



University of
Sistan and Baluchestan



Association of Geography
and Planning
of Border Areas of Iran

Assessment of Optimal Climatic Comfort Indices and Future Projections of Heat Stress in Zahedan: A Strategic Approach to Climate Change Adaptation

Fatemeh Mir¹, Mahmood Khosravi^{2✉}, Faeze Shoja³

1. Master of Climatology, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, zahedan, Iran.

E-mail: mir.fatemeh6897@gmail.com

2. Mahmood Khosravi, Professor in Climatology, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, zahedan, Iran.

✉ E-mail: khosravi@Gep.usb.ac.ir

3. Postdoctoral researcher in Climatology, Department of Physical Geography, University of Tehran, Teheran, Iran.

E-mail: Faeze.shoja@yahoo.com



How to Cite: Mir, F; Khosravi, M & Shoja, F. (2025). Assessment of Optimal Climatic Comfort Indices and Future Projections of Heat Stress in Zahedan: A Strategic Approach to Climate Change Adaptation. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 15 (54), 1-8.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/GAIJ.2025.50467.3247>

Article type:

Research Article

Received:

09/12/2024

Received in revised form:

12/01/2025

Accepted:

19/01/2025

Publisher online:

19/01/2025

ABSTRACT

Heat stress during warm seasons exposes many people to the risk of heat stroke and other heat-related effects. The objective of this study is to develop effective strategies to enhance urban resilience in Zahedan. This can be achieved by conducting a comprehensive evaluation of heat stress indices and modelling climate change with the aim of gaining a deeper understanding of the interactions between climatic and urban factors. The climate parameters required for calculating the indices for the observation period (1985-2014) were obtained from the Iranian Meteorological Organization (IRIMO). The daily minimum and maximum temperature outputs of the three models CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, and MIROC6 were also obtained from the ESGF website for future simulations (2015-2099) under two scenarios: SSP2-4.5, and SSP5-8.5. To select the optimal heat stress index, the values of various indices were first calculated, and then the appropriate index was determined based on the importance of the relative weight. The accuracy and efficiency of the selected GCMs were evaluated using a Taylor diagram and the models were corrected using the variance scaling method (VARI). The results showed that although the bioclimatic indices provided relatively similar conditions for heat stress in Zahedan, they were significantly different from the other parameters because of the relative importance of the two parameters, air temperature and relative humidity, with relative weights of 0.568 and 0.409, respectively. Therefore, the DI Thom, DI Mistry, and MDI indices calculated based on these two parameters were selected as desirable indices for determining heat stress in the study area because of their lower standard deviations and higher relative weights. The results of the multi-model ensembles also showed that the increasing trend of temperature in the study area until the end of 2099 under the two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 was significant with the value of Z-Mann-Kendall 9.68 and 12.21 (maximum temperature), 8.3 and 11.47 (minimum temperature) at 0.99 confidence level. According to the projection of the DI index, the highest increasing trend of this index is related to the months of November, December, and March, with values increasing by 4.4, 4.1, and 3.5 degrees Celsius, respectively, in the period 2066-2099 compared to the base period. The findings of this study can be employed in the formulation of urban development plans and the design of climate-responsive urban spaces to mitigate the adverse effects of global warming on the comfort of Zahedan residents.

Keywords:

Adaptation, Bioclimatic Indices, Climate Change, CMIP6 models, Relative weighting analysis.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

Extended Abstract

Introduction

Among the various weather conditions that directly or indirectly impact human health, extreme temperature events are regarded as the foremost factors (Velea & Bojariu, 2018). The average global temperature during 2010–2019 has risen by 0.9 to 1.2 °C compared to its value in 1850–1900 (Chen et al., 2023) and it is projected that this increase will continue in the future. According to the Clausius–Clapeyron relationship, absolute atmospheric humidity is projected to increase with elevated temperatures over a large portion of the globe, and should worsen the physiological effects of high temperatures (Epstein and Moran 2006). Numerous attempts have been made to quantify the impact of environmental conditions on human heat stress, resulting in the creation of various heat stress indices (HSIs) with differing levels of complexity (De Freitas & Grigorieva, 2017). In this study, we selected an optimal index according to the climatic conditions of Zahedan among the many indicators available for evaluating thermal stress. Subsequently, the changes in the selected index were evaluated under socio-economic scenarios (SSP). The findings of this study can be applied to regional planning, urban and building design, and the development of climate change adaptation strategies in Zahedan.

Material and Methods

To determine the optimal index of heat stress in the study area, climate parameters for the Zahedan Synoptic Station were obtained from the Iran Meteorological Organization for a period of 30 years (1985-2014). Projection of optimal index changes in the future horizon was also conducted based on the daily minimum and maximum temperature outputs from three general circulation models: CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, and MIROC6. These models were obtained from the ESGF website as part of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). This dataset comprises both historical climate model simulations (1985-2014) and future projections (2015-2100), which were utilized in this study under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 socioeconomic scenarios. The variance scaling method (VARI) was employed for the bias correction of the selected GCMs.

The bioclimatic indicators used in this study were calculated. The optimal heat stress index was determined using the relative importance metric method. The widely used method of relative weight analysis is recommended to identify the relative importance of the predictor variables (Mizumoto, 2023).

Result and Discussion

The optimal heat stress index in Zahedan was determined using statistical methods based on the study by Zamanian et al. (2017), Hame Rezaei et al. (2017), and Zare et al. (2018). The research findings showed that air temperature had the highest relative weight (0.568), making it the most effective parameter among all indices. This was followed by relative, with a relative weight of 0.409. Wind speed had the lowest impact on the heat stress evaluation, and its average weight among the indices was 0.0295. Based on the results obtained, it can be concluded that indices based on temperature and humidity are more appropriate for the determination of thermal stresses in the study area because of their lower standard deviation and higher relative weight. DI Thom, DI Mistry, and MDI indices were included in this group.

The average maximum temperature in the study area will continuously increase from 1985 to 2099. In the first decade it was 26.4 degrees Celsius, and at the end of the century it reached 30.4 degrees Celsius, which represents an increase of 4 °C. The heat maps indicated that the minimum temperature changed less than the maximum temperature over time, and the highest temperature increase occurred in August and September. The DI index increased with the maximum temperature in the study area. The most significant increase was projected to occur at the end of the century under the SSP5-8.5 scenario. Thus, the DI exhibited the most significant upward trend in the study area during November, December, and March. The annual pattern of DI indicates an upward trend in the index until 2099. The rate of change varied under the different SSP scenarios in the CMIP6 models. In such circumstances, climate change adaptation has emerged as an opportunity to enhance urban livability and well-being. Consequently, the development and enactment of a comprehensive climate change law incorporating a national action plan to mitigate adverse impacts and improve climate change adaptation can facilitate the achievement of these goals.

Conclusion

The results showed that although the bioclimatic indices provided relatively similar conditions for heat stress in Zahedan, they were significantly different from other parameters because of the relative importance of the two parameters, air temperature and relative humidity, with relative weights of 0.568 and 0.409, respectively. Therefore, the DI Thom, DI Mistry, and MDI indices calculated based on these two parameters were selected as desirable indices for determining heat stress in the study area because of their lower standard deviation and higher relative weight. The results of the multi-model ensembles also showed that the increasing trend of temperature in the study area until the end of 2099 under the two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 was significant with the value of Z-Mann-Kendall 9.68 and 12.21 (maximum temperature), 8.3 and 11.47 (minimum temperature) at 0.99 confidence level. According to the projection of the DI index, the highest increasing trend of this index is related to the months of November, December, and March, with values increasing by 4.4, 4.1, and 3.5 degrees Celsius, respectively, in the period 2066-2099 compared to the base period. The findings of this research indicate that the rising temperature in Zahedan City, coupled with urban expansion, population density, increased human-made construction, and widespread use of fossil fuels, can lead to the intensification of urban heat islands, reduced air quality, and increased energy consumption. These consequences negatively impact citizens' health, economic productivity, and urban infrastructure. Consequently, to enhance Zahedan's resilience against these challenges, urban planning must be conducted using a comprehensive, participatory, and forward-looking approach.

Key words: Adaptation, Bioclimatic Indices, Climate Change, CMIP6 models, Relative weighting analysis.

References

- Afzalinia, F., Mohammadi, H., & Farajzadeh, M. (2019). Thermal stress analysis in 22 districts of Tehran using Hotspot spatial model and cluster analysis. *Quarterly Geographical Journal of Territory*, 16(2), 21-41. (In Persian).
- Alavipanah, S., Wegmann, M., Qureshi, S., Weng, Q., & Koellner, T. (2015). The role of vegetation in mitigating urban land surface temperatures: A case study of Munich, Germany during the warm season. *Sustainability*, 7(4), 4689-4706.
<https://doi.org/10.3390/su7044689>
- Asghari, M., Ghalhari, G. F., Abbasinia, M., Shakeri, F., Tajik, R., & Ghannadzadeh, M. J. (2020). Feasibility of relative strain index (RSI) for the assessment of heat stress in outdoor environments: Case study in three different climates of Iran. *The Open Ecology Journal*, 13(1).
<https://doi.org/10.2174/1874213002013010011>
- Aylett, A. (2015). Institutionalizing the urban governance of climate change adaptation: Results of an international survey. *Urban Climate*, 14, 4-16.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.06.005>
- Azizi, G., Safarrad, T., Mohammadi, H. and Faraji Sabokbar, H. (2016). Evaluation and Comparison of Reanalysis Precipitation Data in Iran. *Physical Geography Research*, 48(1), 33-49. (In Persian). doi: 10.22059/jphgr.2016.57026
- Baaghideh, M., Entezari, A., & Shoja, F. (2012). Evaluation of the Different Degrees of Thermal Stress in the Southern Coast of Iran. *Geography and Environmental Sustainability*, 2(1), 55-68. (In Persian).
- Blouki, H., Fazeli, M., & Sharifzadeh, M. (2021). Predicting the effects of climate change on Sistan and Baluchestan province with emphasis on precipitation and temperature variables. Presented at the 2nd International and 5th National Conference on Conservation of Natural Resources and Environment, Ardabil, Iran. (In Persian).
- Brouillet, A., & Joussaume, S. (2020). More perceived but not faster evolution of heat stress than temperature extremes in the future. *Climatic Change*, 162(2), 527-544.
<https://doi.org/10.1007/s10584-020-02752-z>

Chen, Y., Wang, L., Shi, X., Zeng, C., Wang, Y., Wang, G., ... & Zhang, F. (2023). Impact of Climate Change on the Hydrological Regimes of the Midstream Section of the Yarlung Tsangpo River Basin Based on SWAT Model. *Water*, 15(4), 685.

<https://doi.org/10.3390/w15040685>

Crowe, J., van Wendel de Joode, B., & Wesseling, C. (2009). A pilot field evaluation on heat stress in sugarcane workers in Costa Rica: What to do next?. *Global Health Action*, 2(1), 2062.

<https://doi.org/10.3402/gha.v2i0.2062>

Cui, T., Li, C., & Tian, F. (2021). Evaluation of temperature and precipitation simulations in CMIP6 models over the Tibetan Plateau. *Earth and Space Science*, 8(7), e2020EA001620.

<https://doi.org/10.1029/2020EA001620>

De Freitas, C. R., & Grigorieva, E. A. (2017). A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices. *International journal of biometeorology*, 61(3), 487-512.

<https://doi.org/10.1007/s00484-016-1228-6>

Epstein, Y., & Moran, D. S. (2006). Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial health*, 44(3), 388-398.

<https://doi.org/10.2486/indhealth.44.388>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.

<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

Farajzadeh, H., saligheh, M. and Alijani, B. (2016). Application of Universal Thermal Climate Index in Iran from tourism perspective. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 5(7), 117-138. (In Persian). doi: 10.22111/jneh.2016.2658

Farzaneh, M., Malboosi, S. and Hamidianpour, M. (2022). Prediction of climatic variables in Sistan and Baluchestan province under the conditions of RCP radiation induction scenarios. *Journal of Climate Research*, 1401(51), 148-129. (In Persian).

Forsthoft, A., Mehnert, P., & Neffgen, H. (2001). Comparison of laboratory studies with predictions of the required sweat rate index (ISO 7933) for climates with moderate to high thermal radiation. *Applied ergonomics*, 32(3), 299-303.

[https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(01\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(01)00005-9)

Garver, M. S., & Williams, Z. (2020). Utilizing relative weight analysis in customer satisfaction research. *International Journal of Market Research*, 62(2), 158-175.

<http://dx.doi.org/10.1177/1470785319859794>

Ghazi, B., Przybylak, R., & Pospieszńska, A. (2023). Projection of climate change impacts on extreme temperature and precipitation in Central Poland. *Scientific Reports*, 13(1), 18772.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-46199-5>

Grömping, U. (2007). Estimators of relative importance in linear regression based on variance decomposition. *The American Statistician*, 61(2), 139-147.

<https://doi.org/10.1198/000313007X188252>

Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., Dowdy, A. J., Bador, M., Boschat, G., ... & Power, S. (2020). Insights from CMIP6 for Australia's future climate. *Earth's Future*, 8(5), e2019EF001469.

<https://doi.org/10.1029/2019EF001469>

- Hamerezaee, M., Golbabaee, F., Nasiri, P., Azam, K., Farhang Dehghan, S., Fathi, A., ... et al. (2018). Determination of optimum index for heat stress assessment on the basis of physiological parameters, in steel industries. *Journal of Health Safety and Work (J Health Saf Work)*, 8(2), 163-174. (In Persian).
<http://jhs.w.tums.ac.ir/article-1-5856-fa.html>
- Hamidianpour, M., & Shoja, F. (2022). *Introduction to methods and techniques of climate and climate change modeling*. University of Sistan and Baluchestan Press. (In Persian)
- Heidari, H., Golbabaee, F., Shamsipour, A., Forushani, A. R., & Gaeini, A. (2018). Consistency between sweat rate and wet bulb globe temperature for the assessment of heat stress of people working outdoor in arid and semi-arid regions. *The international journal of occupational and environmental medicine*, 9(1).
<http://dx.doi.org/10.15171/ijjem.2018.1204>
- Heidari, H., Golbabaee, F., Shamsipour, A., & Rahimi-Forushani, A. (2019). Occupational heat stress in outdoor settings considering the regional climate change in the future decades in Iran. *Iran Occupational Health*, 16(2), 33-47. (In Persian).
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press.
- Iwamoto, Y., & Ohashi, Y. (2021). Assessing the Climatological Relationship between Heatstroke Risk and Heat Stress Indices in 47 Prefectures in Japan. *GeoHazards*, 2(4), 321-331.
<https://doi.org/10.3390/geohazards2040017>
- Jiang, Y., Huang, J., Shi, T., & Li, X. (2021). Cooling island effect of blue-green corridors: Quantitative comparison of morphological impacts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(22), 11917.
<https://doi.org/10.3390/ijerph182211917>
- Juzbašić, A., Ahn, J. B., Cha, D. H., Chang, E. C., & Min, S. K. (2022). Changes in heat stress considering temperature, humidity, and wind over East Asia under RCP8.5 and SSP5-8.5 scenarios. *International Journal of Climatology*, 42(12), 6579-6595.
<https://doi.org/10.1002/joc.7636>
- Kadkhoda, E., Omidvar, K., Zarrin, A., Mazidi, A. and Dadashi-Roudbari, A. (2023). Projected heat stress in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Iranian Journal of Geophysics*, 17(2), 157-173. doi: 10.30499/ijg.2023.374840.1472 (In Persian).
- Khalili, A. (2023). Climate changes and Iran's 7th development plan at a glance. *Journal of Agricultural Meteorology*, 11(2), 1-3. (In Persian). doi: 10.22125/agmj.2023.186488
- khoshnafs, M. and sedaghat, M. (2015). Climate comfort investigation by weather severity index (Case study Northwest of Iran). *Journal of Applied Climatology*, 2(1), 91-104. (In Persian).
- Kumar, P., Debele, S. E., Khalili, S., Halios, C. H., Sahani, J., Aghamohammadi, N., ... & Jones, L. (2024). Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: Drivers, effectiveness, and future needs. *The Innovation*, 5(2).
<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100588>
- Kumar, T. L., Vinodhkumar, B., Rao, K. K., Chowdary, J. S., Osuri, K. K., & Desamsetti, S. (2023). Insights from the bias-corrected simulations of CMIP6 in India's future climate. *Global and Planetary Change*, 226, 104137.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104137>

Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L., Falfán, I., & MacGregor-Fors, I. (2022). Too hot to handle? On the cooling capacity of urban green spaces in a Neotropical Mexican city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127633.

<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127633>

Mazidi, A. , Omidvar, K. , Malek Ahmadi, A. and Hosseini, S. S. (2021). Evaluation of bioclimatic indicators affecting human comfort (Case study: Urmia). *Geography and Human Relationships*, 4(2), 155-175. (In Persian).

doi: 10.22034/gahr.2021.286618.1560

Mistry, M. N. (2020). A high spatiotemporal resolution global gridded dataset of historical human discomfort indices. *Atmosphere*, 11(8), 835.

<https://doi.org/10.3390/atmos11080835>

Mizumoto, A. (2023). Calculating the relative importance of multiple regression predictor variables using dominance analysis and random forests. *Language Learning*, 73(1), 161-196.

<https://doi.org/10.1111/lang.12518>

Moda, H. M., Filho, W. L., & Minhas, A. (2019). Impacts of climate change on outdoor workers and their safety: some research priorities. *International journal of environmental research and public health*, 16(18), 3458.

<https://doi.org/10.3390/ijerph16183458>

Modarres, R., Ghadami, M., Naderi, S., & Naderi, M. (2018). Future heat stress arising from climate change on Iran's population health. *International journal of biometeorology*, 62, 1275-1281.

<https://doi.org/10.1007/s00484-018-1532-4>

Moran, D. S., Pandolf, K. B., Shapiro, Y., Heled, Y., Shani, Y., Mathew, W. T., & Gonzalez, R. R. (2001). An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT). *Journal of thermal biology*, 26(4-5), 427-431.

[https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(01\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(01)00055-9)

Moustris, K., Kavadias, K. A., Zafirakis, D., & Kaldellis, J. K. (2020). Medium, short and very short-term prognosis of load demand for the Greek Island of Tilos using artificial neural networks and human thermal comfort-discomfort biometeorological data. *Renewable Energy*, 147, 100-109.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.126>

Moyer, A. N., & Hawkins, T. W. (2017). River effects on the heat island of a small urban area. *Urban Climate*, 21, 262-277.

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.004>

Najafi, M. S. (2020). Simulation of Climate Change Impacts on Heat Stress over the Caspian Sea Region. *Climate Change Research*, 1(2), 1-12. (In Persian). doi: 10.30488/ccr.2020.111110

Negaraesh, H. , Khosravi, M. , Shhoseinei, M. and Mahmodei, P. (2010). A Study on Short-Term Droughts of Zahedan Township. *Geography and Development*, 8(18), 109-134. (In Persian).

doi: 10.22111/gdij.2010.1123

Nie, S., Fu, S., Cao, W., & Jia, X. (2020). Comparison of monthly air and land surface temperature extremes simulated using CMIP5 and CMIP6 versions of the Beijing Climate Center climate model. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 487-502.

<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03090-x>

Pakbaz, H. ,Khosravi, M. ,Tavousi, T. ,& Mahmoudi, P. (2018). Analysis of Spatial Patterns of Discomfort Index (DI) Classes in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5(2), 73-90. (In Persian).

<http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2745-fa.html>

- Peng, S., Wang, C., Li, Z., Mihara, K., Kuramochi, K., Toma, Y., & Hatano, R. (2023). Climate change multi-model projections in CMIP6 scenarios in Central Hokkaido, Japan. *Scientific Reports*, 13(1), 230.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-27357-7>
- Poupkou, A., Nastos, P., Melas, D., & Zerefos, C. (2011). Climatology of discomfort index and air quality index in a large urban mediterranean agglomeration. *Water, Air, & Soil Pollution*, 222(1), 163-183.
<https://doi.org/10.1007/s11270-011-0814-9>
- Qorban-Nia Khabiri, V., Azimi, E., & Armin, M. (2022). Calculating RayMan model tourism climate indices in Yasuj and analyzing their trends. *Geography and Environmental Studies*, 11(41), 107-122. (In Persian).
- Roghanchi, P., & Kocsis, K. C. (2018). Challenges in selecting an appropriate heat stress index to protect workers in hot and humid underground mines. *Safety and health at work*, 9(1), 10-16.
<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.04.002>
- Roshan, G., Almomenin, H. S., da Silveira Hirashima, S. Q., & Attia, S. (2019). Estimate of outdoor thermal comfort zones for different climatic regions of Iran. *Urban Climate*, 27, 8-23.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.005>
- Runhaar, H., Mees, H., Wardekker, A., van der Sluijs, J., & Driessen, P. P. (2012). Adaptation to climate change-related risks in Dutch urban areas: stimuli and barriers. *Regional environmental change*, 12, 777-790.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10113-012-0292-7>
- Sadeghi-Ravesh, M. H., & Tabatabaei, M. (2009). Determining the thermal comfort zone in the arid climate of Yazd. *Hoviat shahr*, 3(4), 39-46. (In Persian).
- Safae pour, M. , Shabankari, M. and Taghavi, T. (2013). The Effective Bioclimatic Indices on Evaluating Human Comfort (ACase Study: Shiraz City). *Geography and Environmental Planning*, 24(2), 193-210. (In Persian).
- Saligeh, M. , Bareimanei, F. and Esmaeilnegad, M. (2008). Climatological Regionalization on Sistan & Balouchestan Province. *Geography and Development*, 6(12), 101-106. (In Persian). doi: 10.22111/gdij.2008.1245
- Santos, R. C., de Souza, A. S., de Souza Santana, C., Sanches, A. C., Gomes Filho, R. R., Martins, E. A. S., ... & Theodoro, F. L. (2020). Evaluation of the rational use of agricultural space for better human occupation. *International Journal for Innovation Education and Research*, 8(10), 384-395.
<http://dx.doi.org/10.31686/ijer.vol8.iss10.2692>
- Shatariyan, R. (2008). *Climate and Architecture of Iran*. Simay-e-Danesh Publications. (In Persian).
- Sheikhi Arjanki, S. , nadi, M. , Rahmaninia, J. and Mohammad Nazari, B. (2021). Climate change impacts on Temperature-Humidity Index, (Case Study: Ramsar and Babolsar stations). *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(2), 39-47. (In Persian).
doi: 10.22125/agmj.2021.284851.1114
- Sherwood, S. C., & Huber, M. (2010). An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(21), 9552-9555.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0913352107>
- Shukla, K. K., & Attada, R. (2023). CMIP6 models informed summer human thermal discomfort conditions in Indian regional hotspot. *Scientific Reports*, 13(1), 12549.
<http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-38602-y>
- Siabi, E. K., Awafo, E. A., Kabo-bah, A. T., Derkyi, N. S. A., Akpoti, K., Mortey, E. M., & Yazdanie, M. (2023). Assessment of Shared Socioeconomic Pathway (SSP) climate scenarios and its impacts on the Greater Accra region. *Urban Climate*, 49, 101432.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101432>

- Siahsarani, A. , Azadi, M. , Layeghi, B. and Babazadeh, D. (2023). The Sensitivity Analysis of Whitecapping Dissipation Term for Calibration of SWAN Model Forced with ERA5 Winds in the Gulf of Oman. *Nivar*, 47(120-121), 15-36. (In Persian). doi: 10.30467/nivar.2023.391823.1243
- Tavousi, T. , Zaharae, A. and Khosravi, M. (2015). Simulation of Climate Change in Sistan and Baluchestan for period 2009-2040 by Using Downscaling the Data of Global Circulation Model. *Geographical Research*, 30(118), 185-206. (In Persian).
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192.
<http://dx.doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*, 456, 12-29.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Velea, L., & Bojariu, R. (2018). Summer thermal discomfort conditions in Romania under climate change scenarios. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 13(2), 595-603.
<http://dx.doi.org/10.26471/cjees/2018/013/050>
- Yi, X., Zou, L., Niu, Z., Jiang, D., & Cao, Q. (2022). Multi-model ensemble projections of winter extreme temperature events on the Chinese mainland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), 5902.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19105902>
- Zamanian, Z., Sedaghat, Z., Hemehrezaee, M., & Khajehnasiri, F. (2017). Evaluation of environmental heat stress on physiological parameters. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 15(1), 1-8.
<https://doi.org/10.1186/s40201-017-0286-y>
- Zare, S., Hasheminejad, N., Ahmadi, S., Bateni, M., Baneshi, M. R., & Hemmatjo, R. (2019). A Comparison of the Correlation Between ESI and Other Thermal Indices (WBGT, WBGT, TWL, HI, SET, PET, PSI, and PSIHR): A Field Study. *Health Scope*, 8(1).
<http://dx.doi.org/10.5812/jhealthscope.63827>
- Zhao, Y., Ducharme, A., Sultan, B., Braconnot, P., & Vautard, R. (2015). Estimating heat stress from climate-based indicators: present-day biases and future spreads in the CMIP5 global climate model ensemble. *Environmental Research Letters*, 10(8), 084013.
<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084013>
- Zolfaghari, H. (2008/1386). Determination of Suitable Calendar for Tourism in Tabriz with using the Thermo-physiological Indices (PET and PMV). *Geographical Research Quarterly*, 62, 129-141. (In Persian).
- Zonato, A., Martilli, A., Gutierrez, E., Chen, F., He, C., Barlage, M., ... & Giovannini, L. (2021). Exploring the effects of rooftop mitigation strategies on urban temperatures and energy consumption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(21), e2021JD035002.
<https://doi.org/10.1029/2021JD035002>

ارزیابی شاخص‌های بهینه آسایش اقلیمی و آینده‌نگری تنش‌های گرمایی در شهر زاهدان؛ (راهبردی جهت سازگاری با تغییر اقلیم)

فاطمه میر^۱، محمود خسروی^{۲*}، فائزه شجاع^۳

مقاله پژوهشی

چکیده

تنش‌های گرمایی در فصول گرم سال، افراد بسیاری را در معرض خطر گرم‌زدگی و سایر عوارض ناشی از گرما قرار می‌دهند. هدف تحقیق حاضر، ارزیابی جامع شاخص‌های تنش گرمایی و مدل‌سازی تغییرات اقلیمی در شهر زاهدان است تا بتوان با درک بهتر تأثیرات متقابل عوامل اقلیمی و شهری، راهکارهای مؤثری برای افزایش تاب‌آوری شهری ارائه نمود. برای این منظور، فراسنج‌های اقلیمی مورد نیاز محاسبه شاخص‌ها برای دوره‌ی مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. برونداد روزانه دمای کمینه و بیشینه سه مدل «CNRM-CM6-1»، «CNRM-ESM2-1» و «MIROC6» نیز جهت شبیه‌سازی‌های آینده (۲۰۱۵-۲۰۹۹) تحت دو سناریوی «SSP2-4.5» و «SSP5-8.5» از وبسایت «ESGF» دریافت شد. برای انتخاب نمایه بهینه تنش دمایی، نخست مقادیر شاخص‌های مختلف محاسبه و سپس براساس معیار اهمیت وزن نسبی، شاخص مناسب تعیین گردید. در ادامه میزان دقت و کارایی خروجی خام GCMهای منتخب، در قالب دیاگرام تیلور مورد ارزیابی قرار گرفت و آریبی مدلهای نیز با کاربرد روش مقیاس‌گذاری واریانس تصحیح شد. نتایج نشان‌داد اگرچه شاخص‌های زیست‌اقلیمی شرایط نسبتاً مشابهی از وضعیت تنش‌های گرمایی زاهدان ارائه می‌دهند اما بر مبنای معیار اهمیت نسبی دو فراسنج دمای هوا و رطوبت نسبی به ترتیب با وزن نسبی ۰/۵۶۸ و ۰/۴۰۹ تفاوت چشمگیری با دیگر پارامترها دارند؛ بنابراین شاخص‌های «Thom»DI، «DI Mistry» و «MDI» که مبتنی بر این دو پارامتر محاسبه می‌شوند به دلیل انحراف معیار کمتر و وزن نسبی بالاتر، به عنوان شاخص‌های مطلوب تعیین تنش‌های دمایی در منطقه انتخاب شدند. برونداد حاصل از اجرای گروهی مدلهای نیز نشان‌داد که روند افزایشی دما تا انتهای سال ۲۰۹۹ تحت هر دو سناریوی «SSP2-4.5» و «SSP5-8.5» به ترتیب با مقدار Z من -۹/۶۸ و ۱۲/۲۱ (دمای بیشینه) و ۸/۳ و ۱۱/۴۷ (دمای کمینه) در سطح اطمینان ۰/۹۹ معنی‌دار است. بدین ترتیب با توجه به آینده‌نگری شاخص DI، ماه‌های آبان، آذر و اسفند پیش‌تاز روند صعودی این نمایه هستند که در بازه زمانی ۲۰۹۹-۲۰۶۶ مقادیر آن طی ماه‌های ذکر شده به ترتیب ۴/۴، ۴/۱ و ۳/۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در تدوین برنامه‌های آمایش شهری و طراحی فضاهای شهری سازگار با اقلیم، به منظور کاهش اثرات سوء گرمایش جهانی بر آسایش ساکنان زاهدان، مورد استفاده قرار گیرد.

جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای
 بهار ۱۴۰۴، سال ۱۵، شماره ۵۴
 تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹
 تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳
 تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰
 صفحات: ۱-۳۲



واژه‌های کلیدی:
 تغییر اقلیم، سازگاری، شاخص‌های زیست‌اقلیمی، مدل‌های «CMIP6»، آنالیز وزن نسبی.

مقدمه

در میان شرایط گوناگون آب‌وهوایی که به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم سلامت انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهند، رویدادهای مربوط به دماهای شدید، از مهم‌ترین عوامل به حساب می‌آیند (Velea & Bojariu, 2018). آسیب به سلامت انسان در اثر گرم‌زدگی به‌عنوان یک مسئله جهانی ناشی از گرم‌شدن کره زمین و جزایر گرمایی شهری شناخته شده و انتظار می‌رود بین سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰، تغییرات آب‌وهوایی باعث مرگ ۲۵۰۰۰۰ نفر در سال

بر اثر سوء تغذیه، مالاریا، اسهال و تنش گرمایی شود (Iwamoto & Ohashi, 2021). میانگین دمای کره زمین طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۹ نسبت به مقدار آن در سال‌های ۱۸۵۰-۱۹۰۰ بین ۰/۹ تا ۱/۲ درجه سلسیوس افزایش داشته (Chen et al., 2023) و پیش‌بینی می‌شود این افزایش در آینده نیز ادامه خواهد داشت. براساس گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، با قطعیت زیاد میانگین دمای سطح زمین از اهداف گرمایشی ۱/۵ و ۲ درجه سلسیوس (نسبت به سطح قبل از صنعتی شدن) که توسط توافق پاریس پیشنهاد شده است، بیشتر می‌شود (IPCC, 2021). به دنبال رابطه کلازیوس-کلاپیرون، رطوبت مطلق اتمسفر با افزایش دما در بخش بزرگی از کره زمین افزایش می‌یابد؛ بنابراین اثرات فیزیولوژیکی دماهای بالا را بدتر خواهد کرد (Epstein & Moran, 2006). در دنیای گرم‌تر و مرطوب‌تر، انتظار می‌رود استرس گرمایی و پیامدهای مربوط به آن در سطح جهان افزایش یابد (Zhao et al., 2015). تغییرات اقلیمی به یکی از چالش‌های بزرگ جهانی تبدیل شده و تأثیرات آن بر زندگی انسان‌ها و محیط زیست قابل مشاهده است. در این میان شهرها به عنوان مراکز اصلی فعالیت‌های انسانی، به طور خاص تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارند. مراکز شهری در اکثر کشورهای در حال توسعه شاهد رشد سریع جمعیت هستند. طبق گزارش سازمان ملل متحد، جمعیت شهری جهان تا سال ۲۰۵۰ حدود ۵۷ درصد افزایش خواهد یافت و کشورهای در حال توسعه بیش از ۹۰ درصد از رشد جمعیت آینده را در شهرهای خود تجربه خواهند کرد (Moda et al., 2019). در چنین جوامعی تنش‌های گرمایی به یکی از نگرانی‌ها در مدیریت مخاطرات طبیعی تبدیل شده که باید با آن مقابله و یا سازگاری داشت (افضلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۸)؛ بنابراین شاخص‌های آسایش اقلیمی می‌توانند به عنوان ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی شهری پایدار و کاهش اثرات نامطلوب گرمایش جهانی بر شهرنشینی مورد استفاده قرار گیرند. تلاش‌های زیادی برای بیان تنش گرمایی انسان به عنوان تابعی از شرایط محیطی انجام شده که منجر به توسعه تعداد قابل توجهی از شاخص‌های تنش گرمایی^۱ (HSIs) با پیچیدگی‌های متفاوت گردیده است (De Freitas & Grigorieva, 2017) و انواع شاخص‌های معتبر و استاندارد به عنوان اقدامات حفاظتی برای کاهش پیامدهای تنش گرمایی معرفی شده‌اند (Crowe et al., 2009; Roshan et al., 2019). از آنجایی که بسیاری از این شاخص‌ها، براساس موضوعات و اقلیم اروپا و آمریکای شمالی توسعه یافته‌اند، هنگام استفاده از شاخص‌های حرارتی، نگرانی‌ها و سؤالات زیادی وجود دارد. این که آیا شاخص‌های معرفی شده در کشورهای توسعه یافته را می‌توان با همین دقت در کشورهای در حال توسعه استفاده کرد؟ مطالعات نشان می‌دهد که علی‌رغم گستره استانداردهای بین‌المللی، توجه کمی به میزان اعتبار و قابل استفاده بودن این شاخص‌ها در کشورهای در حال توسعه صورت گرفته است (Forsthoft et al., 2001; Heidari et al., 2016).

در ایران تحقیقات متعددی جنبه‌های مختلف تنش دمایی و آسایش اقلیمی را مورد واکاوی قرار داده‌اند که از جمله می‌توان به پژوهش‌های صادقی‌روش و طباطبایی، ۱۳۸۸؛ صفایی‌پور و همکاران، ۱۳۹۲؛ باعقیده و همکاران، ۱۳۹۱؛ خوش‌نفس و صداقت، ۱۳۹۴؛ فرج‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ پاکباز و همکاران، ۱۳۹۷؛ افضلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۸؛ مزیدی و همکاران، ۱۴۰۰ و قربان‌نیا خبیری و همکاران ۱۴۰۱ اشاره کرد. در مطالعات مذکور، محققین یک یا چند شاخص تنش دمایی را در حوضه مورد نظر ارزیابی کرده و بر آن مینا دوره‌های آسایش و عدم آسایش اقلیمی را طی ماه‌های مختلف مشخص نموده‌اند ولی معیار مناسبی برای انتخاب شاخص‌های مورد استفاده ارائه نداده‌اند. به همین دلیل، در پژوهش حاضر سعی بر این است که نخست از بین شاخص‌های متعددی که برای ارزیابی تنش‌های دمایی

^۱ -Heat Stress Indices

موجود است، شاخص بهینه‌ای متناسب با اقلیم زاهدان انتخاب کرده و در ادامه تغییرات شاخص منتخب را تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSP^۱) ارزیابی نمود. این مسئله در پژوهش‌های محققین نواحی مختلف دنیا بسیار مورد توجه قرار گرفته است:

ژائو^۲ و همکاران (۲۰۱۵) با کاربرد سه شاخص تنش گرمایی مربوط به دما-رطوبت و ۲۱ مدل شبیه‌سازی آب‌وهوا از پروژه CMIP5 تحت سناریوی RCP8.5 نشان دادند که در سطح جهانی، شدت تنش گرمایی تا پایان قرن ۲۱ به‌طور قابل توجهی در مناطق مرطوب حاره‌ای و نیمه‌حاره‌ای افزایش خواهد یافت. مدرس و همکاران (۲۰۱۸) با کاربست مدل‌های CGCM3، MPI-OM ECHAM5/ و CCSM3 از سری GCM‌های گزارش چهارم IPCC، تغییرات آبی در شاخص گرما را طی دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ بر سلامت جمعیت ایران مورد مطالعه قراردادند و به این نتیجه رسیدند که تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در ایران شاخص گرما از آستانه بحرانی سازگاری انسان فراتر خواهد رفت. برویلت و ژوسوم^۳ (۲۰۲۰) با کاربرد مجموعه‌ای از ۱۲ مدل CMIP5، سرعت تغییر دمای هوا و شاخص WBGT را در عرض‌های جغرافیایی متوسط در سال ۲۰۸۰ دو برابر سریع‌تر از شرایط فعلی پیش‌نگری کردند. جوزباسیک^۴ و همکاران (۲۰۲۲) با ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر تنش‌های گرمایی در شرق آسیا به این نتیجه رسیدند که میانگین و صدک ۹۵ حداکثر دما و دمای مؤثر خالص (شاخص تنش گرمایی) تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت که در این بین نرخ افزایشی شاخص تنش گرمایی بیشتر است. پیش‌نمایی‌های اقلیمی آینده تحت سناریوهای مختلف SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان‌دهنده روند افزایشی شاخص تنش گرمایی با نرخ‌های ۰/۰۹، ۰/۲۶ و ۰/۵۶ درجه سلسیوس در طول قرن بیست‌ویکم در شمال غربی هند است (Shukla & Attada, 2023). کدخدا و همکاران (۱۴۰۲) نیز با مطالعه تنش‌های گرمایی در ایران با استفاده از شاخص UTCI به افزایش تنش‌های گرمایی قوی و خیلی قوی تا اواخر قرن اشاره کردند. مسئله تنش گرمایی در شرایط اقلیم در حال گذار و بالارفتن دمای کره زمین در نتیجه افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در نواحی گرم و خشک نمود بیشتری پیدا می‌کند. شهر زاهدان به‌عنوان یکی از شهرهای گرم و خشک ایران، با ویژگی‌های اقلیمی منحصربه‌فردی مانند دمای بالا، رطوبت کم و تابش خورشیدی شدید روبرو است. این شرایط اقلیمی، ساکنان این شهر را در معرض تنش‌های گرمایی شدیدی در فصل گرم سال قرار می‌دهد. با توجه به پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم، انتظار می‌رود شدت و فراوانی این تنش‌ها در آینده افزایش یابد. در این پژوهش، با هدف ارزیابی شرایط آسایش حرارتی در زاهدان و پیش‌بینی تغییرات آینده آن تحت سناریوهای مختلف مدل‌های اقلیمی، به بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف آسایش حرارتی پرداخته شده است. انتخاب شاخص مناسب برای ارزیابی آسایش حرارتی در مناطق گرم‌و‌خشک مانند زاهدان از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا این شاخص باید بتواند به‌طور دقیق اثرات ترکیبی دما، رطوبت، تابش خورشیدی و سرعت باد بر آسایش انسان را نشان دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین برنامه‌های آمایش سرزمین، طراحی شهری و ساختمان‌ها و همچنین توسعه استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی در زاهدان مورد استفاده قرار گیرد.

^۱ - Shared Socioeconomic Pathways

^۲ - Zhao

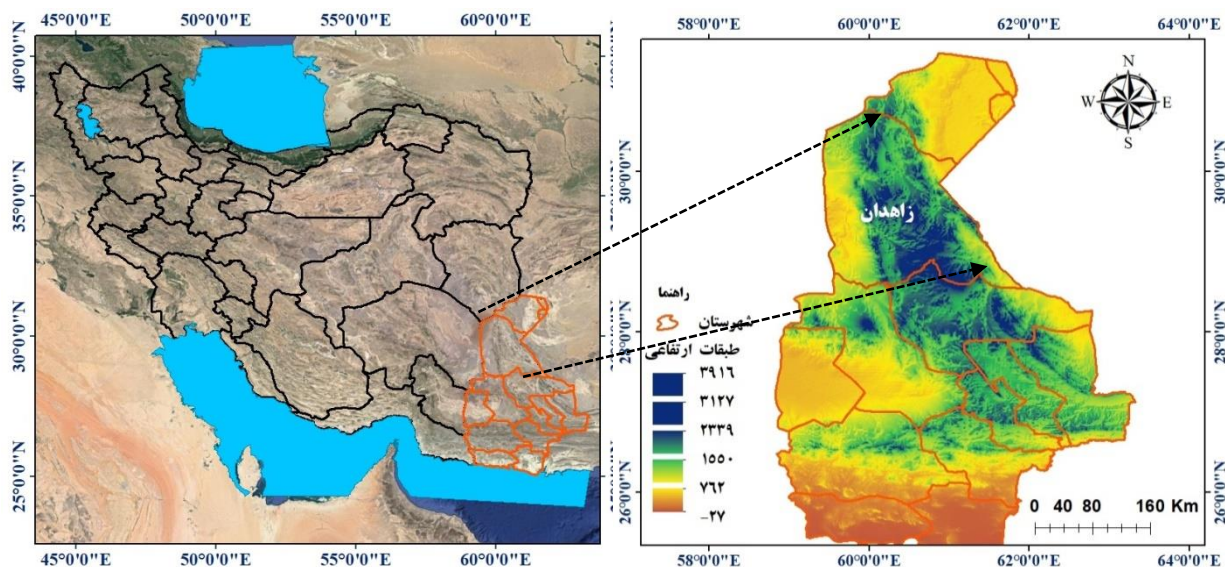
^۳ - Brouillet & Jousaume

^۴ - Juzbašić

داده‌ها و روش‌شناسی

معرفی منطقه مورد مطالعه

زاهدان در ناحیه شمالی استان سیستان و بلوچستان با وسعتی حدود ۴۱۴۰۰ کیلومتر مربع در شمال قله تفتان و بین مختصات ۵۹ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی و ۲۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی واقع گردیده است (شکل ۱). ارتفاع منطقه در ایستگاه سینوپتیک زاهدان به ۱۳۷۰ متر از سطح دریا می‌رسد. این شهر در دشتی صاف و هموار با شیبی ملایم قرار گرفته و کوه‌های کم‌وبیش مرتفع و خشن آنرا محصور کرده‌اند. ناحیه زاهدان از نظر عوارض طبیعی تقریباً منطبق بر ارتفاعات شرقی کشور بوده که از سمت غرب به دشت لوت منتهی می‌شود (نگارش و همکاران، ۱۳۸۹). شهر زاهدان از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی در منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌خشک و معتدل گرم در حاشیه فلات مرکزی ایران قرار گرفته (سلیقه و همکاران، ۱۳۸۷) و در طول سال، تحت تأثیر بادهایی با جهت جنوب غربی-شمال شرقی است که در این میان بادهای ۱۲۰ روزه سیستان تا حدودی از شدت گرمای هوای شهر می‌کاهد. در جدول ۱، میانگین برخی از عناصر اقلیمی ایستگاه مورد مطالعه در یک بازه زمانی طولانی مدت (۱۹۸۶-۲۰۲۰) و به‌صورت ماهانه ارائه گردیده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

جدول ۱- متوسط آماره‌های اقلیمی ایستگاه زاهدان طی دوره ۱۹۸۶-۲۰۲۰

متوسط دمای هوا (°C)	رطوبت نسبی (%)	سرعت باد (m/s)	بارش (mm)	ساعات آفتابی (h)	
۷/۵۳	۴۸/۳۹	۳/۵۵	۱۶/۵۰	۷/۴۴	ژانویه
۱۰/۵۰	۴۲/۵۶	۴/۲۶	۱۲/۴۱	۷/۸۳	فوریه
۱۵/۳۲	۳۶/۶۲	۴/۱۹	۱۳/۹۳	۷/۷۹	مارس
۲۱/۰۹	۲۸/۱۹	۳/۵۳	۸/۶۳	۸/۹۲	آوریل
۲۵/۹۴	۲۱/۰۳	۳/۳۲	۳/۶۸	۹/۹۵	می
۲۹/۲۴	۱۶/۲۴	۳/۵۵	۱/۲۵	۱۱/۰۱	ژوئن

۱۱/۰۸	۰/۹۶	۳/۴۶	۱۶/۳۰	۳۰/۳۰	جولای
۱۱/۰۳	۰/۱۶	۳/۰۶	۱۶/۰۶	۲۸/۱۸	آگوست
۱۰/۵۱	۰/۱۰	۲/۶۴	۱۷/۱۶	۲۴/۰۱	سپتامبر
۹/۶۰	۳/۹۸	۲/۳۱	۲۴/۷۰	۱۸/۹۳	اکتبر
۸/۷۴	۳/۹۰	۲/۵۹	۳۴/۷۷	۱۲/۹۷	نوامبر
۷/۳۷	۱۲/۵۳	۲/۹۰	۴۲/۲۵	۸/۵۹	دسامبر

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

برای تعیین شاخص بهینه تنش گرمایی در محدوده مورد مطالعه پارامترهای اقلیمی شامل دمای هوا (درجه سلسیوس)، دمای نقطه شبنم (درجه سلسیوس)، رطوبت نسبی (درصد)، فشار بخار آب (هکتوپاسکال)، سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)، میزان ابرناکی (اکتا) و ساعات آفتابی برای ایستگاه سینوپتیک زاهدان طی دوره زمانی ۳۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۴) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. جهت تصویرسازی تغییرات شاخص بهینه در افق آینده نیز، برونداد روزانه دمای کمینه و بیشینه سه مدل گردش کلی جو (GCM^۱)، از فاز ۶ پروژه مقایسه مدل جفت شده (CMIP6^۲)، از وبسایت فدراسیون شبکه سیستم زمین (ESGF^۳) به آدرس <https://esgf-node.llnl.gov/search/esgf-llnl> دریافت گردید. داده‌های این گروه شامل شبیه‌سازی‌های تاریخی مدل اقلیمی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و همچنین پیش‌نمایی‌های آینده (۲۰۱۵-۲۱۰۰) هستند که تحت اولین سطح متغیر "r1i1p1f1" و مبتنی بر مسیرهای مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSPs)، در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اطلاعات دقیق مدل‌های انتخاب شده در جدول ۲ فهرست شده است.

جدول ۲- مشخصات GCMs مورد استفاده (Cui et al., 2021)

نام مدل	کشور توسعه‌دهنده	مرکز تحقیقاتی	قدرت تفکیک مکانی
CNRM-CM6-1	فرانسه	Centre National de Recherches Météorologiques Scientifique (CNRM)	1.40625° × 1.40625°
CNRM-ESM2-1			1.40625° × 1.40625°
MIROC6	ژاپن	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo	1.40625° × 1.40625°

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

در جدول ۳ شاخص‌های زیست‌اقلیمی مورد استفاده در تحقیق، نحوه محاسبه و نیز پارامترهای مورد نیاز معرفی شده است. به منظور تعیین شاخص بهینه تنش گرمایی در محدوده مورد مطالعه، از روش معیار اهمیت نسبی^۴ استفاده گردید. رتبه‌بندی اهمیت نسبی متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در مدل خطی برای درک این‌که چگونه متغیرهای پیش‌بین بر متغیر وابسته تأثیر می‌گذارند، بسیار مهم است (Grömping 2007). معیار اهمیت نسبی، که

^۱ - General Circulation Model

^۲ - Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

^۳ - Earth System Grid Federation

^۴ - Relative Importance Metric

به‌عنوان ارزیابی محرک کلیدی در تحقیقات بازاریابی نیز شناخته می‌شود (Garver & Williams, 2020)، یک اصطلاح کلی برای هر روشی است که به‌منظور بررسی مشارکت پیش‌بینی‌کننده‌های هم‌بسته در یک مدل رگرسیون و تخمین اهمیت آن‌ها استفاده می‌شود. پژوهش‌های مختلف معیارهای اهمیت نسبی متعددی را معرفی و آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. از آنجایی‌که این معیارها دیدگاه‌های متفاوتی را در مورد ساختار داده در یک مدل رگرسیونی نشان می‌دهند، نمی‌توان معیار اهمیت نسبی واحدی را برای توصیف کامل اهمیت نسبی متغیرها مشخص نمود. آنالیز وزن نسبی^۱ به‌عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد است که جهت شناسایی اهمیت نسبی متغیرهای پیش‌بین توصیه شده است (Mizumoto, 2023). در پژوهش حاضر محاسبه وزن نسبی هر پارامتر در شاخص زیست‌اقلیمی با استفاده از بسته نرم‌افزاری Relaimpo R، انجام گرفته است.

جدول ۳- معرفی شاخص‌های مورد استفاده در تحقیق

نام شاخص	رابطه	توضیحات	پارامترهای موردنیاز	رفرنس
MDI^۲	۱	$MDI = 0.75 * WBT + 0.3 * Ta$	دمای هوا - رطوبت نسبی	Mistry, 2020
DI	۲	$DI = T - 0.55(1 - 0.01RH)(T - 14.5)$	دمای هوا - رطوبت نسبی	Poupkou et al. 2011
DI	۳	$DI = 0.5 * WBT + 0.5 * Ta$	دمای هوا- رطوبت نسبی	Mistry, 2020
PMV^۳	۴	استفاده از نرم‌افزار ReyMan Pro	دمای هوا - رطوبت نسبی - سرعت باد - ابرناکی - فشار بخار آب	ذوالفقاری، ۱۳۸۶
UTCI	۵	$UTCI = 3.21 + 0.872 * t + 0.2459 * T_{mrt} - 2.5078 * v - 0.0176 * RH$	دمای هوا - تابش خورشیدی - رطوبت نسبی - سرعت باد	فرج‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵
ESI^۵	۶	$ESI = 0.63 T_a - 0.03RH + 0.002SR + 0.0054(T_a * RH) - 0.073(0.1 + SR) - 1$	دمای هوا - رطوبت نسبی - ساعات آفتابی	Moran et al. 2001
PET^۶	۷	استفاده از نرم‌افزار ReyMan Pro	دمای هوا - رطوبت نسبی - سرعت باد - ابرناکی - فشار بخار آب	ذوالفقاری، ۱۳۸۶

^۱ - Relative weight

^۲ - Modified Discomfort Index

^۳ - Predicted Mean Vote

^۴ افزار ریمن-پرو استفاده شده است. از نرم‌Tmrt برای محاسبه

^۵ - Environmental Stress Index

^۶ - Physiological Equivalent Temperature

Moustris et al. 2020	T = دمای هوا، u = سرعت باد	دمای هوا - سرعت باد	$CP = 1.163 \times (10.45 + 10 \times u^{0.5} - u) \times (33 - T)$	۸	CPI^۱
Santos et al., 2020	Ta = دمای هوا، Td = دمای نقطه شبنم	دمای هوا - دمای نقطه شبنم	$HDI = 0.99Ta + 0.36Td + 41.5$	۹	HDI^۲
Asghari et al. 2020	Ta = دمای هوا، e = فشار بخار آب	دمای هوا - فشار بخار آب	$RSI = \frac{(Ta - 21)}{(58 - e)} (14 - 3)$	۱۰	RSI^۳

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

WBt در شاخص DI پایین ترین دمایی است که بتوان هوا را با تبخیر آب خشک نمود. این شاخص حاوی اطلاعاتی در مورد دمای هوا و همچنین محتوای رطوبتی است. در ایستگاه‌های هواشناسی، WBt با استفاده از دماسنج مرطوب (Twb) در معرض باد اندازه‌گیری می‌شود؛ اما معمولاً از نور مستقیم خورشید محافظت می‌گردد (Mistry, 2020). در این پژوهش WBt مطابق رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$WBt = T_a \times \text{atan}[0.151977 \times (RH + 8.313659)^{0.5}] + \text{atan}(T_a + RH) - \text{atan}(RH - 1.676331) + 0.00391838 \times (RH)^{1.5} \times \text{atan}(0.023101 \times RH) - 4.686035 \quad (11)$$

مدل‌های اقلیم جهانی (GCM^۴) و سناریوهای SSP

مدل‌های اقلیم جهانی به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی و پیش‌نگری تغییرات آب‌وهوا مورد استفاده قرار می‌گیرند. GCMها از به‌روزترین فاز پروژه مقایسه مدل جفت‌شده (CMIP6) فرآیندهای آب‌وهوایی جدید را در مقایسه با نسل‌های قبلی ترکیب کرده و فرصتی بی‌سابقه برای تولید پیش‌نمایی‌های اقلیمی قابل اعتماد در آینده و انجام مطالعات تأثیر اقلیم فراهم‌نموده‌اند (Eyring et al., 2016; Grose et al., 2020; Nie et al., 2020). پیش‌بینی‌های آتی مدل‌های CMIP6 تغییرات خاصی را در شاخص‌های توسعه اجتماعی، مانند جمعیت و اقتصاد در نظر می‌گیرند که مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) نامیده می‌شوند. این SSPها بر روی میزان واداشت تابشی از سناریوهای انتشار کم تا زیاد تمرکز دارند (Kumar et al., 2023). SSPها برای تعریف سطوح مختلف توسعه اجتماعی-اقتصادی به پنج دسته تقسیم می‌شوند که تحت عناوینی چون: توسعه پایدار (SSP1)، توسعه میانی (SSP2)، توسعه رقابت منطقه‌ای (SSP3)، نابرابری (SSP4) و توسعه مبتنی بر سوخت‌های فسیلی (SSP5) شناخته می‌شوند (Peng et al., 2023). سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 که در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، واداشت تابشی اضافی ۴/۵ و ۸/۵ W/m² را نشان می‌دهند که به ترتیب مربوط به حد متوسط و بالای پیش‌بینی‌های تغییرات آب‌وهوایی می‌باشد.

¹- Cooling Power Index

²- Human Thermal Discomfort Index

³- Relative Strain Index

⁴- Global Climate Models

تصحیح اریبی GCMs

هرچند مدل‌های CMIP6، به دلیل وضوح عمودی قابل توجه و بالاتر، پارامترسازی اصلاح‌شده میکروفیزیک و مدل‌های یخ اقیانوسی اصلاح‌شده، عملکرد بهتری نسبت به CMIP5 ارائه می‌کنند (Ghazi et al., 2023) با این حال به دلیل وجود خطاهای سیستماتیک بزرگ در شبیه‌سازی‌های مدل و وضوح GCMها، استفاده مستقیم از آنها برای مطالعات تأثیر منطقه‌ای بیش از حد درشت است. به همین دلیل، لازم است که خروجی‌های GCM را برای اطلاعات اقلیمی در مقیاس فضایی محلی ریزگردانی و تصحیح نمود. روش‌های تصحیح اریبی از یک الگوریتم تبدیل برای شبیه‌سازی خروجی مدل استفاده می‌کنند. در این فرآیند فرض بر این است که الگوریتم تصحیح بایاس و پارامترسازی آن تحت شرایط آب‌وهوایی کنونی، برای دوره آینده نیز معتبر است (Siabi et al., 2023). روش‌های متعددی برای تصحیح خطای GCMs در ادبیات علمی ارائه گردیده که در این پژوهش روش مقیاس‌گذاری واریانس (VARI)^۱ برای تصحیح خطای دما مورد توجه قرار گرفته است.

از آنجایی که دما به عنوان یک توزیع تقریباً نرمال شناخته می‌شود؛ بنابراین تصحیح میانگین و واریانس سری‌های زمانی این پارامتر، به صورت گام‌به‌گام بوده که تحت عنوان مقیاس‌گذاری واریانس شناخته می‌شود (Teutschbein & Seibert, 2012؛ حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۲):

در گام اول میانگین‌ها از سری‌های زمانی شبیه‌سازی شده با استفاده از روش مقیاس‌گذاری خطی^۲ تصحیح می‌شوند (رابطه ۱۲):

$$T_{hst,m,d} = T_{LS,hst,m,d} - \mu(T_{LS,hst,m}) \quad (12)$$

سپس انحراف معیار (σ) از سری‌های زمانی نرمال شده مطابق با نسبت مشاهده شده σ و سری‌های نرمال شده σ تصحیح می‌شود (رابطه ۱۳):

$$\sigma_{hst,m,d} = T_{hst,m,d} * \frac{\sigma_m(T_{obs,m,d})}{\sigma_m(T_{hst,m,d})} \quad (13)$$

در نهایت دمای تصحیح شده، بر اساس σ و μ تصحیح شده محاسبه می‌گردد (رابطه ۱۴):

$$T_{hst,m,d}^{cor} = \sigma_{hst,m,d} + \mu(T_{LS,hst,m}) \quad (14)$$

نتایج و بحث

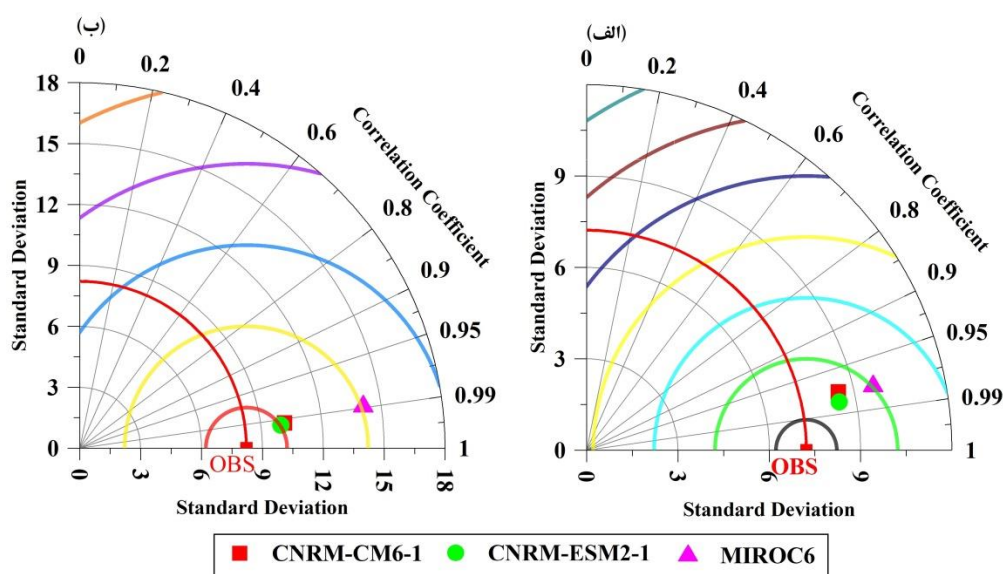
ارزیابی دقت و کارایی GCMs منتخب

به منظور مقایسه خروجی GCMهای منتخب پژوهش و سنجش میزان دقت و عملکرد آنها قبل از تصحیح اریبی از دیاگرام تیلور استفاده گردید (شکل ۲). دیاگرام تیلور نموداری است که میزان خطا، ضریب همبستگی و همچنین انحراف معیار برون داد مدل را با مقادیر مشاهداتی مقایسه می‌کند (Taylor, 2001). در این نمودار، مقادیر ضریب همبستگی به صورت شعاع دایره روی قوس آن، انحراف معیار به صورت دایره‌های متحدالمرکز نسبت به مرکز دایره و مقدار RMSD به صورت دایره‌های متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع (مشاهداتی) ترسیم می‌گردد. روش ارزیابی نیز بدین شکل است که موقعیت GCMs مورد بررسی بر مبنای RMSD، ضریب همبستگی آن با داده مشاهداتی و

^۱ - Variance Scaling

^۲ -Linear Scaling

انحراف معیار سری زمانی روی دیاگرام ترسیم شده و هر مدلی که موقعیت مکانی آن روی نمودار به مشاهداتی نزدیک تر باشد، از دقت و کارایی بالاتری جهت پیش‌نگری تغییرات پارامتر مورد نظر برخوردار خواهد بود (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۵؛ سیه‌سرانی و همکاران، ۱۴۰۲). در شکل ۲ مقادیر پایه با مربع قرمز رنگ (OBS) و GCM‌های CMIP6 با اشکال رنگی روی دیاگرام مشخص شده‌اند. مطابق شکل قبل از تصحیح خطای GCM‌ها عملکرد هر دو مدل CNRM نسبت به MIROC6 بهتر می‌باشد که این برتری به دلیل مقدار RMSD کمتر این دو مدل است؛ با توجه به موقعیت مدل‌ها نسبت به نقطه مرجع مقدار خطای مدل‌های CNRM-CM6-1 و CNRM-ESM2-1 برای دمای کمینه به ترتیب برابر ۲/۷۶ و ۲/۳۲ است و در دمای بیشینه به ۲/۹ و ۳/۷۱ می‌رسد. حال آن‌که در مدل MIROC6 مقدار RMSD بیش از ۳ و ۶ برای دو پارامتر دمای کمینه و بیشینه مشاهده می‌گردد اما پس از اصلاح آریبی، RMSD مدل‌های CNRM در دمای کمینه و بیشینه به کمتر از ۰/۳۲ رسیده و همچنین مقدار خطای ۰/۴۱ و ۰/۵۷ برای کمینه و بیشینه دما نشان‌دهنده انطباق بسیار خوب MIROC6 با مقادیر مشاهداتی می‌باشد. شایان ذکر است که ضریب همبستگی مدل‌های منتخب در هر دو حالت قبل و بعد از تصحیح آریبی بیش از ۰/۹۵ است.

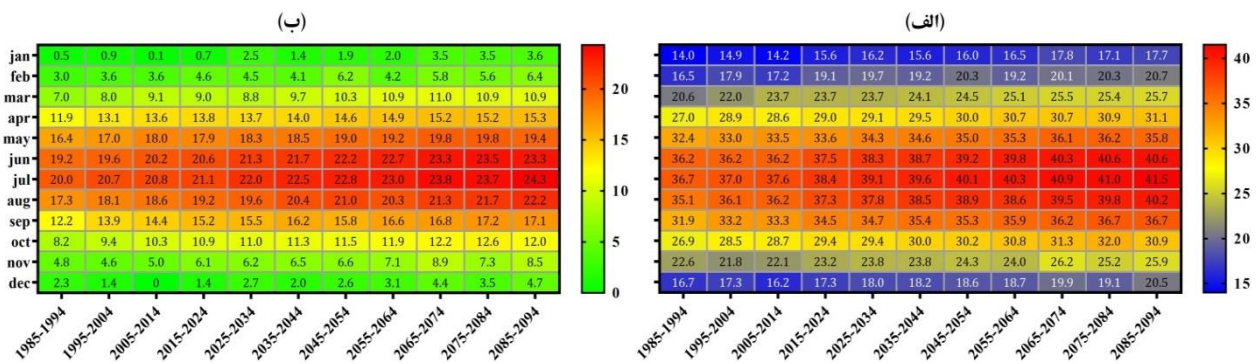


شکل ۲- دیاگرام تیلور دمای کمینه (الف) و بیشینه (ب) از شبیه‌سازی مدل‌های CMIP6 در مقایسه با دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴). (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

کمی‌سازی پیش‌نمایی پارامتر دما در چشم‌انداز آینده (۲۰۱۵-۲۰۹۹)

نمودارهای حرارتی مربوط به فراسنج‌های دمای کمینه و بیشینه در شکل ۳ بیانگر پیش‌نگری بلندمدت پارامترهای مذکور در منطقه مورد مطالعه است. این تغییرات که در مقیاس دهه‌ای مورد واکاوی قرار گرفته، نشان می‌دهد میانگین حداکثر دما در منطقه از ۱۹۸۵ تا ۲۰۹۹ به‌طور متوالی روند افزایشی داشته که از ۲۶/۴ درجه سلسیوس در دهه نخست (۱۹۸۵-۱۹۹۴) با ۴ درجه افزایش به ۳۰/۴ درجه سلسیوس در پایان قرن رسیده است. در مقیاس ماهانه بیشترین نرخ تغییرات دمای حداکثر متعلق به ماه‌های اوت، مارس و فوریه است؛ به عبارت دیگر در میانه قرن، مقادیر دما در این ماه‌ها به ترتیب ۳/۹ و ۳/۸ درجه سلسیوس و در انتهای قرن تا ۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره

پایه افزایش خواهد یافت. کمینه تغییرات دمای حداکثر را نیز می‌توان در نوامبر، دسامبر و ژانویه مشاهده نمود (شکل ۳، الف). مطابق نمودار حرارتی دمای کمینه در شکل ۳، ب، تغییرات بلندمدت این پارامتر نسبت به دمای بیشینه کمتر بوده و بیش‌ترین میزان افزایش دما طی ماه‌های اوت و سپتامبر رخ داده است. نکته قابل توجه در این نمودار، تغییرپذیری بسیار ناچیز دما در دسامبر است. نتایج آماری حاکی از این است که حداکثر نرخ افزایش دما در این ماه تا میانه قرن ۰/۲ درجه سلسیوس و تا پایان قرن ۲/۴ درجه سلسیوس خواهد بود.

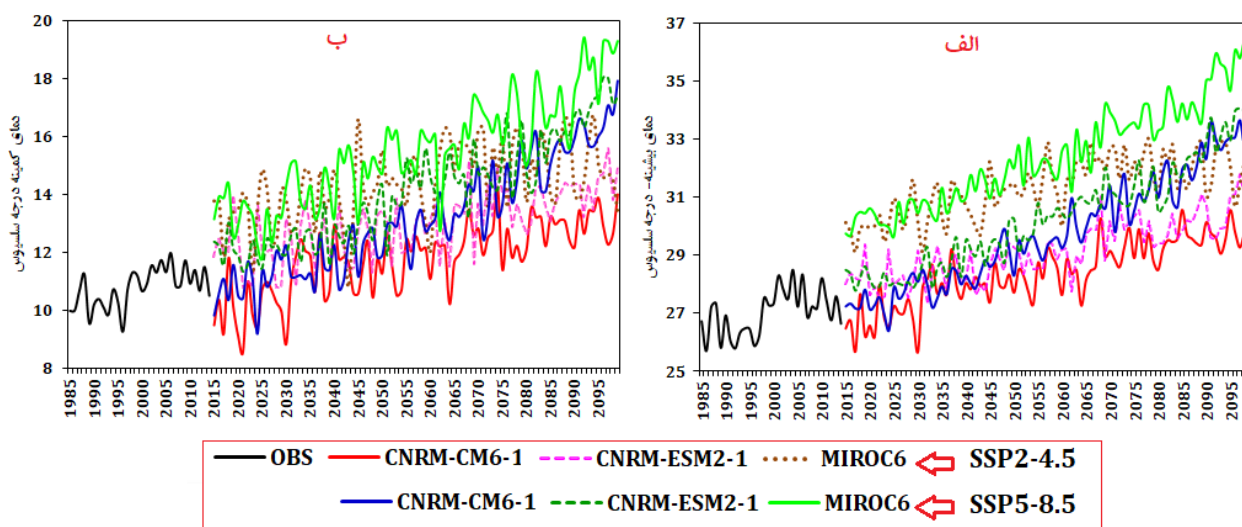


شکل ۳- پیش‌نمایی تغییرات بلندمدت دمای بیشینه (الف) و کمینه (ب) در طول قرن ۲۱

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

ارزیابی روند سالانه دما بر اساس ۳ GCM منتخب و تحت سناریوهای بینابین و بدبینانه اجتماعی-اقتصادی در شکل ۴ نمایان شده است. مطابق نمودار میانگین دمای بیشینه در دوره پایه ۲۷/۱۳ درجه سلسیوس است که این مقدار تحت سناریوی SSP5-8.5 و مدل MIROC6 تا انتهای قرن به ۳۲/۴۱ درجه سلسیوس می‌رسد. افزون بر این همان‌گونه که در نمودار آشکار است، هر سه GCM مورد بررسی سیر صعودی دما را در منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کنند (شکل ۴، الف). برونداد حاصل از اجرای گروهی مدل‌ها (Ensemble) نشان می‌دهد روند افزایشی دما در منطقه مورد مطالعه مبتنی بر هر دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 با مقدار Z من-کندال ۹/۶۸ و ۱۲/۲۱ در سطح اطمینان ۰/۹۹ معنی‌دار است.

همانند دمای بیشینه، بیشترین نرخ افزایشی دمای کمینه نیز در مدل MIROC6 مشاهده می‌گردد. میانگین کمینه دما بر پایه مدل یادشده و تحت سناریوی بینابین اجتماعی-اقتصادی تا انتهای سال ۲۰۹۹، ۳/۶۲ درجه سلسیوس و مطابق بدبینانه‌ترین سناریوی CMIP6، حدود ۴/۷۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. همان‌گونه که در شکل ۴، ب، قابل مشاهده است، کمترین تغییرات دما در هر دو سناریو مربوط به مدل CNRM-CM6-1 می‌باشد. روی هم‌رفته خروجی ریزگردانی‌شده مدل ترکیبی، روند افزایشی دمای کمینه را با مقدار نمره Z من-کندال ۸/۳ و ۱۱/۴۷ در افق آینده در سطح اطمینان ۰/۹۹ تأیید می‌کند.



شکل ۴- روند تغییرات دمای بیشینه (الف) و کمینه (ب) در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و تحت سناریوهای SSP در افق آینده (۲۰۱۵-۲۰۹۹).
(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

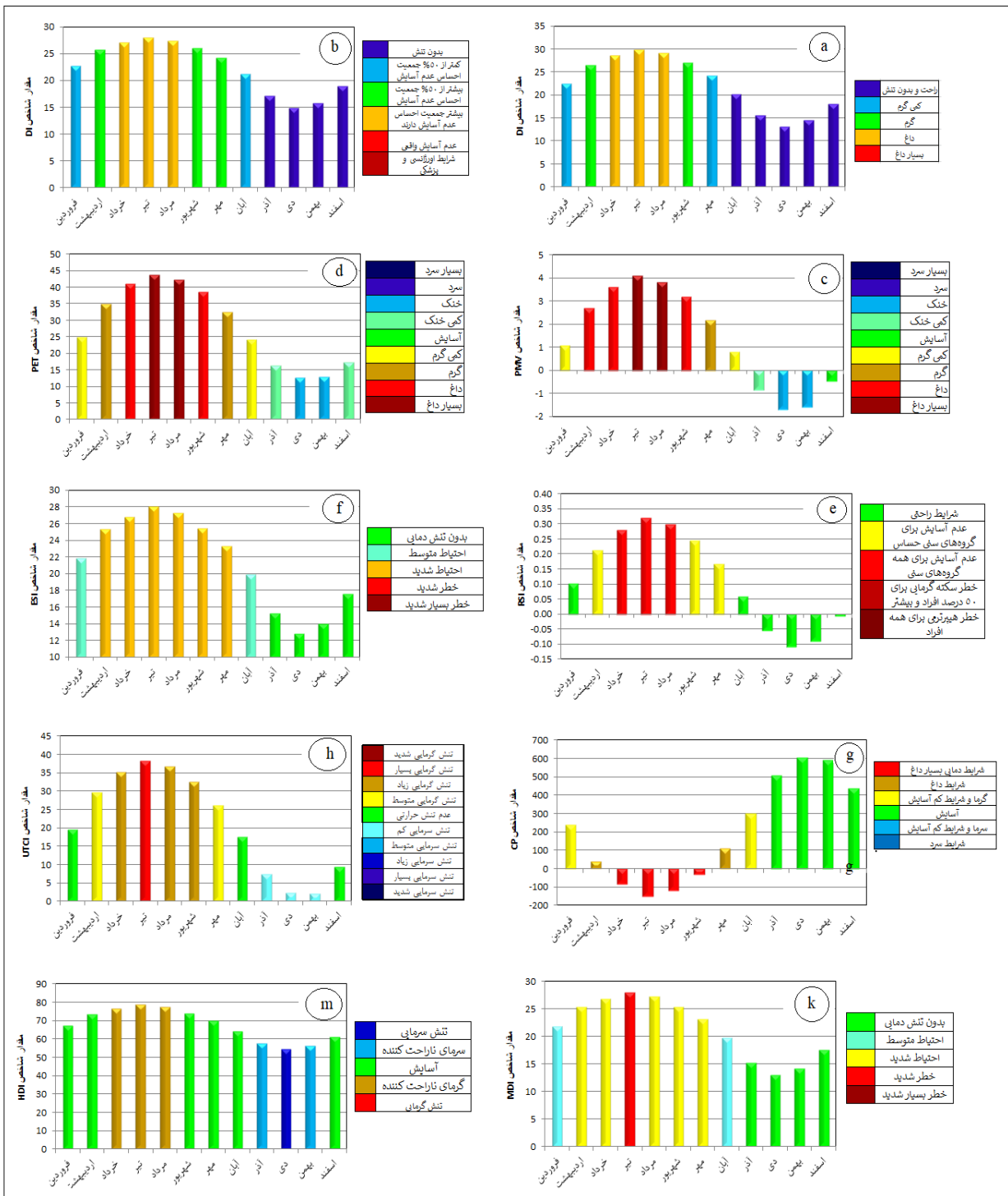
تحلیل شرایط تنش دمایی در زاهدان بر مبنای شاخص‌های مورد استفاده

بررسی وضعیت تنش‌های دمایی مبتنی بر شاخص DI میستری (Mistry) در ایستگاه زاهدان حاکی از این است که از فروردین تا اواخر مهرماه تنش‌های دمایی گرم، از کمی گرم تا شرایط داغ، اقلیم این منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از اواخر بهار تا آخر مرداد با افزایش مقادیر دمای هوا، تنش‌های گرمایی نیز به شدت افزایش یافته و به سمت داغ شدن و شرایط خطر پیش می‌رود. در تقسیم‌بندی شاخص DI توسط میستری (۲۰۲۰) تنش‌های دمایی سرد وجود ندارد، به همین ترتیب در محدوده مورد بررسی نیز از آبان تا آخر اسفندماه شرایط بدون تنش و یا آسایش دمایی بر منطقه حاکم است (شکل ۵، a). تحلیل تنش‌های دمایی مطابق شکل ۵، b در شاخص DI تام (Thom) نشان می‌دهد که ماه‌های فروردین و آبان تحت تأثیر شرایط کمی گرم (احتیاط) قرار دارند و اردیبهشت، شهریور و مهر شرایط نسبتاً گرم (احتیاط شدید) را تجربه می‌کنند؛ از خردادماه تا آخر مرداد هم شرایط داغ (خطر) بر منطقه حاکم است. نمودار میانگین ماهانه شاخص متوسط نظرسنجی پیش‌بینی شده (PMV) نشان می‌دهد که تنش‌های گرمایی بسیار شدید و داغ‌ترین وضعیت‌های سال در طول فصل تابستان رخ داده و مربوط به ماه‌های تیر و مرداد است (شکل ۵، c). طی ماه‌های اردیبهشت، خرداد و شهریور نیز به ترتیب شرایط تنش گرمایی متوسط (شرایط گرم) و تنش گرمایی شدید (داغ) در منطقه مشاهده می‌شود و در فروردین و آبان‌ماه تنش گرمایی اندک (وضعیت‌های کمی گرم) حاکم است. براساس شاخص مذکور، تنها ماهی که دارای شرایط آسایش و بدون تنش حرارتی است، اسفندماه و در واقع اواخر زمستان می‌باشد.

بر مبنای شاخص PET نیز همانند PMV شدیدترین تنش‌های گرمایی (وضعیت داغ) در ماه‌های تیر و مرداد حاکم است و ماه‌های فروردین، آبان و همچنین اردیبهشت و مهر به ترتیب شرایط تنش گرمایی اندک (کمی گرم) و تنش گرمایی متوسط (گرم) را تجربه می‌کنند. براساس شاخص مذکور شرایط آسایش در هیچکدام از ماه‌های سال برای زاهدان وجود ندارد اما ماه‌های فروردین و آبان و همچنین آذر و اسفند به شرایط آسایش کمی نزدیک می‌باشند (شکل ۵، d). با توجه به محاسبات انجام‌شده بر روی شاخص فشار نسبی (RSI)، بیشترین تنش گرمایی و عدم

آسایش برای همه گروه‌های سنی طی ماه‌های خرداد، تیر و مرداد مشاهده می‌شود (شکل ۵، e). مطابق این شاخص وضعیت خطر هیپرترمی و شرایط خیلی داغ در شهر زاهدان مشاهده نمی‌شود و در ماه‌های فروردین، آبان، آذر، دی، بهمن و اسفند شرایط راحتی و آسایش برای انسان وجود دارد. شکل ۵، f نمودار میانگین ماهانه شاخص تنش محیطی را نشان می‌دهد. بر پایه این شاخص، ۵ طبقه تنش دمایی وجود دارد که سه نوع آن در ایستگاه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. متکی بر نتایج به دست آمده بالاترین تنش گرمایی شرایط احتیاط شدید است که طی ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در ادامه ماه‌های فروردین و آبان شرایط تنش دمایی متوسط را تجربه می‌کنند و دوره بدون تنش در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند به چشم می‌خورد. مطابق شاخص CP، ۶ طبقه تنش دمایی تعریف شده که ۴ مورد آن در ایستگاه مورد نظر مشاهده می‌شود. همانند بیشتر شاخص‌های مورد بررسی، در شاخص CP نیز طی ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور تنش‌های دمایی بسیار داغ و در اردیبهشت و مهر شرایط داغ حاکم است. دوره آسایش اقلیمی طبق الگوی طبقه‌بندی شده CP چهار ماه سال از آبان ماه تا آخر اسفند را در برمی‌گیرد و ماه‌های فروردین و آبان شرایط آسایش نسبتاً کم و گرمای جزئی را تجربه می‌کنند. با توجه به نتایج به دست آمده از شاخص UTCI بالاترین طبقه تنش گرمایی، شرایط خیلی گرم است که در تیرماه منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و تنش گرمایی زیاد در خرداد، مرداد و شهریورماه بر منطقه حاکم است. براساس شاخص UTCI ماه‌های اردیبهشت و مهر در شرایط تنش گرمایی متوسط (کمی گرم) قرار می‌گیرند و شرایط تنش سرمایی کم (کمی سرد) به ماه‌های آذر، دی و بهمن اختصاص یافته است. همچنین طی ماه‌های فروردین، آبان و اسفند شرایط عدم تنش حرارتی (آسایش) در منطقه مورد مطالعه حاکم می‌باشد (شکل ۵، h). نتایج به دست آمده در شکل ۵، m بیانگر این است که براساس شاخص MDI بالاترین مقادیر تنش دمایی با شرایط خطر شدید (بسیار قوی و خطرناک) مربوط به تیرماه می‌باشد. ماه‌های اردیبهشت، خرداد، مرداد، شهریور و مهر در وضعیت زرد یعنی دارای شرایط احتیاط شدید (قوی) قرار می‌گیرند. براساس شاخص MDI ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند بدون تنش دمایی (بدون خطر) هستند و شرایط مطلوب در منطقه مورد بررسی وجود دارد.

شکل ۵، k مقادیر میانگین ماهانه شاخص ناراحتی انسانی HDI را نشان می‌دهد. بر مبنای این شاخص ۵ طبقه تنش دمایی وجود دارد که چهار نوع آن در ایستگاه مورد مطالعه به چشم می‌خورد. بدین ترتیب بالاترین سطوح تنش گرمایی، شرایط گرمای ناراحت‌کننده است که طی ماه‌های خرداد، تیر و مرداد منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در ادامه، ماه‌های آذر و بهمن شرایط سرمای ناراحت‌کننده را تجربه می‌کنند. دوره بدون تنش در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، شهریور، مهر، آبان و اسفند مشاهده می‌شود که بر منطقه شرایط مطلوب اقلیمی حاکم است.



شکل ۵- طبقه‌بندی مقادیر میانگین ماهانه شاخص‌های مورد مطالعه از نظر شدت تنش (منبع: نویسنده، ۱۴۰۲)

تعیین شاخص بهینه تنش گرمایی در منطقه مورد مطالعه

با وجود کارهای تحقیقاتی گسترده، در حال حاضر امکان مقایسه کمی شاخص‌های حرارتی موجود با استفاده از یک روش معتبر وجود ندارد؛ بنابراین این وظیفه کاربر است که هر شاخص را ارزیابی کرده و نمایه‌ای را انتخاب نماید که به بهترین وجه با اقلیم حرارتی تعریف شده مطابقت داشته باشد (Roghanchi & Kocsis, 2018). جهت انتخاب شاخص بهینه برای برآورد تنش‌های گرمایی در منطقه زاهدان، مطابق پژوهش‌های زمانیان و همکاران (۲۰۱۷)، حمه رضایی و همکاران (۱۳۹۷) و زارع و همکاران (۲۰۱۸) از روش‌های آماری استفاده گردید. بدین منظور ابتدا میانگین و انحراف معیار شاخص‌های مورد بررسی و پارامترهای اقلیمی استفاده شده در شاخص‌ها، محاسبه گردید تا از این طریق میزان پراکنش مقادیر نسبت به میانگین‌ها مشخص گردد. مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۴ شاخص‌های CP، UICI و PET انحراف معیار بالایی را نشان می‌دهند اما مقادیر انحراف معیار شاخص‌های DI و ESI حاکی از این است که این شاخص‌ها پراکنش کمتری داشته و به میانگین جامعه نزدیک‌ترند. در ادامه جهت شناسایی اهمیت نسبی متغیرهای مورد نیاز در محاسبه شاخص‌ها از روش آنالیز وزن نسبی استفاده گردید. همبستگی بین متغیرهای پیش‌بین باعث ایجاد مشکل تورم یا کاهش تورم ضرایب بتا استاندارد می‌شود. آنالیز وزن نسبی، پیش‌بینی‌کننده‌های همبسته را به متغیرهای متعامد (غیر همبسته) جدیدی تبدیل می‌کند. این هم‌تایان تبدیل شده، سپس برای مدل رگرسیون جهت پیش‌بینی متغیر وابسته استفاده می‌شوند. در نهایت، وزن‌های نسبی با تغییر مقیاس ضرایب بتا استاندارد شده در مرحله نهایی به متغیرهای اصلی محاسبه می‌شوند. از آنجایی که متغیرهای متعامد جدید با یکدیگر همبستگی ندارند، ضرایب بتای استاندارد شده (یعنی وزن نسبی) به دست آمده از این طریق به طور مستقیم برای ارزیابی اهمیت پیش‌بینی کننده‌ها قابل مقایسه هستند (Mizumoto, 2023). نتایج نشان می‌دهد که دمای هوا دارای بیشترین وزن نسبی (۰/۵۶۸ درصد) و در نتیجه مؤثرترین پارامتر در همه شاخص‌ها است. پس از دما رطوبت نسبی با وزن ۰/۴۰۹ رتبه دوم را به خود اختصاص داده است. سرعت باد به عنوان یکی از اجزای محاسبه تنش دمایی در ۴ شاخص PMV، PET، UICI و CP، کمترین تأثیر را در ارزیابی تنش دمایی داشته و میانگین وزن نسبی آن در بین شاخص‌ها برابر ۰/۰۲۹۵ درصد می‌باشد؛ بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اینگونه استنباط کرد شاخص‌هایی که بر اساس پارامترهای دما و رطوبت محاسبه می‌گردند به دلیل انحراف معیار کمتر و وزن نسبی بالاتر، جهت تعیین تنش‌های دمایی در محدوده مورد مطالعه مناسب‌تر هستند که شاخص‌های DI Thom، DI Mistry و MDI در این گروه قرار می‌گیرند (جدول ۴).

جدول ۴- مقادیر میانگین و انحراف معیار شاخص‌ها و پارامترها

شاخص‌ها	میانگین	انحراف معیار	پارامترها	میانگین	انحراف معیار	وزن نسبی پارامترها
DI.Mistry	۲۲/۵۲	±۵/۸۷	دمای هوا	۲۷/۲۶	±۷/۹۱	۰/۵۶۸
DI.Thom	۲۲/۴۸	±۴/۶۵	رطوبت نسبی	۴۳/۶۹	±۱۶/۰۵	۰/۴۰۹
UICI	۲۱/۵۵	±۱۳/۲۳	سرعت باد	۷/۶۴	±۰/۸۳	۰/۰۲۹۵
ESI	۲۱/۵۳	±۵/۳۱	ابرناکی	۱/۵۳	±۰/۹۲	۰/۱۷۶
CP	۱۹۸/۶۸	±۲۷۳/۹۰	فشار بخار آب	۵/۵۸	±۰/۸۱	۰/۳۰۸
HDI	۶۷/۶۴	±۸/۴۷	دمای نقطه شبنم	۲/۵۳-	±۲/۲۳	۰/۱۲۹۸
RSI	۰/۱۲	±۰/۱۵	تابش خورشیدی	۲۳۱/۸۶	±۵۹/۳۱	۰/۳۲۲
MDI	۲۱/۵۳	±۵/۲۶				
PMV	۱/۴۳	±۲/۰۹				
PET	۲۸/۵۶	±۱۱/۵۲				

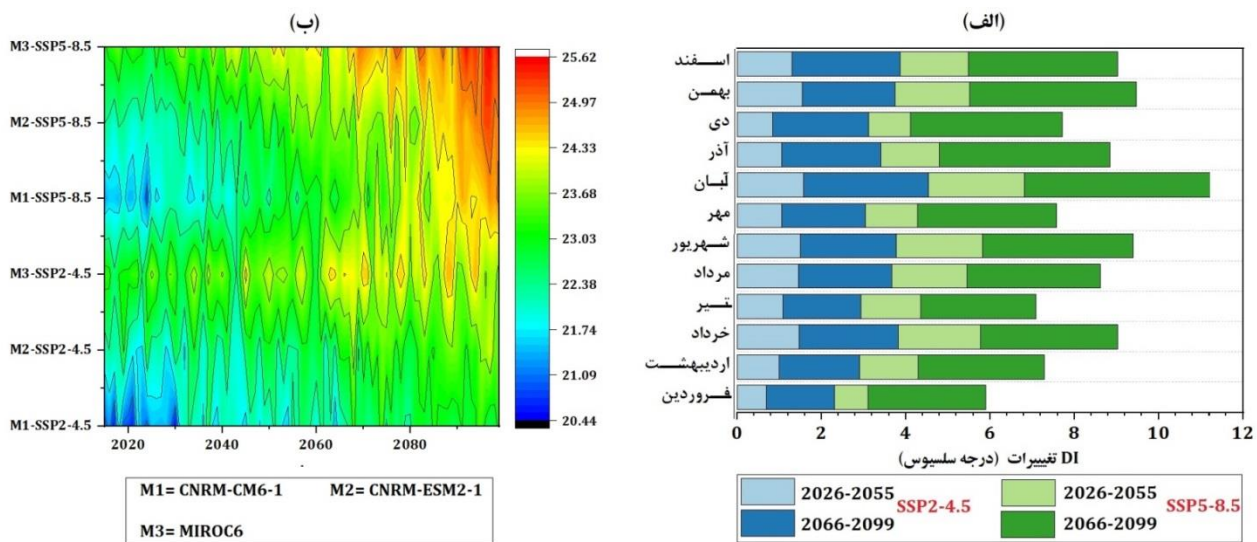
آینده‌نگری وضعیت تنش گرمایی در منطقه مطالعاتی و راهکارهای سازگاری برای توسعه پایدار شهری

با توجه به این که شاخص DI به‌عنوان یکی از شاخص‌های مناسب جهت مطالعه تنش‌های گرمایی منطقه مورد مطالعه تأیید گردید، آینده‌نگری این شاخص مبتنی بر مدل‌های منتخب CMIP6 در قرن ۲۱ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از آنجایی که عدم قطعیت از ویژگی مدل‌های گردش کلی جو است، به‌منظور تعدیل این عامل، برونداد تصحیح آریبی شده GCMها در منطقه مطالعاتی ترکیب شده و اجرای گروهی مدل‌ها (مدل اسمبل) مبنای قضاوت تغییرپذیری نمایه DI قرار گرفت. پیش‌نگری شاخص مورد نظر در چشم‌انداز آینده طی دو دوره ۳۰ ساله ۲۰۲۶-۲۰۵۵ و ۲۰۶۶-۲۰۹۹ نسبت به شرایط مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) در شکل ۶ قابل مشاهده است. مطابق شکل ۶، الف، تغییرپذیری DI هم‌هنگ با افزایش فراسنجه دمای حداکثر در منطقه، روند صعودی داشته که بیشینه این افزایش تحت سناریوی SSP5-8.5 در پایان قرن اتفاق خواهد افتاد. از این جهت، ماه‌های آبان، آذر و اسفند پیش‌تاز روند صعودی شاخص DI در منطقه هستند که در بازه زمانی ۲۰۶۶-۲۰۹۹ مقادیر آن در ماه‌های ذکر شده به ترتیب ۴/۴، ۴/۱ و ۳/۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. الگوی سالانه DI در نمودار ۶، ب، آینده‌نگری این شاخص را به شکل بسیار واضح‌تری در طول یک قرن به تصویر می‌کشد. مطابق نمودار، سیر صعودی شاخص تا سال ۲۰۹۹ کاملاً محرز بوده و نرخ تغییرات آن تحت سناریوهای مختلف SSP در مدل‌های CMIP6 متفاوت می‌باشد. طیف‌های رنگی آبی تا قرمز در شکل ۶، ب، نشانگر کمترین تا بیشترین میزان تغییرپذیری شاخص DI در منطقه مورد مطالعه است.

تنش‌های گرمایی در حال حاضر یکی از علل اصلی مرگ‌ومیر ناشی از پدیده‌های طبیعی است (Sherwood & Huber, 2010). گرچه به نظر می‌رسد مرگ‌ومیر با شب‌های گرم مرتبط باشد، اما روزهای گرم سبک زندگی و بهره‌وری کاری ساکنان عرض‌های جغرافیایی پایین را تغییر می‌دهد و اثرات هر دو مورد به‌وضوح در اقلیم‌های گرم‌تر تشدید خواهند شد. با این حال، به نظر می‌رسد تصور عمومی در جامعه علمی این باشد که تغییرات اقلیمی نیازمند توسعه و اجرای به‌موقع برنامه‌های سازگاری است (Runhaar et al., 2012). سازگاری با تغییرات اقلیمی به‌عنوان فرصتی برای بهبود زیست‌پذیری و رفاه در شهرها مطرح می‌شود (Aylett, 2015). در این راستا، سبز سازی شهری یکی از رویکردهای کاهش پیامدهای بهداشتی افزایش دما ناشی از تغییرات اقلیمی بر انسان است (Alavipanah, 2015). زیرساخت‌های سبز-آبی-خاکستری (GBGI) که شامل ساختارهای مبتنی بر پوشش گیاهی (سبز = درختان، چمن، پرچین و غیره)، آب (آبی = استخرها، برکه‌ها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و غیره) و مهندسی شده (خاکستری = دیوارهای سبز، نماهای سبز و بام‌های سبز) است، به‌طور گسترده برای کاهش اثرات گرمایش بیش‌ازحد شهری و کاهش مصرف انرژی پیشنهاد شده است (Zonato et al., 2021). این زیرساخت‌ها پتانسیل ایفای نقش حیاتی در بهبود کیفیت زندگی ساکنان شهری، ارتقای تنوع زیستی، کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و ارتقای پایداری جوامع شهری را دارند. GBGI، به‌ویژه مؤلفه سبز آن، می‌تواند گرمای شهری را تنظیم کرده و از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند تبخیر و تعرق، سایه‌اندازی و عایق حرارتی، محیط شهری راحت‌تر و خنک‌تری را ایجاد نماید. به‌عنوان مثال، فضاهای سبز با مساحت بیش از ۲ هکتار می‌توانند دمای جزیره گرمایی شهری را در یک شهر نیمه‌گرمسیری حدود ۲ درجه سلسیوس کاهش دهند (Lemoine-Rodríguez et al., 2022; Kumar et al., 2024). مویر و هاوکینز (۲۰۱۷) معتقدند به ازای هر ۱۰۰۰ متر افزایش فاصله از یک منبع آبی،

¹ Green-Blue-Grey Infrastructure

میزان گرمایش شهری تا ۰/۶ درجه سلسیوس در تابستان کاهش می‌یابد و یا یک رودخانه با عرض ۳۵ متر می‌تواند منجر به کاهش تقریبی ۱ تا ۱/۵ درجه سلسیوس در دمای محیط شود که این کاهش در صورت وجود فضای سبز در دو طرف رودخانه قابل افزایش است (Jiang et al., 2021). از آن‌جا که آینده‌نگری اقلیمی یکی از الزامات اصلی برنامه‌ریزی محسوب می‌گردد، تدوین و تصویب قانون جامع تغییر اقلیم که در آن برنامه اقدام ملی برای کاهش اثرات تخریبی و ارتقای سازگاری با تغییرات اقلیمی گنجانده شده باشد، می‌تواند وصول به اهداف برنامه را ممکن سازد (خلیلی، ۱۴۰۲).



شکل ۶- تغییرپذیری ماهانه و روند سالانه شاخص DI در طول قرن ۲۱

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، تمرکز روی شاخص‌های مختلف تنش دمایی در ایستگاه سینوپتیک زاهدان به منظور تعیین شاخصی مناسب با وضعیت اقلیمی منطقه و تصویرسازی شاخص مذکور در چشم‌انداز آینده بود. بدین منظور ابتدا تغییرات فراسنج دما به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر محاسبه شاخص‌های تنش دمایی مبتنی بر سه مدل CNRM-ESM2-1، CM6-1 و MIROC6 و تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و افق آینده (۲۰۱۵-۲۰۹۹) مورد واکاوی قرار گرفت. پس از آن، شاخص‌های مورد نظر در منطقه محاسبه و براساس مقادیر میانگین و انحراف معیار و همچنین آنالیز وزن نسبی، شاخص بهینه انتخاب گردید. در نهایت تغییرات شاخص بهینه با توجه به وضعیت دما در منطقه مورد مطالعه ارزیابی شد. نتایج نشان‌داد مقادیر دما در منطقه مطالعاتی در مقیاس ماهانه و سالانه با نمره Z بالای من- کندال روند افزایشی داشته و بیشترین نرخ افزایش در مدل MIROC6 مشاهده گردید. افزایش دمای گزارش شده در این مطالعه با افزایش مداوم گرمایش مشاهده شده در قرن بیست‌ویکم در منطقه سیستان و بلوچستان مطابقت دارد (خسروی و همکاران، ۱۳۹۴؛ بلوکی و همکاران، ۱۴۰۰؛ فرزانه و همکاران، ۱۴۰۱). پیرامون انتخاب شاخص بهینه تنش گرمایی، درخور ذکر است که اگرچه شاخص‌های مورد مطالعه به‌لحاظ ارائه شرایط اقلیم آسایشی، تفاوت چشمگیری نداشتند اما بر مبنای معیار

اهمیت نسبی مشخص گردید که دو فراسنج دمای هوا و رطوبت نسبی به ترتیب با وزن نسبی ۰/۵۶۸ و ۰/۴۰۹ تفاوت قابل توجهی با دیگر پارامترها دارند؛ بنابراین شاخص‌های DI Thom، DI Mistry و MDI که بر اساس این دو پارامتر محاسبه می‌شوند، به دلیل انحراف معیار کمتر و وزن نسبی بالاتر، به عنوان شاخص‌های بهینه جهت مطالعه تنش‌های دمایی منطقه مورد نظر انتخاب گردیدند. مطابق نظر امانوئل (۲۰۰۵) اگرچه شاخص‌های حرارتی منطقی اغلب مبتنی بر مدل‌های فیزیولوژیکی بسیار پیشرفته از پاسخ بدن هستند اما شاخص‌های حرارتی ساده‌تر و مستقیم برای مطالعات طولانی مدت مانند تحلیل‌های تاریخی آب‌وهوا یا پیش‌بینی‌های اقلیمی مناسب‌تر هستند و هزینه‌های محاسباتی کمتر و انعطاف‌پذیری بالاتری دارند.

در ادامه تغییرات شاخص DI، تحت شرایط تغییر اقلیم در افق آینده پیش‌نمایی گردید؛ نتایج این قسمت حاکی از این بود که ماه‌های آبان، آذر و اسفند بیش‌تاز روند صعودی شاخص DI در منطقه هستند که در بازه زمانی ۲۰۶۶-۲۰۹۹ مقادیر شاخص ذکر شده در این ماه‌ها به ترتیب ۴/۴، ۴/۱ و ۳/۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. نتایج این پژوهش، ضمن تأیید یافته‌های تحقیقات پیشین حیدری و همکاران (۱۳۹۸)، نجفی (۱۳۹۹) و شیخی ارجنکی و همکاران (۱۴۰۰) مبنی بر تشدید تنش‌های گرمایی در آینده، نشان‌دهنده الگوی پیچیده‌تری از این پدیده است. افزایش قابل توجه شاخص تنش گرمایی در ماه‌های سردتر سال در منطقه مورد مطالعه، وجه تمایز مطالعه حاضر با پژوهش‌های قبلی بوده و بر اهمیت بررسی دقیق‌تر تغییرات اقلیمی در مناطق مختلف تأکید دارد. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که روند افزایشی دما در شهر زاهدان همراه با توسعه شهری، تراکم جمعیت، افزایش ساخت‌وسازهای انسانی و استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی می‌تواند منجر به تشدید جزایر گرمایی شهری، کاهش کیفیت هوا و افزایش مصرف انرژی گردیده که بر سلامت شهروندان، بهره‌وری اقتصادی و زیرساخت‌های شهری اثرات منفی خواهد گذاشت؛ بنابراین به منظور افزایش تاب‌آوری شهر زاهدان در برابر این چالش‌ها، لازم است برنامه‌ریزی شهری با رویکردی جامع، مشارکتی و آینده‌نگر انجام شود. توسعه فضاهای سبز، بهبود سامانه‌های تهویه طبیعی، استفاده از مصالح ساختمانی با بازتابندگی بالا، بهبود سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی و توسعه سامانه‌های هشدار زود هنگام، از جمله اقدامات ضروری در این راستا هستند. پژوهش‌های آتی می‌توانند بر روی ارزیابی گسترده‌تر اثرات تغییر اقلیم بر گروه‌های آسیب‌پذیر، مانند: کودکان، سالمندان و افراد دارای بیماری‌های زمینه‌ای و همچنین توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات اقلیمی در سطح محلی تمرکز کنند.

منابع

افضلی‌نیا، فرزانه؛ محمدی، حسین؛ فرج‌زاده اصل، منوچهر (۱۳۹۸). تحلیل تنش گرمایی در مناطق ۲۲گانه تهران با استفاده از الگوی فضایی «هات اسپات» و تحلیل خوشه‌ای، جغرافیایی سرزمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۶ (۶۲)، ۴۱-۲۱.

<https://sanad.iau.ir/Journal/sarzamin/Article/823119>

باعقیده، محمد؛ انتظاری، علیرضا؛ شجاع، فائزه (۱۳۹۱). بررسی وقوع درجه‌های مختلف استرس‌های گرمایی در سواحل جنوب ایران، جغرافیا و پایداری محیط، دانشگاه رازی، ۲ (۲)، ۶۸-۵۵.

https://ges.razi.ac.ir/article_173.html

بلوکی، هدا؛ فاضلی، مهدی؛ شریف‌زاده، مهدی (۱۴۰۰). پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر استان سیستان و بلوچستان با تأکید بر متغیرهای بارش و دما، دومین کنفرانس بین‌المللی و پنجمین کنفرانس ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، اردبیل.

پاکباز، هاجر؛ خسروی، محمود؛ طاوسی، تقی؛ محمودی، پیمان (۱۳۹۷). تحلیل الگوهای فضایی طبقات شاخص عدم آسایش (DI) در

ایران، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دانشگاه خوارزمی، ۵ (۲)، ۷۳-۹۰.

<https://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2745-fa.html>

همه‌رضایی، مسعود؛ گلپایگانی، فریده؛ نصیری، پروین؛ اعظم، کمال؛ فرهنگ دهقان، سمیه؛ فتحی، اسعد؛ دارایی، فائزه (۱۳۹۷). تعیین شاخص بهینه برای ارزیابی استرس حرارتی با توجه به پارامترهای فیزیولوژیک در صنایع فولاد، فصلنامه بهداشت و ایمنی کار، دانشگاه علوم پزشکی تهران، ۸ (۲)، ۱۶۳-۱۷۵.

<https://jhs.w.tums.ac.ir/article-1-5856-fa.html>

حمیدیان پور، محسن؛ شجاع، فائزه (۱۴۰۱). مقدمه‌ای بر روش‌ها و شگردهای مدل‌سازی اقلیم و تغییر اقلیم، انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان. حیدری، حمیدرضا؛ گلپایگانی، فریده؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ رحیمی‌فروشان، عباس (۱۳۹۸). بررسی روند تغییرات دمایی در دهه‌های آتی با تأکید بر استرس‌های گرمایی در محیط‌های روباز کشور، سلامت کار ایران، دانشگاه علوم پزشکی ایران، ۱۶ (۲)، ۳۳-۴۷.

<https://ioh.iuums.ac.ir/article-1-2447-fa.html>

خسروی، محمود؛ طاوسی، تقی؛ زهرایی، اکبر (۱۳۹۴). شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی استان سیستان و بلوچستان با استفاده از ریزگردانی داده‌های مدل گردش عمومی جو (GCM) برای دوره اقلیمی (۲۰۰۹-۲۰۴۰)، تحقیقات جغرافیایی، پروفیسور محمد حسین پاپلی یزدی، ۳۰ (۱۱۸)، ۱۸۵-۲۰۶.

<https://georesearch.ir/article-1-141-fa.html>

خلیلی، علی (۱۴۰۲). تغییرات اقلیمی و برنامه هفتم توسعه ایران در یک نگاه، هواشناسی کشاورزی، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱ (۲)، ۱-۳.

https://www.agrimet.ir/article_186488.html

خوش‌نفس، مریم؛ صداقت، مهدی (۱۳۹۴). بررسی آسایش اقلیمی با استفاده از شاخص درجه سختی هوا شمال غرب ایران، دو فصلنامه آب و هواشناسی کاربردی، دانشگاه اصفهان، ۲ (۱)، ۹۱-۱۰۴.

https://jac.ui.ac.ir/article_20476.html

سیه‌سرانی، امیر؛ آزادی، مجید؛ لایقی، بهزاد؛ بابازاده، داود (۱۴۰۲). تحلیل حساسیت جمله اتلاف سفیدک رأس موج برای کالیبراسیون مدل SWAN با واداشت باد ERA5 در دریای عمان، نیوار، سازمان هواشناسی کشور، ۴۷ (۱۲۰-۱۲۱)، ۳۶-۱۵.

https://nivar.irimo.ir/article_173602.html

شیخی ارجنکی، شمیمه؛ نادی، مهدی؛ رحمانی‌نیا، جواد؛ محمدنظری، بهروز (۱۴۰۰). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر شاخص دما-رطوبت (مطالعه موردی: ایستگاه‌های رامسر و بابلسر، هواشناسی کشاورزی، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران، ۹ (۲)، ۳۹-۴۷.

https://www.agrimet.ir/article_139841.html

صادقی‌روش، محمدحسن؛ طباطبائی، مهدی (۱۳۸۸). تعیین محدوده آسایش حرارتی در شرایط آب‌وهوای خشک شهر یزد، هویت شهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، ۳ (۴)، ۳۹-۴۶.

<https://sanad.iau.ir/Journal/hoviatshahr/Article/795375>

صفایی‌پور، مسعود؛ شبانکاری، مهران؛ تقوی، طیبه (۱۳۹۲). شاخص‌های زیست‌اقلیمی مؤثر بر ارزیابی آسایش انسان شهر شیراز، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه اصفهان، ۲۴ (۲)، ۱۹۳-۲۱۰.

https://journals.ui.ac.ir/article_18602_0.html

عزیزی، قاسم؛ صفراد، طاهر؛ محمدی، حسین؛ فرجی سبکبار، حسنعلی (۱۳۹۵). ارزیابی و مقایسه داده‌های بازکاوی شده بارش جهت استفاده در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، ۴۸ (۱)، ۳۳-۴۹.

https://jphgr.ut.ac.ir/article_57026.html

فرج‌زاده، حسن؛ سلیقه؛ محمد؛ علیجانی، بهلول (۱۳۹۵). کاربرد شاخص اقلیم حرارتی جهانی در ایران از منظر گردشگری، مجله مخاطرات محیط طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۵ (۷): ۱۳۷-۱۱۷.

https://jneh.usb.ac.ir/article_2658.html

فرزانه، مهسا؛ ملبوسی، شراره؛ حمیدیان‌پور، محسن (۱۴۰۱). پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی استان سیستان و بلوچستان تحت شرایط سناریوهای واداشت تابشی RCP، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، سازمان هواشناسی کشور - پژوهشکده اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۱ (۵۱)، ۱۴۸-۱۲۹.

https://clima.irimo.ir/article_148317.html

قربان‌نیا خبیری، وجیهه؛ عظیمی، الهه؛ آرمین، محسن (۱۴۰۱). محاسبه شاخص‌های اقلیم گردشگری مدل RayMan در شهر یاسوج و بررسی روند آن‌ها، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ۱۱ (۴۱)، ۱۲۲-۱۰۷.

https://journals.iau.ir/article_685931.html

کدخدا، الهام؛ امیدوار، کمال؛ زرین، آذر؛ مزیدی، احمد؛ داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۲). پیش‌نگری تنش گرمایی در ایران براساس برون‌داد چند مدلی همادی CMIP6. مجله ژئوفیزیک ایران، انجمن ملی ژئوفیزیک ایران، ۱۷ (۲)، ۱۷۳-۱۵۷.

https://www.ijgeophysics.ir/article_165670.html

مزیدی، احمد؛ امیدوار، کمال؛ ملک‌احمدی، عاطفه؛ حسینی، سیدسلام (۱۴۰۰). ارزیابی شاخص‌های زیست‌اقلیمی مؤثر بر آسایش انسان (مطالعه موردی: شهر ارومیه)، جغرافیا و روابط انسانی، آئیژ عزمی، ۴ (۲)، ۱۷۵-۱۵۵.

https://www.gahr.ir/article_138074.html

نجان‌سلیقه، محمد؛ بریمانی، فرامرز؛ اسماعیل‌نژاد، مرتضی (۱۳۸۷). پهنه‌بندی اقلیمی استان سیستان و بلوچستان. جغرافیا و توسعه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۶ (۱۲)، ۱۱۶-۱۰۱.

https://gdij.usb.ac.ir/article_1245.html

نجفی، محمدسعید (۱۳۹۹). شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر تنش‌های گرمایی در ناحیه خزری؛ پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، دانشگاه گلستان، ۱ (۲)، ۱-۱۲.

https://ccr.gu.ac.ir/article_111110.html

نگارش، حسین؛ خسروی، محمود؛ شاه‌حسینی، منصوره؛ محمودی، پیمان (۱۳۸۸). مطالعه خشکسالی‌های کوتاه‌مدت شهرستان زاهدان، جغرافیا و توسعه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۸ (۱۸)، ۱۳۴-۱۰۹.

https://gdij.usb.ac.ir/article_1123.html

Resources

Alavipanah, S., Wegmann, M., Qureshi, S., Weng, Q., & Koellner, T. (2015). The role of vegetation in mitigating urban land surface temperatures: A case study of Munich, Germany during the warm season. *Sustainability*, 7(4), 4689-4706.

<https://doi.org/10.3390/su7044689>

Asghari, M., Ghalhari, G. F., Abbasinia, M., Shakeri, F., Tajik, R., & Ghannadzadeh, M. J. (2020). Feasibility of relative strain index (RSI) for the assessment of heat stress in outdoor environments: Case study in three different climates of Iran. *The Open Ecology Journal*, 13(1).

<https://doi.org/10.2174/1874213002013010011>

Aylett, A. (2015). Institutionalizing the urban governance of climate change adaptation: Results of an international survey. *Urban Climate*, 14, 4-16.

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.06.005>

Brouillet, A., & Joussaume, S. (2020). More perceived but not faster evolution of heat stress than temperature extremes in the future. *Climatic Change*, 162(2), 527-544. .

<https://doi.org/10.1007/s10584-020-02752-z>

Chen, Y., Wang, L., Shi, X., Zeng, C., Wang, Y., Wang, G., ... & Zhang, F. (2023). Impact of Climate Change on the Hydrological Regimes of the Midstream Section of the Yarlung Tsangpo River Basin Based on SWAT Model. *Water*, 15(4), 685.

<https://doi.org/10.3390/w15040685>

Crowe, J., van Wendel de Joode, B., & Wesseling, C. (2009). A pilot field evaluation on heat stress in sugarcane workers in Costa Rica: What to do next?. *Global Health Action*, 2(1), 2062.

<https://doi.org/10.3402/gha.v2i0.2062>

Cui, T., Li, C., & Tian, F. (2021). Evaluation of temperature and precipitation simulations in CMIP6 models over the Tibetan Plateau. *Earth and Space Science*, 8(7), e2020EA001620.

<https://doi.org/10.1029/2020EA001620>

De Freitas, C. R., & Grigorieva, E. A. (2017). A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices. *International journal of biometeorology*, 61(3), 487-512.

<https://doi.org/10.1007/s00484-016-1228-6>

Epstein, Y., & Moran, D. S. (2006). Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial health*, 44(3), 388-398.

<https://doi.org/10.2486/indhealth.44.388>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.

<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

Forsthoft, A., Mehnert, P., & Neffgen, H. (2001). Comparison of laboratory studies with predictions of the required sweat rate index (ISO 7933) for climates with moderate to high thermal radiation. *Applied ergonomics*, 32(3), 299-303.

[https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(01\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(01)00005-9)

Garver, M. S., & Williams, Z. (2020). Utilizing relative weight analysis in customer satisfaction research. *International Journal of Market Research*, 62(2), 158-175. <http://dx.doi.org/10.1177/1470785319859794>

Ghazi, B., Przybylak, R., & Pospieszńska, A. (2023). Projection of climate change impacts on extreme temperature and precipitation in Central Poland. *Scientific Reports*, 13(1), 18772.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-46199-5>

Grömping, U. (2007). Estimators of relative importance in linear regression based on variance decomposition. *The American Statistician*, 61(2), 139-147.

<https://doi.org/10.1198/000313007X188252>

Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., Dowdy, A. J., Bador, M., Boschat, G., ... & Power, S. (2020). Insights from CMIP6 for Australia's future climate. *Earth's Future*, 8(5), e2019EF001469.

<https://doi.org/10.1029/2019EF001469>

Heidari, H., Golbabaeei, F., Shamsipour, A., Forushani, A. R., & Gaeini, A. (2018). Consistency between sweat rate and wet bulb globe temperature for the assessment of heat stress of people working outdoor in arid and semi-arid regions. *The international journal of occupational and environmental medicine*, 9(1), 1-9.

<http://dx.doi.org/10.15171/ijoom.2018.1204>

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A.

- Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press.
- Iwamoto, Y., & Ohashi, Y. (2021). Assessing the Climatological Relationship between Heatstroke Risk and Heat Stress Indices in 47 Prefectures in Japan. *GeoHazards*, 2(4), 321-331.
<https://doi.org/10.3390/geohazards2040017>
- Jiang, Y., Huang, J., Shi, T., & Li, X. (2021). Cooling island effect of blue-green corridors: Quantitative comparison of morphological impacts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(22), 11917.
<https://doi.org/10.3390/ijerph182211917>
- Juzbašić, A., Ahn, J. B., Cha, D. H., Chang, E. C., & Min, S. K. (2022). Changes in heat stress considering temperature, humidity, and wind over East Asia under RCP8. 5 and SSP5-8.5 scenarios. *International Journal of Climatology*, 42(12), 6579-6595.
<https://doi.org/10.1002/joc.7636>
- Kumar, P., Debele, S. E., Khalili, S., Halios, C. H., Sahani, J., Aghamohammadi, N., ... & Jones, L. (2024). Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: Drivers, effectiveness, and future needs. *The Innovation*, 5(2):100588.
<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100588>
- Kumar, T. L., Vinodhkumar, B., Rao, K. K., Chowdary, J. S., Osuri, K. K., & Desamsetti, S. (2023). Insights from the bias-corrected simulations of CMIP6 in India's future climate. *Global and Planetary Change*, 226, 104137.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104137>
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L., Falfán, I., & MacGregor-Fors, I. (2022). Too hot to handle? On the cooling capacity of urban green spaces in a Neotropical Mexican city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127633.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127633>
- Mistry, M. N. (2020). A high spatiotemporal resolution global gridded dataset of historical human discomfort indices. *Atmosphere*, 11(8), 835.
<https://doi.org/10.3390/atmos11080835>
- Mizumoto, A. (2023). Calculating the relative importance of multiple regression predictor variables using dominance analysis and random forests. *Language Learning*, 73(1), 161-196.
<https://doi.org/10.1111/lang.12518>
- Moda, H. M., Filho, W. L., & Minhas, A. (2019). Impacts of climate change on outdoor workers and their safety: some research priorities. *International journal of environmental research and public health*, 16(18), 3458.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16183458>
- Modarres, R., Ghadami, M., Naderi, S., & Naderi, M. (2018). Future heat stress arising from climate change on Iran's population health. *International journal of biometeorology*, 62, 1275-1281.
<https://doi.org/10.1007/s00484-018-1532-4>
- Moran, D. S., Pandolf, K. B., Shapiro, Y., Heled, Y., Shani, Y., Mathew, W. T., & Gonzalez, R. R. (2001). An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT). *Journal of thermal biology*, 26(4-5), 427-431.
[https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(01\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(01)00055-9)
- Moustris, K., Kavadias, K. A., Zafirakis, D., & Kaldellis, J. K. (2020). Medium, short and very short-term prognosis of load demand for the Greek Island of Tilos using artificial neural networks and human thermal comfort-discomfort biometeorological data. *Renewable Energy*, 147, 100-109.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.126>

- Moyer, A. N., & Hawkins, T. W. (2017). River effects on the heat island of a small urban area. *Urban Climate*, 21, 262-277.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.004>
- Nie, S., Fu, S., Cao, W., & Jia, X. (2020). Comparison of monthly air and land surface temperature extremes simulated using CMIP5 and CMIP6 versions of the Beijing Climate Center climate model. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 487-502.
<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03090-x>
- Peng, S., Wang, C., Li, Z., Mihara, K., Kuramochi, K., Toma, Y., & Hatano, R. (2023). Climate change multi-model projections in CMIP6 scenarios in Central Hokkaido, Japan. *Scientific Reports*, 13(1), 230.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-27357-7>
- Poupkou, A., Nastos, P., Melas, D., & Zerefos, C. (2011). Climatology of discomfort index and air quality index in a large urban mediterranean agglomeration. *Water, Air, & Soil Pollution*, 222(1), 163-183.
<https://doi.org/10.1007/s11270-011-0814-9>
- Roghanchi, P., & Kocsis, K. C. (2018). Challenges in selecting an appropriate heat stress index to protect workers in hot and humid underground mines. *Safety and health at work*, 9(1), 10-16.
<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.04.002>
- Roshan, G., Almomenin, H. S., da Silveira Hirashima, S. Q., & Attia, S. (2019). Estimate of outdoor thermal comfort zones for different climatic regions of Iran. *Urban Climate*, 27, 8-23.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.005>
- Runhaar, H., Mees, H., Wardekker, A., van der Sluijs, J., & Driessen, P. P. (2012). Adaptation to climate change-related risks in Dutch urban areas: stimuli and barriers. *Regional environmental change*, 12, 777-790.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10113-012-0292-7>
- Santos, R. C., de Souza, A. S., de Souza Santana, C., Sanches, A. C., Gomes Filho, R. R., Martins, E. A. S., ... & Theodoro, F. L. (2020). Evaluation of the rational use of agricultural space for better human occupation. *International Journal for Innovation Education and Research*, 8(10), 384-395.
<http://dx.doi.org/10.31686/ijer.vol8.iss10.2692>
- Sherwood, S. C., & Huber, M. (2010). An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(21), 9552-9555.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0913352107>
- Shukla, K. K., & Attada, R. (2023). CMIP6 models informed summer human thermal discomfort conditions in Indian regional hotspot. *Scientific Reports*, 13(1), 12549.
<http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-38602-y>
- Siabi, E. K., Awafo, E. A., Kabo-bah, A. T., Derkyi, N. S. A., Akpoti, K., Mortey, E. M., & Yazdanie, M. (2023). Assessment of Shared Socioeconomic Pathway (SSP) climate scenarios and its impacts on the Greater Accra region. *Urban Climate*, 49, 101432.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101432>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
<http://dx.doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*, 456, 12-29.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>

Velea, L., & Bojariu, R. (2018). Summer thermal discomfort conditions in Romania under climate change scenarios. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 13(2), 595-603.

<http://dx.doi.org/10.26471/cjees/2018/013/050>

Yi, X., Zou, L., Niu, Z., Jiang, D., & Cao, Q. (2022). Multi-model ensemble projections of winter extreme temperature events on the Chinese mainland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), 5902.

<https://doi.org/10.3390/ijerph19105902>

Zamanian, Z., Sedaghat, Z., Hemehrezaee, M., & Khajehnasiri, F. (2017). Evaluation of environmental heat stress on physiological parameters. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 15(1), 1-8.

<https://doi.org/10.1186/s40201-017-0286-y>

Zare, S., Hasheminejad, N., Ahmadi, S., Bateni, M., Baneshi, M. R., & Hemmatjo, R. (2019). A Comparison of the Correlation Between ESI and Other Thermal Indices (WBGT, WBTD, TWL, HI, SET, PET, PSI, and PSIHR): A Field Study. *Health Scope*, 8(1).

<http://dx.doi.org/10.5812/jhealthscope.63827>

Zhao, Y., Ducharne, A., Sultan, B., Braconnot, P., & Vautard, R. (2015). Estimating heat stress from climate-based indicators: present-day biases and future spreads in the CMIP5 global climate model ensemble. *Environmental Research Letters*, 10(8), 084013.

<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084013>

Zonato, A., Martilli, A., Gutierrez, E., Chen, F., He, C., Barlage, M., ... & Giovannini, L. (2021). Exploring the effects of rooftop mitigation strategies on urban temperatures and energy consumption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(21), e2021JD035002.

<https://doi.org/10.1029/2021JD035002>

