



Investigating ET and Cp climatic comfort indices based on quantile regression using temperature, humidity, and wind speed (A case study of Babolsar)

Sedigheh Lotfi¹ | Sedigheh Bararkhanpour Ahmadi²

1. Corresponding author, Professor of Geography and Urban Planning, Department of Geography, University of Mazandaran, Babolsar, Iran, E: s.lotfi@umz.ac.ir
2. PhD in Agricultural Meteorology, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, E: rbararkhan@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords

Climate change
Heat stress
Climate comfort indices
Limit values
Babolsar.

Climate change, as one of the most critical challenges, significantly affects climatic comfort conditions in urban areas. This study aimed to investigate the impact of climate change on climatic comfort indices at the Babolsar synoptic station. In this research, the 28-year trend (1987–2014) and future projections up to the year 2100 were analyzed for the Effective Temperature (ET) and Baker’s Bioclimatic Index (Cp) using temperature, relative humidity, and wind speed data, employing quantile regression methods. To assess future conditions, three climate scenarios optimistic, intermediate, and pessimistic (SSP126, SSP245, and SSP585, respectively) were utilized to determine potential changes in index values and the monthly classification of climatic comfort in the region. The results indicated that under most scenarios, an increase in air temperature and a decrease in relative humidity are likely by the end of the century, whereas only the optimistic scenario shows temperature stability and a relative increase in humidity. The ET index exhibited an upward trend during the historical period, indicating warming of cold days. Under the optimistic scenario, the increase in hot days continues but with lesser intensity; however, under the intermediate and pessimistic scenarios, a significant rise in temperature and a reduction in cold days exacerbate thermal stress, particularly during the warm months. The Cp index, which previously indicated a tendency toward coolness, reflects increasing heat and heat stress in the future. Overall, the findings suggest growing climatic discomfort and declining stability of bioclimatic conditions in the coastal area of Babolsar. Accordingly, adopting smart climate management strategies appears essential to mitigate negative impacts and enhance the region's resilience.

Article History:

Received:

20 Fe 2026

Received in revised form:

19 Ma 2026

Accepted:

21 Ma 2026

Available online:

22 May 2026

Citation: Lotfi, S., Bararkhanpour Ahmadi, S. (2026). Investigating ET and Cp Climatic Comfort Indices based on Quantile Regression using Temperature, Humidity, and Wind Speed (A case study of Babolsar City). *Geography*, 24 (88), 149- 166.

doi <http://doi.org/10.22034/jiga.2026.2082693.1477>



© The Author (s).

Publisher: Iranian Geographical Associati This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Extended Abstract

Introduction

Climate change, driven by anthropogenic activities and amplified by urban morphology, is profoundly impacting human life. The increase in global temperatures, coupled with the urban heat island effect, is leading to the emergence of more frequent and intense heat-related risks. Bioclimatic indices, based on meteorological variables like temperature, humidity, and wind, are essential for evaluating thermal stress in urban environments and guiding sustainable management strategies. In the context of accelerating climate change, the study of future bioclimatic comfort under various emission scenarios (optimistic, moderate, and pessimistic) has become increasingly critical. While numerous studies have examined historical and future urban climatic comfort, many have focused on mean trends in time series data. However, climate change is known to increase the frequency and intensity of extreme weather events. Therefore, analyzing the impact of extreme high and low values of climatic variables on comfort indices is of paramount importance. Unlike traditional regression methods, quantile regression offers a powerful tool to investigate patterns of change across the entire distribution of a dataset—particularly the extremes. This approach can reveal how different quantiles (e.g., low, medium, and high) of independent climatic variables influence the dependent comfort index, providing crucial insights into the effects of severe weather (both hot and cold). Mazandaran Province, is a major tourist destination, renowned for its coastal and natural attractions. Babolsar, with the longest coastline in northern Iran, is a prime location for coastal tourism. As global temperatures rise, studying thermal stress and climatic comfort in these tourism-dependent areas becomes essential. Despite numerous studies on climate change and thermal comfort indices, a comprehensive, localized analysis of future thermal stress and comfort, especially for Iran's northern coastal regions, remains scarce. This study aims to fill this gap by applying multiple Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) and quantile regression to analyze changes in bioclimatic comfort indices in Babolsar for both historical and future periods, offering an innovative and practical approach for adaptation planning.

Material and Methods

The study focuses on Babolsar (36°43'N, 52°39'30"E), a coastal city on the southern Caspian Sea with a humid temperate climate, average annual temperature of 17.8°C, and about 939 mm of precipitation. Two primary datasets were employed: (1) historical daily meteorological data (temperature, humidity, wind speed) from the Babolsar synoptic station (1987–2014), and (2) future climate projections (2020–2099) from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) under three SSP scenarios—optimistic (SSP1-2.6), moderate (SSP2-4.5), and pessimistic (SSP5-8.5). Among eight CMIP6 models evaluated for accuracy in Iran, the GFDL-ESM4 model was selected for its complete data, relatively high accuracy ($R^2=0.7$), and appropriate resolution. Bias correction and downscaling to the station level were performed using bilinear interpolation in R. Two comfort indices were calculated: (a) Effective Temperature (ET), which integrates temperature and humidity ($ET = T - 0.4(T - 10)(1 - RH/100)$), with categories from "Very Hot" to "Very Cold"; and (b) Baker's Bioclimatic Index (C_p), designed for tourist comfort ($C_p = (0.26 + 0.34V^{0.632})(36.5 - T)$, where V is wind speed), with categories from "Hot, Unpleasant" to "Unbearable, Very Cold". The core analytical method was quantile regression, which estimates conditional quantiles (e.g., 5th, 50th, 95th percentiles) rather than just the conditional mean. This allows detection of significant trends across the full distribution (0.01 to 0.99 quantiles) for both historical and future periods.

Results and Discussion

The results revealed between 1987 and 2014, mean daily temperatures rose significantly across all quantiles, with the most pronounced warming (0.048°C/year) occurring on the coldest days. Concurrently, relative humidity declined—especially at lower quantiles—while wind speeds increased. The ET index reflected this warming trend, again strongest for cooler days, suggesting a reduction in cold extremes. Interestingly, Baker's Index showed a historical increase in lower and medium quantiles, indicating a trend toward cooler days, which appeared beneficial. Future projections, however, diverge sharply by emissions scenario. Under the optimistic SSP1-2.6, temperatures continue rising in the near

future (2021–2060) but at a slower rate, with no significant trend expected by 2061–2100. In contrast, the moderate SSP2-4.5 and especially the pessimistic SSP5-8.5 project intensified warming, particularly for lower quantiles. Humidity projections are mixed under optimistic and moderate scenarios (with some high-quantile increases), but the pessimistic scenario foresees significant decreases, especially for medium and high quantiles. Wind speed trends are negligible under SSP1-2.6, slightly negative under SSP2-4.5, and complex under SSP5-8.5 (decreasing near-term, increasing far-term but with weaker slopes than historically). For the ET index, SSP1-2.6 shows near-term warming but far-term stabilization. Under SSP2-4.5 and particularly SSP5-8.5, strong increasing trends emerge across all quantiles, with far-future slopes reaching up to $0.56^{\circ}\text{C}/\text{year}$ —signaling a dramatic rise in hot days. Starkly, Baker’s Index—historically trending toward cooler days—reverses under all future scenarios, showing decreasing trends across most quantiles, indicating a shift toward warmer conditions. This decline intensifies under SSP5-8.5 (slopes up to -0.062), implying a notable reduction in cool and cold days. Quantile regression revealed that ordinary least squares (OLS) mean trends often misrepresented median or extreme trends, underscoring the insufficiency of mean-only analyses. Under SSP5-8.5, upper ET quantiles intensify fastest near-term ($0.3/\text{year}$), while lower quantiles also rise dramatically far-term ($0.07/\text{year}$), eroding cooler days. For the comfort parameter (Cp), negative slopes under SSP5-8.5 are strongest for upper quantiles far-term, signaling a near-total loss of very cool days.

Conclusion

This study investigated historical and future climatic comfort using meteorological data and advanced statistical methods. Two primary datasets were utilized: historical daily weather records (temperature, humidity, wind speed) from 1987-2014 obtained from the local synoptic station, and future climate projections for 2020-2099 derived from the CMIP6 database. Among eight assessed models, the GFDL-ESM4 was selected for its accuracy ($R^2=0.7$) and data completeness. Bias correction and downscaling were performed using bilinear interpolation in R. To evaluate human comfort, two bioclimatic indices were calculated. The Effective Temperature (ET) integrates temperature and humidity to classify comfort from "Very Hot" to "Very Cold." Baker's Bioclimatic Index (Cp) assesses tourist comfort by incorporating wind speed and temperature, with categories ranging from "Hot, Unpleasant" to "Unbearable, Very Cold." These indices were applied to both historical and future data under three Shared Socioeconomic Pathways (SSPs): a low-emissions (SSP1-2.6), moderate (SSP2-4.5), and high-emissions (SSP5-8.5) scenario. The core analytical method was quantile regression, which estimates relationships across different percentiles (e.g., 5th, 50th, 95th) of the dependent variable distribution. This approach is superior to ordinary least squares for climate studies because it captures changes in extreme values—critical for assessing climate impacts. The analysis identified significant trends across quantiles (0.01 to 0.99) for climatic variables and comfort indices over both historical and future periods, enabling a comprehensive understanding of how both average conditions and extremes may shift under different emission pathways.

Keywords: Climate change Heat stress , Climate comfort indices, Limit values, Babolsar

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

The authors' contributions are equal.

Conflict of Interest

Author declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper

References

- Amin, A. & Mourshed, M. (2024). Weather and climate data for energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114247. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114247>
- Amiri, F., Lashgari, H., Ghorbanian, G. & Morshedi, J. (2020). The effect of climate change on rainfed wheat crop calendar (Chamran cultivar) Dezful case study (Article type: Research). *Geography*, 18 (65), 6-18. (in persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1399.18.2.1.8>
- Asadi, M. & Karami, M. (2022). Modeling of relative humidity trends in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8 (1), 1035-1045. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01093-9>
- Asghari, M., Ghalhari, G. F., Ghanadzadeh, M., Moradzadeh, R., Tajik, R., Samadi, S. & Heidari, H. (2023). Modelling of thermal discomfort based representative concentration pathways (RCP) scenarios in coming decades using temperature-humidity index (THI) and effective temperature (ET): a case study in a semi-arid climate of Iran. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01335-y>
- Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Hashemy Shahdany, S. M., Moridi, A., Neshat, A. & Maghsoudi, R. (2024). Projections of meteorological drought severity-duration variations based on CMIP6. *Scientific Reports*, 14 (1), 5027. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55340-4x>
- Ben-Salha, O., Zmami, M., Waked, S. S., Raggad, B., Najjar, F. & Alenazi, Y. M. (2025). Assessing the Impacts of Transition and Physical Climate Risks on Industrial Metal Markets: Evidence from the Novel Multivariate Quantile-on-Quantile Regression. *Atmosphere*, 16 (2), 233. <https://doi.org/10.3390/atmos16020233>
- Bhati, N. & Sheth, A. (2026). Occupational heat stress and adaptation among outdoor workers: a narrative review of global evidence and policy responses. *International Journal of Biometeorology*, 70 (1), 19. <https://doi.org/10.1007/s00484-025-03101-4>
- Çağlak, S. & Türkeş, M. (2023). Spatial Distribution and Future Projections of Thermal Comfort Conditions during the Hot Period of the Year in Diyarbakır City, Southeastern Turkey. *Sustainability*, 15 (13), 10473. <https://doi.org/10.3390/su151310473>
- Calhoun, Z. D., Willard, F., Ge, C., Rodriguez, C., Bergin, M. & Carlson, D. (2024). Estimating the effects of vegetation and increased albedo on the urban heat island effect with spatial causal inference. *Scientific Reports*, 14 (1), 540. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50981-w>
- Duan, Q., McGrory, C. A., Brown, G., Mengersen, K. & Wang, Y. G. (2022). Spatio-temporal quantile regression analysis revealing more nuanced patterns of climate change: A study of long-term daily temperature in Australia. *Plos one*, 17 (8), e0271457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271457>
- Eludoyin, O. M., Adelekan, I. O., Webster, R. & Eludoyin, A. O. (2013). Air temperature, relative humidity, climate regionalization and thermal comfort of Nigeria. *International Journal of Climatology*, 34 (6), 2000-2018. <https://doi.org/10.1002/joc.3817>
- Eskandari Damane, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarnivand, H. & Barati, A. A. (2020). Simulation and forecasting of climatic components of temperature and precipitation in arid regions (Case study: Minab plain). *Geography*, 18 (66), 110-128. (in persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1399.18.3.7.6>
- Fotso-Nguemo, T. C., Vondou, D. A., Diallo, I., Diedhiou, A., Weber, T., Tanessong, R. S. & Yepdo, Z. D. (2022). Potential impact of 1.5, 2 and 3 C global warming levels on heat and discomfort indices changes over Central Africa. *Science of the Total Environment*, 804, 150099.
- Gagnon, D., Schlader, Z. J. & Jay, O. (2026). The physiology behind the epidemiology of heat-related health impacts. *Physiology*, 41 (1), 30-42. <https://doi.org/10.1152/physiol.00012.2025>
- Gu, Y. & You, X. Y. (2022). A spatial quantile regression model for driving mechanism of urban heat island by considering the spatial dependence and heterogeneity: An example of Beijing, China. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103692. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103692>

-
- Hajifathali, M., faizi, M. & dehaghan, A. (2022). The Relationship between Air Temperature, mean Radiant Temperature and Albedo in the Reduction of Thermal Island in Cities. *Geography*, 19 (71), 173-191. (in persian)
<https://dor.isc.ac/dor/http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1400.19.71.9.6>
- Hedjazizadeh, Z., Karbalaee, A. & Kazemiazarr, M. (2025). Investigating the Impact of Climate Change on Extreme Precipitation Events in East Azerbaijan Province. *Geography*, 22(83), 1-20. (in persian) <https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2048574.1363>
- Hejazizadeh, Z. & Karbalaie, A. (2023). Thermal comfort in Iran. *Geography*, 13 (46), 21-39. (in persian)
- Helali, J., Oskouei, E. A., Hosseini, S. A., Saeidi, V. & Modirian, R. (2022). Projection of changes in late spring frost based on CMIP6 models and SSP scenarios over cold regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149 (3), 1405-1418. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04124-2>
- Hu, B., Cutler, M. E. & Morel, A. C. (2026). Spatiotemporal dynamics of heat stress and cold stress on UK rapeseed cropping over 1961–2020. *Scientific Reports*, 16, 12263. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-41957-7>
- Huang, L., Lee, S. S. & Timmermann, A. (2021). Caspian Sea and Black Sea Response to Greenhouse Warming in a High-Resolution Global Climate Model. *Geophysical Research Letters*, 48 (4), e2020GL090270. <https://doi.org/10.1029/2020GL090270>
- Isinkaralar, O. (2023). Bioclimatic comfort in urban planning and modeling spatial change during 2020–2100 according to climate change scenarios in Kocaeli, Türkiye. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20 (7), 7775-7786. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04992-9>
- Isinkaralar, O. (2024). Discovery of spatial climate parameters and bioclimatic comfort change simulation in Türkiye under socioeconomic pathway scenarios: A basin-scale case study for urban environments. *Natural Hazards*, 120 (2), 1809-1819. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06237-x>
- Jia, Y. & Jeong, J. H. (2020). Deep learning for quantile regression under right censoring: DeepQuantreg. arXiv preprint arXiv:2007.07056.
- Khazaei Faizabad, E., Pudineh, M. R. & Hamidianpour, M. (2020). Investigating the effect of climate change on Caravander river runoff. *Geography*, 17 (63), 161-178. (in persian)
- Koenker, R. & Bassett, G. (1978). Regression quantiles. *Econometrica*, 46, 33-50.
- Koenker, R. (2005). *Quantile regression*. first ed, New York, Cambridge University Press, 1-25.
- Lavrov, A. S. & Sterin, A. M. (2024). Detailing Climatic Trends of Temperature and Precipitation in the Territory of the Russian Federation Using Quantile Regression and Clustering. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 60 (Suppl 1), S30-S45. <https://doi.org/10.1134/S0001433824700543>
- Mazidi, A., Omidvar, K., Malek Ahmadi, A. & Hosseini, S. S. (2021). Evaluation of bioclimatic indicators affecting human comfort (Case study: Urmia). *Geography and Human Relationships*, 4 (2), 155-175. <https://doi.org/10.22034/gahr.2021.286618.1560>
- 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), 1-32. (in persian) <https://doi.org/10.22111/gajj.2025.50467.3247>
- Mohammadi, B., Barnameh, S. & Matzarakis, A. (2021). Temporal and spatial analysis of thermal stress and its trend in Iran. *Meteorological Applications*, 28 (1), e1977. <https://doi.org/10.1002/met.1977>
- Nazari, M., Mosaedi, A. & Ghabaei Sough, M. (2026). Detecting climate changes during the past half century in some number of synoptic stations in Iran. *Nivar*, 50 (132-133), 153-175. (in persian) <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.529236.1339>

-
- Nazemosadat, M. J., Heidari, A. & Mehravar, S. (2022). Assessing Climate Change in the Middle East from the Perspective changes in Air Temperature, Relative Humidity and Vector Wind: Land, Sea and atmosphere Interactions. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1330480/v1>
- Over, T., Marti, M., Ortiz, J. & Podzorski, H. (2025). The joint effect of changes in urbanization and climate on trends in floods: A comparison of panel and single-station quantile regression approaches. *Journal of Hydrology*, 648, 132281. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132281>
- Ramezani, G. B. (2010). A Survey on Planning Human Bioclimatic Comfort for Ecotourism (Case Study: Gilan, Iran-South West of Caspian Sea). *Iranian Journal of Tourism & Hospitality Islamic Azad University, Garmsar Branch*, 1 (1), 27-36. <https://sid.ir/paper/321482/en>
- Roşu, C., Mihăilă, D. & Bistricean, P. I. (2022). Evaluation of the bioclimate of submontane resorts located between Suceviţa and Slănic Moldova based on the THI index. *Geo Review*, 32 (1), 4. <http://dx.doi.org/10.4316/GEOREVIEW.2022.01.02>
- Solaimani, K., Ahmadi, S. B. & Shokriani, F. (2024). The spatiotemporal trend changes of extreme temperature-humidity variables and their impact on climatic comfort changes. *Ecological Indicators*, 158, 111629. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2419746/v1>
- Soltani, K., Masoompour Samakosh, J., Mojarrad, F., Hadi Pour, S. & Jalilian, A. (2024). Spatial Changes of Seasonal Reference Evapotranspiration in Iran Based on CMIP6 Models. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49 (4). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.364373.1007556>
- Staffa, S. J., Kohane, D. S. & Zurakowski, D. (2019). Quantile regression and its applications: a primer for anesthesiologists. *Anesthesia & Analgesia*, 128 (4), 820-830. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000004017>
- Torki, F., Mojtabazadeh Khanghahi, H. & Rezaei, H. (2023). Identifying the temperature threshold limit and thermal islands of Kerman city with an emphasis on changes in the landscape of the land. *Geography*, 21 (79), 175-187. (in persian)
- Ullah, S., Aldossary, A., Ullah, W. & Al-Ghamdi, S. G. (2024). Augmented human thermal discomfort in urban centers of the Arabian Peninsula. *Scientific Reports*, 14 (1), 3974. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54766-7>
- Zabihi, O. & Ahmadi, A. (2024). Multi-criteria evaluation of CMIP6 precipitation and temperature simulations over Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101707. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101707>
- Zare, M., Bejestan, M. S., Adib, A. & Beygipoor, G. (2022). Analysis of Future Precipitation and Temperature Change and Its Implication on Doroodzan Dam, Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00903-z>
- Zhang, J., You, Q., Ren, G., Ullah, S., Normatov, I. & Chen, D. (2023). Inequality of global thermal comfort conditions changes in a warmer world. *Earth's Future*, 11 (2), e2022EF003109. <https://doi.org/10.1029/2022EF003109>
- Zhao, Q., Lian, Z. & Lai, D. (2021). Thermal comfort models and their developments: A review. *Energy and Built Environment*, 2 (1), 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.05.007>
- Zhu, L., Fang, W., Rahman, S. U. & Khan, A. I. (2023). How solar-based renewable energy contributes to CO2 emissions abatement? Sustainable environment policy implications for solar industry. *Energy & Environment*, 34 (2), 359-378.



بر اساس رگرسیون چندک با استفاده از دما، C_p و ET ارزیابی شاخص‌های آسایش اقلیمی رطوبت و سرعت باد (مطالعه موردی شهر بابلسر

صدیقه لطفی^۱، صدیقه برارخانپور احمدی^۲

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. s.lotfi@umz.ac.ir

۲. دانش آموخته دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. rbararkhan@gmail.com

اطلاعات مقاله چکیده

واژگان کلیدی:

تغییر اقلیم
تنش گرمایی
شاخص‌های
آسایش اقلیمی
مقادیر حدی
بابلسر

امروزه تغییر اقلیم به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، تأثیر قابل توجهی بر شرایط آسایش اقلیمی دارد. مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر شاخص‌های آسایش اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک بابلسر انجام شد. در این پژوهش، روند ۲۸ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۴) و آینده تا سال ۲۱۰۰ برای شاخص‌های دمای مؤثر (ET) و شاخص زیست‌اقلیمی بیکر (C_p) با استفاده از داده‌های دما، رطوبت نسبی و سرعت باد و بهره‌گیری از روش رگرسیون چندک تحلیل گردید. برای ارزیابی آینده، سه سناریوی اقلیمی (خوش‌بینانه، میانه و بدبینانه) به ترتی $SSP12$ ، $SSP245$ و $SSP585$ مورد استفاده قرار گرفتند تا تغییرات احتمالی در مقادیر مختلف شاخص‌ها و طبقه‌بندی ماهانه آسایش اقلیمی منطقه تعیین شود. نتایج نشان داد که در بیشتر سناریوها، افزایش دمای هوا و کاهش رطوبت نسبی تا پایان قرن محتمل است، در حالی که تنها در سناریوی خوش‌بینانه ثبات دما و افزایش نسبی رطوبت مشاهده می‌شود. شاخص ET در دوره تاریخی روند افزایشی داشته و گرم‌تر شدن روزهای سرد را نشان می‌دهد. در آینده نیز تحت سناریوی خوش‌بینانه، افزایش روزهای گرم با شدت کمتر تداوم دارد، اما در سناریوهای متوسط و بدبینانه، افزایش چشمگیر دما و کاهش روزهای سرد موجب تشدید تنش حرارتی، به‌ویژه در ماه‌های گرم سال می‌شود. شاخص C_p که در گذشته گرایش به خنکی را نشان می‌داد، در آینده افزایش گرما و گرم‌زدگی را منعکس می‌کند. نتایج کلی بیانگر افزایش ناراحتی اقلیمی و کاهش پایداری شرایط زیست‌اقلیمی در منطقه ساحلی شهر بابلسر است. بر این اساس، اتخاذ راهکارهای هوشمندانه مدیریت اقلیم برای کاهش اثرات منفی و افزایش تاب‌آوری منطقه ضروری به‌نظر می‌رسد.

تاریخ دریافت
۱۴۰۴/۱۰/۱۹
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۵/۰۴/۰۸
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۲/۰۱
تاریخ چاپ:
۱۴۰۵/۰۳/۰۱

استناد: لطفی، صدیقه و برارخانپور احمدی، صدیقه. (۱۴۰۵). ارزیابی شاخص‌های آسایش اقلیمی ET و C_p بر اساس رگرسیون چندک با استفاده از دما، رطوبت و سرعت باد (مطالعه موردی شهر بابلسر)، ۲۴(۸۸)، ۱۶۶-۱۴۹.

<http://doi.org/10.22034/jiga.2026.2049015.1371>

مقدمه و پیشینه

تغییر اقلیم و پیامدهای ناشی از آن به طور مستقیم بر عوامل مختلف در ارتباط با زندگی بشر تأثیرگذار است. افزایش دما ناشی از فعالیت‌های انسانی و نوع ساختار محیط شهری موجب افزایش جزیره گرمایی شده است (حاجی فتحعلی و همکاران، ۱۴۰۰) و نوع ساختار و معماری شهری بر روی افزایش یا کاهش دما تأثیرگذار است (ترکی و همکاران، ۱۴۰۲)؛ به طوری که برخی از این مواد و مصالح به کار رفته در ساختار شهرها مانند آسفالت خیابان‌ها می‌توانند موجب شوند که دما حتی به اندازه ۱۰ درجه سانتی‌گراد گرمتر از ناحیه اطراف باشد (کالهن و همکاران، ۲۰۲۴). در حالی که وجود پوشش گیاهی در بخشی از ساختار شهری موجب کاهش دما در این منطقه نسبت به نواحی دیگر می‌شود. به عبارتی دیگر، نوع الگوی شهری موجب ایجاد خرده اقلیم در منطقه و افزایش گرمایش جهانی موجب افزایش استرس گرمایی در بخش‌های مختلف جهان و ظهور روزهایی با خطرات مرتبط با گرما می‌شود.

آمار و اطلاعات آب و هوایی نقش مهمی در کاربردهای انرژی از جمله طراحی و برنامه‌ریزی، مدیریت و نگهداری سیستم‌های انرژی-ساختمان و کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر دارد (امین و مرشد، ۲۰۲۴). مطالعات مختلفی روند افزایشی دمای هوا در ایران را در طول چندین دهه گذشته نشان داده‌اند که اثرات تغییر اقلیم و گرمایش جهانی را تأیید می‌کند (خزاعی فیض آباد و همکاران، ۱۳۹۸؛ اسکندری دامنه و همکاران، ۱۳۹۹؛ امیری و همکاران، ۱۳۹۹) و نیز تحت سناریوهای شبیه‌سازی شده غلظت‌های مختلف انتشار، دمای آینده ایران به افزایش خود ادامه خواهد داد (هوآنگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ زارع و همکاران، ۲۰۲۲؛ ناظم‌السادات و همکاران، ۲۰۲۲). پارامترهای اقلیمی مانند دما، بارندگی، رطوبت نسبی، باد و درخشندگی خورشید بر روی پتانسیل گردشگری یک منطقه تأثیرگذار است (حجازی زاده و کربلایی، ۱۴۰۱) و موجب ضرورت محاسبه شاخص‌های زیست اقلیمی می‌شود که تأثیر اقلیم را بر گردشگر بررسی می‌کند (روزپو و همکاران، ۲۰۲۲). برای ارزیابی آسایش اقلیمی یا اطلاع یافتن از وضعیت آسایش و راحتی انسان در شرایط مختلف اقلیمی از شاخص‌های زیست اقلیمی استفاده می‌گردد که خود بر پایه‌ی متغیرهای هواشناسی از جمله دما، رطوبت و باد می‌باشند. این مؤلفه‌های آب و هوایی بر روی آسایش اقلیمی در شهرها و پتانسیل گردشگری یک منطقه تأثیرگذار است. این امر موجب ضرورت محاسبه، تحلیل و بررسی شاخص‌های آسایش اقلیمی مبتنی بر پارامترهای هواشناسی به منظور مطالعه استرس حرارتی در شهرها برای زمان‌های مختلف می‌شود تا یک الگوی مناسبی به منظور اعمال برنامه‌ریزی‌های مدیریتی جهت کاهش تنش‌های حرارتی بر فرد یا گردشگر اتخاذ گردد. همچنین با توجه به تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، مطالعه آسایش اقلیمی و تنش‌های حرارتی بر اساس سناریوهای مختلف اقلیمی (شرایط خوش‌بینانه، حالت متوسط و بدبینانه) بیش از پیش احساس می‌شود. مطالعات مختلفی بر روی آسایش اقلیمی شهری برای دوره‌ی حال و آینده انجام شده است (کاگلک و تورکز، ۲۰۲۴، ژنگ و همکاران، ۲۰۲۳، ایزینکالار، ۲۰۲۴)؛ همچنین، یوالله و همکاران (۲۰۲۴) به منظور ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی ناراحتی حرارتی انسان در شبه جزیره عربستان برای دوره‌ی ۲۰۲۲-۱۹۷۹ از مجموعه داده شبکه‌بندی شده ERA5-Heat و شاخص جهانی آب و هوای گرمایی^۱ (UTCI) استفاده نمودند؛ نتایج بیانگر افزایش قابل توجه ناراحتی در منطقه با تنوع مکانی بالا بود. نتایج مطالعه محمدی و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی تنش حرارتی و روند آن در بخش‌های مختلف از ایران در دوره-ی زمانی ۲۰۱۰-۱۹۶۱ نشان دادند که مناطق کوهستانی به خصوص ارتفاعات شمال غرب، دارای بیشترین ضریب تغییرپذیری (بیشتر از ۵۰ درصد) هستند و شرایط زیست اقلیمی شدید (شرایط بسیار گرم و سرد) در هر دو عرض شمالی و جنوبی رو به افزایش بوده است. در مطالعه‌ای دیگر، اصغری و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی تغییرات آینده ناراحتی با استفاده از شاخص دما-رطوبت (THI) در شهر اراک در دوره‌ی زمانی ۲۰۹۹-۲۰۱۱ نتیجه گرفتند که مقادیر THI در ماه‌های ژانویه، فوریه و می در دهه‌های آتی نیز بالاتر از دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) خواهد بود.

در مطالعه‌ی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی و نیز شاخص‌های آسایش حرارتی در دوره‌ی حال و آینده، بررسی روند اغلب بر روی میانگین سری زمانی داده‌ها انجام شده است؛ در حالی که نتایج مطالعات نشان داده است که تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، فراوانی و شدت رویدادهای شدید آب و هوایی را افزایش می‌دهند (حجازی زاده و همکاران، ۱۴۰۳؛ بن سالها و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، در بررسی آسایش اقلیمی و ناراحتی حرارتی توجه بر روی مقادیر حدی داده‌ها که طبقه‌های شدید

^۱. Universal Thermal Climate Index

ناراحتی (عدم آسایش) را نشان می‌دهند اهمیت بالایی دارد و بررسی تأثیر مقادیر بسیار بالا و بسیار پایین متغیرهای اقلیمی بر روی میزان آسایش اقلیمی می‌تواند اطلاعات مهمی در زمینه تأثیر آب و هوای شدید و اثرات متقابل آن‌ها بر روی میزان آسایش انسان در اختیار قرار دهد. روش‌های مبتنی بر رگرسیون چندک (کوئکر و باست، ۱۹۸۷) این توانایی را دارند که الگوی تغییرات در مقادیر مختلف از سری زمانی داده‌ها را به طور جدا مورد بررسی قرار دهند و رابطه‌ی مقادیر مختلف از هر متغیر مستقل را بر روی تغییرات متغیر وابسته مورد مطالعه قرار دهند. برای مثال، در زمینه آسایش اقلیمی، استفاده از روش رگرسیون چندک می‌تواند تغییرات در مقادیر مختلف سری زمانی خصوصاً مقادیر بالا و پایین حدی شاخص آسایش را مورد بررسی قرار دهد و نیز رابطه و تأثیر مقادیر مختلف از هر متغیر اقلیمی را بر روی تغییرات آن شاخص مطالعه نماید که در مطالعه آب و هوای شدید (ماه‌های گرم و سرد) بسیار اهمیت دارد. مطالعات مختلفی از روش رگرسیون چندک در مطالعه متغیرهای آب و هوایی استفاده نموده‌اند (ژو و همکاران، ۲۰۲۳، لاوروو و استرین، ۲۰۲۴، اور و همکاران، ۲۰۲۵)؛ برای نمونه، دوآن و همکاران (۲۰۲۲) برای تحلیل روندهای پنهان در داده‌های دمایی، یک مدل ترکیبی از رگرسیون چندکی ارائه نمودند. نتایج با داده‌های استرالیا نشان می‌دهند که حداکثر و حداقل دمای روزانه به ترتیب حدود ۰/۲۱ و ۰/۱۳ درجه سانتی‌گراد در هر دهه افزایش یافته است و این مدل ناهمگونی‌های مکانی، فصلی و صدکی را در الگوهای تغییر دما آشکار می‌سازد. در مطالعه‌ی دیگر، گو و یو (۲۰۲۲) از یک مدل رگرسیون چندک برای تحلیل تأثیر عوامل محرک بر دمای سطح زمین جزیره گرمایی با در نظر گرفتن وابستگی مکانی و ناهمگونی روابط ارائه نمودند؛ نتایج نشان داد که این مدل نسبت به مدل‌های معمولی مانند رگرسیون حداقل مربعات عملکرد بهتری در پیش‌بینی دمای سطح زمین دارد و نشان‌دهنده تغییرات مکانی در ضرایب عوامل است. همچنین نتایج پیشنهاد می‌کند که استراتژی‌های کاهش جزیره گرمایی شهری باید با توجه به ویژگی‌های محلی و حکمرانی منطقه‌ای طراحی شوند. با این حال، مطالعات در زمینه آسایش اقلیمی آینده با استفاده از روش رگرسیون چندک در نواحی مختلف ایران بسیار محدود بوده است (سلیمانی و همکاران، ۲۰۲۴).

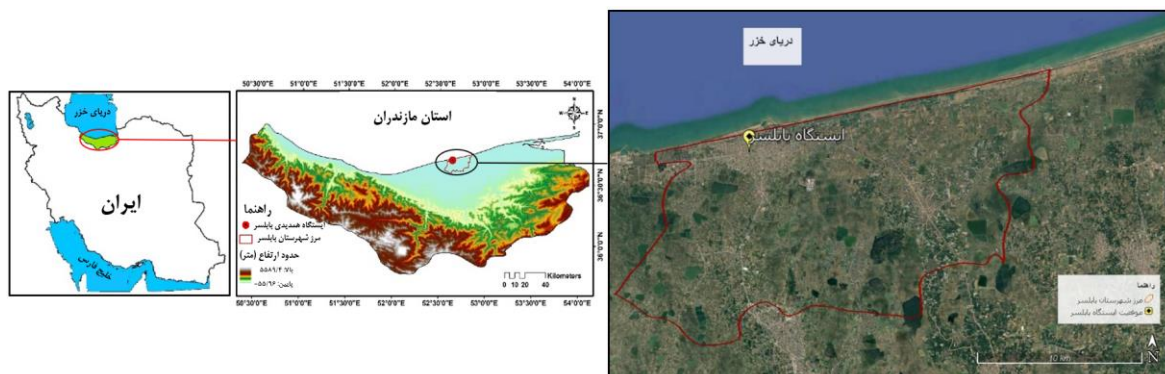
با توجه به رخداد پدیده تغییر اقلیم و تغییر در متغیرهای اقلیمی در ایران، مطالعه آسایش اقلیمی آینده اهمیت به‌سزایی یافته است. از طرفی، مناطق شمالی ایران به دلیل قرارگیری در نواحی جنوبی دریای خزر و نیز وجود کوه و جنگل، سرشار از جاذبه‌های طبیعی و منابع گردشگری مختلف است. استان مازندران به دلیل اینکه بیشترین خط ساحلی را در شمال ایران به خود اختصاص داده است دارای منبع سرشاری از فعالیت‌های گردشگری ساحلی بوده و یکی از مناطق مهم توریستی محسوب می‌شود. با گرم شدن بیشتر آب و هوای جهانی، مطالعه استرس حرارتی و آسایش اقلیم گردشگری به خصوص در مناطق توریست‌پذیر باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد و به یکی از مطالب مهم بررسی اقلیم محیط سکونت انسانی گردشگری تبدیل شود. با وجود انجام مطالعات متعدد درباره تغییر اقلیم و شاخص‌های آسایش حرارتی، هنوز بررسی هم‌زمان تنش‌های گرمایی و آسایش اقلیمی در مقیاس محلی و در افق‌های آینده، به‌ویژه برای مناطق ساحلی شمال کشور، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، اغلب پژوهش‌ها به توصیف روندهای دما و رطوبت بسنده کرده و کمتر از شاخص‌های ترکیبی و روش‌های تحلیلی پیشرفته برای تبیین اثر متغیرهای اقلیمی بهره برده‌اند. این پژوهش با به‌کارگیری سناریوهای مختلف SSP و رگرسیون چندک، تغییرات شاخص‌های آسایش اقلیمی بابل‌سر را در دوره تاریخی و آینده تحلیل می‌کند. از این رو، مطالعه حاضر ضمن پرکردن شکاف موجود در تحلیل زیست‌اقلیمی منطقه، رویکردی نوآورانه و کاربردی برای برنامه‌ریزی سازگاری ارائه می‌دهد.

روش تحقیق

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شهرستان بابل‌سر با مساحت حدود ۲۴۸/۶ کیلومتر مربع که یکی از شهرهای ساحلی استان مازندران و دارای مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۹ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه عرض جغرافیایی می‌باشد به عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده است (شکل ۱). این شهر در شمال ایران و در کرانه‌های جنوبی دریای خزر واقع شده و به دلیل مجاورت با دریا یکی از بهترین مقاصد گردشگری در ایران می‌باشد. ارتفاع این شهر ۲۱ متر پایین‌تر از سطح دریا بوده و با میانگین دمای سالانه حدود ۱۷/۸ درجه سانتی‌گراد و بارش حدود ۹۳۹ میلی‌متر دارای اقلیم مرطوب معتدل با تابستان‌های

گرم و مرطوب است.



شکل (۱). موقعیت جغرافیایی شهرستان بابل

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۵)

داده‌های ایستگاه هواشناسی: در این پژوهش، داده‌های هواشناسی روزانه ایستگاه سینوپتیک بابل از سازمان هواشناسی استان مازندران دریافت گردید. سری زمانی داده‌های اقلیمی شامل دما، رطوبت و باد برای دوره‌ی آماری ۲۰۱۴-۱۹۸۷ از داده‌های ایستگاه بابل استخراج شده و با استفاده از این داده‌ها، سری زمانی شاخص‌های آسایش مورد مطالعه برای دوره‌ی تاریخی محاسبه گردید. داده‌های CMIP6: داده‌های اقلیمی مدل‌های CMIP6 برای سناریوهای مختلف مسیرهای مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSP¹) آینده برای سه سناریو خوش‌بینانه SSP1-2-6، حد متوسط SSP2-4-5 و بدبینانه SSP5-8-5 در ایستگاه مورد نظر (برای دوره‌ی ۲۰۹۹-۲۰۲۰) استخراج و سپس سری زمانی شاخص‌های آسایش اقلیمی آینده برای سناریوهای مختلف محاسبه گردید. در گام بعد، الگوی تغییرات پارامترهای هواشناسی و شاخص‌های آسایش اقلیمی در شهرستان بابل بررسی، پیش‌نگری و تحلیل گردید. داده‌های مدل‌های CMIP6 شامل داده‌های تاریخی^۲ (۱۹۸۷-۲۰۱۴) و سناریو است که از پایگاه داده‌ی ESGF³ دریافت گردید. سپس با در دست داشتن اطلاعات جغرافیایی ایستگاه مورد مطالعه شامل طول و عرض جغرافیایی و کدهای موجود در زبان برنامه‌نویسی R، سری زمانی داده‌های تاریخی و سناریو از مدل برای ایستگاه مورد نظر تشکیل شد. در گام بعد، مقیاس‌های داده‌ها با روش درون‌یابی دو خطی بایلینیر^۴ برای ایستگاه مورد مطالعه انجام گردید. در این روش از چهار پیکسل همسایه‌ی هر پیکسل استفاده شده و میان آن‌ها درون‌یابی برای یافتن پیکسل مورد نظر انجام می‌گردد. به طوری که ابتدا میان هر دو پیکسل مقابل یک درون‌یابی خطی انجام می‌شود، سپس با استفاده از پیکسل‌های همسایه، مقدار پیکسل مورد نظر محاسبه می‌شود. این الگوریتم برای کاهش مقیاس داده‌های شبکه‌ای است (نوروز ولاشیدی و همکاران، ۲۰۲۴). با تحلیل ۸ مدل اقلیمی ACCESS-ESM1-5، ACCESS-CM2، CMCC-ESM2، GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR، NORESM-MM به عنوان مدل‌های نسبتاً دقیق برای ایران براساس نتایج مطالعات انجام شده (سلطانی و همکاران، ۲۰۲۴؛ ذبیحی و احمدی، ۲۰۲۴؛ هلالی و همکاران، ۲۰۲۲)، مدل GFDL-ESM4 به دلیل دارا بودن همه‌ی متغیرها و سناریوهای اقلیمی مورد مطالعه در این پژوهش، دقت نسبتاً مناسب‌تر ($R^2=0.7$) نسبت به مدل‌های دیگر و وضوح مکانی مناسب‌تر (۱۰۰ کیلومتر) (احمدی و محمدی مهر، ۲۰۲۴)، برای مطالعات بعدی در این پژوهش استفاده گردید.

شاخص‌های آسایش اقلیمی

انسان در مقابل عناصر اقلیمی، محیطی و فیزیولوژیکی حساس بوده و با تغییر شکل در شرایط محیط، بدن انسان دمای مناسب زیست که حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد را برای قسمت‌های داخلی تنظیم می‌کند. با منظور کردن عوامل اقلیمی مؤثر در تنظیمات حرارت بدن و حدود آسایش انسان، مدل‌ها و روابط ریاضی متعددی معرفی گردید که شاخص‌های آسایش اقلیمی نامیده می‌شوند (ژائو و همکاران، ۲۰۲۱). با استفاده از این شاخص‌ها، ابتدا دامنه تغییرات دما، رطوبت نسبی، فشار بخار، و متوسط جریان باد برای منطقه آسایش تعریف می‌گردد و سپس با استفاده از اطلاعات هواشناسی منطقه، وضعیت روز، ماه یا سال مورد نظر در آن محدوده تعریف می‌-

1. Shared Socio-economic Pathways

2. Historical

3. Earth System Grid Federation (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>)

4. Bilinear

شود.

شاخص دمای مؤثر

شاخص دمای مؤثر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (الودوئین و همکاران، ۲۰۱۳):

$$ET = T - 0.4(T - 10)(1 - RH/100) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، T دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد، RH رطوبت نسبی بر حسب درصد و ET مقدار دمای مؤثر است (مزیدی و همکاران، ۲۰۲۱). طبقه‌بندی شاخص دمای مؤثر در جدول (۱) ارائه گردید.

جدول (۱). طبقه بندی آسایش اقلیمی انسان بر حسب شاخص دمای مؤثر (ET)

ضریب حرارتی	ET
بسیار گرم	۳۰ <
شرجی	۲۷/۵ تا ۳۰
خیلی گرم	۲۵/۶ تا ۲۷/۵
گرم	۲۲/۲ تا ۲۵/۶
آسایش	۱۷/۸ تا ۲۲/۲
خنک	۱۷/۸ تا ۱۵/۵
خیلی خنک	۱/۶۷ تا ۱۵/۵
سرد	۱/۶۷ تا -۱۰
خیلی سرد	-۱۰ تا -۲۰
بسیار سرد	-۲۰ >

شاخص زیست اقلیمی بیکر^۱

این شاخص برای ارزیابی میزان آسایش گردشگران استفاده می‌شود و به دلیل استفاده از سرعت باد و دمای هوا از جامعیت مناسبی برخوردار است. انتخاب این شاخص به این دلیل است که باد و دما از بین پارامترهای منطقه‌ای مربوط به تحریکات زیست اقلیمی انسان مناسب‌تر است (رمضانی، ۲۰۱۰). رابطه بیکر در رابطه (۲) آمده است:

$$Cp = (0.26 + 0.34V^{0.632}) \times (36.5 - T) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه، V سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، T میانگین دمای روزانه بر حسب درجه سانتی‌گراد و Cp قدرت خنک‌کنندگی محیط می‌باشد. طبقه‌بندی این شاخص در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲). درجات خنک‌کنندگی محیط بر اساس شاخص بیکر

مقدار Cp	وضعیت هوا	شرایط زیست اقلیمی انسان
۰ - ۴	داغ، گرم، مرطوب و نامطلوب	فشار زیست اقلیمی
۵ - ۹	گرم، قابل تحمل	آسایش زیست اقلیمی
۱۰ - ۱۹	معتدل و مرطوب	آسایش زیست اقلیمی
۲۰ - ۲۹	خنک	تحریک متوسط
۳۰ - ۳۹	سرد	تحریک متوسط تا شدید
۴۰ - ۴۹	رو به سرد	فشار متوسط
۵۰ - ۵۹	سرما نامطلوب	فشار شدید
۶۰ - ۷۰	خیلی سرد غیر قابل تحمل	غیر قابل تحمل

^۱ . Beiker bioclimatic index

رگرسیون چندک

چندک‌ها مقادیری با فواصل مساوی هستند که از تابع توزیع تجمعی یک متغیر تصادفی انتخاب می‌شوند. برای یک متغیر تصادفی مثبت X ، چندک τ به صورت زیر تعریف می‌شود (جیا و جئونگ، ۲۰۲۰).

$$Q_T(\tau) = \inf\{t : \Pr(X \leq t) \geq \tau\}, \tau \in (0, 1)$$

روش رگرسیون چندک یک روش آماری رگرسیونی است که در ابتدا توسط کوئکر و باست (۱۹۸۷) پیشنهاد شد و یک جایگزین مناسب برای رویکرد حداقل مربعات در روش رگرسیون خطی معمولی است. تفاوت اصلی بین رگرسیون چندک و روش حداقل مربعات در این است که روش حداقل مربعات، تخمین‌های مبتنی بر مدل را برای میانگین داده‌ها اما رگرسیون چندک، تخمین‌هایی را بر روی یک چندک مشخص تولید می‌کند (استفا و همکاران، ۲۰۱۹). مدل رگرسیون چندک به شکل رابطه (۳) است (کوئکر، ۲۰۰۵؛ کوئکر و باست، ۱۹۷۸):

$$Y(\theta|x) = \beta_0(\theta) + \beta_1(\theta)x + \varepsilon \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، $\beta_0(\theta)$ عرض از مبدأ و $\beta_1(\theta)$ ضریب شیب است و هر دو بسته به مقدار θ امین چندک مورد بررسی تغییر می‌کنند. ε خطا با انتظار صفر و محدوده‌ی مقادیر θ از صفر تا یک است. رگرسیون چندک θ ام، توسط حداقل کردن رابطه (۴) انجام می‌شود:

$$\text{minimize} \left\{ \sum_{\{i|y_i < y_\theta(x_i)\}} (1 - \theta) |y_i - y_\theta(x_i)| + \sum_{\{i|y_i > y_\theta(x_i)\}} \theta |y_i - y_\theta(x_i)| \right\} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که $\{y_\theta(x_i) = \beta_0(\theta) + \beta_1(\theta)x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ است. با توجه به رابطه (۴) برای برآورد رگرسیون چندک از حداقل نمودن مجموع قدرمطلق باقیمانده‌ها استفاده می‌شود که روش حداقل قدرمطلق باقیمانده‌ها^۱ نامیده می‌شود که با توجه به آن، مقدار مطلق تفاوت بین یک مشاهده y_i از چندک θ ام متناظر $y_\theta(x_i)$ وزن $(1 - \theta)$ می‌گیرد اگر مشاهدات زیر خط چندک باشد و وزن θ می‌گیرد اگر مشاهدات بالای خط چندک باشد. برای یک مجموعه از مشاهدات $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ ، برآورد ضرایب β_θ به شکل رابطه (۵) است:

$$\hat{\beta}_\theta = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \theta_\theta (y_i - x_i^T \beta) \quad \text{رابطه (۵)}$$

که تابع $\theta_\theta(\cdot)$ به شکل رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\theta_\theta(u) = \begin{cases} u(\theta - 1) & \text{if } u < 0 \\ u\theta & \text{if } u \geq 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۶)}$$

برای اطلاع یافتن از جزئیات بیشتر در مورد روش رگرسیون چندک به کوئکر (۲۰۰۵) مراجعه گردد.

روند تغییرات مقادیر مختلف (پایین، متوسط و بالا) از پارامترهای اقلیمی میانگین دما، رطوبت نسبی و سرعت باد روزانه در دوره‌ی تاریخی (۱۹۸۷-۲۰۱۴) و نیز ۳ سناریوی خوش‌بینانه (SSP126)، حالت متوسط (SSP245) و بدبینانه (SSP585) در دوره‌ی زمانی آینده‌ی نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و آینده‌ی دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰) بررسی گردید و نتایج شامل شیب و معنی‌داری روند در جدول (۳) ارائه شده است. مقادیر مختلف میانگین دمای روزانه در دوره تاریخی به صورت معنی‌دار افزایش یافته است که شدت این شیب افزایشی برای مقادیر پایین دما (چندک ۰/۰۵) بیشتر بوده است (۰/۰۴۸ درجه سانتی‌گراد در سال). درحالی‌که براساس سناریوی خوش‌بینانه، میانگین دمای روزانه در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک دارای روند

افزایشی البته با شیب کمتر از دوره‌ی تاریخی خواهد بود اما در دوره‌ی آینده‌ی دور، روند معنی‌داری برای دما وجود نخواهد داشت؛ درحالی‌که به سمت سناریوی بدبینانه، مقادیر مختلف از دما در هر دوره با شدت بیشتری افزایش خواهد یافت و شیب تغییرات برای مقادیر پایین دمای روزانه بیشتر بوده است. پارامتر میانگین رطوبت نسبی روزانه نیز در دوره‌ی تاریخی روند کاهشی داشته که شیب روند برای مقادیر پایین رطوبت (چندک ۰/۰۵) بیشتر بوده است. با این حال، براساس سناریوی خوش‌بینانه و حالت متوسط، تغییرات معنی‌دار در رطوبت نسبی روزانه کاهش یافته و اغلب تغییرات به صورت روند افزایشی خواهد بود که برای مقادیر بالای رطوبت بیشتر است. درحالی‌که براساس سناریوی بدبینانه، یک روند کاهشی معنی‌دار برای مقادیر متوسط و بالای رطوبت (چندک‌های ۰/۵ و ۰/۹۵) در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک (با شیب -۰/۱۵ و -۰/۰۴) اما برای مقادیر پایین رطوبت (چندک ۰/۰۵) در دوره‌ی آینده‌ی دور ممکن است رخ دهد. همچنین برای متغیر باد نیز یک روند افزایشی برای مقادیر مختلف سرعت باد روزانه در دوره‌ی تاریخی مشاهده گردید که شیب تغییرات برای مقادیر متوسط بیشتر بوده است. اما براساس سناریوی خوش‌بینانه، هیچ روند معنی‌داری برای سرعت باد در هر دو دوره‌ی زمانی مشاهده نخواهد شد؛ درحالی‌که براساس سناریوی حالت متوسط (در هر دو دوره) و بدبینانه (دوره‌ی آینده‌ی نزدیک)، روند تغییرات کاهشی برای سرعت باد اما با شیب کمتر نسبت به دوره‌ی تاریخی ممکن است رخ دهد. درحالی‌که برای دوره‌ی آینده‌ی دور از سناریوی بدبینانه، یک روند افزایشی معنی‌دار برای تمامی مقادیر سرعت باد ممکن است اتفاق بیفتد؛ با این حال شیب تغییرات از دوره‌ی تاریخی کمتر خواهد بود.

جدول ۳. نتایج بررسی روند پارامترهای اقلیمی بر اساس سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در ایستگاه سینوپتیک بابلسر

متغیر	مقادیر شیب روند تحت سناریوهای مختلف					
	خوش‌بینانه		حالت متوسط		بدبینانه	
	دوره ۱ (۲۰۱۴-۱۹۸۷)	دوره ۲ (۲۰۶۱-۲۰۹۹)	دوره ۱ (۲۰۲۱-۲۰۶۰)	دوره ۲ (۲۰۶۱-۲۰۹۹)	دوره ۱ (۲۰۲۱-۲۰۶۰)	دوره ۲ (۲۰۶۱-۲۰۹۹)
میانگین دما	۰/۰۵	۰/۰۴۸	۰/۰۲۷	۰/۰۱	۰/۰۳۲	-۰/۰۰۱
	۰/۵	۰/۰۴۴	۰/۰۲۶	-۰/۰۰۱	-۰/۰۲۴	۰/۰۳۲
رطوبت نسبی	۰/۹۵	۰/۰۳۱	۰/۰۱۳	-۰/۰۰۹	-۰/۰۲۷	۰/۰۳۸
	۰/۰۵	-۰/۲۲	۰/۰۱۵	۰/۰۱۱	-۰/۰۱۴	۰/۰۰۳
سرعت باد	۰/۵	-۰/۱۸	۰/۰۶	-۰/۰۰۰۷	۰/۰۹۴	-۰/۱۵
	۰/۹۵	-۰/۱۷	۰/۰۱	-۰/۰۳۳	۰/۰۰۲	-۰/۰۴
	۰/۰۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۶	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۲
	۰/۵	۰/۰۲۸	۰/۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۴	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۳
	۰/۹۵	۰/۰۲	۰/۰۰۳	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۳	-۰/۰۳۲

مقادیر در شکل برجسته: معنی‌دار در سطح ۵ درصد

نتایج بررسی تغییرات شاخص‌های ET و Cp در طول سال در جدول (۴) نشان داده است که در دوره‌ی تاریخی، مقادیر مختلف از شاخص ET دارای روند افزایشی بوده که شدت این تغییرات برای مقادیر پایین ET (روزهای سرد) بیشتر می‌باشد (با شیب ۰/۰۴۸). براساس سناریوی خوش‌بینانه نیز مقادیر مختلف ET در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک افزایش خواهد یافت (با شیب کمتر از دوره‌ی تاریخی) درحالی‌که در دوره‌ی آینده‌ی دور هیچ تغییر معناداری مشاهده نخواهد شد. با این حال، براساس سناریوی حالت متوسط و بدبینانه، این شاخص به روند افزایشی خود ادامه خواهد داد؛ به طوری‌که براساس سناریوی بدبینانه، افزایش قابل توجهی برای مقادیر مختلف از این شاخص (با شیب ۰/۵۶ - ۰/۰۳) در دوره‌ی آینده‌ی دور ممکن است تجربه شود که بیان می‌کند روزهای گرم‌تر در این دوره به مراتب بیشتر از شرایط حال خواهد بود. نتایج برای شاخص Cp نیز نشان داده است که در دوره‌ی تاریخی، مقادیر پایین و متوسط (چندک ۰/۰۵ و ۰/۵) این شاخص به صورت معنی‌دار افزایش یافته است (با شیب ۰/۷۲ و ۰/۰۴۶) که بیانگر افزایش روزهای خنک و سرد و کاهش روزهای گرم می‌باشد. اما براساس سناریوهای مختلف مورد مطالعه، روند کاهشی برای مقادیر مختلف Cp رخ خواهد داد؛ به طوری‌که براساس سناریوی خوش‌بینانه، مقادیر متوسط و بالای Cp در آینده‌ی نزدیک به صورت معنی‌دار کاهش خواهد یافت (به ترتیب با

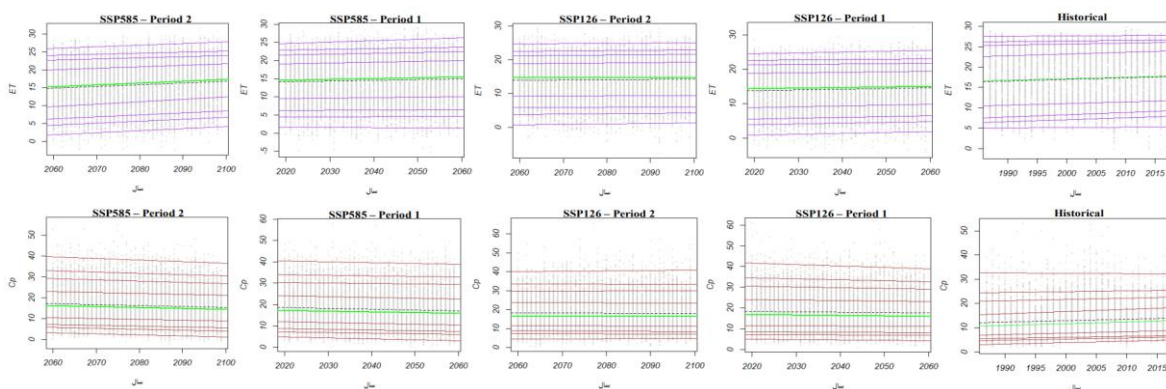
شیب -0.02 و -0.042). درحالی که در دوره‌ی آینده‌ی دور، هیچ تغییر معناداری احتمالاً رخ نخواهد داد. با این حال، براساس سناریوی حالت متوسط و بدبینانه، تغییرات روند به صورت کاهشی در هر دو دوره‌ی زمانی وجود خواهد داشت و به سمت سناریوی بدبینانه و دوره‌ی آینده‌ی دور، این روند منفی تشدید می‌شود (تا شیب -0.062). این امر بیانگر گرایش به افزایش تعداد روزهای با شرایط گرم و گرم‌تر در طول سال می‌باشد.

جدول (۴). نتایج بررسی روند شاخص‌های آسایش اقلیمی بر اساس سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در ایستگاه سینوپتیک بابلسر

متغیر	چندک	مقادیر شیب روند تحت سناریوهای مختلف						
		تاریخی	خوش‌بینانه	حالت متوسط	بدبینانه	دوره ۱	دوره ۲	
		(۱۹۸۷-۲۰۱۴)	دوره ۱ (۲۰۶-۲۰۲۱)	دوره ۲ (۲۰۹۹-۲۰۶۱)	دوره ۱ (۲۰۶-۲۰۲۱)	دوره ۲ (۲۰۹۹-۲۰۶۱)	دوره ۱ (۲۰۶-۲۰۲۱)	دوره ۲ (۲۰۹۹-۲۰۶۱)
			۰/۰۲۳	۰/۰۱	۰/۰۰۸	۰/۰۲۳	۰/۰۰۲	۰/۰۵۶
ET	۰/۵	۰/۰۳۴	۰/۰۱۸	۰/۰۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۵۱
		۰/۰۱۷	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸	۰/۰۳
	۰/۵	۰/۰۴۶	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۳۸	۰/۰۲۱	۰/۰۲۸	۰/۰۴۳
Cp	۰/۵	۰/۰۷۲	۰/۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۲۳	۰/۰۲	۰/۰۳۱	۰/۰۴۴
	۰/۹۵	۰/۰۳۶	۰/۰۴۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۵۴	۰/۰۲۶	۰/۰۶۲

مقادیر در شکل برجسته: معنی‌دار در سطح ۵ درصد

بررسی خطوط شیب روند رگرسیون میانگین و رگرسیون چندک برای چندک‌های مختلف از شاخص‌های آسایش اقلیمی ET و Cp در دوره‌ی تاریخی و نیز سناریوهای مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده است که خط شیب روند میانگین (خط تیره مشکی) متفاوت با خط شیب روند میانه و نیز چندک‌های مختلف بوده لذا تنها اکتفا به بررسی میانگین داده‌ها برای مطالعه‌ی تغییرات در یک سری داده کافی نمی‌باشد. همچنین شدت خطوط شیب روند به سمت سناریوی بدبینانه بیشتر از دوره‌ی تاریخی و سناریوهای دیگر می‌باشد که چندان دور از انتظار نیست و با فرض شرایط بدبینانه، انتظار می‌رود شدت روندها افزایش یافته و به سمت شرایط گرم‌تر پیش برود. همان‌طور که در بالا نیز بیان گردید تغییرات هر دو شاخص مورد مطالعه حتی براساس سناریوی خوش‌بینانه نیز در آینده‌ی نزدیک وجود خواهد داشت اما در دوره‌ی آینده‌ی دور بدون تغییر خواهد بود.



شکل (۲). خطوط شیب روند در چندک‌های مختلف برای سناریوهای مختلف در دوره‌ی تاریخی، آینده‌ی نزدیک و آینده‌ی دور (از پایین به بالا شامل چندک‌های 0.01 ، 0.05 ، 0.1 ، 0.25 ، 0.5 ، 0.75 ، 0.9 ، 0.95 ، 0.99 و 1.0)

منبع: نگارندگان، (۱۴۰۵)

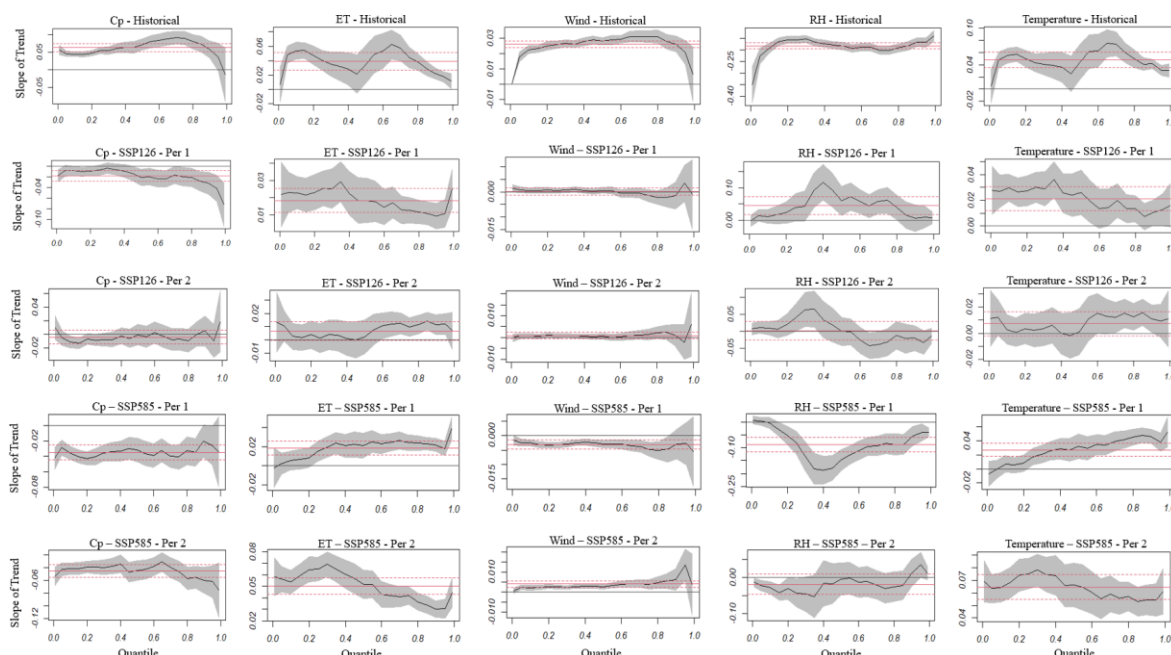
به منظور بررسی تغییرات در مقادیر مختلف از سری زمانی داده‌های اقلیمی و نیز شاخص‌های آسایش مورد مطالعه برای دوره‌ی تاریخی (۱۹۸۷-۲۰۱۴) و نیز سناریوهای خوش‌بینانه (SSP126) و بدبینانه (SSP585) در دوره‌ی آینده، روند تغییرات در چندک‌های مختلف از سری زمانی روزانه (0.01 تا 0.99 با گام 0.01) از متغیرهای اقلیمی سرعت باد، رطوبت نسبی، دما و دو شاخص ET و Cp با استفاده از رگرسیون چندک انجام شد که در شکل (۳) ارائه گردید. بررسی مقادیر شیب روند دما

نشان داده است که در تمامی دوره‌های مورد مطالعه (تاریخی، آینده‌ی نزدیک و آینده‌ی دور) مقدار دما افزایش یافته است؛ با این حال براساس شرایط خوش‌بینانه، مقادیر پایین دما (چندک‌های $>0/5$) دارای شیب بالاتری نسبت به مقادیر بالاتر (چندک‌های $<0/5$) در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک خواهد بود. در حالی که در دوره‌ی آینده‌ی دور، اندازه‌ی شیب روند افزایشی نسبت به قبل کاهش خواهد یافت. با این حال براساس شرایط بدبینانه، مقادیر بالای دما در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک با شدت بسیار بیشتری (شیب $0/04$ درجه‌ سانتی‌گراد در سال) نسبت به مقادیر پایین (شیب حدود $0/01$) افزایش خواهد یافت. در حالی که در دوره‌ی آینده‌ی دور، روند افزایشی در مقادیر بالای دما با همان شیب $0/04$ درجه‌ سانتی‌گراد در سال ادامه خواهد داشت اما شدت شیب در مقادیر پایین دما افزایش خواهد یافت (شیب $0/08$ سانتی‌گراد در سال). متغیر رطوبت نسبی در دوره‌ی تاریخی در تمامی چندک‌های مورد مطالعه دارای شیب کاهشی بوده به طوری که اندازه‌ی شیب روند برای مقادیر پایین رطوبت نسبی بیشتر می‌باشد. با این حال براساس سناریوی خوش‌بینانه، تمام مقادیر رطوبت نسبی در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک احتمالاً افزایش خواهد یافت در حالی که در دوره‌ی آینده‌ی دور، مقادیر پایین این متغیر (چندک‌های $<0/5$) افزایش اما مقادیر بالای آن (چندک‌های $<0/5$) کاهش خواهد یافت؛ به طوری که شیب تغییرات نسبت به دوره‌ی آینده‌ی نزدیک کمتر خواهد بود. با این حال براساس سناریوی بدبینانه، روند کاهشی در اغلب چندک‌ها در هر دو دوره‌ی آینده رخ خواهد داد به طوری که شدت شیب منفی برای مقادیر (چندک‌های) میانی رطوبت نسبی در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک بیشتر خواهد بود. متغیر سرعت باد نیز در دوره‌ی تاریخی در تمامی چندک‌ها دارای شیب افزایشی بوده است اما براساس سناریوی خوش‌بینانه، مقادیر پایین سرعت باد (چندک‌های $<0/6$) در هر دو دوره، تغییرات اندکی خواهد داشت. همچنین تغییرات مقادیر بالای سرعت باد (چندک‌های $<0/6$) براساس سناریوی بدبینانه در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک کاهشی اما در دوره‌ی آینده‌ی دور افزایشی خواهد بود.

روند تغییرات در شاخص ET برای دوره‌ی تاریخی و نیز براساس هر دو سناریو افزایشی خواهد بود؛ براساس سناریوی خوش‌بینانه، اندازه‌ی شیب روند افزایشی در مقادیر پایین (چندک‌های $<0/4$) و بالای این متغیر (چندک‌های $<0/95$) در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک بیشتر خواهد بود؛ در حالی که در دوره‌ی آینده‌ی دور، اندازه‌ی شیب‌های افزایشی نسبتاً کاهش خواهد یافت. با این حال براساس شرایط بدبینانه، اندازه‌ی شیب‌های افزایشی این شاخص به سمت مقادیر بالا افزایش خواهد یافت (شیب $0/3$) که بیانگر افزایش بیشتر در مقادیر بالای این شاخص در این دوره می‌باشد. در حالی که در دوره‌ی آینده‌ی دور، مقادیر بالای این شاخص با همان شیب ($0/3$) افزایش خواهد یافت اما شدت شیب‌های افزایشی برای مقادیر پایین این شاخص (چندک‌های $>0/5$) به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت (با شیب $0/07$) که با توجه به طبقه‌بندی این شاخص می‌توان بیان کرد که علاوه بر افزایش روزهای گرم و بسیار گرم در این دوره، احتمالاً تعداد روزهای سرد و خنک‌تر در طول سال کاهش خواهد یافت. همچنین نتایج بر اساس شاخص Cp نیز نشان داده است که در دوره‌ی تاریخی، تمام مقادیر این شاخص افزایش یافته است که اندازه‌ی شیب افزایشی در چندک‌های $0/8-0/6$ بیشتر بوده است. براساس شرایط خوش‌بینانه، تمام مقادیر این شاخص در دوره‌ی آینده‌ی نزدیک کاهش خواهد یافت (تمایل به گرم‌تر شدن) که اندازه‌ی شیب تغییرات برای مقادیر بالای Cp بیشتر خواهد بود. با این حال، در دوره‌ی آینده‌ی دور، از شدت این تغییرات کاسته خواهد شد و یک شیب یکنواخت برای مقادیر مختلف از این شاخص مشاهده می‌شود. در حالی که براساس شرایط بدبینانه، مقادیر مختلف از این شاخص در هر دو دوره‌ی آینده دارای شیب منفی و کاهشی خواهد بود؛ به طوری که شدت این شیب‌های کاهشی در دوره‌ی آینده‌ی دور و برای مقادیر بالای شاخص Cp بیشتر می‌باشد. به طور کلی، کاهش مقدار Cp بیانگر تمایل روزها به سمت گرم‌تر شدن و کاهش شدید در مقادیر بالای Cp بیانگر کاهش روزهای با شرایط خنک و سرد و تمایل به گرم‌تر شدن می‌باشد.

با بررسی الگوی رفتاری تغییرات در متغیرهای اقلیمی و شاخص‌های آسایش مورد مطالعه می‌توان بیان کرد که الگوی تغییرات شاخص ET براساس تغییرات دما می‌باشد و براساس کاهش یا افزایش مقادیر مختلف دما، این شاخص نیز تغییر می‌کند. اما تغییرات شاخص Cp با متغیر دما رابطه‌ی معکوس در حالی که با متغیر سرعت باد رابطه‌ی مستقیم دارد. در

مواردی که سرعت باد بدون تغییر می‌باشد، الگوی تغییرات Cp براساس تغییرات دما بوده اما در شرایطی که سرعت باد نیز تغییر نموده است، تغییرات Cp براساس تغییرات در هر دو متغیر دما و سرعت باد می‌باشد.



شکل (۳). مقادیر شیب روند در چندک‌های مختلف (۰/۰۱ تا ۰/۹۹ با گام ۰/۰۱) برای پارامترهای اقلیمی و شاخص‌های آسایش اقلیمی

(خط مشکی: مقدار شیب روند در چندک‌های مختلف، محدوده‌ی خاکستری: حدود اعتماد ۹۰ درصد شیب روند، خط قرمز: مقدار شیب رگرسیون میانگین و خط تیره قرمز: حدود اعتماد ۹۰ درصد شیب روند میانگین)

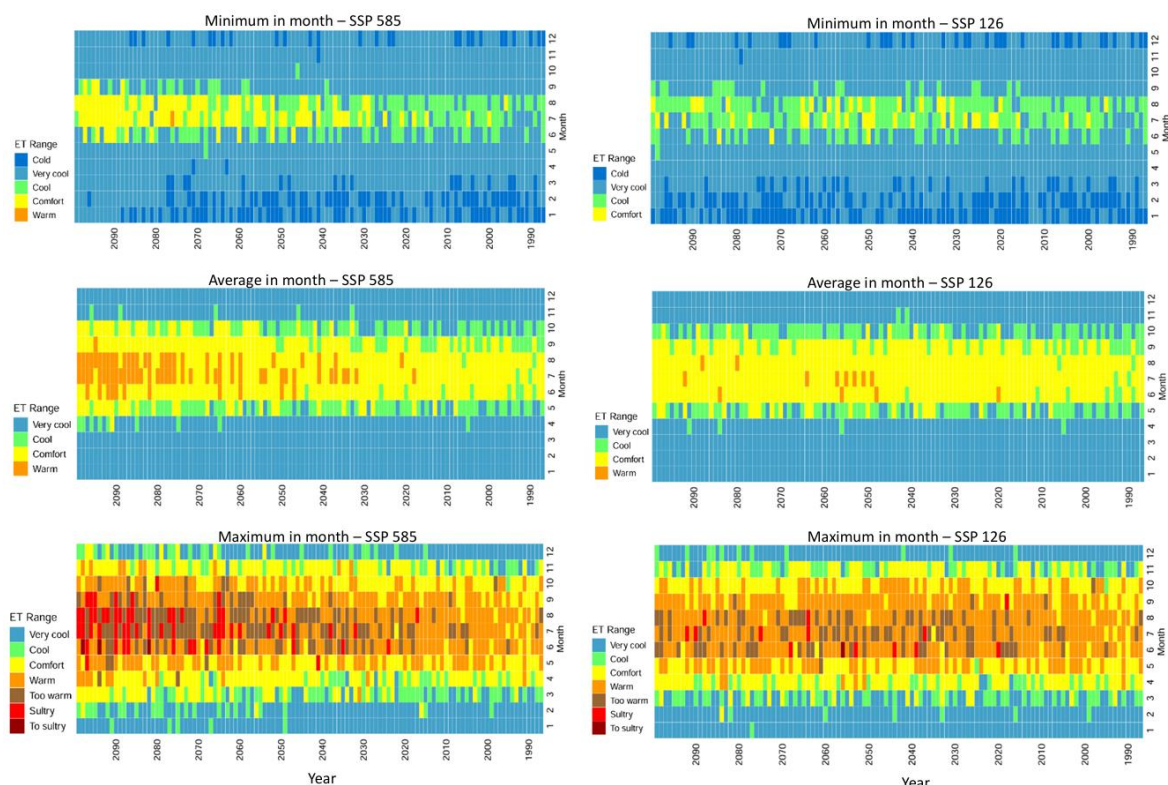
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۵)

تغییرات آسایش اقلیمی در ماه‌های مختلف مبتنی بر تغییر اقلیم

به منظور بررسی آسایش اقلیمی در ماه‌های مختلف از سال، داده‌های کمترین، میانگین و بیشترین مقدار از شاخص‌های آسایش اقلیمی ET و Cp در هر ماه براساس سناریوهای مختلف تا پایان سال ۲۱۰۰ محاسبه و نمودار حرارتی مربوط به هر شاخص برای ماه‌ها و سال‌های مختلف در شکل‌های (۴) و (۵) ترسیم گردید.

بررسی تغییرات در کمترین مقدار شاخص ET روزانه در هر ماه در شکل (۴) نشان داده است که براساس سناریوی خوش‌بینانه، ماه‌های ۶، ۷ و ۸ در اغلب سال‌های مورد مطالعه تا پایان قرن در طبقه آسایش و خنک قرار می‌گیرند در حالی که کمترین مقدار ET در ماه‌های ۱۲، ۱، ۲ و نیز عمدتاً در طبقه شرایط سرد قرار دارد. اما در ماه‌های دیگر (۴، ۵، ۹، ۱۰ و ۱۱) کمترین مقدار ET عمدتاً در طبقه خیلی خنک قرار می‌گیرد. با این حال، با فرض شرایط بدبینانه، نتایج نشان می‌دهد که از سال ۲۰۳۰ تا پایان قرن حاضر، کمترین مقدار ET روزانه در ماه از طبقه خنک به طبقه آسایش و از طبقه سرد به خیلی خنک تغییر می‌کند و گرایش روزها به سمت گرم‌تر شدن افزایش می‌یابد. این تمایل به افزایش شرایط گرم و کاهش شرایط سرد در میانگین ماهانه ET روزانه در ماه نیز مشاهده می‌شود. به طوری که مقدار میانگین ماهانه ET براساس سناریوی خوش‌بینانه در ماه‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ اغلب در طبقه آسایش، در ماه‌های ۵ و ۱۰ در طبقه خنک اما در ماه‌های دیگر در طبقه خیلی خنک قرار می‌گیرد در حالی که بر اساس شرایط بدبینانه، از سال ۲۰۲۰ به سمت پایان قرن حاضر (۲۱۰۰)، تعداد ماه‌های با مقدار میانگین ماهانه ET در طبقه گرم به مراتب بیشتر شده و از ماه‌های در طبقه خنک به طبقه آسایش انتقال می‌یابد. همچنین میانگین ماهانه ET براساس این سناریو در ماه‌های ۵، ۶، ۷، ... و ۱۰ در طبقه گرم و آسایش اما در ماه‌های دیگر در طبقه خنک قرار می‌گیرد و حتی در ماه‌های سرد سال نیز میانگین ET در طبقه سرد یا حتی خیلی خنک قرار نمی‌گیرد. همچنین بررسی بیشترین مقدار روزانه این شاخص در هر ماه نیز نشان می‌دهد که براساس سناریوی خوش‌بینانه، بیشترین مقدار ET

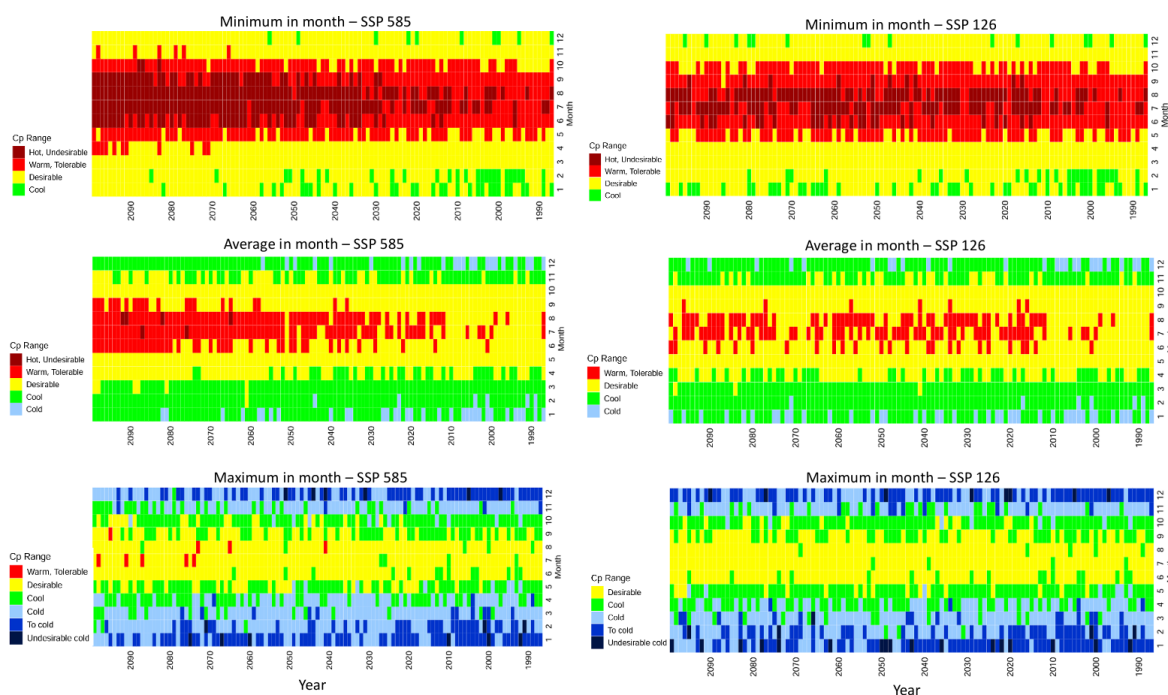
روزانه در اغلب ماه‌ها در طبقه‌های گرم، خیلی گرم، شرجی و خیلی شرجی قرار می‌گیرد که بیشترین رخداد مربوط به طبقه گرم می‌باشد که عمدتاً در ماه‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ مشاهده می‌گردد و شرایط خنک و خیلی خنک عمدتاً در ماه‌های ۱، ۲ و ۱۲ مشاهده می‌شود. با این حال براساس سناریوی بدبینانه، بیشترین مقدار ET روزانه در ماه در اغلب ماه‌های سال در طبقه‌های گرم تا بسیار شرجی قرار می‌گیرد که از سال ۲۰۲۰ به سمت سال‌های انتهایی، شدت طبقه‌های مرتبط با گرما افزایش می‌یابد؛ به طوری که در دهه‌های پایانی، اغلب ماه‌های ۶ و ۷ در طبقه شرجی و بسیار شرجی قرار می‌گیرد و نیز در تمامی ماه‌های سرد، شرایط آسایش از طبقه خیلی خنک به طبقه خنک و آسایش تقلیل می‌یابد.



شکل (۴). نتایج بررسی شرایط آسایش براساس شاخص ET برای کمترین، میانگین و بیشترین مقدار در هر ماه برای دو سناریوی SSP126 (شکل بالا) و SSP585 (شکل پایین) در دوره‌ی زمانی ۲۰۰۹-۲۰۰۰
 (۱: ژانویه، ۲: فوریه، ۳: مارس، ۴: آوریل، ۵: مه، ۶: ژوئن، ۷: ژوئیه، ۸: جولای، ۹: اوت، ۱۰: اکتبر، ۱۱: نوامبر، ۱۲: دسامبر)
 منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۵)

نتایج براساس شاخص Cp در شکل (۵) نسبت به شاخص ET با تفاوت همراه است؛ به طوری که کمترین مقدار Cp روزانه در ماه براساس هر دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه در ماه‌های ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ قرار می‌گیرد که در طبقه‌های گرم و غیر قابل تحمل و گرم می‌باشد. اما در ماه‌های دیگر، اغلب شرایط آسایش حاکم است. با این حال در تعدادی از ماه‌های سرد (۱، ۲ و ۱۲)، کمترین مقدار Cp در طبقه خنک قرار می‌گیرد؛ به طوری که براساس شرایط بدبینانه، احتمال وقوع طبقه‌های گرم و غیر قابل تحمل عمدتاً در ماه‌های گرم سال (۶، ۷، ۸ و ۹) افزایش اما احتمال وقوع طبقه‌های خنک کاهش خواهد یافت. با این حال، بررسی میانگین ماهانه شاخص Cp براساس هر دو سناریو نشان داده است که ماه‌های ۶، ۷ و ۸ عمدتاً در طبقه گرم، ماه‌های ۴، ۵، ۹ و ۱۰ عمدتاً در طبقه آسایش، ماه‌های ۲، ۳، ۱۱ و ۱۲ عمدتاً در طبقه خنک و سرد قرار می‌گیرند. بر اساس سناریوی بدبینانه و به سمت دوره‌ی آینده‌ی دور تا سال ۲۱۰۰، فراوانی ماه‌های با میانگین ماهانه شاخص Cp متناسب با طبقه‌های گرم و داغ و غیر قابل تحمل به مراتب افزایش خواهد یافت. با این حال، کمترین میزان این شاخص در هر ماه عمدتاً در طبقه‌های آسایش تا خیلی سرد قرار می‌گیرد به طوری که کمترین مقدار این شاخص در ماه‌های ۶، ۷، ۸ و گاه ۹ برای هر دو سناریوی اقلیمی عمدتاً در طبقه آسایش، ماه‌های ۵، ۹ و ۱۰ در طبقه خنک و ماه‌های سرد سال (۱، ۲، ۳ و ۱۲)

عمدتاً در طبقه سرد و خیلی سرد قرار می‌گیرند. با این تفاوت که به سمت دوره‌ی آینده‌ی دور، فراوانی طبقه‌های سرد کاهش یافته و تمایل به گرم شدن یا شرایط آسایش خواهند داشت.



شکل (۵). نتایج بررسی شرایط آسایش براساس شاخص Cp برای کمترین، میانگین و بیشترین مقدار در هر ماه برای دو سناریوی

SSP126 (شکل بالا) و SSP585 (شکل پایین) در دوره‌ی زمانی ۲۰۰۰-۲۰۹۹

(۱: ژانویه، ۲: فوریه، ۳: مارس، ۴: آوریل، ۵: مه، ۶: ژوئن، ۷: ژوئیه، ۸: جولای، ۹: اوت، ۱۰: اکتبر، ۱۱: نوامبر، ۱۲: دسامبر)

منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۵)

با بررسی نتایج می‌توان اظهار داشت براساس سناریوهای اقلیمی آینده، دما افزایش و رطوبت نسبی کاهش خواهد یافت و تنها یک شرایط عدم تغییر افزایشی دما و افزایش رطوبت براساس سناریوی خوش‌بینانه در دهه‌های پایانی قرن حاضر محتمل است. همچنین شاخص ET در دوره‌ی تاریخی افزایش یافته که برای مقادیر پایین این شاخص بیشتر بود؛ این امر بیانگر این است که روزهای سرد با شدت بیشتری به سمت گرم شدن رفته است. در شرایط خوش‌بینانه نیز در دوره‌ی آینده نزدیک، شرایط افزایش روزهای گرم با شدت کمتری نسبت به دوره‌ی تاریخی حاکم است. اما در دوره‌ی آینده دور اگرچه هیچ روند کاهشی مشاهده نگردید، می‌توان شاهد عدم تغییر در مقدار این شاخص بود. براساس دو سناریوی حالت متوسط و بدبینانه، افزایش روزهای گرم ادامه خواهد داشت و به سمت دوره‌ی آینده دور تشدید خواهد شد. به طوری که تمامی مقادیر شاخص ET افزایش خواهد یافت. هر چه مقدار ET بیشتر شود با توجه به طبقه‌بندی این شاخص، بیانگر افزایش روزهای گرم و گرم‌تر خواهد بود. براساس شاخص آسایش اقلیمی Cp نیز، در دوره‌ی تاریخی تمایل روزها به سمت خنک‌تر شدن است اما براساس سناریوهای مختلف، تمایل روزها به سمت گرم‌تر شدن بیشتر خواهد شد و در سناریوی بدبینانه تشدید می‌شود. بیشترین تنش‌های گرمایی در ماه‌های گرم سال (جون، ژوئیه و جولای) رخ خواهد داد که به سمت دوره‌ی آینده‌ی دور تشدید می‌شود؛ تنش‌های گرمایی در فصول گرم سال، افراد بسیاری را در معرض خطر گرم‌زدگی و سایر عوارض ناشی از گرما قرار می‌دهند (میر و همکاران، ۱۴۰۳؛ باتی و شت، ۲۰۲۶). با این حال، تنش‌های سرمایی عموماً در ماه‌های سرد سال شامل ژانویه، فوریه و دسامبر می‌باشد که به سمت دوره‌ی آینده‌ی دور و سناریوی بدبینانه، گرایش به گرم‌تر شدن خواهند داشت (هو و همکاران، ۲۰۲۶). با توجه به اینکه با فرض شرایط بدبینانه، افزایش قابل ملاحظه دما و تغییر در متغیرهای اقلیمی دیگر با گرایش به سمت شرایط نامساعد همراه خواهد بود، بنابراین اگر شرایط به صورت شکل حاضر ادامه یابد یا در جهت تولید بیشتر CO₂ و گازهای گلخانه‌ای حرکت کند، ممکن است در آینده نزدیک شاهد افزایش هر چه بیشتر در تعداد روزهای با عدم آسایش اقلیمی باشیم.

مطالعات مختلفی نتایج منطبق با مطالعه حاضر داشته است؛ اسدی و کرمی (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای گزارش کردند که حداقل و حداکثر رطوبت فصلی در بیشتر ایستگاه‌های ایران کاهش یافته است و بیشترین کاهش رطوبت در فصل تابستان مشاهده شد. نتایج مطالعه‌ی ناظم‌السادات و همکاران (۲۰۲۲) در منطقه خاورمیانه نشان داد که دمای هوا افزایش اما باد غربی و رطوبت نسبی کاهش یافته است و پیشرفت‌های اخیر در گردش‌های شمالی بر روی دریای خزر اثرات منفی گرم شدن و خشکی را در برخی مناطق ایران به همراه داشته است. بهزادی و همکاران (۲۰۲۴) در پیش‌بینی تغییرات دما و بارش آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم و بر اساس مدل GFDL-ESM4 در ایران نتیجه گرفتند که میانگین بارندگی سالانه در آینده‌ی نزدیک (تا ۲۰۵۰) کاهش اما در آینده‌ی دور (تا ۲۱۰۰) افزایش (تا ۱۱۵ میلی‌متر) خواهد یافت. همچنین کمینه و بیشینه دما تا ۲۱۰۰ به ترتیب ۴/۸ و ۴/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و با افزایش شدت خشکسالی در منطقه، مدیریت آب با چالش‌هایی مواجه خواهد شد. روند افزایشی نمایه‌های دمایی گرم و کاهش نمایه‌های سرد احتمالاً مرتبط با محرک‌های اصلی انسان‌شناختی مانند رشد جمعیت، صنعتی شدن، تغییر کاربری اراضی، جنگل‌زدایی و در نهایت افزایش گازهای گلخانه‌ای است و در واقع پاسخی به این محرک‌ها است. همچنین در مطالعه تحلیل آسایش اقلیمی، محمدی و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی تنش حرارتی و روند آن در بخش‌های مختلف از ایران در دوره‌ی زمانی ۲۰۱۰-۱۹۶۱ نتیجه گرفتند که اکثر ایستگاه‌های شمالی به خصوص ایستگاه‌های نزدیک به سواحل دریای خزر، در شرایط تنش سرما، روند مثبتی را نشان داده‌اند و به طور کلی، شرایط زیست‌اقلیمی شدید در هر دو عرض شمالی و جنوبی افزایش یافته است. در تحقیقی دیگر، ایزنکارلار^۱ (۲۰۲۴) با استفاده از شاخص ناراحتی (DI) و سرعت باد و اندازه‌گیری دمای مؤثر (ETv)، آسایش حرارتی مکانی در آنتالیا (یک منطقه گردشگری و کشاورزی) را بر اساس سناریوهای SSP245 و SSP585 مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج نشان داد که تا سال ۲۱۰۰، ۴۵ درصد از مناطق خنک و ۵۶ درصد از مناطق گرم کوچک خواهد شد و ۲۵ درصد از منطقه از سطح آسایش دور شده و به منطقه گرم تبدیل می‌شود.

تغییرات غالب در مقادیر حدی دما، سرعت باد و رطوبت نسبی برای افزایش آسایش اقلیمی و مدیریت ریسک آب و هوا خصوصاً در مناطق توریست‌پذیر و با پتانسیل گردشگری بالا از اهمیت بسیاری برخوردار است. همچنین آگاهی از شدت، فراوانی و زمان وقوع رخدادهای حدی می‌تواند در حل مسائل گریبان‌گیر زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی منطقی در جهت کنترل و کاهش این رخدادهای مؤثر واقع شود. در نهایت می‌توان اذعان داشت، شهر ساحلی بابلسر در آینده با تغییرات قابل توجهی در نمایه‌های حدی دما و رطوبت نسبی روبرو خواهد شد که می‌تواند تأثیرات منفی بر منابع آب، کشاورزی، جنگل‌داری و سلامت عمومی داشته باشد. لذا لازم است که به منظور کاهش گسترش پیامدهای احتمالی تغییر اقلیم، کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری در برابر این تغییرات، برنامه‌ریزی‌های مناسب در راستای کاهش خسارت‌های محتمل صورت گیرد. با افزایش شرایط گرما، روزهایی با خطرات بالقوه خطرناک مرتبط با گرما پدیدار می‌شوند که تقریباً همه‌ی انسان‌ها به دلیل استرس گرمایی احساس ناراحتی می‌کنند. بنابراین به نظر می‌رسد که اکثر جمعیت ساکن در امتداد سواحل استان مازندران، احتمالاً در برابر برخی مشکلات سلامتی آسیب‌پذیرتر هستند که می‌تواند از طریق کاهش بهره‌وری کارگران و افزایش روزهای با درجه خنک‌کنندگی، پیامدهایی بر توسعه اجتماعی-اقتصادی منطقه داشته باشد. به طور کلی، این خطرات مرتبط با گرما زمانی که افزایش دما با نرخ بالاتری همراه است، گسترده‌تر و مکررتر می‌شوند (فوستو-انجیوئو و همکاران، ۲۰۲۲؛ گاگون و همکاران، ۲۰۲۶). با توجه به احتمال رخداد این شرایط، بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی و اثرات آن‌ها بر روی سلامتی انسان و نیز فعالیت‌های انسانی، مدیریت منابع آب و امنیت غذایی به جهت سیاست‌گذاری‌های آینده ضرورت دارد و جوامع انسانی می‌بایست به ناچار خود را بر اساس این شرایط تنظیم و سازگار نمایند.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی مطالعه حاضر، تمرکز روش شاخص‌های مختلف تنش گرمایی و آسایش اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک بابلسر به منظور بررسی وضعیت اقلیمی منطقه و ارزیابی الگوی تغییرات شاخص‌های مذکور در چشم‌انداز آینده بود. بدین منظور، ابتدا

¹ . Isinkralar

تغییرات متغیرهای دما، رطوبت نسبی و سرعت باد به عنوان پارامترهای مورد استفاده در محاسبه‌ی شاخص‌های آسایش اقلیمی شامل شاخص دمای مؤثر و شاخص زیست‌اقلیمی بیکر براساس مدل اقلیمی GFDL-ESM4 و تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 در دوره‌ی تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۷) و افق‌های آینده شامل آینده‌ی نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱) و آینده‌ی دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱) مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن، شاخص‌های مورد نظر در منطقه محاسبه و در نهایت به منظور بررسی تغییرات در مقادیر مختلف از شاخص‌های آسایش اقلیمی در طول سال و اثر مقادیر مختلف از متغیرهای اقلیمی بر روی تغییرات این شاخص‌ها از روش رگرسیون چندک استفاده گردید. مهم‌ترین نتایج به شرح زیر می‌باشد:

❖ بررسی نتایج نشان می‌دهد که بر اساس سناریوهای اقلیمی آینده، دما افزایش و رطوبت نسبی کاهش خواهد یافت، به جز سناریوی خوش‌بینانه که کاهش روند افزایشی دما و افزایش رطوبت را در دهه‌های پایانی قرن محتمل می‌داند که با یافته‌های بهزادی و همکاران (۲۰۲۴) و نظری و همکاران (۱۴۰۵) منطبق است. شاخص ET در دوره تاریخی افزایش داشته و بیانگر گرم‌تر شدن روزهای سرد است؛ در آینده نزدیک، افزایش روزهای گرم در سناریوی خوش‌بینانه با شدت کمتر ادامه دارد، اما در سناریوهای متوسط و بدبینانه روند افزایش روزهای گرم تشدید می‌شود.

❖ بررسی شاخص‌های آسایش اقلیمی نشان داده است که روزها در دوره تاریخی به سمت خنک‌تر شدن گرایش داشتند، اما این روند در سناریوهای آینده معکوس شده و تنش‌های سرمایی در ماه‌های سرد سال گرایش به گرمایش خواهند داشت در حالی که تنش‌های گرمایی به ویژه در ماه‌های گرم سال بیشتر خواهند شد (محمدی و همکاران، ۲۰۲۱). این وضعیت احتمال افزایش روزهای نامناسب از نظر آسایش اقلیمی را افزایش می‌دهد که می‌تواند پیامدهای منفی بر سلامت، کشاورزی و منابع آبی منطقه بابلسر داشته باشد و در ماه‌های گرم سال، مردم را در معرض خطرات گرم‌زدگی قرار دهد (ایزینکالار، ۲۰۲۴).

❖ دما مؤثرترین متغیر بر روی تغییرات آسایش اقلیمی می‌باشد؛ روند افزایشی قابل ملاحظه دما خصوصاً مقادیر بالای دما در شهرستان بابلسر همراه با تراکم جمعیت، افزایش توسعه‌ی شهری، افزایش ساخت و ساز و استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی موجب افزایش مصرف انرژی (سیستم‌های سرمایشی)، افزایش جزیره گرمایی و کاهش کیفیت هوا خواهد شد که به طور مستقیم و غیر مستقیم بر سلامتی انسان و بهره‌وری اقتصادی تأثیر منفی خواهد گذاشت. بنابراین به منظور افزایش سازگاری و تاب‌آوری شهروندان در برابر این چالش‌ها، لازم است برنامه‌ریزی و مدیریت شهری با رویکردی جامع و با نگرش آینده انجام شود.

❖ از جمله اقدامات ضروری در راستای کاهش جزایر حرارتی در اثر افزایش دما می‌توان به توسعه‌ی فضای سبز شهری، استفاده از مصالح ساختمانی با بازتابندگی بالا، بهبود سامانه‌های حمل و نقل عمومی و توسعه‌ی سامانه‌های هشدار زودهنگام به‌ویژه در ماه‌های گرم سال و بهبود سامانه‌های تهویه‌ی طبیعی اشاره نمود.

❖ نوآوری این پژوهش نسبت به مطالعات انجام شده هم‌زمان از شاخص دمای مؤثر و شاخص زیست‌اقلیمی بیکر و بررسی وضعیت آسایش و تنش گرمایی بابلسر در دوره تاریخی و افق‌های آینده می‌باشد. همچنین، استفاده از رگرسیون چندک برای تحلیل اثر متغیرهای اقلیمی بر شاخص‌ها نیز موجب افزایش عمق تحلیلی مطالعه شده و آن را از توصیف ساده اقلیم به تحلیل کاربردی و آینده‌نگر تبدیل کرده است.

❖ از جمله مطالعات آینده در این زمینه می‌توان به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی گروه‌های آسیب‌پذیر مانند کودکان و بیماران زمینه‌ای در ماه‌های با تنش گرمایی بالاتر و راهکارهای عملیاتی در جهت کاهش مصرف انرژی از طریق تجهیز ساختمان‌ها با هدف کاهش هدر رفت انرژی اشاره نمود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

صدیقه لطفی: جمع‌آوری داده‌ها، طراحی پژوهش، تهیه پیش‌نویس مقاله، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج
صدیقه برارخانپور احمدی: جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تهیه پیش‌نویس مقاله، انجام محاسبات

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

منابع

- ۱) اسکندری دامنه، حامد؛ زهتابیان، غلامرضا؛ خسروی، حسن؛ آذرینوند، حسین و براتی، علی اکبر (۱۳۹۹). شبیه‌سازی و پیش‌بینی مؤلفه‌های اقلیمی دما و بارش در مناطق خشک (مطالعه موردی: دشت میناب). *جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)*، ۱۸(۶۶)، ۱۱۰-۱۲۸.
- ۲) امیری، فاطمه؛ لشگری، حسن؛ قربانپان، جبرائیل و مرشدی، جعفر (۱۳۹۹). تأثیر تغییر اقلیم بر تقویم زراعی گندم دیم (رقم چمران) مطالعه موردی دزفول. *جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)*، ۱۸(۶۵)، ۱۸-۶.
- ۳) ترکی، فرشاد؛ مجتبی زاده خانقاهی، حسین و رضایی، حسین (۱۴۰۲). شناسایی حد‌آستانه دمایی و جزایر حرارتی شهر کرمان با تاکید بر تحولات سیمای سرزمین، *جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)*، ۲۱(۷۹)، ۱۷۵-۱۸۷.
- ۴) حاجی فتحعلی، مهسا؛ فیضی، محسن و دهقان، عاطفه (۱۴۰۰). رابطه گرمای هوا، میانگین گرمای تابشی و آلبدو در کاهش جزایر حرارتی در شهرها، *جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)*، ۱۹(۷۱)، ۱۷۳-۱۹۱.
- ۵) حجازی زاده، زهرا و کربلایی، علیرضا (۱۴۰۱). آسایش حرارتی در ایران، *جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)*، ۱۳(۴۶)، ۲۱-۳۹.
- ۶) حجازی زاده، زهرا؛ کربلایی دربی، علیرضا و کاظمی آذر، مهسا (۱۴۰۳). واکاوی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی در استان آذربایجان شرقی، *جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)*، ۲۲(۸۳)، ۱-۲۰.
- ۷) خزاعی فیض آباد، الناز؛ بودینه، محمدرضا و حمیدیان پور، محسن (۱۳۹۸). بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه کارواندر، *جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)*، ۱۷(۶۳)، ۱۶۱-۱۷۸.
- ۸) میر، فاطمه؛ خسروی، محمود و شجاع، فائزه (۱۴۰۳). ارزیابی شاخص‌های بهینه آسایش اقلیمی و آینده‌نگری تنش‌های گرمایی در شهر زاهدان؛ (راهبردی جهت سازگاری با تغییر اقلیم)، *جغرافیا و آمایش شهری منطقه‌ای*، ۱۵(۵۴)، ۱-۳۲.
- ۹) نظری، مریم؛ مساعدی، ابوالفضل و قبائی سوق، محمد (۱۴۰۵). آشکارسازی تغییرات اقلیمی طی نیم‌قرن گذشته در محدوده تعدادی از ایستگاه‌های سینوپتیک کشور، نیوار، ۵۰(۱۳۳-۱۳۲)، ۱۷۵-۱۵۳.
- 10) Amin, A. & Mourshed, M. (2024). Weather and climate data for energy applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114247. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114247>
- 11) Amiri, F., Lashgari, H., Ghorbanian, G. & Morshedi, J. (2020). The effect of climate change on rainfed wheat crop calendar (Chamran cultivar) Dezful case study (Article type: Research). *Geography*, 18 (65), 6-18. (in persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1399.18.2.1.8>
- 12) Asadi, M. & Karami, M. (2022). Modeling of relative humidity trends in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8 (1), 1035-1045. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01093-9>
- 13) Asghari, M., Ghalhari, G. F., Ghanadzadeh, M., Moradzadeh, R., Tajik, R., Samadi, S. & Heidari, H. (2023). Modelling of thermal discomfort based representative concentration pathways (RCP) scenarios in coming decades using temperature-humidity index (THI) and effective temperature (ET): a case study in a semi-arid climate of Iran. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01335-y>

- 14) Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Hashemy Shahdany, S. M., Moridi, A., Neshat, A. & Maghsoudi, R. (2024). Projections of meteorological drought severity-duration variations based on CMIP6. *Scientific Reports*, 14 (1), 5027. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55340-4x>
- 15) Ben-Salha, O., Zmami, M., Waked, S. S., Raggad, B., Najjar, F. & Alenazi, Y. M. (2025). Assessing the Impacts of Transition and Physical Climate Risks on Industrial Metal Markets: Evidence from the Novel Multivariate Quantile-on-Quantile Regression. *Atmosphere*, 16 (2), 233. <https://doi.org/10.3390/atmos16020233>
- 16) Bhati, N. & Sheth, A. (2026). Occupational heat stress and adaptation among outdoor workers: a narrative review of global evidence and policy responses. *International Journal of Biometeorology*, 70 (1), 19. <https://doi.org/10.1007/s00484-025-03101-4>
- 17) Çağlak, S. & Türkeş, M. (2023). Spatial Distribution and Future Projections of Thermal Comfort Conditions during the Hot Period of the Year in Diyarbakır City, Southeastern Turkey. *Sustainability*, 15 (13), 10473. <https://doi.org/10.3390/su151310473>
- 18) Calhoun, Z. D., Willard, F., Ge, C., Rodriguez, C., Bergin, M. & Carlson, D. (2024). Estimating the effects of vegetation and increased albedo on the urban heat island effect with spatial causal inference. *Scientific Reports*, 14 (1), 540. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50981-w>
- 19) Duan, Q., McGrory, C. A., Brown, G., Mengersen, K. & Wang, Y. G. (2022). Spatio-temporal quantile regression analysis revealing more nuanced patterns of climate change: A study of long-term daily temperature in Australia. *Plos one*, 17 (8), e0271457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271457>
- 20) Eludoyin, O. M., Adelekan, I. O., Webster, R. & Eludoyin, A. O. (2013). Air temperature, relative humidity, climate regionalization and thermal comfort of Nigeria. *International Journal of Climatology*, 34 (6), 2000-2018. <https://doi.org/10.1002/joc.3817>
- 21) Eskandari Damane, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarnivand, H. & Barati, A. A. (2020). Simulation and forecasting of climatic components of temperature and precipitation in arid regions (Case study: Minab plain). *Geography*, 18 (66), 110-128. (in persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1399.18.3.7.6>
- 22) Fotso-Nguemo, T. C., Vondou, D. A., Diallo, I., Diedhiou, A., Weber, T., Tanessong, R. S. & Yepdo, Z. D. (2022). Potential impact of 1.5, 2 and 3 C global warming levels on heat and discomfort indices changes over Central Africa. *Science of the Total Environment*, 804, 150099.
- 23) Gagnon, D., Schlader, Z. J. & Jay, O. (2026). The physiology behind the epidemiology of heat-related health impacts. *Physiology*, 41 (1), 30-42. <https://doi.org/10.1152/physiol.00012.2025>
- 24) Gu, Y. & You, X. Y. (2022). A spatial quantile regression model for driving mechanism of urban heat island by considering the spatial dependence and heterogeneity: An example of Beijing, China. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103692. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103692>
- 25) Hajifathali, M., faizi, M. & dehaghan, A. (2022). The Relationship between Air Temperature, mean Radiant Temperature and Albedo in the Reduction of Thermal Island in Cities. *Geography*, 19 (71), 173-191. (in persian) <https://dor.isc.ac/dor/http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1400.19.71.9.6>
- 26) Hedjazizadeh, Z., Karbalaee, A. & Kazemiazarr, M. (2025). Investigating the Impact of Climate Change on Extreme Precipitation Events in East Azerbaijan Province. *Geography*, 22(83), 1-20. (in persian) <https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2048574.1363>
- 27) Hejazizadeh, Z. & Karbalaie, A. (2023). Thermal comfort in Iran. *Geography*, 13 (46), 21-39. (in persian)
- 28) Helali, J., Oskouei, E. A., Hosseini, S. A., Saeidi, V. & Modirian, R. (2022). Projection of changes in late spring frost based on CMIP6 models and SSP scenarios over cold regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149 (3), 1405-1418. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04124-2>
- 29) Hu, B., Cutler, M. E. & Morel, A. C. (2026). Spatiotemporal dynamics of heat stress and cold stress on UK rapeseed cropping over 1961–2020. *Scientific Reports*, 16, 12263. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-41957-7>
- 30) Huang, L., Lee, S. S. & Timmermann, A. (2021). Caspian Sea and Black Sea Response to Greenhouse Warming in a High-Resolution Global Climate Model. *Geophysical Research Letters*, 48 (4), e2020GL090270. <https://doi.org/10.1029/2020GL090270>
- 31) Isinkaralar, O. (2023). Bioclimatic comfort in urban planning and modeling spatial change during 2020–2100 according to climate change scenarios in Kocaeli, Türkiye. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20 (7), 7775-7786. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04992-9>
- 32) Isinkaralar, O. (2024). Discovery of spatial climate parameters and bioclimatic comfort change simulation in Türkiye under socioeconomic pathway scenarios: A basin-scale case study for urban environments. *Natural Hazards*, 120 (2), 1809-1819. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06237-x>

- 33) Jia, Y. & Jeong, J. H. (2020). Deep learning for quantile regression under right censoring: DeepQuantreg. arXiv preprint arXiv:2007.07056.
- 34) Khazaei Faizabad, E., Pudineh, M. R. & Hamidianpour, M. (2020). Investigating the effect of climate change on Caravander river runoff. *Geography*, 17 (63), 161-178. (in persian)
- 35) Koenker, R. & Bassett, G. (1978). Regression quantiles. *Econometrica*, 46, 33-50.
- 36) Koenker, R. (2005). *Quantile regression*. first ed, New York, Cambridge University Press, 1-25.
- 37) Lavrov, A. S. & Sterin, A. M. (2024). Detailing Climatic Trends of Temperature and Precipitation in the Territory of the Russian Federation Using Quantile Regression and Clustering. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 60 (Suppl 1), S30-S45. <https://doi.org/10.1134/S0001433824700543>
- 38) Mazidi, A., Omidvar, K., Malek Ahmadi, A. & Hosseini, S. S. (2021). Evaluation of bioclimatic indicators affecting human comfort (Case study: Urmia). *Geography and Human Relationships*, 4 (2), 155-175. <https://doi.org/10.22034/gahr.2021.286618.1560>
- 39) 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), 1-32. (in persian) <https://doi.org/10.22111/gaij.2025.50467.3247>
- 40) Mohammadi, B., Barnameh, S. & Matzarakis, A. (2021). Temporal and spatial analysis of thermal stress and its trend in Iran. *Meteorological Applications*, 28 (1), e1977. <https://doi.org/10.1002/met.1977>
- 41) Nazari, M., Mosaedi, A. & Ghabaei Sough, M. (2026). Detecting climate changes during the past half century in some number of synoptic stations in Iran. *Nivar*, 50 (132-133), 153-175. (in persian) <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.529236.1339>
- 42) Nazemosadat, M. J., Heidari, A. & Mehravar, S. (2022). Assessing Climate Change in the Middle East from the Perspective changes in Air Temperature, Relative Humidity and Vector Wind: Land, Sea and atmosphere Interactions. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1330480/v1>
- 43) Over, T., Marti, M., Ortiz, J. & Podzorski, H. (2025). The joint effect of changes in urbanization and climate on trends in floods: A comparison of panel and single-station quantile regression approaches. *Journal of Hydrology*, 648, 132281. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132281>
- 44) Ramezani, G. B. (2010). A Survey on Planning Human Bioclimatic Comfort for Ecotourism (Case Study: Gilan, Iran-South West of Caspian Sea). *Iranian Journal of Tourism & Hospitality Islamic Azad University, Garmsar Branch*, 1 (1), 27-36. <https://sid.ir/paper/321482/en>
- 45) Roșu, C., Mihăilă, D. & Bistricean, P. I. (2022). Evaluation of the bioclimate of submontane resorts located between Sucevița and Slănic Moldova based on the THI index. *Geo Review*, 32 (1), 4. <http://dx.doi.org/10.4316/GEOREVIEW.2022.01.02>
- 46) Solaimani, K., Ahmadi, S. B. & Shokrian, F. (2024). The spatiotemporal trend changes of extreme temperature-humidity variables and their impact on climatic comfort changes. *Ecological Indicators*, 158, 111629. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2419746/v1>
- 47) Soltani, K., Masoompour Samakosh, J., Mojarrad, F., Hadi Pour, S. & Jalilian, A. (2024). Spatial Changes of Seasonal Reference Evapotranspiration in Iran Based on CMIP6 Models. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49 (4). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.364373.1007556>
- 48) Staffa, S. J., Kohane, D. S. & Zurakowski, D. (2019). Quantile regression and its applications: a primer for anesthesiologists. *Anesthesia & Analgesia*, 128 (4), 820-830. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000004017>
- 49) Toriki, F., Mojtabazadeh Khanghahi, H. & Rezaei, H. (2023). Identifying the temperature threshold limit and thermal islands of Kerman city with an emphasis on changes in the landscape of the land. *Geography*, 21 (79), 175-187. (in persian)
- 50) Ullah, S., Aldossary, A., Ullah, W. & Al-Ghamdi, S. G. (2024). Augmented human thermal discomfort in urban centers of the Arabian Peninsula. *Scientific Reports*, 14 (1), 3974. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54766-7>
- 51) Zabihi, O. & Ahmadi, A. (2024). Multi-criteria evaluation of CMIP6 precipitation and temperature simulations over Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101707. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101707>
- 52) Zare, M., Bejestan, M. S., Adib, A. & Beygipoor, G. (2022). Analysis of Future Precipitation and Temperature Change and Its Implication on Doroodzan Dam, Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00903-z>

- 53) Zhang, J., You, Q., Ren, G., Ullah, S., Normatov, I. & Chen, D. (2023). Inequality of global thermal comfort conditions changes in a warmer world. *Earth's Future*, 11 (2), e2022EF003109. <https://doi.org/10.1029/2022EF003109>
- 54) Zhao, Q., Lian, Z. & Lai, D. (2021). Thermal comfort models and their developments: A review. *Energy and Built Environment*, 2 (1), 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.05.007>
- 55) Zhu, L., Fang, W., Rahman, S. U. & Khan, A. I. (2023). How solar-based renewable energy contributes to CO2 emissions abatement? Sustainable environment policy implications for solar industry. *Energy & Environment*, 34 (2), 359-378. <https://doi.org/10.1177/0958305X211061886>