریوی SSP5-8.5 ۱۴ و ۴۲/۹ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت (شکل ۸-ب).

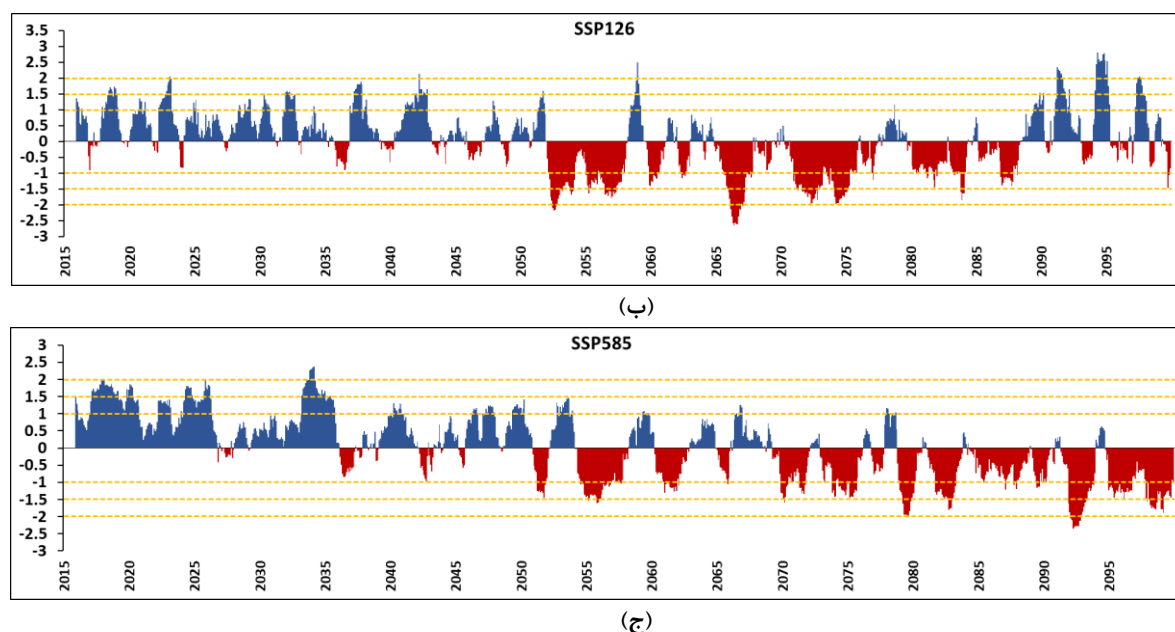


شکل (۸): (الف) نمودار متوسط تبخیر و تعرق سالانه حوضه برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۹۹، (ب) میزان تغییر تبخیر و تعرق سالانه حوضه در دوره‌های آینده نزدیک و دور نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5

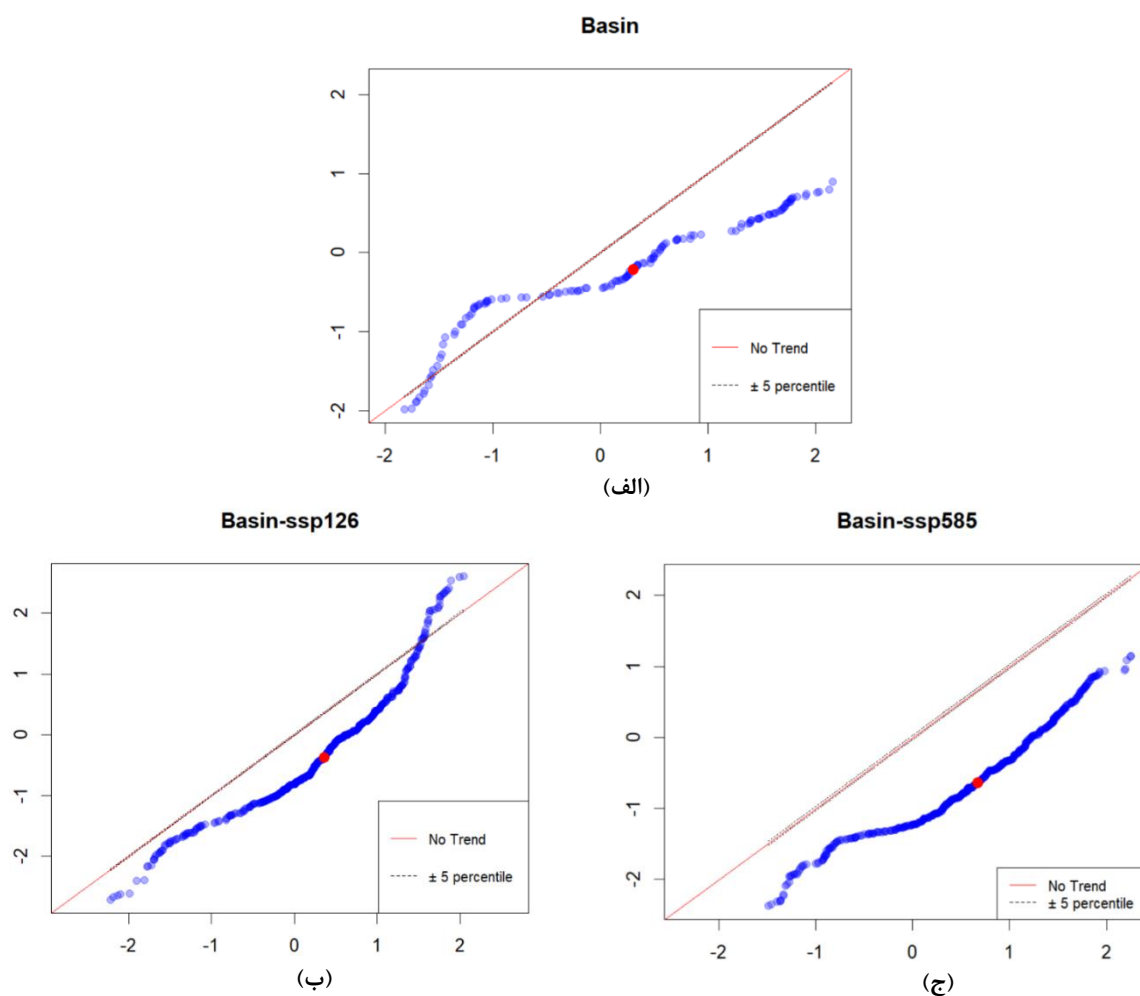
Fig (8): (a) the average annual evapotranspiration of the basin for the period of 1990-2099, (b) the rate of change of annual evapotranspiration of the basin in the near and far future periods compared to the base period under scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5

پس از محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، شاخص خشکسالی SPEI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه برای دوره پایه و دوره آینده تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 محاسبه و در نمودارهای شکل ۹ ارائه شده‌اند. در دوره پایه پس از یک دوره ترسالی چندین دوره خشکسالی رخ داده است، شدت خشکسالی‌ها متوسط تا شدید هستند و خشکسالی بسیار شدید در این دوره رخ نداده است (شکل ۸-الف). در دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۹۹) تحت سناریوی SSP1-2.6 ابتدا چندین دوره ترسالی سپس چندین دوره خشکسالی و در پایان قرن چندین دوره ترسالی پیش‌بینی شده است، شدت خشکسالی‌ها نسبت به دوره پایه افزایش یافته است، براساس این سناریو در دهه‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۶۰ خشکسالی‌های بسیار شدید رخ خواهد داد. تحت سناریوی SSP5-8.5 ابتدا دوره‌های ترسالی و سپس دوره‌های خشکسالی متعددی تا پایان قرن رخ خواهد داد، تحت این سناریو دهه‌های پایانی قرن با خشکسالی‌های پی در پی و با شدت‌های مختلف تا بسیار شدید مواجه خواهد بود به طوری که پس از دهه ۲۰۵۰ تا پایان قرن دوره ترسالی مشاهده نمی‌شود. بررسی روند شاخص SPEI با استفاده از آزمون ITA نشان می‌دهد در دوره پایه نقاط مربوط به مقادیر زیاد و متوسط شاخص عموماً پایین خط ۱:۱ قرار دارند بنابراین عدد شاخص خشکسالی روند نزولی دارد که بیانگر افزایش روند خشکسالی می‌باشد. در دوره آینده تحت سناریوی SSP1-2.6 به جز مقادیر بالا (بالا‌تر از ۱/۵) نقاط شاخص در نمودار پایین خط ۱:۱ قرار دارند. لذا چنین استنباط می‌شود که خشکسالی‌های متوسط دارای روند صعودی و خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید روند نزولی خواهند داشت. تحت سناریوی SSP5-8.5 تمامی نقاط نمودار زیر خط ۱:۱ قرار دارند که بیانگر صعودی بودن روند خشکسالی طی دوره آینده می‌باشد.





شکل (۹): شاخص SPEI برای دوره پایه (الف)، دوره ۲۰۱۵-۲۰۹۹ تحت SSP1-2.6 (ب) و تحت SSP5-8.5 (ج)
 Fig (9): SPEI index for the base period (a), the period 2015-2099 under SSP1-2.6 (b) and under SSP5-8.5 (c)



شکل (۱۰): نمودارهای ITA برای شاخص SPEI برای دوره پایه (الف)، دوره ۲۰۱۵-۲۰۹۹ تحت SSP1-2.6 (ب) و تحت SSP5-8.5 (ج)
 Fig (10): ITA diagrams for the spei index for the base period (a), the period 2015-2099 under SSP1-2.6 (b) and under SSP5-8.5 (c)

۴- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به قرارگیری حوضه آبریز دریاچه ارومیه در منطقه نیمه خشک و واقع شدن شهرهای مهمی همچون تبریز و ارومیه در این حوضه و همچنین خشک شدن بخش عمده‌ای از دریاچه ارومیه طی سال‌های اخیر، برای مقابله و سازگاری با تغییرات اقلیمی، مطالعه و پیش‌بینی اقلیم آینده این حوضه ضروری می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر دما، بارش و خشکسالی حوضه طی دوره آتی پیش‌یابی شده و روند و تغییرات پارامترهای مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشند:

- روند دمای حداکثر حوضه طی دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۵ تحت سناریوی SSP5-8.5 صعودی و تحت سناریوی SSP1-2.6 تا سال ۲۰۷۵ صعودی و بعد از آن نزولی خواهد بود. متوسط دمای حداکثر سالانه حوضه در آینده نزدیک (۲۰۵۵-۲۰۳۱) و دور (۲۰۹۵-۲۰۷۱) تحت هر دو سناریو افزایش خواهد یافت، در آینده نزدیک بین ۱/۰ (سناریوی خوش‌بینانه) تا ۱/۸ درجه سلسیوس (سناریوی بدبینانه) و در آینده دور بین ۱/۵ (سناریوی خوش‌بینانه) تا ۴/۸ درجه سلسیوس (سناریوی بدبینانه) نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد.

- روند دمای حداقل حوضه همانند دمای حداکثر می‌باشد. متوسط دمای حداقل سالانه حوضه در آینده نزدیک بین ۱/۱ (سناریوی خوش‌بینانه) تا ۱/۸ درجه سلسیوس (سناریوی بدبینانه) و در آینده دور بین ۱/۳ (سناریوی خوش‌بینانه) تا ۴/۳ درجه سلسیوس (سناریوی بدبینانه) نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد.

- بارش طی دوره آینده روند معنی‌داری ندارد، اما متوسط بارش سالانه حوضه تحت SSP1-2.6 در آینده نزدیک ۱۶/۵ درصد و در آینده دور ۸/۹ درصد افزایش می‌یابد و تحت سناریوی SSP5-8.5 در آینده نزدیک ۱/۸ درصد و در آینده دور ۷/۲ درصد افزایش می‌یابد.

- روند تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه تحت SSP5-8.5 تا پایان قرن صعودی و تحت SSP1-2.6 تا سال ۲۰۷۵ صعودی و بعد از آن نزولی می‌باشد. متوسط تبخیر و تعرق سالانه حوضه تحت SSP1-2.6 در آینده نزدیک ۱۰ درصد و در آینده دور ۱۲/۷ درصد افزایش و تحت SSP5-8.5 در آینده نزدیک ۱۴ درصد و در آینده دور ۴۲/۹ درصد افزایش می‌یابد.

- براساس شاخص SPEI طی دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۵ تحت سناریوی SSP1-2.6 تا نیمه‌های قرن عمدتاً دوره‌های ترسالی سپس تا سال ۲۰۹۰ دوره‌های خشکسالی و در ادامه تا پایان قرن دوره‌های ترسالی رخ خواهند داد. تحت سناریوی SSP5-8.5 تا اواسط قرن دوره‌های ترسالی و بعد از آن تا پایان قرن دوره‌های خشکسالی به وقوع خواهند پیوست. به طور کلی براساس شاخص ITA روند خشکسالی حوضه تحت سناریوی بدبینانه تا پایان قرن صعودی و تحت سناریوی خوش‌بینانه روند خشکسالی شدید نزولی و روند خشکسالی متوسط صعودی خواهد بود. براساس روند دما، تبخیر و تعرق و خشکسالی، تغییرات دما در وقوع خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI نقش اساسی ایفا می‌کند به طوری که تحت سناریوی SSP1-2.6 با نزولی شدن روند دما در سال‌های انتهایی قرن ۲۱، روند تبخیر و تعرق نیز نزولی شده و میزان خشکسالی کاهش یافته و حتی دوره‌های ترسالی نیز مشاهده می‌شود.

نتایج حاصل از تحقیق حاضر مبنی بر افزایش دما در آینده همسو با مطالعات پیشین از جمله مطالعات انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه (گودرزی و همکاران (۱۳۹۴)، صلاحی و همکاران (۱۳۹۶) و گودرزی و همکاران (۱۳۹۷)) می‌باشد، بارش آینده برخلاف مطالعه گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) و صلاحی و همکاران (۱۳۹۶) و همسو با مطالعه قلعه نوی و همکاران (۱۳۹۸) کاهش معنی‌داری نخواهد داشت. تبخیر و تعرق همانند مطالعه گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) افزایش و خشکسالی برخلاف مطالعه قلعه نوی و همکاران (۱۳۹۸) افزایش خواهد یافت. بنابراین براساس نتایج تحقیق حاضر مهمترین تغییرات اقلیمی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دوره آینده مربوط به افزایش دما و اثرات ناشی از آن (از جمله افزایش تبخیر و تعرق و خشکسالی) می‌باشد.

- Abramowitz, M., & Stegun, I. A. (1965). With formulas, graphs, and mathematical tables. *National Bureau of Standards Applied Mathematics Series*. e, 55, 953.
- Boé, J., Terray, L., Habets, F., & Martin, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(12), 1643-1655. <https://doi.org/10.1002/joc.1602>
- Brian, A., Hamida, N., Hassen, B., Rizwan, K., Vedaste, I., Kenny T.C. Lim Kam Sian, Victor, O. (2021). Evaluation and projection of mean surface temperature using CMIP6 models over East Africa, *Journal of African Earth Sciences* 181, 104226. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104226>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016
- Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M., IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, p. 582.
- Ghalenovi, M.A., Babaei pahnehkolai, S.F., Darzi Naftchali, A., Javid Sabbaghian, R. (2019). Analysis and forecasting drought, evapotranspiration and green water changes in Urmia Lake Basin under climate change. *Arid Regions Geographic Studies* 9 (35), 60-73
URL: <http://journals.hsu.ac.ir/jarhs/article-1-1456-fa.html>
- Goudarzi, M., Salahi, B., & Hoseini, A. (2015). Study on Effects of Climate Changes on Surface Runoff Changes Case Study. Urmia Lake Basin. *Iranian journal of Ecohydrology* 2(2), 175-189. <https://doi.org/10.22059/ije.2015.56152>
- Goudarzi, M., Salahi, B., Hosseini, S.A. (2018). Estimation of Evapotranspiration Rate Due to Climate Change in the Urmia Lake Basin. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12 (41), 1-12. URL: <http://jwmsei.ir/article-1-514-fa.html>
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). *Global surface temperature change*. *Reviews of Geophysics*, 48(4). <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, 1535 pp.
- Li, S. Y., Miao, L. J., Jiang, Z. H., Wang, G. J., Gnyawali, K. R., Zhang, J., ... & Li, C. (2020). Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015–2099. *Advances in Climate Change Research*, 11(3), 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2020.09.003>
- Li, Y., Yan, D., Peng, H., & Xiao, S. (2021). Evaluation of precipitation in CMIP6 over the Yangtze River Basin. *Atmospheric Research*, 253, 105406. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105406>
- Li, F.P., Zhang, G.X., Dong, L.Q. (2013). Studies for impacts of climate change on hydrology and water resources. *Sci. Geogr. Sin.* 33 (4), 457–464.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Öztopal, A., & Şen, Z. (2017). Innovative trend methodology applications to precipitation records in Turkey. *Water Resources Management*, 31(3), 727-737. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1343-5>
- Piani, C., Haerter, J.O., & Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 187-192. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0134-9>

- Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., ... & Fang, J. (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311), 43-51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>
- Salahi, B., Goudarzi, M., Hosseini, S.A. (2017). Prediction of the Climate Parameters in the Urmia Lake Basin during 2011-2030. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 11 (37), 47-56.
URL: <http://jwmsei.ir/article-1-382-fa.html>
- Samantaray, A. K., Ramadas, M., & Panda, R. K. (2022). Changes in drought characteristics based on rainfall pattern drought index and the CMIP6 multi-model ensemble. *Agricultural Water Management*, 266, 107568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107568>
- Şen, Z. (2012). Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9), 1042-1046. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000556](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000556)
- Şen, Z. (2014). Trend identification simulation and application. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), 635-642. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000811](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000811)
- Sung, H.M., Kim, J., Shim, S. et al., (2021), Climate Change Projection in the Twenty-First Century Simulated by NIMS-KMA CMIP6 Model Based on New GHGs Concentration Pathways. *Asia-Pacific J Atmos Sci* 57, 851-862. <https://doi.org/10.1007/s13143-021-00225-6>
- Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112, 449-468. <https://doi.org/10.1002/joc.2168>
- Van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S., Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109:5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V., & Lettenmaier, D. P. (2004). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic change*, 62(1-3), 189-216. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e>
- Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... & Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *Atmospheric Research*, 246, 105111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105111>