



Effectiveness of the MPI-ESM-LR Model in Evaluating the Monthly Temperature Anomaly of Iran under Representative Concentration Pathway (RCP) Scenarios

Fatemeh Taghavinia¹ | Batool Zeynali^{2✉} | Abbasali Dadashi Roudbari³

1. PhD student, Department of Physical Geography, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabili, Iran. E-mail f.taghavinia@uma.ac.ir
2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Physical Geography, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabili, Iran. E-mail: zeynali.b@uma.ac.ir
3. Postdoctoral Research Associate, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: a.dadashi@um.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 4 February 2023

Received in revised form 16
May 2023

Accepted 24 May 2023

Published online 21 July 2024

Keywords:

Iran, Temperature anomaly,
Coupled Model Intercomparison
Project Phase-5, CORDEX, Max
Planck. model.

ABSTRACT

Climate change is a key factor in most weather-related disasters worldwide. Regarding its distinctive geographical location and diverse climate, Iran has the most variable climate in the world. The present study aims to investigate the effectiveness of the MPI-ESM-LR model from the CMIP5 model series in predicting the monthly temperature of Iran under representative concentration pathway scenarios (RCPs) with the CORDEX-WAS project. In this research, for the historical period of 1980-2005, the daily air temperature data of 49 synoptic stations of the country and the MPI-ESM-LR model under the CORDEX project were used. Likewise, for the future period, from the predicted temperature data of RCP 8.5, RCP 4.5, and RCP 2.6 scenarios of the mentioned model in three periods of the near-future (2021-2050), mid-future (2051-2075) and far-future (2076-2100) was used. Validation of the model was done with three statistical indices: r, RMSE, and MBE. The results revealed that the model has a good performance. The slope of the temperature trend in station data and model data has been increasing in the historical period and the future period in RCP8.5 and RCP4.5 in all months, the temperature trend slope has been observed in every decade. In all months, the maximum anomaly of temperature under the scenarios studied in all three future periods can be seen in the northwest and western highlands. The eastern and southeastern regions of Iran have indicated minimum temperature anomalies, except in RCP 2.6 and RCP 8.5, respectively, the southern coasts and the northeastern heights of the country also show minimum temperature anomalies. In the cold half of the year, the minimum area of temperature anomaly has been extended to the north-western heights and low-altitude interior regions of the country.

Cite this article: Taghavinia, F., Zeynali, B., & DadashiRoudbari, A. (2024). Effectiveness of the MPI-ESM-LR Model in Evaluating the Monthly Temperature Anomaly of Iran under Representative Concentration Pathway (RCP) Scenarios. *Journal of Geography and Planning*, 28 (88), 63-79. <http://doi.org/10.22034/GP.2023.56386.3130>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/GP.2023.56386.3130>

Publisher: University of Tabriz.

Extended Abstract

Introduction

Climate change is a key factor in most weather-related disasters worldwide, and the increase in frequency and intensity of extreme events is well documented in various studies. Based on the IPCC report, the climate is continually changing under the complex effects of natural and artificial factors on a global and regional scale. Climate models rely on integrated simulations of the ocean, land surface, atmosphere, and sea ice systems to understand the Earth's climate system and its future changes as accurately as possible. The current research aimed to evaluate the monthly temperature anomaly of Iran under representative concentration pathway scenarios (RCPs) with the MPI-ESM-LR model from the CMIP5 model series by using the CORDEX-WAS dynamic downscaling method and using satellite data and tried to find the answers to these questions, will the MPI-ESM-LR model have a suitable performance for predicting Iran's temperature in future periods? Will the temperature increase in the future? The results of the present study can be valuable for climate modeling and environmental stresses resulting from climate change in Iran.

Data and Method

In the current research, for the historical period of 1980-2005, the daily air temperature data of 49 synoptic stations of the country and the MPI-ESM-LR model (from the CMIP5 model series) under the CORDEX-WAS project with a spatial resolution of 0.44 arc degrees were used. Likewise, for the future period, from the predicted temperature data of RCP 8.5, RCP 4.5, and RCP 2.6 scenarios of the mentioned model in three periods of the near-future (2021-2050), mid-future (2051-2075) and far-future (2076-2100) was used. Three statistical indices r (Pearson's correlation coefficient), RMSE (root mean square error), and MBE (mean deviation error) were used to validate the model.

Discussion and conclusion

The results of validating the historical data of the model with temperature station data in 49 stations during the statistical period of 1980-2005 regarding the three statistical indices r , RMSE, and MBE reveal that the r index with a correlation of 0.99, RMSE with 0.69 °C and MBE with 2.20 °C indicates the better performance of this model in parametric predicting the temperature in Iran. The temperature forecast investigation based on the MPI-ESM-LR model on an annual scale disclosed that under the pessimistic scenario of RCP8.5, in all three future periods, the average air temperature for the whole of Iran compared to the historical period (1980-2005) will increase as 3.33 °C, which has indicated the highest increase in temperature compared to the two mid-future scenarios of RCP 4.5 with values of 1.89 °C and the optimistic scenario of RCP 2.6 with values of 1.09 °C. Inspecting the slope of the temperature trend revealed that the temperature changes during the historical period of the model in average Iran, except January, with a decreasing trend (-0.083 °C in each decade) had a significantly increasing trend in other months. Likewise, the slope of the station data trend has been increasing in all months during the historical period. The temperature forecast until the end of this century shows that in RCP4.5 and RCP8.5, the temperature has an increasing trend, while in the optimistic RCP2.6 scenario, except for January, February, and March, with the increasing trend of temperature to a small amount (respectively 0.011, 0.004 and 0.002 degrees in each decade), in the rest of the months, the trend of decreasing temperature is predicted. Inspecting the spatial extent of the maps reveals that in the historical period, in all months, the maximum temperature is observed in the south and west coasts of Iran and the minimum temperature is observed in the high mountain areas of the west and northwest of the country. In all scenarios and future periods, the maximum anomaly of temperature is observed in the mountainous regions of the northwest and west of the country in some months (April, August, October, and September), and in RCP4.5 and RCP8.5, the maximum temperature anomaly area has also extended to the center of Iran. The east and southeast in all periods and scenarios show the minimum temperature anomaly, which in RCP 2.6, the southern coasts of the country, and RCP 8.5, the heights of Binalud and Aladagh in the northeast of the country are added to the area of minimum temperature anomaly areas.

Results

Future changes in extreme weather events, including temperature, will lead to great losses for society, the economy, and natural ecosystems. The development of cities, the increase in using vehicles, the increase in pollutants because of the industrialization of activities, the increase in the concentration of greenhouse gases, the destruction of land, the significant and serious lack of precipitation, the increase in the potential of temperature increase in future periods. The harsh increase in air temperature in the high and snowy mountainous areas of the northwest and west of the country will lead to the melting of ice and increased evaporation and the reduction of water resources and vegetation in these areas. Likewise, the high positive temperature anomaly in the central,

eastern, and southeastern regions of Iran, which have dry and semi-arid climates, will lead to increased drought and desertification and increased soil salinity through increased evaporation of surface water. Regarding Iran's climate, which is mostly dry, following the increase in temperature even in optimistic conditions, the country needs an integrated water resources management plan and a long-term viewpoint of the relevant managers and officials. Because the upsurge in temperature generates challenges in various fields such as environment, agriculture, food security, social, economic, cultural, political, international.

References

- Ahmadi, H., Azizzadeh, J., (2020). **The impacts of climate change based on regional and global climate models (RCMs and GCMs) projections (case study: Ilam province)**. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6: 685–696.
- Ahmadi, H., Fallah Ghalhari, G. A., Baaghdeh, M. (2019). **Projection of Climate Change Impacts on Seasonal Precipitation in Iranian Cold Regions Based on Radiative Forcing Scenarios (RCP)**. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(1), 177-196 (in Persian).
- Asgari, E., Baaghdeh, M., Kamyar, A., Entezari, A., & Hosseini, M. (2020). **An Overview of Climate Changes of Temperature and Precipitation in the CORDEX Range of South Asia (Case Study: Dez Watershed)**. *Journal of Geography and Regional Development*, 18(1), 252-225 (in Persian).
- Ashraf Vaghefi, S., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., Abbaspour, K.C. (2019). **The future of extreme climate in Iran**, *Scientific Reports*, 9(1464): 1-11.
- Bhuyan, D.I., Mohymenul, I., Bhuiyan, E.K., (2018). **A Trend Analysis of Temperature and Rainfall to Predict Climate Change for Northwestern Region of Bangladesh**. *American Journal of Climate Change*, 7: 115-134.
- Carvalho, D., Cardoso Pereira, S., Rocha, A., (2020). **Future surface temperature changes for the Iberian Peninsula according to EUROCORDERX climate projections**, *Clim. Dyn*, 56(1–2): 123–138.
- Cheruy, F., Dufresne, J.L., Hourdin, F., Ducharne, A., (2014). **Role of clouds and land-atmosphere coupling in midlatitude continental summer warm biases and climate change amplification in CMIP5 simulations**. *Geophysical Research Letters*, 41: 6493–6500.
- Darand, M., (2020). **Future changes in temperature extremes in climate variability over Iran**. *Meteorological Applications*, 27(6): 1-16.
- Di Sante, F., Coppola, E., Giorgi, F., (2021). **Projections of river floods in Europe using EURO-CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations**. *Int. J. Climatol*, 41: 3203–3221.
- Edwards, P.N., (2011). **History of climate modelling**. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2: 128–139.
- Eyni-Nargeseh, H., Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Mokhtassi-Bidgoli, A., (2019). **Analysis of growth functions that can increase irrigated wheat yield under climate change**, *Meteorological Applications*, 27(1): 1-10.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., Dadashi-Roudbari, A., (2019). **Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran**. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3-4): 1539-1562.
- Fischer, E.M., Knutti, R., (2016). **Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models**. *Nat. Clim. Change*, 6: 986–991.
- Ghazi, B., Jeihouni, E., (2022). **Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran**. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7): DOI: 10.1007/s12517-022-09848-z.
- Gholampour Shemami, Y., Majnoun Hosseini, N., bazrafshan, J., sharifzadeh, F., Kanouni, H. (2020). **Assessing Precipitation and Reference Potential Evapotranspiration in the Current Climate and under CORDEX Climate Change Projections in Major Drylands Region of Kurdistan Province**. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2583-2594 (in Persian).
- Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, Ch., et al (2013). **Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5**. *J. Adv. Model. Earth Syst*, 5: 572–597.
- Guo, D.L., Wang, H.J. (2016). **Comparison of a very-fine-resolution GCM with RCM dynamical downscaling in simulating climate in China**, *Adv. Atmos. Sci*, 33: 559–570.
- Hagemann, S., Göttel, H., Jacob, D., Lorenz, P., Roeckner, E., (2009). **Improved regional scale processes reflected in projected hydrological changes over large European catchments**, *Climate Dynamics*, 32(6): 767-781.
- Hamed, M.M., Nashwan, M.S., Shahid, S., (2022). **Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia**. *Atmospheric Research*, 265: 1-14.

- Hassan, I., Kalin, R.M., White, C.J., Aladejana, J.A. (2020). **Selection of CMIP5 GCM Ensemble for the Projection of Spatio-Temporal Changes in Precipitation and Temperature over the Niger Delta, Nigeria.** *Water*, 12(2), 385.
- IPCC, (2013). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Cambridge University Press, 1535 pp.
- Jafarbegloo, N., khorshiddoust, A., rezaei banafsheh, M., Rostamzadeh, H. (2021). **Study of Minimum temperature variations in the northwest of the country using the HadCM3 and MPEH5 global output models statistical output statistics.** *Geography and Planning*, 25(77), 17-30 (in Persian).
- kamyar, A., Movahedi, S., Yazdanpanah, H. (2017). **Projection of Minimum and Maximum Air Temperatures in Isfahan Province during 2050-2017.** *Journal of Climate Research*, (29), 37-54 (in Persian).
- Kohyama, T., Hartmann, D.L., Battisti, D., (2017). **La Niña-like Mean-State Response to Global Warming and Potential Oceanic Roles.** *Journal of Climate*, 30(11): 4207-4225.
- lotfi gharanchai, S., shakiba, A., dashtbozorgi, A., rabbani, F., akbari Azirani, T. (2021). **Modeling and Predicting Climatic Elements of Temperature and Precipitation (Case Study: Ahar Synoptic Station).** *Physical Geography Quarterly*, 14(53), 57-74 (in Persian).
- mahdavian, S., Zeynali, B., Salahi, B. (2022). **Evaluation of land use changes in Kiwi Chay Basin and analysis of precipitation and temperature changes in future periods with CMIP5 models.** *Geography and Planning*, (), -. doi: 10.22034/gp.2022.50623.2977(in Persian).
- Miri, M., Masoompour Samakosh, J., Razinei, T., Jalilian, A., Mahmodi, M., (2021). **Spatial and Temporal Variability of Temperature in Iran for the Twenty-First Century Foreseen by the CMIP5 GCM Models.** *Pure and Applied Geophysics*, 178: 169-184.
- Muller, W.A., Baehr, J., Haak, H., Jungclaus, J.H., Kroger, J., Matei, D., et al, (2012). **Forecast skill of multi-year seasonal means in the decadal prediction system of the Max Planck Institute for Meteorology.** *Geophysical Research Letters*, 39 (22): 1-7.
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C.W. et al. (2019). **Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming.** *Scientific Reports*, 9: 1-10.
- Nayak, S., Mandal, M., Maity, S., (2018). **RegCM4 simulation with AVHRR land use data towards temperature and precipitation climatology over Indian region.** *Atmospheric Research*, 214(1): 163-173.
- Ndiaye, PM., Bodian, A., Diop, L., Dezetter, A., Guilpart, E., Deme, A., Ogilvie, A. (2021). **Future trend and sensitivity analysis of evapotranspiration in the Senegal River Basin.** *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35: 1-23.
- Pathak, R., Sahany, S., Mishra, S. K., Dash, S.K., (2019). **Precipitation biases in CMIP5 models over the South Asian Region.** *Scientific Reports*, 9(1): 1-13.
- pouyanfar, N., Mozafari, G., Omidvar, K., Mazidi, A. (2022). **Trend of changes in pistachio plant chilling need and its prediction using SDSM model (Case study: Yazd).** *Geography and Planning*, 26(80), 45-60 (in Persian).
- Rahimi, J., Laux, P., Khalili, A. (2020). **Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Koppen–Geiger climate zones.** *Theor Appl Climatol*, 141: 183–199.
- Rehman, N., Adnan, M., Ali, S. (2018). **Assessment of CMIP5 climate models over South Asia and climate change projections over Pakistan under representative concentration pathways.** *International Journal of Global Warming*, 16 (4): 381-415.
- Shakeri, H., Motiee, H., McBean, E. (2020). **Projection of important climate variables in large cities under the CMIP5–RCP scenarios using SDSM and fuzzy downscaling models.** *Journal of Water and Climate Change*, 1802-1823.
- Shi, Y., Wang, G., Gao, X.J. (2018). **Role of resolution in regional climate change projections over China.** *Climate Dyn*, 51: 2375–2396.
- Shrestha, S., Bajracharya, AR., Mukand, S.B. (2016). **Assessment of risks due to climate change for the Upper Tamakoshi Hydropower Project in Nepal.** *Climate Risk Management*, 14: 27–41.
- Su, F., Duan, X., Chen, D., Hao, Z., Cuo, L. (2013). **Evaluation of the Global Climate Models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau.** *Journal of climate*, 26: 3187-3208.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A. (2012). **An Overview of CMIP5 and the Experiment Design.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93: 485–498.
- Usta, D.F.B., Teymouri, M., Chatterjee, U. (2022). **Assessment of temperature changes over Iran during the twenty-first century using CMIP6 models under SSP1-26, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios.** *Arabian Journal of Geosciences*, 15 (416), doi.org/10.1007/s12517-022-09709-9.
- Wang, C., Zhang, L., Lee, S.K., Wu, L., Mechoso, C. (2014). **A global perspective on CMIP5 climate model biases.** *Nature Climate Change*, 201–205.

- Yan, L., Liu, X. (2014). **Has climatic warming over the Tibetan Plateau paused or continued in recent years.** *J. Earth Ocean Atmos. Sci*, 1(1): 13-28.
- Yang, X., Wood, E.F., Sheffield, J., Ren, L., Zhang, M., Wang, Y., (2018). **Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for China from CMIP5 models.** *Journal of Hydrometeorology*, 19(3): 609-623.
- zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A. (2021). **Projected changes in temperature over Iran by 2040 based on CMIP6 multi-model ensemble.** *Physical Geography Research Quarterly*, 53(1), 75-90 (in Persian).
- Zhang, D.F., Han, Z.Y., Shi, Y. (2017). **Comparison of climate projections between driving CSIRO-MK3.6.0 and downscaling simulation of RegCM4.4 over China.** *Advances in Climate Change Research*, 8(4): 245-255.

بررسی مدل MPI-ESM-LR در پیش‌نگری دمای ماهانه ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)

فاطمه تقوی‌نیا^۱ | بتول زینالی^۲ | عباسعلی داداشی رودباری^۳

۱. دانشجویان دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: f.taghavinia@uma.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استاد هیات علمی دانشگاه محقق اردبیلی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: zeynali.b@uma.ac.ir
۳. استاد گه‌پژوهشگر پسادکتری، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد ایران. رایانامه: a-dadashi@um.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱</p> <p>کلیدواژه‌ها: ایران، بی‌هنجاری دما، پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم، کوردکس، مدل ماکس پلانک.</p>	<p>تغییرات اقلیمی مسئول بیشتر بلایای مرتبط با آب و هوا در سراسر جهان است. ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی بی‌نظیر و آب و هوای متنوعی که دارد بیش‌ترین تغییرپذیری آب و هوا را در جهان دارد. هدف پژوهش حاضر بررسی کارایی مدل MPI-ESM-LR از سری مدل‌های CMIP5 در پیش‌نگری دمای ماهانه ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) با پروژه CORDEX-WAS است. در این پژوهش برای دوره تاریخی ۱۹۸۰-۲۰۰۵ از داده‌های دمای هوای روزانه ۴۹ ایستگاه سینوپتیک کشور و مدل MPI-ESM-LR تحت پروژه کوردکس استفاده شد. همچنین برای دوره آینده از داده‌های دمای پیش‌نگری شده سناریوهای RCP۸/۵، RCP۴/۵ و RCP۲/۶ مدل مذکور طی سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) استفاده شد. اعتبارسنجی مدل با سه شاخص آماری α، RMSE، MBE انجام شد. نتایج نشان داد که مدل از عملکرد خوبی برخوردار است. شیب روند دما در داده‌های ایستگاهی و داده‌های مدل در دوره تاریخی افزایشی بوده و در دوره آینده در RCP۴/۵ و RCP۸/۵ در تمام ماه‌ها شیب روند افزایشی دما در هر دهه مشاهده شده است. در تمام ماه‌ها پیشینه بی‌هنجاری دما تحت سناریوهای مورد مطالعه در هر سه دوره آتی در شمال غرب و ارتفاعات غربی دیده می‌شود. مناطق شرق و جنوب شرق ایران کمینه بی‌هنجاری دما را نشان داده‌اند که به طور استثنای در RCP۲/۶ و RCP۸/۵ به ترتیب سواحل جنوب و ارتفاعات شمال شرق کشور نیز کمینه بی‌هنجاری دما را نمایانگر هستند. در نیمه سرد سال به صورت محدود پهنه کمینه بی‌هنجاری دما به ارتفاعات شمال غرب و نواحی کم‌ارتفاع داخلی کشور نیز کشیده شده است.</p>

استناد: تقوی‌نیا، فاطمه؛ زینالی، بتول و داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۳). بررسی مدل MPI-ESM-LR در پیش‌نگری دمای ماهانه ایران تحت سناریوهای

واداشت تابشی (RCPs). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۸ (۸۸)، ۶۳-۷۹.

<http://doi.org/10.22034/GP.2023.56386.3130>



© نویسنده‌گان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

از گذشته تا کنون ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر تمام فعالیت‌های انسانی و سازگاری با این تغییرات برای بشر از اهمیت اساسی برخوردار است (کاروالهو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۲۷). در حال حاضر، صرف نظر از اقدامات فعلی یا آتی انجام شده برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییر اقلیم در مقیاس جهانی در حال وقوع است و در سال‌های اخیر اثرات فاجعه بار آن در بسیاری از کشورها مشاهده شده است (فیشر و کنوتی^۲، ۲۰۱۶: ۹۸۸). تغییرات اقلیمی مسئول بیشتر بلایای مرتبط با آب و هوا در سراسر جهان است و افزایش فراوانی وقوع و شدت تأثیر رویدادهای فرین اقلیمی در مطالعات مختلف به خوبی ثبت شده است (دی سنت^۳ و همکاران، ۲۰۲۱: ۳۲۰۷؛ مایر^۴ و همکاران، ۲۰۱۹: ۲). طبق پنجمین گزارش ارزیابی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC^۵) اقلیم تحت تأثیر عوامل طبیعی و مصنوعی به طور مداوم در حال تغییر در مقیاس جهانی و منطقه‌ای است و میانگین دمای جهان در دوره ۱۸۸۰-۲۰۱۲ به طور متوسط ۰/۸۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است و احتمالاً تا پایان قرن بیست و یکم ۰/۳-۴/۸ درجه سلسیوس افزایش یابد (IPCC, 2013). گرمایش هوا به دلیل افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای متأثر از فعالیت‌های انسانی می‌باشد که تغییرات اقلیمی ناشی از این گرمایش در سراسر جهان مشاهده شده است (هاگمن^۶ و همکاران، ۲۰۰۹: ۷۷۵).

مدل‌های اقلیمی برای شناختن هرچه دقیق‌تر سیستم آب و هوای زمین و تغییرات آینده آن بر شبیه‌سازی‌های تلفیقی از اقیانوس، سطح زمین، جو و سیستم‌های یخی دریا متکی هستند (ادواردز^۷، ۲۰۱۱: ۱۳۱). نمونه‌های مهم، پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP^۸) برای شبیه‌سازی آب و هوا هستند که سهم عمده‌ای در گزارش‌های ارزیابی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم تا فاز ۵ دارند (تیلور^۹ و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۸۷). مدل‌های اقلیمی شرکت کننده در پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده در دهه‌های اخیر به تدریج بهبود یافته‌اند، اما به دلیل برخی خطاها، با بسیاری از عدم قطعیت‌ها و یا سوگیری‌ها همراه هستند (وانگ^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۰۲). از آنجایی که دمای هوا در مرکز بازخوردهای مهم بین اجزای سیستم آب و هوایی متعدد قرار دارد، سوگیری (یا خطای) آن می‌تواند بر قابلیت اطمینان کلی شبیه‌سازی‌های مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده و پیش‌بینی‌های آب و هوایی آینده تأثیر گذارد (چروی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۴: ۶۴۹۵). مطالعات پیشین این سوگیری‌ها را به عوامل متعددی از جمله عدم نمایش ابر، بروز خطا در گردش اتمسفری بزرگ مقیاس، عدم نمایش صحیح تبخیر و ناتوانی در ثبت رویدادهای بارندگی شدید نسبت داده‌اند (ژانگ^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۴۷). با این وجود، این سوگیری‌ها همچنان به عنوان یک مشکل تحقیقاتی وجود دارد که در پروژه‌ها و پیش‌بینی‌های مدل‌های آب و هوایی باید بهبود یابد. برای برطرف کردن این سوگیری‌ها، از روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری و دینامیکی استفاده می‌شود که خطاها را به حداقل ممکن می‌رساند تا پیش‌بینی

^۱Carvalho

^۲Fischer & Knutti

^۳Di Sante

^۴Myhre

^۵Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

^۶Hagemann

^۷Edwards

^۸Coupled Model Intercomparison Project

^۹Taylor

^{۱۰}CMIP

^{۱۱}Wang

^{۱۲}Cheruy

^{۱۳}Zhang

مدل‌های آب و هوای جهانی (GCM) دقیق‌تر باشد (شی و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۳۸۲؛ گو و وانگ، ۲۰۱۶: ۵۶۱).

تاکنون با استفاده از روش‌های مختلفی، آب و هوای ایران در شرایط فعلی و آینده مورد بررسی قرار گرفته است؛ با این حال، تحقیقاتی که با استفاده از جدیدترین روش ریزگردانی دینامیکی کوردکس^۴ در پیش‌نگری فراسنج دما باشد در مورد کل ایران نسبتاً معدود است. در حال حاضر در رابطه با بررسی فراسنج دما با به‌کارگیری روش ریزگردانی دینامیکی کوردکس فقط چند مطالعه آن هم با تمرکز بر یک منطقه خاص یا روی حوضه‌های آبخیز یا مناطق کوچک انجام شده است مانند پژوهش کامیار و همکاران (۱۳۹۶) در ارزیابی دما در استان اصفهان، پژوهش عسگری و همکاران (۱۳۹۹) در ارزیابی تغییرات دما و بارش در حوضه آبخیز دز، پژوهش احمدی و عزیززاده (۲۰۲۰) در مطالعه تغییر دمای حوضه کرخه، بررسی‌های غلام‌پور شمایی و همکاران (۱۳۹۸) در ارزیابی بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در شرایط گرمایش هوا در نواحی عمده تولید محصولات دیم در استان کردستان. در عین حال، ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی بی‌نظیر و آب و هوای متنوعی که دارد یکی از مناطقی است که بیش‌ترین تغییرپذیری آب و هوا را در جهان دارد. بر این اساس لزوم انجام پژوهشی در کل کشور با داده‌های با تفکیک افقی مناسب، ضروری است و داده‌هایی با تفکیک افقی بالا می‌توانند ویژگی‌های دقیق تغییرات آب و هوایی را در سراسر ایران بهتر نشان دهند. بنابراین، با توجه به گرمایش کره زمین چه در شرایط گذشته و گرمایش مورد انتظار در آینده، مطالعه شرایط آب و هوایی دمای ایران با استفاده از رویکرد ریزگردانی دینامیکی موسوم به CORDEX-WAS با مدل MPI-ESM-LR^۵ از سری مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPS) یک کار ضروری برای تحقیقات مرتبط با تغییر اقلیم است و می‌تواند تغییرات دما در دوره‌های آتی را به خوبی نشان دهد.

پژوهش‌های زیادی با استفاده از مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم به شبیه‌سازی دما با بکارگیری پروژه کوردکس در سطح جهان پرداخته‌اند که در این میان می‌توان به مطالعات مولر^۷ و همکاران (۲۰۱۲) در اقیانوس اطلس شمالی، کویاما^۸ و همکاران (۲۰۱۷) در نواحی استوایی، بویان^۹ و همکاران (۲۰۱۸) در بنگلادش، حسن^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۰) در نیجریه، ندای^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۱) در حوضه رودخانه سنگال و حامد^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۲) در جنوب شرق آسیا اشاره کرد که همگی بیانگر گرمایش دمای هوا در دوره‌های آتی تحت تاثیر تغییر اقلیم و عملکرد بهینه پروژه کوردکس در پیش‌بینی فراسنج دما هستند. در مورد استفاده از سایر روش‌های ریزگردانی در مطالعات شبیه‌سازی دما در آینده می‌توان به مطالعات شرسنا^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۶) در نپال با مدل سوات، ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) در چین با RegCM4.4؛ نایاک^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۸) در هند با AVHRR و RegCM4؛ فلاح قاهره^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۹) و شاکری^{۱۶} و همکاران (۲۰۲۰) در ایران با SDSM

^۱ General Circulation Models/ Global Climate Models

^۲ Shi

^۳ Guo and Wang

^۴ Cordinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX)

^۵ Max Planck Institute Earth System Model Low Resolution

^۶ Representative Concentration Pathways

^۷ Muller

^۸ Kohyama

^۹ Bhuyan

^{۱۰} Hassan

^{۱۱} Ndiaye

^{۱۲} Hamed

^{۱۳} Shrestha

^{۱۴} Nayak

^{۱۵} Fallah-Ghalhari

^{۱۶} Shakeri

MarksimGCM اشاره کرد که همگی گویای وقوع تغییر اقلیم و افزایش دمای هوا در آینده هستند. همچنین در میان پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص پیش‌نگری فراسنج دما در ایران می‌توان به مطالعات جعفری‌گلو و همکاران (۱۴۰۰)، زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰)، مهدویان و همکاران (۱۴۰۱)، رحیمی^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، دارند^۲ (۲۰۲۰)، میری^۳ و همکاران (۲۰۲۱)، اوستا^۴ و همکاران (۲۰۲۲)، قاضی و جیحونی^۵ (۲۰۲۲) اشاره کرد که با استفاده از مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم و ششم تحت RCP۴/۵ و RCP۸/۵ وجود بی‌هنجاری مثبت دما را در دوره‌های آتی تا سال ۲۱۰۰ در نواحی مختلف ایران نشان داده‌اند که این گرمایش هوا نیازمند برنامه‌ریزی دقیق برای کشف انرژی‌های تجدیدپذیر و ایجاد برنامه‌هایی برای به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای برای غلبه بر خطر افزایش اثرات تغییرات آب و هوایی می‌باشد. جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در مقایسه با مطالعات جهانی که در زمینه تغییر اقلیم در سطح منطقه‌ای با بکارگیری مدل دینامیکی انجام شده‌اند؛ مطالعاتی که از مدل‌های دینامیکی در ایران استفاده کرده باشند؛ بسیار محدود است. بنابراین این پژوهش با استفاده از روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX-WAS (جنوب آسیا) به ارزیابی بی‌هنجاری ماهانه دمای ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) با مدل MPI-ESM-LR از سری مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم پرداخته است و به دنبال یافتن پاسخ این سوال است که آیا مدل MPI-ESM-LR عملکرد مناسبی جهت پیش‌نگری دمای ایران در دوره‌های آینده خواهد داشت؟ و آیا شرایط دمای هوا در دوره‌های آینده افزایشی خواهد بود؟ نتایج این مطالعه برای مدل‌سازی اقلیمی و تنش‌های محیطی منتج از تغییرات آب و هوایی در ایران می‌تواند مفید باشد.

مبانی نظری

طی سال‌های اخیر پژوهشگران آب و هوا شناسی از مدل‌های آب و هوایی منطقه‌ای مختلف به منظور تولید مجموعه چندگانه از داده‌های ریزگردانی شده پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم توسط WCRP۶ استفاده کردند. پروژه کوردکس در اقدامی هماهنگ با انجمن بین‌المللی ریزگردانی منطقه‌ای باهدف پیش‌نگری تغییرات آب و هوایی به‌عنوان ورودی مطالعات دگرگونی آب و هوا و راهکارهای سازگاری با آن ایجاد گردید. هدف اصلی پژوه بین‌المللی کوردکس شناخت بهتر تغییر اقلیم محلی و منطقه‌ای و بهبود کارایی مدل‌ها و روش‌های ریزگردانی نمایی است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۷۵). سناریوهای RCP شامل یک سناریوی کاهش‌ی سختگیرانه (RCP۲/۶)، دو سناریوی حد واسط (RCP۴/۵ و RCP۶) و یک سناریوی بدبینانه (RCP۸/۵) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا می‌باشند. RCP۲/۶، RCP۴/۵، RCP۶ و RCP۸/۵ اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را در سال ۲۱۰۰ به ترتیب تا ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ وات بر متر مربع تخمین زده‌اند (پویان‌فر و همکاران، ۱۴۰۱: ۴۸). مدل MPI-ESM-LR توسط موسسه هواشناسی ماکس پلانک آلمان طراحی شده است. سیستم مدل MPI-ESM برای انواع متنوعی از تنظیمات که در وضوح متفاوت هستند از ECHAM6 یا MPIOM (MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR) یا راه-اندازی مدار و پوشش گیاهی (MPI-ESM-P) توسعه یافته است که ورژن با وضوح پایین MPI-ESM-LR آن در طیف وسیعی از شبیه‌سازی‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم مورد استفاده قرار گرفته است تا امکان استنتاج در کل طراحی تجربی پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم فراهم شود (جورجتا^۷ و همکاران، ۲۰۱۳: ۵۷۴).

داده و روش‌ها

^۱ Rahimi

^۲ Darand

^۳ Miri

^۴ Usta

^۵ Ghazi & Jeihouni

^۶ World Climate Research Program

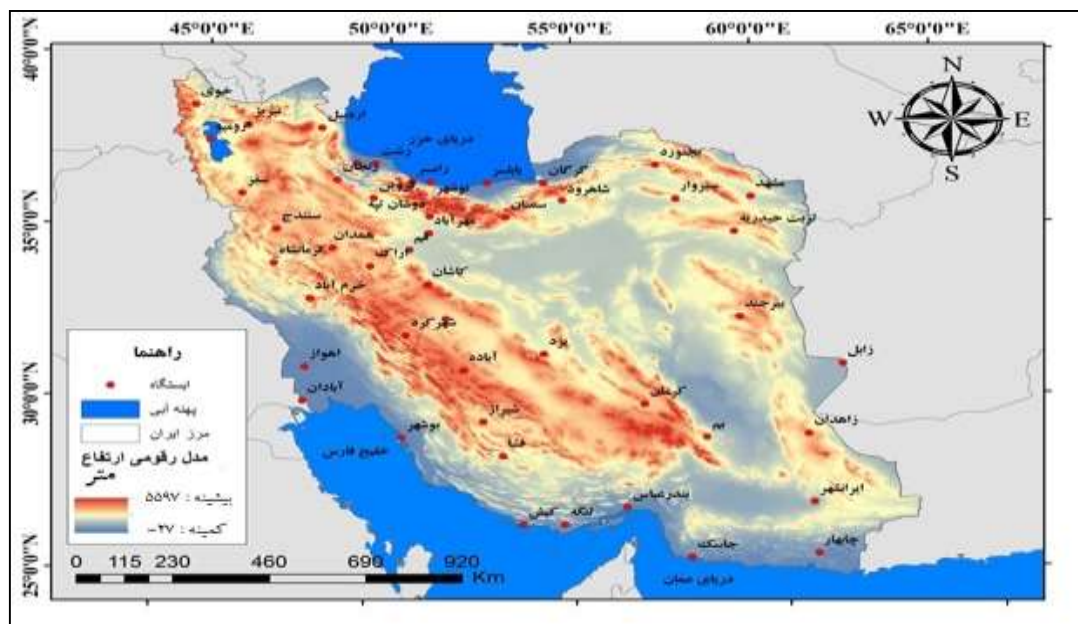
^۷ Giorgetta

منطقه مورد مطالعه

ایران کشوری در جنوب غرب آسیا است و دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. بلندترین نقطه کشور در قله دماوند با ۵۶۱۰ متر ارتفاع و پست‌ترین نقطه در سواحل جنوبی دریای خزر با ارتفاع کمتر از ۲۸ متر واقع شده است (شکل ۱). رشته کوه‌های البرز در شمال و زاگرس در غرب مانند سدی مانع از ورود رطوبت به نواحی مرکزی کشور می‌شود در نتیجه بارش در مناطق مرکزی کشور نسبت به سایر مناطق بسیار ناچیز است. ایران همچنین میزبان یکی از گرم‌ترین بیابان‌های جهان یعنی دشت لوت است. مطابق روش طبقه‌بندی اقلیمی کوپن بیش از ۸۰ درصد از مساحت کشور در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده است (زرین و داداداشی رودباری، ۱۴۰۰: ۸۰).

داده‌های دمای ایستگاه همدید

جهت انتخاب مدل بهینه برای پیش‌نگری دمای ماهانه ایران ۸ مدل شامل *CanESM2*، *CSIRO-Mk3-6-0*، *GFDL-ESM2M*، *ICHEC-EC-EARTH*، *MIROC-ESM*، *MPI-ESM-LR*، *MIROC-ESM*، *IPSL-CM5A-MR* و *NorESM1-M* مورد بررسی قرار گرفت. نتایج درستی سنجی مدل‌های مذکور نشان داد که مدل *MPI-ESM-LR* با حداقل اریبی بهترین مدل برای پیش‌نگری دمای ماهانه ایران در دوره‌های آتی است. جهت درستی سنجی داده‌های دمای هوا که از مدل *MPI-ESM-LR* استخراج شده بود، ۴۹ ایستگاه همدید در سطح کشور طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۰ (مطابق داده‌های تاریخی پروژه کوردکس) انتخاب شد که معیارهای طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا هر ایستگاه برای انتخاب ایستگاه‌ها با پراکندگی مناسب در تمام مناطق کشور مد نظر قرار گرفت (شکل ۱). در تحقیق حاضر جهت ریزگردانی دینامیکی از داده‌های محدوده *CORDEX-WAS* با قدرت تفکیک مکانی ۰/۴۴ درجه قوسی، مدل *RCA4* برای *RCM* و گروه *r1i1p1* (*Ensemble*) استفاده می‌شود. پروژه *CORDEX-WAS* به صورت دینامیکی ریزمقیاس شده است و خروجی پروژه‌های ریزمقیاس شده ضرورتی به انجام تصحیح اریبی ندارند. در این تحقیق قصد داریم که برون‌داد مستقیم پروژه *CORDEX-WAS* را بر روی ایران بررسی کنیم لذا نتایج به‌دست آمده از تحقیق دارای دستاوردهای زیادی در زمینه تغییر اقلیم به ویژه در محدوده *CORDEX-WAS* دارد. برای برآورد شیب روند داده‌ها در سری زمانی، از روش ناپارامتریک سنس استفاده می‌شود. این روش یکی از روش‌های سودمند در این زمینه است. این روش ابتدا توسط تیل در سال (۱۹۵۰) ارائه و سپس توسط سن (۱۹۶۸) بسط داده شد. این روش نیز همانند بسیاری دیگر از روش‌های ناپارامتریک بر ارزیابی تفاوت بین مشاهدات سری زمانی استوار است (داداداشی-رودباری، ۱۳۹۹).



شکل (۱). ایستگاه‌های هم‌دید منتخب ایران

منبع: نگارندگان

تجزیه و تحلیل داده‌ها

مدل و سناریوهای منتخب

مجموعه داده‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم که برای گزارش ارزیابی پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده می‌شود به طور گسترده در مطالعات آب و هوا، به ویژه برای ارزیابی اقلیم آینده براساس جدیدترین مدل‌های آب و هوای جهانی مورد استفاده قرار گرفته است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۸: ۶۱۵). این پژوهش به بررسی کارایی مدل MPI-ESM-LR که از مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم است، در ارزیابی دمای هوا در گستره کشور ایران بر اساس سه سناریو RCP۲/۶ (خوش بینانه)، RCP۴/۵ (میانه) و RCP۸/۵ (بدبینانه) برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) پرداخته است و بی‌هنجاری ماهانه دمای هوا را در ایران مورد مطالعه قرار داده است. سناریوهای واداشت تابشی RCP۲/۶، RCP۴/۵ و RCP۸/۵ اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را در سال ۲۱۰۰ به ترتیب تا ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ وات بر متر مربع تخمین زده‌اند (پویان‌فر و همکاران، ۱۴۰۱: ۴۸). شایان ذکر است که داده‌های اقلیمی در اجرای مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم تا پایان سال ۲۰۰۵ میلادی به عنوان دوره تاریخی و از اول ژانویه ۲۰۲۱ تا ۳۱ دسامبر ۲۱۰۰ میلادی برای سناریوهای آینده در نظر گرفته شده است. بنابراین دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۵ به عنوان دوره تاریخی جهت مقایسه مشاهدات ایستگاه‌های سینوپتیک با شبیه‌سازی‌های مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم در نظر گرفته شد. صحت سنجی داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده با استفاده از آماره‌های میانگین انحراف خطا^۲ (MBE)، مجذور میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون^۴ (r) که معادلات آنها به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) مشخص شده‌اند، ارزیابی شده است.

^۱ Yang

^۲ Mean Bias Error

^۳ Root Mean Square Error

^۴ Pearson's correlation coefficient

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - Y_i)}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

در این روابط X_i و Y_i به ترتیب i امین داده مشاهداتی و داده باز تحلیل/ماهواره و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

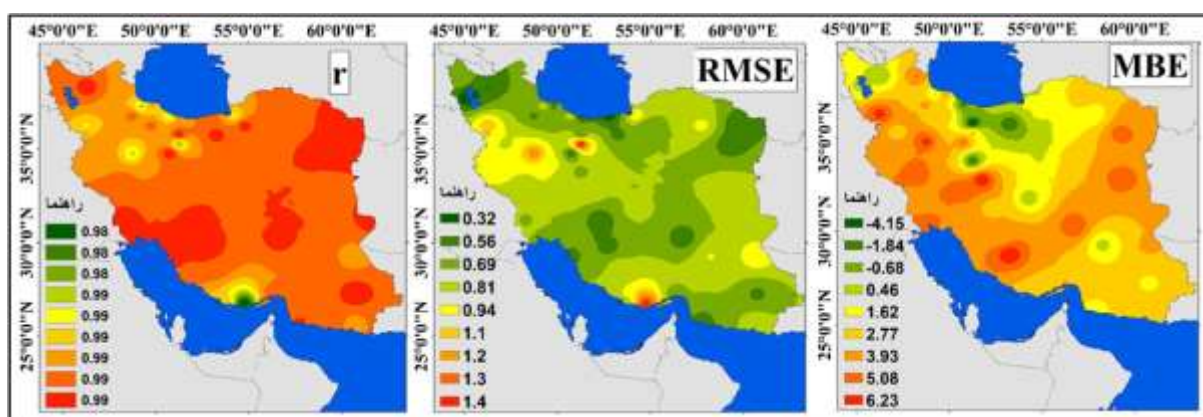
شایان ذکر است که IPCC مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم را در گزارش ششم خود در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ منتشر کرده است و این مدل‌ها توسط بسیاری از محققین در حال ارزیابی و مقایسه با مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم می‌باشد (زرین و دادادشی رودباری، ۱۴۰۰؛ دی سنت و همکاران، ۲۰۲۱؛ حامد و همکاران، ۲۰۲۲؛ اوستا و همکاران، ۲۰۲۲). به دلیل اینکه در زمان انجام این پژوهش روش ریزگردانی CORDEX-WAS مورد استفاده در این پژوهش، برای مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم هنوز به طور کامل بسط داده نشده است بنابراین از مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم استفاده شده است.

بحث و بررسی

کارآیی مدل MPI-ESM-LR تحت روش ریزگردانی دینامیکی کوردکس در ایران

با توجه به افزایش دمای هوا طی سال‌های اخیر، پیش‌نگری فراسنج‌های اقلیمی از جمله دما و بررسی اثرات منفی گرمایش هوا می‌تواند به بسیاری از برنامه‌های مرتبط با تغییر اقلیم در آینده کمک نماید. بدین منظور داده‌های تاریخی مدل MPI-ESM-LR تحت روش ریزگردانی دینامیکی کوردکس با داده‌های ایستگاهی دما در ۴۹ ایستگاه طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۰ براساس سه شاخص آماری ضریب همبستگی پیرسون، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف خطا مورد بررسی قرار گرفت. میانگین ضریب همبستگی برای کل کشور ایران معادل ۰/۹۹ است که بیانگر وجود همبستگی بسیار بالای داده‌های مشاهداتی مدل و داده‌های ایستگاهی می‌باشد. همچنان که شاخص مجذور میانگین مربعات خطا با ۰/۶۹ درجه سلسیوس و میانگین انحراف خطا با ۲/۲۰ درجه سلسیوس نیز کارایی بهتر این مدل را در پیش‌بینی فراسنج دما در ایران نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ می‌توان دریافت که در ضریب همبستگی بجز ایستگاه‌های انزلی، بندرلنگه و مهرآباد که همبستگی ۰/۹۸ را نشان می‌دهند، در سایر ایستگاه‌ها همبستگی در سطح ۰/۹۹ نشان داده شده است که گویای اعتبار بالای مدل جهت شبیه‌سازی پارامتر دما می‌باشد. همچنان که در شاخص مجذور میانگین مربعات خطا وجود مقادیر کمتر از ۱ درجه سلسیوس در اکثریت ایستگاه‌ها نشان از دقت بالای مدل دارد که فقط در ایستگاه‌های همدان، بندرلنگه، مهرآباد و سقز میانگین مربعات خطا به میزان ۱ درجه سلسیوس نشان داده شده است. بالاترین خطا در مهرآباد و بندرلنگه به میزان ۱/۴ درجه و کمترین خطا در ارومیه، بابلسر و تبریز به میزان ۰/۳ درجه مشاهده شده است. مطابق نتایج پژوهش پاتاک (۲۰۱۹) توپوگرافی، عرض جغرافیایی، نوع پوشش منطقه و دوری یا نزدیکی به منابع رطوبتی در کارآیی GCMها تأثیر می‌گذارد. در این راستا افزایش جزئی آماره مجذور میانگین مربعات خطا در برخی از ایستگاه‌های مذکور به معنای ضعف مدل در شبیه‌سازی نیست بلکه به دلیل تغییرپذیری دما در مناطق کوهستانی و فاصله ایستگاه تا نزدیکترین یاخته و عرض جغرافیایی پایین در بندر لنگه می‌باشد. همانطور که شکل ۲ نشان می‌-

دهد مقادیر شاخص میانگین انحراف خطا نیز با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود که ممکن است به دلیل فقدان داده‌های مشاهداتی کافی به دلیل نبود ایستگاه هواشناسی در مناطق مرتفع کوهستانی باشد. لازم به ذکر است که هر چقدر مقادیر میانگین انحراف خطا به صفر نزدیکتر باشد توانایی مدل در پیش‌نگری افزایش می‌یابد. بیشینه اریبی مثبت در سقز، اصفهان، همدان و فسا به میزان ۶/۲ درجه و بیشینه اریبی منفی در دوشان تپه به میزان ۴/۱۵- درجه سلسیوس ثبت شده است. از ۴۹ ایستگاه مورد بررسی برای درستی سنجی مدل MPI-ESM-LR در ۱۴/۲۸ درصد از ایستگاه‌ها اریبی منفی یا کم برآوردی و در ۸۵/۷۱ درصد از ایستگاه‌ها اریبی مثبت یا بیش برآوردی حاصل شده است. مطابق آنچه که بیان گردید مقادیر هر سه آماره مورد استفاده بیانگر کارایی بهتر مدل MPI-ESM-LR در برآورد دمای هوا در گستره کشور ایران می‌باشد که مطالعات بویان و همکاران (۲۰۱۸) و مولر و همکاران (۲۰۱۲) نیز به بهینه بودن مدل MPI-ESM-LR در برآورد دما به ترتیب در بنگلادش و اقیانوس اطلس شمالی با پروژه کوردکس تحت پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم اشاره کرده‌اند.



شکل (۲). کارایی مدل MPI-ESM-LR براساس درستی سنجی آماری داده‌های دمای مدل و داده‌های ایستگاهی طی دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۰۵ با استفاده از سنجه‌های آماری
منبع: نگارندگان

توزیع زمانی متوسط ماهانه و سالانه بی‌هنجاری دمای هوا براساس مدل MPI-ESM-LR در دوره مشاهداتی و آینده

مدل‌های آب و هوای جهانی به طور گسترده برای پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی در آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند. ارزیابی دوره‌ای تغییرات اقلیمی توسط هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم به شدت بر شبیه‌سازی GCM از آب و هوای آینده متکی هستند و توسط سناریوهای انتشار مختلف هدایت می‌شود (سواو همکاران، ۲۰۱۳: ۳۱۸۸). بررسی پیش‌نگری دما بر اساس مدل MPI-ESM-LR در مقیاس سالانه نشان داد که متوسط بی‌هنجاری دمای هوا برای کل کشور به طور میانگین برای هر سه دوره آینده دور و نزدیک و میانه تحت سناریو بدبینانه RCP۸/۵ معادل ۳/۳۳ درجه سلسیوس می‌باشد که نشان می‌دهد تحت سناریو بدبینانه RCP۸/۵ دمای هوا برای متوسط کل ایران نسبت به دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) ۳/۳۳ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت که بیشترین افزایش دما را نسبت به دو سناریو میانه RCP۴/۵ با مقادیر ۱/۸۹ درجه سلسیوس و سناریو خوش بینانه RCP۲/۶ با مقادیر ۱/۰۹ درجه سلسیوس نشان داده است. گرمایش ۳/۳ درجه‌ای تحت سناریو RCP۸/۵ در پژوهش رحیمی و همکاران (۲۰۲۰) نیز قابل توجه است. همچنین نتایج گویای این است که برای کل کشور متوسط بی‌هنجاری دمای هوا برای دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت سناریو RCP۸/۵ معادل ۴/۹۹ درجه سلسیوس، تحت سناریو RCP۴/۵ معادل ۲/۴۰ درجه سلسیوس و تحت سناریو RCP۲/۶ برابر ۰/۹۵ درجه سلسیوس است و برای دوره آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) RCP۸/۵، RCP۴/۵ و RCP۲/۶ به ترتیب مقادیر ۳/۳۶، ۱/۹۴ و ۱/۱۵ درجه سلسیوس گرمایش را نسبت به دوره تاریخی نشان می‌دهد. در همین حال برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) سناریو RCP۸/۵ گرمایش ۱/۶۴ درجه سلسیوس، سناریو RCP۴/۵

افزایش دمای ۱/۳۱ درجه و سناریو RCP۲/۶ گرمایش ۱/۱۷ درجه سلسیوس را نسبت به دوره تاریخی نمایانگر است (جدول ۲). از این نتایج می‌توان چنین استنباط نمود که برای کل پهنه ایران در بین همه سناریوها و دوره‌ها متوسط کمترین تغییرات افزایش دما تحت سناریو خوش بینانه RCP۲/۶ طی دوره آینده دور با مقدار ۰/۹۵ درجه سلسیوس و بیشترین افزایش دما تحت سناریو بدبینانه RCP۸/۵ طی دوره آینده دور با ۴/۹۹ درجه سلسیوس گرمایش نسبت به دوره تاریخی اتفاق خواهد افتاد. توسعه شهرها و افزایش استفاده از وسایل نقلیه و افزایش آلاینده‌ها به دنبال صنعتی شدن هرچه بیشتر فعالیت‌ها به گرمایش هرچه بیشتر هوا در دوره‌های پیش‌رو دامن خواهد زد. مقایسه برآوردها در مقیاس ماهانه نشان می‌دهد که در کل کشور ایران به طور متوسط کمینه افزایش دمای هوا در ماه فوریه در دوره آینده نزدیک تحت سناریو RCP۲/۶ به میزان ۰/۵۴ درجه سلسیوس خواهد بود و در عین حال بیشینه افزایش دمای هوا در دوره آینده دور تحت سناریو RCP۸/۵ در ماه می به میزان ۵/۷۲ درجه سلسیوس رخ خواهد داد (جدول ۲). به دلیل بالابودن حجم جدول به ذکر مقادیر سالانه در جدول ۲ بسنده کرده‌ایم.

جدول (۲). متوسط بی‌هنجاری دمای هوا در دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) و آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) براساس مدل *MPI-ESM-LR* تحت

سناریوهای واداشت تابشی RCPs

RCP ۸/۵			RCP ۴/۵			RCP ۲/۶			دوره تاریخی	
-۲۰۷۶	-۲۰۵۱	-۲۰۲۱	-۲۰۷۶	-۲۰۵۱	-۲۰۲۱	-۲۰۷۶	-۲۰۵۱	-۲۰۲۱	۲۰۰۵-۱۹۸۰	دوره
۲۱۰۰	۲۰۷۵	۲۰۵۰	۲۱۰۰	۲۰۷۵	۲۰۵۰	۲۱۰۰	۲۰۷۵	۲۰۵۰		آماري
۴/۹۹	۳/۳۶	۱/۶۴	۲/۴۰	۱/۹۴	۱/۳۱	۰/۹۵	۱/۱۵	۱/۱۷	۱۵/۳۹	میانگین
۳/۳۳			۱/۸۹			۱/۰۹			۲۰۲۱-۲۱۰۰	میانگین

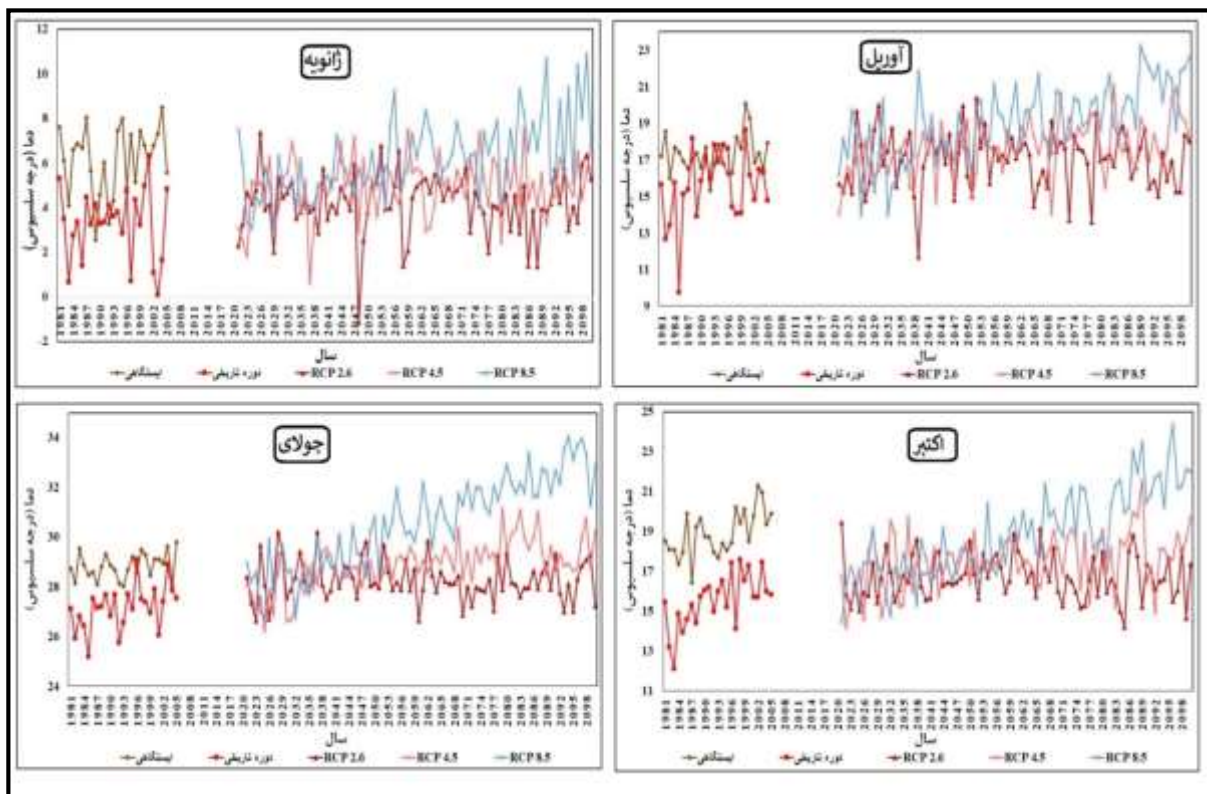
شیب روند دمای ایران براساس داده‌های تاریخی و آینده مدل *MPI-ESM-LR* و داده‌های ایستگاهی

تغییر اقلیم به دلیل اثرات مخرب آن بر بخش‌های مختلف از جمله منابع آب، بهداشت عمومی، انرژی و کشاورزی یک موضوع جهانی است. پیش‌بینی تغییرات احتمالی در پارامترهای اقلیمی از جمله دما برای برنامه‌ریزی جهت سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش اثرات مخرب تغییر اقلیم بسیار مهم است. این امر بویژه در مناطقی که تغییرات جزئی دما ممکن است اثرات مخرب شدیدی در بخش‌های مختلف داشته باشد، بسیار اهمیت دارد (حامد و همکاران، ۲۰۲۲: ۳). همانطور که شکل ۳ نشان می‌دهد که تغییرات دما طی دوره تاریخی مدل در متوسط ایران به استثنای ماه ژانویه با شیب روند کاهشی (۰/۰۸۳- درجه سلسیوس در هر دهه) در سایر ماه‌ها به شکل قابل توجهی روند افزایشی داشته است که بیشترین شیب روند افزایشی در ماه اکتبر به ازای هر دهه ۱/۱۵۸ درجه سلسیوس محاسبه شده است. در عین حال بررسی شیب روند داده‌های ایستگاهی نیز بیانگر افزایش دما در تمام ماه‌ها طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۵ بوده است که بیشینه شیب روند گرمایش به ازای هر دهه به میزان ۰/۹۴۵ درجه سلسیوس در ماه اکتبر ثبت شده است و کمینه شیب روند افزایشی نیز در ماه نوامبر برابر با ۰/۰۸۳ درجه به ازای هر دهه بوده است. همانطور که جدول ۳ نشان می‌دهد به‌جز ماه ژانویه در دوره تاریخی مدل با روند کاهشی، در بقیه ماه‌ها در دوره تاریخی مدل و داده‌های ایستگاهی، فراسنج دما دارای روند افزایشی بوده است. پیش‌نگری دما تا پایان قرن حاضر تحت سه سناریو خوش‌بینانه (RCP۲/۶) حدواسط (RCP۴/۵) و بدبینانه (RCP۸/۵) نشان می‌دهد که در RCP۴/۵ و RCP۸/۵ دما شیب روند افزایشی دارد در حالی که در سناریو خوش‌بینانه RCP۲/۶ به‌جز ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس با روند افزایشی دما به مقدار کم (به ترتیب ۰/۰۱۱، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۲ درجه در هر دهه)، در بقیه ماه‌ها شیب روند کاهشی دما در این سناریو پیش‌نگری شده است که بیشترین شیب روند کاهشی دما در ماه آگوست به میزان ۰/۱۲۹- درجه سلسیوس در هر دهه و کمترین روند کاهشی دما در ماه آوریل به میزان ۰/۰۰۸- درجه در هر دهه ثبت شده است. در این راستا نتایج مطالعات لطفی قرانچای و همکاران (۱۴۰۰) نیز وجود روند کاهشی دمای اهر را تحت سناریو RCP۲/۶ در دوره‌های آتی نشان داده‌اند. در RCP۸/۵ دما در ماه اکتبر به شکل قابل توجهی با روند افزایشی پیش‌بینی شده است که معادل ۰/۷۷۴ درجه سلسیوس در هر دهه می‌باشد و کمترین روند افزایشی دما در این سناریو بدبینانه به میزان ۰/۴۲۸ درجه سلسیوس در هر دهه در ماه ژانویه محاسبه شده است. در RCP۴/۵ بیشترین روند افزایشی در هر دهه در ماه‌های مارس، آوریل و می به میزان ۰/۲۹ درجه سلسیوس و کمترین روند افزایشی دما در ماه

دسامبر به میزان ۰/۰۷۶ درجه سلسیوس در هر دهه پیش‌نگری شده است. با توجه به نمودارها می‌توان گفت که در تمام ماه‌ها در RCP۴/۵ و RCP۸/۵ تقریباً از سال ۲۰۳۵ بعد افزایش دما شدت بیشتری خواهد گرفت. عواملی همچون افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، تخریب زمین، کمبود قابل ملاحظه و جدی بارش که سبب کاهش رطوبت و خشکتر شدن سطح زمین و ضعیف‌تر شدن رویش و پوشش گیاهی می‌شود، پتانسیل افزایش دما را در دوره‌های آینده بالاتر می‌برد. به دلیل بالا بودن تعداد نمودارها، یک نمودار به عنوان نمونه از هر فصل ارائه کرده‌ایم اما در تحلیل‌ها تمام ماه‌ها بررسی شده است.

جدول (۳). شیب روند دمای هوا در دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) و آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) براساس داده‌های ایستگاهی و داده‌های مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPs در هر دهه

ماه	داده ایستگاهی	دوره تاریخی	RCP۲/۶	RCP۴/۵	RCP۸/۵
ژانویه	۰/۳۹۴	-۰/۰۸۳	-۰/۰۱۱	-۰/۱۲۵	-۰/۴۲۸
فوریه	۰/۸۴	-۰/۴۲۴	-۰/۰۰۴	-۰/۱۰۶	-۰/۵۲۸
مارس	۰/۸۳۷	-۰/۲۸۸	-۰/۰۰۲	-۰/۲۹۸	-۰/۵۵۶
آوریل	۰/۲۹	-۰/۸۳۶	-۰/۰۰۸	-۰/۲۹۸	-۰/۵۸۹
می	۰/۲۱۲	-۰/۸۴۲	-۰/۰۶۷	-۰/۲۹۱	-۰/۶۷۴
ژوئن	۰/۲۶۳	-۰/۳۶۲	-۰/۰۳۶	-۰/۲۰۵	-۰/۶۵۹
جولای	۰/۲۱۷	-۰/۵۵۱	-۰/۰۲۸	-۰/۲۵۹	-۰/۶۹۹
اگوست	۰/۵۴۹	-۰/۲۳۴	-۰/۱۲۹	-۰/۲۰۳	-۰/۶۹۳
سپتامبر	۰/۴۳۵	-۰/۰۳	-۰/۰۶۹	-۰/۲۲۷	-۰/۶۷۸
اکتبر	۰/۹۴۵	۱/۱۵۸	-۰/۰۱۶	-۰/۲۳	-۰/۷۷۴
نوامبر	۰/۰۸۳	-۰/۰۵۹	-۰/۰۳۶	-۰/۲۰۲	-۰/۵۹۱
دسامبر	۰/۷۲۳	-۰/۳۵۸	-۰/۰۵۸	-۰/۰۷۶	-۰/۶۸۸



شکل (۳): شیب روند دمای هوا طی دوره مشاهداتی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) و آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) براساس داده‌های ایستگاهی و داده‌های مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPs (به دلیل بالا بودن تعداد نمودارها، اولین ماه هر فصل را به عنوان نمونه ارائه

کرده‌ایم)

منبع: نگارندگان

توزیع مکانی ماهانه دمای ایران بر اساس داده‌های تاریخی مدل MPI-ESM-LR

بررسی گستره مکانی نقشه‌ها نشان می‌دهد که در دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) در همه ماه‌ها بیشینه دما در سواحل جنوب و غرب ایران و کمینه دما در مناطق مرتفع کوهستانی غرب و شمال غرب کشور مشاهده می‌شود که ماکزیمم دما در ماه جولای در اهواز و آبادان با $38/3$ درجه سلسیوس و مینیمم دما در ماه ژانویه در تبریز با $-6/2$ درجه سلسیوس ثبت شده است که حاکمیت سامانه پرفشار جنب حاره در فصل تابستان و تاثیر بیابان‌های گرم جنوب و جنوب غرب ایران و وزش بادهای گرم این مناطق در سواحل خلیج فارس در بالا بودن دمای نواحی جنوب و جنوب غرب ایران موثر است. همچنین فعالیت پرفشار عربستان در ترازهای زیرین جو در بالا بودن دمای جنوب و جنوب غرب کشور نقش مهمی دارد. به طور کلی در دوره تاریخی متوسط دمای هوا برای کل کشور $15/39$ درجه سلسیوس ثبت شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

بی‌هنجاری ماهانه دمای ایران بر اساس مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)

بررسی گستره مکانی تغییرات دما بر اساس نقشه‌ها (شکل‌های ۴ و ۵) بیانگر این است که به‌طور کلی در تمام سناریوها و دوره‌های آینده بیشینه بی‌هنجاری دما در مناطق کوهستانی شمال غرب و غرب کشور مشاهده می‌شود که در بعضی ماه‌ها (آوریل، آگوست، اکتبر و سپتامبر) و دوره‌ها در $RCP4/5$ و $RCP8/5$ پهنه بیشینه بی‌هنجاری دما به مرکز ایران نیز گسترش یافته است. به‌طور استثنا در ماه‌های نوامبر، اکتبر و فوریه و در دوره آینده دور در ماه دسامبر بیشینه بی‌هنجاری دما در ارتفاعات شرق و جنوب شرق کشور مشاهده می‌شود. همچنان که نتایج مطالعات رحمان^۱ و همکاران (۲۰۱۸) نیز گویای گرمایش هوا در رشته کوه‌های بزرگ جهان مانند هندوکش و مناطق غربی هیمالیا بر اساس مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم تحت $RCP8/5$ است. در این راستا، بیشینه بی‌هنجاری دما در دوره‌های آتی در مطالعات فلاح قالمهری و همکاران (۲۰۱۹)؛ زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰)؛ دارند (۲۰۲۰)؛ قاضی و جیحونی (۲۰۲۲) در مناطق مرتفع کوهستانی شمال غرب کشور و اشرف و آقایی^۲ و همکاران (۲۰۱۹) در جنوب ایران بر اساس مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم و ششم گزارش شده است. مطالعات اوستا و همکاران (۲۰۲۲) نیز بیانگر افزایش دما در دوره‌های آتی در مرکز ایران با مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم است. همچنین در مقیاس جهانی یان و لیو^۳ (۲۰۱۴) نیز بیشینه بی‌هنجاری دما را در مناطق کوهستانی در سراسر جهان مورد تایید قرار دادند. افزایش شدید دمای هوا در مناطق مرتفع و برف‌گیر کوهستانی شمال غرب و غرب کشور منجر به ذوب یخ‌ها و افزایش تبخیر و کاهش منابع آبی و پوشش گیاهی در این مناطق خواهد شد. همچنین بالا بودن بی‌هنجاری مثبت دما در نواحی داخلی و شرق و جنوب شرق ایران که اقلیم خشک و نیمه خشک دارند، در بعضی ماه‌ها و دوره‌ها در $RCP4/5$ و $RCP8/5$ منجر به افزایش خشکسالی و بیابان‌زایی و افزایش شوری خاک از طریق افزایش تبخیر آب سطحی خواهد شد.

در نقطه مقابل شرق و جنوب شرق در تمام دوره‌ها و سناریوها کمینه بی‌هنجاری دما را نسبت به سایر مناطق کشور نشان می‌دهد که در $RCP2/6$ سواحل جنوب کشور و در $RCP8/5$ ارتفاعات بینالود و ال‌داغ در شمال شرق کشور به پهنه نواحی کمینه بی‌هنجاری دما اضافه می‌شود با این تفاوت که در $RCP8/5$ به‌طور کلی از وسعت نواحی با کمترین بی‌هنجاری کاهش می‌یابد که بیانگر این است که تحت سناریو بدبینانه $RCP8/5$ در کل کشور شاهد افزایش شدید دمای هوا نسبت به سناریوهای دیگر خواهیم بود. در این راستا نتایج مطالعات عینی نرگسه^۴ و همکاران (۲۰۱۹) به افزایش دما تحت سناریو $RCP8/5$ به میزان

^۱ Rehman

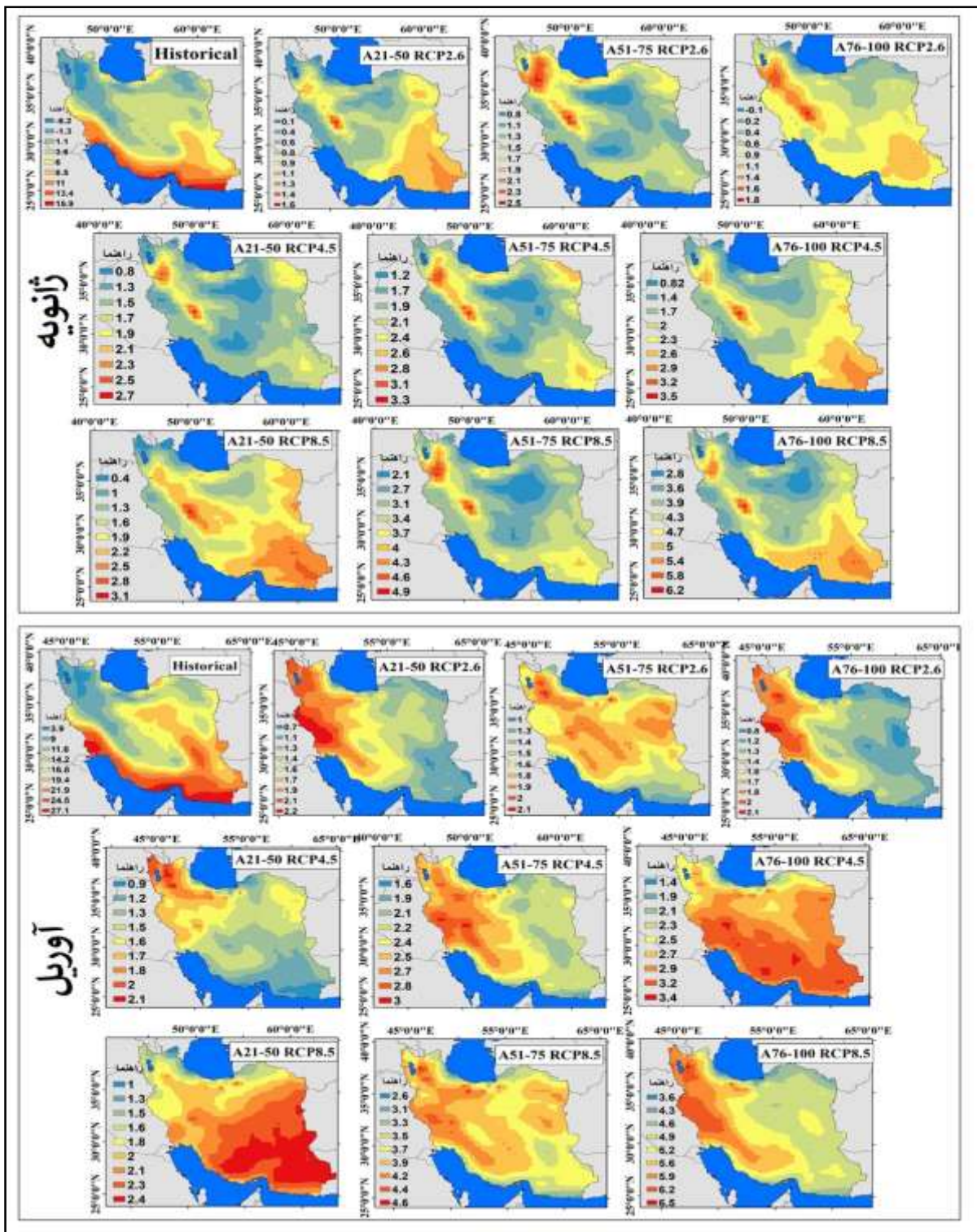
^۲ Ashraf Vaghefi

^۳ Yan & Liu

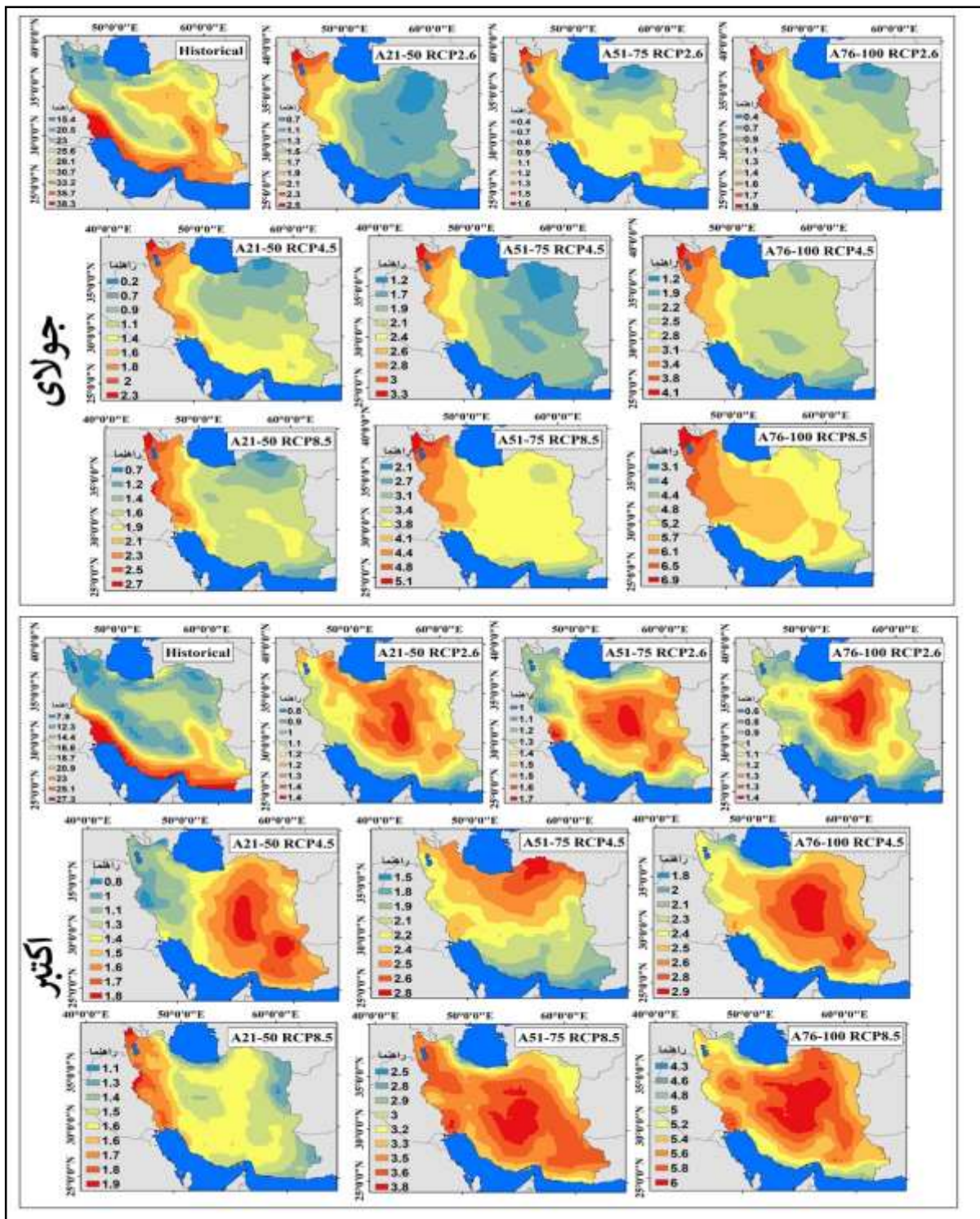
^۴ Eyni-Nargeseh

۲/۳ درجه سلسیوس در ایران اشاره دارد و نشان می‌دهد که کاهش عملکرد رشد گندم نتیجه این گرمایش در آینده دور خواهد بود. به طور استثنا در ماه‌های نوامبر، اکتبر و فوریه کمترین بی‌هنجاری دما در غرب و شمال غرب کشور مشاهده می‌شود. همچنین در ماه اکتبر در RCP۲/۶ در دوره آینده دور و در دوره آینده میانه در RCP۴/۵ کمینه بی‌هنجاری دما در ارتفاعات تفتان و بشاگرد در جنوب شرق کشور نمایانگر است. در ماه فوریه در RCP۲/۶ در دوره آینده میانه در شرق و نواحی داخلی ایران کمترین بی‌هنجاری دما ثبت شده است در حالی که در RCP۴/۵ در همین ماه کمینه بی‌هنجاری دما به دوره‌های آینده دور و نزدیک در مرکز ایران جابجا شده است.

تغییرات گستره مکانی دما در مقیاس ماهانه نیز نشان می‌دهد که ماکزیمم بی‌هنجاری منفی دما در ماه ژانویه تحت سناریو RCP۲/۶ در دوره آینده دور به میزان ۰/۱۹- درجه سلسیوس در سواحل خزر در رشت و در شمال استان اردبیل در دشت مغان بوقوع خواهد پیوست. همچنین نواحی بسیار محدود در حاشیه جنوبی ارتفاعات البرز و در غرب کشور ایستگاه سقز ماکزیمم بی-هنجاری مثبت دما را به میزان ۷/۱ درجه سلسیوس در ماه می تحت سناریو RCP۸/۵ در دوره آینده دور نشان می‌دهند (شکل-های ۴ و ۵). نتایج مطالعات میری و همکاران (۲۰۲۱) نیز بیانگر بیشترین تغییرپذیری دما در مناطق کوهستانی ایران در دوره-های آینده تحت سناریو RCP۸/۵ بر اساس مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم است. از دلایل تغییرپذیری شدید دما در دوره سرد سال می‌توان به ورود توده‌های هوای مختلف به ایران اشاره کرد. همچنان که ضخامت کمتر جو و افزایش ارتفاع در مناطق مرتفع کوهستانی دلیلی بر تغییرپذیری دما در این مناطق است. در شکل‌های ۴ و ۵ به دلیل بالا بودن تعداد شکل‌ها، اولین ماه هر فصل به عنوان نمونه آورده شده است اما در تحلیل‌ها بی‌هنجاری دما در تمام ماه‌ها بررسی شده است.



شکل (۴): بی‌هنجاری دما طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) براساس مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) (به دلیل بالابودن تعداد شکل‌ها، ماه زانویه و آوریل به عنوان نمونه فصل زمستان و بهار آورده شده است)
منبع: نگارندگان



شکل (۵): بی‌هنجاری دما طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) براساس مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) (به دلیل بالا بودن تعداد شکل‌ها، ماه جولای و اکتبر به عنوان نمونه فصل تابستان و پاییز آورده شده است)

منبع: نگارندگان

نتیجه‌گیری

تغییرات آبی در رویدادهای شدید آب و هوایی از جمله دما منجر به زیان‌های بزرگ برای جامعه، اقتصاد و اکوسیستم‌های طبیعی خواهد شد. به دلیل ماهیت پیچیده سیستم اقلیمی، مدل‌ها به ویژه در سطوح منطقه‌ای دارای درک ضعیف و ناکافی هستند و عدم قطعیت در پیش‌بینی مدل‌ها وجود دارد. از انواع روش‌های مقیاس‌کاهی برای پیش‌بینی‌های قابل اعتماد استفاده می‌شود. در این راستا، پژوهش حاضر به بررسی کارایی مدل MPI-ESM-LR از سری مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم در پیش‌نگری دمای ماهانه ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی با پروژه CORDEX-WAS برای دوره مشاهداتی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) و آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) پرداخته است. نتایج اعتبارسنجی مدل با سه شاخص آماری ضریب همبستگی پیرسون (۰/۹۹)، مجذور میانگین مربعات خطا (۰/۶۹)، میانگین انحراف خطا (۲/۲۰) در دوره مشاهداتی بیانگر کارایی بهتر این مدل در پیش‌بینی فراسنج دما در ایران می‌باشد. بر اساس مقیاس زمانی سالانه، در دوره‌های آینده وقوع بالاترین گرمایش هوا معادل ۳/۳۳ درجه سلسیوس در RCP۸/۵ نمایانگر است. در مقیاس ماهانه شیب روند دما در داده‌های ایستگاهی و داده‌های مدل در دوره (۱۹۸۰-۲۰۰۵) افزایشی بوده و در دوره آینده در RCP۴/۵ و RCP۸/۵ در تمام ماه‌ها شیب روند افزایشی دما در هر دهه مشاهده شده است در حالی که در RCP۲/۶ به استثنای ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس با شیب روند افزایشی، در بقیه ماه‌ها شیب روند کاهشی دما پیش‌بینی شده است. گستره مکانی بیشینه دما در دوره مشاهداتی در سواحل جنوب و در اهواز و آبادان و کمینه دما در ارتفاعات مرتفع کوهستانی شمال غرب و غرب کشور نشان داده شده است. همچنین در دوره مورد مطالعه بیشینه تغییرات مکانی دما تحت سناریوها و دوره‌های مورد مطالعه در بخش‌های شمال غربی و ارتفاعات غربی و به صورت محدود در بعضی از دوره‌ها و سناریوها (همچون RCP۲/۶ و RCP۸/۵ ماه نوامبر) در نواحی کم-ارتفاع داخلی و ارتفاعات شرق و جنوب شرقی ایران دیده می‌شود. در نقطه مقابل، مناطق شرق و جنوب شرق ایران در مقیاس سالانه و ماهانه کمینه بی‌هنجاری دما را نشان داده‌اند که به طور استثنای در RCP۲/۶ و RCP۸/۵ به ترتیب سواحل جنوب و ارتفاعات شمال شرق کشور کمینه بی‌هنجاری دما را نمایانگر هستند. در نیمه سرد سال به صورت محدود پهنه کمینه بی‌هنجاری دما به ارتفاعات شمال غرب و نواحی کم‌ارتفاع داخلی کشور نیز کشیده شده است. نتایج به دست آمده مبنی بر وقوع گرمایش هوا در ایران در دوره‌های آبی در پژوهش انجام یافته در راستای نتایج پژوهش‌های انجام یافته توسط جعفری‌گلو و همکاران (۱۴۰۰)، زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰)، مهدویان و همکاران (۱۴۰۱)، رحیمی و همکاران (۲۰۲۰)، دارند (۲۰۲۰)، میری و همکاران (۲۰۲۱)، اوستا و همکاران (۲۰۲۲)، قاضی و جیحونی (۲۰۲۲) است که همگی بیانگر افزایش دمای هوا در آینده با مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده در مناطق مختلف ایران هستند. با توجه به اقلیم ایران که بیشتر آن خشک است، به دنبال افزایش دما حتی در شرایط خوش بینانه، کشور نیازمند برنامه مدیریت یکپارچه منابع آب و چشم‌انداز بلندمدت مدیران و مسئولان مربوطه است. چرا که افزایش دما مشکلاتی را در زمینه‌های مختلف از جمله محیط زیست، کشاورزی، امنیت غذایی، اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی، سیاسی، بین‌المللی و غیره ایجاد می‌کند.

- احمدی، حمزه؛ فلاح قاله‌ری، غلامعباس؛ باعقیده، محمد. (۱۳۹۸). پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر بارش فصلی مناطق سردسیر ایران براساس سناریوهای واداشت تابشی (RCP). *فیزیک زمین و فضا*، ۴۵(۱): ۱۷۷-۱۹۶.
- پویان‌فر، ناصر؛ مظفری، غلامعلی؛ امیدوار، کمال؛ مزیدی، احمد. (۱۴۰۱). روند تغییرات نیاز سرمایی گیاه پسته و پیش‌بینی آن با استفاده از مدل SDSM (مطالعه موردی: یزد). *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۶(۸۰): ۴۵-۶۰.
- جعفری‌گلو، ناصر؛ خورشیددوست، علی محمد؛ رضایی بنفشه، مجید؛ رستم‌زاده، هاشم. (۱۴۰۰). بررسی تغییرات دماهای کمینه در شمالغرب کشور با استفاده از ریزمقیاس گردانی آماری خروجی مدل‌های جهانی HadCM3 و MPEH5. *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵(۷۷): ۱۷-۳۰.
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) براساس رویکرد همادی چندمدلی CMIP6. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۳(۱): ۷۵-۹۰.
- عسگری، الهه؛ باعقیده، محمد؛ کامیار، اصغر؛ انتظار، علیرضا؛ حسینی، مجید. (۱۳۹۹). چشم‌انداز تغییرات اقلیم‌شناختی دما و بارش در دامنهٔ CORDEX جنوب آسیا (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبخیز دز). *جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، ۱۸(۱): ۲۲۵-۲۵۲.
- غلام‌پور شمامی، یوسف؛ مجنون حسینی، ناصر؛ بذرافشان، جواد؛ شریف زاده، فرزاد؛ کانونی، همایون. (۱۳۹۸). ارزیابی بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در شرایط اقلیم فعلی و تغییر اقلیم آینده تحت پروژه CORDEX در نواحی عمده تولید محصولات دیم استان کردستان. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۱۰): ۲۵۸۳-۲۵۹۴.
- کامیار، اصغر؛ موحدی، سعید؛ یزدان پناه، حجت‌اله. (۱۳۹۶). چشم‌انداز دمای کمینه و بیشینه استان اصفهان در افق ۲۰۵۰-۲۰۱۷. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۲۹ و ۳۰: ۳۷-۵۴.
- لطفی قرانچای، شهرام؛ شکیب، علیرضا؛ دشت بزرگی، آمنه؛ ربانی، فاطمه؛ اکبری ازیرانی، طیبه. (۱۴۰۰). مدلسازی و پیش‌بینی عناصر اقلیمی دما و بارش (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک اهر). *جغرافیای طبیعی*، ۵۳(۱۴): ۵۷-۷۴.
- مهدویان، شیرین؛ زینالی، بتول؛ صلاحی، برومند. (۱۴۰۲). ارزیابی تغییرات کاربری اراضی حوضه کیوی چای و تحلیل روند تغییرات بارش و دمای آن در دوره‌های آتی با مدل‌های CMIP5. *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۷(۸۵): ۱۳۳-۱۴۳. doi: 10.22034/gp.2022.50623.2977
- Ahmadi, H., Azizzadeh, J., (2020). The impacts of climate change based on regional and global climate models (RCMs and GCMs) projections (case study: Ilam province). *Modeling Earth Systems and Environment*, 6: 685-696.
- Ashraf Vaghefi, S., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., Abbaspour, K.C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9(1464): 1-11.
- Bhuyan, D.I., Mohymenul, I., Bhuiyan, E.K., (2018). A Trend Analysis of Temperature and Rainfall to Predict Climate Change for Northwestern Region of Bangladesh. *American Journal of Climate Change*, 7: 115-134.
- Carvalho, D., Cardoso Pereira, S., Rocha, A., (2020). Future surface temperature changes for the Iberian Peninsula according to EUROCORDEX climate projections. *Clim. Dyn*, 56(1-2): 123-138.
- Cheruy, F., Dufresne, J.L., Hourdin, F., Ducharne, A., (2014). Role of clouds and land-atmosphere coupling in midlatitude continental summer warm biases and climate change amplification in CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*, 41: 6493-6500.
- Darand, M., (2020). Future changes in temperature extremes in climate variability over Iran. *Meteorological Applications*, 27(6): 1-16.
- Di Sante, F., Coppola, E., Giorgi, F., (2021). Projections of river floods in Europe using EURO-CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations. *Int. J. Climatol*, 41: 3203-3221.
- Edwards, P.N., (2011). History of climate modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2: 128-139.
- Eyni-Nargeseh, H., Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Mokhtassi-Bidgoli, A., (2019). Analysis of growth functions that can increase irrigated wheat yield under climate change. *Meteorological Applications*, 27(1): 1-10.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., Dadashi-Roudbari, A., (2019). Impacts of climate changes on the

- maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3-4): 1539-1562.
- Fischer, E.M., Knutti, R., (2016). Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nat. Clim. Change*, 6: 986–991.
- Ghazi, B., Jaihouni, E., (2022). Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7): DOI: 10.1007/s12517-022-09848-z.
- Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, Ch., et al (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Syst*, 5: 572–597.
- Guo, D.L., Wang, H.J. (2016). Comparison of a very-fine-resolution GCM with RCM dynamical downscaling in simulating climate in China. *Adv. Atmos. Sci*, 33: 559–570.
- Hagemann, S., Göttel, H., Jacob, D., Lorenz, P., Roeckner, E., (2009). Improved regional scale processes reflected in projected hydrological changes over large European catchments. *Climate Dynamics*, 32(6): 767-781.
- Hamed, M.M., Nashwan, M.S., Shahid, S., (2022). Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 265: 1-14.
- Hassan, I., Kalin, R.M., White, C.J., Aladejana, J.A. (2020). Selection of CMIP5 GCM Ensemble for the Projection of Spatio-Temporal Changes in Precipitation and Temperature over the Niger Delta, Nigeria. *Water*, 12(2), 385.
- IPCC, (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Cambridge University Press*, 1535 pp.
- Kohyama, T., Hartmann, D.L., Battisti, D., (2017). La Niña-like Mean-State Response to Global Warming and Potential Oceanic Roles. *Journal of Climate*, 30(11): 4207-4225.
- Miri, M., Masoompour Samakosh, J., Raziiei, T., Jalilian, A., Mahmodi, M., (2021). Spatial and Temporal Variability of Temperature in Iran for the Twenty-First Century Foreseen by the CMIP5 GCM Models. *Pure and Applied Geophysics*, 178: 169-184.
- Muller, W.A., Baehr, J., Haak, H., Jungclaus, J.H., Kroger, J., Matei, D., et al, (2012). Forecast skill of multi-year seasonal means in the decadal prediction system of the Max Planck Institute for Meteorology. *Geophysical Research Letters*, 39 (22): 1-7.
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C.W. et al. (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, 9: 1-10.
- Nayak, S., Mandal, M., Maity, S., (2018). RegCM4 simulation with AVHRR land use data towards temperature and precipitation climatology over Indian region. *Atmospheric Research*, 214(1): 163-173.
- Ndiaye, PM., Bodian, A., Diop, L., Dezetter, A., Guilpart, E., Deme, A., Ogilvie, A. (2021). Future trend and sensitivity analysis of evapotranspiration in the Senegal River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35: 1-23.
- Pathak, R., Sahany, S., Mishra, S. K., Dash, S.K., (2019). Precipitation biases in CMIP5 models over the South Asian Region. *Scientific Reports*, 9(1): 1-13.
- Rahimi, J., Laux, P., Khalili, A. (2020). Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Koppen–Geiger climate zones. *Theor Appl Climatol*, 141: 183–199.
- Rehman, N., Adnan, M., Ali, S. (2018). Assessment of CMIP5 climate models over South Asia and climate change projections over Pakistan under representative concentration pathways. *International Journal of Global Warming*, 16 (4): 381-415.
- Shakeri, H., Motiee, H., McBean, E. (2020). Projection of important climate variables in large cities under the CMIP5–RCP scenarios using SDSM and fuzzy downscaling models. *Journal of Water and Climate Change*, 1802-1823.
- Shi, Y., Wang, G., Gao, X.J. (2018). Role of resolution in regional climate change projections over China. *Climate Dyn*, 51: 2375–2396.
- Shrestha, S., Bajracharya, AR., Mukand, S.B. (2016). Assessment of risks due to climate change for the Upper Tamakoshi Hydropower Project in Nepal. *Climate Risk Management*, 14: 27–41.
- Su, F., Duan, X., Chen, D., Hao, Z., Cuo, L. (2013). Evaluation of the Global Climate Models in the

- CMIP5 over the Tibetan Plateau. *Journal of climate*, 26: 3187-3208.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93: 485–498.
- Usta, D.F.B., Teymouri, M., Chatterjee, U. (2022). Assessment of temperature changes over Iran during the twenty-first century using CMIP6 models under SSP1-26, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios. *Arabian Journal of Geosciences*, 15 (416), doi.org/10.1007/s12517-022-09709-9.
- Wang, C., Zhang, L., Lee, S.K., Wu, L., Mechoso, C. (2014). A global perspective on CMIP5 climate model biases. *Nature Climate Change*, 201–205.
- Yan, L., Liu, X. (2014). Has climatic warming over the Tibetan Plateau paused or continued in recent years. *J. Earth Ocean Atmos. Sci*, 1(1): 13-28.
- Yang, X., Wood, E.F., Sheffield, J., Ren, L., Zhang, M., Wang, Y., (2018). Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for China from CMIP5 models. *Journal of Hydrometeorology*, 19(3): 609-623.
- Zhang, D.F., Han, Z.Y., Shi, Y. (2017). Comparison of climate projections between driving CSIRO-MK3.6.0 and downscaling simulation of RegCM4.4 over China. *Advances in Climate Change Research*, 8(4): 245-255.